

ANÁLISE DE ESTABILIDADE GLOBAL DA OMBREIRA DE UMA BARRAGEM A GRAVIDADE EM CONCRETO DE ACORDO COM OS CRITÉRIOS DE PROJETO CIVIL DA ELETROBRÁS

Julio Rodrigo Luzzatto

Engenheiro civil egresso da UCEFF Faculdades

jrluzzatto@gmail.com

Poliana Bellei

Professora do curso de Engenharia civil da UCEFF Faculdades

polianabellei@gmail.com

Lidiane de Fátima Rodrigues da Silva

Engenheira civil egressa da UCEFF Faculdades

lidifrs@yahoo.com.br

Resumo. A presente pesquisa tem por objetivo analisar a estabilidade global de uma seção da ombreira de uma barragem a gravidade em concreto. A geometria analisada pertence a uma obra já executada, os dados necessários para verificação do equilíbrio da estrutura foram coletados in loco por meio de uma visita técnica, através da observação, pela análise de registros fotográficos e pela coleta de dados junto ao projeto executivo que confirmaram as dimensões da barragem. Posteriormente, foi confeccionada uma planilha no Excel com base nos Critérios de Projetos Civil da Eletrobrás e alimentada com os dados coletados. Desta forma, foram feitas análises quanto ao deslizamento, tombamento, flutuação e tensões na base da barragem. Os resultados do dimensionamento da barragem foram satisfatórios e atenderam os fatores de segurança estabelecidos pelos Critérios de Projeto Civil da Eletrobrás, confirmando a estabilidade da estrutura analisada.

Palavras-chave: Estabilidade global. Equilíbrio. Dimensionamento.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, ao final de 1990, a energia hidrelétrica estava em ascensão e representava cerca de 90 % da potência instalada no país. O déficit que representava 15% da dívida externa brasileira foi promovido pelo próprio governo, que não mediu esforços para a implantação destes aproveitamentos hidrelétricos. Os impactos econômicos, sociais e ambientais atenuaram então os esforços à implantação de projetos viáveis, as chamadas Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) (REIS, 2011).

Antes da implantação de uma usina hidrelétrica, é essencial que seja verificado o equilíbrio das estruturas. A barragem em análise estará submetida a diversas situações com diferentes esforços no decorrer de sua vida útil, portanto, foram aplicados carregamentos sobre a estrutura que simulassem condições normais e excepcionais de operação da usina hidrelétrica, verificando posteriormente a integridade e o equilíbrio da barragem, isso de acordo com os critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas da Eletrobrás.

A responsável técnica do empreendimento cedeu os projetos executivos, registros fotográficos da execução da barragem e

documentos relevantes para análise deste da barragem. Foram representados os principais diagramas dos esforços solicitantes na seção da ombreira da barragem, verificando posteriormente a estabilidade global em uma seção na ombreira, de acordo com os critérios supracitados.

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1 Usinas hidrelétricas

Uma usina hidrelétrica é constituída por diversas estruturas, nem sempre elas estão diretamente ligadas umas com as outras, porém, o funcionamento em sincronia de ambas é transformado no produto final que é a energia elétrica.

O circuito de geração é composto por um reservatório, uma barragem com vertedouro para extravasar a vazão excedente do rio, um sistema de captação e condução que leva a água a uma casa de força, onde estão instaladas as turbinas e geradores de energia elétrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

A barragem tem como principal objetivo interromper o fluxo natural do rio, permitindo, desta forma a criação de um reservatório. Além de estocar a água, esta configuração fornece o desnível necessário para a geração de energia elétrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

As margens da barragem são denominadas como ombreiras, as quais podem estar associadas, ou não, ao vertedouro, este por sua vez, não precisa estar ligado a barragem sendo possível implantá-lo em outra região do reservatório. As ombreiras podem ser mistas ou homogêneas. As mistas contemplam dois ou mais tipos de materiais, as homogêneas são construídas com apenas um tipo de material. Em ombreiras de concreto, consegue-se ter um controle melhor de percolação da água, já, em ombreiras de solo, os materiais empregados

para sua construção classificam-se de acordo com a pressão exercida do reservatório sobre o aterro. O material impermeável da ombreira de terra é protegido contra a ação das ondas produzidas pelo reservatório e a crista é protegida contra as intempéries climáticas. A parte montante e jusante das ombreiras possuem inclinações, nem sempre a geometria será simétrica, podendo variar de acordo com os esforços exercidos pelo reservatório e pela capacidade de resistência da fundação (REIS, 2011).

Na escolha do local onde a barragem será construída, é importante verificar se o terreno dispõe de condições para a fundação e suporte para as ombreiras. Pode-se realizar estudos preliminares em escritório e por meio de fotografias, os quais permitam o planejamento para o trabalho em campo. Deve-se evitar locais que apresentem sinais de deslizamento e alta permeabilidade que não tenha o maciço rochoso consolidado (ELETROBRÁS, 2000).

2.2 Cargas atuantes em uma barragem

A pressão hidrostática é a força que a água exerce sobre a face de uma estrutura, esta força varia linearmente em função da profundidade a partir da superfície da água. Os esforços são representados por meio de diagramas triangulares ou trapezoidais, de acordo com nível d'água especificado no projeto (ELETROBRÁS, 2003).

Conforme Eletrobrás (2003), as pressões hidrodinâmicas são proporcionadas pelo escoamento superficial da água em vertedouros, defletores e bacias de dissipação. Nesse processo, ocorre a transformação de energia potencial em cinética, devido ao fluxo da água de montante para jusante do dissipador de energia.

Em barragens a gravidade, é importante mensurar os esforços atuantes que poderão desestabilizar a estrutura. Além das pressões hidrodinâmicas existem pressões que agem na

base da barragem, denominadas como subpressão. O maciço na base de uma barragem apresenta imperfeições, fissuras, falhas e anomalias geológicas que proporcionam a permeabilidade da água pela fundação da estrutura (MASON, 1988).

Para o estudo das pressões atuantes, além das pressões hidrodinâmicas é importante que os estudos preliminares quantifiquem os sedimentos acumulados ao decorrer da vida útil de um reservatório. O estudo da sedimentologia estima os sedimentos que serão carregados pelo rio e que com o passar dos anos ficarão depositados junto ao pé da barragem (ELETROBRÁS, 2003).

As condições de carregamento que deverão ser consideradas na análise de estabilidade global de uma barragem a gravidade, são estabelecidas pelos critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas, conforme ELETROBRÁS (2003) são:

a) Condições de carregamento normal (CCN): Referem-se aos esforços que vão estar presentes durante a vida útil da estrutura, correspondem as combinações projetadas pela operação normal ou durante a manutenção da estrutura com condições hidrológicas normais;

b) Condições de carregamento excepcional (CCE): São de baixa probabilidade de ocorrência durante a vida útil de uma barragem, ocasionadas por condições hidrológicas excepcionais, efeitos sísmicos e problemas com o sistema de drenagem, considerando os níveis máximos operacionais;

c) Condições de carregamento limite (CCL): Contemplam as combinações de ações com menor probabilidade de ocorrência e correspondem as condições de carregamento limite, levando em conta as condições hidrológicas excepcionais, problemas com o sistema de drenagem, efeitos sísmos e carregamento normal;

d) Condições de carregamento de construção (CCC): Podem ocorrer no período da construção da obra, proveniente aos

carregamentos de equipamentos de construção, estruturas construídas para auxílio na execução, cargas anormais durante o transporte de equipamentos ou atuações com períodos curtos de duração em condições semelhantes.

2.3 Segurança global de estruturas de concreto

As estruturas devem ser analisadas quanto ao seu estado limite último de perda de equilíbrio, no caso de uma barragem, está análise refere-se ao movimento de corpo rígido (ELETROBRÁS, 2003).

O deslizamento refere-se ao escorregamento que a estrutura pode sofrer no sentido horizontal. Em uma barragem, existem juntas horizontais no concreto, entre o concreto e fundação e na própria fundação. A coesão e o ângulo de atrito dos materiais empregados na construção e dos materiais de suporte da mesma, irão determinar a capacidade resistente ao cisalhamento ou colapso por deslizamento. É apropriado na fase inicial de um projeto adotar parâmetros relacionados a outros projetos que tenham materiais similares (ELETROBRÁS, 2003).

Para a verificação de escorregamento (deslizamento) considera-se a fundação em material com coesão, adotando-se a “Equação (1)” (ELETROBRÁS, 2003).

$$FSD = \frac{\sum N_i \tan(\phi_i) + \sum C_i A_i}{\sum T_i} > = 1 \quad (1)$$

Onde:

FSD = Fator de segurança ao deslizamento (caso o fator de segurança FSD calculado seja muito próximo do coeficiente 1, o projetista deverá fazer adequações ao projeto para aumentar a segurança contra deslizamento);

FSD ϕ = Fator de redução da resistência ao atrito;

FSDc = Fator de redução da resistência à coesão;

$\sum Ni$ = Somatório das forças normais à superfície de deslizamento em análise;

ϕ_i = Ângulo de atrito característico da superfície de deslizamento em análise;

C_i = Coesão característica ao longo da superfície de deslizamento;

A_i = Área efetiva comprimida da estrutura no plano em análise;

$\sum Ti$ = Somatório das forças paralelas à superfície de deslizamento.

O ângulo a jusante de uma barragem é proposital, sendo que, esta inclinação ajuda na estabilidade da barragem. Porém, independente da geometria deve-se garantir a segurança ao deslizamento, considerando os efeitos proporcionados pela subpressão (MASON, 1988).

Ainda na verificação do deslizamento, poderá ser admitido nos cálculos a inexistência da coesão entre estrutura/fundação, neste caso os fatores de segurança para cada combinação de cálculo poderão ser verificados por meio da “Eq. (2)” (ELETROBRÁS, 2003).

$$FSD = \frac{\sum Ni \tan(\phi_i)}{FSD \phi + \sum Ti} > = 1 \quad (2)$$

Quando o fator de segurança ao deslizamento não for satisfatório, deve-se fazer outras verificações onde despreza-se a coesão e admite-se o ângulo de atrito pós-ruptura, assim como utilizado para verificação de empuxo passivo. Desta forma, o excesso de tensão de cisalhamento não absorvido por esta seção deve ser transferido para as partes remanescentes verificando sucessivamente, até que o fator de segurança seja atingido (ELETROBRÁS, 2003).

Para que o elemento estrutural não tombe, é necessário que o momento tombador gerado por uma força seja menor que o momento do

peso da barragem, ou momento estabilizante, onde os mesmos apresentam relação com uma linha ou ponto de rotação da estrutura. Nessa verificação adota-se a “Eq. (3)” (ELETROBRÁS, 2003).

$$FST = \sum Me / \sum Mt \quad (3)$$

Onde:

FST: Fator de Segurança ao tombamento;

$\sum Me$: Soma dos momentos desestabilizantes da estrutura, neste caso, utiliza-se valor como do peso próprio, cargas permanentes e cargas de equipamentos instalados a estrutura;

$\sum Mt$: Soma dos momentos de tombamento deve-se considerar as cargas hidrostáticas, empuxos e subpressão. A favor da segurança é recomendado que não se utilize efeitos estabilizantes quanto ao atrito e coesão do contato da estrutura com a fundação.

A “Tabela 1” traz os fatores de segurança quanto ao tombamento (ELETROBRÁS, 2003).

Tabela 1. Fatores de segurança ao tombamento

Fator de segurança	Casos de carregamento			
	CCN	CCE	CCL	CCC
FST min	1,5	1,2	1,1	1,3

De acordo com o manual da Eletrobrás (2003), com a adoção desses valores pressupõe-se que haja conhecimento dos materiais envolvidos na construção da estrutura, caso contrário deverão ser empregados fatores de redução da resistência ao atrito e coesão (ELETROBRÁS, 2003).

A barragem quando envolvida pela água, tanto a montante quando a jusante, deverá resistir aos esforços promovidos pela pressão d'água que tende a levantar a estrutura da fundação, fazendo com que a mesma venha a flutuar. Este quesito poderá ser verificado pela “Eq. (4)”.

$$FSF = \frac{\Sigma V}{\Sigma U} \quad (4)$$

Onde:

ΣV : Soma das forças Gravitacionais;

ΣU : Soma das forças de Subpressão;

FSF: Fator de segurança à Flutuação.

Para a verificação de flutuação, é apropriado que as forças verticais dos equipamentos permanentes estejam computadas nos cálculos e as cargas acidentais deverão ser desconsideradas no decorrer da análise (ELETROBRÁS, 2003).

A “Tabela 2” traz os valores mínimos para cada combinação de carga quanto a flutuação.

Tabela 2. Fator de segurança à flutuação

Fator de segurança	Casos de carregamento			
	CCN	CCE	CCL	CCC
FSF min	1,3	1,1	1,1	1,2

Os cálculos de concreto armado poderão apenas definir a armadura que irá resistir esforços de retração e variações de temperatura. Neste caso, os elementos devem ser dimensionados de acordo com ABNT NBR 6118 (2014) (ELETROBRÁS, 2003).

Para verificar a estabilidade global, também é necessário a verificação das tensões na base, a tensão admissível não deve ser maior que a tensão admissível dos materiais utilizados na construção ou da fundação. Desta forma tem-se a “Eq. (5)” (MOURA, 2016).

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{max}}{CS} \quad (5)$$

Onde:

σ_{max} : Tensão máxima na fundação;

CS: coeficiente de segurança;

σ_{adm} : Tensão admissível.

Deverá ser utilizado métodos adequados para determinar a capacidade de carga do material da fundação, isso pode ser realizado in loco ou em laboratório (ELETROBRÁS, 2003).

A “Tabela 3” traz os coeficientes de segurança para tensão admissível na fundação.

Tabela 3. Fator de segurança para tensão na fundação

Casos de carregamento	CCN	CCE	CCL	CCC
σ_{max} admissível na fundação	3,0 (4,0)	2,0 (3,0)	1,5 (2,0)	1,3 (1,5)

De acordo com Moura (2016) e Eletrobrás (2003), os parâmetros de segurança são aplicados quando se pressupõe razoável conhecimento dos materiais, porém, os coeficientes poderão ser aumentados quando não houver conhecimento exato dos mesmos, onde poderão ser aplicados os coeficientes em parênteses da “Tabela 3”.

3. SEÇÃO DA OMBREIRA

A barragem é composta por um vertedouro com 100 m de comprimento e duas ombreiras mistas de concreto e terra, ou seja, em sua construção foram empregados diversos tipos de materiais, Concreto Ciclópico (CCP), Concreto Convencional (CCV), argila, filtros e transições compostos por agregados graúdos e miúdos. A margem esquerda contempla 55 m de ombreira em concreto e 17,30 m de ombreira de terra. Já na margem direita, a ombreira de concreto possui 10 m e 70,85 m de comprimento de ombreira em solo. Toda barragem é a gravidade onde seu próprio peso suporta os diferentes esforços promovidos pelo reservatório.

A seção analisada da ombreira de concreto é triangular do tipo cheia, a inclinação da ombreira é voltada, propositalmente para jusante onde contribui para a estabilidade e resistência do empuxo hidráulico ativo exercido pelo reservatório a montante da estrutura.

A “Fig. 1” traz a planta baixa da barragem.

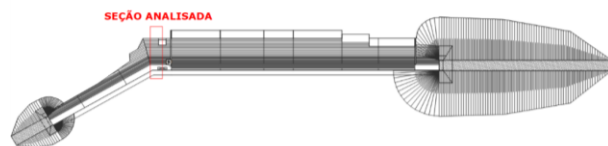


Figura 1. Barragem da PCH

A seção da barragem analisada encontra-se na ombreira da margem esquerda do rio, próxima ao vertedouro. A escolha da seção foi estratégica por estar ao lado da galeria da comporta de fundo da barragem. Esta comporta proporcionará o esvaziamento do reservatório e foi projetada para futuras manutenções durante a vida útil da barragem e das estruturas do circuito hidráulico.

A “Fig. 2” demonstra o local analisado.

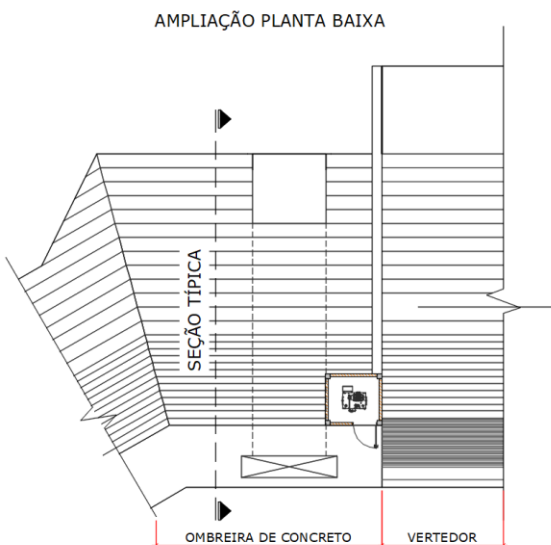


Figura 2. Planta do local analisado

Por meio de uma visita técnica foi possível verificar in loco as dimensões da ombreira da barragem. Foram aferidas as dimensões verticais e horizontais dos degraus a jusante, da crista e do pescoço da ombreira. Pode-se dizer que a construtora executou a estrutura de acordo com o projeto executivo.

A “Fig. 3” apresenta a seção analisada na barragem da PCH.

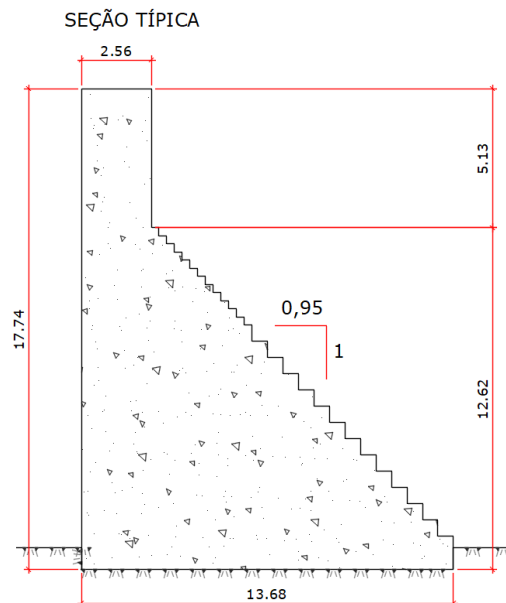


Figura 3. Seção da barragem analisada

Na execução da ombreira foram utilizados dois tipos de concreto, o CCP e o CCV, o concreto CCP foi utilizado no núcleo como preenchimento e o concreto CCV na face de montante. Esta divisão entre os concretos foi adotada pela diferença da resistência de ambos, onde o CCP foi confeccionado com concreto Fck 10 MPa e o CCV com Fck 20 MPa.

Em virtude do projeto e dos dados coletados em campo estarem compatíveis, na análise da seção da ombreira foram consideradas as dimensões de projeto para verificação da estabilidade global. É importante salientar que foi analisada uma fatia da barragem com largura de 1 metro linear.

Na “Fig. 4”, estão apresentados os principais níveis operacionais e de locação da estrutura.

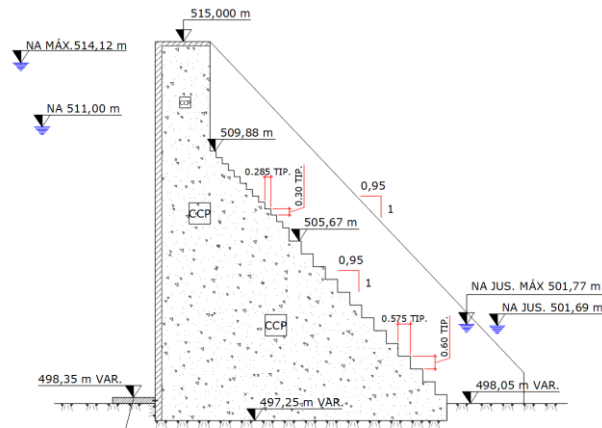


Figura 4. Níveis operacionais

Desta forma, foram adotados os seguintes parâmetros para o cálculo da seção da ombreira:

- Peso específico do Concreto Ciclópico – 22,50 kN/m³;
- Peso específico da água – 10 kN/m³;
- Peso específico de assoreamento – 18 kN/m³;
- Ângulo de atrito da estrutura interno da rocha – 40 graus;
- Coesão de contato entre a estrutura e a rocha – 400 kN/m²;
- Tensão admissível da rocha – 100 MPa (ângulo de atrito, coesão e tensão admissível da rocha são dados que foram coletados da memória de cálculo disponibilizada pela responsável técnica do projeto executivo).

Os itens listados acima relacionam as propriedades dos materiais empregados nos cálculos para verificação da estabilidade da ombreira da barragem.

Os dados da geometria da estrutura e dos esforços foram lançados em uma planilha do Excel elaborada com base nos critérios de projeto civil da Eletrobrás. A partir dos resultados obtidos foram analisados se os coeficientes de segurança dos cálculos quanto ao deslizamento, tombamento, flutuação e tensões na base ficavam acima dos estabelecidos pela Eletrobrás.

3.1 Principais esforços solicitantes

Os diagramas das cargas atuantes na ombreira de concreto da barragem estão representados pelos níveis máximos correspondentes as CCE e os demais níveis d'água correspondem às CCN. Para facilitar a retirada dos dados do centro de gravidade da estrutura foi considerado o concreto CCV da face de montante da estrutura como o concreto CCP. Sabe-se que o concreto CCV tem peso superior ao CCP, contribuindo para a segurança na verificação da estabilidade estrutural.

Os carregamentos hidrostáticos produzem empuxos ativos sobre a estrutura. Com o auxílio do software AutoCad foi possível verificar o centro de gravidade da ombreira de concreto, bem como aplicar corretamente os empuxos hidrostáticos sobre a estrutura.

A “Fig. 5” demonstra os esforços que a estrutura está submetida na CCN.

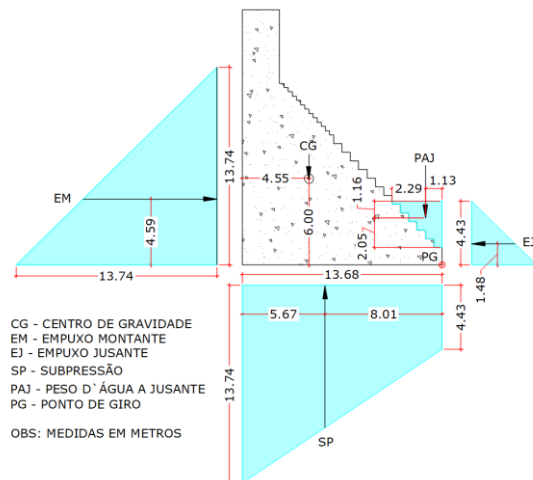


Figura 5. Diagrama de esforços solicitantes CCN

A “Fig. 5” e “Fig. 6” mostram os diagramas das pressões hidrostáticas exercida pelo reservatório em situação normal e excepcional de operação, tanto a montante quanto a jusante do paramento. Para que as barragens fiquem estáveis, é necessário que as somas dos momentos produzidos pelos esforços sejam menores ou iguais ao peso próprio da estrutura.

Na “Fig. 6” apresenta-se os esforços que a estrutura está submetida na CCE.

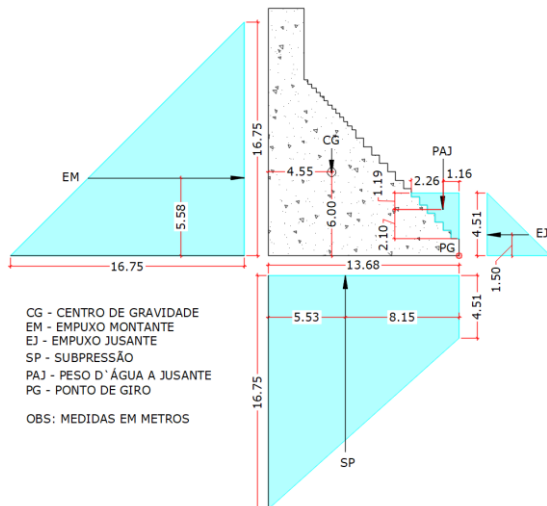


Figura 6. Diagrama de esforços solicitantes CCE

Além disso, deve-se considerar como carregamento o assoreamento do reservatório. Embora esta condição não aconteça de imediato ou logo após o enchimento do reservatório, ao longo dos anos o assoreamento reduz a sua capacidade do reservatório em função do acúmulo de materiais rochosos desintegrados e sedimentos que se depositam no fundo do mesmo. Os critérios de projetos da Eletrobrás estabelecem que a pressão a ser considerada como carregamento ativo sobre a estrutura da barragem deve ser de 10% a altura da seção analisada.

Foi Rankine (1856) que determinou por meio de modelos matemáticos a componente horizontal de empuxo de assoreamento em barragens. Por meio deste estudo disponibilizado pela Eletrobrás, pode ser aplicado estes esforços na estrutura analisada.

Também, foi verificado no cálculo de estabilidade da barragem qual a interferência dos abalos sísmicos. O manual da Eletrobrás salienta que as determinações dos esforços são particulares para cada caso e devem ser considerados os esforços mais desfavoráveis, inclusive desconsidera-se esta influência no

valor da subpressão.

A “Fig. 7” mostra o diagrama de esforços sísmicos e de assoreamento do reservatório.

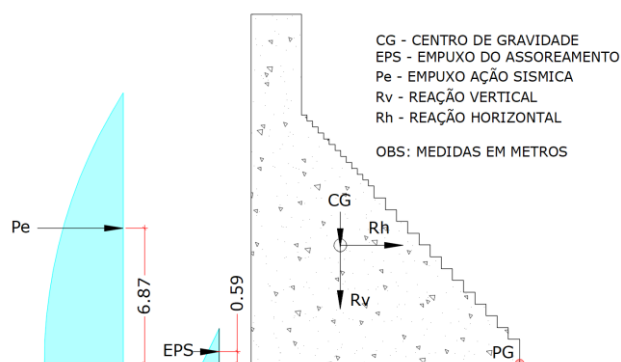


Figura 7. Diagrama dos esforços de assoreamento e sísmico

O empuxo de assoreamento foi posicionado a $0,33 \times H$ (altura manométrica) do reservatório. Para representação do empuxo de abalo sísmico, foi considerado $0,50 \times H$ do reservatório conforme orientação do manual da Eletrobrás. Na análise de estabilidade foi utilizado os coeficientes de distribuição de pressão para atividade sísmica, desta forma desfavorecendo o peso da barragem e favorecendo os esforços aplicados sobre a estrutura. Caso os fatores de segurança apresentarem valores acima dos especificados pela Eletrobrás, a geometria da estrutura será considerada como estável.

3.2 Análise de estabilidade

Para a análise de estabilidade global da estrutura foram consideradas as seguintes condições de carregamento:

- CCN: Como combinação de cálculo foram utilizados os esforços provenientes a operação normal da estrutura. Considerou-se os esforços estabilizantes normais contra os desestabilizantes normais;
- CCE1: Neste caso utilizou-se os esforços provenientes a uma cheia com TR de 1.000 anos, um caso excepcional, mas que segundo o critério de projetos da Eletrobrás deve ser

levado em consideração. Foram utilizados os esforços hidráulicos máximos, como empuxo hidráulico montante, subpressão e empuxo hidráulico jusante;

c) CCE2: Para esta situação foram utilizados os esforços de operação normal combinados com uma possível ação sísmica;

d) CCL: Nesta combinação a estrutura é levada ao limite onde estão considerados os esforços de maior magnitude, foram combinadas as ações excepcionais de operação com TR de 1.000 anos e possíveis ações sísmicas que poderão ocorrer durante a vida útil da estrutura.

Para todas as combinações foram realizadas as verificações quanto ao deslizamento, tombamento, flutuação e tensões na base, estabelecidas pelos critérios de projeto civil de usina hidrelétrica da Eletrobrás. Por meio da planilha eletrônica confeccionada no Excel, pode-se averiguar a estabilidade em função dos esforços sobre a estrutura.

3.3 Deslizamento

Para o cálculo de deslizamento utilizou-se as “Eq. (1)” e “Eq. (2)”. Neste caso foram empregados os parâmetros de ângulo de atrito interno da rocha e coesão entre a estrutura e a rocha.

O cálculo sem coesão apresentado na tabela a seguir é feito para verificar se a estrutura fica estável na pior situação, ou seja, sem coesão nenhuma entre a barragem e a fundação. Por isso, foi calculado a coesão necessária a qual poderia ser verificada em campo. Com base no ângulo de atrito interno da rocha foram aplicados coeficientes de redução do ângulo de atrito e coesão. A rocha da região da ombreira é de boa qualidade, sem muitas alterações, o que indica que a coesão in loco é maior que a expressa pelo cálculo necessário, porém esta verificação não foi realizada para afirmar esta condição.

A “Tabela 4” demonstra os resultados

quanto ao deslizamento.

Tabela 4. Deslizamento

FATORE DE SEGURANÇA	CCN	CCE 1	CCE 2	LIMIT E	
Sem Coesão	Cálculo	1,08	0,83	1,28	0,73
	Mínimo	1	1	1	1
	Resultado	OK	Calcular Coesão necessária	OK	Calcular Coesão necessária
Fator redução atrito	FSDc	3,0	1,5	1,5	1,3
Fator redução Coesão	FSD ϕ	1,5	1,1	1,1	1,1
Ângulo atrito interno Tg(40°)	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
Coesão estrutura/rocha [kN/m ²] ou kPa	400	400	400	400	400
Com Coesão	Cálculo	3,21	3,57	5,14	3,71
	Mínimo	1	1	1	1
	Coesão necessária [kN/m ²] ou kPa	-	41,84	-	43,13
	Resultado	OK	OK	OK	OK

3.4 Tombamento

Para verificação do tombamento da estrutura foi considerada a “Eq. 3”. Conforme visualizado na “Fig. 5”, “Fig. 6” e “Fig. 7” os carregamentos com suas excentricidades geram momentos em relação a jusante da barragem (representados como PG nas figuras, ou ponto de giro), estes esforços geram momentos que podem desestabilizar a barragem.

A “Tabela 5” traz o resultado dos cálculos

de tombamento da estrutura.

Tabela 5. Tombamento

Fatores de Segurança	CCN	CCE 1	CCE2	LIMITE
Cálculo	1,84	1,32	1,65	1,22
Mínimo	1,50	1,20	1,20	1,10
Resultado	OK	OK	OK	OK

Em todas as condições de carregamentos os resultados mostraram-se satisfatórios. Desta forma, a estrutura está estável quanto ao tombamento conforme os critérios de projetos civil da Eletrobrás.

3.5 Flutuação

Para a verificação da flutuação da estrutura foi empregada a “Eq. 4” que traz a somatória das forças gravitacionais, além dos esforços que contribuem e subtraem os esforços de subpressão na base da estrutura.

A “Tabela 6” apresenta os resultados obtido por meio dos cálculos.

Tabela 6. Flutuação

Fatore de Segurança	CCN	CCE 1	CCE2	LIMITE
Cálculo	2,34	1,99	2,19	1,99
Mínimo	1,30	1,10	1,10	1,10
Resultado	OK	OK	OK	OK

Os resultados superaram os fatores mínimos para todas as condições de carregamento estabelecidos pela Eletrobrás.

3.6 Tensões na base

Para o cálculo de tensão admissível deve-se verificar os parâmetros da fundação para cada trecho da estrutura, a fim de não exceder a tensão admissível da fundação com a carga da estrutura, evitando recalques que poderiam gerar patologias e até prejudicar a integridade da mesma.

A “Tabela 7” demonstra os resultados da verificação das tensões na fundação da barragem.

Tabela 7. Tensões na base

FATORE DE SEGURANÇA	CCN	CCE 1	CCE2	LIMITE	
P/A	-121,61	-105,66	-127,86	-112,11	
M/W	-17,26	105,85	3,87	136,14	
Tensão máx. Montante [kN/m ² ou kPa	-138,87	0,19	-123,99	24,03	
Tensão máx. Jusante [kN/m ² ou kPa	-104,34	-211,50	-131,73	-248,25	
Base Comprimida					
Base Comprimida	Cálculo	100%	99,92%	100%	91,15%
	Mínimo	100%	75%	75%	75%
CS - Coeficiente de segurança	3	2	2	1,5	
Tensão máx. montante [MPa]	-4,63	0,01	-6,20	1,60	
Tensão máx. jusante [MPa]	-3,48	-10,58	-6,59	-16,55	
Resultado	OK	OK	OK	OK	

Conforme os dados obtidos da memória de cálculo do projeto executivo, a fundação onde a barragem encontrasse construída apresenta tensão máxima admissível de 100 MPa, com base nos cálculos realizados e demonstrados na tabela supracitada, a maior tensão verificada na fundação foi na condição de carregamento limite que chegou a 16,55 % da tensão máxima admissível.

Os resultados que estão negativos representam compressão e os positivos tração obtidos por meio da “Eq. 5”. Na verificação da base comprimida, os valores apresentados também são aceitáveis.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal desta pesquisa era analisar estabilidade global de uma seção da

ombreira da barragem a gravidade em concreto. Esta verificação não é feita apenas em barragens, mas em todas estruturas que compõem o circuito hidráulico de uma Usina Hidrelétrica, garantindo assim, a segurança da estrutura durante sua vida útil.

A memória de cálculo de estabilidade da estrutura não apresentava os cálculos para CCE2 e LIMITE, por esta razão foi decidido revisar os cálculos de estabilidade da ombreira.

A estabilidade da estrutura foi verificada e submetida as combinações de cálculo com esforços hidráulicos operacionais normais e excepcionais, conforme orienta o manual da Eletrobrás. Por meio dos carregamentos lançados sobre a geometria da barragem e com auxílio da planilha do Excel, foi confirmada a estabilidade global da estrutura.

Todos os fatores de segurança exigidos pelos critérios de projeto civil da Eletrobrás foram satisfeitos e pode-se afirmar então que as orientações disponibilizadas pelo manual da Eletrobrás ajudam os projetistas a empregar melhores técnicas construtivas proporcionando redução de custos e aumento da segurança nas obras de infraestrutura.

5. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília. 2008. Disponível em: <http://www.agência_nacional_de_energia_elétrica.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>.

Acesso em: 18 set. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2014.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas**. Centrais Elétricas Brasileiras S.A Ed. Rio de Janeiro, 2000.

ELETROBRÁS. **Críticos de projeto civil de usinas hidrelétricas**. Eletrobrás/CBDB, Brasília-DF, 2003.

MASON, J. **Estruturas de aproveitamentos hidrelétricos**. Rio de Janeiro: Editora campus Ltda, 1998.

MOURA, F. M. **Estudo comparativo da Verificação da estabilidade de barragens de gravidade de concreto compactado a rolo a partir de modelagem em elementos finitos e de métodos analíticos**. 2016. 231 f. Salvador: Universidade Federal da Bahia - Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Ano 2016. Disponível em <<https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/21236>> . Acesso em 28 abr. 2018.

REIS, L. B. D. **Geração de energia elétrica**. Barueri: Manole Ltda, 2011.