



## Estudo e Apresentação de Alternativas para Evitar um Eventual Colapso Ocasionado por Cheias na Hidroelétrica de Itaipu

### *Studies and Presentations of Some Alternatives to Avoid a Casual Collapse Caused by Floods on Itaipu Hydroelectric*

Alexandre de Castro Salvestro

Angela Maria Picolloto

Lucídio Molina Filho

Jean Paulo Silva Natal

Ana Maria Mazaron Casadei

Larissa Rossi Alves

**Resumo:** O trabalho abordou um estudo sobre as alternativas para evitar um eventual colapso provocado por cheias na Barragem de Itaipu, localizada nos municípios de Foz do Iguaçu, no Brasil, e Ciudad del Este no Paraguai. O tema foi explorado devido ao grande número de rompimentos de barragens e as grandes consequências causadas por essa eventualidade que se tornou preocupante nos últimos anos no país. Inicialmente foi realizado cálculos a fim de obter uma eventual vazão de colapso da barragem, para a determinação desse valor foi encontrado a precipitação regional para um período de retorno de 25 anos entre todos os municípios que compreende a área do reservatório da barragem. Após obtenção dos valores da precipitação, foi verificado que para uma eventual possibilidade de rompimento da barragem a vazão oriunda da intensidade de precipitação precisaria atingir um valor de 46% mais que a vazão encontrada no presente trabalho. No entanto, foram apresentadas algumas alternativas além das que já existem na Itaipu para maior segurança e garantia de funcionamento da barragem como, por exemplo, para tal eventualidade da minoração de um colapso ocasionado por cheias a ampliação do número de vertedouros existentes na estrutura.

**Palavras-chave:** cheias; barragens; intensidade de precipitação; vazão.

**Abstract:** The current work has approached some alternatives to avoid a casual breakdown promoted by floods over Itaipu's dam, which is located in Foz do Iguaçu, in Brazil, and located in Ciudad Del Este in Paraguay as well. The work's theme was explored due to a huge number of dam breaks and its consequences caused by this eventuality, which has turned a worrisome point in the last few years. Initially, some calculations have been made to get a casual flow rate of dam's collapse. To determine this amount it has been found the regional precipitation for a return period of 25 years among all towns over the area of the dam tank. After getting the precipitation amount it was checked for a casual possibility of dam breakdown and flow rate from precipitation intensity and it would need to get an amount of 46% more than the current flow rate studied in this work. However, it has been shown some other alternatives besides those that can already be found in Itaipu to a better safety and working guarantee of the dam, as example, for an eventuality collapse lessening caused by floods, the enlargement in the spillways numbers on the structure would help in this case.

**Keywords:** floods; water dams; precipitation intensity and flow rate.

## INTRODUÇÃO

O Brasil possui mais de 24 mil barragens catalogadas pelo poder público em todo o território, as quais se diferenciam de tamanhos e funções como reserva de água para consumo humano, irrigação, depósito de rejeitos minerais e industriais (ANA, 2018). O rompimento de uma barragem provoca sempre consequências traumáticas, mesmo não havendo perdas humanas ou catástrofes ambientais. Ainda que a intensidade provocada pelo rompimento tenha um impacto limitado, afeta altamente as comunidades servidas, seja através do abastecimento de água, irrigação ou produção de energia.

Jansen (1983 *apud* Willinghoefer, 2015) afirma que o risco de rompimento de barragens é um dos fardos inevitáveis que a civilização carrega e, desta forma, uma responsabilidade básica da engenharia é a de minimizar estes riscos. As principais causas de rompimento de barragens são problemas de fundação, capacidade inadequada dos vertedouros, instabilidade dos taludes, falta de controle de erosão, deficiências no controle e inspeção pós-operação (ICOLD, 2001).

As condições climáticas também influenciam o regime de cheias que, consequentemente, tem repercussões no dimensionamento do corpo e dos órgãos hidráulicos. O relatório do Banco Central de 2011 diz que: “Uma matriz energética altamente baseada na energia hidrelétrica cria significativa vulnerabilidade às mudanças climáticas e é uma característica que muitos países de baixa e média renda têm em comum”.

Para garantir as necessárias condições de segurança das barragens ao longo da sua vida útil, devem ser adotadas medidas de prevenção e controle desses fatores, a construção de um canal de desvio é uma das alternativas, que ajuda a desviar parte da vazão da cheia do curso d'água principal, diminuindo assim a vazão do rio na zona que se deseja proteger.

Outra medida é o uso de vertedouros capaz de descarregar todo o excesso de água acumulada no reservatório, já que um vertedouro não eficaz pode conduzir o galgamento e, eventualmente, colapso de uma barragem. Além disso, níveis exagerados de água podem vir a causar alagamentos a montante, e mesmo no caso de passagem de vazões maiores, prejuízos à jusante.

Partindo desses princípios, este trabalho tem como objetivo estudar e apresentar estratégias para controlar uma eventual vazão de colapso do reservatório de Itaipu por meio do estudo da precipitação na área, que compreende o reservatório da barragem para que a demanda de água em excesso não seja capaz de possibilitar um eventual rompimento da estrutura.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### Barragens

Barragens são definidas como barreiras que cortam rios, córregos ou canais para delimitar e dessa maneira controlar o fluxo de água, elas devem corresponder a alguns requisitos administrativos e técnicos para manter seu funcionamento seguro, eficaz e econômico. As barragens podem ser conhecidas de dois modos, de pequeno porte construídas frequentemente em fazendas, e de grande porte usadas geralmente para fornecimento de água, controle de enchentes, irrigação, navegação, controle de sedimentos e energia hidrelétrica (Comitê Brasileiro De Barragens, 2020).

### Tipos de Barragens

Segundo Costa (2012), alguns tipos mais primitivos de barragens são eventualmente utilizados quando a construção assume reduzidas proporções, principalmente quando executada por pequenos fazendeiros com o propósito de armazenar água para próprio consumo da forma mais econômica possível. Por isso, quanto ao tipo, devem as barragens ser divididas em dois grandes grupos: convencionais, que são as mais utilizadas, cujo mecanismo é de amplo conhecimento na literatura especializada e para conhecimento as não convencionais, sendo poucos usuais, portanto, não serão abordadas no trabalho.

### Barragens Convencionais

#### Barragens de terra

Meirelles (2015) define as barragens de terra (figura 1), como barragens de aterro mais comumente utilizadas. Em relação a sua construção, adotam-se materiais naturais (argila, silte e areia) com um mínimo de processamento prévio.

Segundo Schoklitsch (1946 *apud* Meirelles, 2015), as situações geológicas e o quantitativo financeiro influenciam diretamente na dimensão das barragens de terra, podendo estas atingir até 110 m de altura em circunstâncias pertinentes.

As barragens de terra são recomendadas quando a análise de campo revelar que o fragmento rochoso se depara a grandes profundidades na área em questão. Essa categoria de estrutura requer uma declividade nos critérios de jusante e montante menores, e, conseqüentemente, resulta em volumes maiores. Por essa razão, é empregue para médias e pequenas alturas (Assis, 2014).

**Figura 1 - Barragem de Terra.**

Fonte: Oficina de textos, 2020.

## Barragens de Enrocamento

Com relação às barragens de enrocamento, sua utilização teve origem na região da Califórnia em meados de 1850 (ICOLD, 2010 *apud* Machado, 2018), sendo que sua construção foi ampliada acentuadamente com início em 1960, que foram as barragens de enrocamento com superfície de concreto e também de terra/enrocamento. O enrocamento pode ser determinado como o material de aterro (figura 2), composto por matéria rochosa, não coerente e de granulometria com dimensão variada.

Segundo USBR (1967 *apud* Meirelles, 2015), as barragens de enrocamento são mais aconselháveis para locais remotos, onde existe rocha apropriada, onde há solos de má qualidade e nas situações nas quais a estruturação de uma barragem de concreto seria bastante onerosa.

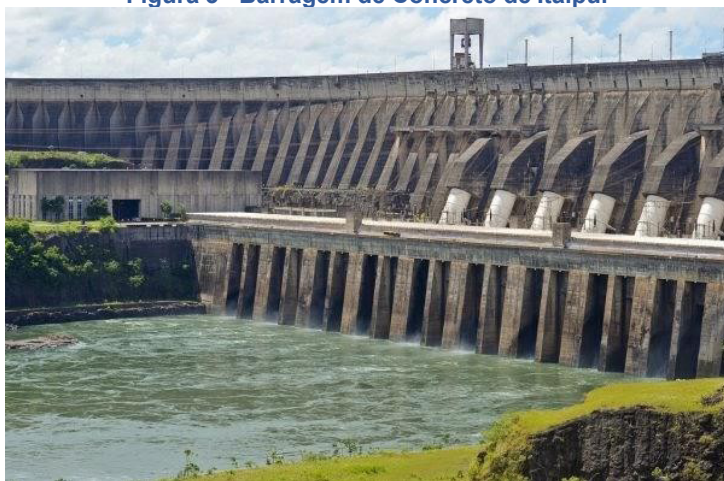
**Figura 2 - Barragem de Enrocamento.**

Fonte: Oficina de textos, 2020.

## Barragens de Concreto

Possan (2015) explica que barragens de concreto são aquelas consideradas rígidas, conforme figura 3, construídas basicamente com materiais granulares naturais, como a areia, ou desenvolvidas artificialmente, tendo como exemplo as britas, aos quais se acrescentam aglomerantes, como o cimento, pozolanas e aditivos químicos, citando os incorporadores de ar e retardadores de pega. Essas barragens classificam-se, segundo sua forma e/ou geometria, em: Barragens de Gravidade, Barragens de Contrafortes, Barragens em Arco ou Arco-Gravidade e Barragens de Gravidade Aliviada.

**Figura 3 - Barragem de Concreto de Itaipu.**



Fonte: Oficina de textos, 2020.

## Barragem da Hidroelétrica de Itaipu

Segundo Dyminski *et al.* (2010), a barragem da Hidroelétrica de Itaipu é composta por dois trechos de barragens de terra, trechos de concreto e um trecho de barragem de enrocamento compondo as estruturas mais elevadas do conjunto.

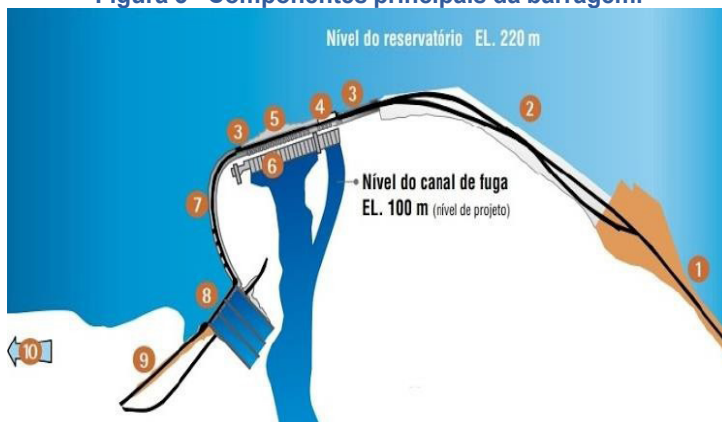
A barragem é a estrutura que exerce a função da barragem da água, onde atinge o desnível de 120m de queda bruta, no qual possibilita o funcionamento das turbinas. No fragmento elevado da barragem principal, estão localizadas as tomadas de água, conforme apresentado na figura 4. Estruturas com comportas que proporcionam que a água, passando por elas e pelos condutos forçados, alcance a caixa espiral no qual faz a turbina girar (Itaipu, 2010).

**Figura 4 - Barragem de Itaipu.**

Fonte: Exame, 2020.

### Elementos que compõem a barragem da Hidroelétrica de Itaipu

A barragem da Hidroelétrica de Itaipu possui elementos que a compõem de acordo com a figura 5, sendo descritos:

**Figura 5 - Componentes principais da barragem.**

Fonte: Itaipu, 2020.

1 - Barragem de terra esquerda: Um dique de terra com coroamento na cota 225 m, comprimento de 2.000 m e volume de 2.900.000 metros cúbicos (Tratado de Itaipu, 1973). 2 - Barragem de enrocamento: Uma barragem em enrocamento com coroamento na cota 225 m, comprimento de 1.984 m e volume de 11.400.000 metros cúbicos (Tratado de Itaipu, 1973).

3 - Barragem lateral esquerda: Uma barragem de gravidade em concreto aliviado, com comprimento de 350 m e volume de 778.000 metros cúbicos (Tratado de Itaipu, 1973).



4 - Estrutura de desvio: De acordo com Piasentin (2016), o fechamento do rio na fase final de desvio. A estrutura de controle pode ser uma estrutura temporária separada da barragem, ou fazer parte da barragem, como na situação de Itaipu. Um aspecto relevante do desvio de Itaipu foi à utilização de enscadeiras de concreto em arco para a última fase da escavação do canal de desvio, as quais foram demolidas a fogo para desobstrução do canal. A escolha foi ditada por razões como o espaço de trabalho restrito, os taludes quase verticais do canal, a demolição mais fácil em comparação com a alternativa de aterro e ao risco menor de arraste de rochas.

5 - Barragem principal: Estrutura de gravidade, em concreto aliviado, com coroamento na cota 225 m, comprimento de 884 m e volume de 5.200.000 metros cúbicos, construída através do rio Paraná e do canal, na margem esquerda, o qual é escavado para o desvio provisório do rio. A barragem tem 20 aberturas para tomada d'água, providas de comportas. Cada uma dessas tomadas d'água dá acesso a uma turbina existente na casa de força, através de um conduto forçado (Tratado de Itaipu, 1973).

6 - Casa de força: Está localizada na base da barragem principal, com comprimento de 950 m. Na mesma é instalado um conjunto gerador composto de 18 unidades de 700 megawatts cada uma. Nove destas unidades são em 50 Hz e nove em 60 Hz. A Plataforma superior da casa de força está na cota 144 m acima do nível do mar (Tratado de Itaipu, 1973).

7 - Barragem lateral direita: Uma barragem de concreto aliviado com coroamento na cota de 225 m, comprimento de 997 m e volume de 704.000 metros cúbicos, ligando o vertedouro à barragem principal (Tratado de Itaipu, 1973).

8 - Vertedouro: O vertedouro da Itaipu, do tipo encosta, foi colocado na margem direita, a uma distância adequada das unidades geradoras, de modo a não representar risco para a usina (Itaipu, 2010).

9 - Barragem de terra direita: Um dique de terra com coroamento na cota 225 m, comprimento de 840 m e volume de 300.000 metros cúbicos (Tratado de Itaipu, 1973).

10 - Dique de Hernandarias - Um dique menor, de terra, localizado na margem direita, a uma distância de cerca de 4,5 km a oeste da barragem principal, nas proximidades da cidade de Hernandarias. Esse dique se remete a fechar uma depressão onde poderia ocorrer extravasamento com o reservatório ao nível máximo de enchente (Tratado de Itaipu, 1973).

## Implantação de Reservatórios

A implantação de reservatórios cumpre função de assegurar uma considerável regularização da vazão, o que faz com que as cheias de menor porte sejam absorvidas, diminuindo, no primeiro momento, o impacto a jusante (Balbi, 2011).

Os reservatórios de controle de cheias podem ser operados, ou seja, pode-se conter a parcela de água armazenada através da abertura ou fechamento de comportas (Mees, 2013).

## Canal de Fuga do Vertedouro

Os vertedouros são estruturas hidráulicas designadas a exercer descargas das águas excedentes dos reservatórios, sem ocasionar dano à barragem ou às outras estruturas hidráulicas adjacentes. Também são utilizados para o controle do fluxo à entrada de canais, efetuar o controle de níveis em obras hidráulicas e em outras diversas situações. O tipo e localização dos vertedouros podem variar conforme as condições geotécnicas e topográficas locais e o arranjo geral da obra (Maia, 2018). Existem classificações para os diferentes modelos de vertedouros, a saber:

**Vertedouros de fundo:** Poderão ser da categoria de barragem móvel, condutos com válvulas dispersoras ou galerias, conforme figura 6. Vertedouros de fundo apenas deverão ser utilizados se condicionantes requerem descargas a jusante, em situações que não possa ser atendida por vertedouro de superfície (Brasil, 2007).

**Figura 6 - Conduto com Válvula Dispersora.**



**Fonte: Palmeira, 018.**

**Vertedouros Livre:** Aplicação específica em usinas a fio d'água, da qual a barragem possua uma soleira vertente. Provocam maior sob elevação no reservatório (figura 7). Algumas categorias de vertedouros livres, especificamente como os do tipo sifão e tulipa, não são muito utilizados, e, no momento que são empregues geralmente a vazão de vertimento é reduzida (Brasil, 2007).



**Figura 7 - Vertedouro Tipo Tulipa.**

**Fonte: Kilkus et al. 2018.**

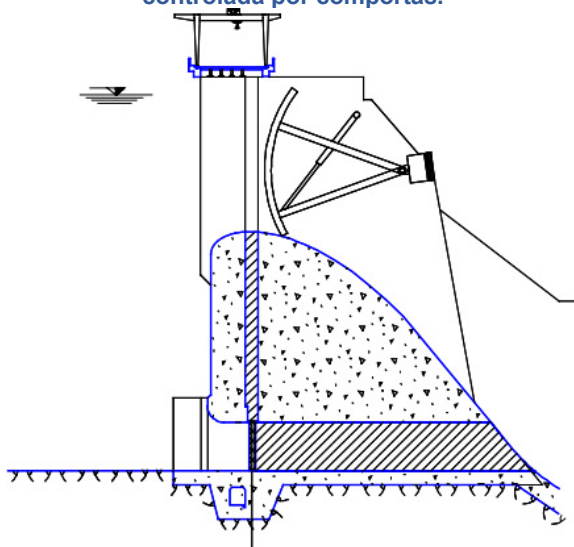
**Vertedouros Controlados:** Estes vertedouros apresentam comportas para controlar o nível do reservatório e a vazão descarregada, em conformidade com a figura 8. São recomendados a utilização com reservatórios deplecionados (Brasil, 2007).

**Figura 8- Vertedouros Controlados.**

**Fonte: FLICKER, 2011.**

**Vertedouro de Ogiva Alta:** É constituído de uma soleira vertente, com grande altura, pode ser ou não contidas por comportas do tipo segmento (Figura 9), juntamente com um dissipador de energia. É utilizado, na maior parte dos casos, em barragens de média altura e atua como uma estrutura de desvio por meio de adufas posicionadas em seu corpo (Brasil, 2007).

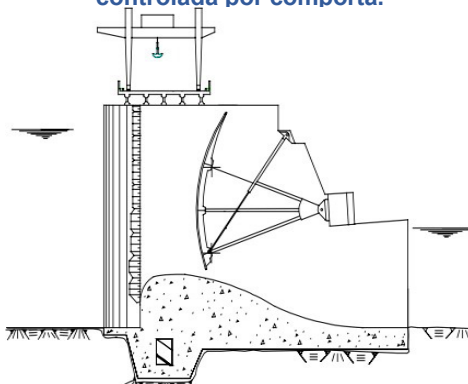
**Figura 9 – Seção típica de vertedouro de superfície do tipo ogiva alta controlada por comportas.**



Fonte: Brasil, 2007.

Vertedouro de Ogiva Baixa: Constituído de uma soleira vertente baixa, podendo ser gerenciado ou não por comportas, e por um dissipador de energia (figura 10). É utilizado, geralmente, em barragens baixas sendo capaz de auxiliar como estrutura de desvio do curso de água (Brasil, 2007).

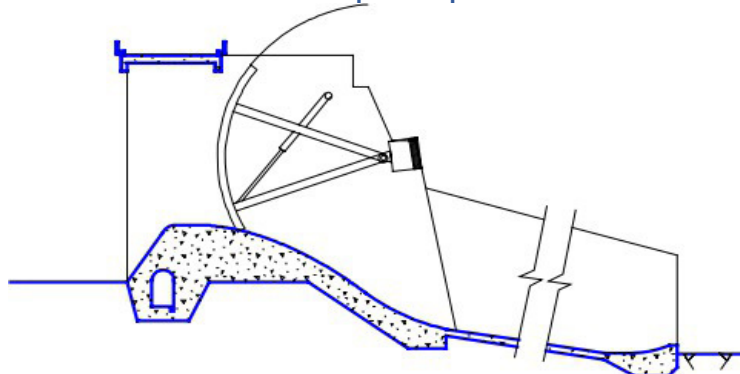
**Figura 10 – Seção típica de vertedouro de superfície do tipo ogiva baixa controlada por comporta.**



Fonte: Brasil, 2007.

Vertedouro de Encosta: Formado por uma soleira vertente pequena, um dissipador de energia e um canal, conforme figura 11. O vertedouro em questão tem a capacidade de ser controlado ou não por comportas do modelo segmento, além disso, é operado em aproveitamentos de barragens com elevadas níveis de aterro fechando a seção por completo do vale e é desviado do canal de água através de galerias ou túneis (Brasil, 2007).

**Figura 11 – Seção típica de vertedouro de superfície do tipo encosta controlado por comportas.**



Fonte: Brasil, (2007).

## Alternativas de Evitar o Colapso por Cheias em Barragens

Zuffo (2005, p. 11 *apud* Kaplan, 2010 p. 25) afirma que a segurança de uma barragem pode ser afetada por ocorrências naturais como enchentes, terremotos, deslizamentos, e deterioração da estrutura da barragem. Algumas alternativas para evitar esse problema são expostas a seguir:

### Canal de desvio - construções de barragens

Balbi (2011) declara que inúmeras estruturas são construídas frequentemente para intervir na natureza dos cursos d'água. Algumas delas, como as barragens, exercem papel significativo nas estratégias de gestão dos recursos hídricos por permitirem um melhor aproveitamento dessas cheias sazonais regularizando as vazões, tais como as do tipo de desvio e de controle.

Barragens de desvio são geralmente construídas a fim de direcionar a água para canais com destino específico, sendo usualmente empregadas na irrigação e reserva de água para atividade industrial (United States of América, 1960 p. 66 *apud* Kaplan, 2010 p. 23).

Barragens de controle de cheias atuam na desaceleração e na redução das enxurradas acarretadas por conta de chuvas torrenciais, estocando previamente e liberando a água por uma vazão específica que compreende a capacidade máxima e plausível do canal de vazante (United States of América, 1960 p. 66 *apud* Kaplan, 2010 p. 23).

### Sistemas extravasores de emergências

Segundo Ovando (2019), o risco associado ao acúmulo de água é a erosão no maciço da barragem, causada geralmente por erosão interna ou galgamento, o qual é considerado o transbordamento da água em excesso por cima da crista da barragem, desgastando o maciço. Para a retirada dessas águas acumuladas emprega-se um

canal extravasor (figura 12), considerado um dos principais elementos de segurança da barragem. É o sistema responsável por evitar galgamentos, assegurando que o excesso de água extravase do reservatório de maneira estável e com técnicas apropriadas, garantindo a segurança estrutural ao longo da vida útil de uma barragem.

**Figura 12 – Canal extravasor da Barragem de Taió.**



Fonte: Carolina, 2015.

## DESENVOLVIMENTO

### Análise da Vazão de Saída Pelos Vertedouros

Para o cálculo da vazão do vertedouro foi utilizado a fórmula de Francis (1905), (Equação 5 e 6), juntamente com as especificações técnicas do vertedouro, dados que foram pesquisados juntamente à Hidroelétrica de Itaipu.

Sem contração lateral:  $Q = 1,84 L.H^{3/2}$  (Equação 5)

Com contração lateral:  $Q = 1,84 (L - 0,2 H) H^{3/2}$  (Equação 6)

Onde:

$Q$  = vazão ( $m^3/s$ );

$L$  = largura da soleira (m)

$H$  = carga d'água (m)

### Cálculo da Vazão para um Eventual Colapso da Barragem

A partir da análise da capacidade máxima do vertedouro, foi determinada a vazão de colapso pela seguinte relação:

**Vazão de colapso = Vazão de entrada pela precipitação regional - Vazão de saída pelos vertedouros** (Equação 1)

Para a obtenção da vazão de entrada pela precipitação regional será necessário o cálculo da intensidade de precipitação de acordo com a equação descrita por Netto (1998), que segue:

$$I = K \times Tr^a / (Tc + b)^c \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$I$  = intensidade pluviométrica, em milímetros por hora (mm/h);

$Tr$  = tempo de recorrência, em anos;

$Tc$  = tempo de concentração, em minutos (min);

$K, a, b \text{ e } c$  = parâmetros a serem determinados para a localidade em questão.

Os parâmetros utilizados na equação de chuvas intensas ( $K, a, b$  e  $c$ ) válidas para os municípios que estão no âmbito regional do reservatório de Guairá até Foz do Iguaçu serão gerados pelo software *Plúvio 2.1*, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

O tempo de concentração foi calculado através da equação referenciada por Tucci (1995), que segue:

$$Tc = 57 (L^3 / H)^{0,385} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$L$  = extensão do curso de água, em quilômetros (km);

$H$  = diferença de cotas entre a seção de drenagem e o ponto mais alto do talvegue, em metros (m);

$Tc$  = tempo de concentração, em min.

Para o cálculo das vazões, será utilizado o Método Racional, conforme recomenda Tomaz (2002).

$$\text{Vazão de entrada pela precipitação regional} = 0,278 \cdot C \cdot I \cdot A \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$Q$  = vazão pluvial, em metros cúbicos por segundo ( $m^3 s^{-1}$ );

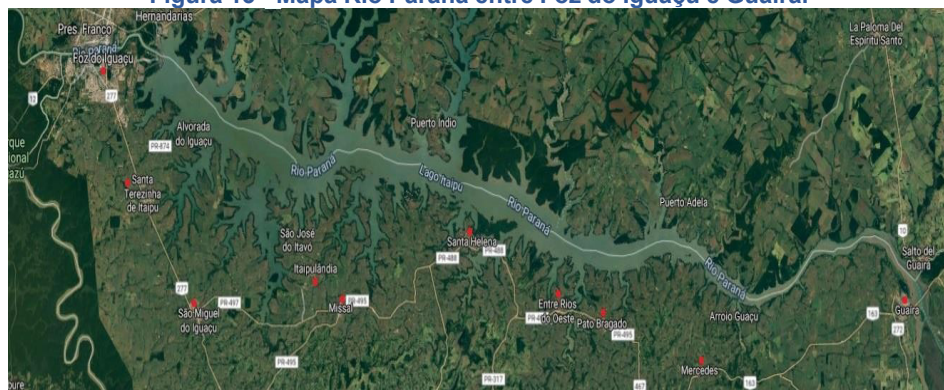
$C$  = coeficiente de runoff ou coeficiente de escoamento superficial, que relaciona o volume precipitado com o volume efetivamente escoado;

$I$  = intensidade de precipitação relação entre a altura da chuva, recolhida em uma determinada área em função do tempo decorrido, em mm/h;

$A$  = área de drenagem, em  $km^2$ .

Como o reservatório compreende vários municípios desde Guairá a Foz do Iguaçu, conforme figura 13, e que fazem margem ao Rio Paraná serão somadas a vazão de entrada pela precipitação regional das seguintes cidades: Santa Terezinha de Itaipu, São Miguel do Iguaçu, Missal, Itaipulândia, Santa Helena, Entre Rios do Oeste, Pato Bragado e Mercedes, a vazão de precipitação regional será o somatório do montante de cada município.



**Figura 13 - Mapa Rio Paraná entre Foz do Iguaçu e Guaíra.**

Fonte: Google Earth Pro, 2020.

## Alternativas Existentes na Itaipu para Controlar uma Eventual Cheia

A fim de apresentar as alternativas existentes e usuais do controle de uma eventual cheia na Hidroelétrica, foi realizado uma pesquisa em forma de questionário enviado via e-mail para a Itaipu Binacional em busca das informações necessárias.

## Outras Alternativas que Podem ser Tomadas em uma Eventual Cheia

Realizado o cálculo da vazão para um eventual colapso da barragem, foi feito a análise da precipitação para que tal fato ocorra e apresentado outras alternativas além das que existem que possam minimizar os impactos previstos em uma eventual vazão de colapso, garantindo as necessárias condições de segurança da barragem.

## ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### Vazão de Saída dos Vertedouros

A fim de obter o valor da capacidade máxima dos vertedouros foram analisadas informações técnicas no site da Itaipu Binacional, que aplicados na equação 5 e 6, resultou em uma vazão referente à  $62200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Por falta de dados técnicos foi-se elaborados cálculos para o vertedouro com contração e sem contração, ambos deram resultados que chegam próximos e colaboram com a vazão de  $62200 \text{ m}^3/\text{s}$  existente na literatura, conforme segue no quadro 1.



**Quadro 1 – Vazão dos vertedouros.**

<b>Classificação do Vertedouro</b>	<b>Vazão (m³/s)</b>
Sem contração lateral	62118,28 m³/s
Com contração lateral	61412,50 m³/s

**Fonte:** autoria própria, 2020.

## Cálculo da Precipitação Regional

Para a obtenção da vazão de precipitação regional, seguindo a metodologia foram detalhados:

Inicialmente, determinou-se o tempo de concentração por meio da equação de Tucci (1995) válidas para os municípios de Guaíra-PR a Foz do Iguaçu-PR. Onde adotou-se, para a extensão do curso d'água o valor de 7km, e para a diferença de cotas, levou-se em consideração as altitudes de cada município em relação ao nível do mar.

Com os valores dos tempos de concentração de cada município foi possível calcular a intensidade pluviométrica, através da equação de Netto (1998), juntamente com os coeficientes obtidos com base no software Plúvio 2.1, de acordo com a tabela 1.

**Tabela 1 – Parâmetros de equação IDF.**

<b>Pluviômetro</b>	<b>K</b>	<b>A</b>	<b>b</b>	<b>c</b>
Guaíra	1967,893	0,141	17,779	0,855
Mercedes	2611,343	0,127	22,878	0,904
Pato Bragado	2855,278	0,124	25,641	0,924
Entre Rios do Oeste	2877,369	0,124	25,893	0,927
Santa Helena	2886,428	0,124	25,997	0,927
Missal	2886,690	0,124	26,000	0,927
Itaipulândia	2886,689	0,124	26,000	0,927
São Miguel do Iguaçu	2886,70	0,124	26,000	0,927
Santa Terezinha de Itaipu	2885,472	0,124	25,988	0,927
Foz do Iguaçu	2853,479	0,125	25,674	0,925

**Fonte:** Pluvio 2.1, 2020.

Para o desenvolvimento desta equação, o tempo de recorrência ou período de retorno adotado foi de 25 anos, por ser um período de maior acesso aos registros.

Após os resultados das intensidades pluviométricas aplicou-se o Método Racional proposto por Tomaz (2002), com o objetivo de obter os resultados das vazões de entrada da precipitação de cada município. Para a utilização da fórmula proposta necessitou do coeficiente único de perdas, denominado coeficiente de deflúvio, também conhecido por coeficiente de “runoff” ou coeficiente de escoamento superficial. Tucci *et al.* (2001), enfatiza que a estimativa do coeficiente é baseada por meio da superfície, de acordo com a característica da bacia, conforme tabela 2:

**Tabela 2 - Valores do coeficiente de “runoff”.**

Superfície	Coeficiente de runoff, C	
	Intervalo	Valor esperado
Pavimento		
Asfalto	0,70 – 0,95	0,83
Concreto	0,80 – 0,95	0,88
Calçada	0,75 – 0,85	0,8
Cobertura: grama solo arenoso		
Pequena declividade 2%	0,05 – 0,10	0,08
Declividade média (2 a 7 %)	0,10 – 0,15	0,13
Forte declividade (7%)	0,15 – 0,20	0,18
Cobertura: grama solo argiloso		
Pequena declividade 2%	0,05 – 0,10	0,15
Declividade média (2 a 7 %)	0,10 – 0,15	0,2
Forte declividade (7%)	0,15 – 0,20	0,3

**Fonte: ASCE, citada por Tucci et al. 2001.**

Posteriormente, determinou-se o valor a ser utilizado para o coeficiente de deflúvio igual a 0,18 (cobertura: grama solo arenoso), com forte declividade, de acordo com as características da superfície da região.

Utilizando os parâmetros estipulados para a equação de chuvas intensas, obteve-se uma vazão de precipitação regional igual a 42571 m<sup>3</sup>/s, de acordo com o somatório resultante para cada município que compõem o reservatório de Itaipu, conforme tabela 3:

**Tabela 3 – Valores de Intensidade Pluviométrica e Vazão.**

Município	Intensidade Pluviométrica (mm/h)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
Guaíra	69,13	4671,00
Mercedes	78,51	4802,46
Pato Bragado	68,61	4152,02
Entre Rios do Oeste	66,96	4085,99
Santa Helena	66,68	4148,28
Missal	69,36	4424,25
Itaipulândia	66,21	4208,33
São Miguel do Iguaçu	70,33	4618,97
Santa Terezinha de Itaipu	68,28	4534,92
Foz do Iguaçu	59,50	2,97

**Fonte: autoria própria, 2020.**

Por fim, a partir dos valores obtidos, calculou-se a vazão de colapso na qual relaciona a vazão de saída dos vertedouros com a vazão da precipitação regional calculada, sendo determinada através da equação proposta na metodologia que segue:

$$Q_{\text{colapso}} = 42571 \text{ m}^3/\text{s} - 62200 \text{ m}^3/\text{s} = -19629 \text{ m}^3/\text{s}$$

Com base no resultado obtido da vazão de colapso, pode-se considerar que se precipitação regional encontrada tiver um aumento superior a vazão de  $19629 \text{ m}^3/\text{s}$  a estrutura tem grandes possibilidades de colapsar.

Pode-se dizer ainda que para um período de retorno de 25 anos a intensidade de precipitação média encontrada entre os municípios que compreende o reservatório da barragem de Itaipu foi de  $68,4 \text{ mm/h}$ , no qual se analisa que se houver um aumento significativo de 46% em relação a vazão de colapso para que tal fato ocorresse seria necessário um aumento na intensidade pluviométrica de  $32 \text{ mm/h}$  a mais do que a média existente o que poderia colocar a barragem em risco de colapso.

## Alternativas Existentes na Itaipu para Controle de uma Eventual Cheia

A Itaipu possui um programa de vigilância e manutenção abrangente, além de contar com sistemas e procedimentos de previsões de vazões utilizados para o controle de cheias no qual contam com informações de agentes como CTG (China Three Gorges), Copel (Companhia Paranaense de Energia) e além do próprio ONS (Operador Nacional do Sistema), os quais são capazes de prever a situação hidrológica do entorno da Usina com antecedência suficiente para adoção de um conjunto de procedimentos que formam o plano ação de cheias. Além disso, para garantir a segurança da barragem a Hidroelétrica de Itaipu atribui o sistema de controle das comportas que são acionados quando o nível do reservatório atinge um volume maior de água, possibilitando o escoamento das águas em excesso através dos vertedouros. Embora exista toda essa tecnologia, o reservatório de Itaipu ainda é classificado como a fio d'água, ou seja, ele não tem capacidade de conter grandes cheias.

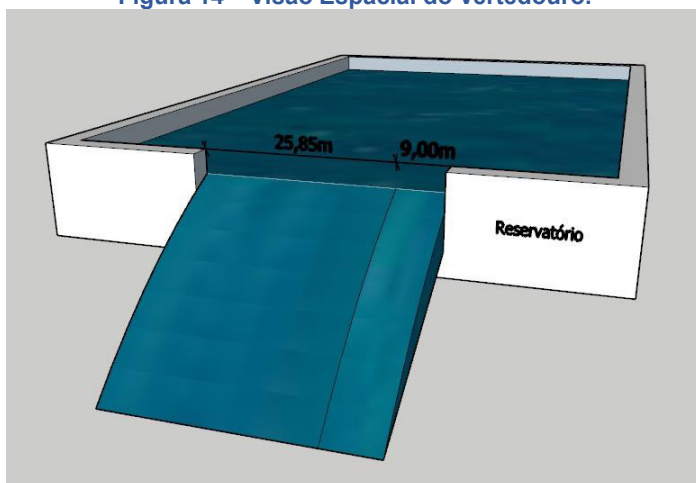
## Alternativas Auxiliares para Evitar o Colapso

A implantação de alternativas auxiliares para evitar o colapso da barragem, requer uma análise ampla e comparativa, pois, devem-se considerar fatores ambientais, econômicos e operacionais. No entanto, na ausência de informações mais detalhadas, o presente estudo propõe apenas uma possibilidade sobre a integração dessas alternativas como uma segurança a mais da barragem, já discutidas anteriormente tais como, os vertedouros, os canais de desvios, especificamente as barragens de desvio e as de controle de cheias, e os sistemas extravasores de emergências.

Como solução para o controle da vazão excedente, bem como diminuição dos problemas ocasionados pelo aumento do volume do reservatório, pensando em fatores ambientais e econômicos, sugere-se o aumento da capacidade da vazão dos vertedouros, ou seja, por se tratar de uma estrutura extremamente complexa, certamente a ampliação de 9 metros da soleira de cada vertedouro dobraria a capacidade de saída dos vertedouros existentes, conforme mostrado na figura 14, minorando o impacto dessa estrutura de modo a amenizar ainda mais

a vazão do reservatório, alcançando um valor considerável para, que a vazão de saída dos vertedouros, seja capaz de suportar uma eventual vazão de colapso, caso houvesse uma intensidade de precipitação média duas vezes maior a 100,4mm/h, garantindo que a vazão de saída dos mesmos seja suficiente de suportar o aumento das possíveis cheias.

**Figura 14 – Visão Espacial do Vertedouro.**



Fonte: autoria própria, 2020.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no referencial teórico e nos resultados obtidos apresentados neste trabalho, conclui-se que:

A barragem de Itaipu se encontra segura, por se tratar de uma das maiores barragens do mundo, possui uma ampla instrumentação e acompanhamento em tempo integral, que permite indicar situações hidrológicas com precedência, a fim de tomar medidas apropriadas para combater uma eventual cheia.

Ao analisar a vazão de precipitação, verificou-se que para a barragem correr o risco de colapso a vazão da precipitação regional deverá ser superior a  $62200\text{m}^3/\text{s}$  (vazão de saída dos vertedouros) e através dos estudos e cálculos executados no trabalho, a vazão de precipitação regional encontrada foi de  $42571\text{m}^3/\text{s}$ , enquanto a precipitação regional em 68,4mm/h, ou seja, cerca de 46% a mais já ocorreria o risco de rompimento.

Como solução para o controle da vazão excedente, após análise, a ampliação da largura das soleiras dos 14 vertedouros existentes, se mostrou a melhor alternativa de evitar um eventual colapso ocasionado por cheias na hidroelétrica de Itaipu, de forma a atender os objetivos do trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ANA. Agência Nacional De Águas. **Módulo I - Barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais**. Unidade 9: Barragens de terra e enrocamento. Curso de segurança de barragens. Disponível em: <[https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/110/20/Unidade\\_9-modulo1.pdf](https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/110/20/Unidade_9-modulo1.pdf)>. Acesso em: 23 mar. 2020.
- ASSIS, André. **Apostila de Barragens**. Notas de aula da disciplina de Barragens. 2014.
- BALBI, Diego Antônio. **Curso de segurança de barragens**. Módulo III: gestão e desempenho de barragens. Unidade 2: planos de ações de emergência. Disponível em: <[https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2179/15/Unidade\\_2-modulo3.pdf](https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2179/15/Unidade_2-modulo3.pdf)>. Acesso em: 7 maio 2020.
- BRASIL. **Ministério de Minas e Energia**. Manual de inventário hidroelétrico de bacias hidrográficas. Rio de Janeiro: CEPEL, 2007. 648 p.
- CAROLINA, Tatiana. **Canal extravasor da Barragem de Taió é aberto em 3 metros**. Disponível em: <<https://radaraltovale.com/noticia/noticias/canal-extravasor-da-barragem-de-taio-e-aberto-em-3-metros-21441>>. Acesso em: 28 abr. 2020.
- COMITÊ Brasileiro De Barragens. **Apresentação das barragens**. Disponível em: <<http://cbdb.org.br/apresentacao-das-barragens>>. Acesso em: 24 mar. 2020.
- COSTA, Walter. **Geologia das barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- DYMINSKI, Andréa *et al.* **Técnicas de mineração visual de dados aplicadas aos dados de instrumentação da barragem de Itaipu**. São Carlos: Gestão & Produção, 2010. Disponível em: <[https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-530X2010000400007](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-530X2010000400007)>. Acesso em: 15 abr. 2020.
- EXAME. **Barragem de Itaipu**. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/noticias-sobre/itaipu/>>. Acesso em: 30 maio 2020.
- FLICKR. **Vertedouros controlados**. Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/parchen/5340396931>>. Acesso em: 9 abr. 2020.
- FREIRE, Ana Cláudia. Usina de Itaipu abre vertedouro, quase um ano depois, para socorrer países vizinhos. Paraná Portal, 2020. Disponível em: <<https://paranaportal.uol.com.br/cidades/usina-itaipu-vertedouro-estiagem/>>. Acesso em: 26 abr. 2020.
- ITAIPU BINACIONAL. **Barragem**. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/barragem>>. Acesso em: 28 abr. 2020.
- KAPLAN, Eduardo. **Pequenas barragens para o abastecimento de água do município de Caxias do Sul/RS: avaliação e proposição de métodos de recuperação e conservação**. Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<https://www>>.

lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/26030/000755006.pdf?sequence=1>. Acesso em: 13 maio 2020.

KILKUS, Peter *et al.* **Vertedor tipo tulipa**. Disponível em: <<https://ghtengenharia.com.br/pt/blog/buraco-lago-da-california-cria-imagem-surreal-intriga-turistas>>. Acesso em: 4 abr. 2020.

MAIA, Victor. **Estruturas hidráulicas**. Disponível em: <<https://eduqc.com.br/concursos/engenharia/estruturas-hidraulicas/>>. Acesso em: 25 maio 2020.

MACHADO, Lucas *et al.* **Incidentes e acidentes em barragens**. Disponível em: <[https://itr.ufrj.br/sigabi/wp-content/uploads/7\\_sigabi/VASCONCELLOS\\_LUCAS\\_355a358.pdf](https://itr.ufrj.br/sigabi/wp-content/uploads/7_sigabi/VASCONCELLOS_LUCAS_355a358.pdf)>. Acesso em: 25 mar. 2020.

MEES, Alexandre. **Qualidade de água em reservatórios**. Unidade 1: reservatórios. Disponível em: <[https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/74/2/Unidade\\_1.pdf](https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/74/2/Unidade_1.pdf)>. Acesso em: 15 maio 2020.

MEIRELLES, Fernando. **Curso de segurança de barragens**. Módulo I: barragens – aspectos legais, técnicos e socioambientais. Unidade 9: barragens de terra e enrocamento. Disponível em: <[https://capacitacao.ana.gov.br/conhecercb/bitstream/ana/110/20/Unidade\\_9-modulo1.pdf](https://capacitacao.ana.gov.br/conhecercb/bitstream/ana/110/20/Unidade_9-modulo1.pdf)>. Acesso em: 26 mar. 2020.

OFICINA DE TEXTOS. **Barragem de concreto de Itaipu**. Disponível em: <<https://www.ofitexto.com.br/comunitexto/conheca-todos-os-tipos-de-barragem/>>. Acesso em: 26 maio 2020.

OFICINA DE TEXTOS. **Barragem de enrocamento**. Disponível em: <<https://www.ofitexto.com.br/comunitexto/conheca-todos-os-tipos-de-barragem/>>. Acesso em: 26 maio 2020.

OFICINA DE TEXTOS. **Barragem de terra**. Disponível em: <<https://www.ofitexto.com.br/comunitexto/conheca-todos-os-tipos-de-barragem/>>. Acesso em: 26 maio 2020.

OVANDO, Lucas. **Dimensionamento de sistema extravasor de emergência em barragens de rejeitos da mineração**. Disponível em: <[http://www.dcta.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/21/2019/07/201312080272\\_Lucas-dos.pdf](http://www.dcta.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/21/2019/07/201312080272_Lucas-dos.pdf)>. Acesso em: 20 maio 2020.

PALMEIRA, Geraldo. **Conduto com válvula dispersora**. Disponível em: <<http://geraldopalmeira.com.br/2018/04/04/barragem-de-serro-azul-tera-abertura-de-valvulas-dispersoras-nesta-sexta-feira-6/>>. Acesso em: 4 abr. 2020.

PIASENTIN, Corrado. **Curso de segurança de barragens**. Módulo I – barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais. Unidade 3: aspectos de projeto, construção, operação e manutenção de barragens. Disponível em: <[https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/110/28/Unidade\\_3-modulo1.pdf](https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/110/28/Unidade_3-modulo1.pdf)>. Acesso em: 12 maio 2020.



POSSAN, Edna. **Curso de segurança de barragens**. Módulo I - barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais. Unidade 10: barragens de concreto. Disponível em: <[https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/110/4/Unidade\\_10-modulo1.pdf](https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/110/4/Unidade_10-modulo1.pdf)>. Acesso em: 27 mar. 2020.

SAMEK, Jorge Miguel. **Bê-á-bá de Itaipu**. Disponível em: <[https://www.itaipu.gov.br/sites/default/files/BX\\_beaba\\_OK.pdf](https://www.itaipu.gov.br/sites/default/files/BX_beaba_OK.pdf)>. Acesso em: 25 maio 2020.

TRATADO DE ITAIPU. Decreto Legislativo nº 23, de 1973. Tratado entre o Brasil e o Paraguai, de 26 de abril de 1973. Disponível em: <[https://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/dlg1973023\\_ITAIPU.pdf](https://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/dlg1973023_ITAIPU.pdf)>. Acesso em: 26 maio 2020.

TUCCI, Carlos Eduardo. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, ABRH, 2001.

WILLINGHOEFER, Matheus. **Avaliação do risco de rompimento da barragem de uma pequena central hidrelétrica na bacia do rio do Peixe**. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/160177/TCC%202015-1%20Matheus%20Willinghoefer.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2020.