

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

**Jeferson Henrique Mattiazzi**

**BARRAGENS: CONSTRUÇÃO DA BARRAGEM DE CCR DA  
PCH QUEBRA DENTES – QUEVEDOS-RS**

Santa Maria, RS

2019

**Jeferson Henrique Mattiazzi**

**BARRAGENS: CONSTRUÇÃO DA BARRAGEM DE CCR DA PCH  
QUEBRA DENTES – QUEVEDOS-RS**

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 grau de **Engenheiro civil**.

Orientador: Professor MSc. Talles Augusto Araújo (UFSM)

Santa Maria, RS

2019

**Jeferson Henrique Mattiazzi**

**BARRAGENS: CONSTRUÇÃO DA BARRAGEM DE CCR DA PCH  
QUEBRA DENTES – QUEVEDOS-RS**

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 grau de **Engenheiro civil**.

**Aprovado em 19 de julho de 2019**

---

**Talles Augusto Araújo, Prof. MSc.**  
(Presidente/Orientador)

---

**Carlos José Antônio Kummel Felix, Prof. Dr.**  
(Avaliador, UFSM)

---

**Evelyn Paniz Possebon, Prof. MSc.**  
(Avaliador, UFSM)

Santa Maria, RS

2019

## AGRADECIMENTOS

Agradeço àqueles que sempre me apoiaram nos momentos em que mais precisei.

Ao meus pais Nilson Cláudio Mattiazzi e Liriane de Lurdes Facco Mattiazzi pela educação que me deram, por me incentivarem em todos os desafios que enfrentei. Por nunca deixarem faltar nada nesta caminhada. E principalmente, por serem os exemplos para eu me espelhar e ser o homem que sou hoje.

À minha irmã Manuela Cristine Mattiazzi pela amizade de sempre e pelo convívio durante todos os anos juntos em Santa Maria.

À minha segunda mãe, vó Tereza, pela cumplicidade eterna e educação recebida.

À meus avós Meda e Luiz (in memoriam) por todos os sábios conselhos e ensinamentos repassados.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Maria pela oportunidade de realizar meus estudos na instituição. Aos professores que transmitiram todos seus conhecimentos à mim, em especial ao professor Talles Augusto Araújo, pela orientação.

À Leonardo de Bem Silva pela oportunidade de ingresso no "mundo barrageiro", pelos ensinamentos, lealdade e hombridade.

À Dam Energy e sua equipe de profissionais pela oportunidade da realização do estágio de conclusão de curso. Por cederem permissão do estudo de caso na PCH Quebra Dentes.

Aos meus amigos que sempre estiveram juntos nos momentos mais "corridos".

## RESUMO

### **BARRAGENS: CONSTRUÇÃO DA BARRAGEM DE CCR DA PCH QUEBRA DENTES – QUEVEDOS-RS**

AUTOR: JEFERSON HENRIQUE MATTIAZZI

ORIENTADOR: PROF. TALLES AUGUSTO ARAÚJO

O uso de barramentos com a finalidade de armazenar água para diversos fins, é uma prática milenar, com registros nas mais antigas civilizações da humanidade. Hoje em dia, os principais usos das barragens são para irrigação, abastecimento de grandes populações, rejeito de materiais e geração de energia elétrica. Em relação à parte técnica, há diversos métodos para construção destes barramentos, sendo que todos eles são definidos baseados em inúmeros aspectos, como geologia e geotecnia do local da barragem. Os principais aspectos que definem o tipo de barragem são os materiais disponíveis na região e a fundação em que o barramento ficará assentado. No Brasil, as barragens mais utilizadas são as homogêneas de terra e as zoneadas, sendo que nas últimas décadas, os barramentos de gravidade executados com o Concreto Compactado com Rolo (CCR) tiveram um significativo crescimento. O CCR consiste em um tipo de método executivo de um concreto com baixo teor de cimento no traço, capaz de atingir bons níveis de resistência. Em geral, o CCR é utilizado em obras de pavimentação e barragens de gravidade. A barragem da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Quebra Dentes, que servirá como base deste estudo é do tipo vertedouro e foi executada no método de concreto CCR. Todo material rochoso utilizado no concreto foi utilizado das escavações do túnel da PCH e britado no canteiro da própria obra. A barragem terá uma altura de 22,62 metros em seu Nível de Água (NA) máximo, sendo que sua estabilidade foi verificada e os resultados obtidos mostraram a segurança da estrutura.

**Palavra-chave:** Barragens. CCR. PCH. Barramento

## **ABSTRACT**

### **DAMS: CONSTRUCTION OF PCH IN RCC OF DAM QUEBRA DENTES - QUEVEDOS-RS**

AUTHOR: JEFERSON HENRIQUE MATTIAZZI

ADVISOR: PROF. TALLES AUGUSTO ARAÚJO

The use of dams for the purpose of storing water for various purposes, is an ancient practice, with records in the oldest civilizations of mankind. Today, the main uses of the dams are to irrigation, supplying large populations, reject materials and generate electricity. In relation to the technical part, there are several methods for building these dams, all of which are defined based on several aspects, such as geology and geotechnics of the dam site. The main aspects that define the type of dam are the materials available in the region and the foundation on which the dam will be seated. In Brazil, the most used dams are homogeneous earth and zoned, and in the last decades gravity buses executed with Roller Compacted Concrete RCC have shown a significant growth. The RCC consists of a type of executive method of a concrete with low trace cement, capable of achieving good strength levels. In general, CCR is used for paving and gravity dams. The dam of the PCH Quebra Dentes, which will serve as the basis of this study, is of the spillway type, and was executed in the RCC concrete method. All rock material used in the concrete was used from the excavations of the PCH tunnel and crushed at the own construction. The dam will have a height of 22,62 meters, and its stability was verified and the results obtained showed the safety of the structure.

**Key-Words:** Dams. RCC. PCH.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Finalidade de uso das barragens de uso único .....	20
Figura 2 - Modelo de Barragem Homogênea de Terra. ....	21
Figura 3 - Barragem zoneada de terra-enrocamento.....	23
Figura 4 - Zoneamento Típico de uma BCFC .....	25
Figura 5 - Face de Concreto UHE Campos novos com detalhe para armadura pré-moldada para recuperação da Usina Hidrelétrica de Campos Novos.....	25
Figura 6 - Compactação do núcleo da UHE Foz do Chapecó. ....	27
Figura 7 - Aspecto físico no-slump do CCR.....	29
Figura 8 - Perfil do paramento hidráulico em CCR da UHE Dona Francisca. ....	34
Figura 9 - Detalhamento das camadas de CCV e CCR no vertedouro do barramento.....	34
Figura 10 - Estrutura em arco de dupla curvatura .....	36
Figura 11 - Seção típica de uma barragem em arco de dupla curvatura .....	37
Figura 12 - Localização do empreendimento.....	45
Figura 13 – Projeção da área de alagamento da PCH Quebra Dentes. ....	46
Figura 14 – Seção transversal tipo da barragem da PCH Quebra Dentes .....	48
Figura 15- Detalhamento do barramento.....	49
Figura 16 - Detalhe das adufas de desvio, descarga de fundo e Bloco 02. ....	49
Figura 17 - Mapeamento de localização das linhas de ensaio geoeletrico. ....	51
Figura 18 - Levantamento geoeletrico 01 .....	52
Figura 19 - Consistômetro Vebe Modificado Encaixado à mesa vibratória. ....	58
Figura 20 – Fixação da <i>fungenband</i> em rocha .....	60
Figura 21 - Posicionamento e armação do veda junta <i>fungenband</i> .....	61
Figura 22 - Execução da regularização sobre a linha de rocha do bloco 04 B do vertedouro .....	62
Figura 23 - Mapeamento injeção de calda de cimento na fundação do barramento vista frontal.....	63
Figura 24 – Representação da Pista Teste CCR no Bloco 2 .....	64
Figura 25 - Limpeza do rolo compactador antes de entrar em praça .....	65
Figura 26 - Limpeza dos pneus do caminhão antes da entrada em praça .....	66
Figura 27 - Projeto de divisão entre os blocos 03,04A e 04B .....	68

Figura 28 - Detalhamento Vertedouro.....	69
Figura 29 - Espalhamento Argamassa de Ligação .....	69
Figura 30 - Praça de CCR com camada finalizada no Método Rampado.....	70
Figura 31 - Camada executado no Método Tradicional Linear .....	71
Figura 32 - Abertura de vala para inserção de lona Neoprene no correr da junta de dilatação .....	72
Figura 33 - Rolo vibrando camada de CCR .....	73
Figura 34 - Compactação com Compactador de Percussão .....	74
Figura 35 - Camada de CCR executada recebendo película e água para cura. .....	74
Figura 36 - Camada de CCR erodida pelas ação da água .....	75
Figura 37 - Situação de camada com má compactada.....	76
Figura 38 - Forma alternativa de lançamento de CCR.....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Maiores Hidroelétricas do mundo .....	18
Tabela 2 - Maiores hidrelétricas totalmente brasileiras.....	19
Tabela 3 - Características PCH Quebra Dentes. ....	46

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Barragens com núcleo de concreto betuminoso .....	28
Quadro 2 - Matriz para classificação das barragens de acumulação de água	39
Quadro 3 - Periodicidade limite de fiscalização de barragens .....	40
Quadro 4 - Fases de estudos e projeto para obras de barragens .....	41
Quadro 5 - Relação entre material disponível e tipo de barragem escolhida..	43
Quadro 6 - Tipos de barragens para determinado tipo de vale.....	44
Quadro 7 - Composição granulométrica Areia Artificial .....	53
Quadro 8 - Composição granulométrica Brita 1 e 2.....	54
Quadro 9 - Resultado do ensaio de resistência à compressão do cimento ....	54
Quadro 10 - Ensaio de umidade higroscópica .....	55
Quadro 11 - Classes concreto (em Kg/m <sup>3</sup> ) .....	56
Quadro 12 - Rompimento de CP's de CCR .....	57
Quadro 13 - Relatório controle tecnológico de concreto CCR. Ensaio de Laboratório e de Campo.....	59
Quadro 16 - Critérios usuais de lançamento e tratamento de juntas .....	66

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Relação consumo de cimento ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) e resistência à compressão .....	32
Gráfico 2 - Consumo de cimento/ $\text{m}^3$ de concreto em função da resistência do concreto .....	33

## SUMÁRIO

1.1	OBJETIVOS .....	16
1.1.1	<b>Objetivos Gerais.....</b>	<b>16</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
2.1	HISTÓRIA DAS BARRAGENS .....	17
2.2	TIPOS DE BARRAGENS .....	20
2.2.1	<b>Barragem homogênea de terra .....</b>	<b>20</b>
2.2.2	<b>Barragens zoneadas .....</b>	<b>22</b>
2.2.3	<b>Barragem de enrocamento com face de concreto.....</b>	<b>24</b>
2.2.4	<b>Barragem de enrocamento com núcleo de asfalto .....</b>	<b>26</b>
2.2.5	<b>Barragens de Concreto Compactado com Rolo (CCR).....</b>	<b>28</b>
2.2.6	<b>Barragem de concreto armado com contraforte.....</b>	<b>35</b>
2.2.7	<b>Barragem de concreto em arco com dupla curvatura .....</b>	<b>35</b>
2.3	LEIS DE SEGURANÇA DE BARRAGENS GERADORAS DE ENERGIA ELÉTRICA .....	37
2.3.1	<b>Segurança de barragens destinadas ao setor de geração de energia elétrica.....</b>	<b>38</b>
2.4	ASPECTOS TÉCNICOS DE CONCEPÇÃO E PROJETO DE BARRAGENS.....	40
2.4.1	<b>Fases de Projeto .....</b>	<b>40</b>
2.4.2	<b>Critérios de Escolha do Tipo de Barragem.....</b>	<b>42</b>
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO: CONSTRUÇÃO DA BARRAGEM EM CCR DA PCH QUEBRADENTES, QUEVEDOS RIO GRANDE DO SUL. ....</b>	<b>45</b>
3.1	DADOS GERAIS DA OBRA.....	45
3.2	SEÇÃO TIPO DA BARRAGEM.....	47
3.3	DIVISÃO DOS BLOCOS DA BARRAGEM.....	48

3.5 ANÁLISES GEOFÍSICAS E GEOLÓGICAS DA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM .....	50
3.6 ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DE MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO .....	52
<b>3.6.1 Areia Artificial</b> .....	<b>52</b>
<b>3.6.2 Brita 1 e 2</b> .....	<b>53</b>
<b>3.6.3 Cimento</b> .....	<b>54</b>
<b>3.6.4 Ensaio de umidade higroscópica dos materiais</b> .....	<b>54</b>
3.7 TRAÇOS E ENSAIOS REALIZADOS COM CCR .....	55
<b>3.7.1 Traços</b> .....	<b>55</b>
<b>3.7.2 Rompimento de corpos de prova</b> .....	<b>56</b>
<b>3.7.3 Ensaio de compactação de CCR</b> .....	<b>57</b>
3.8 SISTEMA DE VEDAÇÃO E TRATAMENTO DE FUNDAÇÃO .....	60
3.9 CENTRAL DE CCR E PISTA EXPERIMENTAL .....	63
3.10 PREPARAÇÃO DA PRAÇA PARA RECEBIMENTO DO CCR .....	65
3.11 EXECUÇÃO DO CCR .....	67
3.12 OBSERVAÇÕES DO PROCESSO CONSTRUTIVO .....	75
<b>4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DE CCR</b> .....	<b>78</b>
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>79</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água é, provavelmente o único recurso natural que tem a ver com todos os aspectos da civilização humana, dos mais simples usos, até os mais complexos; prova disso, são as mais valorizadas e desenvolvidas regiões do mundo, todas situadas próximas à rios, lagos e mares. A necessidade do armazenamento de água, nas mais diversas finalidades, fez com que o homem desenvolvesse a técnica da construção de barragens.

As barragens têm sido construídas há milhares de anos; evoluindo em um processo histórico de aprimoramento e grandes estudos para suas mais diversas implantações; para controlar inundações, represar água, como fonte de geração de energia elétrica, para fornecer água para o consumo humano, para o uso industrial, ou para irrigações (MILANI, 2003).

Através destas estruturas há um grande processo de análise, projeção e implantação que revigoram fatores sociais e ambientais, tais fatores que destacaram a vigência de normas e leis que regulamentem e fiscalizem estas estruturas garantindo a integridade ambiental e a responsabilidade legal por estas estruturas.

Pode-se afirmar que, no cenário atual, as empresas estão buscando a regularização das barragens para o fim de evitar desastres e situações de riscos que possam afetar diretamente regiões povoadas ou que firam o meio ambiente.

O avanço dos estudos na construção de barragens, busca, entre outros, a racionalização do tempo e dos custos envolvendo essas obras de grande impacto para uma civilização. Durante os séculos de aprimoramento, a evolução dos estudos de técnicas empregadas pelo homem na construção de barragens permitiu a ele a descoberta do método de construção de barragens de Concreto Compactado com Rolo (CCR).

O Concreto Compactado com Rolo (CCR) é definido como sendo um concreto de consistência seca - *no slump*, aspecto arenoso com propriedades próprias, que é transportado, espalhado e compactado de forma contínua através de maquinários usualmente aplicados em obras de terra e enrocamento (OLIVEIRA, 1995).

A utilização do concreto compactado com rolo na construção de barragens de água teve início na década de 70, em estudos no Japão, com o objetivo de reduzir custos e prazos. Porém, foi na década de 80 que o CCR teve suas primeiras obras de

impacto, quando veio a competir diretamente com as barragens de concreto convencional.

No Brasil, a primeira barragem construída totalmente em concreto compactado com rolo, foi na Paraíba, mais especificamente na barragem de Saco de Nova Olinda, em 1986. A adoção deste método no país, não se baseou apenas na redução do consumo de cimento, mas também na necessidade da otimização de materiais encontrados próximos às obras, sendo eles diferentes em cada lugar do Brasil, devido a sua vasta extensão territorial. Por conta disso, uma série de procedimentos de controle evoluíram e foram adotados nas barragens de CCR do país. Atualmente, o Brasil é o segundo país construtor de barragens de CCR entre os seis países principais de construção civil do mundo (ANDRIOLO, 2006).

O interesse por esse tipo de barragem tem aumentado por várias razões, o mais proeminente sendo economia e velocidade de construção. Em muitas nações, os custos de construção de barragens de Concreto Convencional (CVC) aumentaram significativamente mais rápido do que os custos semelhantes para barragens de aterro. Isto, juntamente com o fato de o concreto ser um bom material de construção, resistente, durável, estimula os projetistas a procurar novas maneiras de usar o concreto na construção da barragem, como as de emprego da metodologia CCR. O entendimento do CCR, nestes anos, que evoluiu na composição granulométrica, o melhor uso dos finos sob um conceito de "engenharia"- que deve ser entendido em termos de qualidade, segurança e economia - traz a tecnologia CCR para sua simplicidade na maneira de usar o material disponível no local do empreendimento para ser dosado, misturado e transportando com equipamento adequado e espalhado permitindo que a construção seja feita rapidamente (ANDRIOLO, 2015).

Observando esse predomínio que o CCR tem na execução de barragens nos dias de hoje, somado à oportunidade de estágio em um empreendimento com a utilização deste tipo de método, optou-se por aprofundar os estudos em CCR com um estudo de caso na execução da Barragem da Pequena Central Hidrelétrica Quebra Dentes, na cidade de Quevedos, região central do Rio Grande do Sul.

O empreendimento que embasou este estudo irá gerar, após concluído, 22,40 MW de energia, sendo composto por uma barragem do tipo vertedouro soleira, construída predominantemente no método CCR. Relata-se detalhadamente nas páginas seguintes os processos de execução deste empreendimento, podendo assim, analisar na prática, a revisão bibliográfica realizada ao longo do trabalho.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivos Gerais

- Apresentar uma revisão bibliográfica sobre barragens; os principais tipos, seus aspectos técnicos, concepção de projeto e um histórico envolvendo as recentes leis de segurança de barragens.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Através de um estudo de caso, apresentar as práticas de construção de uma barragem de CCR.
- Estudar as condições de execução da barragem de Quebra Dentes.
- Analisar os sistemas de vedação e tratamento de fundação da PCH Quebra Dentes.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

“O mundo das barragens” reúne desde os mais simples aos mais complexos projetos e métodos de execução. Dessa maneira, faz-se necessário a contextualização de um assunto tão amplo e presente diariamente na vida de qualquer cidadão. A revisão bibliográfica introduzirá aquilo que se observa como necessário para alguém que queira entender melhor a história, concepção de projeto, leis e tipos de barragens com potencial hidrelétrico.

### 2.1 HISTÓRIA DAS BARRAGENS

Barragens, definida como obstáculo artificial com a capacidade de reter água, qualquer outro líquido, rejeitos, detritos, para fins de armazenamento ou controle, podem variar em tamanho desde pequenos maciços de terra, usados frequentemente em fazendas, a enormes estruturas de concreto ou de aterro, geralmente usadas para fornecimento de água, de energia hidrelétrica, para controle de cheias e para irrigação, além de diversas outras finalidades.

As barragens construídas para armazenar e controlar especificamente água se destinam geralmente ao abastecimento doméstico e industrial, à irrigação, à navegação, à recreação, ao controle de sedimentação, ao controle de cheias e à produção de energia elétrica (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2013).

Descobertas arqueológicas recentes indicam que barragens simples de terra e redes de canais foram construídas já em 2.000 a.C. para fornecer às pessoas fontes confiáveis da água de que precisavam para viver. Uma das barragens mais antigas ainda em uso é uma barragem de terra e enrocamento construída em, aproximadamente, 1.300 a.C., na cidade de Homs na Síria (CBDB, 2007).

Por volta de 1950, os governos e o setor privado (em alguns países) já estavam construindo um número cada vez maior de barragens, à medida que as populações aumentavam e as economias cresciam. Até 1950, as barragens de concreto representavam cerca de 38% das barragens com mais de 15 m de altura construídas em todo o mundo (com exceção da China). Entre 1951 e 1977, esse número de barragens de concreto decresceu para 25%. Entre 1978 e 1982, baixou ainda mais, chegando à marca de 16,5%. Esse declínio deu-se em razão do elevado custo do concreto e do aumento da popularidade das barragens de terra e enrocamento,

impulsionado pelo desenvolvimento da tecnologia de mecânica dos solos (HANSEN, 1991).

No início deste novo século, muitos países tornaram-se dependentes das usinas hidrelétricas para produzir a sua eletricidade. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), no mundo em 2015, a produção de energia por usinas hidrelétricas era de 3.840,5 TW.hora. Atualmente, a Ásia é responsável pela geração de 40% desse total de energia elétrica, sendo que, conforme a CIGB (2007) a maior concentração de grandes barragens por área geográfica ocorre neste território, seguido da América do Norte com 32%, e América do Sul (3%)

Dentro deste quadro gerador de energia hidrelétrica, o Brasil aparece como sendo o terceiro maior produtor das américas, ficando atrás apenas de Estados Unidos e Canadá (EIA, apud EPE, 2017). Atualmente, a maior hidrelétrica (tabela 1) e maior reservatório de água do mundo, é a Represa das Três Gargantas na China, com uma superfície total de 1.045 km<sup>2</sup> e volume total de água na represa de 39,3 km<sup>3</sup>, tendo uma altura de 181 m e extensão 2309 m.

Tabela 1 - Maiores Hidroelétricas do mundo

Hidroelétrica	Potência	Localização
Usina de Três Gargantas	18.200 MW	China
Usina de Itaipu	14.000 MW	Brasil
Usina de Belo Monte	11.23 MW	Brasil
Usina de Guri	10.200 MW	Venezuela
Tucuruí I e II	8.370 MW	Brasil
Grand Coulee	6.494 MW	Estados Unidos
Sayano Shshenskaya	6.400 MW	Rússia

Fonte: Brasil Escola (2017)

No Brasil, a maior usina hidrelétrica totalmente nacional, é a Usina Hidrelétrica de Belo Monte (tabela 2), localizada no Pará, com uma capacidade de produção de 11,23 MW de potência (G1, 2019). Apesar de a usina de Itaipu estar localizada no Brasil e ter capacidade de produção de 14,00 MW de potência, ela pertencente ao Brasil e ao Paraguai, o que faz dela Binacional, dividindo em 50 % a energia gerada para cada país. A usina de Itaipu Binacional é também retratada com a sua história e

importância, não só para a geração de energia elétrica, como também para a integração dos dois países.

Tabela 2 - Maiores hidrelétricas totalmente brasileiras.

HIDROELÉTRICA	POTÊNCIA (MW)	REGIÃO
BELO MONTE	11.230	N
TUCURUÍ	8.370	N
ITAIPU (BRASIL)	7.000	S
ILHA SOLTEIRA	3.444	SE/CO
XINGÓ	3.162	NE
PAULO AFONSI IV	2.462	NE
ITUMBIARA	2.082	SE/CO

Fonte: Brasil (2015).

A maioria das barragens no Registro da CIGB (2007) é de barragens de uso único (71,7%), embora haja um número crescente de barragens de usos múltiplos (28,3%) (figura 1). Destaca-se na Região Amazônica o relato do projeto e construção da usina de Tucuruí, a segunda maior hidrelétrica brasileira, dotada de eclusas para a navegação do rio Tocantins, realçando a importância da Região Amazônica como continuidade do uso dos nossos recursos hídricos.

Figura 1 - Finalidade de uso das barragens de uso único



Fonte: CIGB (2007, p. 29).

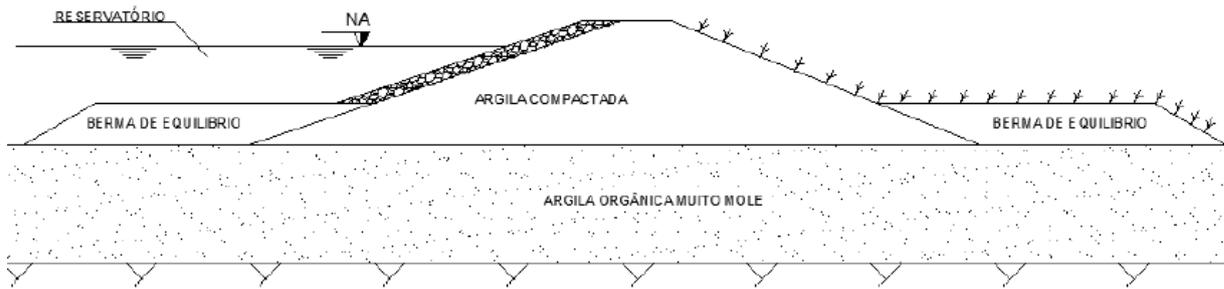
## 2.2 TIPOS DE BARRAGENS

### 2.2.1 Barragem homogênea de terra

Conforme descreve Marangon (2004, p.5), as barragens homogênea de terra são aquelas cuja construção foi feita através da utilização de apenas um tipo de material de empréstimo. Por conta disso, há necessidade de que os taludes possuam inclinações suaves, permitindo um maior controle sobre a estabilidade da barragem, assim como da busca por materiais mais impermeáveis, a fim de dificultar a percolação da água.

As barragens de terra são tradicionalmente utilizadas em empreendimentos agrícolas (para irrigação) e quando o terreno de fundação é constituído de solos com grande espessura ou solos compressíveis e com baixa resistência, como é o caso dos solos orgânicos muito moles. Pode ser considerada como o único tipo de barragem que se adapta, muito bem, a qualquer tipo de terreno de fundação (ARAÚJO E BARTH, 2005, p. 255).

Figura 2 - Modelo de Barragem Homogênea de Terra.



Fonte: Araújo e Barth(2005, p.258).

Para Massad (2010, p. 185), “O projeto de uma barragem de terra deve pautar-se por dois princípios básicos: segurança e economia. Este último inclui os custos de manutenção da obra, durante a sua vida útil”.

Assim como em qualquer obra de engenharia, a segurança da estrutura, seja na execução ou utilização, é pilar fundamental para a elaboração de uma barragem de terra. Massad (2010, p.185) afirma que: A segurança da barragem é princípio preponderante [...] de ser garantida quanto:

- a) Ao transbordamento, que pode abrir brecha no corpo de barragens de terra e enrocamento;
- b) Ao pipping (erosão interna devida infiltração de água no solo)
- c) À ruptura dos taludes artificiais, de montante e de jusante, e aos taludes naturais, das ombreiras adjacentes ao reservatório;
- d) Ao efeito das ondas formadas pela ação dos ventos, atuantes na superfície dos reservatórios, e que vão quebrar no talude de montante, podendo provocar sulcos de erosão;
- e) Ao efeito erosivo das águas das chuvas sobre o talude de jusante.

Antes de definir a escolha por uma barragem homogênea de terra, deve-se estudar a área do empreendimento a fim de conhecer se há disponibilidade de materiais para a construção da barragem, sem que haja deslocamentos grandes para busca deste, o que acarreta em custos altos de transporte. Economicamente, deve-se, sempre que possível, utilizar os materiais oriundos das escavações obrigatórias, combinados aos solos encontrados na região do empreendimento, desde que com propriedades geotécnicas adequadas.

Araújo e Barth (2005, p. 256) afirma que atualmente, esta técnica construtiva está se tornando menos atrativa, visto que o período de construção é relativamente

longo, causa disto o fato das especificações técnicas de compactação exigirem cuidados minuciosos, em busca da umidade ótima. Esse simples critério de compactação, pode muitas vezes causar atrasos de cronograma, incompatíveis com os anseios atuais de retorno financeiro dos investidores.

Em relação à drenagem da barragem homogênea de terra, tem-se drenos de filtros verticais, que garantem o controle da percolação da água e a interceptação de qualquer fluxo presencial de água; drenos de filtros horizontais, os quais coletam e conduzem para a jusante as águas captadas pelo filtro vertical; trincheiras drenantes e poços de alívio. Em relação à vedação, necessário quando o material de fundação são muito permeáveis, porém resistentes, faz-se a denominada trincheira de vedação – *cut-off* (ARAÚJO E BARTH, 2005, p. 259).

O talude de jusante de uma barragem homogênea de terra normalmente é protegido contra a erosão causada pelo escoamento superficial das águas da chuva, neste caso, o talude de jusante recebe uma cobertura de grama e são instalados sobre ele, canaletas de drenagem superficial. Para o talude de montante, deve-se prever a erosão provocada pelo efeito das ondas do reservatório, e também proteger o aterro argiloso de erosão interna, quando da ocorrência de inversão do sentido de fluxo por conta do rebaixamento rápido do reservatório; neste caso, há necessidade de prover o talude de montante com camadas de transição e enrocamento (ARAÚJO E BARTH, 2005, p. 260).

### **2.2.2 Barragens zoneadas**

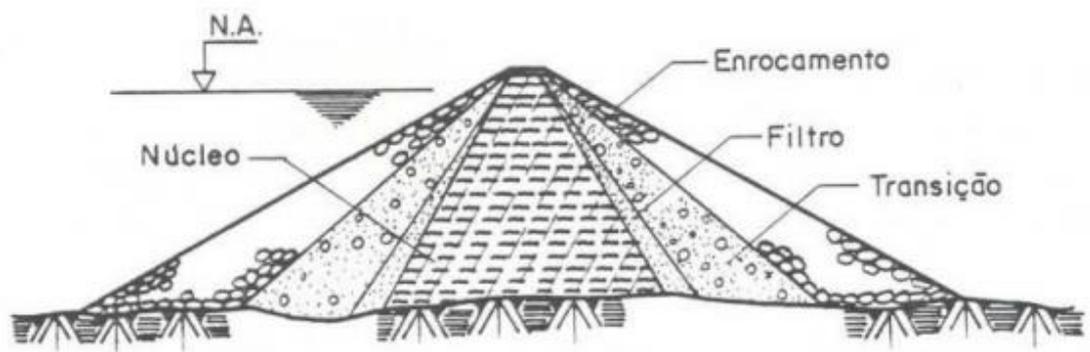
Barragens zoneadas apresentam, como característica principal, a utilização de mais de um tipo de aterro na sua seção transversal. Tradicionalmente, de acordo com os princípios básicos de projeto, os materiais são dispostos na seguinte ordem: um núcleo central de aterro argiloso com baixa permeabilidade com a função de vedação e nos flancos ou espaldares, aterros granulares (transição e enrocamento) com alta permeabilidade e resistência ao cisalhamento para dar estabilidade geral ao maciço de barramento (ARAÚJO E BARTH, 2005, p.261).

Segundo Massad (2010), para este tipo de barragem, há necessidade de dispor de um sistema de transição gradual em termos de granulometria (figura 3), para que, assim como na barragem homogênea de terra, possa-se evitar o pipping. Além desta função, o enrocamento em uma barragem zoneada tem a função essencial de dar

suporte e estabilidade ao núcleo de argila. Assim, os taludes do núcleo argiloso podem ser mais verticais por que são executados concomitantemente aos espadares de montante e jusante, mantendo-se estáveis nesta condição conforme CBDB (2011).

A vedação de uma barragem zoneada é garantida pelos materiais mais finos e menos permeáveis, mais compressíveis e com menor resistência ao cisalhamento, como é o caso das argilas. Dentro os principais processos executivos que garantem uma boa vedação, está a compactação do material fino em uma umidade ótima.

Figura 3 - Barragem zoneada de terra-enrocamento



Fonte: Furnas (1993).

Barragens de enrocamento com núcleo em solo compactado ou úmido e em função rochosa têm sido construídas em todo mundo, e o número de rupturas registradas é próximo de zero e muito inferiores aos casos de rupturas de barragens de solos compactados. Mesmo os acidentes ocorridos, em casos de núcleos delgados, puderam ser corrigidos e, portanto, este tipo de barragem é essencialmente seguro (CRUZ, 1996, p. 325).

Do ponto e vista de viabilidade, os estudos têm por objetivo a determinação das características do meio físico, social e econômico. Dentre os mais importantes estudos, tem-se a caracterização e avaliação volumétrica das diversas áreas de empréstimo de argila e a localização de áreas que existam rochas sã, com qualidade geotécnica adequada. Segundo ARAÚJO E BARTH (2005) para barragens de pequeno e médio porte de irrigação e abastecimento, somente se faz uso deste tipo de barragem, quando se dispõe de elementos técnicos mais precisos; caso contrário, utiliza-se barragens homogêneas de terra.

### 2.2.3 Barragem de enrocamento com face de concreto.

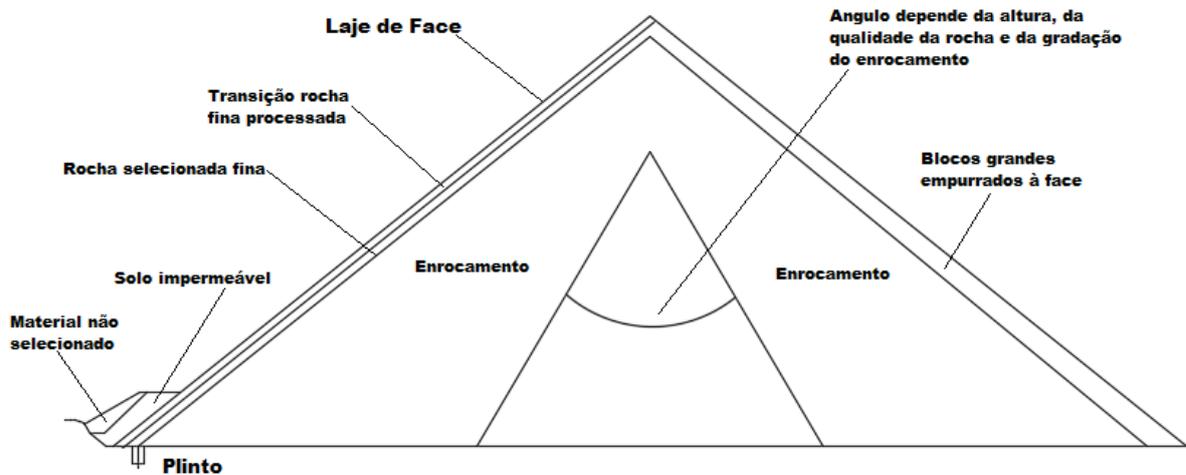
As barragens de enrocamento com face de concreto (BEFC) constituem um tipo de estrutura de barramento em que predominam os aterros de enrocamento com a função preponderante de dar estabilidade ao maciço da barragem, e uma face de concreto armado à montante (figura 5) , com função de impermeabilização e a formatação do reservatório (ARAÚJO E BARTH, 2005, p. 263).

Segundo J. Barry Cooke (1999), as barragens de enrocamento com face de concreto são fundamentalmente mais seguras, especialmente quando submetidas aos efeitos de sismos intensos, são apropriadas para barramentos muito altos e podem ser consideradas como as mais adaptáveis à qualidade das fundações da maioria dos locais disponíveis atualmente para a construção de barragens.

Para Araújo e Barth (2005), as vantagens da utilização das barragens de enrocamento com face de concreto são inúmeras, dentre elas, o baixo custo de execução se comparada as demais, uma rapidez de construção, impossibilidade de ruptura por erosão interna ou hidráulica, possibilidade de serem construídas em locais onde não existem solos a distância de transportes adequadas, etc.

Estruturalmente, tem-se a necessidade da construção de uma estrutura chamada “plinto de concreto” na fundação da barragem (figura 4). Este tipo de estrutura é o “apoio” da face de concreto do espaldar de montante e define exatamente a geometria dessa face. Como para adotar um largura do plinto(L), tem-se  $L=H/20$ , em que (H) é a altura da carga hidráulica num ponto do reservatório, considerando como  $L_{máx} = 6,5M$  e  $L_{mín} = 4,0m$  referência (Cruz 2014). Normalmente os projetos para esse tipo de barragem indicam a execução de injeções de consolidação e cortina impermeabilizante sob o plinto que está no limite a montante do corpo da barragem Fernandes (2007).

Figura 4 - Zoneamento Típico de uma BCFC



Fonte: Cooke (1987).

Para espessura da laje da face de concreto armado ( $e$ ), com função de garantir a vedação da barragem, pode-se considerar como  $e=0,30 + 0,002H$ , sendo  $H$  a profundidade de um ponto de dentro do reservatório.

Para este tipo de barragem, não existe nenhum sistema interno de drenagem para drenagem interna. Porém, até por razões de apoio da laje de concreto, e de se desejar reduzir as deformações da mesma laje na fase de enchimento, é necessário que haja uma diferenciação granulométrica e requisitos diferenciados de compactação do enrocamento em várias zonas da barragem. Sendo assim, o lado de montante, o enrocamento é compactado em camadas de menor espessura do que no lado de jusante (CRUZ, 2004, p. 329).

Figura 5 - Face de Concreto UHE Campos novos com detalhe para armadura pré-moldada para recuperação da Usina Hidrelétrica de Campos Novos



Fonte: Pires (2005).

A execução deste tipo de barragem segue ordenadamente, primeiro o lançamento de enrocamentos que compõem o corpo da barragem, ou seja, de maior granulometria (até 1m) e de melhor qualidade. Após lança-se uma zona de material fino selecionado, chamada zona de transição. Finalizada a fase de transição, executa-se a última etapa do enrocamento, a qual é composta por materiais semipermeáveis capazes de controlar infiltrações em caso de mal funcionamento das juntas; esse perfil de enrocamento servirá de suporte para laje de concreto de face (ODEBRECHT, 2005).

A laje de concreto é sustentada por malhas pré-moldadas, seguidas da inserção dos veda-juntas (fabricados em canteiro por perfiladeiras) de cobre inferiormente e lateralmente, entre lajes. O concreto é geralmente lançado por gravidade a partir do topo da barragem, mediante calhas metálicas. Posterior a isto, deve-se executar o parapeito da barragem *in-loco* (ODEBRECHT, 2005).

Podemos citar alguns dos grandes empreendimentos brasileiros com barragem de enrocamento com face de concreto, como; UHE Campos Novos, UHE Itá, UHE Itapebí, UHE Foz de Areia, UHE Segredo, UHE Xingó, etc.

#### **2.2.4 Barragem de enrocamento com núcleo de asfalto**

Segundo Hoeg (1993), o concreto asfáltico é praticamente impermeável, resistente à erosão e envelhecimento, e boa trabalhabilidade e compactação oferecendo poucas juntas na construção do núcleo. Desta maneira, o uso de asfalto no núcleo da barragem elimina o risco de possíveis falhas na vedação, além de uma considerável redução no prazo de execução da obra (HERWEG, 2012).

A primeira barragem com núcleo de concreto asfáltico foi construída na China em 1977 (quadro 1). No Brasil, destaque para a construção da UHE Foz do Chapecó, localizada no rio Uruguai e com sua barragem construída em enrocamento com núcleo asfáltico.

Este tipo de barragem consiste em um núcleo de concreto asfáltico (figura 6) com as propriedades já citadas anteriormente, rodeado de terra e enrocamento. Segundo Horg (1993), a espessura do núcleo deve ser tal que o mesmo possa se ajustar as deformações do enrocamento e aos recalques diferenciais na fundação da

barragem. O critério geralmente utilizado é função da altura da barragem; 1% da altura total.

Figura 6 - Compactação do núcleo da UHE Foz do Chapecó.



Fonte: Geosul (2012).

Os processos construtivos em geral, dividem-se em limpeza da fundação, lançamento de enrocamento dos extremos da barragem em direção ao núcleo da mesma, lançados na seguinte ordem: enrocamento grosso, enrocamento fino, transição grossa, transição fina. Por fim, com a camada já regularizada com os materiais granulares, executa-se o núcleo de asfalto.

Quadro 1 - Barragens com núcleo de concreto betuminoso

Nome do Barramento	País	Altura da Barragem (m)	Comprimento de Crista (m)	Período de construção	Espessura do Núcleo (m)
Kleine Dhuenn	Alemanha	35	265	1962	0,7/0,6/0,5
Eberlaste	Áustria	28	475	1968	0,6/0,4
Legadadi	Etiópia	26	35	1969	0,6
Wiehl	Alemanha	53	360	1971	0,6/0,6/0,4
Jiulikeng	China	44	107	1977	0,5/0,3
High Island West	Hong Kong	95	720	1977	1,2/0,8
High Island East	Hong Kong	105	420	1978	1,2/0,8
Finstertal	Austria	100	652	1980	0,7/0,6/0,5
Vestredal	Noruega	32	500	1980	0,5
Kleine Kinzig	Alemanha	70	345	1982	0,7/0,5
Shichigashuko	Japão	37	300	1985	0,5
Storvatn	Noruega	100	1472	1987	0,8/0,5
Feistritzbach	Austria	88	380	1990	0,7/0,6/0,5
Storglomvatn	Noruega	128	830	1997	0,95/0,5

Fonte: Hoeg (1993).

### 2.2.5 Barragens de Concreto Compactado com Rolo (CCR)

As barragens de Concreto Compactado com Rolo (CCR) são barragens que se enquadram no tipo barragens de gravidade. As barragens de gravidade se caracterizam pela utilização de maciços de concreto ou outros materiais em que a sua estabilidade é obtida, basicamente, pela ação do peso desses materiais (pedra argamassada, gabiões e concretos), ou seja, sua compressão, que compõem a seção transversal da estrutura de barramento (ARAÚJO E BARTH, 2005, p. 267). Para Bureau of Reclamation (2002) as fundações e ombreiras devem ser de material resistentes por questões de capacidade de suporte, devido ao peso próprio da estrutura de concreto.

Segundo Araújo e Barth (2005), este tipo de barragem se mostra adequado para vales com fundações e ombreiras constituídas de rocha sã e condutividade hidráulica relativamente baixa, que tenha disponibilidade de areias e rocha com qualidade para britagem e solo de cobertura de fundação com pouca espessura.

O CCR utilizado para barragens se caracteriza por um tipo de concreto simples com baixo consumo de cimento e com consistência seca (no-slump) (figura 7), aspecto arenoso com propriedades próprias, o qual deve ser adensado continuamente, em camadas, com rolos compactadores. O funcionamento do núcleo de CCR tem

unicamente o objetivo de compressão e peso. Para isto, à montante, utiliza-se a camada de concreto convencional com a função de vedação.

A principal justificativa para o uso deste tipo de concreto em barragens, é o fato de a dosagem do CCR utilizar uma quantidade significativamente menor de cimento se comparado às dosagens do concreto CCV, e ainda assim manter a resistência desejada nos cálculos de estabilidade. Além disso, o processo executivo da construção dos barramentos em CCR é simples, tornando-se rápida se comparada à outros métodos.

Figura 7 - Aspecto físico no-slump do CCR



Fonte: Autor (2019).

Historicamente, em 1974, com o objetivo de reduzir os custos e os prazos executivos de barragens de concreto, o Ministério das construções do Japão por intermédio do Committee on Rationalized Construction of Concrete Dams realizou um programa de pesquisas que procurou manter a qualidade e o aspecto das barragens de concreto a gravidade. O estudo preliminar relatou que a metodologia adotada na barragem de Alpe Gera combinada com o processo de compactação com rolo vibratório seria a linha mais conveniente a ser seguida. Uma avaliação da metodologia descrita foi observada em 1976 numa ensecadeira de montante da barragem de

Ohkawa. Nesta, utilizou-se concreto convencional adensado por vibradores de imersão nas faces dos paramentos da barragem e o núcleo foi executado simultaneamente com Concreto Compactado com Rolo. Após essa aplicação foram realizadas diversas outras execuções de aterros experimentais e ensaios de laboratórios (ANDRIOLO, 1989).

Em 1982 foi notificada a conclusão da barragem de Willow Creek, em menos de cinco meses, com 52 m de altura, localizada nos Estados Unidos da América. Foi a primeira grande barragem no mundo totalmente construída em Concreto Compactado com Rolo, com volume de CCR em torno de 329.000 m<sup>3</sup> (ANDRIOLO, 1989), utilização do concreto compactado com rolo na construção de barragens de água teve início na década de 70, em estudos no Japão, com o objetivo de reduzir custos e prazos. Porém, foi na década de 80 que o CCR teve suas primeiras obras de impacto, quando veio a competir diretamente com as barragens de concreto convencional (ANDRIOLO, 1989).

De acordo com Kuperman (1996) a primeira aplicação de Concreto Compactado com Rolo em barragens no Brasil ocorreu em 1978 na Itaipu Binacional. Na ocasião foi aplicado na rampa de acesso às fundações, na estrutura de desvio, um volume total de 26.000 m<sup>3</sup>. Em 1982, foi relatado o primeiro lançamento de CCR em estrutura permanente. A aplicação ocorreu no muro direito da eclusa de navegação de Tucuruí com um volume de cerca de 12.000 m<sup>3</sup> executados em camadas de 25 cm de altura. Um marco importante na aplicação do Concreto Compactado com Rolo no Brasil ocorreu em 1986 quando a barragem de Saco de Nova Olinda, localizada na Paraíba, com 56 m de altura e volume de CCR de 138.000 m<sup>3</sup> foi construída em pouco mais de três meses. Os resultados e detalhes desta obra receberam destaques tanto no país como no exterior, especialmente pelo custo do CCR em torno de US\$ 40/m<sup>3</sup>. Foi a primeira barragem brasileira totalmente construída em Concreto Compactado com Rolo, e também a primeira barragem de CCR em arco construída no mundo (ANDRIOLO, 1989).

#### 2.2.5.1 Propriedades do CCR

Segundo Milani Filho (2003), o Concreto Compactado com Rolo tem características aproximadamente iguais às do concreto convencional. Os valores obtidos para diversas propriedades têm mostrado grande semelhança entre os dois

tipos de concreto. Algumas diferenças são geradas em sua maior parte na dosagem ou processo de adensamento, pois o CCR possui menor teor de água e de pasta que o concreto convencional.

A massa específica obtida para o CCR é ligeiramente superior, cerca de 1 a 3% à do concreto convencional com os mesmos tipos de agregados. Isto ocorre devido ao menor teor de água e de pasta da mistura e da maior energia da compactação. Entretanto, caso sejam utilizados finos de menor massa específica como “filler” ou o teor pasta seja aumentado com adições de água ou de materiais pozolânicos, o aumento da massa específica pode não ocorrer.

A melhor porcentagem de água dentro de um metro cubico de CCR varia entre 4 e 7% do peso dos materiais secos, sendo necessários, na maioria dos casos, 110 a 130 litros/m<sup>3</sup> de água, ou seja, aproximadamente 70% da água que normalmente utiliza-se para fabricar um concreto comum (mais ou menos 190 litros/m<sup>3</sup>). O CCR é muito sensível a variação do conteúdo da água. A falta de água aumenta o risco a segregação, dificultando a compactação e o acabamento superficial. Já o excesso produz falta de estabilidade de mistura durante a compactação. Tanto a falta como o excesso e água produzem a diminuição da resistência mecânica do CCR (PITTA, 1994).

A ocorrência de variação de volume devido à perda de água ou retração por secagem é significativamente menor no concreto rolado, devido ao seu menor teor de água e cimento comparativamente com o concreto convencional. A variação de volume no CCR ocorre também devida a quantidade do cimento. Como o teor de cimento é menor, as variações decorrentes das variações térmicas e reações álcalis-agregado também são menores, sempre comparadas ao concreto tradicional.

#### 2.2.5.2 O consumo e cimento em Barragens de CCR

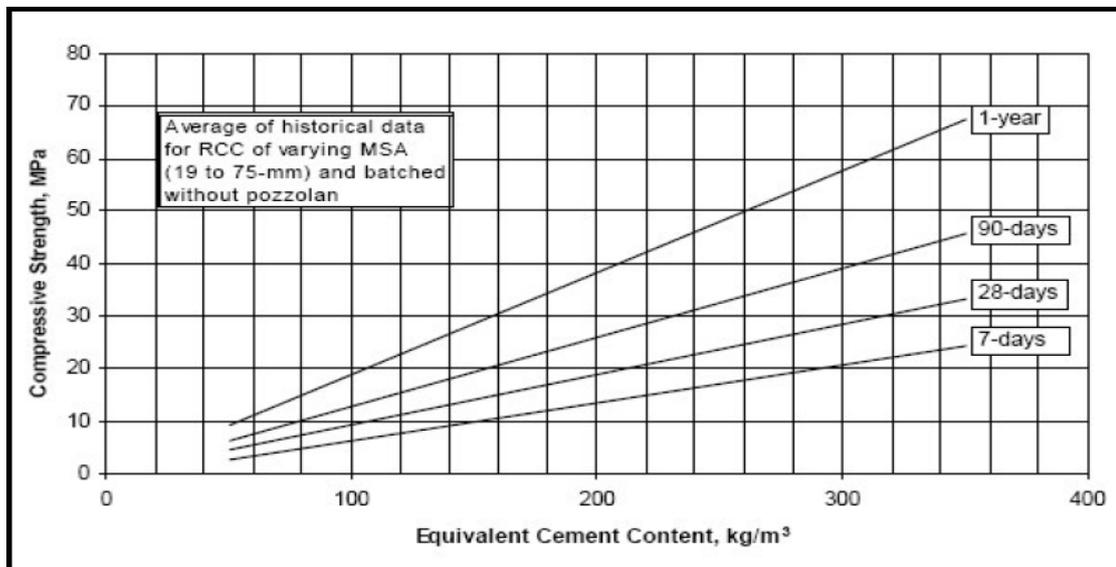
Todos os tipos de cimento Portland podem ser utilizados para execução do CCR (ACI 207, 1997; PITTA, 1995). Em casos visando um melhor resultado do CCR em função das premissas do projeto, pode-se optar por um cimento com características diferenciadas. A escolha do tipo de cimento dá-se com base nos critérios estruturais e de durabilidade do concreto, levando em conta também a disponibilidade existente na região em que está inserido o empreendimento. As

normas associadas aos materiais cimentícios são: NBR5735, NBR5736 e NBR5739 da ABNT.

Como já destacado anteriormente, a utilização do concreto CCR em obras teve sua justificativa entre outros, na baixa utilização de cimento, o que acaba por reduzir o custo de uma obra. Em concretos plásticos, a pasta (cimento mais água) ocupa todos os espaços vazios existentes entre os agregados, fato este que não ocorre em concretos secos devido a falta desta pasta. A dosagem de concretos secos, como o CCR, consiste em encontrar a melhor porção entre agregados de maneira a propiciar o menor volume de vazios possíveis entre os agregados, ou seja, escolher faixas granulométricas contínuas (TANGO, 1994).

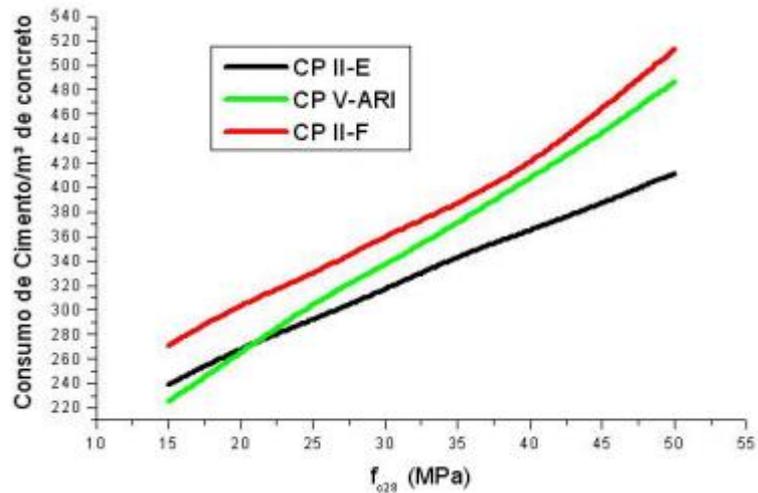
Segundo a US Army Corps of Engineers, a dosagem de cimento no concreto CCR pode variar de 60 kg/m<sup>3</sup> a 320 kg/m<sup>3</sup>, sendo que os traços mais usuais em barragens de CCR utilizam-se de 80 kg/m<sup>3</sup> a 150 kg/m<sup>3</sup> de cimento (gráfico 1). Sabe-se que, para atingir resistências parecidas com as do CCR, os teores de cimento do concreto CCV em média variam entre 140 kg/m<sup>3</sup> a 500 kg/m<sup>3</sup>, sendo mais usuais traços na faixa de 200 kg/m<sup>3</sup> a 350 kg/m<sup>3</sup> (gráfico 2).

Gráfico 1 - Relação consumo de cimento (Kg/m<sup>3</sup>) e resistência à compressão



Fonte: Milani apud US Army Corps of Engineers(2003).

Gráfico 2 - Consumo de cimento/m<sup>3</sup> de concreto em função da resistência do concreto



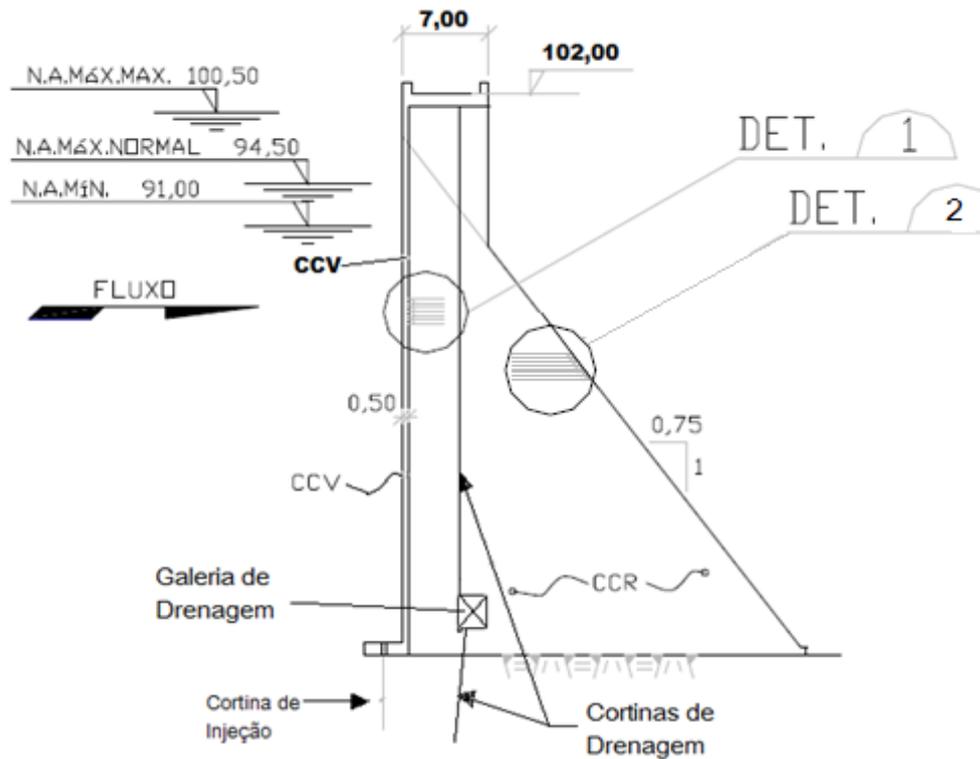
Fonte: Barboza (2008, p. 07).

Segundo Millani (2003), a resistência a compressão axial simples do CCR é afetada principalmente pela relação água/aglomerante e pela energia de compactação. As resistências obtidas para o CCR são, aproximadamente, 15 a 30 % mais elevadas do que as do concreto convencional, se comparada a mesma utilização de cimento. Esta diferença é extremamente vantajosa para o concreto rolado, no que se refere às tensões de origem térmica, pois pode-se atingir um mesmo nível de resistência com um menor consumo de aglomerante (ANDRIOLO, 1989).

#### 2.2.5.3 Seção tipo de barragens de CCR

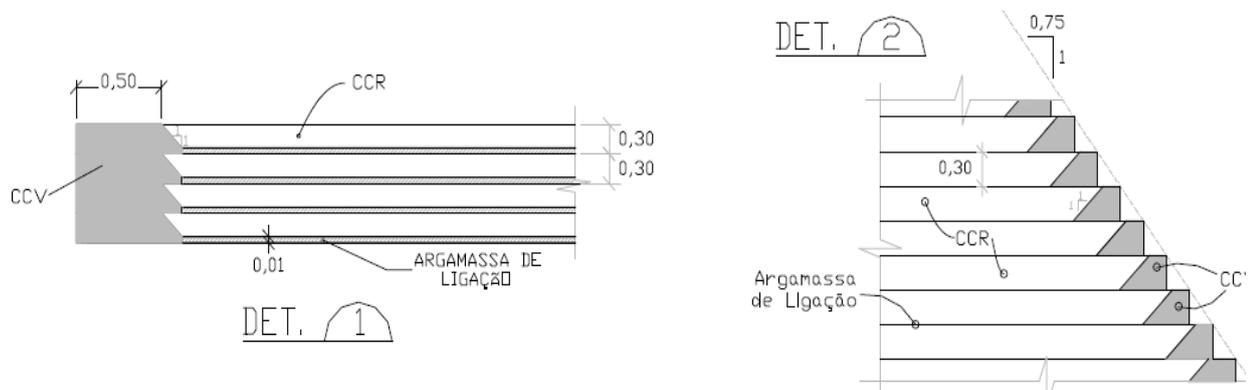
A utilização do Concreto Compactado com Rolo em barragens tem função de compressão e peso, apesar do surgimento de perspectivas da utilização do CCR como paramento de montante e jusante em barragens. As barragens de CCR possuem a vantagem da possibilidade de implantação do vertedouro sobre a própria estrutura, o que significa vantagem frente à barragens de terra e enrocamento, por exemplo. As figuras 8 e 9 ilustram em perfil como é tradicionalmente executado barramentos hidráulicos de CCR em usinas hidrelétricas.

Figura 8 - Perfil do paramento hidráulico em CCR da UHE Dona Francisca.



Fonte: Projeto Básico UHE Dona Francisca (2019).

Figura 9 - Detalhamento das camadas de CCV e CCR no vertedouro do barramento.



Fonte: Projeto Básico UHE Dona Francisca (2019).

As barragens construídas no método CCR possuem à montante e jusante, uma face geralmente de 50 centímetros de concreto CCV. A espessura final das camadas compactadas deverá situar-se entre 0,20 m e 1,00 m. Atualmente, tem-se adotado a execução de camadas com espessura na faixa de 0,30 m, como é o caso da UHE Dona Francisca.

O sistema de galerias, é utilizado em todas barragens superiores a 40 metros de altura; a necessidade da implantação de galerias em barragens inferiores a 40 m ainda é um assunto bastante discutido por especialistas (MILANI, 2005). As galerias são inseridas geralmente dentro do corpo da barragem, com a função de fornecer meios de acesso e prover espaço para possíveis perfurações, inspeção, manutenções, monitoramento e realização de serviços. Este sistema serve também para coletar e conduzir as águas de drenagem do corpo e da fundação da barragem. A localização da galeria deve ser próxima ao leito do rio, perto e acima da superfície da rocha (CORPS OF ENGINEERS, 1995).

Em barragens de grandes dimensões, geralmente com alturas superiores a 40 metros, há o monitoramento da barragem, sendo que, na galeria inferior, encontra-se o painel de instrumentação. A barragem é monitorada pelo uso de um conjunto de instrumentos de auscultação composta de piezômetros (PZ), marcos superficiais (MS), drenos de cortina (DRC), drenos de fundação (DF), drenos de junta (DJ), medidores de vazão (MV), e termômetros internos de concreto (TE) (CORPS OF ENGINEERS, 1995).

#### **2.2.6 Barragem de concreto armado com contraforte.**

A barragem de concreto armado com contraforte é uma barragem oca com sólido, com o lado a montante estanque à água, e que é suportado a jusante por intervalos de uma série de contrafortes suportes. Comparando com as barragens de gravidade requerem menor uso de concreto, entretanto exigem uma quantidade maior de formas e armação segundo Massad (2010).

Com a necessidade de estarem apoiadas sobre maciços rochosos com rigidez elevada, a execução da fundação exige um cuidado maior, com a necessidade de injeções de caldas de cimento e inserção de tirantes.

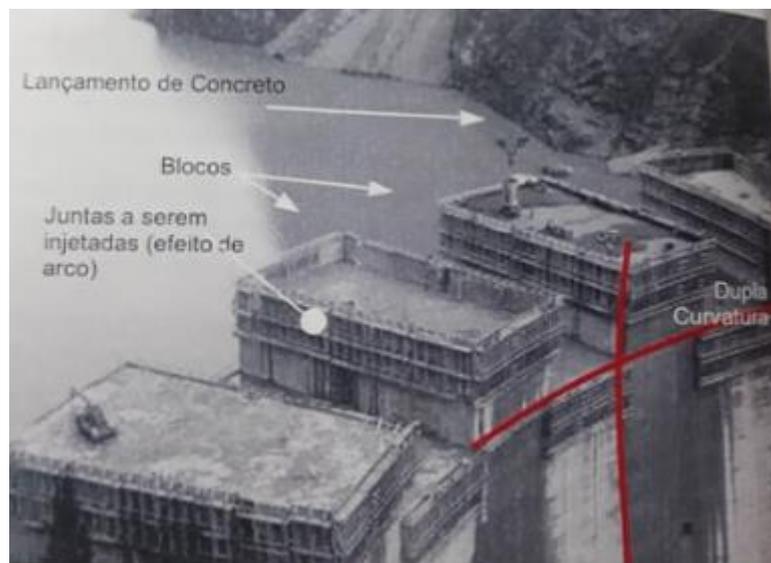
Este tipo de barragem é indicada para vales largos e de leve declividade. Segundo Araújo e Barth (2005), as barragens de contrafortes são muito comuns em empreendimentos de pequeno e médio porte para geração de energia e para abastecimento de água.

#### **2.2.7 Barragem de concreto em arco com dupla curvatura**

A Barragem em Arco Dupla Curvatura (figura 10), é alternativa a ser construída em vales estreitos, com geologia de boa qualidade e é a alternativa que envolve menor volume de concreto. Além disso, esta forma pode ser aproveitada para reduzir o volume da barragem (ODEBRECHT, 2005, p 21).

O arco é apoiado contra as encostas do vale, que devem ser constituídas de rocha sã e firme. A dupla curvatura é utilizada para otimizar a distribuição dos esforços, limitando ao máximo as zonas de tração. Entre os blocos, as juntas necessariamente deverão ser injetadas após o resfriamento do corpo da barragem a fim de obter o monolitismo da estrutura e garantir o “efeito arco”.

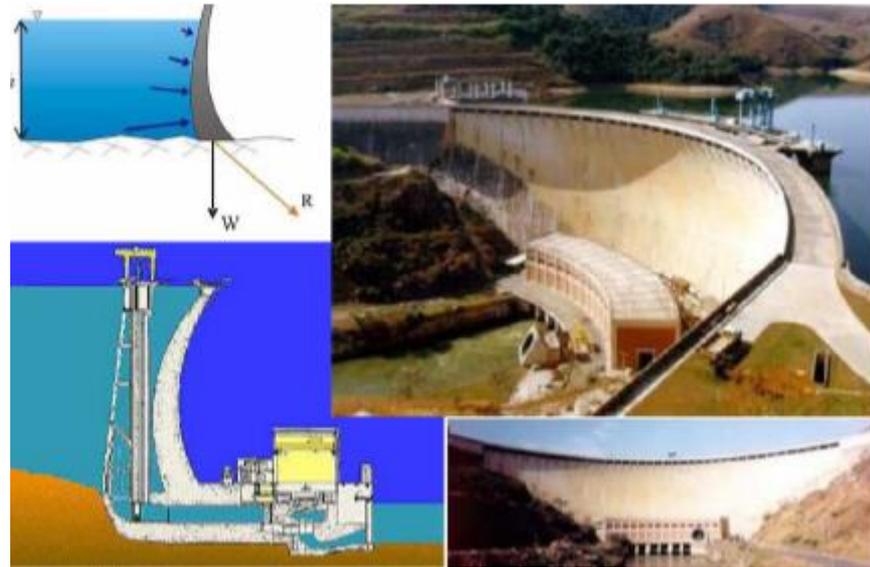
Figura 10 - Estrutura em arco de dupla curvatura



Fonte: Odebrecht (2005).

Para Massad (2010) o problema dessas barragens é hiperestático, requer estudos de compatibilidade de deformações entre estrutura de concreto e o maciço rochoso (figura 11), sendo necessário se conhecer o módulo de elasticidade da rocha. As fundações requerem cuidados minuciosos.

Figura 11 - Seção típica de uma barragem em arco de dupla curvatura



Fonte: Armelin (2013).

### 2.3 LEIS DE SEGURANÇA DE BARRAGENS GERADORAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Estruturas de grandes proporções que represam água, as barragens de usinas hidrelétricas têm importância estratégica para o país, necessitando de constante monitoramento, procedimentos de inspeção e manutenção a plena segurança de suas operações (CONSERVANI, 2019).

Rodeado por incidentes relacionados aos mais diversos tipos de barragens, a preocupação com a segurança destas se tornou crescente nas últimas décadas. Em razão disso, foram estabelecidas legislações em diversos países do mundo com o intuito de regulamentar as etapas de construção e operação, definindo planos de ação emergências (VERÓL, 2012). No Brasil, no ano de 2010, foi sancionada a primeira lei relacionada ao tema, a Lei nº12.334, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinada à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeito e à acumulação de resíduos instruais. A partir desta lei, criou-se também o Sistema Nacional de Informações Segurança de Barragens (SNISB).

A lei nº 12.334 aplica-se a maciços com alturas maiores ou iguais a 15 metros, reservatório com capacidade total maior ou igual a 3.000.000m<sup>3</sup>, e define barragem

como qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou misturas de líquidos e sólidos. Basicamente, esta lei define condições que visam manter a integridade estrutural, operacional e a preservação da vida, seja ela humana ou ambiental (BRASIL, 2010).

Dentre os inúmeros capítulos da Política Nacional de Segurança de Barragens 2010(PNSB), destaca-se aquele em que visa manter a população sempre informada a respeito da situação da barragem que às cerca, estimulando a comunidade à participar diretamente ou indiretamente das ações preventivas e emergenciais. Para a PNSB, é de total obrigação dos proprietários dos empreendimentos, a promoção de mecanismos de participação e controle social.

### **2.3.1 Segurança de barragens destinadas ao setor de geração de energia elétrica**

Os inúmeros tipos de barragens existentes, utilizados para as mais diversas situações, obrigou a PNSB criar em 2012 uma resolução dedicada somente às especificações de fiscalização de barragens. A resolução nº 143, organizou um sistema que classificava as barragens (de todos os tipos) por categoria de risco, dano potencial associado e volume. Visto a necessidade de aprimorar ainda mais a segurança das barragens, os órgãos governamentais optaram por separar as especificações conforme a utilização da barragens. Por fim, direcionada à área de geração de energia elétrica, criou-se em 2015 a Resolução Normativa nº 696, da Lei nº 12.334, a qual estabeleceu critérios para classificação, formulação do Plano de Segurança e a realização da Revisão Periódica de segurança em barragens fiscalizadas pela ANEEL.

As barragens fiscalizadas pela ANEEL são aquelas que tem por objeto de outorga para exploração de potencial de energia hidráulica.

a) Classificação das barragens: A resolução criada em 2015, visou estabelecer critério gerais de classificação referente aos 3 sistemas classificatórios. Quanto a categoria de risco as barragens foram classificadas de acordo com as características técnicas dela (altura, comprimento do coroamento, tipo do material de construção, fundação, idade, etc.); quanto ao seu estado de conservação (confiabilidade das estruturas extravasoras, eclusa, percolação, deformação e recalques, etc.); e quanto ao plano de segurança existente ( documentação de projeto, procedimentos de

inspeção, regra operacional, organização e qualificação dos profissionais da equipe técnica de segurança da barragem).

A classificação quanto ao dano ambiental associado, abrange aspectos referentes à potencial perda de vidas humanas que possam ser atingidas por determinados acidentes. Refere-se também ao tipo de rejeito ou resíduo armazenado, preocupação esta direcionada principalmente a barragens de rejeitos (BRASIL 2015).

Para classificar quanto ao volume em barragens para acumulação de água, as barragens foram divididas em:

- pequena: menor que 5 milhões m<sup>3</sup>
- média: entre 5 milhões m<sup>3</sup> e 75 milhões m<sup>3</sup>
- grande: entre 75 milhões m<sup>3</sup> e 200 milhões m<sup>3</sup>
- muito grande: maior que 200 milhões m<sup>3</sup>

O quadro 2 ilustra como é feito a soma para avaliação de uma barragem referente a acumulação de água. Em anexos, é possível verificar o valor associado a cada situação, e como é feito a soma referente a classificação de uma barragem.

Quadro 2 - Matriz para classificação das barragens de acumulação de água

MATRIZ PARA CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA		
NOME DA BARRAGEM		
NOME DO EMPREENDEDOR		
DATA:		
<b>IL1 - CATEGORIA DE RISCO</b>		<b>Pontos</b>
1	Características Técnicas (CT)	
2	Estado de Conservação (EC)	
3	Plano de Segurança de Barragens (PS)	
<b>PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS</b>		
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	<b>CATEGORIA DE RISCO</b>	<b>CRI</b>
	ALTO	> = 62 ou EC* > =8 (*)
	MÉDIO	35 a 62
	BAIXO	< = 35
(*) Pontuação (maior ou igual a 8) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providências imediatas pelo responsável da barragem.		
<b>IL2 - DANO POTENCIAL ASSOCIADO</b>		<b>Pontos</b>
DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)		
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	<b>DANO POTENCIAL ASSOCIADO</b>	<b>DPA</b>
	ALTO	> = 16
	MÉDIO	10 < DPA < 16
	BAIXO	< = 10
<b>RESULTADO FINAL DA AVALIAÇÃO:</b>		
<b>CATEGORIA DE RISCO</b>		Alto / Médio / Baixo
<b>DANO POTENCIAL ASSOCIADO</b>		Alto / Médio / Baixo

Fonte: Brasil (2012)

b) Plano de Segurança: A elaboração do Plano de Segurança compete ao empreendedor, devendo este apresentar um detalhamento do Plano de Segurança

proporcional à complexidade da barragem, sendo suficientes para garantir as condições adequadas de segurança. Em situações em que as barragens forem classificadas como A ou B, deverão ser elaborados estudos de rompimento e propagação da cheia associada.

Os planos de segurança serão sempre inspecionados por equipes de Segurança de Barragens treinadas e capacitadas, sendo estas, responsáveis por retratar as condições de segurança, conservação e operação do empreendimento. As inspeções de segurança regular deverão ser realizadas sempre que houver alteração no nível de segurança da barragem, observada a periodicidade limite disposta no quadro 3.

Quadro 3 - Periodicidade limite de fiscalização de barragens

	Classe da Barragem		
	A	B	C
Periodicidade	6 meses	1 ano	2 anos

Fonte: Brasil (2012) .

- c) Revisão Periódica de Segurança (RPS): Tem por objetivo diagnosticar o estado geral de segurança da barragem, levando-se em conta o avanço tecnológico, a atuação de informações hidrológicas na respectiva bacia, de critérios de projeto e de condições de uso e ocupação do solo a montante e a jusante do empreendimento. A RPS deve indicar as medidas a serem adotadas pelo empreendedor para a manutenção da segurança da barragem, sendo ele o total responsável legal pela segurança da mesma.

## 2.4 ASPECTOS TÉCNICOS DE CONCEPÇÃO E PROJETO DE BARRAGENS.

### 2.4.1 Fases de Projeto

Antes de executar qualquer obra civil são necessários vários estudos, que evoluem em várias etapas do projeto que antecedem a implantação deste. Esses estudos envolvem inúmeras áreas, como ambiental, técnico-econômicas e social, que são utilizadas para definir as necessidades, adequação, segurança e economia do empreendimento (ARAUJO E BARTH, 2009).

O quadro 4 mostra as cinco fases de estudo das barragens e a respectiva correspondência lógica da necessidade de obtenção das licenças ambientais.

Quadro 4 - Fases de estudos e projeto para obras de barragens

	<b>Fase</b>	<b>Abrangência</b>
1	Inventário	Toda Bacia
2	Plano de Bacia	Toda Bacia
3	Viabilidade	Um local barrável
4	Projeto Básico	O local da Obra
5	Projeto Executivo	O local da Obra
	Regras Operacionais	O local da Obra

Fonte: Araújo e Barth (2005).

Inicialmente, a tomada de decisão para selecionar locais aptos a receberem barramentos, temos primeiramente os estudos preliminares básicos que inclui a coleta de dados nas mais diferentes instituições bem como a digitalização de mapas básicos. Nesta fase, devem ser elaborados estudos de âmbito regional, através dos quais são resgatadas as informações e estudos disponíveis, formando um banco de dados para subsidiar os estudos subsequentes (ARAÚJO E BARTH, 2005).

Para Porto (1997 *apud* SILVEIRA, 2005, p.25), esta fase é dividida em 3 partes:

- a) inteligência: modelo representativo da realidade;
- b) projeto: conjunto de alternativas hierarquizadas;
- c) decisão: selecionar as melhores alternativas que passarão para as fases subsequentes.

Ainda dentro desta primeira fase, segundo Araújo e Barth (2005), é necessário haver uma análise sobre o potencial ambiental da região e uma inspeção de campo com a finalidade de identificar *in situ* fatores desfavoráveis à seleção de locais de barragens não possíveis de serem identificados nos estudos realizados anteriormente.

Após esta fase preliminar, iniciam-se os estudos de inventário hidrelétrico, com objetivo de identificar o potencial hidrelétrico de uma bacia hidrográfica, técnico, econômico, social e ambientalmente aproveitável, levando-se em conta o cenário de utilização múltipla da água na bacia. Isso significa maximizar os benefícios do empreendimento e minimizar os efeitos negativos sobre o meio ambiente (ELETROBRAS, 2016).

A fase de aprovação do Plano de Bacia é a etapa na qual o conjunto das alternativas identificadas pelos estudos de inventário da bacia é apresentada ao Comitê de Bacia para a apreciação e aprovação. Ao comitê, cabe aprovar na íntegra, aprovar parcialmente ou não aprovar (ARAÚJO E BARTH, 2005).

Aprovadas as alternativas no Plano de Bacia, é iniciada a fase de Viabilidade, que analisa individualmente cada alternativa. Esta etapa visa a concepção global e o detalhamento do empreendimento, constante da divisão de quedas selecionada na etapa de inventário, tendo como objetivo a sua otimização técnica, econômica e socioambiental. É nesta etapa que os estudos referentes às estratégias de construção a serem adotadas na implantação da usina hidrelétrica começam a ser estudadas e detalhadas. O detalhamento dos estudos deve ser suficiente para permitir um adequado pré-dimensionamento das obras (ELETROBRAS, 2016).

Segundo a Eletrobrás, finalizado o projeto de Viabilidade, é realizado o leilão do projeto para que o empreendimento passe a ter um "dono" (empreendedor), que conduzirá as etapas subsequentes, começando pelo Projeto Básico. Nesta etapa é feito o detalhamento do estudo de viabilidade da obra – memoriais descritivos da obra, especificações técnicas, plantas e cortes das estruturas e equipamentos permanentes, cronograma e orçamentos -, incluindo o Projeto Básico Ambiental. Concluída esta fase, tem-se o embasamento necessário para os processos de licitação da obra, que selecionarão as companhias capazes de executar a obra. Tem-se então o Projeto Executivo, onde realiza-se o detalhamento dos estudos desenvolvidos na fase anterior, visando à implantação do empreendimento, incluindo medidas pertinentes à formação do reservatório. Esta etapa está diretamente associada à construção do empreendimento. Por último, em paralelo à execução da obra são realizados os estudos de estabelecimento das Regras Operativas, como por exemplo os detalhes da armação das paredes de uma determinada estrutura.

#### **2.4.2 Critérios de Escolha do Tipo de Barragem.**

Muitos são os tipos de materiais e as técnicas construtivas possíveis de serem utilizadas na construção de barragens e, por consequência, cabe ao projetista compatibilizar o uso dos materiais e das técnicas disponíveis às condições do meio físico local (ARAÚJO E BARTH, 2005).

Para Cruz (1998), os critérios especificados em projeto podem ser “perigosos” porque, por serem genéricos, são incapazes de prever situações peculiares que sempre ocorrem em todo projeto de uma barragem. Para evitar problemas de compatibilização de aplicação do projeto, faz-se necessário visitas de campo anteriores à qualquer tomada de decisão final.

O principal critério para escolha do tipo de barragem é a disponibilidade de materiais de construção nas proximidades do local de implantação da barragem. Deve-se dar especial atenção aqueles provenientes das escavações obrigatórias necessárias à construção das obrigatórias. Sugere-se que as jazidas de solo tenham no mínimo o dobro de material previsto para o corpo da barragem, e materiais granulares e rochosos devem ter 50% a mais que o volume estimado para as necessidades da obra. Nenhum material natural de construção deve ser descartado, mesmo que este tenha volume pequeno, podendo ser utilizado em estruturas com seções essencialmente diversas de outro trecho (CRUZ, 1998).

O quadro 5 resume em modos gerais, o tipo de barragem a ser escolhida, quando o critério é os materiais disponíveis.

Quadro 5 - Relação entre material disponível e tipo de barragem escolhida

<b>Materiais disponíveis</b>	<b>Tipo de Barragem mais indicado</b>
Região de basalto – argila	Barragem homogênea de terra
Região de granito – rocha (enrocamento e agregado para concreto)	Barragem de terra e enrocamento ou de concreto gravidade
Região com pouca argila	Barragem com núcleo delgado ou face de concreto
Região com solos distintos	Barragem zoneada

Fonte: Sayão (2013 *apud* SOUZA, 2013, p.16).

Além do critério dos materiais disponíveis, a fundação condiciona de maneira marcante a escolha da seção típica da barragem. A escolha é feita em função do nível de tensões sobre as fundações, do caminho de percolação, da profundidade da camada resistente, sua textura, e de acordo com essas informações deve-se optar pelo tipo de barragem mais adequado as características da fundação, e os tratamentos necessários.

A topografia do local de construção da barragem deve ser analisada e também é um dos fatores fundamentais na escolha do tipo de barragem a ser construída. O formato dos vales pode ser em forma de U ou V, abertos, médio e fechado. O quadro 6 apresenta o tipo de barragem adequado conforme forma do vale.

Quadro 6 - Tipos de barragens para determinado tipo de vale

<b>Tipo de vale</b>	<b>Características do vale</b>	<b>Barragem indicada</b>
Fechado	Erosão vertical, menor volume de construção	Barragem de concreto (arco ou gravidade)
Média	Descontinuidades na altura da barragem, recalques diferenciais, trincas transversais	Barragem de concreto (gravidade ou contrafortes) ou de enrocamento
Aberto	Maior custo de execução, erosão lateral, depósitos sedimentares, maior área de reservatório	Barragem de terra ou enrocamento com núcleo

Fonte: Araújo e Barth (2005)

Segundo Araújo e Barth (2005), além dos condicionantes anteriores, faz-se necessário a avaliação do clima da região, a geologia e a hidrologia do local, os tipos de equipamentos e recursos de laboratório, o custo de mão de obra, a legislação local referente as leis sociais e à segurança da obra, as condições econômicas, os fatores de preservação ambiental e os prazos construtivos, além de aspectos políticos e demagógicos. Somam-se a isso, os recursos humanos e a experiência dos projetistas e das empreiteiras.

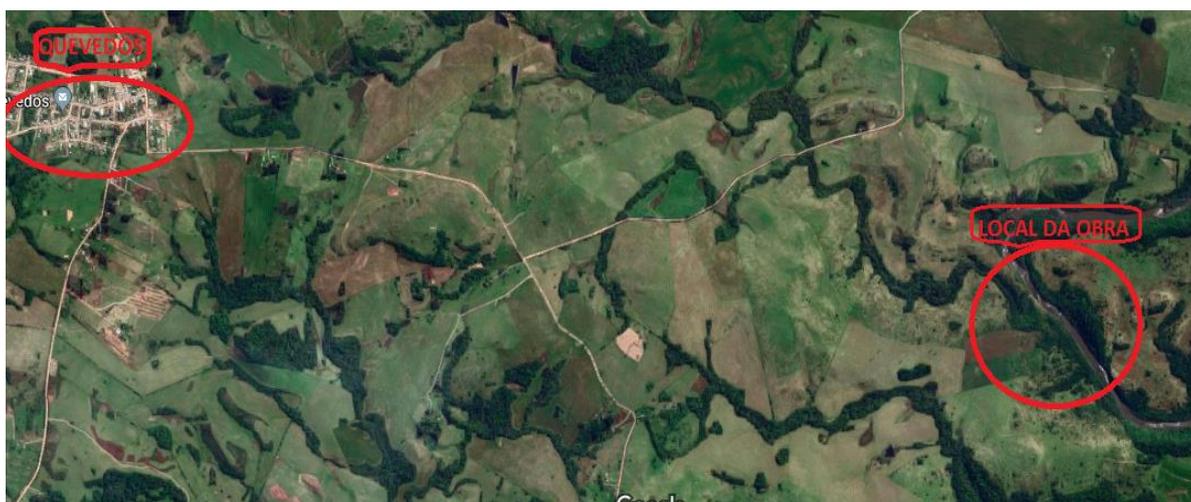
### 3. ESTUDO DE CASO: CONSTRUÇÃO DA BARRAGEM EM CCR DA PCH QUEBRA DENTES, QUEVEDOS RIO GRANDE DO SUL.

#### 3.1 DADOS GERAIS DA OBRA

Na busca por novos ramos de investimentos, o grupo de varejo Havan resolveu injetar seu capital no mercado energético brasileiro. A construção de PCH'S, crescente no país, chamou atenção do empresário do ramo varejista, Luciano Hang, que após conseguir liberação para implantar suas lojas do ramo no estado do Rio Grande do Sul, anunciou em conjunto, o investimento de 500 milhões na execução de 4 PCH's na região central do estado. As 4 Pequenas Centrais Hidrelétricas, fazem parte do chamado Complexo Toropi somando após finalizadas, um total de 63 Megawatts/hora de produção de energia. Dentro dessas 4 construções, está a PCH Quebra Dentes, base deste Trabalho de Conclusão de Curso do autor.

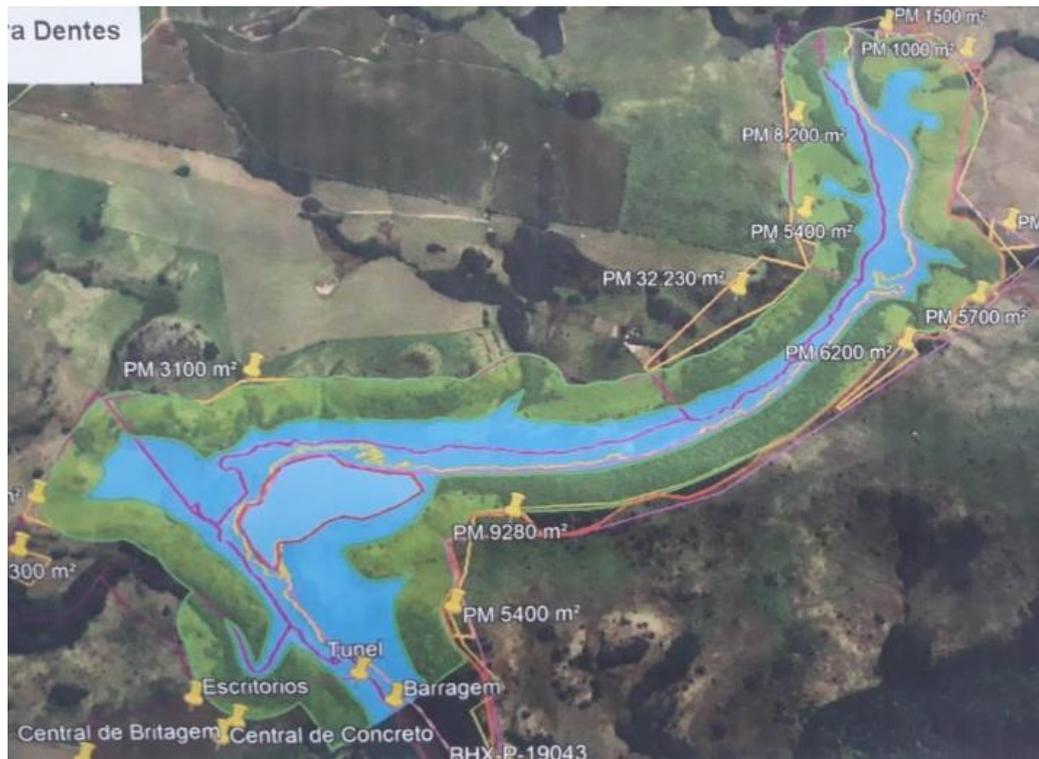
A PCH Quebra Dentes, está localizada a  $29^{\circ}22'32''$  S e  $54^{\circ}01'05''$  W no rio Toropi, divisa dos municípios de Quevedos com Júlio de Castilhos (figuras 12 e 13), interior do Rio Grande do Sul. A base do canteiro de obras, escritórios, túnel, ombreira direita e casa de máquinas estão localizadas no município de Quevedos. A ombreira esquerda do barramento está no município de Júlio de Castilhos-RS.

Figura 12 - Localização do empreendimento.



Fonte: Google Earth (2019)

Figura 13 – Projeção da área de alagamento da PCH Quebra Dentes.



Fonte: Projeto Topográfico DAM Energy (2018)

A tabela 3 mostra as características técnicas da barragem.

Tabela 3 - Características PCH Quebra Dentes.

Volume de armazenamento	14.738.720 m <sup>3</sup>
Área máxima do reservatório	92,117 ha
Cota máxima do barramento	305,08 m
N.A. máximo	303,33 m
N.A. normal	300,33 m (cota vertedouro)
Altura máxima da barragem	24,55 m
Extensão da crista da barragem	202,20 m
Extensão Vertedor Soleira	112,00 m
Profundidade máxima do reservatório	22,62 m
Geração de energia da PCH	22,40 MW/h

Fonte: Autor (2019).

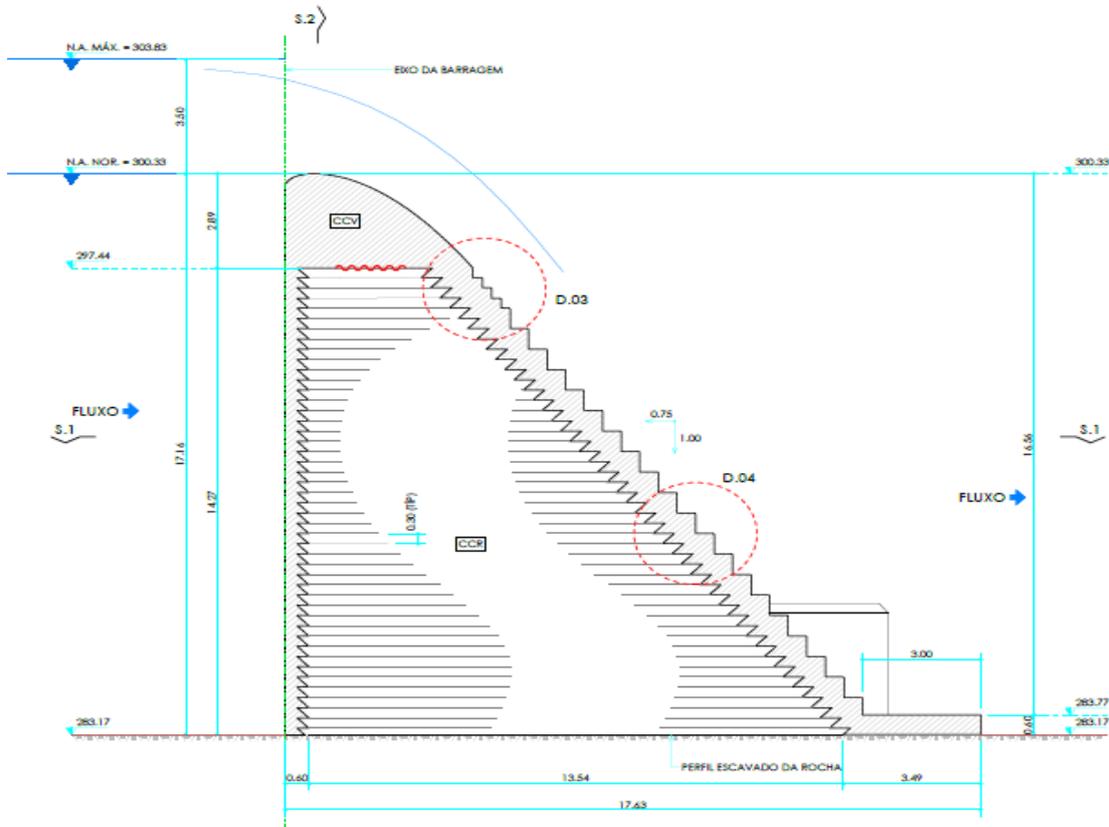
A obra está sendo gerida pela empresa Quevedos Energética S.A., fiscalizada executivamente pela empresa DAM Energy, e executava pelas empresas FBF construtora e Pedra Branca Escavações.

### 3.2 SEÇÃO TIPO DA BARRAGEM

A escolha final do tipo de barragem, geralmente deve ser feita após a consideração relacionadas as condições climáticas, feições físicas (topográficas, geológicas, geomorfológicas, etc.) do local da obra e a sua adaptação para atender a finalidade para a qual será construída, observando-se os aspectos de economia, de segurança, socioambientais e outras limitações pertinentes (CABRAL CRUZ, 2005 p. 298).

As razões pelas quais foi escolhido a construção da barragem da PCH Quebra Dentes no método concreto CCR, tiveram base nas investigações de sondagem realizadas no "campo de alcance" da obra, o qual não apresentou argila de qualidade para que se fizesse um barramento de terra. Pondera-se também, que a abundância de material rochoso de boa resistência extraído do túnel da obra, foi de significativa importância para a escolha do método CCR, visto que a britagem da rocha no canteiro traria grandes ganhos econômicos ao empreendimento. O fator climático da região também foi um grande influenciador no método construtivo, visto que os períodos chuvosos acarretariam em uma lentidão na execução de um barramento feito em argila, considerando que a execução da PCH é na maior parte no outono/inverno (período onde o clima da região apresenta grande precipitações). Juntos aos fatores citados, as inspeções técnicas realizadas no local da barragem, informaram uma fundação constituída de rocha sã, indeformável, podendo-se optar por uma barragem rígida, como a de CCR. Sendo assim, a escolha de um tipo de barragem em concreto CCR foi a que apresentou menor prazo de construção, maior ganho financeira, reaproveitamento de materiais do canteiro, e segurança construtiva. Definiu-se assim uma barragem em Concreto Compactado com Rolo. A figura 14 mostra a seção transversal tipo da barragem. Pode-se observar que devido à baixa altura do barramento, a mesma não possui galeria de drenagem e inspeção.

Figura 14 – Seção transversal tipo da barragem da PCH Quebra Dentes



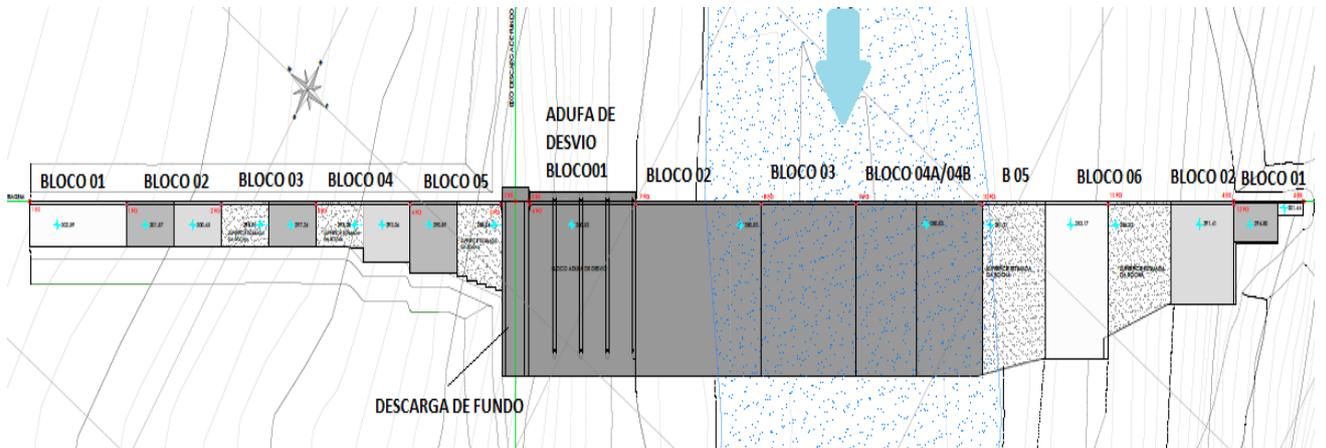
Fonte: Projeto executivo PCH Quebra Dentes

### 3.3 DIVISÃO DOS BLOCOS DA BARRAGEM

O método construtivo adotado para o núcleo dos blocos da barragem da PCH Quebra Dentes, foi o de Concreto Compactado com Rolo por vezes rampado, por vezes tradicional. Conforme ilustram as figuras 15 e 16, os blocos foram divididos em:

- ombreira direita: bloco 01, bloco 02, bloco 03, bloco 04, bloco 05.
- descarga de fundo, núcleos e paredes.
- adufa de desvio, núcleos, paredes, bloco 01.
- vertedouro: bloco 02, bloco 03, bloco 04A, bloco 04B, bloco 05, bloco 06.
- ombreira esquerda: blocos 01, bloco 02.

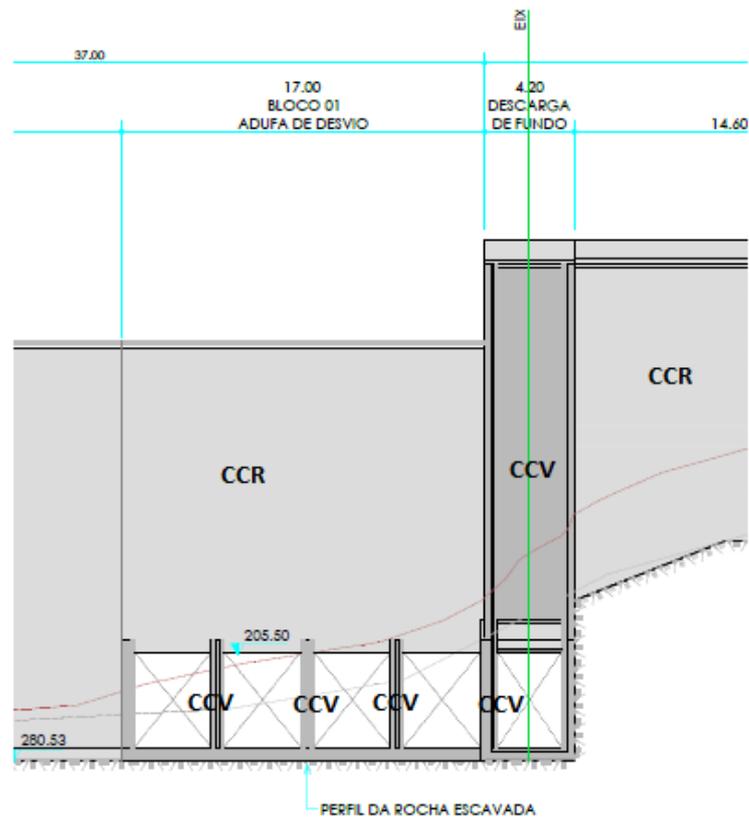
Figura 15- Detalhamento do barramento.



Fonte: Projeto Executivo PCH Quebra Dentes (2018).

As paredes, núcleos das estruturas de adufa e descarga de fundo foram todas executadas em concreto convencional vibrado de 20 MPA.

Figura 16 - Detalhe das adufas de desvio, descarga de fundo e Bloco 02.



Fonte: Projeto Executivo PCH Quebra Dentes (2018)

### 3.5 ANÁLISES GEOFÍSICAS E GEOLÓGICAS DA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM

A elaboração dos projetos de construção do barramento de uma PCH exigem conhecimentos técnicos de geologia da região de implantação da mesma. Antes de elaborar os projetos, o responsável por este recebe as observações de campo e as investigações geotécnicas, as quais serão fundamentais para a escolha do projeto mais adequado para determinada construção.

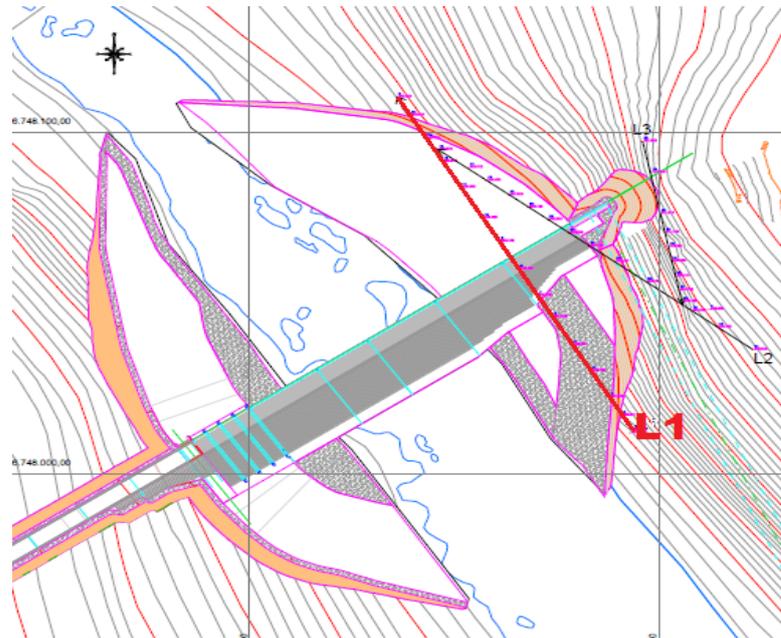
Para o caso da PCH Quebra Dentes, foram aplicados ensaios rotativos e geoeletricos nas ombreiras da barragem.

A sondagem rotativa é um tipo de investigação direta feita com um tubo chamado barrilete, disposto de uma peça cortante que perfura a seção do terreno através de um movimento de rotação, conforme descreve Maciel Filho (2007, p.112). Por este ensaio são obtidas amostras a cada metro, informações sobre o nível d'água, identificação e classificação das camadas que compõem o subsolo e condição de resistência dos materiais do subsolo.

O ensaio Geoeletrico é explicado pelo fato de as rochas apresentarem composições mineralógicas, texturas e deposições, fazendo com que elas tenham propriedades elétricas características, tais como resistividade, permeabilidade magnéticas, constante dielétrica, etc. Em função disto, uma seção geológica pode ser considerada como um meio, cujos materiais existentes apresentam diferentes propriedades elétricas, conforme Oliveira (2016, p.07).

A figura 17 ilustra as 3 linhas (L1, L2 e L3) dos ensaios geoeletricos executados na ombreira esquerda do barramento. Segundo geologia do empreendimento, a realização destes 3 ensaios foram suficientes para que se pudesse ter um entendimento do perfil em que se instaria a ombreira esquerda. Um dos resultados do levantamento geoeletrico foi ilustrado na figura 18 - perfil da linha -.

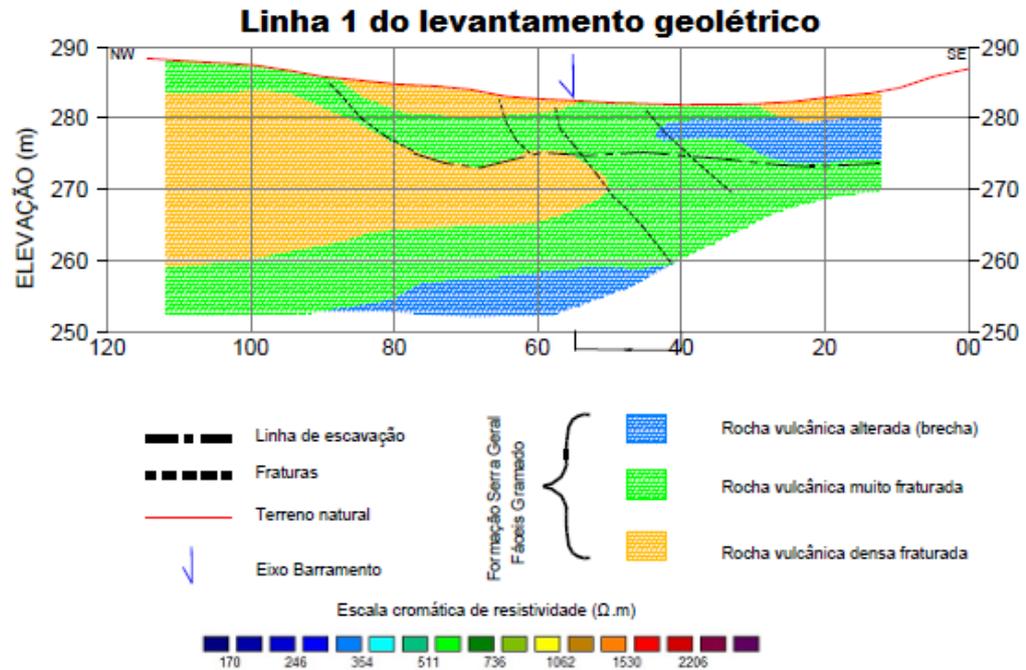
Figura 17 - Mapeamento de localização das linhas de ensaio geolétrico.



Fonte: Projeto Executivo PCH Quebra Dentes (2018).

Os resultados obtidos nos levantamentos geológicos e geotécnicos definiram os planos de escavação e limpeza da ombreira esquerda, como também expuseram a necessidade de injeção de calda de cimento nas fraturas de rocha. Conforme resultado do ensaio (figura 18), o eixo do barramento encontra-se em um local de rocha com características satisfatórias para o apoio da ombreira. Os resultados dos ensaios para as linha L2 e L3 tiveram características semelhantes aos apresentados no perfil L1, satisfazendo a necessidade de resistência para apoio da ombreira esquerda.

Figura 18 - Levantamento geolétrico 01



Fonte: Projeto Executivo PCH Quebra Dentes (2018).

### 3.6 ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DE MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO

Com o objetivo de verificar as características dos agregados e garantir que estes, ao serem usados na confecção do concreto estejam de acordo com a especificação técnica da obra, foram realizados ensaios de granulometria, conforme NBR NM 248:2003 *Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de Ensaio*. Após estes, foram realizados os ensaios que definem a dimensão máxima característica e o módulo de finura dos agregados conforme NBR 7211:2009 *Agregados para concreto - Especificação*. Também foi realizado o ensaio para definir o teor de material pulverulento de acordo com a NBR 46:2003 *Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 $\mu$ m por lavagem*.

#### 3.6.1 Areia Artificial

A areia artificial está classificada como agregado miúdo, uma vez que seus grãos obtiveram módulo de finura 3,12 e diâmetro máximo de 4,76 , ficando entre os

limites recomendados de 0,074 à 4,8mm. No quadro 7 são apresentados dados da areia artificial usada nos concretos da PCH Quebra Dentes.

Quadro 7 - Composição granulométrica Areia Artificial

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA - NBR NM 248								
Peneiras		Ensaio (Valores médios)			Limites recomendados - NBR 7211 (Acumulados)			
					Porcentagem Retida			
ASTM	mm	Retida g	Retida %	Acumulada %	Limites inferiores		Limites superiores	
					Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
3/8	9,5	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0
1/4	6,3	0,0	0,0	0,0	0	0	0	7
4	4,76	0,0	0,0	0,0	0	0	5	10
8	2,38	90,2	23,9	23,9	0	10	20	25
16	1,19	100,9	26,7	50,6	5	20	30	50
30	0,59	71,1	18,8	69,4	15	35	55	70
50	0,297	38,0	10,1	79,5	50	65	85	95
100	0,149	34,5	9,1	88,6	85	90	95	100
FUNDO		43,0	11,4	100,0	-	-	-	-
TOTAL		377,6	100,0		-	-	-	-
MÓDULO FINURA =		3,12						
DIÂM. MÁXIMO =		4,76mm						

Fonte: Relatório de Qualidade de CCR FBF PCH Quebra Dentes (2018).

### 3.6.2 Brita 1 e 2

A brita 1 é classificada como agregado graúdo, com seus grãos apresentando módulo de finura de 6,7 diâmetro máximo de 19,0mm (quadro 8), ou seja, está dentro dos limites recomendados por norma (NBR NM 248:2003 NBR 7211:2009) (entre 4,75 e 19,5mm). A qualidade da brita 1 é garantida devido ao fato de a mesma ser obtida através do processamento de rocha basáltica afanítica, densa e resistente.

A brita 2 é classificada como agregado graúdo, uma vez que seus grãos têm um diâmetro compreendido entre 4,75 e 19,5mm. Para a amostra ensaiada (quadro 8), obteve-se um diâmetro máximo 32,00 e módulo de finura igual a 7,83. Assim como a brita 1, a qualidade da brita 2 é garantida pois sua obtenção se dá através do processamento de rocha basáltica afanítica, densa e resistente.

Quadro 8 - Composição granulométrica Brita 1 e 2

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA - NBR NM 248							
Peneiras		Ensaio (Valores médios)			Limites recomendados - NBR 7211/2009 (Acumulados)		
ASTM	mm	Retida g	Retida %	Acum. %	Porcentagem Retida		
					Brita 0	Brita 1	Brita 2
1 1/2	38	0,0	0,0	0,0	-	-	-
1 1/4	32	0,0	0,0	0,0	-	-	0 - 5
1	25	1835,2	35,1	35,1	-	0 - 5	5 - 25
3/4	19	2592,0	49,6	84,7	-	2 - 15	65 - 95
1/2	12,5	791,7	15,1	99,8	0 - 5	40 - 65	92 - 100
3/8	9,5	0,0	0,0	99,8	2 - 15	80 - 100	95 - 100
1/4	6,3	0,0	0,0	99,8	40 - 65	92 - 100	-
4	4,76	0,0	0,0	99,8	80 - 100	95 - 100	-
8	2,38	0,0	0,0	99,8	95 - 100	-	-
16	1,19	0,0	0,0	99,8	-	-	-
30	0,59	0,0	0,0	99,8	-	-	-
50	0,297	0,0	0,0	99,8	-	-	-
100	0,149	0,0	0,0	99,8	-	-	-
FUNDO		10,8	0,2	100,0	-	-	-
TOTAL		5229,7	100,0		-	-	-
MÓDULO FINURA =		7,83					
DIÂM. MÁXIMO =		32,0mm					

Fonte: Relatório de Qualidade de CCR FBF PCH Quebra Dentes (2018).

### 3.6.3 Cimento

O cimento utilizado pela executora na obra é classificado como CP IV-32-RS à granel. Este tipo de cimento tem baixo calor de hidratação, sendo recomendado para concretagens de grandes volumes e sob temperaturas elevadas. O alto teor de pozolana em sua composição garante que o calor liberado pela hidratação do clínquer de cimento seja menor, evitando o risco de fissuração. As análises físicas do cimento seguem no quadro 9

Quadro 9 - Resultado do ensaio de resistência à compressão do cimento

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - ABNT NBR 7215							
Idade (dias)	Resultados obtidos					DMR %	Limites estabelecidos ABNT NBR 16697
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	Média		
3	28,2	26,3	27,0	27,5	27,3	3,5%	≥10,0MPa
7	29,2	29,4	28,5	29,1	29,1	1,2%	≥20,0MPa
28	41,3	38,8	39,8	38,0	39,5	4,6%	≥32,0MPa

DMR – Desvio relativo máximo não deve ultrapassar o valor de 6% NBR 7215. OBS: Item 3.6.4 - NBR 7215 - Quando o desvio relativo máximo for superior a 6%, calcular uma nova média, desconsiderando o valor discrepante.

Fonte: Relatório de Qualidade de CCR FBF PCH Quebra Dentes (2018).

### 3.6.4 Ensaio de umidade higroscópica dos materiais

O ensaio de umidade higroscópica dos agregados foi realizado no início dos turnos, a fim de obter-se valores próximos dos reais a cada dosagem, garantindo

qualidade do concreto. Os resultados obtidos nos ensaios (quadro 10), foram utilizados para a correção dos traços de concreto no momento do carregamento.

Quadro 10 - Ensaio de umidade higroscópica

AMOSTRA 01		AMOSTRA 02		AMOSTRA 03	
Local do Ensaio:	Laboratório	Local do Ensaio:	Laboratório	Local do Ensaio:	Laboratório
Material:	Areia Artificial	Material:	Brita 1	Material:	Brita 2
Umidade Higroscópica		Umidade Higroscópica		Umidade Higroscópica	
Cápsula nº	1	Cápsula nº	2	Cápsula nº	3
Agregado Úmido (g)	500,00	Agregado Úmido (g)	500,00	Agregado Úmido (g)	500,00
Agregado Seco (g)	482,00	Agregado Seco (g)	488,00	Agregado Seco (g)	492,00
Tara (g)	0,00	Peso da Caps. (g)	0,00	Peso da Caps. (g)	0,00
Peso da Água (g)	18,00	Peso da Água (g)	12,00	Peso da Água (g)	8,00
Peso Solo Seco (g)	482,00	Peso Solo Seco (g)	488,00	Peso Solo Seco (g)	492,00
Teor de Umidade (%)	3,73	Teor de Umidade (%)	2,46	Teor de Umidade (%)	1,63

Fonte: Relatório de Qualidade de CCR FBF PCH Quebra Dentes (2018).

### 3.7 TRAÇOS E ENSAIOS REALIZADOS COM CCR

#### 3.7.1 Traços

O CCR utilizado foi classificado de acordo com a resistência característica de projeto ( $F_{ck}$ ). A resistência característica a compressão mínima deverá atingir um valor de 9,0 MPa aos 90 dias de idade.

A argamassa de ligação utilizada na obra deve ter uma resistência mínima a compressão de 12,0 Mpa aos 90 dias de idade.

Segue no quadro 12 a relação de uma das cartas traço de concreto ensaiadas em canteiro, sendo o traço utilizado em obra o CC 2ª.

Quadro 11 - Classes concreto (em Kg/m<sup>3</sup>)

 <b>PCH QUEBRA DENTES - PCH SALTO DO GUASSUPI</b>											
<b>TRAÇOS DE CONCRETO CCR</b>											
<b>Abatimento 8 à 10 segundos</b>											
Materiais	Traço G (ARG)		Traço CCR 1A		Material Traço (%)	Traço CCR 2A		Material Traço (%)	Traço CCR 3A		Material Traço (%)
	Fck (MPa)	Idade (Dias)	Fck (MPa)	Idade (Dias)		Fck (MPa)	Idade (Dias)		Fck (MPa)	Idade (Dias)	
	12	90	9	90		9	90		9	90	
Cimento	300,0		90,0		3,81%	110,0		4,65%	110,0		4,65%
Areia Artificial	1519,0		1349,0		57,05%	1233,0		52,14%	1169,0		49,44%
Brita 1	-		535,0		22,63%	582,0		24,61%	542,0		22,92%
Brita 2	-		260,0		11,00%	298,0		12,60%	388,0		16,41%
Água	300,0		130,0		5,50%	135,0		5,71%	140,0		5,92%
BASF 122	2,7		0,585		0,02%	0,715		0,03%	0,715		0,03%
A/C	1,0		1,4		-	1,2		-	1,3		-

Fonte: Relatório de Qualidade de CCR FBF PCH Quebra Dentes (2018)

### 3.7.2 Rompimento de corpos de prova

A moldagem e os ensaios de compressão axial dos corpos de prova foram realizados seguindo os procedimentos técnicos das normas ABNT NBR 5738:2016 e ABNT NBR 5739:2018. Conforme cada liberação de concretagem, foi recolhido as amostras, assinada em três vias pelos responsáveis de cada setor da obra.

Para o CCR, a resistência característica máxima dos corpos de prova será atingida aos 90 dias.

Observa-se no quadro 12 que as amostras do concreto CCR fabricado atingiram a resistência média de 7,40 Mpa aos 28 dias, estando dentro do esperado conforme procedimento de elaboração do traço.

Quadro 12 - Rompimento de CP's de CCR

TRAÇO DE CONCRETO											PCH QUEBRA DENTES				
TRAÇO CLASSE	Fck (MPa)	Idade (Dias)	Abatimento	AVC	Consumo de Materiais (kg/m <sup>3</sup> )										
					Cimento	Água	Areia Artificial	Brita 1	Brita 2	Aditivo					
CCR 2A	9,0	90	8 a 10s	1,23	110	135	1,233	582	298	0,715					
Moldagem	Nº Liberação	Consumo de Materiais (kg/m <sup>3</sup> )									Local de Aplicação				
		7 Dias			28 Dias			90 Dias							
		Data do Rompimento	CP 1	CP 2	Média (MPa)	Data do Rompimento	CP 1	CP 2	Média (MPa)	Data do Rompimento		CP 1	CP 2	Média (MPa)	
Nº	Data	Hora													
1	05/12/18	11:00:00	65	12/12/18	7640	7960	4,4	02/01/19	12980	12720	7,3	05/03/19			Vertedouros, Bloco 02, Camada 01
2	06/12/18	06:40:00	66	13/12/18	7980	8610	4,9	03/01/19	13520	13940	7,9	06/03/19			Vertedouros, Bloco 02, Camada 02 e 03
3	06/12/18	07:40:00	66	15/12/18	7980	7920	4,5	05/01/19	12990	12970	7,4	06/03/19			Vertedouros, Bloco 02, Camada 04 e 05
4	11/12/18	07:00:00	73	18/12/18	8050	8080	4,6	05/01/19	13010	13080	7,4	11/03/19			Vertedouros, Bloco 02, Camada 06 e 07
5	14/12/18	09:40:00	82	21/12/18	7980	8010	4,5	11/01/19	12990	12980	7,3	14/03/19			Vertedouros, Bloco 02, Camada 08 e 09
6	17/12/18	07:00:00	84	24/12/18	8150	8130	4,6	14/01/19	13070	13030	7,4	17/03/19			Vertedouros, Bloco 02, Camada 10 e 11
7	19/12/18	17:50:00	85	26/12/18	8130	8090	4,6	16/01/19	13080	13460	7,6	19/03/19			Vertedouros, Bloco 02, Camada 12 e 13
8	04/01/19	08:10:00	93	11/01/19	7980	7820	4,5	01/02/19	12990	12840	7,3	04/04/19			Vertedouros, Bloco 02, Camada 14 e 15
9	05/01/19	14:50:00	94	12/01/19	8030	7610	4,5	02/02/19	12890	12910	7,3	05/04/19			Vertedouros, Bloco 02, Camada 16 e 17
10	06/01/19	09:50:00	95	15/01/19	8460	8340	4,8	05/02/19	12910	12860	7,3	09/04/19			Vertedouros, Bloco 02, Camada 18 e 19
11	11/01/19	14:00:00	97	19/01/19	8270	8210	4,7	09/02/19	12940	12810	7,3	11/04/19			Omb. Direita, Bloco 3, 4 e 5, c. 1 e 2
12	12/01/19	15:30:00	100	19/01/19	8140	7920	4,6	09/02/19	12980	12930	7,3	12/04/19			Vertedouros, Bloco 02, Camada 20 e 21
13	14/01/19	14:00:00	102	21/01/19	7780	7690	4,4	11/02/19	12850	12990	7,4	14/04/19			Omb. Direita, Bloco 3, 4 e 5, c. 3 e 4
14	18/01/19	18:00:00	101	22/01/19	8010	7860	4,5	12/02/19	12880	12890	7,3	15/04/19			Vertedouros, Bloco 02, Camada 22 e 23
15	21/01/19	11:00:00	107	29/01/19	7910	7970	4,5	19/02/19	13100	12980	7,4	21/04/19			Omb. Direita, Bloco 3, 4 e 5, c. 5 e 6
16	22/01/19	11:00:00	106	29/01/19	7620	7840	4,4	19/02/19	13030	12880	7,4	22/04/19			Vertedouros, Bloco 1 e 2, c. 24 e 25
17	23/01/19	11:00:00	108	30/01/19	7680	7660	4,3	20/02/19	12900	13120	7,4	23/04/19			Omb. Direita, Bloco 3, 4 e 5, c. 7 e 8
18	24/01/19	15:20:00	111	31/01/19	7680	7710	4,4	21/02/19	13140	13080	7,4	24/04/19			Vertedouros, Bloco 1 e 2, c. 26 e 27
19	25/01/19	14:00:00	113	01/02/19	7810	7840	4,4	23/02/19	12740	12910	7,3	25/04/19			Omb. Direita, Bloco 3, 4 e 5, c. 9, 10 e 11
20	26/01/19	13:30:00	114	02/02/19	7760	7720	4,4	23/02/19	12780	12890	7,3	26/04/19			Vertedouros, Bloco 1 e 2, c. 28 e 29
Média					4,5				7,4						
Número de amostras					20				20						
Desvio padrão					0,1				0,1						
Coeficiente de variação (%)									1,9						
Evolução da resistência (%)									63,1						

Fonte: Relatório de Qualidade de CCR FBF PCH Quebra Dentes (2018)

### 3.7.3 Ensaio de compactação de CCR

Conforme os procedimentos adotados e repassados pela empresa executora (FBF) da PCH Quebra Dentes, para toda camada de CCR aplicada, foram realizados ensaios para obtenção do grau de compactação, densidade e umidade do concreto. Estes ensaios são realizados *in loco*. Além dos ensaios em campo, antes do transporte do material até a frente de serviço, foram executados ensaios em laboratório.

Os ensaios de CCR em laboratório seguiram orientação da NBR 16312-2/2015 e NBR 16312-3/2015; para determinação de consistência, tempo de vibração e massa específica do CCR, utilizando o método do Vebê Modificado. Todas amostras para realização desse ensaio foram retiradas dos caminhões recém carregados na central de CCR. Na sequência, com a massa e o volume do recipiente vazio determinados, o concreto é disposto em camadas no consistômetro Vebê Modificado com auxílio de uma concha, para que se evite qualquer forma de compactação. Após o preenchimento do recipiente, o mesmo é rasado e encaixado na mesa vibratória.

Figura 19 - Consistômetro Vebe Modificado Encaixado à mesa vibratória.



Fonte: Relatório de Qualidade de CCR FBF PCH Quebra Dentes (2018).

O cronômetro e a mesa vibratória são ativados simultaneamente, devendo ser observado o preenchimento de vazios e formação de película de argamassa no cilindro para determinar o tempo de vibração. Após isso, o recipiente é vibrado por mais 120 segundos, retirado da mesa vibratória e pesado para a realização do ensaio da massa específica do CCR. É feita então a medição do espaço deixado no recipiente após toda vibração.

Com a obtenção dos valores conforme procedimentos descritos acima, pode-se então calcular a massa específica e o grau de compactação do CCR em laboratório.

Os ensaios de CCR em campo foram executados sempre após a conclusão de cada camada de 30 centímetros, extraído de um local já compactado - com o auxílio de um anel e materiais pontiagudo - uma amostra suficientemente capaz de após os cálculos, oferecer valores de consistência, tempo de vibração e massa específica do CCR aplicado. Os cálculos para determinação destas grandezas são obtidos através das seguintes equações:

- Determinação da massa da água adicionada na cavidade  $P4 = P2 - P3$ ;
- Determinação da densidade da amostra de concreto CCR;

$$DA = \left( \frac{\left( \frac{P1}{P4} \right)}{(100 + umidade)} \right) \times 100$$

- Determinação do grau de compactação da camada de CCR;

$$GC = \left( \frac{DA}{DT} \right) \times 100$$

Onde:

P1= Massa do CCR extraída da cavidade da camada (kg)

P2= Massa de água antes da aplicação no furo do CCR (Kg)

P3= Massa de água após a aplicação do furo do CCR (kg)

P4= Massa da água para preencher a cavidade (Kg)

DA= Densidade da amostra extraída (Kg/m<sup>3</sup>)

DT= Densidade Teórica (Kg/m<sup>3</sup>)

GC= Grau de Compactação (%)

Segue o quadro 13 com resultados de ensaios de laboratório e de campo realizados conforme citados anteriormente. É possível observar que os resultados foram satisfatórios diante do que as normas NBR 16312-2/2015 e NBR 16312-3/2015 exige.

Quadro 13 - Relatório controle tecnológico de concreto CCR. Ensaios de Laboratório e de Campo

 <b>CONTROLE TECNOLÓGICO</b> <b>GRAU DE COMPACTAÇÃO DE CONCRETO CCR</b>	
<b>OBRA:</b> PCH QUEBRA DENTES <b>ESTRUTURA:</b> OMBREIRA DIREITA - BLOCOS 3, 4 E 5 <b>DATA:</b> 25/01/19	
<b>1 - MASSA UNITÁRIA CCR - ENSAIO VEBÊ MODIFICADO - LABORATÓRIO</b>	
Tara VeBê = <b>m3</b> (Kg)      6,660 Volume VeBê = <b>v1</b> (l)      9,000 VeBê + Concreto = <b>m1</b> (Kg)      20,480 VeBê + Concreto + Água = <b>m2</b> (Kg)      23,622 Massa do Concreto (Kg)      13,820 Massa da Água (Kg)      3,142 Concreto CCR Úmido (g)      720,00 Concreto CCR Seco (g)      669,00 Umidade CCR (%)      7,62 Massa Específica Teórica Úmida = <b>μc</b> (Kg/m <sup>3</sup> )      2.374,00	<b>1.1 - Volume de Concreto (m4)</b> $m4 = v1 - (m2 - m1)$ m4 (l) <b>5,858</b>
	<b>1.2 - Massa Específica do Concreto Fresco (μe)</b> $\mu e = \frac{(m1 - m3)}{\left(\frac{m4}{1000}\right)}$ μe (Kg/m <sup>3</sup> ) <b>2359,2</b>
	<b>1.3 - Grau de Compactação (GC)</b> $GC = \frac{\mu e}{\mu c} \cdot 100$ GC (%) <b>99,38</b>
	<b>RESULTADO</b> <b>SATISFATÓRIO</b> Grau de Compactação exigido 97 à 100%
<b>2 - MASSA UNITÁRIA AMOSTRA CCR - ENSAIO FILME PLÁSTICO - CAMPO</b>	
Massa CCR Extraído = <b>me</b> (Kg)      38,620 Massa Água Cavidade = <b>ma</b> (l)      15,590 Volume Água Cavidade = <b>Va</b> (m <sup>3</sup> )      0,0156 Concreto CCR Úmido (g)      600,00 Concreto CCR Seco (g)      567,00 Umidade CCR <b>U</b> (%)      5,82 Massa Específica Teórica Úmida = <b>μc</b> (Kg/m <sup>3</sup> )      2.374,00	<b>2.1 - Massa Específica do Concreto CCR (μa)</b> $\mu a = \left( \frac{me/\mu c}{\left(\frac{Va}{100+U}\right)} \right) \cdot 100$ μa (Kg/m <sup>3</sup> ) <b>2341,0</b>
	<b>2.2 - Grau de Compactação (GC)</b> $GC = \frac{\mu a}{\mu c} \cdot 100$ GC (%) <b>98,61</b>
	<b>RESULTADO</b> <b>SATISFATÓRIO</b> Grau de Compactação exigido 97 à 100%
Liberação de concreto: FBF-PCHQD-LB-113 Camada: CCR 09 Elevação: 303,29 Local do Ensaio: P1	
<b>Condição do Tempo:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Bom <input type="checkbox"/> Nublado <input type="checkbox"/> Chuvisco	

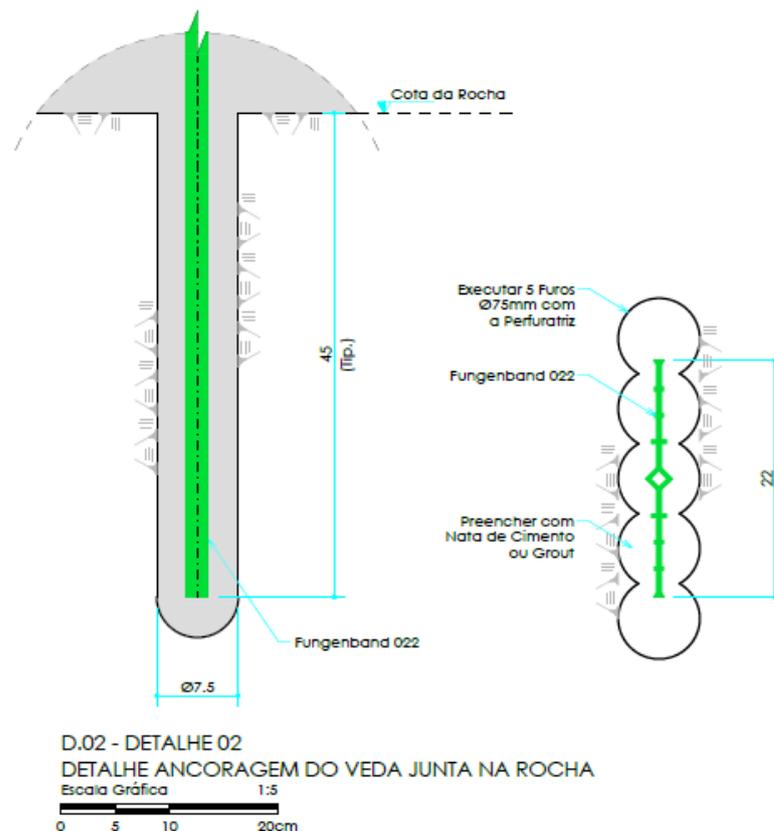
Fonte: Relatório de Qualidade de CCR FBF PCH Quebra Dentes (2018).

### 3.8 SISTEMA DE VEDAÇÃO E TRATAMENTO DE FUNDAÇÃO

Diante das exigências construtivas da execução do concreto CCR, a qual prevê juntas de contração na estrutura de barramento e vertedouro (possuem a finalidade de compatibilizar a capacidade de produção e requisitos de projeto), o projeto da PCH Quebra Dentes definiu divisões dos blocos das estruturas em tamanhos de 15 a 20 metros.

No encontro dos blocos da barragem, as juntas de dilatação ou contração, possuem à montante “veda juntas” do tipo *fungenband* O-22 (figura, utilizadas para barramentos com alturas de até 30 metros. Para fixação do “veda junta” *fungenband* em rocha, foi executada uma perfuração de 45 cm de profundidade na rocha sã para introdução do material e imobilização do mesmo.

Figura 20 – Fixação da *fungenband* em rocha



Fonte: Projeto Executivo PCH Quebra Dentes (2018).

Após fixação em rocha, o “veda junta” é protegido e posicionado através de uma armação (figura 21), a qual garante apenas o posicionamento do material, sem função estrutural, evitando que os processos de execução dos blocos do barramento desloquem o “veda junta”. Conforme figura 21, observa-se a existência de uma armadura de pele, a qual tem função de dar melhor sustentação à camada de CCV, evitando futuramente a retração do concreto, o que poderia acarretar na abertura de fissuras à montante

Figura 21 - Posicionamento e armação do veda junta fungenband



Fonte: Autor (2019).

“Durante o preparo da fundação, as escavações devem ser feitas até se atingir níveis adequados de fundação, do ponto de vista geomecânico” (MILANI, 2003).

Todo corpo do vertedouro e da barragem estão locados sobre rocha basáltica sã. O processo construtivo constituiu na escavação dos materiais alterados até o encontro com a rocha sã. Chegado até a rocha sã, foi feita a verificação de sua densidade, garantindo que esta não estivesse solta. Para isto, através de barras de ferro, bateu-se em toda base rochosa a fim de analisar o som de reação; em caso de sons de “rocha oca”, realizou-se nova remoção com escavadeira, até que se

pudesse chegar à rocha densa. Garantida a qualidade da fundação, foi realizada a limpeza desta com jatos de água e ar, até que se tivesse uma superfície em perfeitas condições para o recebimento de argamassa de ligação, e posterior aplicação do concreto de regularização a fim de deixar toda a superfície plana e pronta para o recebimento do CCR (figura 22).

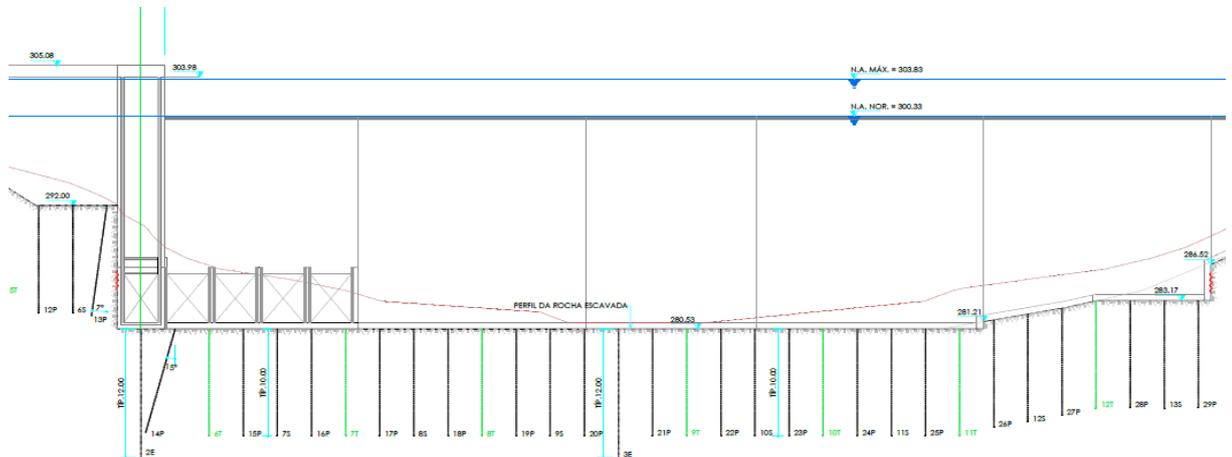
Figura 22 - Execução da regularização sobre a linha de rocha do bloco 04 B do vertedouro



Fonte: Autor (2019).

Para o tratamento da percolação de água na linha de montante da barragem, ou seja, o sistema de vedação, foi implementada cortina de injeção de calda de cimento, composta por uma linha com furos primários espaçados em 6 metros cada, e furos secundários localizados entre cada furo primário (figura 23). A profundidade de cada furo variou entre 10 metros e 12 metros.

Figura 23 - Mapeamento injeção de calda de cimento na fundação do barramento  
vista frontal



Fonte: Projeto Executivo PCH Quebra Dentes (2018).

### 3.9 CENTRAL DE CCR E PISTA EXPERIMENTAL

A fabricação do concreto compactado com rolo a ser utilizado na obra é todo produzido em uma central de concreto CCR fixa no canteiro industrial da obra PCH Quebra Dentes. A operação desta conta com um sistema de abastecimento de agregados por meio de correias, onde todas levam até o misturador. Após, o misturador descarrega o concreto nos caminhões basculantes, os quais levam até a frente de serviço.

Seguindo as especificações técnicas da produção de CCR, foi feita uma pista experimental para definição de diversas características e procedimentos a serem seguidos nas camadas de CCR, como dosagem, número de passadas do rolo, espessura de camadas para o rolo especificado, intervalo de lançamento entre as mesmas, etc.

A pista teste executada pela construtora compreendeu a primeira camada de CCR do bloco 02 do Vertedouro (figura 24), da cota 280,23 à 280,53, nas dimensões e 15x15x0,3. Criou-se assim, uma otimização dos processos, onde foi possível aproveitar a camada lançada para estudo, como camada base do bloco 02.

Após a execução da pista e avaliação do comportamento do traço elaborado, foram definidos os equipamentos necessários para a execução do Concreto Compactado com Rolo.

- 10 caminhões basculantes;
- 1 Rolo compactador Caterpillar CS54B 10.555 Kg;
- 1 Trator de esteira Komatsu D51EX 14.000 Kg;
- 4 Caminhões betoneiras;
- 2 Compactadores de Percussão Weber SRV 500;
- 1 Compressor de ar;
- 1 Bomba de sucção 4”.

O procedimento também definiu que para densidade requerida, o número de passadas do rolo compactador necessárias por camada seria de 8, sendo 2 sem vibrações e 6 com vibrações. A espessura final das camadas de CCR nos degraus do vertedouro será de 30cm, uma vez que cada degrau tem altura de 63 cm.

Figura 24 – Representação da Pista Teste CCR no Bloco 2



Fonte: Projeto Executivo PCH Quebra Dentes (2018).

### 3.10 PREPARAÇÃO DA PRAÇA PARA RECEBIMENTO DO CCR

O resultado final de qualquer processo construtivo será de boa qualidade desde que sejam observados os mais minuciosos detalhes, em especial aqueles registrados nas normas técnicas. O Concreto Compactado com Rolo, por mais que represente um processo de simples execução, talvez seja um dos processos que exija um maior número de ações até sua finalização. Tem-se necessidade de que o caminhão basculante, o rolo compactador e o trator de esteira, os quais irão ingressar no local da execução, estejam absolutamente limpos, livres de qualquer tipo de poeira, terra ou outro material que possa afetar na qualidade de compactação e liga do CCR.

Para execução do CCR da PCH Quebra Dentes, houve a preparação da praça em volta dos blocos e a limpeza dos maquinários que ingressariam na frente de serviço (figuras 25 e 26). Preparou-se o acesso para ingresso dos caminhões e dos maquinários com rocha detonada, travada por agregados de diferentes diâmetros. Antes do ingresso no acesso, todos os caminhões e máquinas tiveram seus pneus lavados e aerados com jatos ar.

Figura 25 - Limpeza do rolo compactador antes de entrar em praça



Fonte: Autor (2019).

Figura 26 - Limpeza dos pneus do caminhão antes da entrada em praça



Fonte: Autor (2019).

Outro importante processo pré execução de CCR, é a limpeza da camada que irá receber o concreto ´no slump`. A tabela 16 mostra os processos necessários, conforme o intervalo de tempo de execução.

Quadro 14 - Critérios usuais de lançamento e tratamento de juntas

Intervalo de Tempo Entre Camadas Consecutivas	Zona Onde se Prevê Argamassa de Ligação	Zona Onde Não se Prevê Argamassa de Ligação
Menos que 4 horas (diurno) e 8 horas (noturno)	A nova camada pode ser lançada sem qualquer tratamento.	
Entre 4 horas (diurno) e 24 horas ou 8 horas (noturno) e 24 horas.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Limpeza da superfície com jato de ar úmido.</li> <li>2. Lançamento da argamassa de ligação.</li> <li>3. Lançamento da nova camada de CCR.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Limpeza da superfície com jato de ar úmido.</li> <li>2. Lançamento da nova camada de CCR.</li> </ol>
Mais de 24 horas	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Preparação da superfície com escova giratória ou jato de ar e água.</li> <li>2. Lançamento da argamassa de ligação.</li> <li>3. Lançamento da nova camada de CCR.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Limpeza da superfície com jato de ar.</li> <li>2. Lançamento da nova camada de CCR.</li> </ol>

Fonte: Milani (2003).

Um dos dados que a pista teste forneceu, foi o tempo de intervalo máximo de 2 horas (dentro dos critérios usuais de lançamento) que a execução de camadas poderia ter para o recebimento de outra camada, sem a necessidade de tratamento. Para intervalos maiores que 2 horas, fez-se o uso de argamassa de ligação, bem como anterior a isso, a limpeza da camada com o uso de jatos de ar e água pressurizados.

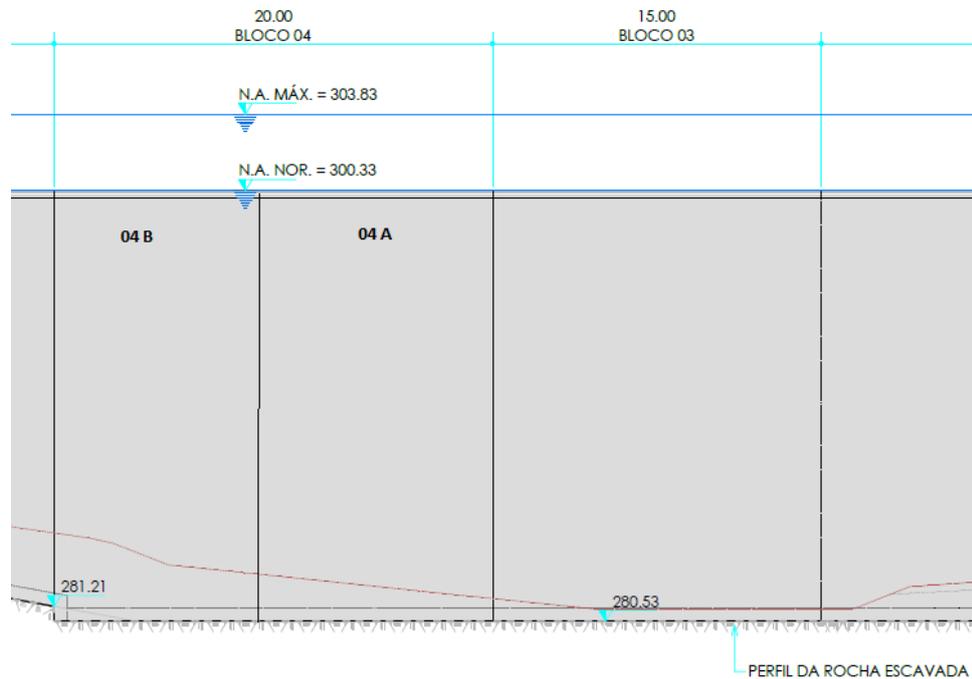
### 3.11 EXECUÇÃO DO CCR

Concluídos os processos de limpeza até a chegada na rocha sã, injeção de calda de cimento, regularização da camada em contato com a rocha, concretagem das paredes e núcleos de adufas e descarga de fundo, tem-se a liberação para o início da execução do Concreto Compactado com Rolo (CCR).

Para análise da execução de CCR deste estudo, fixou-se como base, a construção dos blocos 3; 4A e 4B, que apesar de divididos em projeto, foram executados em um mesmo processo linear, em uma vez, tendo o avanço de suas elevações em conjunto. Para a divisão entre os blocos, tem-se os “veda juntas” (conforme citado no item 3.8) e a inserção de mantas “neoprene” ao correr de cada encontro de bloco, com a função de espaçamento entre eles para dilatação e contração.

Os blocos 3; 4A e 4B fazem parte do vertedouro (figura 27), com perfil de rocha na cota 280,53 metros, camada de regularização de 68 centímetro, tendo início do lançamento de CCR sobre a camada de regularização, cota 281,21 metros.

Figura 27 - Projeto de divisão entre os blocos 03,04A e 04B



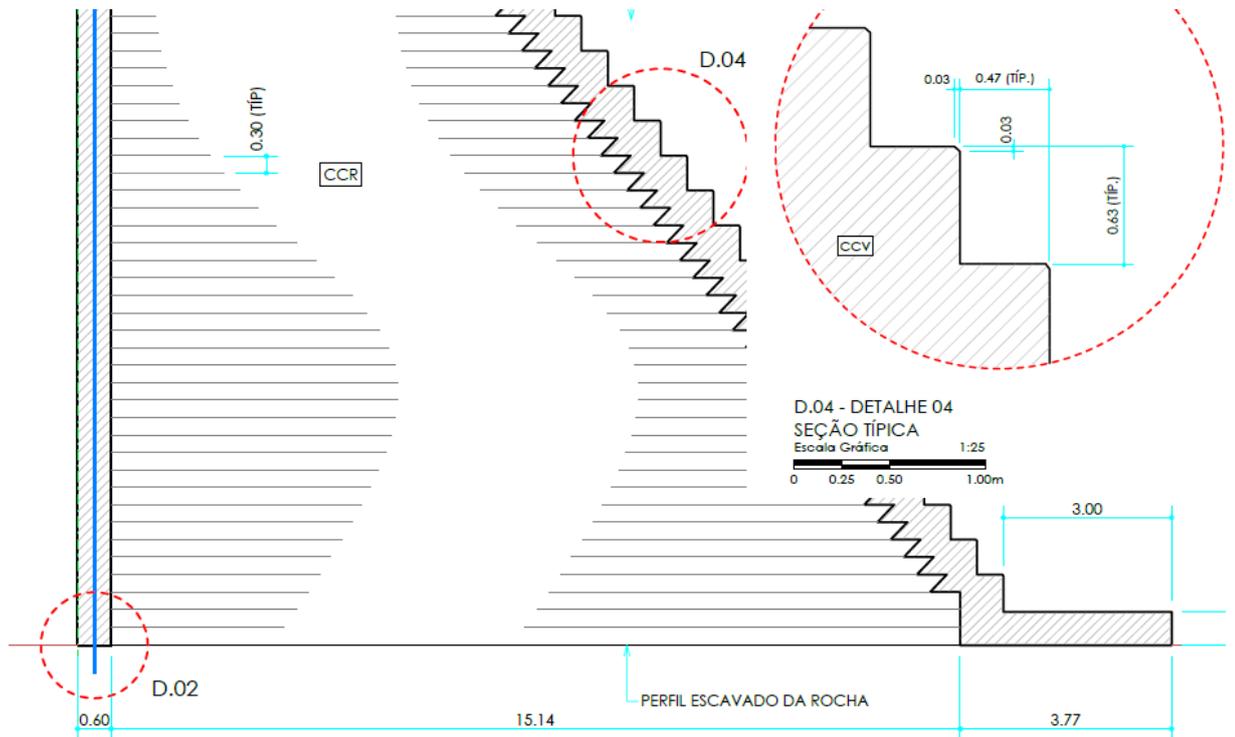
Fonte: Projeto Executivo PCH Quebra Dentes (2018).

Para o recebimento do concreto “no slump”, cercou-se a praça de concretagem à montante, esquerda hidráulica e jusante (direita hidráulica já estava delimitada pelo bloco 02) com formas trepantes verticais, conforme a NBR 15696. A montante, junto à todas as formas, inseriu-se a armadura de pele (conforme imagem 21).

A autorização para que os caminhões possam chegar até a frente de serviço é dada após a Engenharia fiscalizadora da obra liberar a frente de serviço, bem como a praça envoltória.

Após ingressarem nos blocos a serem executados, o rolo compactador e o trator de esteira ficam em espera até a chegada dos caminhões betoneira e posteriormente os caminhões basculantes com a carga de concreto CCR. O método de lançamento adotado pela executora foi de lançar primeiramente o concreto convencional (fck 20 Mpa aos 90 dias) nas faces do vertedouro, através de caminhões betoneira. O projeto previu camada de 60 centímetros de CCV à montante e 50 centímetros de CCV – degrau de 47 centímetros e espaçamento para forma de 3 centímetros - à jusante (figura 28).

Figura 28 - Detalhamento Vertedouro



Fonte: Projeto Executivo PCH Quebra Dentes (2018).

Após o preenchimento do concreto CCV nas faces do vertedouro, houve o lançamento da argamassa de ligação por caminhões betoneira sobre a camada de CCR antiga. O espalhamento deste se deu pelos operários, com rodas especiais, conforme figura 29

Figura 29 - Espalhamento Argamassa de Ligação



Fonte: Autor (2019).

Terminado o espalhamento da camada da argamassa de ligação, teve início a entrada dos caminhões basculantes para o derramamento do concreto CCR. Conforme o tamanho da praça do bloco, era delimitado o número de caminhões necessários para cobrir uma camada de 30 centímetros.

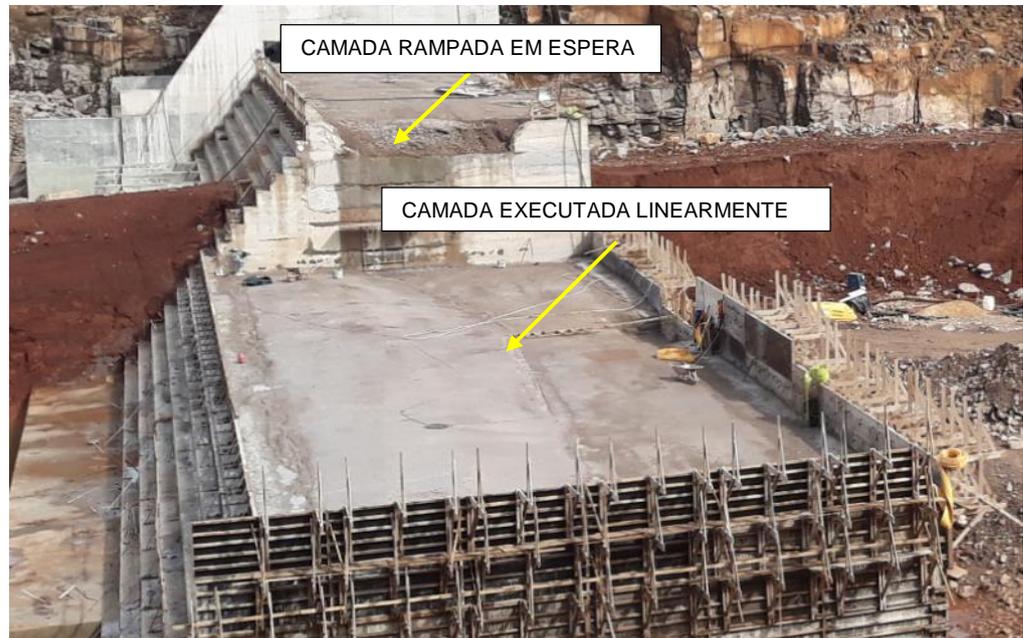
A escolha do método de compactação – rampado ou tradicional – fez-se conforme o tamanho da praça a ser concretada no dia. Em geral, nas camadas mais baixas dos blocos 4A,4B e 5 do vertedouro, onde a área era maior, escolheu-se o método rampado (figura 30 e 31), por questões de praticidade e otimização de execução. Em cotas mais elevadas, onde as áreas a serem concretadas eram menores, optou-se pelo método tradicional, capaz de cobrir e compactar toda camada linearmente.

Figura 30 - Praça de CCR com camada finalizada no Método Rampado



Fonte: Autor (2019).

Figura 31 - Camada executado no Método Tradicional Linear



Fonte: Autor (2019).

Após os caminhões bascularem todas as cargas de concreto programadas para aquela praça de concretagem, o trator de esteira Komatsu D51EX espalha todo o concreto *no slump* de modo a atingir uma altura de 40 centímetros por toda a área desejada. Ao fim do espalhamento de todo CCR e antes da compactação, foi realizado na linha longitudinal de todas as juntas de dilatação, uma abertura manual com inchadas, para que houvesse a inserção da lona Neoprene na camada a ser compactada (figura 32). Este processo garante que todas as juntas de dilatação possuam o espaçamento necessário entre os blocos, conforme projeto.

Figura 32 - Abertura de vala para inserção de lona Neoprene no correr da junta de dilatação



Fonte: Autor (2019).

Um dos principais processos na execução do Concreto Compactado com Rolo é o subsequente ao espalhamento do trator de esteira. A necessidade de ter uma compactação idêntica à da pista experimental, para que se obtenha camadas com a resistência requerida em projeto, fez com que se tivesse um cuidado minucioso em toda compactação de todas as camadas dos blocos. Todas as camadas compactadas, tiveram sempre o mesmo Rolo Compactador de 10.555 kg, previsto após a execução da pista experimental e dos ensaios em laboratório. Conforme fixado após resultados da pista experimental, o número de passadas do rolo compactador foi de 8 vezes, 6 passadas vibrando, e 2 passadas sem a vibração, a fim de se obter em cada camada, uma altura de 30 centímetros (figura 33). Conforme projeto, cada degrau do Vertedouro (onde os blocos 4A, 4B e 5 estão compreendidos) possui 63 centímetros. Terminada a compactação com o rolo, todas as faces de CCV 20 Mpa foram vibradas, com a função do adensamento do mesmo.

Figura 33 - Rolo vibrando camada de CCR



Fonte: Autor (2019).

Nas regiões não acessíveis ao rolo vibratório, na ligação entre CCR e CCV, e na ligação do CCR junto aos blocos laterais, foram utilizados compactadores de percussão manuais (figura 34), com capacidade de até 680 golpes por minuto. Após finalizada a camada de 30 centímetros com todos os processos acima descritos, a mesma ficou pronta para que se houvesse o recebimento da camada posterior, também de 30 centímetros, repetindo os mesmos processos de recebimento, espalhamento e compactação.

Figura 34 - Compactação com Compactador de Percussão



Fonte: Autor (2019).

Para dias onde a temperatura era elevada, ou havia sol, no intervalo da execução dessas duas camadas, molhou-se o concreto CCR já compactado a fim de garantir uma cura gradual e sem perda de água rapidamente.

Figura 35 - Camada de CCR executada recebendo película e água para cura.



Fonte: Autor (2019).

### 3.12 OBSERVAÇÕES DO PROCESSO CONSTRUTIVO

Durante o processo construtivo, houveram grandes precipitações de chuva, sendo que em uma dessas ocorrências, a ensecadeira de argila que protegia a praça de execução dos blocos 04A,04B e 05, galgou. A correnteza da água que invadiu a praça de CCR provocou a erosão superficial da camada que havia sido lançada no dia anterior (figura 36). O procedimento adotado após o esgotamento total da água que estava dentro da ensecadeira e a limpeza total da camada, foi o de corte verde, com jatos pressurizados de ar e o posterior lançamento de argamassa de ligação, para então receber a nova camada de CCR.

Figura 36 - Camada de CCR erodida pelas ação da água



Fonte: Autor (2019).

Em situações em que houve o início de chuva moderada, sendo que o processo de lançamento do CCR já estivesse iniciado, compactou-se a camada lançada e posteriormente cobriu esta com lonas impermeáveis a fim de não prejudicar o adensamento da camada. Em uma ocasião de camada lançada, não foi possível a compactação antes da forte chuva, sendo assim, a camada que havia sido lançada foi removida.

Para camadas que aparentavam excesso de agregados, ou falta de ligantes, a empresa fiscalizadora exigia o corte verde da mesma, podendo, dependendo do tamanho da má qualidade do concreto, exigir a retirada de todo material. Para situações em que houvesse uma má compactação da camada (figura 37), o processo de corte ou remoção também era exigido.

Figura 37 - Situação de camada com má compactada



Fonte: Autor (2019).

Durante os processos executivos das camadas do vertedouro, testou-se uma nova ordem no lançamento de CCR (figura 38), diferentemente da tradicional utilizada pela empreiteira. Neste teste, foi feito primeiro o lançamento e compactação do CCR na camada de 30 centímetros, posteriormente, no espaço entre o CCR compactado e as formas do bloco, inseriu-se o CCV. Conforme conclusão dos responsáveis pela execução, esta ordem de lançamento acarretaria em uma demora maior de execução, se comparado com o método tradicionalmente utilizado pela mesma, além de um consumo maior de CCV.

Figura 38 - Forma alternativa de lançamento de CCR



Fonte: Autor (2019).

## 4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DE CCR

Optar por métodos construtivos de grandes obras é uma decisão que envolve inúmeras razões e consequências, principalmente sociais e econômicas. O concreto Compactado com Rolo é um método construtivo recente no âmbito da engenharia de barragens, visto que sua consolidação como alternativa deu-se em torno de 40 anos atrás.

Segundo Lacerda (2006), a maior vantagem do CCR sobre outros tipos de concreto, é a possibilidade de redução e otimização do custo e do tempo de construção devido à mecanização do processo de lançamento do concreto. As principais vantagens estão destacadas a seguir:

- ✓ Produtividade superior à de outros processos;
- ✓ Redução do custo (Cronograma reduzido);
- ✓ Mão-de-obra otimizada e de fácil adaptação;
- ✓ Maior fluência (menor probabilidade de fissuras de origem térmica);
- ✓ Menor interferência das condições climáticas no lançamento
- ✓ Vida útil com mais de 20 anos e pouca manutenção
- ✓ Economia de cimento: a grande densidade alcançada com os rolos vibratórios, faz com que o CCR tenha maior resistência que o concreto convencional com igual teor de cimento.

O menor custo do CCR pode ser atribuído ao uso de equipamentos de grande produção, redução do consumo de materiais de custo mais elevado e redução sensível no uso de fôrmas, além da simplificação e redução na infraestrutura de apoio.

Mesmo assim, o CCR apresenta certas limitações em seu uso. Por exemplo, as variações na umidade e a compactação não adequada estão ligadas ao comportamento final deste tipo de concreto. Outro importante fator que limita o uso deste tipo de método construtivo, é quando não há agregados de boa qualidade próximos a obra, ou não há distribuidores de materiais cimentícios próximos a região.

## 5 CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica realizada, permitiu o aprofundamento dos conhecimentos relacionados aos tipos de barragens existentes, bem como suas concepções gerais de execução. Antes da construção de qualquer tipo de barragem, há a necessidade de inúmeros processos, os quais começam na premissa básica de estudo da região à ser construída, até a parte final de emissão dos projetos executivos. Dentro desta fase pré-executiva, tem-se a escolha do tipo de barragem, a qual está relacionada principalmente as condições da fundação e características dos materiais disponíveis na proximidade da barragem.

Além das concepções técnicas referente às barragens, estudou-se também a necessidade de especificações cada vez mais detalhadas referentes à segurança de barragens, tema cada vez mais recorrente na década atual. Hoje, qualquer barragem em operação ou em execução deve garantir condições de segurança, qualidade, funcionalidade e durabilidade aceitáveis. Para isto, deve ser seguido rigorosos procedimentos de monitoramento, manutenção e segurança na operação. No Brasil, destaca-se a Lei nº12.334 e a Resolução nº696 (referente a Lei nº12.334), com a finalidade de manter a segurança de toda comunidade da região da barragem, aqueles que nela trabalham e à todo habitat natural que qualquer acidente possa atingir.

Aprofundar o estudo na execução da barragem da Pequena Central Hidrelétrica de Quebra Dentes, foi e suma importância visto a relação entre estudos teóricos bibliográficos e o estudo prático visual. Estar inserido diariamente em um meio relacionado ao tema do trabalho, permitiu a observação de diversos detalhes que teoricamente não seria possível análise.

A definição da construção da barragem da PCH Quebra Dentes em Concreto Compactado com Rolo, deu-se devido as investigações geológicas e geotécnicas mostrarem a falta de materiais argilosos na região, o vale ter forma fechada, e haver uma quantidade grande de rocha escavada dos túneis da obra.

Para o tratamento da fundação da barragem Quebra Dentes utilizou-se de injeções de calda de cimento quando a rocha se apresentava muito fraturada. Em geral, a camada de fundação apresentou ótima resistência. A vedação das juntas entre os blocos da barragem deu-se com a utilização de veda junta *fungerband O22*.

Verificou-se também os processos técnicos de execução do Concreto Compactado com Rolo, utilizado para execução do vertedouro do barramento. O concreto “no slump”, ou seja, de aspecto seco e com pouca utilização de cimento, permitiu a construção de um barramento mais rápido e com uma significativa redução nos custos da barragem do tipo gravidade. Apesar de ter composição simples, as etapas da execução do CCR exigiram cuidados minuciosos, visto a necessidade de se obter os resultados especificados em projeto, principalmente com camadas homogêneas e bem compactadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 207.5R-89: **Roller compacted mass concrete**: Manual of concrete practice, Materials and General Properties of Concrete. v.1, 1998. Disponível em: <[http://dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI%20207.5R-11%20Report%20on%20Roller-Compacted%20Mass%20Concrete\\_MyCivil.ir.pdf](http://dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI%20207.5R-11%20Report%20on%20Roller-Compacted%20Mass%20Concrete_MyCivil.ir.pdf)>. Acesso em: 15 maio 2019.

ANA. **Manual do empreendedor sobre Segurança e Barragens**. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/cadastros/barragens/ManualEmpreendedor/DiretrizesParaElaboracaoProjetosBarragens.PDF/>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

ANDRIOLO, F.R. Aspectos sobre o uso do CCR em barragens Brasileiras. 7<sup>th</sup> **International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams**. China, 2015. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/documentos/AspectosDoUsoDoCCREmBarragensnoBrasil01Agosto2015.pdf> />. Acesso: em 25 mar. 2019.

\_\_\_\_\_. Barragens em CCR. **II Seminário Nacional De Concreto Compactado Com Rolo**. 1996. Disponível em: <<https://www.andriolo-eng.com/pt/publicacoes/>>. Acesso em: 20 fev. 2019.

ARAÚJO, T. A.; BARTH, J. Aspectos técnicos de barragens. In: SILVEIRA, G.L; CRUZ, J.C. (Org) **Seleção ambiental de barragens**: análise de favorabilidades ambientais em escala de bacia hidrográfica. Santa Maria: Ed. Da UFSM/ABRH, 2005. 20-270 p.

ARMELIN, L.; FERREIRA, R. **Classificação das Barragens**. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2013. Disponível em: <<http://professor.ucg.br/SiteDocente/Acesso> >. Acesso em: 05 jan. 2019.

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C. Estabilidade de Taludes. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Org). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. 243-269 p.

BARBOZA, Marcos R.; BASTOS, Paulo Sérgio. Traços de concreto para obras de pequeno porte. **Concreto e construção**, 2008. 7 p.

BATISTA, Moisés. **Estabilidade do Vertedouro**. Projeto PCH Quebra Dentes. Universidade Estadual Paulista. UNESP, 2019.

\_\_\_\_\_. **Projeto executivo.** Projeto PCH Quebra Dentes. Universidade Estadual Paulista. UNESP, 2018.

BUREAU OF RECLAMATION. **Avaliação de pequenas barragens.** Brasília, 2002. 74 p. Disponível em: <<http://www.codevasf.gov.br/principal/publicacoes/>>. Acesso em: 15 abr. 2019.

BUREAU OF RECLAMATION. **Design of small dams.** 3<sup>rd</sup>-Washington: United States Department of the Interior, 1987.

BRASIL. ANEEL. **Matriz energética elétrica.** Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.c>>. Acesso em: 30 mar. 2019.

\_\_\_\_\_. ANEEL. **Resolução normativa nº696, de 15 de dezembro de 2015.** Realização do plano de segurança em barragens fiscalizadas pela ANEEL. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015696.pdf/>>. Acesso em: 18 abr. 2019.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº143, de 10 de julho de 2012.** Classificação de barragens. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/seguranca-de-barragens/>>. Acesso em: 18 abr. 2019.

\_\_\_\_\_. Presidência da Republica. **Lei nº12.334, de 20 de setembro de 2010.** Política Nacional de Segurança de Barragens. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm/](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm/)>. Acesso em: 18 abr. 2019.

\_\_\_\_\_. Eletrobras. **Critério de projeto civil de Usinas Hidrelétricas.** Brasília 2003. 141-277 p. Disponível em: <<https://eletrobras.com/en/AreasdeAtuacao/geracao/Manuais/>>. Acesso em: 18 abr. 2019.

CARVALHO, L. H. **Curso de Barragem de Terra:** Ministério do Interior –DNOCS. Fortaleza, 1983.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **A história as barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI:** cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro, 2011. 524 p. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/documentos/>>. Acesso em: 18 abr. 2019.

COMITÊ INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. **As barragens e a água no mundo**. [S.1], 2007. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/documentos>>. Acesso em: 18 abr. 2019.

CONSERVANI, César. **Segurança em barragens de usinas hidrelétricas**. Jornal do Correio. Texto online, 2019 Disponível em: <<https://www.correio24horas.com.br/noticia/nid/seguranca-em-barragens-de-usinas-hidreletricas/>>. Acesso em: 18 abr. 2019.

CONSOCIO CONSTRUTOR BELO MONTE. **Concreto compactado com Rolo (CCR):** Determinação do Teor de Umidade após a mistura. Especificações técnicas. 2013

\_\_\_\_\_. **Concreto compactado com Rolo (CCR)**. Especificações técnicas. 2013

\_\_\_\_\_. **Concreto compactado com Rolo (CCR):** Liberação para execução de obras. Especificações técnicas. 2013.

COOKE, J. B.; SHERARD, J. L.. Barragens de Enrocamento com Face de Concreto I: Conceitos. **Journal Of Geotechnical Engineering**, 1987.

CORPS OF ENGINEERS. Gravity Dam Design,1995. Disponível em: <[https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM\\_1110-2-2200.pdf](https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-2200.pdf)>. Acesso em: 30 maio 2019.

\_\_\_\_\_. **Roller-Compacted Concrete**, 2000. Disponível em: <[https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM\\_1110-2-2006.pdf](https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-2006.pdf)>. Acesso em: 30 maio 2019.

CRUZ, P. T. C. **100 barragens brasileiras:** casos históricos, materiais de construção, projeto. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

CRUZ, Paulo T. **Barragens de enrocamento com face de concreto**. 2ª ed. São Paulo, 2014. 79-173 p.

FERNANDES, A. R. D. Relato – Tema 100 – Construções de Barragens. In: **Seminário Nacional de Grandes Barragens**. Comitê Brasileiro De Barragens.

Belém, 2007. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/seminario/belem/>>. Acesso em: 18 abr. 2019.

GEOSUL. **Barragem de Enrocamento com Núcleo de Asfalto na UHE Foz do Chapecó.** Porto Alegre, 2012.

GLOBO G1. **Belo Monte, no PA, passa a ser a maior usina hidrelétrica totalmente brasileira com inauguração da 14ª turbina.** Disponível em <https://g1.globo.com/pa/para/noticia/2019/07/17/belo-monte-no-pa-inaugura-14a-turbina-e-passa-a-ser-a-maior-usina-hidreletrica-totalmente-brasileira.ghtml> > Acessado em 17/07/2019

GOOGLE MAPS. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-29.3559304,-54.0267156,5252m/data=!3m1!1e3>> Acesso em: 18 abr. 2019.

HOEG, K. **Asphaltic Concrete Core for Embankment Dams.** Norwegian Geotechnical Institute. Norway, 1993.

LACERDA, D. et a. **Fatores que determinaram o CCR: Concreto Compactado com Rolo como material para o projeto estrutural da barragem do AHE Peixe Angical.** Trabalho Conclusão de Curso. Goiânia: Universidade Católica de Goiás Departamento de Engenharia, 2006. 32 p.

MARQUES FILHO, P. L.; GERALDO, A. Barragens e Reservatórios. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Org). **Geologia de Engenharia.** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. ISBN 85-7270-002-1. Cap. 24, p. 397-418.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MILANI FILHO, LUIZ. **O uso de concreto compactado com rolo em barragens – tendências futuras.** Dissertação de mestrado. 100 p. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2003.

ODEBRECHT. **Comunidade de conhecimento barragens e usinas: Melhores Práticas.** 1ª edição, 1/2, 2005

OLIVEIRA, A. C. de. **Métodos Geométricos Aplicados: Módulo Hidrologia.** Universidade Estadual Paulista. São Paulo, 2016. Disponível em:

<<https://fenix.ciencias.ulisboa.pt/downloadFile/1407512322506757/Geoeletricos-V3.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2019.

PITTA, Márcio Rocha; DÍAZ, Patrício S. Estado-del-arte de los pavimentos de concreto compactado com rodillo. In: 1º **Simpósio de obras de concreto compactado com rolo**. São Paulo, 1995. Disponível em: <[http://web.asocem.org.pe/asocem/bib\\_img/61658-8-1.pdf](http://web.asocem.org.pe/asocem/bib_img/61658-8-1.pdf)>. Acesso em: 18 abr; 2019.

SILVEIRA, G. L. et al. Concepção geral. In: SILVEIRA, G. L.; CRUZ, J.C.(Org). **Seleção ambiental de barragens**: análise da favorabilidade ambiental em escala de bacia hidrográfica. Santa Maria: Ed. da UFSM/ABRH, 2005. 15-52 p.

SOUZA, M. M. de. **Estudo para o projeto geométrico da barragem do Alto Irani-SC**. 2013. 129 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – UFRJ- Rio de Janeiro, 2013.

VERÓL, Aline Pires; MIGUEZ, Marcelo Gome; MASCARENHAS, Flávio Cesar Borba. Propagação da Onda de Ruptura de Barragem Através de um Modelo. Quase-2D. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.18, n.1, 2012. 165-176 p.

## ANEXO A – Matrizes para classificação da barragem quanto a segurança

E.1 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (ACUMULAÇÃO DE ÁGUA)					
2 - ESTADO DE CONSERVAÇÃO - EC					
Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (h)	Confiabilidade das Estruturas de Adução (i)	Percolação (j)	Deformações e Recalques (k)	Deterioração dos Taludes / Parâmetros (l)	Eclusa (*) (m)
Estruturas civis e hidroelétricas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro (tipo soleira livre) desobstruídos (0)	Estruturas civis e dispositivos hidroelétricos em condições adequadas de manutenção e funcionamento (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Inexistente (0)	Inexistente (0)	Não possui eclusa (0)
Estruturas civis e hidroelétricas preparadas para a operação, mas sem fontes de suprimento de energia de emergência / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões ou obstruções, porém sem riscos à estrutura vertente (4)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroelétricos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação (4)	Umidade ou surgência nas áreas de junta, parâmetros, taludes ou ombreiras estabilizadas e/ou monitoradas (3)	Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Falhas na proteção dos taludes e parâmetros, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Estruturas civis e hidroelétricas bem mantidas e funcionamento (1)
Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroelétricos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões e/ou parcialmente obstruídos, com risco de comprometimento da estrutura vertente (7)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroelétricos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas (8)	Umidade ou surgência nas áreas de junta, parâmetros, taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico (5)	Existência de trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento (5)	Erosões superficiais, fogueira exposta, crescimento de vegetação generalizada, gerando necessidade de monitoramento ou situação crítica (5)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroelétricos com problemas identificados e com medidas corretivas em implantação (2)
Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroelétricos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas/ canais ou vertedouro (tipo soleira livre) obstruídos ou com estruturas danificadas (10)	-	Surgência nas áreas de junta, taludes ou ombreiras com cumeamento de material ou com vazão crescente (8)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento da segurança (8)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança (7)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroelétricos com problemas identificados e sem medidas corretivas (4)
EC = $\sum (h \text{ até } m)$					

Fonte: Brasil (2012)

II.1 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (ACUMULAÇÃO DE ÁGUA)				
3 - PLANO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM - PS				
Existência de documentação de projeto (n)	Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de Segurança da Barragem (o)	Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento (p)	Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem (q)	Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação (r)
Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui estrutura organizacional com técnico responsável pela segurança da barragem (0)	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0)	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre (0)	Emite regularmente os relatórios (0)
Projeto executivo ou "como construído" (2)	Possui técnico responsável pela segurança da barragem (4)	Possui e aplica apenas procedimentos de inspeção (3)	Não (6)	Emite os relatórios sem periodicidade (3)
Projeto básico (4)	Não possui estrutura organizacional e responsável técnico pela segurança da barragem (8)	Possui e não aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (5)	-	Não emite os relatórios (5)
Anteprojeto ou Projeto conceitual (5)	-	Não possui e não aplica procedimentos para monitoramento e inspeções (6)	-	-
Inexiste documentação de projeto (8)	-	-	-	-
<b>PS = <math>\sum</math> (o até s):</b>				

Fonte: Brasil (2012)

IL2 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO - DPA (ACUMULAÇÃO DE ÁGUA)

Volume Total do Reservatório (a)	Potencial de perdas de vidas humanas (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto sócio-econômico (d)
Pequeno < = 5 milhões m³ (1)	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais) (3)	INEXISTENTE ( não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente da barragem) (0)
Médio 5 milhões a 75 milhões m³ (2)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (4)	MUITO SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem apresenta interesse ambiental relevante ou protegida em legislação específica) (5)	BAIXO ( existe pequena concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (4)
Grande 75 milhões a 200 milhões m³ (3)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal, estadual, federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (8)	-	ALTO (existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (8)
Muito Grande > 200 milhões m³ (5)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (12)	-	-
<b>DPA = ∑ (a até d):</b>			

Fonte: Brasil (2012)

II.1 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (ACUMULAÇÃO DE ÁGUA)						
1 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS - CT						
Altura (a)	Comprimento (b)	Tipo de Barragem quanto ao material de construção (c)	Tipo de fundação (d)	Idade da Barragem (e)	Vazão de Projeto (f)	Casa de Força (g)
Altura ≤ 15m (0)	comprimento ≤ 200m (2)	Concreto convencional (1)	Rocha sã (1)	entre 30 e 50 anos (1)	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decimlenar (3)	Barragem/Dique sem Casa de Força associada (0)
15m < Altura < 30m (1)	Comprimento > 200m (3)	Avenaria de pedra / concreto ciclópico / concreto rolado - CCR (2)	Rocha alterada dura com tratamento (2)	entre 10 e 30 anos (2)	Milenar (5)	Casa de força associada à barragem por meio de conduto forçado, túnel, etc (2)
30m ≤ Altura ≤ 60m (2)	-	Terra homogênea /rocamento / terra enrocamento (3)	Rocha alterada sem tratamento / rocha alterada fraturada com tratamento (3)	entre 5 e 10 anos (3)	TR = 500 anos (6)	Casa de força ao pé da barragem (5)
Altura > 60m (3)	-	-	Rocha alterada mole / saprolito / solo compacto (4)	< 5 anos ou > 50 anos ou sem informação (4)	TR = 500 anos ou Desconhecida / Estudo não confiável (10)	-
-	-	-	Solo residual / aluvião (5)	-	-	-
<b>CT = ∑ (a até g):</b>						

Fonte: Brasil (2012)