

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Luana Daniel Velasquez

**ESTUDO DE CASO: INJEÇÕES DE CALDA DE CIMENTO PARA
IMPERMEABILIZAÇÃO E CONSOLIDAÇÃO DE FUNDAÇÃO DE
BARRAGEM**

Santa Maria, RS
2022

Luana Daniel Velasquez

**ESTUDO DE CASO: INJEÇÕES DE CALDA DE CIMENTO PARA
IMPERMEABILIZAÇÃO E CONSOLIDAÇÃO DE FUNDAÇÃO DE BARRAGEM**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Magnos Baroni

Santa Maria, RS
2022

Luana Daniel Velasquez

**ESTUDO DE CASO: INJEÇÕES DE CALDA DE CIMENTO PARA
IMPERMEABILIZAÇÃO E CONSOLIDAÇÃO DE FUNDAÇÃO DE BARRAGEM**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira Civil**.

Aprovado em 31 de março de 2022:

Magnos Baroni, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Rinaldo J. B. Pinheiro, Dr. (UFSM)

Amanda Vielmo Sagrilo, MSc. (UFSM)

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Santa Maria, seus servidores e todos aqueles que defendem e lutam pelo ensino superior gratuito e de qualidade, por terem me proporcionado à formação de Engenheira Civil.

Ao corpo docente pelos seus esforços e ensinamentos que resultaram na minha formação. Em especial, ao Professor Dr. Magnos Baroni, por ser meu orientador no presente trabalho e ter paciência comigo.

Aos meus colegas de graduação pela colaboração e apoio em diversos momentos.

Aos meus colegas de trabalho da Kaeng Infraestrutura pelos ensinamentos e apoio na realização desse trabalho, em especial Débora e Esdra.

Ao encarregado de laboratório Paulo Márcio, da Holanda Engenharia, pela ajuda na realização dos ensaios cujos resultados estão aqui demonstrados.

A Rudi Ohweiler Júnior (in memorian) pela oportunidade de fazer parte do ramo de construção de barragens para geração de eletricidade e pelo exemplo de humildade.

A Douglas da Construtora NN pela disposição em colaborar.

A Augusto pelo suporte ao longo da graduação e apoio na realização deste trabalho.

Insanidade é continuar fazendo sempre a mesma coisa e esperar resultados diferentes.

RESUMO

ESTUDO DE CASO: INJEÇÕES DE CALDA DE CIMENTO PARA IMPERMEABILIZAÇÃO E CONSOLIDAÇÃO DE FUNDAÇÃO DE BARRAGEM

AUTORA: Luana Daniel Velasquez

ORIENTADOR: Prof. Dr. Magnos Baroni

Durante a etapa do estudo de viabilidade para implantação de Pequenas Centrais Hidrelétricas é de fundamental importância ter conhecimento sobre como é composto e como se apresenta, na área de interesse, o maciço rochoso, já que será responsável pelo suporte das cargas resultantes com a construção das estruturas que as compõe. Além de apresentar boa resistência mecânica, outro fator muito importante que deve ser observado é a definição de um tratamento de fundação que vise a redução da percolação através da fundação da barragem, tornando, dessa forma, a estrutura mais segura, uma vez que a percolação e as pressões dela resultantes são significativas fontes de instabilidade e um dos maiores problemas em relação à segurança de barragens. Neste trabalho de conclusão de curso, apresenta-se um estudo sobre caldas de cimento, que foram utilizadas como método de tratamento de fundação na pequena central hidrelétrica Cachoeira Cinco Veados, localizada na região central do Rio Grande do Sul, mostrando como se deu o processo de execução das perfurações e injeções de calda de cimento, tanto no formato de cortina, para impermeabilização, quanto em pontos específicos para consolidação do maciço rochoso sob a fundação da barragem. A partir de análises realizadas é mostrado o cumprimento dos requisitos solicitados na NBR 7681:2013 e das resistências à compressão esperadas para as caldas de cimento aplicadas. Informações de ensaios e atividades realizadas ao longo da cortina de injeções, também são apresentados. Sendo assim, pode-se concluir que o maciço rochoso apresentou baixa permeabilidade e que as caldas de cimento injetadas atingiram as resistências à compressão especificadas para a construção da PCH.

Palavras-chave: Cortina de injeção. Injeção de calda de cimento. Injeções de consolidação. Tratamento de fundação de barragem.

ABSTRACT

CASE STUDY: CEMENT GROUTING INJECTIONS FOR WATERPROOFING AND CONSOLIDATION OF DAM FOUNDATION.

AUTHOR: Luana Daniel Velasquez

ADVISOR: Prof. Dr. Magnos Baroni

During the stage of the viability study for the implementation of Small Hydroelectric Power Plants, it is of fundamental importance to have knowledge about how it is composed and how the rock mass is presented, in the area of interest, since it will be responsible for supporting the loads resulting from the construction of the structures that compose them. In addition to presenting good mechanical resistance, another very important factor that must be observed is the definition of a foundation treatment that aims to reduce percolation through the dam foundation, thus making the structure safer, since percolation and the resulting pressures are significant sources of instability and one of the biggest problems in relation to dam safety. In this course conclusion work, a study on cement grouts is presented, which were used as a method of treatment of foundation in the small hydroelectric power plant Cachoeira Cinco Veados, located in the central region of Rio Grande do Sul, showing how the process took place. for the execution of perforations and cement grout injections, both in the form of a curtain, for waterproofing, and in specific points for the consolidation of the rock mass under the dam foundation. From the analyzes carried out, compliance with the requirements requested in NBR 7681:2013 and the expected compressive strengths for the cement grout applied is shown. Information on tests and activities carried out along the injection curtain are also presented. Thus, it can be concluded that the rock mass presented low permeability and that the injected cement grouts reached the compressive strengths specified for the construction of the PCH.

Keywords: Injection curtain. Cement grout injection. Consolidation injections. Dam foundation treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da Trincheira de Vedação e demais itens de uma Barragem de Terra	18
Figura 2 - Metodologia executiva de Parede Diafragma	19
Figura 3 - Esquema de uma Cortina Diafragma em fundação de barragem	19
Figura 4 - Fluxograma do processo de injeção	21
Figura 5 - Corte transversal mostrando as injeções de calda de cimento sob a barragem	22
Figura 6 - Esquema de sondagem rotativa	26
Figura 7 - Localização do município de São Martinho da Serra – RS	31
Figura 8 - Vista em planta da estrutura do barramento	32
Figura 9 - Corte longitudinal do barramento	33
Figura 10 - Obturador ao centro da imagem	33
Figura 11 - Esquema longitudinal de injeções de calda de cimento	34
Figura 12 - Perfuração com perfuratriz para injeção de calda de cimento	35
Figura 13 - Execução de ensaio de perda d'água.	37
Figura 14 - Equipamentos empregados durante a injeção	38
Figura 15 - Vista em planta do paleocanal	41
Figura 16 – Mistura da calda	44
Figura 17 – Determinação do Índice de Fluidez com o cone de Marsh	45
Figura 18 - Moldagem de corpos de prova	47
Figura 19 - Ruptura de corpos de prova com prensa eletrohidráulica digital	48
Figura 20 - Média das resistências à compressão axial encontradas para as caldas dosadas em laboratório	51
Figura 21 - Média das resistências à compressão simples de caldas de cimento com traço igual a 0,7:1 dosadas em campo e aplicadas na cortina de injeção	52
Figura 22 - Resumo da permeabilidade encontrada nos furos exploratórios	53
Figura 23 - Consumo de cimento por furo da cortina de injeção	54
Figura 24 - Consumo de cimento por metro em furos injetados na falha geológica da PCH Cachoeira Cinco Veados	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de referência de absorção de calda de cimento.....	24
Tabela 2 - Classificação RQD	28
Tabela 3 - Traço para injeção em função dos resultados obtidos no ensaio de perda d'água.....	40
Tabela 4 - Valores de referência para a obra nos ensaios de resistência à compressão axial.....	47
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de caracterização da calda de cimento relação A/C= 0,70	49
Tabela 6 – Resultados dos ensaios de caracterização da calda de cimento relação A/C = 0,5	50
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de caracterização da calda de cimento relação A/C = 0,4	50
Tabela 8 - Resumo da permeabilidade observada em furos exploratórios	53
Tabela 9 - Consumo de cimento em quilogramas por metro de furo injetado na Cortina de Injeções.....	54
Tabela 10 - Consumo de cimento em quilogramas por metro de furo de consolidação injetado na falha geológica.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PCH's	Pequenas Centrais Hidrelétricas
UHE's	Usinas Hidrelétricas
MW	Mega Watts
Km ²	Quilômetros quadrados
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
MPa	Mega Pascal
A/C	Relação água/cimento
cm ³	Centímetros cúbicos
m	Metros

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo Geral	14
1.1.2 Objetivos Específicos	14
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	14
2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	15
2.1 O QUE SÃO PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS (PCH's)	15
2.1.2 Elementos construtivos	15
2.2 TRATAMENTOS DE FUNDAÇÃO	16
2.2.1 Trincheira de vedação	17
2.2.2 Parede diafragma	18
2.2.3 Injeções de calda de cimento	20
2.2.3.1 <i>Injeções de consolidação</i>	21
2.2.3.2 <i>Injeções de impermeabilização</i>	22
2.2.3.3 Injeções de contato	23
2.2.3.4 Processo executivo de injeção	23
2.2.3.5 Furos de verificação	24
2.2.3.5.1 Sondagem Rotativa	25
2.4 CONTROLE DE QUALIDADE DAS CALDAS DE CIMENTO	28
2.4.1 Fluides	28
2.4.2 Vida Útil	28
2.4.3 Exsudação	29
2.4.4 Expansão	29
2.4.5 Resistência à compressão	29
3 METODOLOGIA	30

3.1 LOCAL DE IMPLANTAÇÃO	30
3.2 BARRAGEM ESTUDADA	32
3.3 INJEÇÕES DE CALDA DE CIMENTO	33
3.3.1 Perfurações a rotopercussão	34
3.3.2 Ensaio de perda d'água sob pressão	35
3.3.3 Execução das injeções	36
3.3.3.1 Pressões de injeção	39
3.3.3.2 Dosagem das caldas de cimento	39
3.4 PALEOCANAL DA PCH CACHOEIRA CINCO VEADOS	40
3.5 LABORATÓRIO	43
3.5.1 Fluidez	44
3.5.2 Vida Útil	45
3.5.3 Exsudação	45
3.5.4 Expansão	46
3.5.5 Resistência à compressão axial	46
4 RESULTADOS	49
4.1 RESULTADOS OBTIDOS EM LABORATÓRIO	49
4.2 RESULTADOS OBTIDOS EM CAMPO	52
5 CONCLUSÃO	56
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

A construção de barragens foi fundamental na história da civilização humana. Pensadas, inicialmente, como forma de combater a escassez no abastecimento de água, com o passar do tempo também foram empregadas com outras finalidades, como regulação de vazões, geração de energia hidrelétrica e armazenamento de resíduos da indústria de mineração. Com a finalidade de geração de energia, a primeira barragem construída no Brasil foi a de Ribeirão do Inferno, em 1883, no rio Jequitinhonha em Minas Gerais, para fornecer energia a uma mina de extração de diamantes. Atualmente, segundo o Balanço Energético Nacional para o ano de 2021, somos o 2º país que mais gera energia hidrelétrica no mundo. (EPE, BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2021, p. 197)

No que se refere a construção de barragens para geração de energia hidrelétrica, é de suma importância que essa estrutura apresente estanqueidade e segurança, de modo que pequenas vazões decorrentes da percolação e da drenagem interna se mantenham dentro dos valores padrão utilizados como referência. A principal forma de realizar o controle de percolação, que é a passagem de água através da fundação dessas estruturas, é prevendo um tratamento de fundação ou um conjunto deles. Dessa forma, será abordado o tratamento através de injeções de calda de cimento em formato de cortina (injeções de impermeabilização) e, também, para consolidação (injeções de consolidação).

A calda para injeção é um material obtido através da mistura de cimento e água, podendo ser adicionados, eventualmente, outros componentes minerais, como areia, e é destinada ao tratamento de fundação de forma que sele os vazios, fraturas ou descontinuidades, tornando o maciço rochoso menos permeável, conferindo maior resistência e menor deformabilidade, sobre o qual seja seguro construir.

Neste trabalho, buscou-se entender a importância que esse tipo de tratamento representa no controle de percolação em maciços rochosos que servem de fundação para barragens, apresentando os métodos executivos de perfuração, ensaios e da injeção propriamente dita.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Demonstrar a necessidade e a importância de tratamentos de fundação de barragens, os principais tipos de tratamento e mais especificamente, o tratamento através de injeções de calda de cimento e o seu processo executivo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar o método de execução de injeções de calda de cimento para impermeabilização e para consolidação das fundações da barragem da PCH Cachoeira Cinco Veados;
- Mostrar os resultados obtidos em ensaios, seguindo a NBR 7681, realizados em laboratório para caracterização de alguns traços de calda de cimento;
- Mostrar de forma empírica os resultados obtidos com ensaios de laboratório realizados para caldas dosadas in loco, que formaram uma cortina de injeção.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Inicialmente, será feita a revisão de conceitos e técnicas necessários para dar justificativa ao uso do método de tratamento de fundação de barragens por meio de injeções de calda de cimento. Em seguida, na metodologia, será apresentado o local de implantação da barragem, bem como suas características, e o que levou a decisão de adotar tal tratamento. Ainda no mesmo capítulo, há um caso prático, em que foi de suma importância realizar esse tipo de tratamento. Será explicado o processo executivo, e em resultados será demonstrado o cumprimento das características requeridas por norma regulamentadora, os resultados dos ensaios de perda d'água e a injetabilidade das caldas que promoveram, em conjunto com outros fatores, o controle de percolação pela fundação da estrutura.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 O QUE SÃO PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS (PCH'S)

Consideradas fontes alternativas de geração de energia por resultarem em menores impactos ambientais, as pequenas centrais hidrelétricas, "PCH's", complementam a matriz energética com custos de construção bem inferiores às usinas hidrelétricas, "UHE's", contribuindo também, para a descentralização da geração de energia. Falando de potência já instalada, as PCH's estão situadas em 4º lugar, em relação à geração, entre as fontes de energia do país com um pouco mais de 5500,44 "MW" gerados. E para se enquadrarem nessa definição, devem ter sua potência instalada entre os valores de 5 MW e 30 MW e uma área de reservação de até 3 Km², excluindo-se a calha regular do rio. A área do reservatório é delimitada pela cota d'água associada à vazão de cheia com tempo de recorrência de 100 anos. (RESOLUÇÃO ANEEL 394/1998).

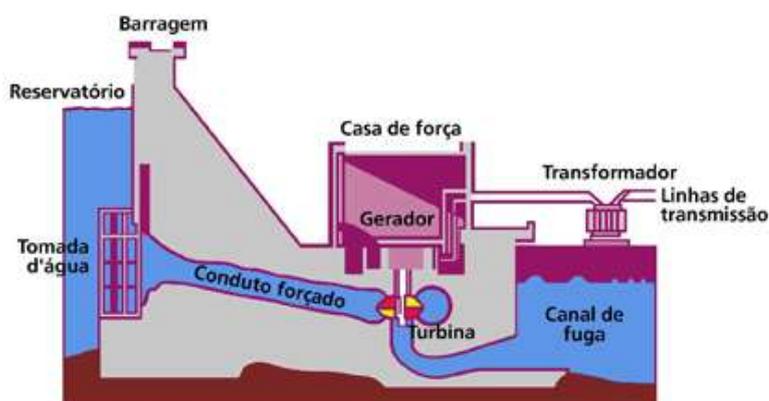
Segundo relatório de expansão da matriz energética da ANEEL para o ano de 2021, as PCH's agregaram à matriz 114,14 MW, 1,51% do total anual. E do total dos empreendimentos outorgados em implantação, a construção de novas PCH's representa 3,13% do montante dos Mega Watts esperados. (ANEEL, RELATÓRIO DE EXPANSÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA, 2021).

2.1.2 Elementos construtivos

As PCH's são compostas, basicamente, por barragem, vertedouro, tomada d'água, casa de força e subestação. Começando pela estrutura do barramento, que é responsável por represar a água a sua montante, garantindo a carga hidráulica e a vazão necessárias para a geração de energia elétrica. Essa estrutura pode ser construída em concreto convencional vibrado, concreto compactado com rolo, enrocamento com face de concreto, enrocamento com núcleo asfáltico, núcleo de terra com enrocamento de proteção ou homogênea de terra.

O tipo de vertedouro normalmente adotado na construção de PCH's é um vertedouro incorporado ao barramento que a partir de um certo nível d'água começa a verter naturalmente, visto que não há aqui comportas, conservando a vazão natural do curso do corpo hídrico. A Figura 1 ilustra um esquema básico de uma PCH.

Figura 1 - Esquema básico de uma PCH



Fonte: Associação Brasileira de PCH's e CGH's (2022).

A Tomada d'água é a estrutura que fará a captação e, através de um ou mais condutos forçados, direcionar a água até a turbina. Devem ser instaladas grades que evitem a passagem de objetos grandes que poderiam causar danos aos condutos e às turbinas. Dependendo do comprimento do conduto forçado, é necessário que sejam incorporadas comportas à essa estrutura.

A Casa de Força pode ser construída, assim como o vertedouro, juntamente ao corpo do barramento ou em outro ponto. Na Casa de Força ficam localizadas as turbinas, geradores, caixa espiral, sala de comando e demais equipamentos eletromecânicos. Os condutos forçados são responsáveis por direcionar o fluxo da água até as turbinas.

2.2 TRATAMENTOS DE FUNDAÇÃO

Quando se pensa em construir um empreendimento utilizando um barramento como forma de reserva de água a montante, seja ele para geração, consumo, regulação ou irrigação, uma das principais preocupações e indicativos de eficiência é justamente a estanqueidade dessa estrutura. Os empreendimentos que visam a geração de energia elétrica passam por um estudo de viabilidade de implantação, que, entre outros fatores, será responsável por analisar as características geológicas do terreno. Busca-se, dentro de uma área de interesse em algum trecho do curso da

água, rocha sã, com resistência suficiente para suportar o peso da estrutura a ser construída e que apresente baixa permeabilidade.

E mesmo no caso de fundação sobre rocha sã, seja o núcleo do barramento formado por solo ou concreto, há a preocupação com o controle de percolação no contato rocha-barragem e por possíveis fissuras e planos de corte presentes na rocha de fundação. Portanto, deve haver o controle de percolação sob o barramento.

A melhor e evidentemente mais efetiva maneira de controlar a percolação pela fundação é a interceptação total do material permeável com uma trincheira ou cortina. Quando este recurso pode ser utilizado, e é corretamente executado, tanto a vazão pela fundação como os gradientes de saída se tornam irrisórios. (SANDRONI, 2006, p.4.).

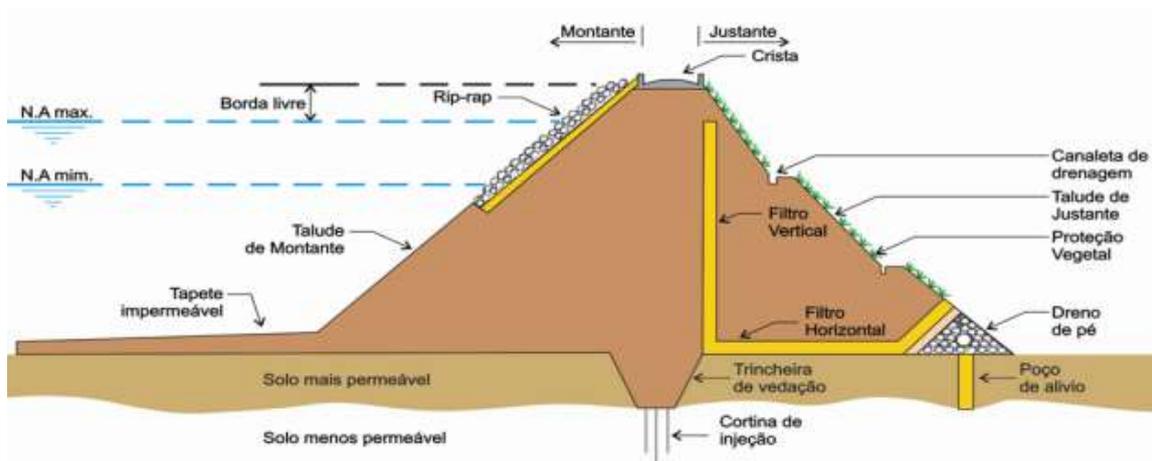
Existem diversos métodos para tratamento de fundação de barragens, para que de algum modo se possa aumentar o caminho de percolação, o que eleva o coeficiente de segurança, tornando essas mais seguras. A seguir, será feita a exposição de alguns dos principais métodos.

2.2.1 Trincheira de vedação

Um dos métodos mais simples e acessíveis para construção de um barramento em um país com abundância de solos argilosos, a trincheira de vedação, também chamada de cut-off, consiste em camadas de solo impermeável compactadas no sentido perpendicular ao fluxo da água, em trincheiras escavadas na fundação, sob o núcleo da barragem de terra.

Por apresentar baixo coeficiente de permeabilidade, na ordem de $1 \cdot 10^{-6}$ podendo chegar até $1 \cdot 10^{-9}$, os solos argilosos são empregados na construção dessas estruturas. A Figura 2, abaixo, traz a representação deste método aplicado à construção de uma barragem homogênea.

Figura 2 - Representação da Trincheira de Vedação e demais itens de uma Barragem de Terra



Fonte: Prof. David de Carvalho (UNICAMP-SP).

2.2.2 Parede diafragma

Outro método de tratamento de fundação é a parede diafragma que consiste em uma estrutura impermeável formada a partir de uma trincheira escavada na fundação, sendo, na sequência, concretada formando painéis individuais, com largura variando de 0,40 a 1,50 metros, que ao final resultam em uma parede.

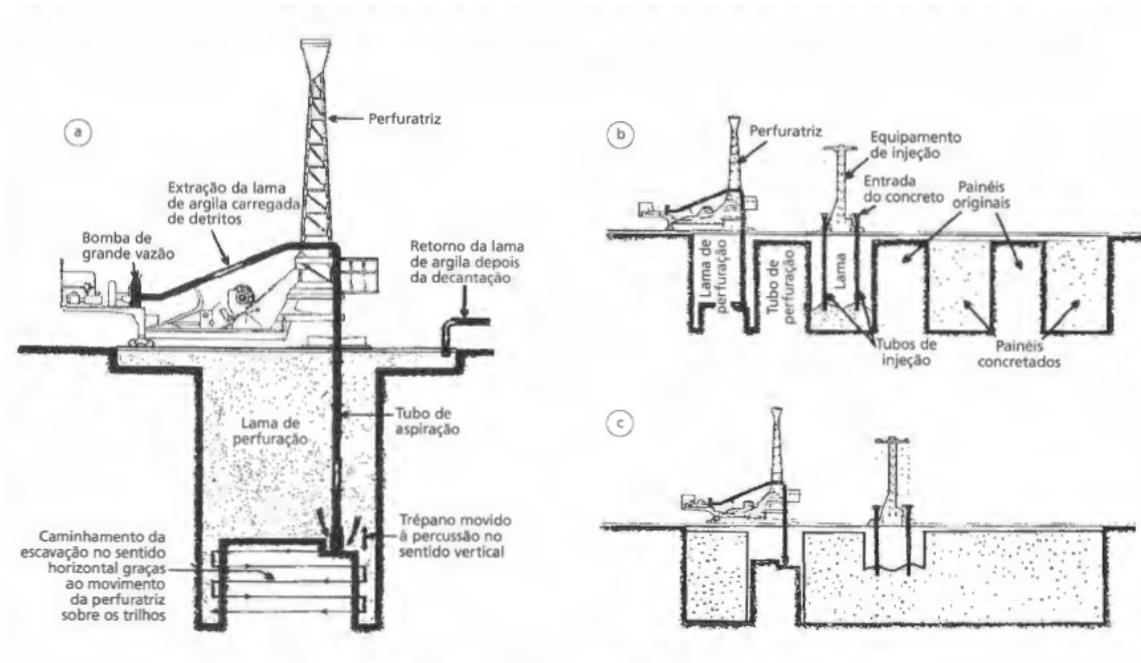
A parede diafragma tem como principais vantagens os fatos de que pode ser construída em grandes profundidades e de poder ser executada mesmo abaixo do nível d'água, o que já garante uma vantagem em relação à trincheira de vedação. Isso porque, durante a escavação da trincheira para execução da concretagem dos painéis, é utilizada lama bentonítica para garantir a estabilidade das paredes da escavação.

Geralmente, a escavação é feita com o emprego do clamshell e/ou de uma hidrofresa, que vai escavando painéis no solo da seguinte forma: em uma primeira etapa de escavação, executam-se painéis alternando entre escavação e espaços de solo original para que numa segunda etapa de escavação retorne e se escave os painéis onde permaneceu o terreno original. Isso tudo, ao longo de um eixo pré-definido onde se deseja criar essa barreira física de controle de percolação.

Pode ser rígida, conforme exposto à cima, plástica que é quando ao invés de concreto se injeta uma mistura de água, cimento e bentonita denominada "coulis" ou

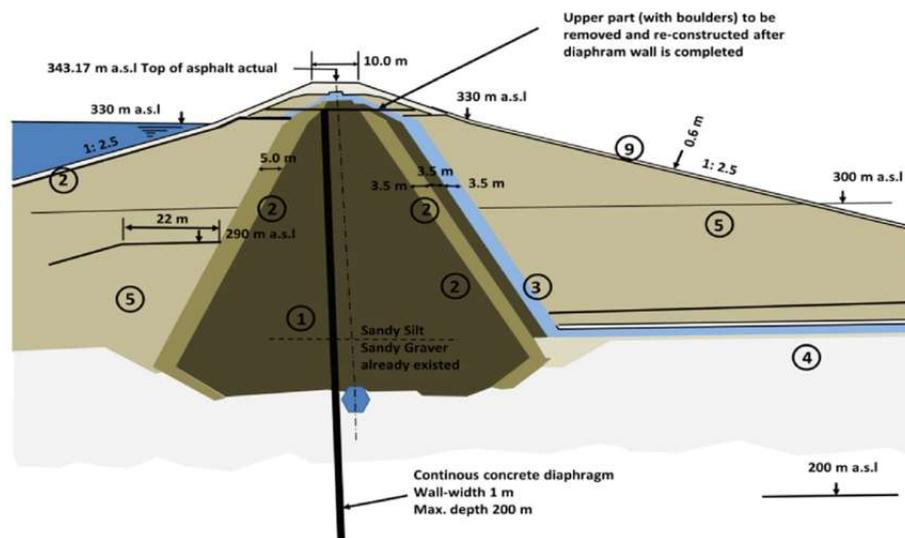
pré-moldada. A Figura 3 demonstra um esquema da metodologia de execução de paredes diafragma. E a Figura 4 mostra o esquema de uma Cortina Diafragma em fundação de barragem.

Figura 3 - Metodologia executiva de Parede Diafragma



Fonte: COSTA, W.D. Geologia de Barragens, Oficina de Textos, 2012. p. 235.

Figura 4 - Esquema de uma Cortina Diafragma em fundação de barragem



Fonte: Nadhur Al-Ansari, Nasrat Adamo, Sven Knutsson e Jan Laue (2020).

2.2.3 Injeções de calda de cimento

As injeções de calda de cimento são técnicas já difundidas na construção de barragens e objetivam preencher os vazios oriundos de pequenas fraturas existentes na rocha de fundação.

Quando um maciço rochoso se encontra muito diaclasado ou fraturado, um tratamento por injeção de caldas à base de cimento para preenchimento dessas fraturas pode devolver ao maciço as características geotécnicas que este apresentava antes de sofrer fraturação:

Melhorar a sua capacidade resistente e diminuir a sua deformabilidade;

Acessoriamente, diminuir também o caudal de água. (GAMA, 2012, p.8.).

O recurso mais comum de controle da percolação em fundações rochosas são as cortinas de injeção de cimento. Elas são utilizadas na rocha de fundação de praticamente todas as obras de barramento de concreto. Sua função primordial é diminuir a vazão pela fundação de forma a reduzir a solicitação do sistema de drenagem. (SANDRONI, 2006, p.5.).

Em princípio, as vedações, tanto da barragem como da fundação, devem ser centrais, ou seja, localizadas a partir do eixo da barragem e estendendo-se para a montante. Em casos particulares, a vedação pode estar localizada no espaldar de montante ou mesmo sobreposta a este, como no caso de barragens de enrocamento com paramento de concreto. (CRUZ, 2008, p. 358.).

Segundo Naresi Júnior (2022), as injeções têm, principalmente, o intuito de:

- Retirada e redução de vazamento a níveis aceitáveis de barragens de solo, concreto, reduzindo a perda d'água por percolação e vazamento, devido a vício da construção, nestes maciços;
- Controlar a pressão d'água dentro do maciço da fundação e no contato estrutura – fundação da barragem, deixando a barragem estável;
- Melhorar a resistência mecânica e as propriedades elásticas das rochas fraturadas;
- Consolidação de solos moles, melhorando a capacidade de carga e suporte destes tipos de solos;
- A real necessidade ou tratamento final depende de alguns fatores técnicos: Percolação de água em locais onde é necessário a estanqueidade das estruturas;

Existem diferentes tipos de injeções para diferentes finalidades. Neste trabalho, serão citadas as injeções de consolidação, impermeabilização e contato bem como as suas aplicações. Antes disso, a Figura 5 traz um fluxograma dos tipos e processo de injeção.

Figura 5 - Fluxograma do processo de injeção



Fonte: Própria (2021).

2.2.3.1 Injeções de consolidação

As injeções de consolidação aumentam a compacidade das rochas, aumentando a sua resistência mecânica e seu módulo de elasticidade. Empregam-se em rochas fraturadas de baixa resistência e refletem, também, na sua impermeabilização.

Diante de tal finalidade, são utilizadas na presença de descontinuidades e falhas na rocha de fundação, onde poderia vir a ocorrer o assentamento da barragem devido ao seu peso e, nesses casos, não necessariamente respeitam um traçado

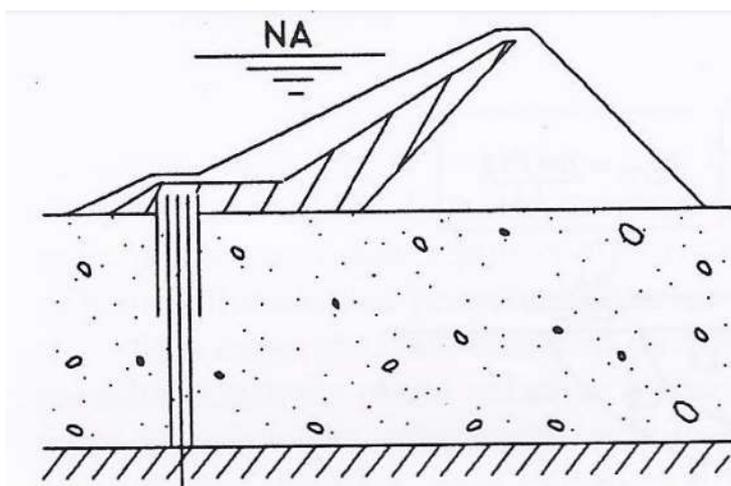
único e retilíneo, mas sim, se distribuem paralelamente à cortina de injeções de impermeabilização.

2.2.3.2 Injeções de impermeabilização

As injeções de impermeabilização são destinadas ao preenchimento de fissuras e descontinuidades presentes nas rochas, para que, como o próprio nome já sugere, tornem impermeável a fundação de uma estrutura.

Comumente aplicadas no formato de cortina, ou seja, várias injeções ao longo de toda a extensão longitudinal de um barramento, espaçadas e aprofundadas de forma pré-definida, para vedação, dificultando a percolação e diminuindo a subpressão. Em barramentos de concreto, geralmente, a linha de injeção se encontra o mais a montante possível. Já em barragens de terra, o eixo pode localizar-se a montante ou centralizado sob a zona impermeável do barramento. A Figura 6 mostra um corte transversal de uma barragem onde aplicou-se mais de uma linha de injeções de calda de cimento.

Figura 6 - Corte transversal mostrando as injeções de calda de cimento sob a barragem



Fonte: Euzébio José Gil – Curso de Segurança de Barragens.

2.2.3.3 Injeções de contato

As injeções de contato objetivam eliminar os vazios existentes entre um maciço de concreto e as fundações rochosas. (COSTA, 2012. p. 236).

Também podem ser executadas para vedação entre chapa de aço e concreto, como por exemplo, em caixas espirais e tubos de sucção.

2.2.3.4 Processo executivo de injeção

Equipamentos rotopercussivos, como a perfuratriz, realizam as perfurações seja em solo, rocha ou concreto, até a profundidade requerida em especificação e projetos técnicos.

Conforme Costa (2012), embora o número de linhas de tratamento das fundações em barragens no Brasil tenha sido muito variável, as alternativas mais empregadas são duas: linha única, centralizada no eixo ou a montante, e linha tripla (uma no eixo, uma a montante e outra a jusante desse eixo).

Ainda segundo esse autor, quando o tratamento é realizado por meio de uma única linha de furos, estes devem ser alinhados ao longo do eixo da barragem de terra ou enrocamento ou no trecho de montante, nas barragens de concreto. Nesse último caso, os furos são geralmente situados no pé de montante, mas podem ser também realizados a partir da galeria de drenagem, desde que executados antes dos furos de drenagem, para não haver o risco de estes colmatarem.

Ao longo da linha única de tratamento, os primeiros furos - denominados furos primários - são geralmente espaçados de 12 m. Em função dos seus resultados, após injetados, são intercalados os furos secundários, perfazendo um espaçamento de 6 m entre as duas fases de perfuração. A avaliação dos resultados dos testes de permeabilidade e de absorção de calda definirá a necessidade de novas intercalações em uma terceira fase, onde os furos terciários distarão apenas 3 m dos primários e secundários. Eventuais necessidades de complementação localizada de tratamento poderão exigir a realização de furos quaternários, que são geralmente inclinados, buscando vedar melhor trechos revelados mais problemáticos nas fases anteriores a diferentes profundidades.

Segundo Levis (2006), as injeções podem ser feitas de duas maneiras: descendente ou ascendente. O método dos estágios ascendentes consiste em abrir o

furo de uma só vez em toda a sua profundidade e injetá-lo de baixo para cima, em diversos estágios de injeção. Os estágios, em geral, coincidem com a subdivisão das zonas, sendo que às vezes uma zona pode ser dividida em mais de um estágio, dependendo das suas características de permeabilidade. No método dos estágios descendentes, as operações seguem, ordem inversa, abrindo-se o furo somente até o fim da zona mais superficial, injetando-a, reabrindo o furo antes da pega final da calda, perfurando a zona seguinte e repetindo-se o processo até o final do furo.

Para que se tenha um parâmetro dos valores de absorção de calda de cimento, utiliza-se um critério proposto por DEERE (1977) e que está exposto na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de referência de absorção de calda de cimento

Designação da Absorção	Peso de cimento absorvido por metro de furo (Kg/m)
Muito baixa	0 a 12,5
Baixa	12,5 a 25
Moderadamente baixa	25 a 50
Moderada	50 a 100
Moderadamente alta	100 a 200
Alta	200 a 400
Muito Alta	Mais de 400

Fonte: DEERE (1977).

2.2.3.5 Furos de verificação

O controle final da cortina é, em geral, efetuado com a execução dos furos de injeção ou com sondagens rotativas, para assegurar que as injeções homogeneizaram o maciço rochoso, reduzindo as altas permeabilidades e as concentrações de fluxo (AZEVEDO, 1993).

Executados através de sondagens rotativas com recuperação de testemunhos, os pontos de sondagem serão definidos com base nos boletins de injeção que, devem ser entre furos onde foram verificados os maiores consumos de calda. Após a

realização da sondagem e recuperação dos testemunhos, deve ser feito ensaio de perda d'água sob pressão e posteriormente reinjetados.

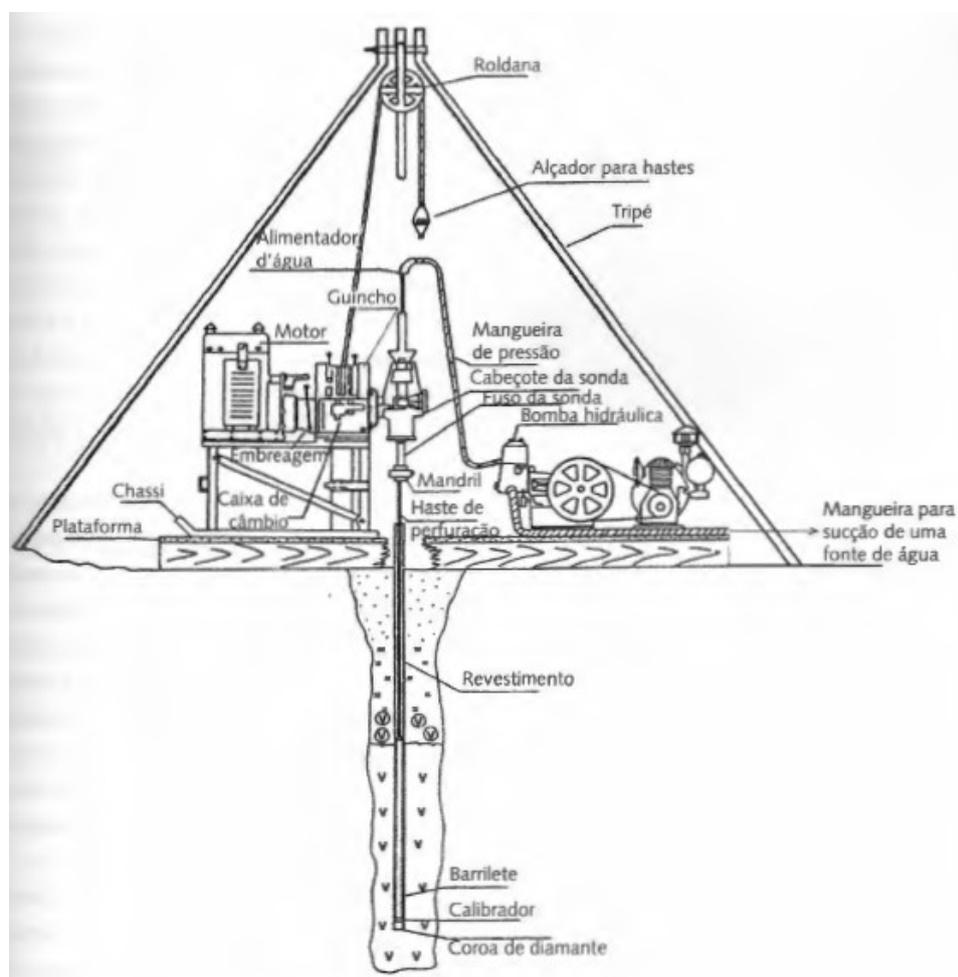
2.2.3.5.1 Sondagem Rotativa

Segundo o Manual de Sondagens da ABGE, a sondagem rotativa é um método de investigação que consiste no uso de um conjunto motomecanizado destinado à perfuração de maciços rochosos e obtenção de amostras de materiais rochosos com formato cilíndrico, chamadas de testemunhos. Pode também amostrar solos e outros materiais e serve de acesso para a realização de diversos ensaios.

São identificadas pelas letras SR seguidas de número indicativo e quando for necessária a execução de mais de um furo num mesmo ponto de investigação, os furos subsequentes terão a mesma numeração do primeiro, acrescida de letras. (BOLETIM nº 3, 5ª edição, 2013, p. 61).

A Figura 7 apresenta um esquema desse tipo de sondagem em que a engrenagem mecânica acionada por um motor é responsável pela rotação dos equipamentos de corte e amostragem, denominados, respectivamente, coroa e barrilete. A água bombeada sob pressão objetiva evitar o superaquecimento da coroa durante o corte da rocha. (COSTA, 2012, p.158).

Figura 7 - Esquema de sondagem rotativa



Fonte: Modificado de ABGE (1998).

O equipamento utilizado para executar a sondagem rotativa, mostrado na Figura 7, é composto por:

- a) Sonda rotativa, de acionamento manual, mecânico ou hidráulico:
 - i. Motor à combustível ou elétrico;
 - ii. Guincho;
 - iii. Cabeçote de perfuração;
- b) Hastes: tubos de 1,5 a 6,0 metros de comprimento ligados por niples, usados para transmitir movimentos de rotação e perfuração à ferramenta de corte e conduzir água para a refrigeração e limpeza do furo;
- c) Barriletes: tubos destinados a receber o testemunho, podendo ser dos seguintes tipos:

- i. Simples: o testemunho é exposto ao fluído de circulação. Utilizado para rochas brandas de excelente qualidade;
 - ii. Duplo-rígido: constituídos por dois tubos com mesmo sentido de rotação, entre os quais circula o fluído. Utilizado para rochas de boa qualidade;
 - iii. Duplo-livre: o tubo interno é estacionário, sendo empregado quando se pretende recuperar o material de enchimento das descontinuidades das rochas;
 - iv. Tubo interno removível: o tubo interno é retirado de dentro da coluna de perfuração, permitindo alta recuperação do material perfurado;
- d) Coroas: elementos de corte constituídos por:
- i. Matriz: elemento de fixação dos diamantes;
 - ii. Corpo: ligação da coroa com os elementos superiores;
 - iii. Saídas d'água: espaço para saída de água de refrigeração;
 - iv. Diamantes industriais: cravados ou impregnados;
- e) Revestimentos: para estabilização dos furos, quando necessário;
- f) Sistema de circulação de água: formado por conjunto motor-bomba, tanque e mangueiras, destinado à refrigeração da coroa, expulsão dos detritos e adicional estabilização das paredes por pressão hidrostática;
- g) Caixas de testemunhos.

A quantidade de testemunhos retida no barrilete, dada em percentagem entre a extensão da amostra e o comprimento perfurado, é denominada recuperação. Considera-se como extensão da amostra o somatório de todos os trechos em que se compartimentou o testemunho durante uma manobra, independentemente do comprimento de cada um desses trechos. Denomina-se manobra na sondagem rotativa cada ciclo de corte e retirada do testemunho do interior do barrilete. (COSTA, 2012, p.158).

O RQD - rock quality designation – é o índice que quantifica a qualidade da rocha. Representado na Tabela 2, é calculado através de testemunhos, representa a relação entre a soma de todos os testemunhos de material maiores do que 10 centímetros e o comprimento total do furo de amostragem multiplicada por 100, como ilustra a equação (1):

$$RQD(\%) = \frac{\sum li(> 10cm)}{L} * 100 \quad (1)$$

Tabela 2 - Classificação RQD

RQD	Qualidade do maciço rochoso
0-25%	Muito fraco
25-50%	Fraco
50-75%	Razoável
75-90%	Bom
90-100%	excelente

Fonte: DEERE, (1988).

2.4 CONTROLE DE QUALIDADE DAS CALDAS DE CIMENTO

Agora no âmbito das normativas técnicas, utiliza-se a NBR 7681/2013 como parâmetro para coordenar os ensaios em laboratório. Esta, é formada por quatro partes, a saber: Parte 1 - requisitos; Parte 2 – Determinação do índice de fluidez e vida útil; Parte 3 – Determinação do índice de exsudação e expansão e Parte 4 – Determinação da resistência à compressão.

Da parte de requisitos, expõe-se a seguir alguns conceitos importantes:

2.4.1 Fluidez

O índice de fluidez da calda de injeção, imediatamente antes de ser injetada, não deve exceder o valor de 12 segundos.

2.4.2 Vida Útil

Não é admitida calda cujo índice de fluidez ultrapasse o valor de 12 segundos, durante o período de 30 minutos, após a conclusão da mistura.

2.4.3 Exsudação

A água exsudada deve ser no máximo 2% do volume inicial da calda, medida por 2 horas após a mistura.

2.4.4 Expansão

A expansão total livre deve ser no máximo 7% do volume inicial de calda, medida por 2 horas após a mistura.

2.4.5 Resistência à compressão

A parte 4 da norma estabelece o método para moldagem, cura e determinação da resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos. A calda deve apresentar resistência à compressão axial superior ou igual a 35 MPa aos 28 dias de idade.

3 METODOLOGIA

Realizar-se-á um estudo de caso do processo executivo das injeções de calda de cimento realizadas na PCH Cachoeira Cinco Veados, técnica essa adotada como forma de tratamento das fundações do barramento, visando o controle tecnológico da percolação da água. Ainda neste capítulo, serão apresentados os resultados laboratoriais realizados para os diferentes traços das caldas de cimento aplicadas, os resultados dos ensaios de perda d'água, bem como analisar-se-ão os consumos das caldas injetadas.

Contudo, para um melhor entendimento do trabalho, será apresentado de maneira prévia os aspectos geológicos do local de implantação das PCH Cachoeira Cinco Veados e a exposição de como se deram as atividades de execução das perfurações.

3.1 LOCAL DE IMPLANTAÇÃO

O empreendimento pertence ao chamado Complexo Toropi, e está localizado no rio Toropi, na divisa dos municípios de São Martinho da Serra e Quevedos, na região central do estado do Rio Grande do Sul, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Localização do município de São Martinho da Serra – RS



Fonte: Raphael Lorenzeto de Abreu (2006).

Com relação a geologia local, ROBAINA et al 2010 e WILDNER, 2006, destacam o seguinte:

Na região central do Rio Grande do Sul, está localizado o município de São Martinho da Serra que é representado pela unidade geomorfológica do Planalto das Missões entre os modelados de Patamares do Planalto e o rebordo do Planalto, que apresentam sua origem ligada ao vulcanismo que cobriu os sedimentos da Bacia do Paraná no final do Mesozóico (ROBAINA et al 2010). Seu substrato litológico é com predominância de rochas ígneas da Formação Serra Geral, porém, nas menores altitudes afloram os arenitos de granulometria grossa a fina, frequentemente com clastos de argila, com estratificação cruzada, designados da Formação Caturrita (WILDNER, 2006).

Tendo conhecimento da formação geológica do maciço de fundação dessa barragem, no projeto executivo, os projetistas optaram pelo emprego de injeções de calda de cimento como forma de tratamento de fundações, visando a impermeabilização, em formato de cortina, de modo a dificultar a percolação e diminuir a condutividade hidráulica pelo maciço rochoso. Também foram executadas injeções de consolidação, buscando a obtenção de um maciço mais resistente, e injeções de

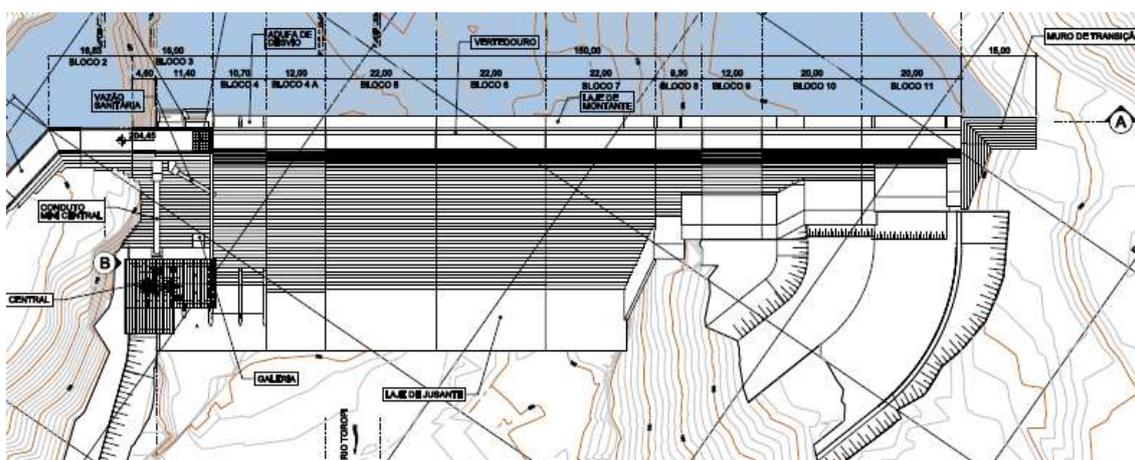
contato, objetivando a vedação no contato entre o concreto e rocha, de modo a unir as estruturas às formações geológicas existentes.

3.2 BARRAGEM ESTUDADA

A PCH Cachoeira Cinco Veados é uma pequena central hidrelétrica em fase final de construção, que apresenta potência instalada de 16,227 MW gerados por turbinas tipo dupla Francis e geradores síncronos de eixo horizontal a partir de um reservatório de 1,35 Km² abastecido pelas águas do rio Toropi, no centro do Rio Grande do Sul. Apesar de haver um reservatório, por sua capacidade ser pequena, essa PCH pode ser enquadrada no regime de fio d'água. Apresenta, ainda, uma mini-central junto à estrutura da barragem, para manutenção da vazão sanitária e aproveitamento hídrico por meio de uma turbina Francis simples com gerador síncrono de eixo horizontal.

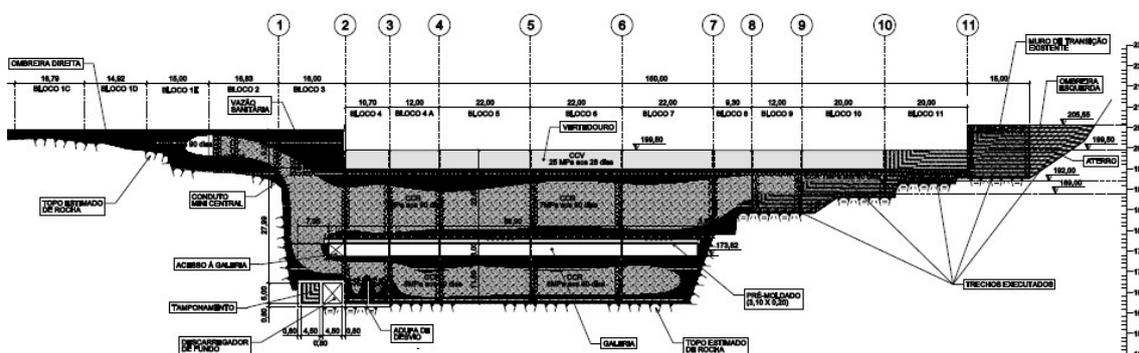
Construída em concreto convencional vibrado (CCV) e, em sua maior parte, por concreto compactado com rolo (CCR), a estrutura da barragem é do tipo gravidade, sendo que em sua maior seção no rio apresenta altura máxima de aproximadamente 55 metros. O vertedouro, em soleira livre, tem 150 metros de extensão. As Figuras 9 e 10, mostram em vista e em corte a estrutura do barramento.

Figura 9 - Vista em planta da estrutura do barramento



Fonte: GeoEnergy (2021).

Figura 10 - Corte longitudinal do barramento



Fonte: GeoEnergy Engenharia (2021).

3.3 INJEÇÕES DE CALDA DE CIMENTO

As injeções de calda de cimento foram realizadas em estágios ascendentes, onde se executa um furo em todo seu comprimento ou prolonga-se um furo a uma profundidade pré-determinada para injetá-lo, a partir do fundo, em trechos consecutivos de 3,0 metros, limitados interiormente pelo obturador, ilustrado na Figura 11, a diferentes profundidades, o sistema de injeção é tal que a calda de cimento possa ser introduzida em diferentes profundidades do furo, mediante o emprego de obturadores.

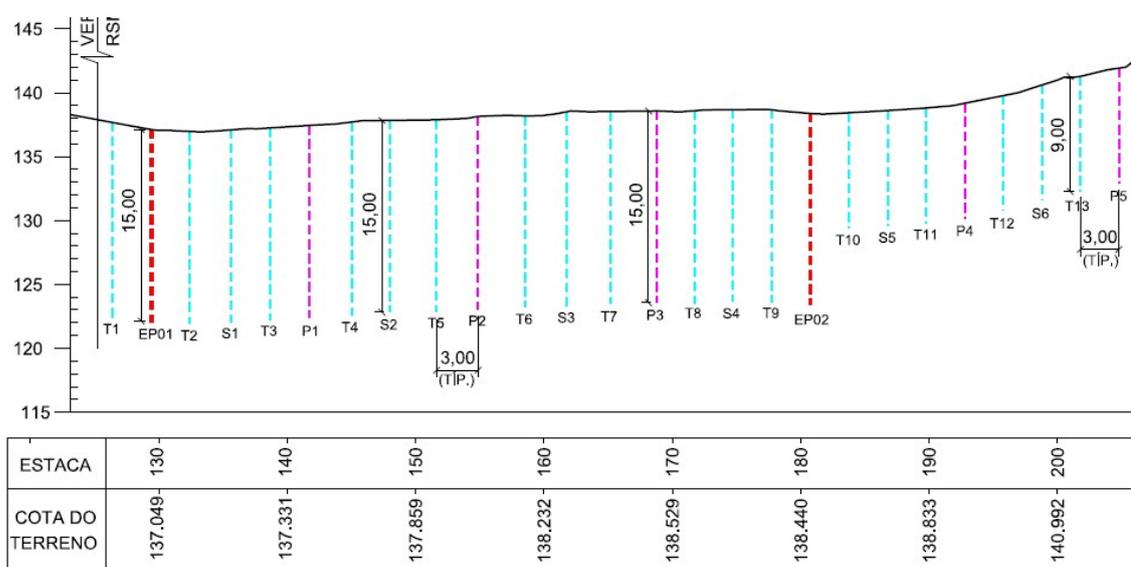
Figura 11 - Obturador ao centro da imagem



Fonte: Autora (2021).

Para essa etapa da investigação geotécnica, os furos exploratórios foram realizados a cada 48 metros, os primários a cada 12 metros, assim como os secundários e, os terciários a cada 6 metros. Havendo a necessidade de furos quaternários, devem ser executados a cada 3 metros, conforme ilustrado na Figura 12, abaixo.

Figura 12 - Esquema longitudinal de injeções de calda de cimento

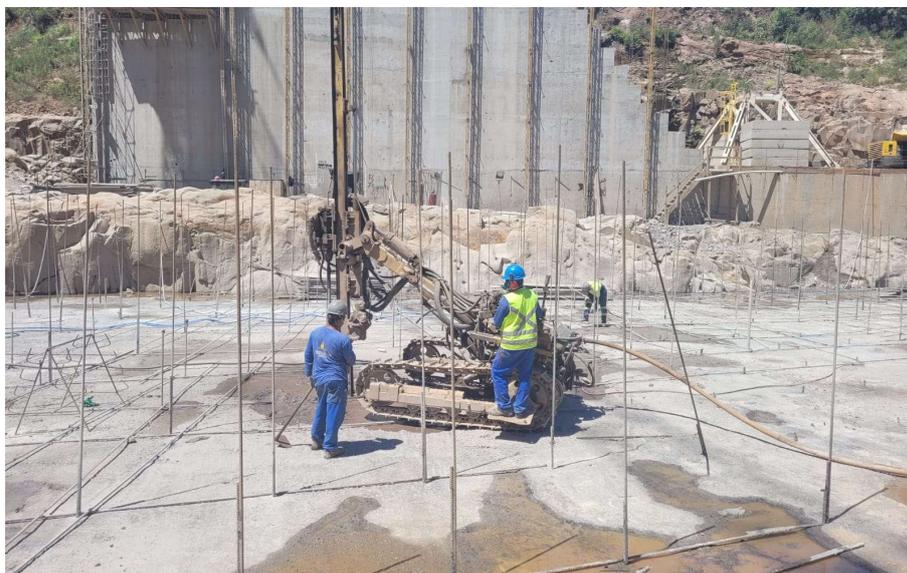


Fonte: GeoEnergy Engenharia (2021).

3.3.1 Perfurações a rotopercussão

As perfurações a rotopercussão ou percussiva, foram realizadas para a abertura dos furos para injeção de calda de cimento. Nas operações realizadas, foram utilizados equipamentos para perfuração rotopercussiva ou percussiva, a ar comprimido, dotados de todos os recursos para posicionamento a qualquer orientação e previstos para execução de furos com diâmetros de 50 mm a 150 mm e profundidade de até 60 metros. As perfurações a rotopercussão foram empregadas em trabalhos a céu aberto. A Figura 13 exibe uma perfuratriz perfurando uma superfície de concreto para realizar injeções de calda de cimento com a finalidade de consolidação.

Figura 13 - Perfuração com perfuratriz para injeção de calda de cimento



Fonte: Autora (2021).

3.3.2 Ensaio de perda d'água sob pressão

Segundo o Manual de Sondagens da ABGE, o ensaio de perda d'água sob pressão (EPA), realizado em maciços rochosos por meio de furos de sondagens, visa à determinação das características de permeabilidade e do comportamento desses maciços frente à percolação d'água.

Para realizar pesquisas geológicas e geotécnicas, nos furos exploratórios e nos furos de verificação foram executados ensaios de perda d'água sob pressão no método ascendente, em trechos de 3 metros. Executados, em cinco estágios de pressão, usando-se a sequência pressão mínima, pressão intermediária, pressão máxima, pressão intermediária e pressão mínima. A pressão máxima nos ensaios será definida de acordo com as expressões (2) e (3).

$$P_{\text{máx}} = 0,25 \text{ kgf/cm}^2 \times (H_{\text{ob}} + \frac{1}{2} T) \text{ no caso de rochas competentes, ou} \quad (2)$$

$$P_{\text{máx}} = 0,15 \text{ kgf/cm}^2 \times (H_{\text{ob}} + \frac{1}{2} T) \text{ no caso de rochas brandas} \quad (3)$$

Onde:

H_{ob} = profundidade do obturador em metros medida na vertical;

T = comprimento em metros do trecho ensaiado.

Em função da condutividade hidráulica observada durante os ensaios de perda d'água sob pressão, dependendo do caso, foram adotadas pressões de ensaio diferenciadas para melhor avaliar as condições de permeabilidade do maciço rochoso. A pressão mínima no ensaio é sempre igual a 0,10 kgf/cm² e a pressão intermediária será metade da pressão máxima.

A duração de cada estágio, trecho isolado de 3 metros, tanto em furos exploratórios como em furos de verificação, foi de no máximo de 10 minutos, contados do final do período de estabilização de pressões. Em todos os furos, caso os três primeiros estágios apresentem perdas nulas, o quarto e o quinto estágios podem ser suspensos.

3.3.3 Execução das injeções

Para execução das injeções, a disposição dos equipamentos inclui um circuito de retorno, convenientemente concebido, para que a calda de cimento possa circular, continuamente, ao longo da tubulação, a fim de evitar a obstrução da mesma e, simultaneamente, permitir um controle acurado da pressão no furo, por menor que seja o volume de calda injetado.

Os equipamentos de injeção compreendem uma unidade injetora completa.

Cada unidade injetora inclui:

- Uma bomba injetora do tipo avanço, com rosca de eixo helicoidal, capaz de manter a pressão de descarga mais uniforme possível, e de operar a uma pressão máxima de 2,1 MPa;
- Um misturador mecânico de alta velocidade, capaz de preparar a calda de cimento no estado coloidal, em quantidade suficiente para suprir a bomba injetora;
- Um tanque provido de agitador mecânico, com capacidade mínima igual a três vezes a vazão máxima da bomba durante um minuto, sendo que os agitadores deverão estar equipados com pás que imprimam à calda velocidades não inferiores a 2,0 m/s. A tubulação de saída de calda do depósito deverá estar situada, no mínimo, a 20 cm acima do fundo do agitador;

- Um reservatório de água de, no mínimo, 8.000 litros para ser utilizado no preparo da calda de cimento, ensaios e lavagem dos furos e dos equipamentos de injeção;
- Hidrômetros de precisão, graduados em litro e fração de litro, devidamente aferidos, com certificados de calibração.
- Um manômetro rastreável, adequadamente graduado, de alta precisão (1%), para aferição periódica dos demais manômetros;
- Manômetros com graduações adequadas às pressões a serem aplicadas. Tais manômetros deverão ser aferidos, no campo, quinzenalmente.
- Válvulas, mangueiras de pressão com engate rápido, linhas de alimentação, obturadores com tubos pneumáticos ou anéis expansivos de borracha e ferramentas comuns, em quantidade e qualidade adequadas à execução dos serviços;
- Salvamanômetro, que consiste em uma peça localizada na entrada do manômetro para proteção do manômetro.

Figura 14 - Execução de ensaio de perda d'água.



Fonte: Autora (2021).

Figura 15 - Equipamentos empregados durante a injeção



Fonte: Autora (2021).

Seguindo a especificação técnica da projetista responsável pelos empreendimentos, o cimento empregado na calda deve ser do tipo Portland comum ou Pozolânico e ter superfície específica (Blaine) igual ou superior a $3.500 \text{ cm}^2/\text{g}$, atendendo às exigências da ABNT NBR-5732 e NBR-5736 no que se referem às demais características. Sendo utilizados somente cimentos acondicionados em sacos de papel, optou-se, então, pela utilização, nas injeções, do cimento Portland pozolânico (CP IV 32 RS). A água aplicada na dosagem das caldas seguiu o exposto na NBR 15900 e a temperatura da calda foi monitorada, não podendo ser superior a 40°C , no momento da injeção.

A distância entre o agitador e a bomba injetora foi tal, não podendo ultrapassar de 10 m e a distância entre a bomba injetora e o furo 30 m, a não ser que fosse introduzido um agitador intermediário ou mantido um controle sistemático de acompanhamento da calda de injeção, junto a boca do furo. Tanto agitadores quanto bombas, permaneceram em constante funcionamento, durante todo o processo de

injeção. As tubulações foram lavadas após o procedimento, com água corrente, objetivando evitar obstruções por deposição de calda.

3.3.3.1 Pressões de injeção

De modo geral, as pressões das injeções realizadas podem ser dadas por meio da seguinte expressão (4):

$$P_m = 0,3 (H_{ob} + \frac{1}{2} T) \quad (4)$$

Onde:

P_m = pressão a ser medida no manômetro (kgf/cm²);

H_{ob} = profundidade do obturador medida em metros na vertical;

T = comprimento em metros do trecho injetado.

A pressão injetada, medida no manômetro, deverá ser acrescida em 0,25 Kgf/cm² toda vez que a calda for engrossada.

O processo de injeção de calda de cimento de qualquer trecho de um furo poderá ser considerado concluído quando as absorções de calda forem nulas por um período de 10 minutos, na pressão especificada para o trecho em injeção ou quando as absorções ocorrerem por um período de 10 minutos com velocidades inferiores a 0,15 l/m.min para trechos com obturador localizado até a 10,0 m de profundidade e inferior a 0,4 l/m.min para profundidade superior a 10,0 m.

3.3.3.2 Dosagem das caldas de cimento

As dosagens das caldas de cimento, são adotadas em função da condutividade hidráulica do meio a ser tratado e das características das caldas encontradas em laboratório para diferentes traços, foram empregadas caldas de cimento constituídas, apenas, por cimento e água, atendendo a recomendação normativa NBR 7681/2013.

As dosagens foram ajustadas às condições encontradas em cada trecho de furo a ser injetado. A relação água / cimento (em peso) variou de acordo com as características de cada furo, oscilando entre 1,0 e 0,4.

Para o início da injeção, definiu-se o traço com base nos resultados obtidos nos ensaios de perda d'água, usando caldas mais grossas para permeabilidades elevadas. A Tabela 3, apresenta um critério do traço a ser adotado para dar início ao procedimento de injeção, com base em permeabilidade observada em ensaio de perda d'água.

Tabela 3 - Traço para injeção em função dos resultados obtidos no ensaio de perda d'água

Ensaio de Perda D'água Hv – (l/min/m/Kg/cm²)	Calda Inicial (A/C em peso)
< 2,0	1:1
2,0 - 10,0	0,8:1
10,1 - 20,0	0,6:1
> 20,1	0,4:1

Fonte: GeoEnergy Engenharia (2021).

Depois de terminada a injeção de qualquer estágio de um furo, a pressão foi mantida por uma válvula até que a calda de cimento se solidificasse a ponto de permanecer retida no furo.

Sempre que em um furo de qualquer ordem for registrada absorção de calda de cimento superior a 35 kg de cimento por metro em trecho cuja profundidade seja igual ou superior à maior profundidade do furo adjacente de ordem subsequente, o furo adjacente deverá ser aprofundado em 3 m abaixo da profundidade onde a absorção foi constatada.

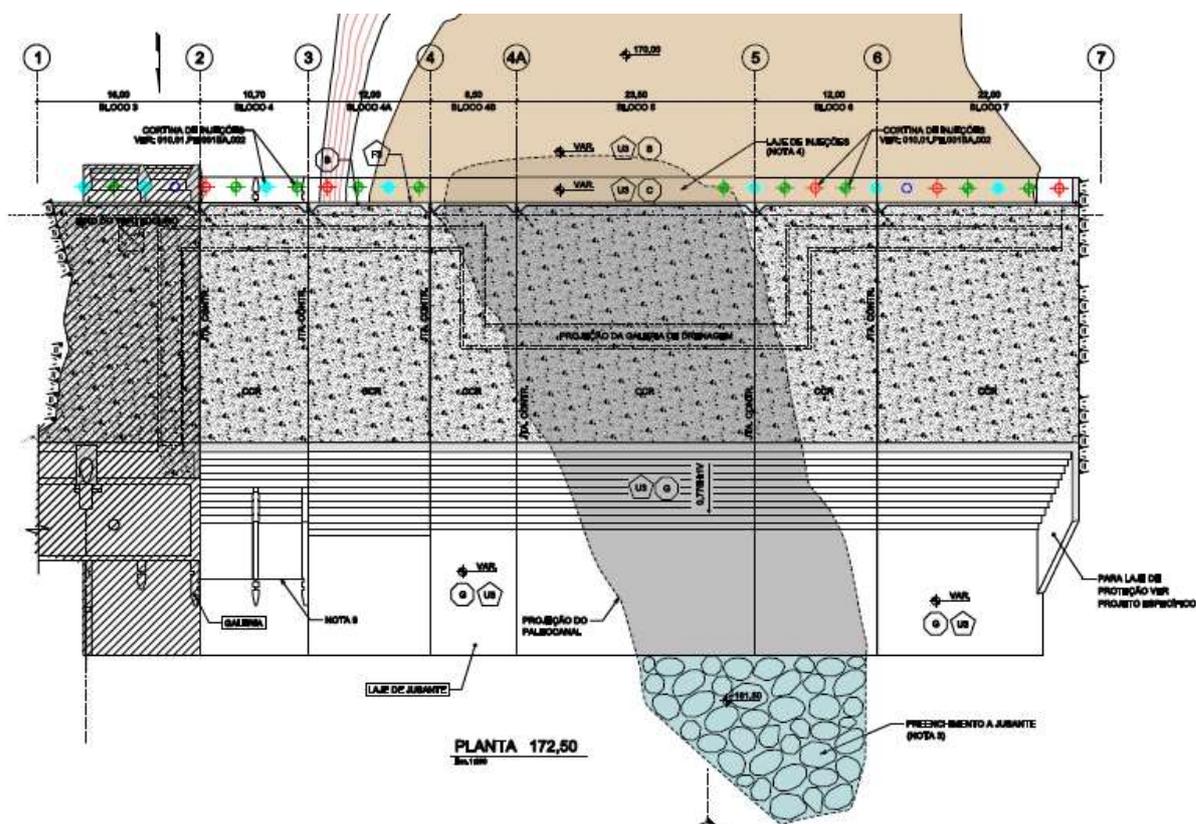
3.4 PALEOCANAL DA PCH CACHOEIRA CINCO VEADOS

Na PCH Cachoeira Cinco Veados, após a construção da ensecadeira de 2º Estágio, durante os trabalhos de escavação para limpeza do leito do rio, na região que antes estava localizada sob a ensecadeira de 1º estágio, foi descoberta uma falha geológica na rocha de fundação. Essa falha é denominada paleocanal e apresenta largura na sua face montante de 30 metros, estreitando para 25 metros na sua face

jusante, aproximadamente, atingindo até 16 metros de profundidade. Apresenta um alinhamento de aproximadamente 65° em relação ao Eixo do Barramento, com 55 metros de comprimento.

Para outros blocos, integrantes da estrutura do barramento / vertedouro de soleira livre, a rocha sã foi encontrada, aproximadamente, na elevação 162,00 metros. Já, para essa região, através de sondagens rotativas realizadas no interior da escavação, pode-se estimar a cota inferior, aproximadamente na Elevação 146,00 metros a montante e 153,00 metros a jusante, mantendo um patamar de material aluvionar na porção de montante.

Figura 16 - Vista em planta do paleocanal



Fonte: GeoEnergy Engenharia (2021).

Foi então, escavado com emprego de escavadeira hidráulica para limpeza grossa e ferramentas manuais e sopradores para limpeza fina até a elevação 154,00 metros. Na parede de rocha montante ao paleocanal, foi feita a projeção de concreto

e instalação de drenos (barbacãs) para garantir a estabilidade do maciço durante as atividades de limpeza da fundação e concretagem.

Diante desse imprevisto, a projetista avaliou a necessidade de realizar injeções de calda de cimento para consolidação da rocha de fundação e, como exposto anteriormente nesse trabalho, ao se realizar injeções de consolidação a impermeabilização é uma consequência logo, aumentamos a resistência desse maciço e diminuimos a subpressão, além do que, impedindo, conseqüentemente, o fluxo de água, tornamos essa região mais segura e com menor risco de sofrer forças de arrasto.

Foram realizadas as verificações e observou-se que os blocos do vertedouro localizados sobre o paleocanal atendem aos critérios de estabilidade, sendo que as tensões na fundação se mostraram dentro dos limites admissíveis.

Da elevação inferior até a elevação superior, desta falha, foram realizadas concretagens com emprego de concreto convencional vibrado para preenchimento e, ao chegar na elevação 159,80 metros iniciaram as atividades de injeção. Foram perfurados e injetados 7 furos nessa cota.

Com o surgimento deste imprevisto, a galeria de drenagem da barragem teve seu traçado alterado. Isso para que pudesse passar por uma zona mais crítica e central desse paleocanal.

Devido a necessidade de se prosseguir com o alteamento da estrutura do Vertedouro, agora em concreto compactado com rolo, as demais perfurações e injeções foram realizadas no momento em que se chegou ao nível do piso da Galeria de Drenagem, porque aí ambos os serviços poderiam ser realizados sem interferência e sem gerar maiores atrasos. Essa elevação é a 172,33 metros, em que foram perfurados e injetados os 30 furos restantes. Todos os 37 furos de consolidação avançaram pela profundidade de 3 metros na rocha.

Na parte jusante desse paleocanal foram aplicados grandes blocos de rocha (matacos) preenchidos com argamassa.

3.5 LABORATÓRIO

Na etapa de ensaios em laboratório, foram realizadas análises com a calda de cimento a ser injetada nos furos, seguindo o estabelecido na NBR 7681/2013.

Durante a execução de cada injeção de calda de cimento, mais precisamente, quando a calda já foi dosada e batida, mas ainda não injetada, procedeu-se com a coleta. Isso foi feito antes do início da injeção para que a quantidade coletada para análise não interferisse nos resultados do processo, no caso, na quantidade de calda consumida naquele trecho do furo.

Em laboratório, realizaram-se os ensaios para determinação do índice de fluidez, vida útil, expansão, exsudação, massa específica e resistência à compressão axial para os traços A/C 0,7:1; 0,5:1 e 0,4:1, que foram os mais usuais na execução das injeções na referida barragem.

Realizou-se a dosagem e mistura das caldas de cimento, com o auxílio de uma betoneira, como mostrado na Figura 17. O cimento utilizado foi o CP IV 32 RS, da fabricante Votorantim, com resistência à compressão de 32Mpa aos 28 dias. Os próximos subitens descrevem os procedimentos adotados.

Figura 17 – Mistura da calda



Fonte: Autora (2021).

3.5.1 Fluidiez

O ensaio de fluidez foi realizado através do método do funil de Marsh. O índice de fluidez é dado pelo tempo em que 1000 cm^3 de calda levam para escoar pelo funil ou cone de Marsh.

Estando o funil umedecido, despejou-se a calda no funil até a marca de 1800 cm^3 , passando antes por uma peneira com abertura igual a 2,36 milímetros, estando a saída (bico do funil) fechada manualmente. Posicionou-se a proveta graduada de 1000 cm^3 abaixo. Permitiu-se, então, a passagem da calda e no momento que essa atinge o fundo da proveta foi acionado o cronômetro até que alcance a marca de 1000 cm^3 , parando o cronômetro e registrando o resultado que é o índice de fluidez.

Figura 18 – Determinação do Índice de Fluidez com o cone de Marsh



Fonte: Autora (2021).

3.5.2 Vida Útil

Com o excedente de calda de cimento, foram feitas verificações a cada 30 minutos da fluidez da calda. Procedeu-se desse modo até que o tempo necessário para que o fluído escoe pelo cone de Marsh, enchendo uma proveta de 1000 cm³, seja inferior a 12 segundos. O recipiente que contém a calda deve estar vedado e antes de testar a fluidez, ocorreu a mistura da calda de cimento para homogeneização.

3.5.3 Exsudação

Para realização do ensaio de exsudação, a partir da amostra reservada, preencheu-se uma proveta graduada de 1000 cm³ até o volume (750 ± 20) cm³ que teve sua abertura vedada. Com o passar do tempo, notou-se a ocorrência de

exsudação e passou-se a fazer leituras a cada 30 minutos do volume de sólido na proveta, até o volume final que deverá ser atingido 2 horas após o início.

O índice de exsudação é calculado pela expressão (5):

$$E_{sd} = \frac{V_f}{V_i} * 100 \quad (5)$$

Onde:

E_{sd} é o índice de exsudação, expresso em porcentagem (%);

V_s é o volume de sólido, expresso em centímetros cúbicos (cm³);

V_f é o volume total da calda mais a água exsudada, expresso em centímetro cúbico (cm³);

V_i é o volume inicial da calda introduzida na proveta, expresso em centímetros cúbicos (cm³).

3.5.4 Expansão

Como as caldas dosadas não continham em seu traço aditivos, não foi necessário realizar o ensaio de expansão.

3.5.5 Resistência à compressão axial

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão simples (RCS) ou compressão axial, após a calda de cimento ser preparada, ela foi passada pela peneira #8, cuja abertura da malha é de 2,36 mm, sendo moldados seis corpos de prova, para posterior ensaio. As Figuras 19 e 20, demonstram, respectivamente, a moldagem de corpos de prova e posteriormente a ruptura na prensa eletrohidráulica para determinação da resistência à compressão axial.

Segundo especificação técnica para as atividades de injeção de calda de cimento, emitida pela empresa projetista da obra, os valores de resistência à compressão axial, que devem ser atendidos para diferentes traços, devem ser os apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de referência para a obra nos ensaios de resistência à compressão axial

Relação A/C	Resistência à compressão simples
0,5:1	10 MPa
< 0,5:1	30 MPa

Fonte: GeoEnergy Engenharia (2021).

Figura 19 - Moldagem de corpos de prova



Fonte: Autora (2021).

Figura 20 - Ruptura de corpos de prova com prensa eletrohidráulica digital



Fonte: Autora (2021).

4 RESULTADOS

4.1 RESULTADOS OBTIDOS EM LABORATÓRIO

Conforme exposto no item 3.4, foram feitos ensaios em laboratório para caracterização de traços usualmente aplicados na execução de caldas de cimento. Na Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7, são apresentados os resultados dessas caracterizações realizadas em laboratório.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de caracterização da calda de cimento relação A/C= 0,70

Tempo decorrido (h)	Volume inicial (cm ³)	Volume final (cm ³)	Água Exsudada (cm ³)	Exsudação (%)	Fluidez (s)
00:00	780	780	0	0.00%	5.96
00:30	780	750	30	3.85%	6.14
01:00	780	730	50	6.41%	6.46
01:30	780	720	60	7.69%	6.68
02:00	780	720	60	7.69%	6.71

Fonte: Autora (2021).

Realizando a análise dos valores obtidos para a exsudação e fluidez, apresentados na Tabela 5, tem-se como resultado um índice de fluidez, que é o valor encontrado logo após a mistura, igual a 5,96 segundos. A NBR 7681 estabelece que esse índice não deve ultrapassar 12 segundos, portanto, esse traço atendeu ao critério.

Observa-se também, que ao longo dos 30 primeiros minutos de acompanhamento da execução do ensaio, a fluidez manteve-se abaixo de 12 segundos, o que significa que a vida útil desta calda também atende o estabelecido na NBR 7681.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de caracterização da calda de cimento relação A/C = 0,5

Tempo decorrido (h)	Volume inicial (cm ³)	Volume final (cm ³)	Água Exsudada (cm ³)	Exsudação (%)	Fluidez (s)
00:00	760	760	0	0.00%	8.86
00:30	760	750	10	1.32%	10.67
01:00	760	742	18	2.37%	11.70
01:30	760	740	20	2.63%	13.40
02:00	760	740	20	2.63%	-

Fonte: Autora (2021).

Realizando, agora, a análise dos valores obtidos para a exsudação e fluidez, apresentados na Tabela 6, tem-se como resultado um índice de fluidez igual a 8,86. Portanto, esse traço atendeu ao critério estabelecido na norma.

Observa-se também, que ao longo dos 30 primeiros minutos de acompanhamento da execução do ensaio, a fluidez manteve-se abaixo de 12 segundos, o que significa que a vida útil dessa calda também atende o estabelecido na NBR 7681. No caso, pode-se dizer que apresenta vida útil de 1 hora, já que a partir da próxima leitura ultrapassa os 12 segundos.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de caracterização da calda de cimento relação A/C = 0,4

Tempo decorrido (h)	Volume inicial (cm ³)	Volume final (cm ³)	Água Exsudada (cm ³)	Exsudação (%)	Fluidez (s)
00:00	785	785	0	0.00%	21.38
00:30	785	780	5	0.64%	-
01:00	785	777	8	1.02%	-
01:30	785	772	13	1.66%	-
02:00	785	765	20	2.55%	-

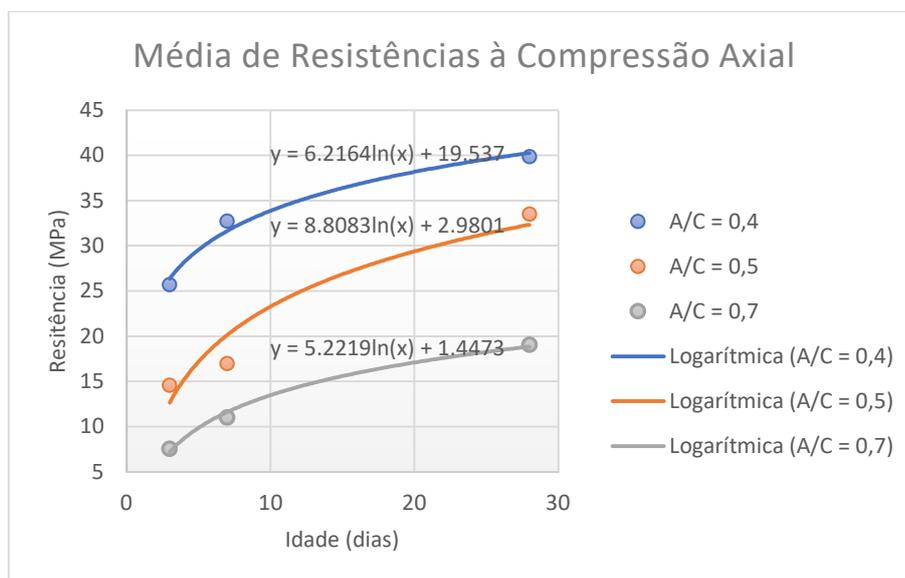
Fonte: Autora (2022).

Já na análise dos valores obtidos para a exsudação e fluidez, apresentados na Tabela 7, nota-se que a calda de cimento com traço de relação A/C igual a 0,4 não poderá ser empregada, conforme a NBR 7681/2013. Pois, seu índice de fluidez

ultrapassa o limite de 12 segundos. Nesse caso, havendo a necessidade de realizar injeções com tal relação A/C, precisará ser utilizado algum aditivo, como o superplastificante, por exemplo, de modo a reduzir a tempo final obtido para o índice de fluidez.

Seguindo o estabelecido na NBR 7681-4 e os valores dados como referência pela empresa projetista da obra, expostos anteriormente na Tabela 4, fez-se a média dos valores de resistência à compressão axial para os três traços dosados em laboratório. Segue a exposição dos resultados na Figura 21. Pode-se observar que quanto maior a relação água / cimento, menor será a resistência à compressão axial da calda e que quanto menor a relação água / cimento, maior será a resistência à compressão axial alcançada.

Figura 21 - Média das resistências à compressão axial encontradas para as caldas dosadas em laboratório

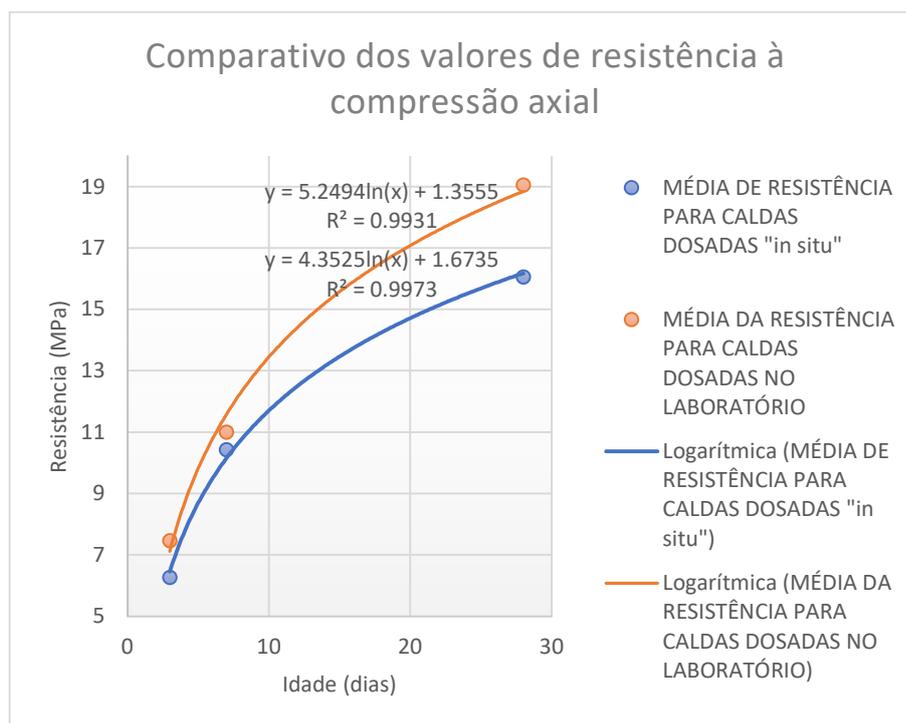


Fonte: Autora (2022).

Como a maior parte dos furos da cortina de injeção receberam calda de cimento relação A/C igual a 0,7 e, conseqüentemente obteve-se maior quantidade de dados de corpos de prova rompidos, para melhor visualização e como material para apoio às análises de estabilidade da barragem, em relação à resistência à compressão simples, fez-se um resumo desses valores.

Dessa forma, a Figura 22, mostra os resultados da ruptura de corpos de prova por meio de ensaios de compressão axial para as caldas de cimento que foram dosadas em campo em comparação àquelas que foram dosadas em laboratório.

Figura 22 - Média das resistências à compressão simples de caldas de cimento com traço igual a 0,7:1 dosadas em campo e aplicadas na cortina de injeção



Fonte: Própria (2022).

Pode-se observar que as resistências à compressão alcançadas com ensaios laboratoriais foram maiores para as três idades apresentadas. Isso se deve à diferença de controle da qualidade entre laboratório e campo. Mas, que ambas atendem aos valores requeridos em especificação técnica, conforme mostrado na Tabela 4.

4.2 RESULTADOS OBTIDOS EM CAMPO

Ao longo da cortina de injeções, localizada ligeiramente à montante da barragem, foram perfurados, submetidos ao ensaio de perda d'água e posteriormente receberam injeções de calda de cimento três furos exploratórios. Nesse mesmo eixo

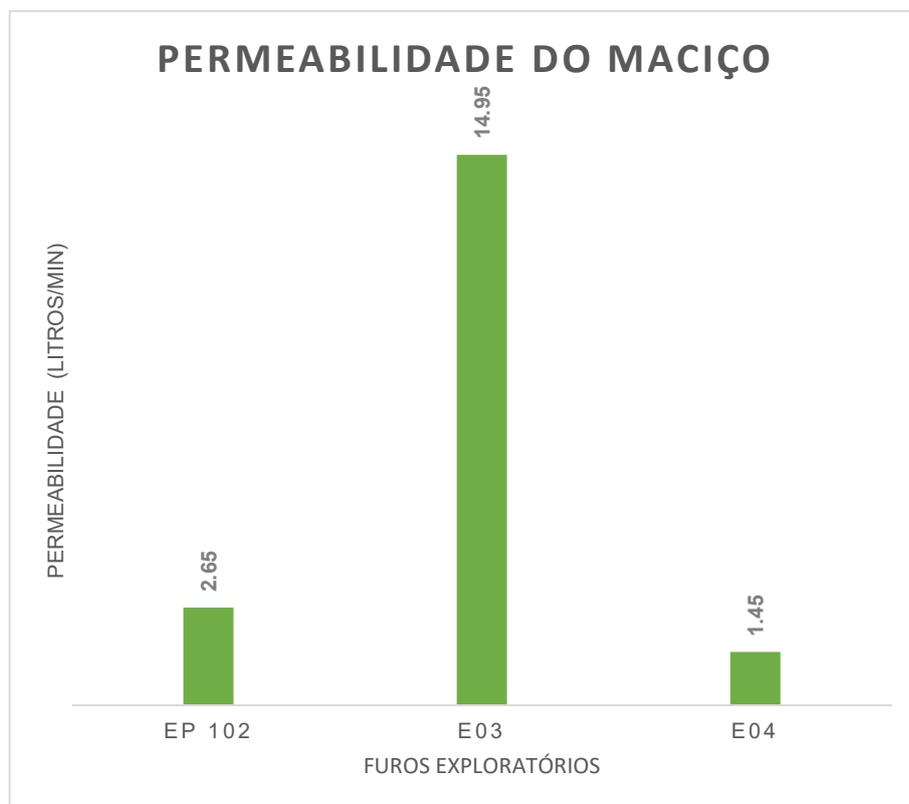
localizado à montante, foram perfurados e injetados 11 furos primários, 12 furos secundários, 14 terciários e 4 quaternários. Com base nos resultados obtidos nos ensaios de perda d'água e das injeções em formato de cortina, foi elaborado um resumo de valores característicos. Esses valores são utilizados pela empresa projetista das estruturas para as análises de estabilidade da barragem.

Tabela 8 - Resumo da permeabilidade observada em furos exploratórios

Denominação Furo	Profundidade do Ensaio (m)	Vazão Absorvida (L/min/m)
EP 102	35	2.65
E03	42	14.95
E04	12.7	1.45

Fonte: Autora (2022).

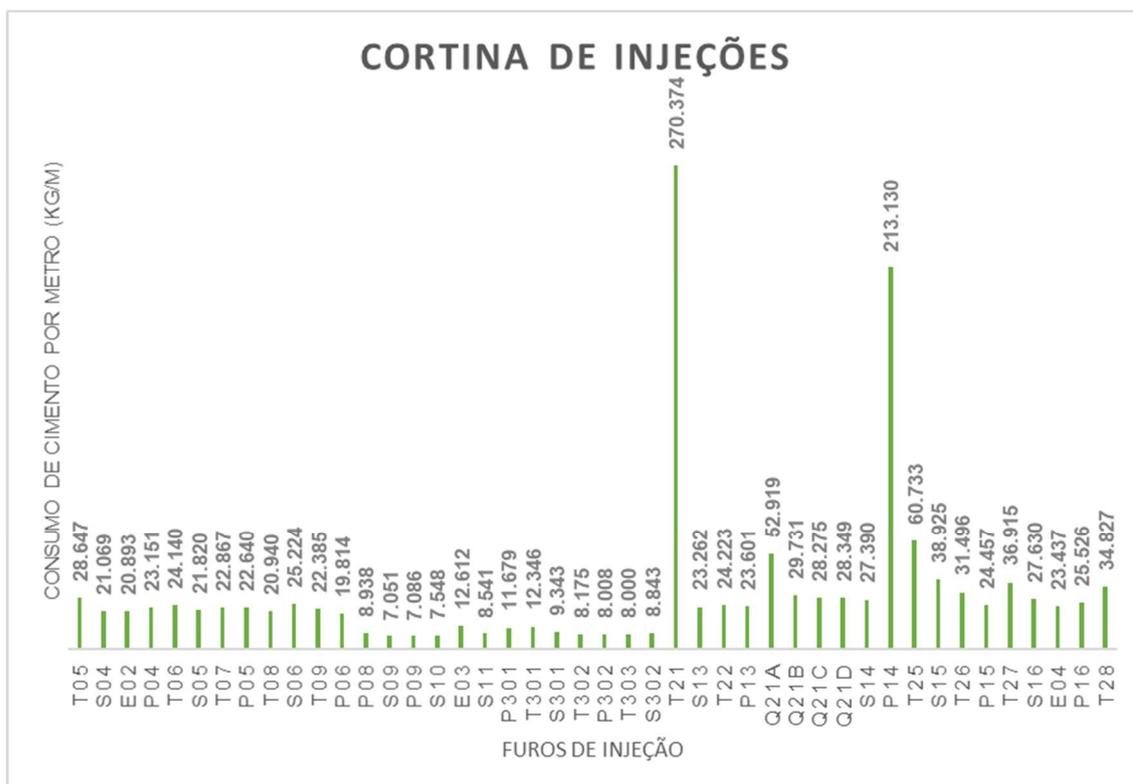
Figura 23 - Permeabilidade encontrada nos furos exploratórios



Fonte: Autora (2022).

A Figura 23, mostra o consumo de cimento em Kg por metro de furo injetado. Os furos, que são de ordem primária, secundária, terciária e até quaternária, pertencem a cortina de injeções.

Figura 24 - Consumo de cimento por furo da cortina de injeção



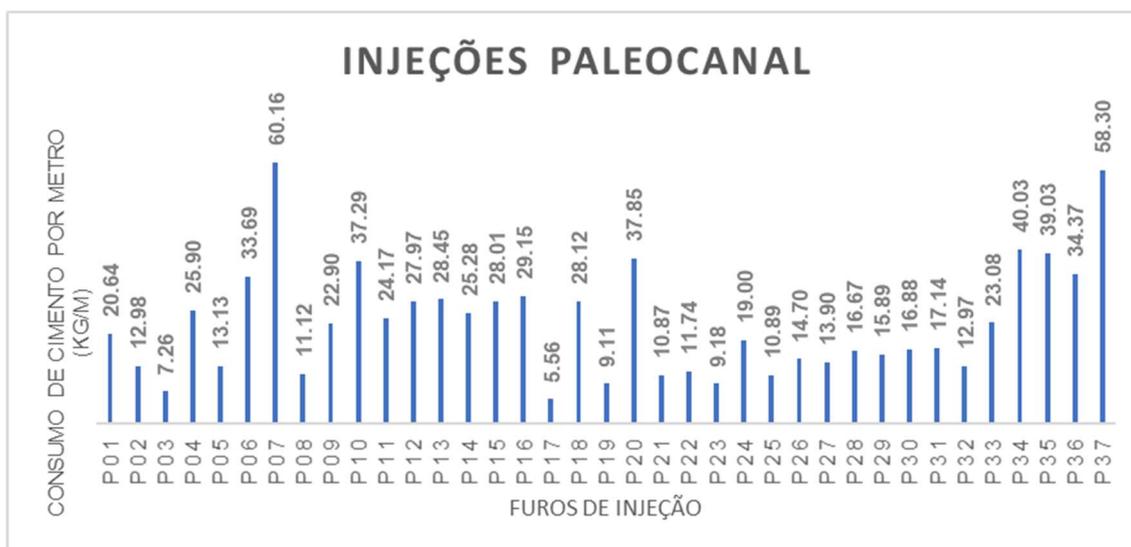
Fonte: Autora (2022).

Tabela 9 - Consumo de cimento em quilogramas por metro de furo injetado na Cortina de Injeções

Número de injeções	Consumo (Kg/m/nº furos)
46	30,803

Fonte: Autora (2022).

Figura 25 - Consumo de cimento por metro em furos injetados na falha geológica da PCH Cachoeira Cinco Veados



Fonte: Autora (2022).

Tabela 10 - Consumo de cimento em quilogramas por metro de furo de consolidação injetado na falha geológica

Número de injeções	Consumo (Kg/m/nº furos)
37	23,064

Fonte: Autora (2022).

5 CONCLUSÃO

O trabalho apresentou a solução empregada na PCH Cachoeira Cinco Veados como forma de tratamento das fundações da barragem de concreto, que devido à geologia local, composta por basaltos, sendo que nas maiores altitudes, próximo a região das ombreiras, apresentaram-se já bastante alterados, foi necessário o emprego de injeções de calda de cimento, com o objetivo de aumentar o caminho de percolação, consolidando o maciço rochoso, diminuindo a permeabilidade e as subpressões e interligando estruturas de concreto à rocha em contatos verticais, como no caso dos encaixes da estrutura do barramento nas ombreiras direita e esquerda.

Realizando a análise da quantidade de calda de cimento absorvida por metro de injeção e comparando com os valores de referência de absorção de calda de cimento demonstrados na Tabela 1, pode-se concluir que o maciço rochoso apresentou uma baixa absorção de calda de cimento.

Tendo em vista a exposição de informações das injeções executadas, nota-se que o traço A/C igual a 0,7:1, ou seja, 0,7 Kg de água a cada 1 Kg de cimento, foi o mais utilizado. Com boa injetabilidade e uma relação que é mais econômica, quando se considera a quantidade de cimento utilizada, pode-se concluir que é uma escolha adequada.

Observou-se que haverá, ainda, um ganho de resistência à compressão, medido para a idade de 90 dias, o que pode ser entendido como um aumento no coeficiente de segurança da estrutura.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para possíveis trabalhos futuros, na área de geotecnia, complementando o assunto desse trabalho de conclusão de curso, poderia ser realizado:

- um estudo sobre a efetividade da cortina de injeções por meio de furos de verificação realizados por meio de sondagens rotativas com extração de testemunhos. Poderia assim ser de outro modo comprovada a eficiência desse método de tratamento de fundações de barragens de concreto uma vez verificado o preenchimento das descontinuidades presentes na amostra de rocha extraída.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, **Manual de Sondagens**, Boletim nº 3, 5ª edição, São Paulo, 2013.

AZEVEDO, A. **Análise do Fluxo e das Injeções nas Fundações da Barragem de Taquaruçu, Rio Paranapanema, São Paulo**. 1993. 206p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7681 - 1**: Calda de cimento para injeção: Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7681 - 2**: Calda de cimento para injeção: Determinação do índice de fluidez e vida útil – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7681 - 3**: Calda de cimento para injeção: Determinação dos índices de exsudação e expansão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7681 - 4**: Calda de cimento para injeção: Determinação da resistência à compressão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

COSTA, W.D. **Geologia de Barragens**, Oficina de Textos, 2012, p. 234.

DOTTO, Antonio Von Ende, ROBAINA, Luís Eduardo de Souza. Identificação e Classificação do relevo do município de São Martinho da Serra – RS. Revista Ciência e Natura, Santa Maria, v. 43, e49, 2021. Publicado em: 18 de jun. de 2021. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/42781/html>>. Acesso em: 05 dez. 2021.

GAMA, P.S. dos S. **Injeção de cimento em fundações rochosas de barragens: Revisão crítica de metodologias**. Lisboa, 2012.

LEVIS, S.D. **Verificação da eficácia dos sistemas de vedação e drenagem em fundações de barragens de concreto**. São Carlos, 2006

Ministério de Minas e Energia (MME). **Relatório de Expansão da Matriz Energética 2021**. Brasília. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/aneel-bate-meta-de-expansao-da-matriz-eletrica-em-2021-tres-meses-antes-do-previsto/656877?inheritRedirect=false>. Acesso em: 16 jan. 2022.

Ministério de Minas e Energia (MME). **Balanco Energético Nacional 2021**. Brasília: SEM/MME, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em: 16 mar. 2022.

NARESI JUNIOR, L.A Disponível em: <<https://sites.google.com/site/naresi1968/27-injecao-de-consolidacao-de-macico-instavel-com-aplicacao-de-tubos-manchetados-e-injecao-de-calda-de-cimento-com-pessao>>. Acesso em: 16 jan. 2022.

ROBAINA, L. E. de S.; VERDUM, R. Compartimentação Geomorfológica da Bacia Hidrográfica do Ibicuí, Rio Grande do Sul, Brasil: Revista Brasileira de Geomorfologia v. 2, p. 11–23, 2010.

SANDRONI, S.S. Notas para o curso “GEOTECNIA DE BARRAGENS”, COPPE/UFRJ, 2003. Acesso em: 19 jan. 2022.

WILDNER, Wilson; RAMGRAB, Gilberto Emilio; LOPES Ricardo da Cunha; IGLESIAS, Carlos Moacyr Fontoura. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Escala 1:750000. CPRM, Serviço Geológico do Brasil. Porto Alegre, RS. 2006.