

UNIEVANGÉLICA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

CLÁUDIA LAVÍNIA SOUZA ALENCAR

**ESTUDO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO DIRECIONADO À
CONSTRUÇÃO DA PCH TAMBORIL LOCALIZADA EM
CRISTALINA-GO**

ANÁPOLIS / GO

2020

CLÁUDIA LAVÍNIA SOUZA ALENCAR

**ESTUDO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO DIRECIONADO À
CONSTRUÇÃO DA PCH TAMBORIL LOCALIZADA EM
CRISTALINA-GO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

ORIENTADORA: VANESSA HONORATO DOMINGOS

ANÁPOLIS / GO: 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

ALENCAR, CLÁUDIA LAVÍNIA SOUZA.

Estudo Geológico e Geotécnico Direcionado à Construção da PCH Tamboril Localizada em Cristalina – GO.

66P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2020).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

1. Geologia

2. Pequenas Centrais Hidrelétricas

3. Geotecnia

4. Energia Elétrica

I. ENC/UNI

II. Bacharel

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Alencar, Cláudia Lavínia. Estudo Geológico e Geotécnico Direcionado à Construção da PCH Tamboril Localizada em Cristalina – GO. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA, Anápolis, GO, 66p. 2020.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Cláudia Lavínia Souza Alencar.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Estudo Geológico e Geotécnico Direcionado à Construção da PCH Tamboril Localizada em Cristalina – GO.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2020

É concedida à UniEVANGÉLICA a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Cláudia Lavínia Souza Alencar
E-mail: laviniacaudia99@gmail.com

CLÁUDIA LAVÍNIA SOUZA ALENCAR

**ESTUDO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO DIRECIONADO À
CONSTRUÇÃO DA PCH TAMBORIL LOCALIZADA EM
CRISTALINA-GO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL**

APROVADO POR:

**VANESSA HONORATO DOMINGOS, Mestra (UniEVANGÉLICA)
(ORIENTADORA)**

**EDUARDO MARTINS TOLEDO, Mestre (UniEVANGÉLICA)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**PAULO ALEXANDRE DE OLIVEIRA, Mestre (UniEVANGÉLICA)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: ANÁPOLIS/GO, 04 de DEZEMBRO de 2020.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente presto meus agradecimentos à Deus, sem Ele não somente a realização deste sonho, mas nada seria possível. Agradeço por ter me agraciado com fé, e esperança para não ser abalada e nem desistir mesmo com todos os obstáculos que no caminho foram colocados.

Agradeço de coração aos meus pais, principais responsáveis pelo mérito de onde consegui chegar, agradeço por terem feito o possível e o impossível para que hoje me tornasse quem sou e por terem me educado com essa sede de não desistir. Agradeço meus avós que estiveram ao meu lado em oração e em pensamento, essa vitória também devo a vocês. Agradeço aos meus irmãos, que somam papel de grande importância em minha vida, em especial a minha irmã Larissa, que tanto me ajudou nessa pesquisa.

Agradeço a equipe da PCH Tamboril, que não mediram esforços para que todas as minhas dúvidas fossem sanadas e minha pesquisa concluída. Agradeço a GeoNorte, em especial ao meu padrinho Cleberson, que sempre esteve antenado ao meu tema e me orientando. Agradeço também a minha orientadora Vanessa, que esteve comigo nesta batalha, me orientando, me acompanhando e me guiando.

Presto aqui o meu profundo agradecimento a toda a minha família, minha maior fonte de inspiração, obrigada por mesmo sem imaginarem me ajudaram tanto. Agradeço aos meus amigos, que são mais chegados que irmãos, por terem me incentivado e até mesmo aprofundado comigo nesta pesquisa. Agradeço aos meus colegas de faculdade que no decorrer desses 5 anos foram peças chaves e fizeram a longa caminhada ser menos árdua, desejo sucesso a vocês. À todos os profissionais da educação, que caminharam comigo desde 2003, minha profunda gratidão.

Não poderia finalizar sem mencionar a memória de meus avós: Maria Camilo, Otaviano Pereira e Basílio Marques, e das minhas pequenas meninas: Ana Beatriz e Maria Vitória, sei que almejávamos viver esse momento juntos, muitas vezes quando eu pensei em desistir olhando pro céu eu sabia que vocês estavam comigo. Enfim, obrigada.

Cláudia Lavínia Souza Alencar

RESUMO

Atualmente, barragens têm sido um assunto de grande pauta no Brasil. Após a ruptura da Barragem de Mariana, no ano de 2015 e a Barragem do Córrego do Feijão, em 2019 as barragens foram submetidas a fiscalizações mais severas, bem como estas que poderiam ter evitado ambos os acidentes. A construção de uma barragem exige mão de obra qualificada, possuindo como desvantagem um grande impacto ambiental, sem mencionar o setor financeiro. Na busca por um empreendimento que atendesse as necessidades, porém trouxesse um menor custo ambiental e financeiro, as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) vêm ganhando lugar no mercado, com sua produção de energia em menor escala, logo, essa conta com um menor custo financeiro além de proporcionar um impacto ambiental menos significativo se comparado a uma Usina Hidrelétrica. Portanto, esta pesquisa visou apresentar as vantagens e desvantagens de construir uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH), seus principais elementos construtivos, bem como o avanço da tecnologia que colabora com o monitoramento destas, evitando danos como prováveis recalques e rupturas que podem ser previstos com antecedência. Além dos resultados obtidos através de pesquisas em campo, como as leituras dos piezômetros e as medidas dos elementos construtivos.

PALAVRAS-CHAVE: Barragens. Impacto ambiental. Pequenas Centrais Hidrelétricas. Monitoramento.

ABSTRACT

Currently, dams have been a big subject in Brazil. After the rupture of the Mariana Dam, in 2015 and the Córrego do Feijão Dam, in 2019 the dams were subjected to more severe inspections, as well as these that could have prevented both accidents.

The construction of a dam requires qualified labor, with a major environmental impact as a disadvantage, not to mention the financial sector. In the search for a project that would meet the needs, but bring a lower environmental and financial cost, Small Hydroelectric Plants (SHPs) have been gaining market share, with their production of energy on a smaller scale, soon, it has a lower financial cost in addition to providing a less significant environmental impact compared to a Hydroelectric Plant.

Therefore, this research aimed to present the advantages and disadvantages of building a Small Hydroelectric Power Plant (SHP), its main constructive elements, as well as the advancement of technology that collaborates with the monitoring of these, avoiding damages such as probable settlements and ruptures that can be predicted with advance. In addition to the results obtained through field research, such as readings from piezometers and measurements of construction elements.

KEYWORDS:

Dams. Environmental impacts. Small Hydroelectric Plants. Monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais Elementos de uma Barragem de Terra.....	20
Figura 2 - Crista da Barragem de Ilha Solteira/ CESP	21
Figura 3 - Borda Livre de uma Barragem.....	22
Figura 4 - Seção de uma barragem sem filtro e com filtro	23
Figura 5 - Filtro Sanduíche.....	23
Figura 6 - Talude de Montante protegido por <i>rip rap</i>	25
Figura 7 - Proteção com grama do Talude de Jusante	26
Figura 8 - Abertura do <i>Cut Off</i>	27
Figura 9 - Vertedouro da Usina Hidrelétrica de Tucuruí.....	30
Figura 10 - Execução de Piezômetro <i>Stand Pipe</i>	32
Figura 11 - Esquema de Piezômetro <i>Stand Pipe</i>	33
Figura 12 - Piezômetro Pneumático	34
Figura 13 - Esquema de Piezômetro Pneumático.....	35
Figura 14 - Piezômetro Corda Vibrante	36
Figura 15 - Esquema Piezômetro de Corda Vibrante	37
Figura 16 - Circuito Eletrônico com Sistema Varistor	38
Figura 17 - Piezômetro Elétrico.....	38
Figura 18 - Piezômetro Hidráulico	39
Figura 19 - Esquema de instalação de Piezômetro Hidráulico	40
Figura 20 – Localização do Rio São Bartolomeu.....	41
Figura 21 – Local onde o rio São Bartolomeu desemboca no rio Corumbá	42
Figura 22 – Imagem Satélite da Localização da PCH Tamboril	42
Figura 23 – Localização da Montante e Jusante da PCH Tamboril	43
Figura 24 – Mapa Geológico da região	44
Figura 25 – Planta de Locação das Sondagens – Área de Empréstimo.....	45
Figura 26 – Planta de Locação das Sondagens – Eixo da Barragem.....	46
Figura 27 – Testemunhos de Sondagem Mista PCH Tamboril – SM-302 J	48
Figura 28 – Eixo da Barragem com Poços de Inspeção demarcados	49
Figura 29 – Localização das SM, SP e SR no Eixo da Barragem	50
Figura 30 – Relação NA vs. Profundidade do furo	51
Figura 31 – SM e SR no Eixo da Barragem	51
Figura 32 – Construção da Crista	54

Figura 33 – Planta da Barragem	54
Figura 34 – Planta da Barragem ilustrando o Filtro	55
Figura 35 – <i>Rip Rap</i>	55
Figura 36 – Sistema Vegetal de Proteção do Talude de Jusante	56
Figura 37 – <i>Cut - Off</i>	56
Figura 38 – Piezômetro de Corda Vibrante: GK 404 Geokon	57
Figura 39 – Descida do instrumento.....	58
Figura 40 – Instalação do Piezômetro de Corda Vibrante.....	59
Figura 41 - Monitoramento Piezômetro de Corda Vibrante.....	59
Figura 42 – Croqui Piezômetro <i>Standpipe</i>	60
Figura 43 – Monitoramento Piezômetro <i>Standpipe</i>	61
Figura 44 – Leitura do Nível de Água.....	61

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 – Quadro de Materiais	53
--------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Borda livre de algumas barragens brasileiras	21
Tabela 2 - Taludes Preliminares Para Diversos Tipos de Solo	24
Tabela 3 – Especificação dos Furos de Sondagem.....	46
Tabela 4 – Furo SM-302 J profundidade de 0,00 a 30,00 metros.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT -	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL -	Agência Nacional de Energia Elétrica
BIG -	Banco de Informações de Geração
CAP -	Cheia Afluente de Projeto
DG -	Decigrama
DNAEE -	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
DRS -	Despacho de Registro da Adequabilidade do Sumário Executivo
HM -	Hectômetro
KW -	Kilowatts
MW -	Megawatts
NA -	Nível de Água
PCH -	Pequena Central Hidrelétrica
PI -	Poços de Inspeção
RAS -	Relatório Ambiental Simplificado
RQD -	<i>Rock Quality Designation</i>
SBGER -	São Bartolomeu Geradora de Energia Renovável
SM -	Sondagem Mista
SNISB -	Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens
SP -	Sondagem a Percussão
SPT -	<i>Standard Penetration Test</i>
SR -	Sondagem Rotativa
ST -	Sondagem a Trado
UHE -	Usina Hidrelétrica
UTM -	<i>Universal Transversa de Mercator</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 Objetivo geral	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 METODOLOGIA	15
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2 PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS (PCH)	17
2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS PCH'S	17
2.2 DEFINIÇÃO	18
2.3 IMPACTOS POSITIVOS E IMPACTOS NEGATIVOS DAS PCH'S	19
2.4 BARRAGENS DE TERRA	19
2.4.1 Elementos Constituintes de uma Barragem de Terra.....	20
2.4.1.1 Crista.....	20
2.4.1.2 Borda Livre.....	21
2.4.1.3 Dreno Vertical e Inclinado.....	22
2.4.1.4 Dreno Horizontal ou Tapete Drenante.....	23
2.4.1.5 Taludes.....	24
2.4.1.6 <i>Cut off</i> ou Cortinas de Vedação	26
2.4.2 Fundações.....	28
2.4.3 Vertedores	29
3 PIEZÔMETRO	31
3.1 PIEZÔMETRO DE TUBO ABERTO OU <i>STANDPIPE</i>	31
3.1.1 Vantagens e Desvantagens do Piezômetro de tubo aberto	32
3.2 PIEZÔMETRO PNEUMÁTICO	33
3.2.1 Vantagens e Desvantagens do Piezômetro Pneumático	34
3.3 PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE.....	35
3.3.1 Vantagens e Limitações do Piezômetro de Corda Vibrante.....	37
3.4 PIEZÔMETRO ELÉTRICO	37
3.4.1 Vantagens e Limitações do Piezômetro Elétrico	38
3.5 PIEZÔMETRO HIDRÁULICO	39

3.5.1	Vantagens e Limitações do Piezômetro Hidráulico.....	40
4	PCH TAMBORIL.....	41
4.1	LOCALIZAÇÃO	41
4.2	GEOLOGIA LOCAL.....	43
4.3	ESPECIFICAÇÕES DAS SONDAGENS.....	45
4.4	DESCRIÇÃO DA BARRAGEM.....	52
4.5	ELEMENTOS CONSTITUINTES DA BARRAGEM	52
4.6	INSTRUMENTAÇÃO DA BARRAGEM	57
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Recentemente nos noticiários ouvi-se muito sobre barragens, isto devido um dos maiores acidentes entre mineradoras do Brasil, a ruptura da Barragem Córrego do Feijão, em Brumadinho. Foi considerando ainda, um dos maiores desastres no contexto ambiental tendo cerca de 13 milhões de m³ de rejeitos da mineração lançados no meio ambiente contendo diversos metais pesados e substâncias químicas decorrentes do processo de beneficiamento. Foram registradas 252 mortes e 18 desaparecidos, e graves impactos ambientais gerados devido a quantidade de rejeitos dispostos no leito do rio Paraopeba e região (G1, 2019).

As barragens são conceituadas como estruturas designadas para a acumulação de água, ou disposição permanente ou temporária de rejeitos, ou para o acúmulo de resíduos (SANTOS, 2019). Essa estrutura apresenta várias finalidades, como: gerar energia, abastecimento de cidades, lazer, piscicultura, irrigação, armazenamento de rejeitos de mineração, além de poder controlar as cheias

Atualmente, no Brasil, existem 19.220 barragens registradas no Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens (SNISB, 2020). Através desse sistema pode-se classificar as barragens pelo seu Dano Potencial Associado, ou seja, os prejuízos que podem ocorrer com a ruptura da barragem.

A construção de uma barragem impulsiona o desenvolvimento local, por gerar empregos, renda e receitas municipais, proporcionando uma estabilidade entre desenvolvimento econômico sem desprezar os direitos sociais e ambientais. Contudo, são associadas a custos ambientais e sociais, estes ligados a desmatamento e crescimento urbano desordenado.

No ranking das 10 maiores hidrelétricas do mundo, o Brasil se encontra nas primeiras colocações com a Usina de Itaipu (14.000 mW) e Belo Monte (11.233 mW). No quesito setor elétrico, o Brasil tem instalada uma capacidade de geração de energia elétrica de cerca de 120.000 mW, tendo um percentual de 70% dessa energia provinda de fonte hidráulica (ESTADÃO, 2012).

As Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) foram criadas para facilitar o abastecimento de cidades onde não é possível a construção de grandes usinas. Desde o final do século XX, o Brasil tem passado por inúmeras mudanças, que afetaram também o setor elétrico, isto foi um fator importante para que se iniciasse a construção das PCHs (FURCHI, 2005).

Tendo em vista o crescimento das PCHs, Balarin e seus Colaboradores (2004) afirmam que cada vez o aproveitamento da energia dessas Pequenas Centrais Hidrelétricas têm sido uma

alternativa mais executável, não somente pelo seu custo ser menor, já que as grandes hidrelétricas exigem elevados recursos econômicos, mas também porque a capacidade potencial de geração de energia em centrais de pequeno porte são altíssimas, e ainda pouco utilizadas.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) as PCHs têm um aproveitamento com potência instalada entre 1 e 30 kW e a área inundada deve ser menor que 3 km² (TELES & CUSTÓDIO, 2014). A ANEEL (2014) ainda afirma que o Brasil possui 459 PCHs, que somadas garantem uma potência de 4.525.598 kW ao país, representando assim 3,64% da energia do Brasil.

A instrumentação de barragens é uma forma de avaliar o desempenho da estrutura através de mecanismos (THÁ, 2007). No Brasil, ela ganhou impulso na década de 50, iniciando assim em 1970 a criação uma grande diversidade de instrumentos para a auscultação de barragens no País, dentre eles os medidores de nível de água como: piezômetros elétricos, piezômetros hidráulicos e pneumáticos com os dados obtidos através destes, faz-se possível o cálculo dos recalques (SILVEIRA, 2006).

Esses medidores são utilizados para monitoramento das barragens, podendo fornecer a carga de pressão no ponto em que foi instalado. Atualmente, são muito utilizados e de extrema importância, pois os piezômetros podem prever problemas: recalques, redução do fator de segurança dos taludes, e até mesmo rupturas como o caso de Brumadinho, a tempo de resolvê-los sem que gere excesso de gastos planejados ou acidentes.

1.1 JUSTIFICATIVA

Na atualidade as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) vêm ganhando grande lugar no Brasil, devido ao seu custo ser inferior das grandes hidrelétricas e sua capacidade energética ser de valor considerável. No ano de 2015 ocorreu um dos primeiros casos de ruptura de barragem de grande escala no Brasil, a Barragem de Mariana, e em 2019 a história se repetiu, porém com a Barragem Córrego do Feijão, em Brumadinho. Ambas as rupturas tiveram grande impacto ambiental, socioeconômico e principalmente das vidas que foram tiradas. Tudo isso proveniente de falhas de segurança na operação das barragens, vistoria e seguimento de procedimentos de licenciamento, monitoramento e fiscalização.

Com isso, as obras de barragens passaram a ser tratadas com mais cautela, tendo a seu favor o crescimento da tecnologia que tem ajudado em vários âmbitos, como por exemplo os instrumentos que hoje podem ser utilizados para prever recalques, fatores de segurança dos taludes, excesso de umidade nas barragens o que pode diminuir a resistência e ocasionar na

ruptura, entre outros. Os Piezômetros se encaixam nestes elementos que colaboram para a prevenção de incidentes, podendo prever acontecimentos a tempo de serem resolvidos com antecedência.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Através desta pesquisa, o objetivo geral almejado é investigar e estudar mais profundamente a área de Pequenas Centrais Hidrelétricas, como ênfase na prospecção do subsolo e elementos da barragem tomando como objeto de estudo a PCH Tamboril em Cristalina, Goiás.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos propostos para essa pesquisa são:

- Realizar uma ampla pesquisa bibliográfica sobre os principais conceitos para a construção de uma barragem;
- Analisar os resultados dos laudos de sondagem obtidos na barragem da PCH Tamboril dando ênfase no tipo do solo e nas características gerais;
- Analisar os resultados obtidos na barragem da PCH Tamboril mediante ao uso de Piezômetros Casagrande e Corda Vibrante.

1.3 METODOLOGIA

Para que a presente pesquisa fosse desenvolvida fez-se necessário a utilização de fontes de pesquisas bibliográficas, artigos científicos, livros e grandes profissionais da área geotécnica que foram a base para os fundamentos teóricos e práticos. Se tratando de uma pesquisa qualitativa que visa descrever os elementos construtivos de uma barragem e como o avanço tecnológico tem sido um grande aliado no monitoramento das mesmas.

Outras metodologias utilizadas para a andamento da pesquisa foram as visitas a construção da Pequena Central Hidrelétrica Tamboril, localizada em Cristalina Goiás, além do acompanhamento de projetos feitos tanto para a construção quanto para a localização dos

piezômetros e a análise dos laudos de sondagens que foram dispostos para compreensão do subsolo e entendimento quanto a escolha do eixo da barragem.

Comparando-se o Referencial Bibliográfico a visita *in loco*, nota-se os elementos citados como teoria e os mesmos apresentados em prática na construção da PCH Tamboril, além da análise dos resultados obtidos através dos piezômetros *standpipe* e elétricos de corda vibrante instalados no empreendimento possibilitando assim compreender o comportamento do NA da barragem.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em cinco partes. Sendo elas divididas como primeiro capítulo apresentando a introdução, os objetivos do mesmo, a justificativa e a metodologia.

Em seguida, o segundo capítulo conta com pesquisas históricas apontando assim a evolução das PCHs, além de sua definição e seus principais pontos sendo eles positivos e negativos. Exibe também as barragens de terra e os principais elementos constituintes para a construção da mesma.

Prosseguindo assim, o capítulo três é a definição de Piezômetro, contado assim com os principais modelos existentes, suas vantagens e desvantagens, além da sua utilização no mercado.

No quarto capítulo, a abordagem de tema é o estudo de caso realizado na PCH Tamboril, apresentando sua localização, sua especificação técnica, especificação de sondagem e seus principais elementos. Caminhando assim para o quinto capítulo que são as considerações finais da pesquisa.

2 PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS (PCH)

2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS PCH'S

Em 1883, em Minas Gerais, fora construída a primeira barragem hidrelétrica do Brasil, esta provinda do rio Jequitinhonha é conhecida como Ribeirão do Inferno, teria por finalidade o fornecimento de energia para uma mina de extração de diamantes. Em 1889, a primeira usina de grande porte da América do Sul, a Marmelos, fluente do rio Paraibuna, em Minas Gerais (OLIVEIRA, 2018).

Entre o fim do século XIX e o início do século XX, aos poucos a eletricidade foi se desenvolvendo, principalmente as de origem hidráulica, espalhando-se pelo país através da implantação da iluminação pública, dos bondes, dos telefones e também dos usos domésticos. Em pouco tempo várias cidades já possuíam serviços de iluminação pública, como: Juiz de Fora, Porto Alegre, Curitiba, Belém, Maceió, São Paulo, Belo Horizonte e Manaus (TELLES, 1993).

Com o fim da Primeira Guerra Mundial, o Brasil fazia parte de um dos poucos grupos que possuía sistema de transmissão de 70.000 volts ou mais de energia (HUGHES, 1983). Nesse primeiro momento, esses grupos restritos só poderiam desenvolver usinas de geração hidrelétrica de pequeno porte, podendo abastecer apenas: indústrias, oficinas, minas ou cidades.

Em 1920, 37 anos após a construção da primeira barragem hidrelétrica no Brasil, o país já somava 343 hidrelétricas que representavam 88,4% da energia total gerada. Após uma década 1211 usinas já estavam em operação, gerando 630 MW (FAINZILBER, 1980).

No início do século XXI, com a vinda da crise elétrica de 2001, para facilitar o processo de aprovação das Pequenas Centrais Hidrelétricas, um modelo simplificado para a publicação dos pedidos de licenciamento ambiental foi criado, o RAS (Relatório Ambiental Simplificado). A instituição visava ampliar o setor elétrico brasileiro com urgência, trabalhando no combate da escassez de energia (LEÃO, 2008).

De acordo com o BIG (Banco de Informações de Geração) da ANEEL entre os anos de 2015 e 2019, 533 PCHs possuíam DRS (Despacho de Registro da Adequabilidade do Sumário Executivo) emitidos e Projetos Básicos aprovados em todo o território brasileiro, sendo provenientes de uma potência de 7863,99 MW, possuindo entre elas, 75 com outorgas emitidas, ou seja, 835,38 MW.

A Portaria DNAEE (Departamento Nacional De Águas E Energia Elétrica) 109 de 1982, restringia a capacidade instalada ao limite máximo de 10 MW. A regulamentação posterior Portaria DNAEE 136, de 1987 e a resolução ANEEL 394, de 1998, essas restrições

foram extintas e a capacidade instalada foi ampliada ao limite máximo de 30 MW e a uma área máxima de 3 Km² referente ao reservatório, sendo delimitada pela cota d'água associando assim à vazão de cheia com tempo de reincidência de 100 anos. Atualmente, a resolução que encontra-se em vigor é a ANEEL 652, de 2003, a mesma mantém a capacidade máxima instalada em 30 MW e ainda estende o reservatório que agora pode chegar a 13 Km² para fins exclusivos de serviços hidrelétricos (DNAEE, 1982; 1987; ANEEL, 1998;2003).

2.2 DEFINIÇÃO

Relacionando produção de energia a grandes barragens, concluímos que essas são construídas para a implantação de usinas hidrelétricas, as quais durante muito tempo estavam interligadas à imagem de fonte limpa e renovável de energia (ABASSI & ABASSI, 2011). Porém, essa imagem de sustentabilidade vem sendo questionada atualmente, devido aos grandes impactos ambientais e sociais que este empreendimento traz, o que vem contribuindo para a queda de apoio que estes recebiam (BERMANN, 2007).

Diante do cenário negativo das Grandes Centrais Hidrelétricas, as Pequenas Centrais Hidrelétricas vêm ganhando espaço no mercado, devido a ser uma alternativa mais sustentável e mais econômica. Países como: China, Índia, Canadá, Brasil e Reino Unido já vêm adotando esse sistema (ABASSI & ABASSI, 2011). As PCHs produzem energia elétrica com uma menor capacidade instalada em MW. Entretanto, mesmo sendo baixa a capacidade instalada, é imprescindível a construção de uma barragem, pois, a mesma direciona o fluxo d'água e em alguns casos cria um reservatório que fornece a vazão necessária para o funcionamento da central (ELETROBRÁS, 2000).

No Brasil, considera-se PCHs empreendimentos hidrelétricos com potência entre 1 e 30 MW, com áreas menores que 3 km² para reservatórios e que são atribuídos para à produção independente, autoprodução ou produção independente autônoma (ANEEL, 2003).

A construção de barragens causam modificações, essas acarretam na alteração de 3 ordens: (1) características físicas, químicas e geomorfológicas do rio; (2) na produtividade primária; (3) nas comunidades de consumidores (WCD, 2000). Em casos de pequenas barragens instaladas em uma mesma bacia hidrográfica para construção de várias PCHs, podem ocorrer impactos ambientais maiores que os decorrentes de grandes reservatórios das Usinas Hidrelétricas, devido a distribuição dentro da paisagem (AGUILAR, 2006).

2.3 IMPACTOS POSITIVOS E IMPACTOS NEGATIVOS DAS PCH'S

Os impactos positivos baseiam-se no aumento da oferta de emprego que os empreendimentos proporcionam, além do aumento da demanda de serviços que acabam girando a economia local. Porém, é válido considerar que esses benefícios são mais significativos no período de construção das PCHs e diminuem durante a fase de operação (AGUILAR, 2006). Ressalta-se também que as PCHs são adequadas para a substituição de pequenas termelétricas, colaborando assim com a redução significativa da emissão de gases do efeito estufa e combatendo o aquecimento global (MARROCOS NETO & MORET, 2008).

Quanto aos impactos negativos, considera-se o aumento da pressão sobre que é descarregado sobre o perfil de solo, a probabilidade de haver contaminação no lençol freático, o afeto a áreas designadas a agricultura e pecuária, limitação quanto as atividades pesqueiras e no dia a dia da população (AGUILAR, 2006).

2.4 BARRAGENS DE TERRA

Normalmente, as barragens de terra são mais comuns devido ao fácil acesso aos materiais utilizados. Porém, possui a desvantagem da percolação de água que ocorre no interior de seu maciço (ARTHUR, 1960).

Segundo Sowers (1962) consiste em um material de fácil manuseio e de baixo custo por m³, se comparado a outros tipos de materiais. Mas, o autor completa que apesar das vantagens, apresenta desvantagens no quesito ocasionalmente não se encontrar o material utilizado para o aterro nas proximidades do local da obra, o que aumentaria o custo e se comparada a barragem de concreto, a barragem de terra exige uma manutenção de maior proporção.

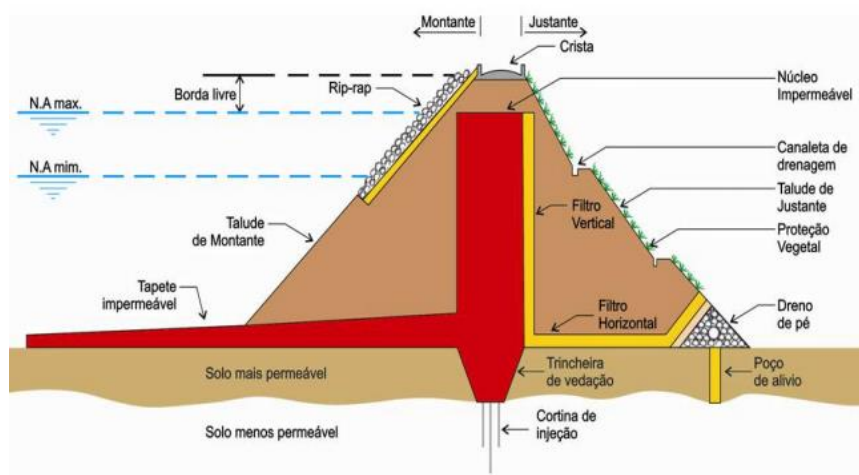
Para a construção de uma barragem de terra, é necessário que se tenha solos adequados, extraídos de jazidas ou obtidos através de escavações, em seguida são compactados por maquinários em camadas. Esses maquinários incluem os rolos de pé de carneiro, vibratórios, rolos pneumáticos, tratores esteira e até mesmo o peso próprio do veículo.

Para que a barragem não gere altos custos, recomenda-se que a mesma seja construída a menos de 2 km de uma jazida de material compatível para a execução do aterro (PASCHOALIN FILHO, 2002). Segundo Cruz (1996), para que não ocorra o fenômeno de empolamento, o volume da escavação deve ser o dobro do volume que será compactado.

2.4.1 Elementos Constituintes de uma Barragem de Terra

Para que seja realizado com êxito o projeto e a determinação da seção transversal de uma barragem, diversos fatores devem ser considerados. De maneira, que mesmo a metodologia sendo a mesma, as condições de construção serão alteradas de acordo com o local, que influenciará na seção de cada uma delas (GAIOTO, 1998). São apresentados na Figura 1 os principais elementos de uma barragem de terra.

Figura 1 - Principais Elementos de uma Barragem de Terra.



Fonte: CARVALHO, 2011.

Portanto, a escolha da configuração da seção transversal do barramento, se dá pela concordância dos elementos a seguir: crista, borda livre, dreno vertical e inclinado, dreno horizontal ou tapete drenante, taludes e *cut off* ou cortinas de vedação.

2.4.1.1 Crista

Considera-se crista, a superfície plana do topo de uma barragem. Sua largura se dá pela intensidade de tráfego sobre ela, tendo por largura mínima 3 metros, até mesmo para as pequenas barragens, devido a problemas de trafegabilidade e estabilidade. Em casos de construção de estradas sobre a crista, a dimensão mínima sempre deverá ser de 5 metros, como apresentado na Figura 2. Entretanto, na maioria das barragens, a crista vai de 6 a 12 metros de largura (CARVALHO, 2011).

A superfície da crista deve ter inclinação para a montante, de maneira que as águas pluviais sejam drenadas. Para evitar erosões e empoçamento de água, recomenda-se que haja

um sistema de drenagem na crista, permitindo assim o escoamento das águas de maneira segura (CARVALHO, 2011).

De acordo com Gaioto (2000), os recalques podem variar com o tipo de solo, os mesmos poderão ser na ordem de 0,2% a 0,4% da altura da barragem.

Figura 2 - Crista da Barragem de Ilha Solteira/ CESP.



Fonte: PASCHOALIN FILHO, 2002.

2.4.1.2 Borda Livre

O principal fator de ruptura das barragens, consiste no transbordamento. Segundo Cruz (1980) 40% dos acidentes é de responsabilidade deste fato. De tal maneira, que a atenção deve ser voltada para o dimensionamento de evacuadores de cheias. A Tabela 1 apresenta alguns exemplos de bordas livres de barragens brasileiras.

Tabela 1 - Borda livre de algumas barragens brasileiras.

Barragem	N.A máx Normal (m)	N.A máx Máximorum (m)	Cota da Crista (m)	Borda Livre Normal (m)	Borda Livre Mínima (m)
Água Verm.	383,3	384,6	387,3	4	2,7
Atibainha	787	789	791	4	2
Ilha Solteira	328	329	332	4	3
Itaipu	220	223	225	5	2
Marimbondo	446,3	447,4	450,5	4,2	3
Paraibuna	714	716,5	719	5	2,5
Tucuruí	72	74	78	6	4

Fonte: BORDEAUX, 1980.

Portanto, a Borda Livre é considerada a distância vertical que se dá entre a Crista da barragem e o Nível Máximo de Água do reservatório, como representado na Figura 3. Para que não haja galgamento das ondas que são formadas sobre a crista, é necessário que a borda livre tenha uma altura suficiente (GAIOTO, 1998).

Figura 3 - Borda Livre de uma Barragem.



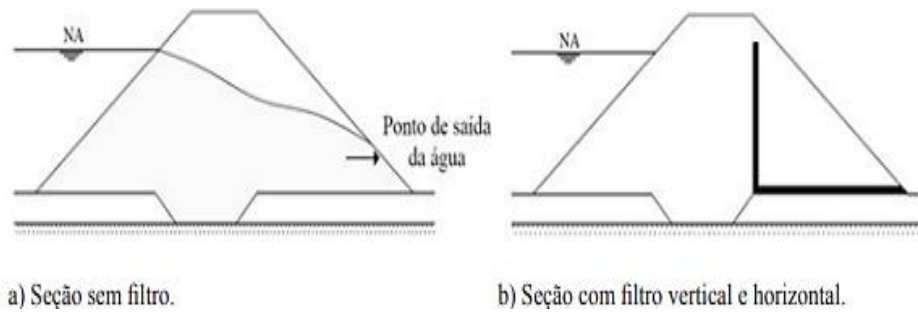
Fonte: CARVALHO, 2011.

2.4.1.3 Dreno Vertical e Inclinado

O Dreno Vertical e Inclinado ou Filtro Chaminé tem como finalidade dar vazão a água que percola pelo maciço da barragem, além de impedir a condução de materiais em face de fluxo de água no maciço terroso seguindo o sentido de montante para jusante, como representado na Figura 4 a diferença do caminho da água em uma seção com filtro e sem filtro (ROSA et al., 1983).

São compostos por materiais arenosos e devem estar sempre a mesma altura que o Nível de Água máximo, sendo indicados para barramentos que possuem a altura do maciço inferior a 30 metros (CRUZ, 1996). Ainda segundo Cruz (1996), o desenvolvimento do dreno vertical representou no Brasil um novo conceito de drenagem, utilizando o termo “Barragem Brasileira” para a seção homogênea com dreno vertical e horizontal.

Figura 4 - Seção de uma barragem sem filtro e com filtro.



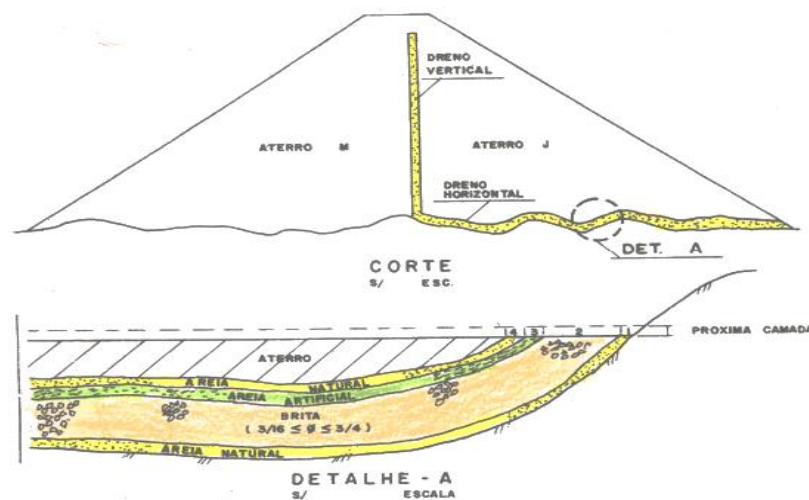
Fonte: MASSAD, 2003.

2.4.1.4 Dreno Horizontal ou Tapete Drenante

Esses elementos têm como função principal o controle do fluxo de água procedente da fundação, além de recolher e conduzir, as águas captadas pelo filtro vertical. Os drens horizontais necessitam estar sempre conectados ao dreno vertical, são contínuos e revestem toda a área de fundação à jusante (RUBERT, 2016).

Há casos específicos onde faz-se necessário o acréscimo de uma ou mais camadas de materiais que fazem a drenagem, casos esses que são conhecidos como filtro sanduíche, é utilizado quando há uma contribuição de água maior que o esperado por parte da fundação. Onde esse é composto por camadas externas de areia, onde há menor permeabilidade, e núcleo interno de pedrisco, onde há maior permeabilidade, a Figura 5 mostra a vista aérea de um dreno horizontal, do tipo Sanduíche (RUBERT, 2016).

Figura 5 - Filtro Sanduíche.



Fonte: ROSA, 1983.

2.4.1.5 Taludes

As regiões onde encontram-se as maiores solicitações de resistência ao cisalhamento estão nos taludes, sendo assim, a mesma exige a presença de materiais de maior resistência. Na Tabela 2 contém indicados taludes preliminares que aguardam ser confirmados pelas análises de estabilidade.

Tabela 2 - Taludes Preliminares Para Diversos Tipos de Solo.

Tipo de Material	Montante (H):(V)	Jusante (H):(V)
Solos Compactados	2,5:1,0	2,0:1,0
	3,0:1,0	2,5:1,0
Solos Compactados Argilosos	2,0:1,0	2,0:1,0
	3,0:1,0	2,5:1,0
Solos Compactados Siltosos	3,5:1,0	3,0:1,0
Enroncamentos	1,3:1,0	1,3:1,0
	1,6:1,0	1,6:1,0

Fonte: CRUZ, 1996.

Existem dois tipos de taludes, os Taludes de Montante e os Taludes de Jusante:

- Taludes de Montante: é a parte do maciço que terá contato direto com a água do reservatório o que exigirá um cuidado maior na fase de projeto e no cálculo de estabilidade, a partir deste a sua inclinação é definida (CARVALHO, 2011);
- Talude de Jusante: são conhecidos como talude “seco”, pois não possuem contato direto com a água do reservatório (CARVALHO, 2011).

Os valores referentes a inclinação dos taludes são utilizados para estimativas de custos, quando os dados geotécnicos ainda não foram disponibilizados para cálculo de estabilidade. Através do tipo de solo, diferentes autores sugerem a inclinação de 1:3 (vertical: horizontal) no anteprojeto do Talude de Montante, considerando que o maciço seja de uma pequena barragem

com solos de “boa” compactação e fundação “estável”. Para os Taludes de Jusante a inclinação considerada em um anteprojetado é de 1:2 (vertical: horizontal) (CARVALHO, 2011).

Para que não haja destruição da parte não submersa do Talude de Montante, devido ações das ondas que são formadas no reservatório e também das águas provenientes das chuvas vindas da crista, o talude necessita que haja uma proteção contra erosões, essa mesma é denominada de *Rip Rap* (CARVALHO, 2011).

O *Rip Rap* é a proteção feita no talude com rochas de tamanhos maiores, para que as ondas formadas no reservatório não consigam arrastá-las como mostra a Figura 6, além de rochas a proteção dos taludes também pode ser feita por solo-cimento (CRUZ, 1996). Para que não ocorram problemas inesperados, a proteção deve ser feita de maneira que cubra todo o trecho do talude, desde a crista, até uma cota um pouco abaixo do nível de operação do reservatório.

O efeito das ondas que são produzidas pelo reservatório devem ser considerados na escolha do material para proteção dos Taludes de Montante, sejam eles solo-cimento ou *Rip Rap*.

Segundo Cruz (1996) a altura da onda H depende da direção e da velocidade dos ventos dominantes, do *fetch* efetivo, da frequência e do período da onda. Sendo assim, os valores estimados são de responsabilidade da área hidrológica e devem ser fornecidas como dados de entrada do projeto.

Figura 6 - Talude de Montante protegido por *rip rap*.



Fonte: CARVALHO, 2011.

Ao percorrer a distância entre o topo e o pé do talude, as águas da chuva adquirem velocidades elevadas que podem causar erosões, por esse motivo os Taludes de Jusante devem

ser protegidos. O mais comum é a utilização de grama na proteção desses taludes, como apresentado na Figura 7. Juntamente com a proteção, é viável que sejam construídas canaletas de drenagem, para que a água seja coletada de maneira correta. O dimensionamento das canaletas, devem atender a vazão do máximo volume de água previsto para cada região de implantação da barragem (CARVALHO, 2011).

Em barragens de terra, os taludes são subdivididos em trechos com alturas inferiores a 10 metros, onde são intercalados bermas, com larguras de 3 a 4 metros. Esses bermas devem possuir declividade para a montante, com o intuito de não permitir que as águas da chuva que caem nelas atinjam o talude inferior (GAIOTO, 2000).

Figura 7 - Proteção com grama do Talude de Jusante.



Fonte: TERRAPLAN, 2011.

O plantio de árvores e arbustos devem ser evitados nos Taludes de Jusante, pois as raízes, caso a árvore morra podem apodrecer, e o buraco causado por elas pode resultar em erosões internas, além das raízes caminharem para o sistema de drenagem interna em busca de água, abrindo assim caminhos para a percolação (PASCHOALIN FILHO, 2002).

2.4.1.6 *Cut off* ou Cortinas de Vedação

Considerando que barragens de terra nunca estão apoiadas em um maciço totalmente vedado, sempre haverá um fluxo de água subterrâneo. No Sul do Brasil existem grandes extensões de áreas, em que os solos superficiais, até elevadas profundidades apresentam solo não saturados, que resultam a facilidade do fluxo de água devido ao valor de porosidade e coeficiente de permeabilidade. Nessas profundidades é comum que haja presença de buracos de animais, como tatus e formigas, gerando assim um ponto negativo, associando os buracos

com a alta porosidade, pois facilita a percolação de água na barragem podendo assim resultar na ruptura da mesma, devido a subpressão e a erosão interna causada na fundação (CARVALHO, 2011).

A Trincheira de Vedação, consiste em um tipo de Cortina de Vedação conhecida como *Cut Off*, é preenchida com material argiloso compactado e é a forma mais utilizada de interrupção do fluxo de água sob a fundação da barragem. Possui vantagens como a permissão de uma inspeção visual das paredes de escavação e do fundo da trincheira, através do controle tecnológico pode-se fazer o preenchimento e compactação da trincheira por materiais impermeáveis selecionados, pode ser executado com equipamentos convencionais de escavação e terraplanagem como apresentado na Figura 8, além de ser relativamente econômica principalmente quando há possibilidade de reaproveitamento do material retirado das trincheiras na construção do maciço da barragem (BORDEAUX, 1980).

A profundidade do *Cut Off* é definida através do subsolo local identificado por sondagens, e pela altura da lâmina de água do reservatório. O mínimo que a largura da base deve ter é a largura da lâmina do trator esteira, porém a escavação deve iniciar em uma largura maior, levando em consideração a inclinação do talude. Em casos de profundidades elevadas, um novo cálculo de estabilidade deve ser feito (CARVALHO, 2011).

Figura 8 - Abertura do *Cut Off*.



Fonte: TERRAPLAN, 2011.

Quando as barragens são zoneadas, preenche-se o *Cut Off* por aterro, devendo ser compactado da mesma maneira que o núcleo impermeável da barragem. Em casos de barragens homogêneas, o preenchimento de *Cut Off* é compactado da mesma forma que o maciço compactado da barragem (CARVALHO, 2011).

A principal desvantagem das Trincheiras é quando a execução deve ser feita em profundidades abaixo do lençol freático, nesses casos é necessário que faça o rebaixamento do lençol freático, resultando assim em maiores custos, devido à complexidade do projeto (BORDEAUX, 1980). As camadas aluvionares podem ser impermeabilizadas através de paredes diafragmas de concreto ou solo-cimento (PASCHOALIN FILHO, 2002).

2.4.2 Fundações

Tratando-se de barragens, a base onde são apoiadas todas as estruturas de concreto ou aterros compactados, é denominada fundação. Na construção de uma barragem a pesquisa geotécnica da fundação, é de total importância, pois, é através dela que se pode prever o comportamento da fundação diante das cargas da estrutura. A fundação deve ser estudada, pois, antes de decidir sobre a construção da barragem é necessário que conheça as características geológicas e geotécnicas do local onde será implantado a estrutura (OLIVEIRA, 2008).

É necessário o conhecimento sobre deslocamentos, para projetar uma barragem, que podem ser compatíveis com o comportamento da obra, o que pode ser uma condição de segurança tanto para os problemas de estabilidade da barragem, quanto para a prevenção de trincas, *pipping*, ruptura hidráulica, entre outros, que são deslocamentos verticais e horizontais (PASCHOALIN FILHO, 2002). Através de inclinômetros é possível observar os deslocamentos horizontais, com o intuito de prever deslocamentos cisalhantes que possam resultar em possíveis superfícies de ruptura (SILVEIRA, 1983).

É comum ocorrer em terrenos naturais deformações verticais, provenientes do carregamento imposto pela barragem no local em que o aterro está apoiado. Esta deformação é denominada, recalque, para combatê-la é necessário que seja retirada as camadas de solos de alta compressibilidade, totalmente ou parcialmente (PASCHOALIN FILHO, 2002). De acordo com Gaioto (2000), os recalques podem variar com o tipo de solo, os mesmos poderão ser na ordem de 0,2% a 0,4% da altura da barragem.

Para que se tenha um controle da estabilidade de uma fundação, é necessário que haja conhecimento em três propriedades: a resistência ao cisalhamento, a compressibilidade e a permeabilidade. É necessário que haja uma resistência adequada para assegurar-se quanto a estabilidade da barragem (OLIVEIRA, 2008).

Os solos em geral, são materiais que possuem boa resistência a compressão, entretanto, não resiste tão bem a tração e ao cisalhamento. Geralmente as rupturas ocorrem por

cisalhamento, ou seja, sempre que citado resistência do solo, será referente à resistência ao cisalhamento (OLIVEIRA, 2008).

A ação do peso da barragem, pode causar deformação e/ou adensamento do solo, a compressibilidade é a propriedade responsável por esses dois fatores. No entanto, a permeabilidade trata-se do caminho que a água faz entre os poros da fundação até chegar à jusante, podendo o trajeto ter sido de fácil ou difícil acesso. Ressaltando que a fundação pode ser composta por rocha fraturada, podendo assim a água percolar entre as fraturas (OLIVEIRA, 2008).

Devido a água do reservatório forçar a entrada de água na fundação, isso muitas vezes resulta na desestabilização da barragem, podendo os taludes de terra perderem a resistência. Há casos onde faz-se necessário a construção de Cortinas de Vedação (OLIVEIRA, 2008).

2.4.3 Vertedores

As barragens de terra não podem galgar, com isso é necessário que possuam um sistema de vertimento, projetado para que nos períodos de cheia possam ter uma vazão segura. O vertedouro tem a finalidade de absorver a vazão da Cheia Afluente de Projeto (CAP) com segurança, não podendo o nível do reservatório ultrapassar a borda livre, evitando assim o galgamento. Em casos onde o reservatório é pequeno relacionado ao volume de entrada da cheia, a descarga do extravasor será considerada igual a vazão de pico da cheia. Caso o reservatório seja grande, o cálculo deve considerar o enfraquecimento das cheias para assim ter o pico de descarga do extravasor (OLIVEIRA, 2008).

Segundo Oliveira (2008), se houver casa de força, durante a passagem afluente da cheia de projeto, ela deve ser desconsiderada em operação.

O dimensionamento dos vertedouros deve ser feito de maneira correta e a sua manutenção frequente, pois, o comprometimento da eficiência hidráulica pode resultar em riscos para a obra. Algumas barragens, possuem comportas nos seus vertedouros, são equipamentos eletromecânicos que exigem manutenção e testes funcionais. Principalmente próximo as cheias, as comportas devem ser verificadas de maneira geral e consertada qualquer irregularidade que possa comprometer seu perfeito funcionamento (OLIVEIRA, 2008).

A Figura 9, apresenta o Vertedouro da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, localizada no rio Tocantins, fornece energia para os estados do Pará, Maranhão e Tocantins, possui uma capacidade de vazão de 110 000 m³/s (CBIE, 2002).

Figura 9 - Vertedouro da Usina Hidrelétrica de Tucuruí.



Fonte: CBIE, 2002.

3 PIEZÔMETRO

Em meados de 1733, o fisiologista, químico e inventor inglês Stephen Hales após desenvolver um estudo na área da saúde criou o primeiro piezômetro, inicialmente com a finalidade de medir-se a pressão sanguínea de um cavalo. De modo que, com o passar do tempo esse foi sendo aperfeiçoado. Hoje inserido na construção civil, o mesmo tem como função determinar as pressões neutras em maciços de terra ou de rocha (SANTOS, 2019).

De acordo com o dicionário Dicio (2020) o Piezômetro é definido como: “Cada um dos dispositivos usados para medir a pressão dos fluídos ou a compressibilidade de substâncias sujeitas a pressões elevadas”, ou seja, tem como finalidade fornecer a carga de pressão no ponto em que foi instalado (THÁ, 2007), medindo assim a pressão da água em solos, rochas e estruturas de concreto.

O piezômetro tem como função principal fornecer dados quantitativos e significativos sobre a magnitude e a distribuição da pressão e a sua variação com o tempo, contribuindo para a avaliação do padrão de infiltração em zonas que possuem potencial para a instalação das tubulações.

Os piezômetros, também conhecidos como medidor de pressão poroso, nas barragens estão entre os instrumentos de maior importância, existindo vários modelos, tendo em vista o que se encaixe mais adequadamente em cada circunstância. Os principais tipos de piezômetros são: *Standpipe* ou Casagrande, Pneumático, Elétrico de Corda Vibrante, Elétrico de Resistência e Hidráulico.

3.1 PIEZÔMETRO DE TUBO ABERTO OU *STANDPIPE*

Os piezômetros de tubo aberto ou *Standpipe* também são conhecidos como Casagrande, foram desenvolvidos por ele durante a construção do aeroporto de Logan, em Boston (DUNNICLIFF, 1988). Tal instrumento na atualidade é o mais conhecido e o mais utilizado (MACHADO, 2007). Os mesmos, são equipamentos robustos e bastante confiáveis, para que se possa acompanhar a subpressão ou poropressão (pressão neutra), principalmente em barragens de terra. Destaca-se por ser um equipamento simples e de baixo custo, que gera bons resultados no quesito monitoramento e de ótimo desempenho a longo prazo, geralmente sua vida útil é compatível com a da barragem (MACHADO, 2007).

Quanto ao método construtivo pode ser comparado com o Medidor de nível d'água, porém apresenta diferenças como: o comprimento do trecho perfurado e complementação no

fundo do furo com material drenante ao longo da extensão. Na Figura 10, o piezômetro *Standpipe* já está instalado, logo, não se pode notar seus detalhes, o mesmo é confeccionado em obra através de um tubo perfurado com 4 linhas de furos no trecho do bulbo (que deve ser protegido por uma camada de BIDIM no trecho perfurado), e é preenchido com areia lavada e peneirada na região do bulbo, em seguida são instalados.

É permitido a instalação de dois ou mais piezômetros em um mesmo furo de sondagem, dependendo do diâmetro do furo. Quando isso ocorre, os piezômetros são fixados em alturas diferentes. (CRUZ, 2004).

Figura 10 - Execução de Piezômetro *Stand Pipe*.



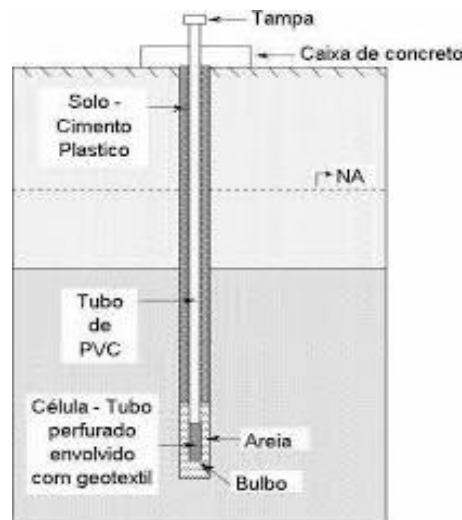
Fonte: WYDE, 2020.

3.1.1 Vantagens e Desvantagens do Piezômetro de tubo aberto

De acordo com Silveira (2006) as principais vantagens deste instrumento são: a confiabilidade, a durabilidade, como mencionado anteriormente, sua vida útil pode ser similar à da barragem, a sensibilidade, a possibilidade de verificação do seu desempenho por meio de ensaios e a estimativa do coeficiente de permeabilidade do solo. Ademais, este apresenta vantagens econômicas, por possuir baixo custo, além da praticabilidade na instalação.

Entretanto, Fonseca (2003) destaca como desvantagens de tal equipamento: a demora para obter-se resultados para materiais de baixa permeabilidade, a execução de compactação próximo a um piezômetro pode causar alteração nos resultados, não possibilita a medição de pressões neutras negativas, o acesso aos terminais de leitura são mais difíceis em relação a outros modelos.

Figura 11 - Esquema de Piezômetro Stand Pipe.



Fonte: FONSECA, 2003.

A Figura 11 ilustra um esquema de piezômetro *Standpipe*. É necessário que a extremidade do tubo seja envolta com material filtrante (areia grossa e brita), acima dessas camadas coloca-se areia fina. Para garantir-se a obtenção de bons resultados, a região onde o piezômetro será instalado, deve ser de bom isolamento. No nível da ponta porosa é o local onde o piezômetro mede a pressão hidrostática ou pressão neutra.

Para que o piezômetro exerça sua função hidráulicamente isolado (barreira vertical), o ponto de medição precisará ser coberto com calda de cimento, bentonita ou argila plástica até a boca do furo. Além disto, não é permitido que este ponto tenha contato com a pressão atmosférica ou com outra camada do solo que não seja a que as medições serão realizadas.

Em casos onde o Piezômetro marcar pressões elevadas na cota da boca do tubo, uma mangueira plástica transparente deverá ser inserida para que se prolongue a altura da boca. Se ocorrer do nível continuar elevando-se, a medição deve ser realizada através do manômetro (MACHADO, 2007).

3.2 PIEZÔMETRO PNEUMÁTICO

Sherar (1981) descreve uma das primeiras instalações de piezômetros pneumáticos, esta realizada na barragem de Briones, localizada na Califórnia, Estados Unidos, possuindo uma altura máxima de 88 metros, foi construída entre 1961 e 1964, onde os piezômetros aplicados foram: hidráulico de tubulação dupla e pneumáticos. O resultado foi muito satisfatório tanto nesta, como em aplicações posteriores. Segundo um relatório do proprietário

da barragem, emitido em 1980, relatava que após 18 anos de instalação todos os piezômetros pneumáticos permaneciam com funcionamento em perfeito estado, comparando ao piezômetro hidráulico, que não apresentou bom estado e encerrou seu funcionamento cerca de 10 a 12 anos após a aplicação (SILVEIRA, 2006).

Ao descrever os piezômetros pneumáticos Cruz (2004) afirma que os mesmos têm seu funcionamento baseado para o equilíbrio de pressões que atuam em um diafragma flexível, a Figura 12, exemplifica um Piezômetro Pneumático, onde de um lado atua-se a água da qual deseja-se medir a pressão, e do outro atua-se um gás, geralmente nitrogênio comprimido, sob uma pressão variável que é conhecida e controlada através de um manômetro situado em um painel de controle.

Figura 12 - Piezômetro Pneumático.



Fonte: LAN, 2020.

3.2.1 Vantagens e Desvantagens do Piezômetro Pneumático

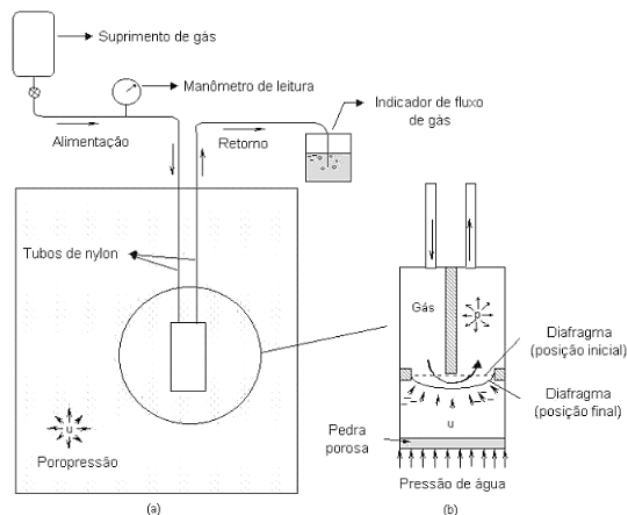
A vantagem que se destaca deste instrumento é que relacionando-o ao elétrico, este pode ser produzido em materiais plásticos, não corrosivos, o que garante a robustez e durabilidade. Cruz (2004) acrescenta vantagens como: a não interferência dos recalques sofridos pelos instrumentos sobre as medidas, resistente a descargas atmosféricas, não apresenta limitações no quesito de localização do instrumento, tempo de resposta consideravelmente pequeno.

Acrescenta ainda as desvantagens como a necessidade de recarregar as ampolas de gás comprimido em um certo intervalo de tempo e apresentar um percentual de confiabilidade menor no quesito de medição de pressões neutras negativas (CRUZ, 2004).

Na Figura 13, nota-se um esquema de Piezômetro Pneumático, figura essa que mostra a presença de dois tubos flexíveis que fazem a conexão pneumática entre o piezômetro e o painel de controle, esses são denominados de alimentação e retorno. Silveira (2003) resume a leitura da pressão da seguinte maneira: Coloca-se uma pressão crescente, através da tubulação de alimentação mediante isso a intensidade de pressão na tubulação de retorno é medida, momento este no qual a pressão se iguala a pressão do solo, ou seja, quando solicita-se uma leitura um indicador pneumático é conectado ao terminal ou diretamente na tubulação (MACHADO, 2007).

Quando a Pressão de retorno atinge valor igual a zero, obtém-se a possibilidade de determinação exata da pressão que a água exerce ao passar através da pedra porosa, em equilíbrio com a água já contida nos poros da rocha

Figura 13 - Esquema de Piezômetro Pneumático.



Fonte: FONSECA, 2003.

3.3 PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE

Os Piezômetros de Corda Vibrante, são instrumentos elétricos, cuja principal finalidade é a medição da pressão intersticial da transição da água que passa por uma pedra poroso para um diafragma interno, onde conta-se com um transdutor (sensor) mede a deflexão, oferecendo assim, precisão e confiabilidade em longo prazo, pois possui vida útil na faixa de 30 anos. Para que se possa fazer a escolha do modelo de piezômetros de corda vibrante que mais se encaixe em cada situação, primeiramente deve-se considerar qual a pressão que o sensor

deve medir quando for instalado, levando em consideração que quanto maior o alcance do transdutor, maior pode ser o erro sistemático nas leituras (SANTOS, 2019).

Segundo Cerqueira (2017) o Piezômetro *Standpipe* vem sendo substituído pelo Piezômetro de Corda Vibrante. Em aplicações geotécnicas é comum que os instrumentos estejam susceptível a umidade, e o Piezômetro de Corda Vibrante não é afetado por ela, pois é construído em um cilindro selado, cujo no interior encontra-se um transdutor de pressão (MACHADO, 2007).

É comum a sua utilização em auscultação de barragens de terra, por possuir uma boa precisão, contar com uma alta sensibilidade e por possibilitar a leitura a distância (SILVEIRA, 2006).

A Figura 14 trata-se de um Piezômetro de Corda Vibrante, para que hajam resultados mais eficazes e de maior confiabilidade neste aparelho, alguns cuidados são aconselhados, como: a blindagem dos cabos elétricos, observar de maneira sutil o aterramento dos cabos junto as centrais de leitura, instalação de aparelhos que possam proteger os equipamentos de descargas atmosféricas, campos eletromagnéticos, dentre outros. Muitas vezes essas medidas de cuidados não são tomadas devido o encarecimento significativo que as mesmas trazem a auscultação de barragens (AZEVEDO, 2019).

Os Piezômetros de Corda Vibrante podem ser efetuados de forma em que a perfuração seja preenchida com calda de cimento e bentonita com as leituras sendo realizadas através de leitores digitais. Em alguns terrenos se faz possível a utilização do dispositivo *push-in* que trata-se de um Piezômetro de Corda Vibrante que pode ser instalado no solo sem que haja perfuração com perfuratriz hidráulica (DAMASCO PENNA, 2020).

Figura 14 - Piezômetro Corda Vibrante.



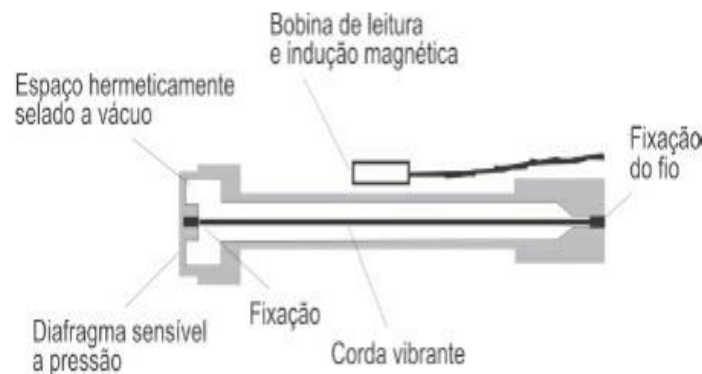
Fonte: LAN, 2020.

3.3.1 Vantagens e Limitações do Piezômetro de Corda Vibrante

A Figura 15 representa um esquema do Piezômetro de Corda Vibrante, o mesmo apresenta como vantagens principais a alta resolução e precisão dos resultados, os sinais podem ser transmitidos a longa distância, a acessibilidade para instalação e leitura (MACHADO, 2007) e devido ao volume de água necessário, para que as leituras sejam eficientes, ser reduzido, o mesmo apresenta respostas instantâneas (SANTOS, 2019).

Como limitação, o Piezômetro de Corda possui alto custo de aquisição e pode ser danificado por descargas elétricas, portanto faz-se necessário a blindagem eletromagnética do instrumento.

Figura 15 - Esquema Piezômetro de Corda Vibrante.



Fonte: SILVEIRA, 2006.

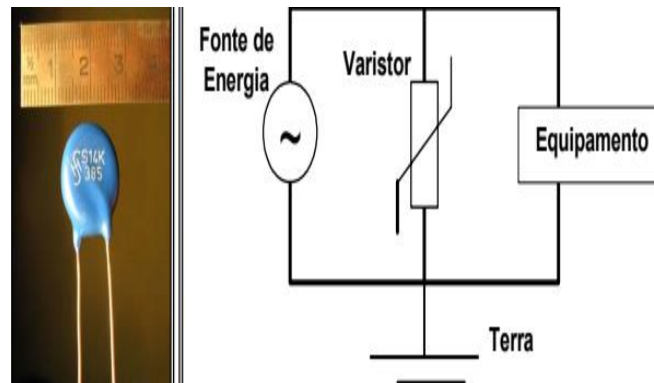
3.4 PIEZÔMETRO ELÉTRICO

Em aparelhos eletrônicos, a pressão da água costuma ser monitorada através de um transdutor elétrico. O Piezômetro Elétrico é conhecido por ser o instrumento que apresenta o menor tempo de resposta, isso é possível devido ao baixo volume de água que o maciço necessita fornecer para que o diafragma do transdutor desloque (CRUZ, 1996). Este Piezômetro é composto por um dispositivo cilíndrico metálico que possui pedra porosa e diafragma, instrumentado através de extensômetros elétricos de resistência (MACHADO, 2007).

Através do Piezômetro Elétrico pode-se realizar medidas dinâmicas de propressão com registro contínuo, recurso este de grande importância para instrumentação de barragens em regiões que a sismicidade é de relevância (MACHADO, 2007).

Como apresentado na Figura 16, este instrumento é um pouco mais delicado, o cuidado que este piezômetro exige é que sua carcaça deve ser aterrada e protegida contra descargas elétricas e o mesmo possui um dispositivo, denominado varistor. O varistor ou VDR (*voltage dependent resistor*) tem como principal finalidade limitar tensões, ou seja, impedir que descargas de pequena duração cheguem ao circuito (MACHADO, 2007).

Figura 16 - Circuito Eletrônico com Sistema Varistor.



Fonte: MACHADO, 2007.

A Figura 17, apresenta um Piezômetro Elétrico, mostrando claramente suas pontas, faz-se necessário a blindagem dos cabos e o aterramento, individualmente, para proteção. A leitura deve ser feita através de instrumentos digitais.

Figura 17 - Piezômetro Elétrico.



Fonte: COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO, 2007.

3.4.1 Vantagens e Limitações do Piezômetro Elétrico

Segundo Machado (2007), este instrumento possui alternativa de automação das leituras, o que possibilita o monitoramento remoto das medidas de pressão neutra negativa e possuem um bom desempenho inicial.

Devido as dificuldades de proteção da resistência elétrica, o Piezômetro Elétrico possui vida útil limitada.

3.5 PIEZÔMETRO HIDRÁULICO

Os Piezômetros Hidráulicos de Tubo duplo ou Tubo aberto, foram criados com intuito de serem instalados na fundação e no aterro de barragens de terra no período de obras. A barragem de Três Marias, da Cemig, construída entre 1957 e 1963 foi uma das primeiras barragens brasileiras de terra a utilizar os piezômetros hidráulicos. Esta com comprimento igual a 2700 metros e altura máxima de 65 metros, no período de construção teve um total de 104 piezômetros instalados, sendo 12 deles hidráulicos (SILVEIRA, 2006).

Associando este piezômetro ao Pneumático, concluímos que para o funcionamento o ar é substituído por óleo e não existe membrana diafragma. Sendo assim, há contato direto da água dos vazios do solo com a água do instrumento. A Figura 18, representa um Piezômetro Hidráulico, que é constituído por um sistema composto por um filtro poroso em conexão com dois tubos flexíveis que possuem um manômetro em uma das extremidades (MACHADO, 2007).

Foi projetado para ter vida útil de longa duração, usualmente utilizado para monitorar barragens em fase de construção. Obtém-se o nível piezométrico considerando o valor médio que os manômetros indicam, em casos onde os tubos flexíveis são saturados, os dois manômetros indicam o mesmo nível piezométrico. É necessário efetuar a troca de água nos tubos de leitura regularmente em um período inferior à 6 meses, em barragens em operação. (MACHADO, 2007).

Figura 18 - Piezômetro Hidráulico.



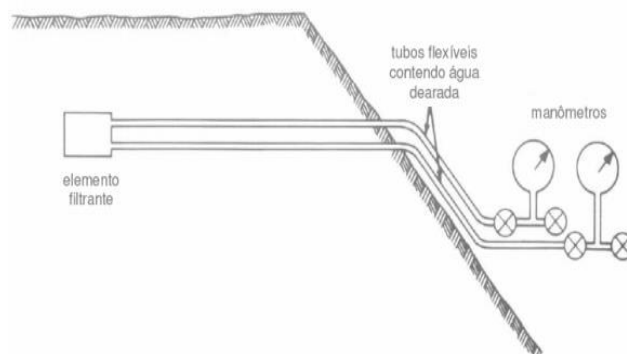
Fonte: GEOTECNIA E FUNDAÇÃO, LAN, 2020.

3.5.1 Vantagens e Limitações do Piezômetro Hidráulico

Segundo MACHADO (2007), as vantagens que mais se destacam no Piezômetro Hidráulico é a facilidade na instalação e nas técnicas de utilização, através dele é possível efetuar avaliação de poropressão negativa além do ensaio de permeabilidade, acessibilidade ao sensor, custo médio e longa vida útil, a Figura 19 representa uma breve ilustração de um esquema de instalação dos Piezômetros Hidráulicos.

Apresenta ainda limitações como em casos de instalação em solos de baixa permeabilidade, o tempo de resposta pode ser grande e considerando que possa haver influências de recalques nas leituras dos instrumentos (MACHADO, 2007).

Figura 19 - Esquema de instalação de Piezômetro Hidráulico.



Fonte: DUNNICLIFF, 1988.

4 PCH TAMBORIL

4.1 LOCALIZAÇÃO

A bacia do Rio São Bartolomeu é totalizada em uma área de 4.525,25 km² e em uma extensão de cerca de 200 km. Os critérios hidrológicos permitem a sua divisão em três sub-bacias, conforme representado na Figura 20, o alto São Bartolomeu (Planaltina, Sobradinho e Paranoá), o médio (São Sebastião, Cidade Ocidental e parte de Luziânia) e o baixo (parte de Luziânia e Cristalina).

Figura 20 – Localização do Rio São Bartolomeu.



Fonte: LEMES, 2010.

O Rio São Bartolomeu é formado pela junção do Rio Pípiripau e do Ribeirão Mestre D'Armas, nascendo ao norte do Distrito Federal e passando assim pelos municípios de Planaltina, Sobradinho, Paranoá até adentrar o sudeste do Estado de Goiás pelo sul do Distrito Federal, passando pelos municípios de Cidade Ocidental, Luziânia e Cristalina findando ao desembocar no Rio Corumbá, como mostra a Figura 21. Após ser formado, o rio São Bartolomeu recebe o Ribeirão Sobradinho, Córregos do Meio, Quinze e Rajadinha, para depois confluir com o Rio Paranoá seguindo em direção ao Corumbá. Em suma, o Rio São Bartolomeu abrange os Estados de Goiás e Distrito Federal, considerado assim um domínio da união (PÁDUA, 2016).

Figura 21 – Local onde o rio São Bartolomeu desemboca no rio Corumbá.



Fonte: TOREZAN, 2019.

Para a construção da PCH Tamboril, os locais selecionados estão situados no Rio São Bartolomeu, no Estado de Goiás, com as coordenadas UTM aproximadas $16^{\circ}48'09''$ S e $47^{\circ}53'35''$ W, $16^{\circ}46'44''$ S e $47^{\circ}52'56''$ W, respectivamente os eixos montante e jusante.

Figura 22 – Imagem Satélite da Localização da PCH Tamboril.



Fonte: EARTH, 2020.

O acesso rodoviário à margem direita da PCH Tamboril é feito a partir de Brasília pela BR-040, sentido Belo Horizonte. O eixo da PCH encontra-se logo a montante da foz do Rio São Bartolomeu, junto a ferrovia. O acesso também pode ser realizado pela BR-457, entrando-se a direita em estrada vicinal à 10 km do entroncamento com a BR-040, e seguindo-se por

mais 25 km até o eixo pela margem esquerda. A Figura 22 apresenta a localização da PCH através de imagem satélite.

Conforme demarcado na Figura 23, próximo a barragem é localizada a Estrada de Ferro de Goyaz (EFG), criada em 1906 e iniciado o processo de construção em 1911, a ferrovia foi responsável por grandes progressos no Estado de Goiás, facilitando assim a urbanização e a chegada de novos moradores. Em 1957, a mesma foi incorporada pela Rede Ferroviária Federal S.A. Com a privatização da Rede, em 1996, a estrada de ferro tem sido operada até os dias atuais pela Ferrovia Centro Atlântica, empresa pertencente a Vale S.A (TOREZAN, 2019).

Figura 23 – Localização da Montante e Jusante da PCH Tamboril.



Fonte: Adaptado de MAPS (2020).

A Ferrovia contribuiu em algumas fases da construção do empreendimento, na fase de concretagem, por exemplo, já que uma usina móvel foi instalada no canteiro e diariamente a areia era entregue através dos vagões, proporcionando assim uma acessibilidade melhor de materiais.

4.2 GEOLOGIA LOCAL

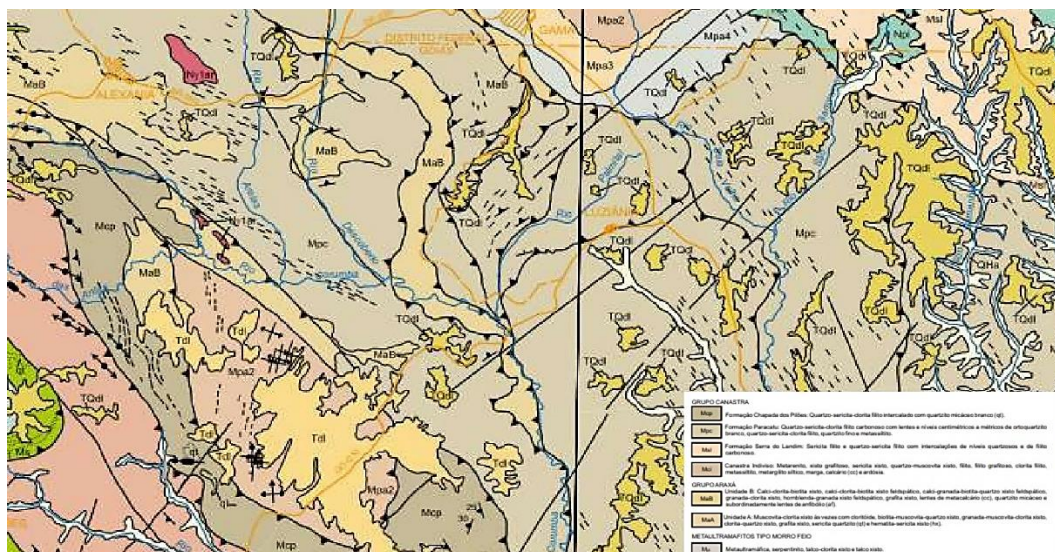
O maciço rochoso presente no sítio da PCH Tamboril, segundo o Mapa Geológico, pertence a formação Paracatu (Mpc) do Grupo Canastra. Segundo Barbosa (1955) este grupo corresponde a um conjunto de rochas metamórficas, constituído por quartzitos, filitos e xistos, que ocorrem desde o Sul de Minas Gerais até o Noroeste do Distrito Federal, ocupando assim

o setor Meridional da Faixa de Cavalgamentos e Dobramentos Brasília (Dardenne, 1978 & Pereira, 1992). Eventualmente ocorrem sulfetos (pirita) disseminados nos planos da xistosidade.

Uma subdivisão formal foi proposta por Silva & Dardenne (1996) para o grupo Canastra no oeste mineiro e sudeste de Goiás, em 3 formações conhecidas como: Serra do Landin, Paracatu (membros Morro do Ouro e Serra da Anta) e Chapada dos Pilões (membros Serra de Urucânia e Hidroelétrica Batalha).

Como citado anteriormente a formação da PCH Tamboril é denominada Paracatu, sendo essa distribuída continuamente do Sul de Cristalina até Oeste de Brasília. Essa formação é representada por uma sequência de quartzo - sericitaclorita filitos, que por vezes podem ser carbonosos, com lentes e níveis centimétricos a métricos de orto – quartzitos brancos, maciços e de granulometria variável, predominando aqueles de grãos médios. A Figura 24 representa o mapa geológico da região de construção do complexo das 4 PCHs.

Figura 24 – Mapa Geológico da região.



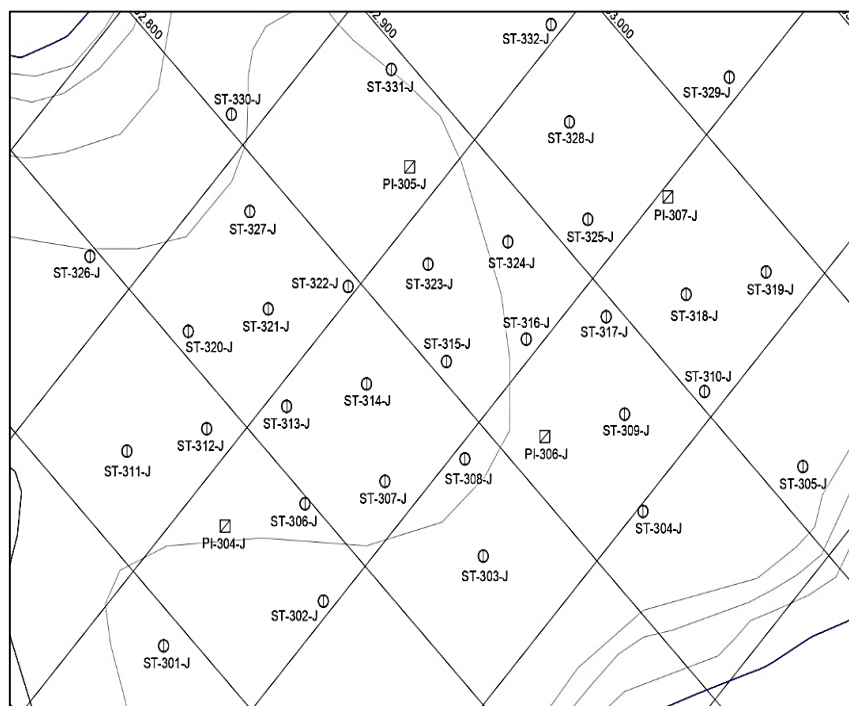
Fonte: CPRM, 2020.

Os solos residuais foram mais comuns na região das ombreiras esquerda e direita, sobrepondo a rocha decomposta e por vezes ocorrem aflorando na superfície do terreno natural. Entretanto, os solos aluvionares encontram-se no vertedouro e nas margens do Rio São Bartolomeu. Nas margens, geralmente, encontrou-se argila siltosa pouco arenosa de coloração acinzentada, mole e com presença de restos vegetais dispersos. Na região do vertedouro, o material aluvionar é composto por areia fina a média, coloração amarelada, podendo ocorrer blocos de rocha.

4.3 ESPECIFICAÇÕES DAS SONDAGENS

Para a realização da barragem da PCH Tamboril foram feitos estudos geológicos em ambas as partes do rio São Bartolomeu, tanto em jusante quanto em montante. Ao todo foram realizadas 105 sondagens, sendo elas: 27 Sondagens Mistas (17 montante e 10 jusante), 11 Sondagens a Percussão (6 montante e 5 jusante), 14 Poços de Inspeção (7 montante e 7 jusante) e 53 Sondagens a Trado (21 montante e 32 jusante), conforme representado nas Figuras 24 e 25.

Figura 25 – Planta de Localização das Sondagens – Área de Empréstimo.

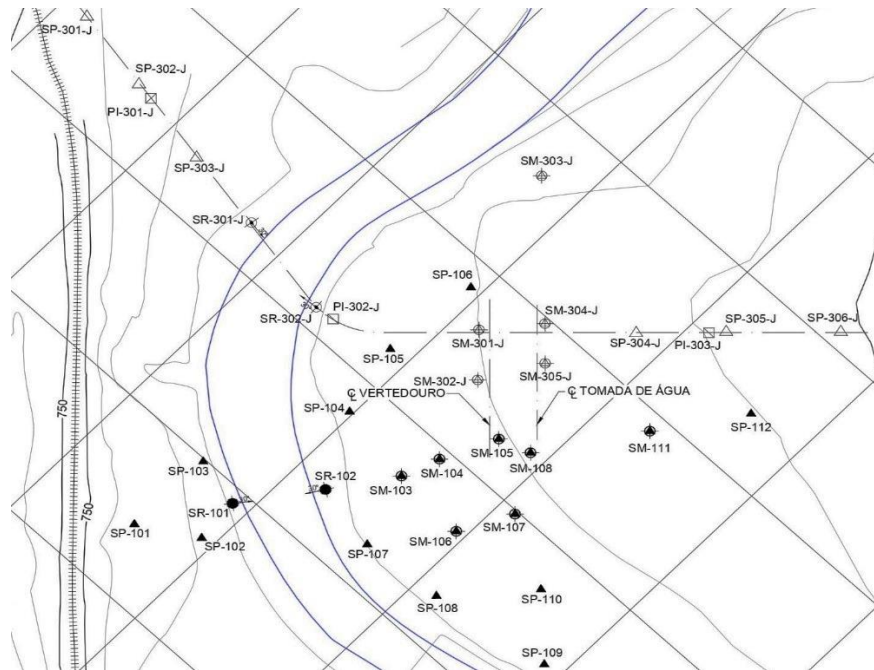


Fonte: INTERTECHNE, 2017.

A Figura 25, apresenta os furos realizados na área de empréstimo da barragem, o material retirado teve utilização direta na construção dos taludes, sendo esta uma área rica em argila.

A Figura 26, que é a Planta de Sondagem, apresenta todos os furos realizados no decorrer do estudo geotécnico no Eixo de Jusante, a partir da mesma obteve-se os laudos de sondagem que apresentam informações, tais como: o tipos de solos e rochas encontrados na região, a alteração, coerência e grau de faturamento da rochas, o índice RQD, o nível de água, estratigrafia do terreno e o parâmetros de resistência N_{spt} .

Figura 26 – PI, SM, SP e SR realizados no eixo da barragem.



Fonte: INTERTECHNE, 2017.

É a partir da análise dos laudos que se escolhe o local da implementação da barragem e da fundação, assim como a verificação de disponibilidade de materiais para a construção da mesma. A Tabela 3 apresenta a quantidade e os tipos de furos realizados na área de construção da PCH Tamboril, isso inclui sondagens mistas (SM), a percussão (SP), a trado (ST) e poços de inspeção (PI).

Tabela 3 – Especificação dos Furos de Sondagem.

Tipo de Sondagem	Sigla	Quantidade Total	Furos
Mista	SM	27	SM 301, SM 302, SM 303, SM 304, SM 305, SM 306, SM 307, SM 308, SM 309, SM 310, SM 311, SM 312, SR 301-M, SR 303-M, SR 301-AE, SR 302-AE, SR 303-AE, SM 301-J, SM 302-J, SM 303-J, SM 304-J, SM 305-J, SR 301-J, SR 302-J, SRP 02, SRP 03, SRP 04.
Percussão	SP	11	SP 301, SP 302, SP 303, SP 304, SP 305, SP 306, SP 301-J, SP 302-J, SP 303-J, SP 304-J, SP 305-J.

Tipo de Sondagem	Sigla	Quantidade Total	Furos
Trado	ST	53	ST 301, ST 302, ST 303, ST 304, ST 305, ST 306, ST 307, ST 308, ST 309, ST 310, ST 311, ST 312, ST 313, ST 314, ST 315, ST 316, ST 317, ST 318, ST 319, ST 320, ST 321, ST 301-J, ST 302-J, ST 303-J, ST 304-J, ST 305-J, ST 306-J, ST 307-J, ST 308-J, ST 309-J, ST 310-J, ST 311-J, ST 312-J, ST 313-J, ST 314-J, ST 315-J, ST 316-J, ST 317-J, ST 318-J, ST 319-J, ST 320-J, ST 321-J, ST 322-J, ST 323-J, ST 324-J, ST 325-J, ST 326-J, ST 327-J, ST 328-J, ST 329-J, ST 330-J, ST 331-J, ST 332-J.
Poços de Inspeção	PI	14	PI 301-M, PI 302-M, PI 303-M, PI 304-M, PI 305-M, PI 306-M, PI 307-M, PI 301-J, PI 302-J, PI 303-J, PI 304-J, PI 305-J, PI 306-J, PI 307-J.

Fonte: Autorial Própria, 2020.

A início a barragem seria locada a montante do rio, devido a viabilidade econômica e ambiental optaram pela realização a jusante, levando em consideração o melhor barramento e o impacto global presente nesta região. Logo, se a barragem fosse implementada no eixo de jusante ficaria com um elevado custo de construção.

As sondagens são realizadas para o estudo do solo antes de se realizar uma construção. Uma barragem, por exemplo, necessita de um estudo geológico aprofundado, para a escolha do material a ser utilizado na sua construção devido aos cuidados necessários para que a mesma não sofra recalque e perda d'água, além de que a sua fundação exige mais atenção em áreas como a casa de força e os vertedouros.

Para exemplificar a análise das informações essenciais a serem extraídas dos Laudos de Sondagem, foi escolhido o furo SM-302 J, que é uma Sondagem Mista, localizado próximo ao vertedouro e a casa de força, local este que exige cautela devido ao peso que o solo necessita suportar nesta área sem sofrer recalque. Com relação a estratigrafia, nos primeiros 6 metros encontra-se uma argila siltosa residual madura com valor de resistência a penetração inferior a 10 golpes, seguido por uma areia com 1,6 metros de espessura e valor de resistência a penetração entre 20 e 30 golpes e por fim uma areia argilosa residual jovem, entre 8 e 15,9 metros de profundidade, com resistência a penetração variando entre 25 e 40 golpes. O nível de água se encontra a 10,35 metros de profundidade.

A Figura 27 apresenta a extração dos testemunhos de rocha no furo SM 302-J. A presença da rocha nesse furo iniciou-se a 15,9 metros de profundidade, onde verificou-se a existência de uma rocha Quartzo Sericita Xisto com um grau de fraturação elevado até aproximadamente os 20 metros de perfuração. Após, encontrou-se uma rocha pouco fraturada, com o grau de Consistência muito coerente (C1), pouca alteração (A1) e RQD excelente (entre 90 e 100%) até a finalização do furo em 30 metros, ou seja, a rocha está praticamente sã.

Figura 27 – Testemunhos de Sondagem Mista PCH Tamboril – SM-302 J.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

A Tabela 4 exibe um resumo das características do solo e da rocha no furo de sondagem SM-302J, tais como: os tipos de solo, o RQD, a Alteração, a Qualidade e o Fraturamento por profundidade.

Tabela 4 – Furo SM-302 J profundidade de 0,00 a 30,00 metros.

Profundida.	Tipo de Solo/Rocha	Nspt	RQD (%)	Alteraç.	Qualid.	Fraturam.
0,00 – 6,45	Argila Siltosa	3-11	-	-	-	-
6,45 – 8,00	Areia	11-28	-	-	-	-
8,00 – 15,90	Areia Argilosa	28-28/10	-	-	-	-
15,90 – 16,20	Quartzo Sericita Xisto	-	0	A4	C4	F5
16,20 – 17,74	Quartzo Sericita Xisto	-	20	A2	C2	F5
17,74 – 20,00	Quartzo Sericita Xisto	-	35	A2	C2	F5
20,00 – 30,00	Quartzo Sericita Xisto	-	90	A1	C1	F2

A4 – extremamente alterada; A2 – moderadamente alterada; A1 – rocha sã

C4 – incoerente; C2 – coerente; C1 – muito coerente.

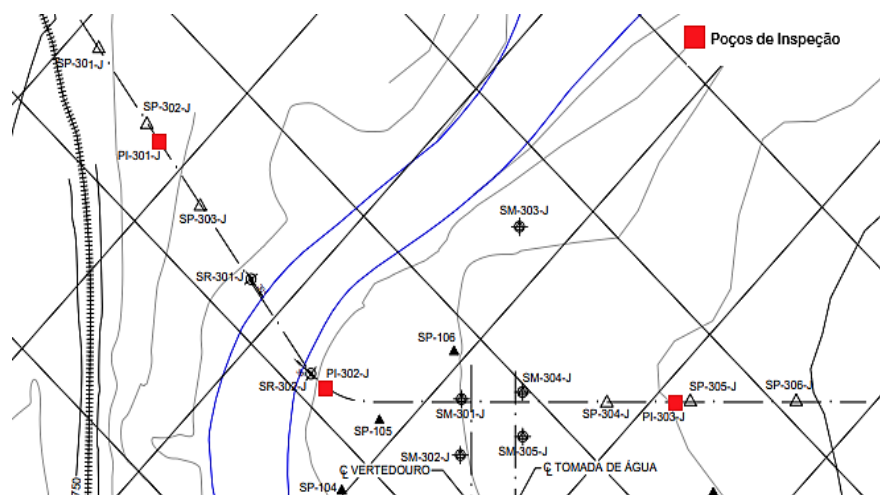
F5 – fragmentada; F2 – medianamente fraturada.

Fonte: Autoria Própria, 2020.

A partir dos Laudos Técnicos confeccionados para essa obra, pode-se notar algumas similaridades comportamentais do subsolo entre os furos de cada sondagem, criando-se assim regiões de mesma característica geotécnica. Essas afinidades e divergências serão descritas a seguir.

Todos os Poços de Inspeção executados na área de jusante foram paralisados a uma profundidade entre 1,40 e 4,00 metros, devido a presença de uma rocha impenetrável localizada logo abaixo da superfície. Acima da rocha foi verificado a presença de Solo Residual Maduro, apenas nos Poços PI 303-J, PI 301-J apresentou Solo Saprolítico.

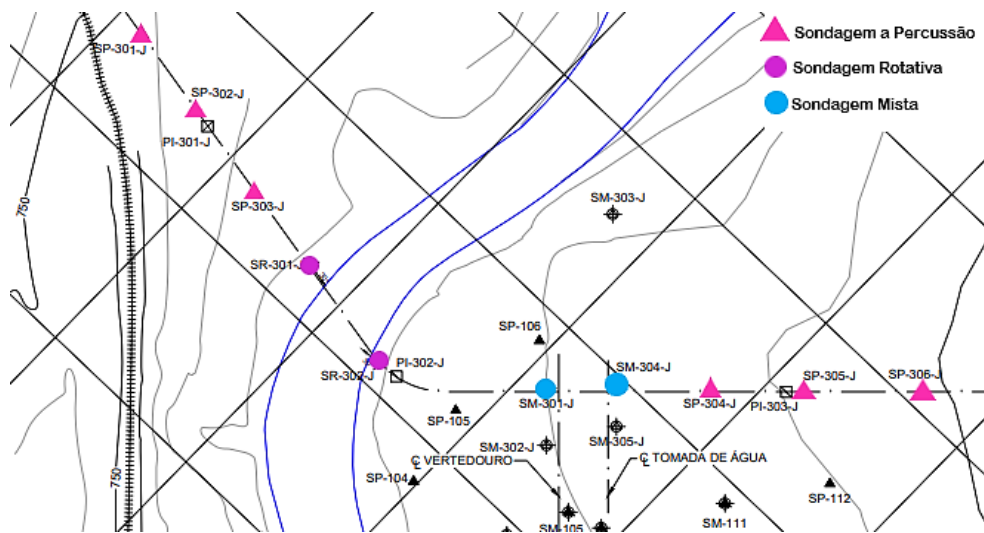
Figura 28 – Eixo da Barragem com Poços de Inspeção demarcados.



Fonte: Adaptado de INTERTECHNE (2017).

Os Poços de inspeção, representados na Figura 28, estão no eixo da barragem e em nenhum se verificou a presença de nível de água, pois todos foram escavados superficialmente, com profundidade máxima de 4 metros, apenas para a retirada de amostra indeformadas. Em todos os poços o solo da superfície foi classificado como Argila siltosa residual jovem.

Figura 29 – Localização das SM, SP e SR no Eixo da Barragem.



Fonte: Adaptado de INTERTECHNE (2017).

A Figura 29 apresenta a localização das Sondagens Mistas, as Sondagens a Percussão e as Sondagens Rotativas realizadas no Eixo da Barragem.

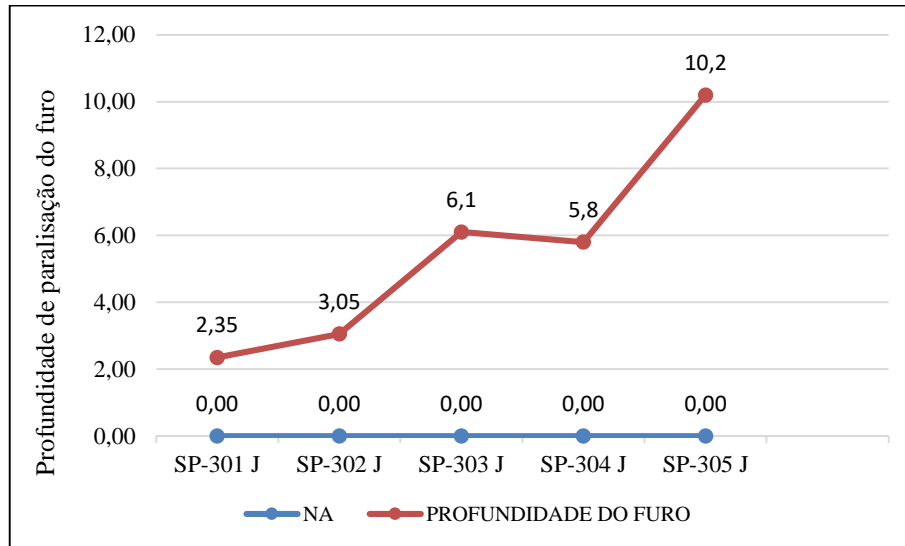
A Figura 30 apresentada abaixo ilustra as Sondagens a Percussão realizadas no eixo da barragem, sendo elas: SP 301 - J, SP 302 - J, SP 303 - J, SP 304 - J e SP 305 - J, cujo representados em vermelho estão dispostos a profundidade de paralisação de cada furo de sondagem. Em azul observa-se que o Nível de Água seco manteve-se constante em todos os furos.

A Figura 31 retrata o gráfico com as Sondagens Mistas e as Sondagens Rotativas executadas no eixo da barragem, sendo elas: SM 301 - J, SM 304 - J, SR 301 - J, SR 302 - J. Assim como no gráfico anterior a profundidade de paralisação do furo é dada em vermelho e o Nível de Água em azul. Entretanto, nota-se que foi detectado a presença de NA em todos os furos.

Comparando-se os gráficos, nota-se que na Figura 31 o NA foi alcançado em profundidades menores que as representadas na Figura 30 (sem detecção de NA), acontece que quando a sondagem é realizada em solos, como a SP, essa para imediatamente quando alcança a rocha. Todavia, as realizadas em rocha, que são as SR e SM, têm contato direto com as

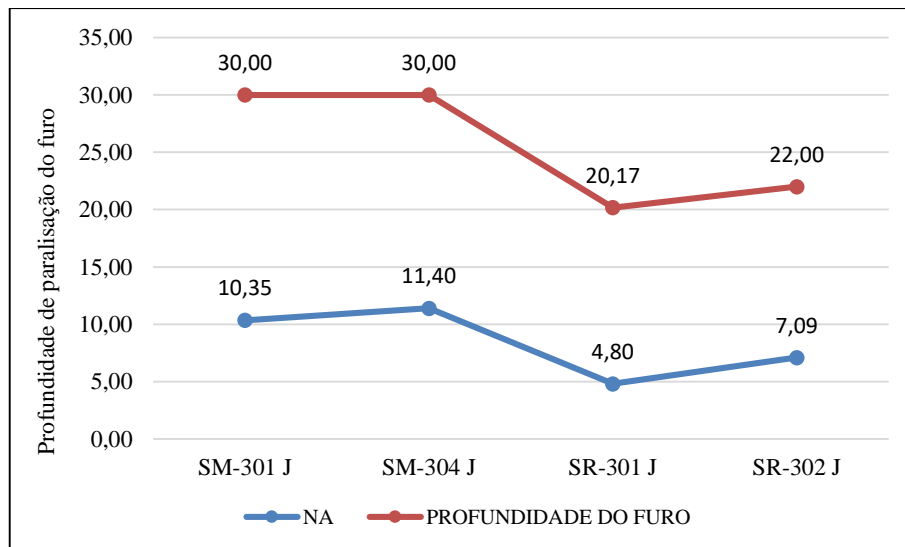
mesmas, em casos onde as rochas são muito fraturadas há possibilidade de percolação de água em seu interior, detectando assim o NA nas localidades mais afetadas.

Figura 30 – Relação NA vs. Profundidade do furo.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

Figura 31 – SM e SR no Eixo da Barragem.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

As Sondagens a Trado executadas a montante, foram realizadas em uma mesma região, como já foi ilustrado na Figura 25, isso porquê o solo dessa área foi utilizado como área de empréstimo. Nessa região encontra-se material de qualidade e em grande quantidade de argila, resultando assim nas diversas prospecções desta área pela sua riqueza de material. Os materiais predominantes foram as Argilas Silto Arenosas e a Argilas Siltosas, no entanto em alguns furos

foram encontrados apenas Pedregulhos (ST-304 J, ST-308 J, ST-313 J e ST-330 J). O solo retirado foi lançado e compactado na barragem denominados 1A-C e 1A-L como mostra o Quadro 1.

4.4 DESCRIÇÃO DA BARRAGEM

A Pequena Central Hidrelétrica Tamboril conta com uma barragem de terra, que foi construída com a finalidade de gerar energia. Após ser produzida, a mesma é destinada para a subestação de Cristalina – GO, e em seguida para o Sistema Brasileiro de energia. Só a partir daí, que a mesma será distribuída para a população.

As PCHs Salgado e São Bartolomeu localizam-se no município de Luziânia, entretanto a Tamboril e a Gameleira estão entre os municípios de Cristalina e Luziânia. Estas trarão benefícios diretos para os municípios envolvidos, entre eles: o aumento da arrecadação de impostos, aquecimento na economia local, além da geração de cerca de 150 empregos diretos.

A preservação ambiental e o bem estar social são itens de extrema importância em uma obra, a construção da PCH Tamboril seguiu medidas socioambientais para que nenhuma das partes fossem prejudicadas, tais como: atendimentos as condicionantes ambientais, gestão dos resíduos e efluentes, controle ambiental da qualidade da água e capacitação da mão de obra.

É uma obra de responsabilidade da SBGER (São Bartolomeu Geradora de Energia Renovável) que possui um complexo de PCHs, são elas: Tamboril, Gameleira, Salgado e São Bartolomeu. A PCH Tamboril, possui duas turbinas, que ao todo serão responsáveis pela geração de 15,8 MW de energia, representando 27,24% da geração de energia no complexo das 4 PCH's, que ao todo gerarão 58 MW.

A PCH Tamboril conta com uma área inundada do reservatório no nível d'água máximo normal de 6,8 km², comportando assim um volume de água de 35,1 hm³. Possui uma vazão máxima turbinada de 127,6 m³/s, além de uma vazão máxima instantânea de 845 m³/s e 947 m³/s em recorrência de 50 e 100 anos respectivamente.

4.5 ELEMENTOS CONSTITUINTES DA BARRAGEM

A Barragem da PCH de Tamboril é do tipo homogênea, onde o material utilizado para a construção dessa barragem é denominado 1A-C, como representado no Quadro 1, tratando-se de uma Argila Siltosa compactada. A altura da barragem é variável, isso devido a topografia da região, com altura mínima de 4 metros próximo a margem esquerda e altura máxima de 26

metros na seção central da barragem. Os taludes de montante e jusante possuem a mesma inclinação de 2H:1V, formando um ângulo de 26,6° com a horizontal, o que condiz com as especificações construtivas da Tabela 2. Foi necessário a construção de ensecadeiras à montante e a jusante, tendo como finalidade isolar o rio mantendo assim uma parte da área seca para que fosse possível construir a Barragem.

O Quadro 1 apresenta uma síntese dos principais materiais utilizados ao longo da construção da barragem e como esses materiais foram trabalhados, se por meio da compactação ou apenas por lançamento. As siglas apresentadas na primeira coluna serão utilizadas para sintetizar o tipo de material usado em cada elemento constituinte da barragem. Os materiais no Quadro 1 estão dispostos em ordem crescente de granulometria, onde o material 1A-C é o mais fino e o material 6A é o mais granular.

Quadro 1 – Quadro de Materiais.

Material	Descrição
1A-C	SOLO COMPACTADO
1A-L	SOLO LANÇADO
3-C	AREIA COMPACTADA
4A-C	TRANSIÇÃO FINA COMPACTADA
4B-C	TRANSIÇÃO MÉDIA COMPACTADA
4C-L	TRANSIÇÃO ÚNICA LANÇADA
4C-C	TRANSIÇÃO ÚNICA COMPACTADA
5A-L	ENRONCAMENTO MÉDIO LANÇADO
5A-C	ENRONCAMENTO MÉDIO COMPACTADO
6A	<i>RIP RAP</i>

Fonte: A autoria Própria, 2020.

A Crista dessa barragem foi construída com material 4-C-C e possui 7 metros de largura ao longo de 6,4 km de comprimento, sobre a mesma foi construída uma estrada de acesso simples, conforme ilustrado na Figura 32.

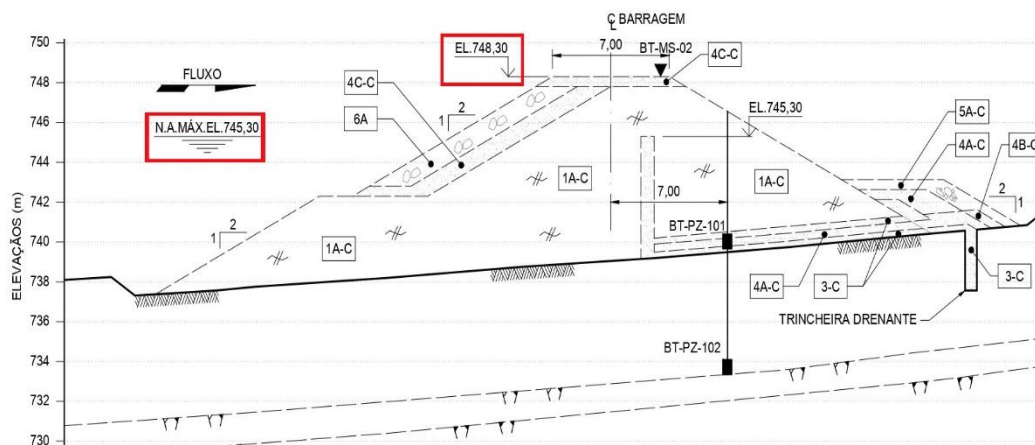
Figura 32 – Construção da Crista.



Fonte: Autorial Própria, 2020.

Para que não houvesse o galgamento das ondas, fez-se necessário a presença de Borda Livre, para que a altura fosse suficiente o valor foi obtido subtraindo-se a cota da crista (748,30 metros) da elevação máxima do NA do reservatório a montante (745,30 metros) como mostra a Figura 33, resultando assim em uma Borda Livre de 3 metros, valor este suficiente para que não haja galgamento.

Figura 33 – Planta da Barragem.

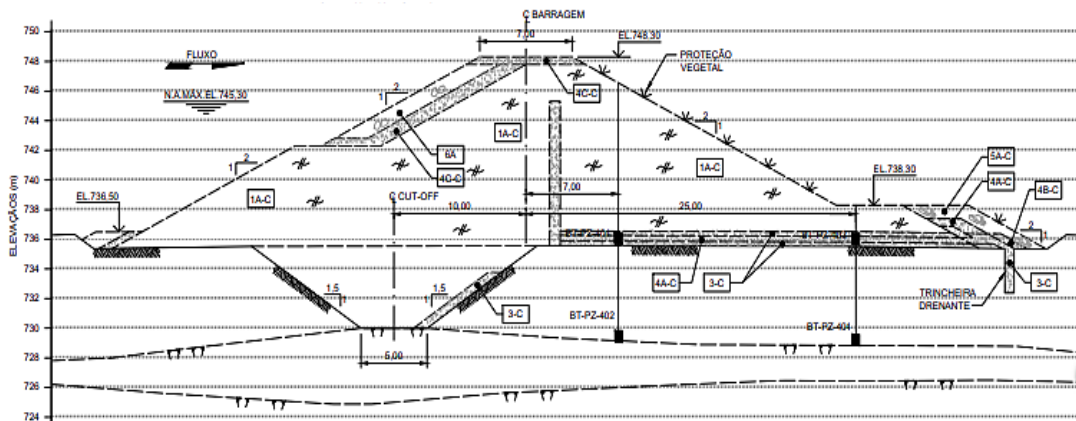


Fonte: Adaptado de SBGER (2017).

O sistema de drenagem adotado, como mostra a Figura 34, foi o Filtro Chaminé mais dreno de pé. A cota superior do Filtro Chaminé está locada na mesma cota do NA máximo a montante. O método construtivo adotado foi a instalação de um Filtro Chaminé do tipo Sanduíche, devido a elevada contribuição de água proveniente da fundação da barragem,

necessitando de uma composição de materiais mais drenante no meio do Filtro Sanduiche e um material de drenante intermediária para revestir, fez-se necessário o acréscimo de 3 camadas sendo a primeira de material 3-C, a segunda 4A-C e a terceira 3-C, possuindo também material 5A-C e 4B-C, finalizando na trincheira drenante com um 3-C, os materiais supracitados estão caracterizados no Quadro 1.

Figura 34 – Planta da Barragem ilustrando o Filtro.



Fonte: SBGER, 2020.

Para que não haja deterioração da parte do Talude de Montante não submerso a água o *Rip Rap* foi construído, a Figura 35 apresenta o mesmo após o enchimento do reservatório. A proteção executada no talude foi realizada com rochas de tamanhos maiores, para que as ondas formadas no reservatório não deteriore o talude de montante.

Figura 35 – Rip Rap.



Fonte: GUARAENGE, 2020.

Os Taludes de Jusante também devem ser protegidos, por exemplo, das águas das chuvas. O sistema de proteção utilizado, como apresenta a Figura 36, foi a cobertura vegetal, além de que canaletas de drenagem que foram instaladas para facilitar a percolação das águas pluviais.

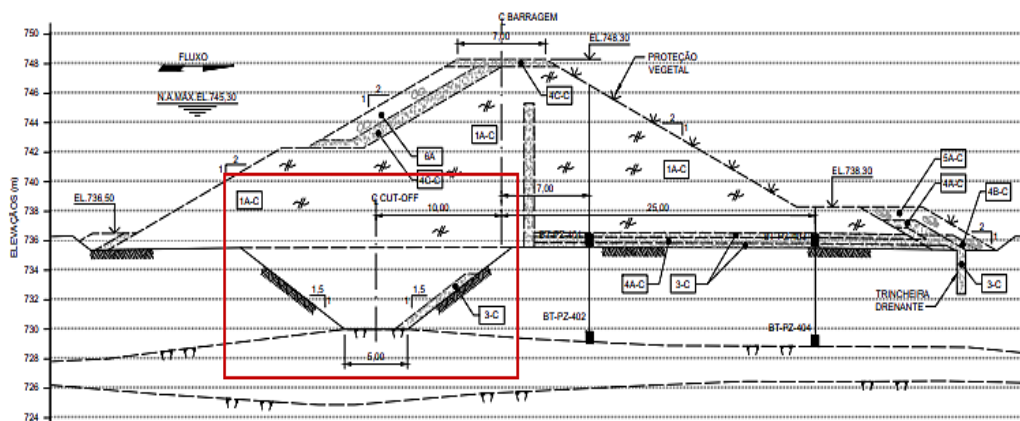
Figura 36 – Sistema Vegetal de Proteção do Talude de Jusante.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

A Figura 37 ilustra o *Cut – Off* presente na barragem, o mesmo possui a função de dificultar o fluxo de água pela fundação, com uma profundidade de aproximadamente 6 metros e uma inclinação de 1,5H:1,0V.

Figura 37 – Cut – Off.



Fonte: SBGER, 2020.

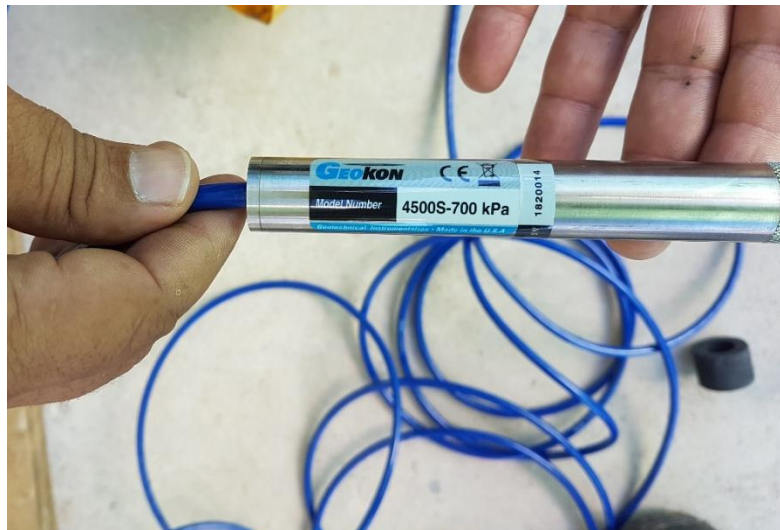
4.6 INSTRUMENTAÇÃO DA BARRAGEM

A PCH Tamboril possui um sistema de instrumentação amplo e completo, contando com a presença de:

- 21 Piezômetros *Standpipe*, exercendo a finalidade de medir o NA podendo medir a pressão neutra também;
- 20 Piezômetros Elétricos de Corda Vibrante, que medem a pressão neutra e o peso da água no lençol freático;
- 2 Extensômetros Múltiplos (1 de fundação e 1 de contato com a água);
- 13 Marcos Superficiais (3 na margem esquerda e 10 na margem direita);
- 4 Medidores de NA (1 na margem esquerda e 3 na margem direita);
- 2 termômetros para medir a temperatura do concreto;
- 3 Medidores de Vazão.

Todos os piezômetros foram instalados a Jusante da Barragem. Para a segurança da Barragem os instrumentos, como piezômetros, são lidos diariamente, pois alterações podem gerar problemas irreversíveis quando detectadas muito tarde. Nesse caso, os piezômetros são responsáveis para controlar o NA e medir a pressão, então faz-se necessário o controle diário para que possa ser evitado contratemplos como a percolação da água na barragem. O modelo do Piezômetro de Corda Vibrante utilizado na obra é o GK 404 da Geokon (Figura 38) e os Standpipe foram confeccionados in loco.

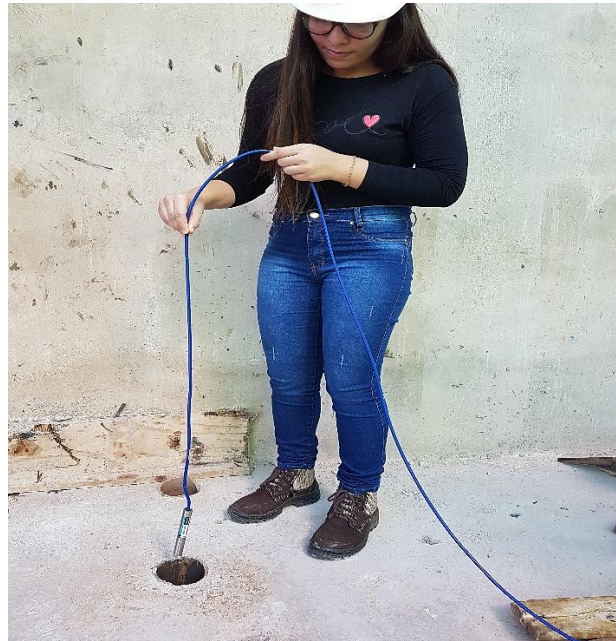
Figura 38 – Piezômetro de Corda Vibrante: GK 404 Geokon.



Fonte: Aatoria Própria, 2020.

O Piezômetro de Corda Vibrante porta um diafragma metálico que separa a água dos poros do sistema de medição, onde um fio tensionado é conectado ao ponto médio do diafragma, como apresentado na Figura 39, de modo que a deflexão do diafragma cause mudanças na tensão do fio, sendo possível então a medição da pressão de água nesta região.

Figura 39 – Descida do instrumento.



Fonte: Autorial Própria, 2020.

Após o fio ser tensionado é realizada a leitura inicial, onde a pressão do lençol freático é dada em dg (decigrama) e a temperatura em graus Celsius, o instrumento é conectado a um aparelho de leitura. A Figura 40 apresenta a instalação de um Piezômetro de Corda Vibrante em concreto, um revestimento é colocado no furo para que o instrumento não desça tendo contato com as paredes, assim evitando alterações de leitura. Após estar em contato com o lençol freático a leitura é iniciada, neste exemplo a leitura inicial foi de 8433,6 Dg e 26,1 °C à 32,05 metros de profundidade. Posteriormente o furo é preenchido com areia e bentonita. Ficando no exterior apenas os fios de leitura diária.

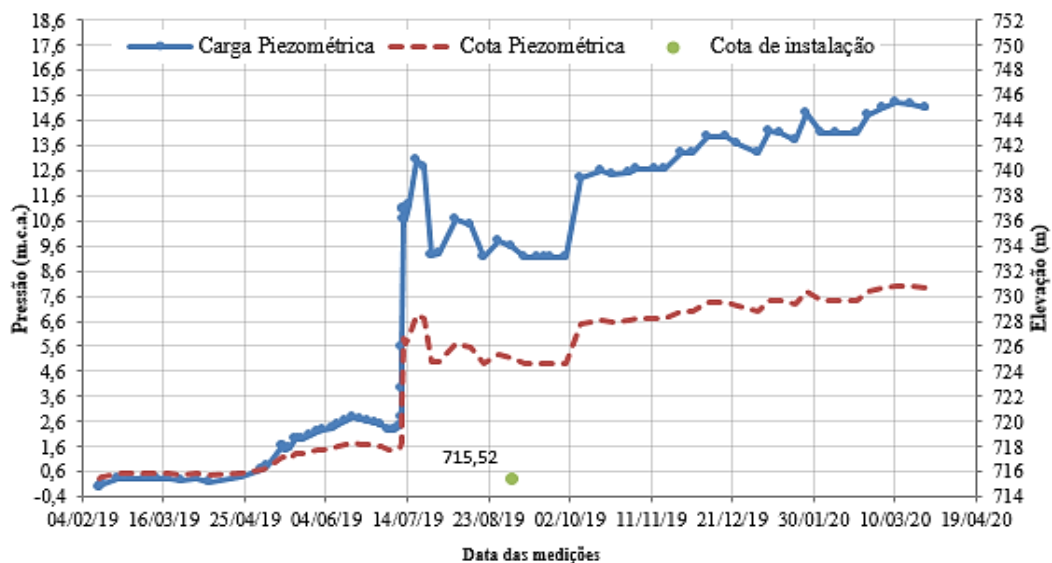
Figura 40 – Instalação do Piezômetro de Corda Vibrante.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

A Figura 41 representa as principais leituras realizadas no decorrer de 14 meses desde a instalação de um Piezômetro de Corda Vibrante. O PE – 01 foi instalado próximo ao vertedouro, para que toda e qualquer alteração que ocorra nessa área possa ser monitorada. Nota-se que a partir do mês de julho a carga piezométrica elevou-se consideravelmente, a explicação está no enchimento da bacia de dissipação, pois, houve desvio do rio de montante com isso a carga piezométrica passou de uma média de 2 para 15.

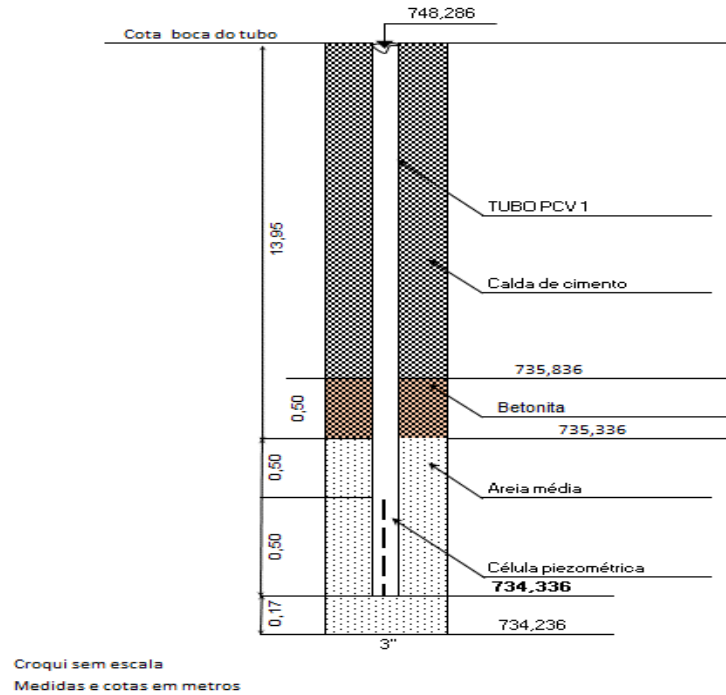
Figura 41 - Monitoramento Piezômetro de Corda Vibrante.



Fonte: FAUSTO, 2019.

Os Piezômetros *Standpipe* foram construídos in loco tendo como material principal tubos de PVC, são compostos de um bulbo, instalado no local onde pretende-se medir a carga de pressão, e um tubo que liga o bulbo até o local onde será realizada a leitura. Após ser instalado o mesmo, é preenchido (em volta), com areia, bentonita e calda de cimento. A Figura 42 ilustra o Croqui da instalação do Piezômetro *Standpipe* PZ 701 instalado na Margem esquerda da Barragem.

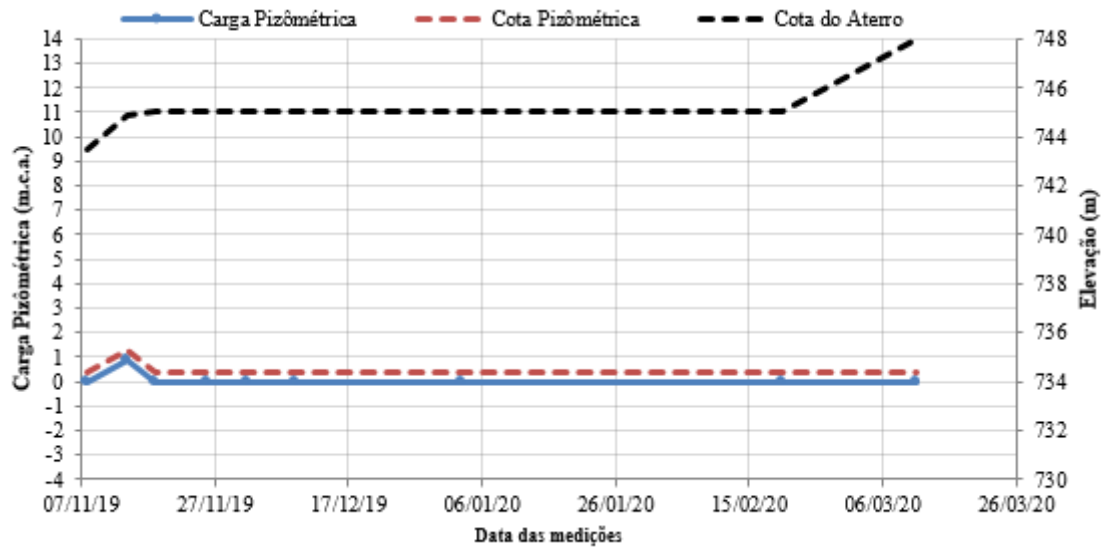
Figura 42 – Croqui Piezômetro *Standpipe*.



Fonte: FAUSTO, 2019.

Devido a instalação do mesmo ser em um ponto do talude onde o NA encontra-se seco não se faz necessário a leitura do instrumento diariamente, entretanto é necessário que o monitoramento seja realizado ao menos duas vezes por mês, para verificar se não houve alterações. A Figura 43 representa as leituras realizadas no PZ – 701 em um intervalo de 5 meses, nota – se que a carga e a cota piezométrica possuíram uma elevação inicial e depois mantiveram-se constantes.

Figura 43 – Monitoramento Piezômetro *Standpipe*.



Fonte: FAUSTO, 2019.

O nível de água é medido através de medidores elétricos de nível de água, os mesmos são inseridos nos piezômetros *standpipe* e descem fazendo a leitura, quando entra em contato com a água seu sensor apita informando digitalmente onde encontra-se o NA, esse processo é apresentado na Figura 44.

Figura 44 – Leitura do Nível de Água.



Fonte: Autoria Própria, 2020.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa foi realizada com o intuito de apresentar os principais pontos da construção e monitoramento de uma PCH. O estudo foi realizado na PCH Tamboril, cuja barragem empreendida foi a homogênea de terra, tendo como finalidade gerar energia para comercialização, possuindo duas turbinas que juntas geram um total de 15,8 MW.

Atualmente, a PCH Tamboril encontra-se apenas com uma das turbinas em funcionamento, gerando assim 7,9 MW, entretanto a outra turbina já está em processo de produção e liberação pela ANEEL. As outras 3 PCH's constituintes do complexo estão em fase de estudos geológicos e geotécnicos para construção, que serão realizados assim como os da Tamboril, seguindo as especificações de projeto. Esta fase pode demandar um tempo maior, pois é necessário que seja realizado um levantamento geral da região, incluindo o subsolo, através de sondagens para que seja definido o melhor eixo para cada barragem.

Através da análise geológica e geotécnica da barragem, diversos assuntos foram pautados, por exemplo, os elementos principais constituintes de uma barragem como: a crista, borda livre, drenos, taludes, *cut off*, fundação e vertedores que fizeram parte do levantamento bibliográfico sobre a PCH Tamboril possibilitando assim que a geometria da barragem e os valores preliminares dos principais parâmetros geotécnicos fossem encontrados. Além dos laudos de sondagem que proporcionaram o conhecimento do perfil do solo e a localização de onde foram extraídos os materiais utilizados. Com isso, a investigação geotécnica de campo fez - se necessária para que os parâmetros para análises fossem localizados e a pesquisa concluída.

Ultimamente, este assunto tem sido um grande dilema na sociedade, devido aos incidentes resultantes de barragens que não foram fiscalizadas e monitoradas como deveriam colocando assim a vida de inúmeras pessoas em risco, o que não foi o caso da PCH Tamboril, a mesma conta com uma instrumentação de qualidade e um monitoramento adequado. A função principal da barragem a princípio era segurar a água e não perdê-la, os piezômetros tornaram a mesma possível com segurança, pois o equipamento permite prever os riscos possíveis antes que a barragem sofra ruptura.

Portanto, conclui-se que as Pequenas Centrais Hidrelétricas veem ganhando cada vez mais espaço no mercado, por ser uma obra de menor custo que uma Usina Hidrelétrica e por causarem menor impacto ambiental, as mesmas contribuem para um grande avanço na construção civil. Aliadas aos desenvolvimentos tecnológicos de instrumentação, que trazem segurança e facilidade ao empreendimento as PCHs tendem a ser progressivamente a opção no quesito gerar energia com sustentabilidade e segurança.

REFERÊNCIAS

ABASSI, Tasneem. ABASSI, Sharid Abbas. *Small hydro and the environmental implications of its extensive utilization*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2134-2143, 2011.

AGUILAR, Graziela de Toni. **Avaliação de Impacto Social e proposição de medidas mitigadoras** – compromisso com a Responsabilidade Social. PCH Notícias e SHP News, 31, 12-17, 2006. Disponível em: <<http://cerpch.unifei.edu.br/artigos/avaliacao-de-impacto-social-e-proposicao-de-medidas-mitigadoras-compromisso-com-a-responsabilidade-social/>>. Acesso em: 23 mai. 2020.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Pequenas Centrais Hidrelétricas: Outorgas e Registros de Geração**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/-/asset_publisher/mJhnKli7qcJG/content/pch-pequena-central-hidreletrica-ren-673-2015-655808?inheritRedirect=false&redirect=https%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Foutorgas%2Fgeracao%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_mJhnKli7qcJG%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D2>. Acesso em: 12 fev. 2020.

ARTHUR, H. G. *Selection of type of dam. Design of small dams*. Washington, DC: *United State Government Printing Office*, cap 3. 1960.

AZEVEDO, André Gonçalves de. **Análise estatística para identificação de leituras discrepantes de piezometria: estudo de caso em barragem de terra**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2019.

BERMANN, Célio. **Impasses e controvérsias de hidreletricidade**. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/ea/v21n59/a10v2159.pdf>> Acesso em: 08 mar. 2020.

BORDEAUX, Guy Maupassant. **Barragens de terra e enrocamento, projeto e construção**. Salvador: Clube de Engenharia, 1980.

CARVALHO, David de. **Barragens: Uma introdução para graduandos**. São Paulo: UniCamp, 2011.

CBIE. **Centro Brasileiro de Infra Estrutura**. Disponível em: <<http://www.cbie.com.br/aprovacao/2018/07/12/ola-mundo/>>. Acesso em: 15 mai. 2020.

CERQUEIRA, Hélio Márcio Lopes de. **Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas de mineração**. Disponível em: <https://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/cerqueira-2017-m-sc.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2020.

CESP. **Companhia Energética De São Paulo**. Disponível em: <<https://www.cesp.com.br/>>. Acesso em: 15 fev. 2020.

CPRM, Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Geológico do Estado de Goiás e do Distrito Federal**. Disponível em:

<http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/plgb/geolgoias/geolgoias_mpgeologo.gne.pdf> Acesso em: 21 out. 2020.

CRUZ, Paulo Teixeira. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto.** São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

CRUZ, Paulo Teixeira. **Estabilidade de Taludes.** 1ed. São Paulo: Grêmios Politécnicos da USP, 1980.

DAMASCOPENNA. **Instrumentação Geotécnica-** Tipos de Piezômetro. Disponível em: <<https://www.damascopenna.com.br/piezometros/>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

DICIO. **Dicionário Online de Português.** Disponível em: <<https://www.dicio.com.br/piezometro/>>. Acesso em: 12 fev. 2020.

DNAEE - **Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica.** Portaria n. 109, de 24 de novembro de 1982. Brasília: DOU de 26/11/1982.

DNAEE - **Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica.** Portaria n. 136, de 06 de outubro de 1987. Brasília: DOU de 08/10/1987.

DUNNICLIFF, John. *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance.* New York: Wiley, 1988.

EARTH, Google. **Divisa onde o rio São Bartolomeu corta Goiás e Distrito Federal (Brasília).** Disponível em: <<https://earth.google.com/web/@-16.05272152,-47.68550057,841.98927596a,2128.45550255d,35y,14.78341188h,0t,0r>> . Acesso em: 25 set. 2020.

ELETROBRÁS – **Centrais Elétricas Brasileiras.** Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas. Brasília: Eletrobrás, 2000.

ESTADÃO. **Concessões de Usinas Hidrelétricas.** Disponível em: <<https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,concessoes-de-usinas-hidreletricas-imp-,906238>>. Acesso em: 10 mar. 2020.

FAINZILBER, Abrahao. **Energia hidrelétrica.** Rio de Janeiro: Bloch, 1980.

FONSECA, Alessandra Rocha. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica** – estudo de caso das barragens da UHE São Simão. Ouro Preto: UFOP, 2003.

FURCHI, Sérgio Augusto Lunardelli. **Pequenas Centrais Hidrelétricas Face À Reestruturação Do Setor Elétrico Brasileiro** Uma Questão De Políticas Públicas.

Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/101770/furchi_sal_dr_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 mar. 2020.

G1, Minas. **Brumadinho:** Polícia Civil diz que investigações sobre desastre da Vale estão em reta final. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas->

gerais/noticia/2019/10/25/brumadinho-policial-civil-diz-que-investigacoes-sobre-desastre-da-vale-estao-em-reta-final.ghtml>. Acesso em: 10 mar. 2020.

GAIOTO, Nélio. **Barragens de terra e enrocamento**. São Carlos: Gráfica EESC/USP, 1998.

GAIOTO, Nélio. **Curso de barragens de terra e enrocamento** (notas de aula). São Carlos. Departamento de Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos. 2000.

GEOTECNIA E FUNDAÇÃO, LAN. **Instrumentação Geotécnica – Piezômetros**.

Disponível em: <<https://sites.google.com/site/geotecniaefundacaolan/166-piez>>. Acesso em: 20 fev. 2020.

HUGHES, Thomas Parke. *Networks of power: electrification in western society, 1880-1930*. Baltimore, Maryland: Johns Hopkins University Press, 1983.

LEÃO, Larissa Lara. **Considerações sobre impactos socioambientais em Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) – modelagem e análise**. Brasília: Universidade de Brasília, 2008.

LEMES, Clodoaldo. **Projeto de Recuperação e Preservação da Bacia do Rio São Bartolomeu**. Disponível em: <<https://www.redecol.com.br/2010/03/projeto-de-recuperacao-e-preservacao-da.html>>. Acesso em: 15 set. 2020.

MACHADO, William Gladstone de Freitas. **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração**. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-31032008-154124/publico/DissertacaoWillianGladstoneMachado.pdf>>. Acesso em: 17 maio 2020.

MARROCOS NETO, Antônio Alves da Silva. MORET, Artur de Souza. **Contribuição técnica, econômica e ambiental das PCHs no Sistema Elétrico Isolado de Rondônia**. Espaço Energia, 9, 25-33, 2008. Disponível em: <<http://www.espacoenergia.com.br/edicoes/9/EE009-05.pdf>>. Acesso em: 06 mai. 2020.

OLIVEIRA, Jader Roosevelt de Carvalho. **Contribuição para verificação e controle da segurança de pequenas barragens de terra**. Disponível em: <file:///C:/Users/55629/Downloads/DISSERTA%C3%87%C3%83O_Contribui%C3%A7%C3%A3oVerifica%C3%A7%C3%A3oControle.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2020.

OLIVEIRA, Nathalia Capellini Carvalho de, **A grande aceleração e a construção de barragens hidrelétricas no Brasil**. Belo Horizonte: Varia História, 2018. P. 321. Vol. 34.

PÁDUA, Alexandre Jorge. **Avaliação Integrada Da Sustentabilidade Da Bacia Do Rio São Bartolomeu**. Disponível em: <https://bdm.unb.br/bitstream/10483/15903/1/2016_AlexandreJorgePadua_tcc.pdf>. Acesso em: 15 set. 2020.

PASCHOALIN FILHO, João Alexandre. **Utilização de solo residual de diabásio como elemento de fundação e material de construção de aterros compactados para barragens de pequeno porte**. Disponível em: <<http://www.geoconceitoengenharia.com.br/images/PDF/FUNDACAO/DISSERTACAO->

UTILIZACAO-DE-SOLO-RESIDUAL-DE-DIABASIO-COMO-ELEMENTO-DE-FUNDACAO-E-MATERIAL-DE-CONSTRUCAO-DE-ATERROS-COMPACTADOS-PARA-BARRAGENS-DE-PEQUENO-PORTE.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2020.

RUBERT, Felipe Sostisso. **Análise do controle de percolação da água na barragem de terra da PCH Ilha Comprida**. Disponível em: <

file:///C:/Users/55629/Downloads/TCC%20Felipe%20Rubert%20Final%20repositorio.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2020.

ROSA *et. al.* **Lipids Of The Archaea: A New Tool For Bioelectronics**. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956566394800642>>. Acesso em: 04 mar. 2020.

SANTOS, Laryssa Cortes. **Estudo sobre a instrumentação de barragens de terra e rejeitos**. Disponível em:

<<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/28051/4/EstudoSobreInstrumenta%C3%A7%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

SHERAR, J.L. **Engineering Problems of Design and Contruction**. Disponível em:

<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde/publico/Dissertacao_Revisada_2008.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2020.

SILVEIRA, João Francisco Alves. **Instrumentação e Segurança de Barragens De Terra e Enrocamento**. 2ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

SNISB, Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens. **Registro de barragens**. Disponível em: <<http://www.snisb.gov.br/portal/snisb> >. Acesso em: 10 mar. 2020.

SOWERS, George F. **Earthfill and Rockfill Dam Engineering**. *Bombay*: Asia Publishing House. 1962.

TELES, Paula Vieira. CUSTÓDIO, Maraluce Maria. **Pequenas Centrais De Hidrelétricas Como Fonte De Energia Renovável**: Uma discussão sobre seu potencial ofensivo ao Meio Ambiente. Disponível em: <

<http://www.publicadireito.com.br/artigos/?cod=bb5d0eba11f7e244>>. Acesso em: 04 mar. 2020.

TELLES, Pedro Carlos da Silva **História da engenharia no Brasil**. Rio de Janeiro: Clube de Engenharia, 1993.

THÁ, Pedro de Carvalho. **Estudo das Condições de Fluxo pela Barragem de Terra da Margem Esquerda de Itaipu**. Disponível em: < http://www.civ.puc-rio.br/wp-content/view/down_pdf.php?pdf=../pdf/100.pdf >. Acesso em: 12 fev. 2020.

TOREZAN, Evandro. **De Luziânia a Pires do Rio – 24-08-2019**. Disponível em:

<<https://serpedalante.com/2019/08/24/de-luziania-a-pires-do-rio-24-08-2019/>>. Acesso em: 07 out. 2020.