

# **Roteiro de cálculo com auxílio de planilha eletrônica para análise de estabilidade em barragens de concreto por gravidade.**

Bruno Ketzer

Almir Schäffer

**Resumo:** Este trabalho acadêmico tem um objetivo muito claro, que consiste em estabelecer um roteiro de cálculo afim de confeccionar uma tabela eletrônica, através do programa Excel, baseado em teorias já consagradas. Os cálculos para se obter a segurança ao tombamento, deslizamento e flutuação são muito repetitivos, e como para um projeto de uma barragem é necessário analisar diversas seções com diversos carregamentos se torna uma seqüência de cálculo muito extensa. Este trabalho define claramente quais esforços atuam sobre uma barragem, ainda explica seus conceitos e como se deve utilizá-los para fazer as verificações. O objetivo deste trabalho foi alcançado. Em anexo é apresentado um exemplo da tabela desenvolvida a qual facilitou a execução da verificação da estabilidade em uma barragem, pois com ela o tempo necessário para se fazer as verificações se reduziu.

**Palavras chave:** Barragem de concreto. Barragens por gravidade. Estabilidade de barragens. Análise de estabilidade.

## **1 Introdução**

Assegurar a segurança e o bom desempenho em estruturas é uma tarefa de engenharia. Atingir esse objetivo, principalmente em obras grandes como barragens, não é simples. Um projeto de barragem envolve as mais diversas áreas da engenharia, estrutural, hidráulica, elétrica, geotécnica, hidrologia, entre outras, logo é impossível um homem só ser especializado em todas essas ciências e por isso o projeto é o resultado de um trabalho em equipe.

“No Brasil existe um grande número de barragens construídas e em fase de projeto, e os critérios de projeto são permanentemente questionados e revisados em diversos fóruns” (Krüger, 2009). A quantidade de livros falando sobre o assunto no Brasil ainda é escassa, o que torna complicado o aprendizado na área.

### **1.1 Tema de pesquisa**

O tema escolhido para a pesquisa foi “*Roteiro de cálculo com auxílio de planilha eletrônica para análise de estabilidade em barragens de concreto por gravidade*”.

## 1.2 Justificativa do tema

A análise de estabilidade em estruturas de gravidade é um elemento fundamental em projetos de barragens. Constitui-se de uma rotina de cálculo básica, porém extensa pelas inúmeras verificações a serem feitas e principalmente pela quantidade de seções que necessitam ser analisadas ao longo do projeto de uma barragem.

Sugere-se fazer a verificação de estabilidade em diversas seções da barragem, no vertedouro, no fim do vertedouro, nos muros de abraço onde ocorre uma mudança brusca de seção.

## 1.3 Objetivo

Este trabalho de conclusão de curso tem por objetivo criar um roteiro que possa auxiliar no cálculo de estabilidade de barragens de concreto por gravidade, de seções convencionais, como mostrado na Figura 1.1, e ao longo deste relatório será explicada a teoria que envolve a análise de sua estabilidade e irá indicar uma rotina de cálculo a ser executada pelo calculista para garantir sua estabilidade.

Associado à rotina de cálculo acima citada será apresentado uma sugestão de layout para elaboração de uma planilha eletrônica que auxilia na execução destes cálculos. Através dela será possível calcular, de maneira rápida, várias hipóteses de cálculo com uma segurança mais elevada já que ela reduz consideravelmente a chance de haver erro humano nos cálculos.

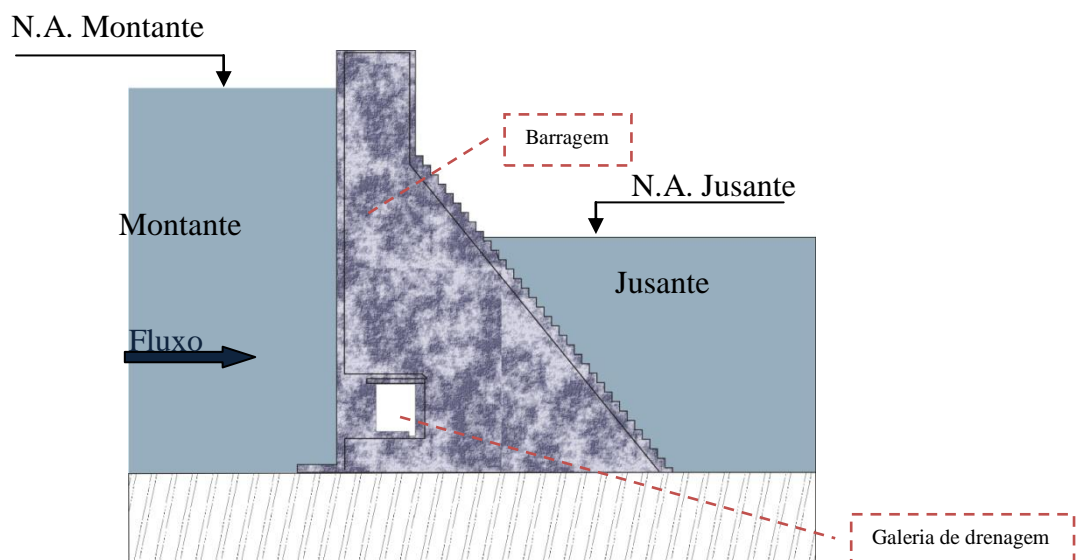


Figura 1.1 - Seção convencional de uma barragem de concreto

## 1.4 Delimitações do Trabalho

A planilha não efetuará o cálculo de estabilidade para as seções onde a barragem em sua base possua mais de uma elevação. A tabela ainda não leva em consideração o esforço exercido

pelas ondas sobre a barragem, esforços gerados por gelo e o peso d'água sobre o pé de montante assim como o empuxo de água em sua base.

Outra limitação da planilha é o cálculo das tensões na base. Isso pode gerar um erro no cálculo da sub-pressão, pois sem a verificação das tensões na base não podemos assegurar com certeza que não surgiu o rompimento do contato do concreto com a fundação da barragem.

## 2 Referencial Teórico

O livro *Estabilidade em obras hidráulicas* é um livro extremamente prático, onde as informações teóricas são abordadas muito superficialmente, o autor Fu Mei Fong realizou uma obra diferente da maioria que trata do assunto. O assunto de estabilidade em obras hidráulicas normalmente é abordado de maneira muito teórica onde a prática fica de lado. “A bibliografia disponível neste assunto é pequena, e as existentes possuem um escopo excessivamente teórico – razão pela qual preparamos este trabalho – livre de considerações teóricas – preocupadas somente com as aplicações práticas que constituem – de certo modo – uma rotina nos trabalhos de cálculos estruturais.” (Fong, Fu Mei, 1978).

Ainda do livro do Fu Mei Fong serão retiradas algumas idéias de simplificações de cálculos que serão aplicadas para desenvolver a planilha eletrônica. Único inconveniente desse livro é que não é encontrado com muita facilidade.

*Usinas Hidrelétricas* do autor Schreiber é um livro destinado as teorias envolvidas no projeto de uma UHE, abordando os mais variados assuntos da engenharia civil, mecânica e elétrica, os assuntos como geotécnica, turbinas, projeto de barragens, entre outros são encontrados no livro. É no capítulo de barragens que pude retirar muitas informações pertinentes a este trabalho, além de conseguir os conceitos básicos de barragens pude retirar os conceitos o método de cálculo da estabilidade.

O livro citado no parágrafo anterior é muito bem visto, pois é um livro completo no assunto que trata e totalmente em português e isto é o seu principal diferencial, como citado anteriormente a bibliografia no assunto escolhido é de difícil acesso, pois são poucos livros que tratam do assunto e a maioria está escrito em outras línguas. Outra boa característica desse livro é o seu método didático, ele explica cada assunto de uma maneira de fácil compreensão.

Livro muito bem conceituado o *Design of Small Dams* é uma das referencias bibliográficas mais citadas nos livros que tocam no assunto barragens de gravidade. O livro foi escrito pelo governo dos Estados Unidos da America em 1987 e nele constam todas as informações necessárias sobre pequenas barragens desde os conceitos de barragem como citado ao longo

deste trabalho, passando pelos conceitos de cada carga que atuam na barragem como por exemplo “Pressão das águas externas – Considerações básicas: São cargas geradas pelos reservatório e pela lâmina d’água, são obtidos através dos estudo do funcionamento do reservatório e pelas curvas das lâminas d’água” (Bureau of Reclamation, 1987), e mostrando até métodos de cálculo de estabilidade, porém seguindo o que foi citado anteriormente este livro não possui um exemplo prático para este cálculo.

Dos mesmo autores existem ainda outros títulos como *Arch Dams*, *Gravity Dams*, *Small Canals*, esses não foram consultados para este trabalho acadêmico porém são indicados para estudos nas áreas de barragens em arco, barragens por gravidade, pequenos canais respectivamente.

A tese de pós-graduação, elaborada pelo Cláudio Marchand Krüger, possui um assunto e objetivo semelhante a este trabalho acadêmico, sobre estabilidade estrutural aplicado a uma barragem. Desta tese que foi retirada alguns métodos de cálculo e os fatores de segurança mínimos para garantir a estabilidade da estrutura.

Esta tese me pareceu uma boa opção de fonte para este trabalho de conclusão, pois é uma tese bem recente, ela foi elaborada em 2008, e totalmente em português.

### **3 Metodologia de Pesquisa**

Segundo Silva (2001) “Pesquisa é um conjunto de ações, propostas para encontrar a solução para um problema, que têm por base procedimentos racionais e sistemáticos. A pesquisa é realizada quando se tem um problema e não se tem informações para solucioná-lo.”

Para Gil (1999), a pesquisa é ‘processo formal e sistemático de desenvolvimento do método científico. O objetivo fundamental da pesquisa é descobrir respostas para problemas mediante o emprego de procedimentos científicos’.

Pesquisa pode ter dois objetivos distintos, um deles é achar métodos de resolver problemas, pré-estabelecidos, com base em conhecimentos adquiridos através de consultas a obras já publicadas de autores conceituados e dos novos artigos publicados de pesquisadores recentes. Outro objetivo da pesquisa é estudar uma solução já encontrada para um problema com o intuito de otimizá-la já, de maneira que quando surgir problemas semelhantes no futuro possamos usar o conhecimento adquirido na pesquisa para encontrar a melhor solução.

Esse trabalho acadêmico é uma pesquisa aplicada do ponto de vista de sua natureza, pois ele “objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos. Envolve verdades e interesses locais” (Silva, 2001). Ainda segundo Silva (2001) podemos classificar este trabalho de conclusão como uma pesquisa quantitativa porque

“considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisadas. Requer o uso de recursos e de técnicas estatísticas”.

De acordo com Gil (1991) podemos classificar esta pesquisa de dois pontos de vista. Do ponto de vista dos seus objetivos ela se caracteriza como uma pesquisa exploratória já que ‘visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito ou a construir hipóteses. Envolve levantamento bibliográfico; entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado; análise de exemplos que estimulem a compreensão’. E do ponto de vista dos procedimentos técnicos podemos classificar de duas maneiras, como pesquisa bibliográfica, pois é ‘elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de livros, artigos de periódicos e atualmente com material disponibilizado na Internet’, e como uma pesquisa experimental porque ‘determina um objeto de estudo, selecionam-se as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto’.

#### **4 Conceitos dos esforços**

“Uma barragem de concreto por gravidade é concebida de modo que seu próprio peso exerça a maior resistência sobre as forças externas que atuam sobre ela.” (Bureau of Reclamation, 1987). Atualmente as barragens de concreto vêm sendo feitas com concreto CCR (Concreto Compactado a Rolo).

“O perfil transversal clássico para este tipo de barragem é triangular, tendo o vértice oposto ao menor cateto na altura do nível d’água máximo, acrescido de uma construção retangular, que forma a crista da barragem. O paramento de montante é vertical, ou tem pequena inclinação, aumentando a largura da base por que, com o reservatório vazio, a resultante dos pesos do triângulo e retângulo acima mencionado cai teoricamente fora do núcleo.” (Schreiber, 1981).

Os principais esforços atuantes em uma barragem são os seguintes:

- O peso da barragem (esforço vertical)
- O peso resultante das águas, tanto a montante como a jusante do corpo de concreto da barragem (esforço horizontal, e vertical quando em contato com uma superfície inclinada)
- Sub-pressão proveniente da água
- Esforços provocados pelas ondas do reservatório
- Esforços provocados pelo gelo formado na superfície da água
- Empuxo provocado pelo acúmulo de material decantado

- Esforços provenientes do atrito
- Esforços proveniente de terremotos

Ainda possui o esforço provocado pela lâmina d'água na seção do vertedouro, quando ocorre o extravasamento devido ao aumento do nível de água a montante. Essa carga não é considerada em cálculo por ser uma carga pequena que está a favor da segurança e que não é uma carga constante, pois acontece esporadicamente, logo não podemos levar ela em conta.

Para se obter a estabilidade da barragem devemos analisar esses esforços através de diversas hipóteses. Segundo Linsley 'As barragens à gravidade podem falhar por *flutuação*, *tombamento*, *deslizamento* ao longo de um plano horizontal, ou por ruptura do material. Rupturas podem ocorrer no nível do terreno ou em qualquer outro plano da barragem. Deslizamento (ou ruptura por cisalhamento) poderá ocorrer se a resultante horizontal dos esforços acima de qualquer cota da barragem superar a resistência ao cisalhamento no mesmo nível'. A verificação a segurança dessas falhas serão explicadas ao longo deste trabalho acadêmico.

#### 4.1 O peso da barragem

Em uma barragem por gravidade este é o principal esforço resistente da barragem. Este varia diretamente com a área da seção da barragem e o peso específico do concreto. Segundo o livro Usinas Hidrelétricas (Schreiber, 1977) "O peso da barragem depende do peso específico do concreto, que pode ser aumentado usando-se agregado graúdo de cerca de 15 cm. A granulométrica do agregado deve ser fixada de modo que se obtenha um concreto o mais denso possível. A vibração do concreto fresco ajuda no adensamento e reduz a porosidade. Assim pode-se conseguir facilmente concreto com peso específico de 2,4 t/m<sup>3</sup>".

A resultante deste esforço é vertical e tem seu ponto de aplicação no centróide da seção de concreto, ver Figura 4.1. Ela atua no sentido da gravidade e é a favor da segurança.

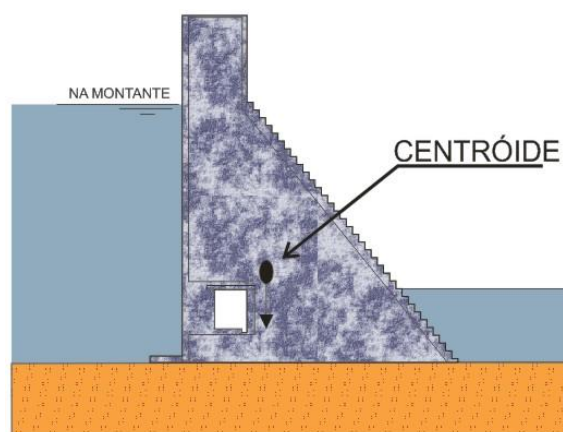


Figura 4.1 - Esforço exercido pelo peso da barragem

## 4.2 O empuxo resultante das águas

Outro esforço importante é a força exercida pelas águas no mais diversos planos da barragem, na face de paramento de montante, na face de jusante. Elas formam cargas distribuídas ao longo das faces de paramento de maneira triangular, sendo a sua resultante aplicada a 1/3 da altura como mostrado na Figura 4.2.

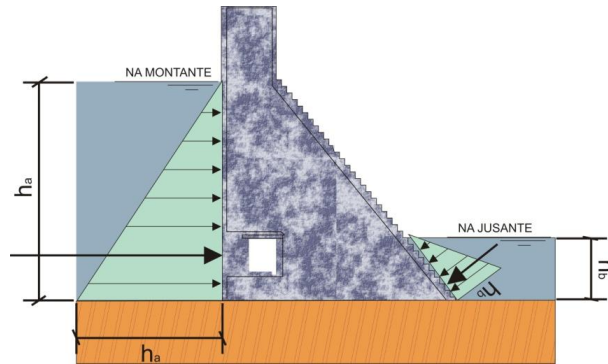


Figura 4.2 - Empuxo que a água gera na barragem

## 4.3 Esforços provenientes de terremotos

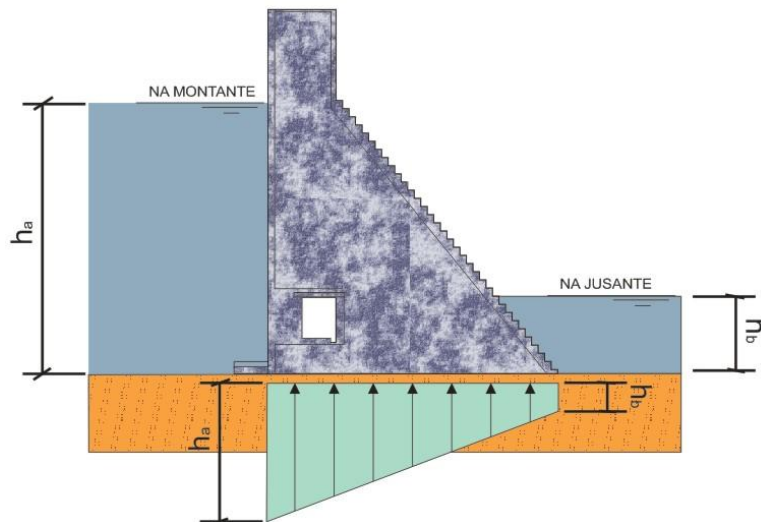
Apesar de o território brasileiro estar em uma zona tectonicamente calma aconselha-se a levar em consideração esforços sísmicos, da seguinte forma: redução ou acréscimo de 3% do peso da estrutura dependendo da aceleração considerada.

“A construção da barragem cria um novo lago, que irá alterar as condições estáticas das formações rochosas do ponto de vista da mecânica (em virtude do próprio peso da massa d’água) e do ponto de vista da hidráulica (em consequência da infiltração do fluido, que causa pressões internas nas camadas rochosas profundas). A combinação das duas ações pode desencadear distúrbios tectônicos e, eventualmente, gerar sismo, caso as condições locais sejam propícias (existência de falhas e esforços convenientemente orientados)”. (Universidade de Brasília, 2009)

Ainda segundo o livro Usina Hidrelétricas (Schreiber, 1977) devemos levar em considerações duas forças no sentido horizontal uma atuando na estrutura da barragem e outra atuando no corpo de água a montante, essa força foi chamada de pressão hidrodinâmica.

## 4.4 Esforços de sub-pressão

A sub-pressão é o resultado da percolação da água. Ela atua no sentido inverso da gravidade e tem sua distribuição de esforços de maneira trapezoidal na base da barragem, onde o lado de montante tem um valor igual à altura da coluna de água da face de paramento de montante e o lado de jusante tem um valor igual à altura de água na face de paramento de jusante, ver Figura 4.3.

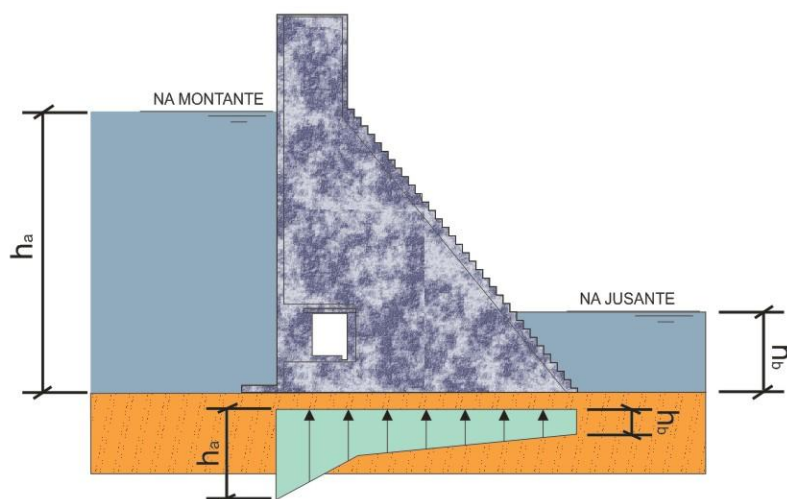


**Figura 4.3 - Diagrama de sub pressão sem drenagem**

Este esforço pode ser amenizado através da utilização de drenagens, quando se usa drenagens o gráfico de distribuição das cargas mudam. O gráfico se inicia com um valor igual à altura de água na face de paramento em seguida ele decresce gradativamente até o ponto onde se encontra a drenagem então sofre um alívio brusco de pressões e em seguida continua a cair gradualmente.

“A pressão d’água a montante é reduzida, geralmente, por injeções e drenagem. A redução da pressão pela drenagem não pode ser determinada por pesquisas, no campo, durante a elaboração do projeto. Medições em barragens existentes mostram reduções de 40 a 60%.” (Schreiber, 1977)

Na Figura 4.4 está representado como as cargas de sub pressão se distribuem ao longo da base da barragem quando essa possui um sistema de drenagem para aliviar os esforços.



**Figura 4.4 - Diagrama de sub pressão com uso de drenos**



#### 4.5 Esforços provocados pelas ondas do reservatório

“Os esforços produzidos pelas ondas dependem de sua altura, que por sua vez está relacionada com a área do reservatório adjacente à barragem, orientada na direção do vento. Algumas fórmulas estabelecem uma simples relação entre a altura das ondas e o comprimento de uma reta traçada, na direção do vento, que liga o local da barragem com a margem oposta do reservatório. Se não se conhece a direção dos ventos mais fortes, escolhe-se a reta mais comprida.” (Schreiber, 1977).

#### 4.6 Empuxo provocado pelo acúmulo de material decantado

Em todos os reservatórios ocorre o depósito de material proveniente do arrasto dos rios esse material fica alocaado em forma de lodo em frente à barragem. Esse acúmulo acontece com maior intensidade nos reservatórios pequenos do que nas barragens que possuem reservatórios grandes.

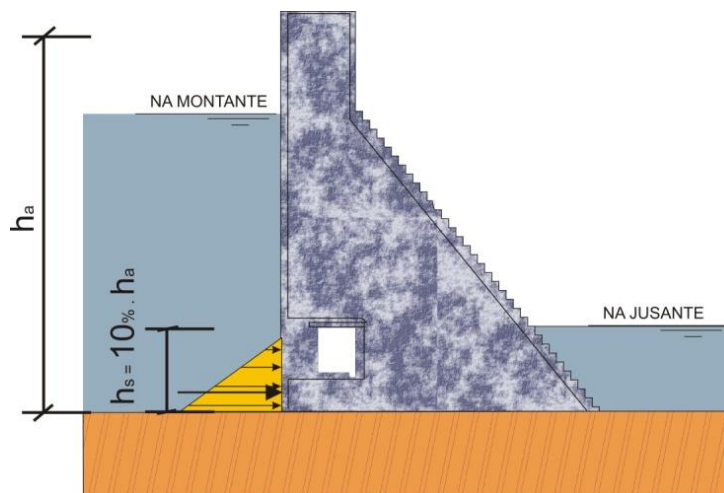


Figura 4.5 - Empuxo gerado pelo material decantado

“O lodo pouco a pouco se compacta, formando uma massa densa, com ângulo de atrito interno muito grande, exercendo, assim, empuxo muito pequeno sobre a barragem. A influência do empuxo do lodo sobre a estabilidade das barragens altas é desprezível, porém, em barragens de pequena altura, deverá ser levada em consideração.” (Schreiber, 1977)

Na falta de dados exatos aconselha-se tratar o lodo como em suspensão, exercendo pressão hidrostática no sentido horizontal de um fluido com peso específico de cerca de  $1300 \text{ kg/m}^3$ .

A profundidade  $h_s$  da camada de lodo decantado pode ser avaliada em 10% da altura da barragem, e o empuxo atuando em um terço da altura  $h_s$  da camada, ver detalhe na Figura 4.5 acima.

Calcula-se o empuxo em repouso com a fórmula a seguir.

$$E_s \equiv \frac{fs \cdot h_s^2}{2} \cdot (1 - \text{sen} \phi) \quad (4.1)$$

Onde:

$fs$  = peso específico do material submerso, como dito anteriormente em falta de dados pode ser admitido 1300kg/m<sup>3</sup>;

$\phi$  = ângulo de atrito interno, o qual se sugere adotar 30°

#### 4.7 Esforços provocados pelo gelo

“As pressões provenientes do gelo podem produzir cargas significantes contra a face da barragem quando ela se localiza em lugares onde as temperaturas no inverno sejam baixas o suficiente para congelar a água da superfície”. (Bureau of Reclamation, 1987)

Essas pressões causadas pelo gelo variam bastante através da espessura da camada de gelo, a intensidade dos ventos no local da barragem, a dureza do gelo, o modulo elástico. A forma com a qual a pedra de gelo é arrastada pelo vento depende essencialmente do tamanho e forma da área exposta.

Aqui no Brasil a ocorrência de gelo é quase nenhuma, ou nenhuma, o que nos permite desconsiderar está carga.

### 5 Montagem da Tabela

#### 5.1 Dados de entrada

A partir dos principais pontos da seção, ver Figura 5.1, são calculados os dados geométricos da seção como: altura da barragem, largura da barragem, largura e altura do pé de montante, área da seção, centróide da seção, altura do dreno, distância até o dreno.

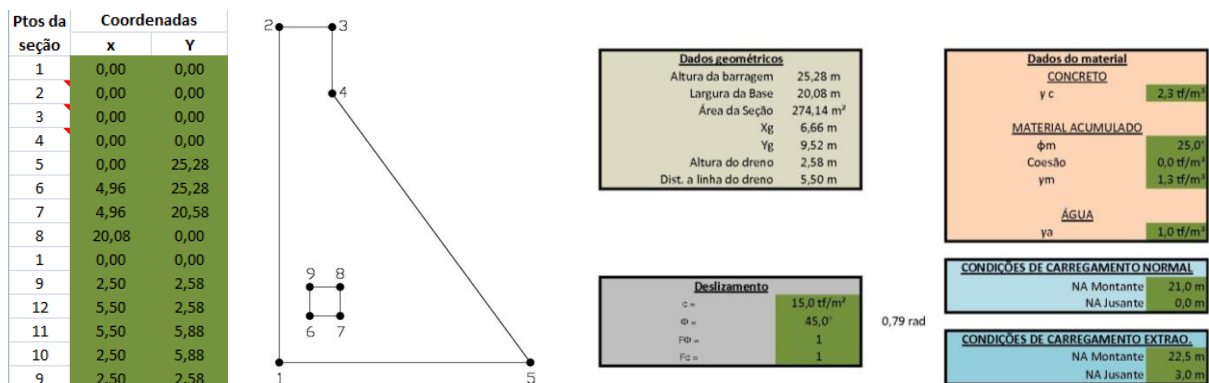


Figura 5.1 - Dados de entrada da tabela

Ainda como dados de entrada devemos colocar os dados dos materiais, peso específico do concreto, ângulo de atrito do material, coesão e peso específico do material assoreado, e o peso específico da água.

Para o cálculo da verificação ao deslizamento devemos informar as propriedades da base ângulo de atrito característico da superfície de deslizamento, coesão ao longo da superfície de deslizamento, fator de redução da resistência ao atrito à coesão.

Devemos também informar as condições de carregamento normal e extraordinário.

## 5.2 Cálculos dos esforços

Os cálculos realizados pela tabela serão demonstrados abaixo. Para os cálculos dos momentos foram utilizados dois pontos base, o primeiro chamando de “a” localizado na face de contato com o a superfície e no centro da largura da barragem e o segundo chamado de “b” que se localiza junto ao ponto 5 da Figura 5.1.

Foram utilizados dois pontos para os cálculos dos momentos pois a segurança ao tombamento deve ser calculada a partir dos momentos gerados em torno do ponto “b”. Os momentos gerados no ponto “a” foram calculados com objetivo de preparar a tabela para futuramente calcular as tensões na base.

### 5.2.1 Peso da barragem

O cálculo do peso da barragem é simples como é mostrado abaixo. A força calculada deve ser aplicada no centróide da seção no sentido da gravidade. Neste trabalho usei um comprimento unitário, no valor de um metro, para o cálculo do volume conseqüentemente o peso.

$$P = \gamma c \times \text{Área} \quad (5.1)$$

$$Xa = \frac{\text{Largura}}{2} - Xg \quad (5.2)$$

$$Xb = \text{Largura} - Xg \quad (5.3)$$

### 5.2.2 Empuxos de montante e jusante

Os esforços devidos aos empuxos d'água a jusante a montante foram realizadas levando em consideração o que foi citado no item 4.2. As formulas utilizadas para os cálculos foram as seguintes:

$$Fx = \frac{ha^2}{2} \times \gamma a \quad (5.4)$$

$$Y = ha/3 \quad (5.5)$$

Onde:

$h_a$  – Altura de água do carregamento normal ou extraordinário

$\gamma_a$  – Peso específico da água

### 5.2.3 Esforços devido à sub-pressão

Os esforços devido à sub-pressão foram utilizando as seguintes considerações: o esforço provocado pela sub-pressão na face de montante é igual à altura da água a montante e o esforço provocado a jusante é igual a altura da água a jusante, formando os seguintes diagramas sem drenagem e com drenagem respectivamente.

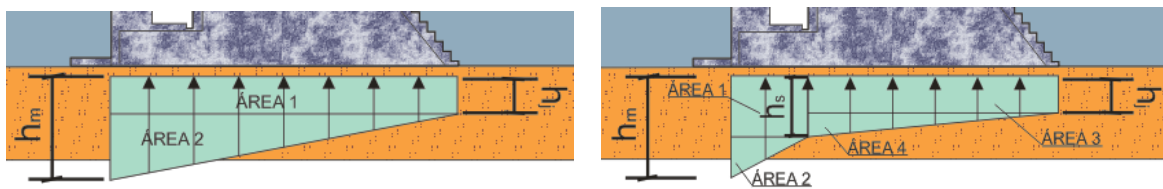


Figura 5.2 - Diagramas de sub-pressão

Onde:

$h_m$  – Altura de água a montante

$h_j$  – Altura de água a jusante

$h_s$  – Altura de água no local da drenagem

Para facilitar os cálculos da pressão pelos diagramas foram divididos em áreas como mostrado na figura acima, a soma das áreas resulta no total da força de sub-pressão. Os braços de alavanca devem ser calculados separadamente observando o formato de cada área, áreas retangulares a força deve ser aplicada no centro, e nas áreas triangulares as forças devem ser aplicadas a 1/3 da distância do lado de maior esforço. A multiplicando-se a área pelo braço de alavanca obtém-se o momento provocado por cada área. Dividindo-se a soma dos momentos de cada área pela soma de todas as áreas obtemos o braço de alavanca resultante.

Para o cálculo da altura de água na drenagem foi realizada a seguinte consideração: a altura de água no dreno é igual à distância do piso da galeria a base da barragem mais um terço da coluna d'água (referenciado na tabela como *altura do dreno*) sobre ele.

$$h_s = h_d + \frac{(NAM - h_d)}{3} \quad (5.6)$$

Onde:

$h_d$  – Altura do dreno

NAM – Nível de água a montante

#### 5.2.4 Empuxo devido material decantado

Os esforços que o material decantado exerce sobre a barragem foi calculado com as formulas apresentadas no item 4.6.

#### 5.2.5 Esforços provenientes terremotos

Como mostrado no item 4.3 os esforços provenientes de terremotos geram um acréscimo ou redução no peso da barragem e uma oscilação horizontal, como um acréscimo no peso ou uma oscilação de jusante para montante iria a favor da segurança a tabela calcula apenas a redução do peso e a oscilação de montante pra jusante. A redução do peso é calculada da seguinte forma.

$$F_t = 0,03 \times P \quad (5.7)$$

Onde:

$F_t$  – Força vertical devida ao cismo

$P$  – Peso da barragem

Sendo essa força aplicada no centróide da barragem no sentido contrário a gravidade. e outro no sentido montante para jusante.

O esforço horizontal, que o livro usinas hidrelétricas sugere, é calculado a partir da formula abaixo. Essa força atua no centro de gravidade da barragem. Nesse caso, ao contrário do que acontece na oscilação vertical, devemos considerar apenas o acréscimo do peso para se tornar mais conservador.

$$F_h = 0,05 \times (P \pm 0,03P) \quad (5.8)$$

Onde:

$F_h$  – Força horizontal gerada pelo cismo

$P$  – Peso da estrutura

#### 5.2.6 Esforços devido a hidrodinâmica

Segundo Schreiber (1977) “a aceleração sísmica da água no reservatório provoca uma sobrepressão hidrodinâmica oscilante sobre a frente vertical” da barragem, que pode ser calculada pela fórmula mostrada a seguir.

$$p_o = \frac{2}{3} \times \frac{0,05 \times 0,817 \times ha}{\sqrt{1 - 7,74 \times \left(\frac{ha}{1000}\right)^2}} \quad (5.9)$$

Onde:

$p_o$  = Pressão hidrodinâmica

$ha$  = Altura d'água a montante

O braço de alavanca sugerido dessa força deve ser igual a 40% da altura da coluna de água a montante.

$$Yg = 0,40 \times ha \quad (5.10)$$

### 5.3 Escolha do carregamento

A tabela possui uma facilidade para escolher os esforços que se quer considerar na hipótese escolhida. Essa seção da planilha foi realizada através de relações lógicas que o excel dispõe em suas ferramentas na figura abaixo é mostrado as opções de cada hipótese.

CARREGAMENTO	DRENOS	OPÇÕES
<input checked="" type="radio"/> NORMAL <input type="radio"/> EXTRAORDINÁRIO	<input checked="" type="radio"/> INOPERANTE <input type="radio"/> OPERANTE	<input checked="" type="checkbox"/> EFEITOS SÍSMICOS <input checked="" type="checkbox"/> ASSOREAMENTO

Figura 5.3 - Opções de carregamento da hipótese

### 5.4 Verificações

A tabela realiza as verificações básicas da estabilidade, que são as seguintes: Verificação a flutuação, ao tombamento, e ao deslizamento.

As verificações realizadas pela tabela são todas calculadas a partir das formulas apresentadas no item 5.

## 6 Verificações a serem executadas

“Nas fases preliminares de uma barragem à gravidade considera-se, isoladamente, uma seção transversal típica com largura unitária (ao longo do comprimento da barragem). Admite-se que esta seção atue independentemente das seções adjacentes. A análise estrutural é feita passo a passo, do topo à base e deve considerar várias hipóteses, como, por exemplo, as do reservatório cheio e vazio”. (Krüger, 2008)

Segundo a Eletrobrás (2003), ‘os critérios de projeto civil prevêm as seguintes condições de carregamentos nos estudos de estabilidade global e respectivos cálculos dos esforços internos das barragens: Condição de Carregamento Normal (CCN), Condição de Carregamento Excepcional (CCE), Condição de Carregamento Limite (CCL) e ainda a Condição de Carregamento de Construção (CCC)’, as combinações citadas apresentam as seguintes probabilidades de ocorrer grandes, pequenas, muito pequenas, ocorrência maior apenas durante a construção da obra, respectivamente.

Em todas as combinações de esforços as cargas devem ser consideradas de forma com que fiquem com a maior intensidade e aplicadas do modo mais desfavorável. As cargas

uniformemente distribuídas, acidentais e/ou concentradas são consideradas nas situações mais prejudiciais a barragem levando em consideração a intensidade, o local de aplicação, o sentido e a direção.

As cargas provenientes da água devem ser analisadas de diversas maneiras, considerando os níveis de água mais desfavoráveis tanto a montante como a jusante, deve se analisar ainda com e sem esforço de sub-pressão, com e sem o alívio provocado pela drenagem. Ainda devemos montar condições de carregamento levando em considerações o empuxo provocado pelo acúmulo do material decantado e eventualmente cargas concentradas provenientes do gelo e do material arrastado pelo rio.

Ainda segundo Krüger, nos projetos de barragens de concreto à gravidade, as verificações necessárias correspondem a análises de estabilidade considerando seções típicas da barragem como corpos rígidos, no sentido de avaliar a segurança global quanto aos seguintes movimentos:

- Deslizamento em qualquer plano, tanto na própria estrutura, como na fundação;
- Tombamento;
- Flutuação;
- Tensões na base da fundação e na estrutura;

Sendo que neste trabalho acadêmico será verificado os três primeiros itens, os quais são os essenciais para a verificação: deslizamento, tombamento, flutuação.

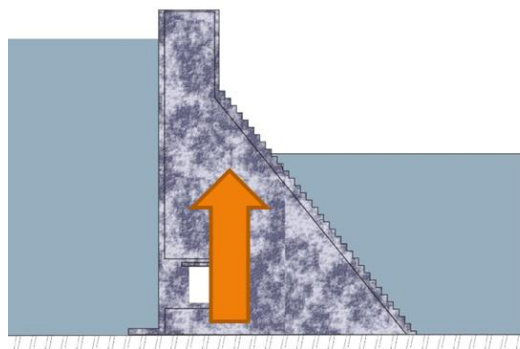
### **6.1 Verificação da flutuação**

A flutuação é verificada através da relação entre o somatório das forças verticais atuando na barragem, normalmente essas forças são gravitacionais, contra a soma das forças de sub-pressão existente ao longo da largura da base. Abaixo é apresentado uma figura esquemática, ver Figura 6.1, da flutuação.

$$FSF = \Sigma FV / \Sigma FSP \quad (6.1)$$

Onde:

- FSF – Fator de segurança a flutuação
- $\Sigma FV$  – Somatório das forças verticais
- $\Sigma FSP$  – Somatório das forças de sub-pressão



**Figura 6.1 - Esquema da flutuação**

Nas forças verticais devemos considerar o peso mínimo da barragem, sem considerar qualquer sobrecarga salvo aos de aparelhos permanentemente instalados, forças do sistema de ancoragem. As cargas acidentais podem ser desconsideradas nas verificações de estabilidade.

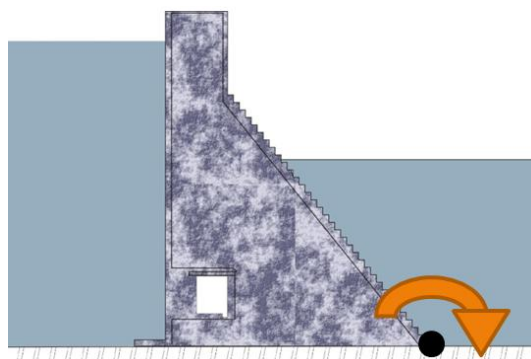
## 6.2 Verificação ao tombamento

A verificação ao tombamento é a relação entre a soma dos momentos estabilizantes e o somatório dos momentos tombadores em relação ao chamado ponto “b” da tabela, ver item 5.2. Os momentos para essa verificações devem ser feitos tomando como um ponto base o ponto extremo a jusante, ver Figura 6.2.

$$FST = \Sigma ME / \Sigma MT \quad (6.2)$$

Onde:

- FST – Fator de segurança ao tombamento
- $\Sigma ME$  – Somatório dos momentos estabilizantes
- $\Sigma MT$  – Somatório dos momentos tombadores



**Figura 6.2 - Esquema da força de tombamento**

Os momentos estabilizantes incluem os momentos devidos ao peso da barragem, e de equipamentos permanentes eventualmente instalados. Devemos desconsiderar os momentos provocados pelos esforços acidentais. O somatório dos momentos tombadores são aqueles



devido à carga hidrostática, do empuxo de terra, sub-pressão, cargas de gelo entre outras. Devemos ainda desprezar os efeitos de coesão e de atrito que atuam na base.

### 6.3 Fator de segurança ao deslizamento

Neste fator de segurança se analisa a resistência ao cisalhamento dos materiais da estrutura da barragem, dos materiais rochosos, ou do contato concreto com a rocha. Abaixo é mostrado uma figura esquemática, ver Figura 6.3.

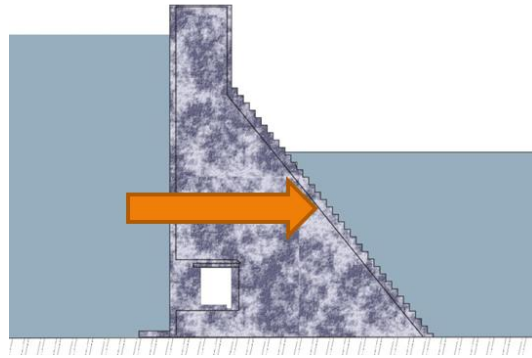


Figura 6.3 - Figura esquemática do deslizamento

“Neste item, devem ser selecionadas superfícies de ruptura de modo a incluir todos os planos de menor resistência possível, ou os submetidos a tensões críticas na estrutura, na fundação e no contato da estrutura com a fundação, sobre as quais a estrutura possa sofrer movimento de deslizamento (escorregamento) como corpo rígido”. (Krüger, 2008)

$$FSD = \frac{\frac{\sum N_i \cdot \operatorname{tg}(\phi_i)}{FSD_\phi} + \frac{\sum C_i \cdot A_i}{FSD_c}}{\sum T_i} \quad (6.3)$$

Onde:

- FSD – Fator de segurança ao deslizamento;
- FSD $\phi$  – Fator de redução da resistência ao atrito;
- FSD $c$  – Fator de redução da resistência à coesão;
- $\sum N_i$  – Somatório das forças normais
- $\sum T_i$  – Somatório das forças paralelas ao deslizamento
- $\phi_i$  – Ângulo de atrito característica da superfície de deslizamento
- $C_i$  – Coesão característica ao longo da superfície de deslizamento
- $A_i$  – Área efetiva comprimida da estrutura no plano em análise

Em materiais sem coesão:

$$FSD = \frac{\frac{\sum N_i \cdot tg(\phi_i)}{FSD_\phi}}{\sum T_i} \quad (6.4)$$

Na tabela a seguir são apresentados os fatores de segurança e os fatores de redução sugeridos pela Eletrobrás.

**Tabela 6.1 - Fatores de redução da resistência da coesão e do atrito, e fatores de segurança a flutuação e ao tombamento**

Fatores de redução e coeficientes de segurança	CC Normal	CC Excepcional	CC Limite	CC Construção
FSD <sub>c</sub>	3,0 (4,0)	1,5 (2,0)	1,3 (2,0)	2,0 (2,5)
FSD <sub>φ</sub>	1,5 (2,0)	1,1 (1,3)	1,1 (1,3)	1,3 (1,5)
FSF	1,3	1,1	1,1	1,2
FST	1,5	1,2	1,1	1,3

Fonte: Eletrobrás (2003)

## 7 Conclusão

A conclusão deste trabalho foi positiva, a tabela montada no Excel calcula de forma correta todos os cálculos esperados, com uma vantagem bastante grande devido ao tempo que se leva para se fazer as verificações. Os cálculos de verificação que chegava a durar semanas podem ser realizados em poucos dias, ou em até um dia dependendo do tempo de demora para coletar os dados da seção.

O mais importante é que ela reduz consideravelmente os erros humanos, que ocorrem com frequência quando esses cálculos são realizados manualmente devido ao fato de ser um cálculo muito repetitivo.

A grande vantagem da tabela é que você precisa executar o cálculo somente uma vez e para qualquer alteração posterior é necessário somente alterar os dados de entrada, a partir disso é possível até otimizar uma seção. Um exemplo seria: se uma barragem está com um fator de segurança muito alto, com planilha pronta é possível variar os dados da seção para então analisar como os fatores de segurança se comportam e através de uma interação achar uma seção otimizada, onde a seção tem a menor área (mais econômico) necessária para que a barragem seja segura a estabilidade.

Existem diversas sugestões para realizar a partir deste trabalho, uma muito importante seria realizar o cálculo das tensões nas bases da barragem, pois ela pode levar a um erro grave no

cálculo da sub-pressão. Outra sugestão é fazer um estudo comparativo de como se comporta a segurança ao tombamento, deslizamento, e flutuação quando se aumenta gradativamente a largura da barragem, podendo assim obter a largura otimizada da barragem, e/ou como se comporta as seguranças quando se varia o nível de água a montante e jusante.

## **8 Bibliografia**

BUREAU OF RECLAMATION (Estados Unidos da América). **DESIGN OF SMALL DAMS**. 3. ed. Denver, Colorado: United States Government Printing Office, 1987. 860 p. A Wather Resources Technical Publication.

ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas**. Brasil. 2003.

FONG, Fu Mei. **ESTABILIDADE DE ESTRUTURAS HIDRÁULICAS DE GRAVIDADE**. Porto Alegre: Editora Companhia Brasileira De Artes Gráficas, 1978. 62 p.

GIL, Antonio Carlos. **MÉTODOS E TÉCNICAS DE PESQUISA SOCIAL**. São Paulo: Atlas, 1999.

KRÜGER, Cláudio Marchand. **ANÁLISE DE CONFIABILIDADE ESTRUTURAL APLICADA ÀS BARRAGENS DE CONCRETO**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2008. 157 p.

LINSLEY, R. K., FRANZINI, J. B., FREYBERG, D. L. **Water-resources engineering**. McGraw-Hill, 1992.

SCHREIBER, Gerhard Paul. **USINAS HIDRELÉTRICAS**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1977. 238 p. ENGEVIX S.A.

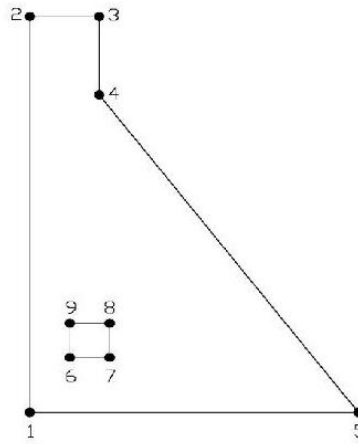
SILVA, Edna Lúcia da. **METODOLOGIA DA PESQUISA E ELABORAÇÃO DE DISSERTAÇÃO**. 3. ed. rev. atual. – Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - INSITUDO DE GEOCIÊNCIAS (Brasília). **SISMICIDADE INDUZIDA PELO HOMEM**. Disponível em: <[http://www.obsis.unb.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=61&Itemid=73](http://www.obsis.unb.br/index.php?option=com_content&view=article&id=61&Itemid=73)>. Acesso em: 10 nov. 2009.

## APÊNDICES

# APÊNDICE I – PLANILHA ELETRÔNICA

Ptos da seção	Coordenadas	
	x	Y
1	0,00	0,00
2	0,00	25,28
3	4,96	25,28
4	4,96	20,58
5	20,08	0,00
6	2,50	2,58
7	5,50	2,58
8	5,50	5,88
9	2,50	5,88
6	2,50	2,58



<u>Dados geométricos</u>	
Altura da barragem	25,28 m
Largura da Base	20,08 m
Área da Seção	274,14 m <sup>2</sup>
Xg	6,66 m
Yg	9,52 m
Altura do dreno	2,58 m
Dist. a linha do dreno	5,50 m

<u>Dados do material</u>	
<u>CONCRETO</u>	
$\gamma_c$	2,3 tf/m <sup>3</sup>
<u>MATERIAL ACUMULADO</u>	
$\phi_m$	25,0°
Coesão	0,0 tf/m <sup>3</sup>
$\gamma_m$	1,3 tf/m <sup>3</sup>
<u>ÁGUA</u>	
$\gamma_a$	1,0 tf/m <sup>3</sup>

<u>Deslizamento</u>	
$c =$	15,0 tf/m <sup>2</sup>
$\Phi =$	45,0°
$F\Phi =$	1
$Fc =$	1

0,79 rad

<u>CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO NORMAL</u>	
NA Montante	21,0 m
NA Jusante	0,0 m

<u>CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO EXTRAO.</u>	
NA Montante	22,5 m
NA Jusante	3,0 m

CÁLCULOS		
<b>FORÇAS ESTABILIZANTES</b>		
<i>PESO PRÓPRIO</i>		
Fy = -630,5196	Xa = 3,38	Ma = -2130,12 t.m
	Xb = 13,42	Mb = -8459,59 t.m
<i>EMPUXO DE JUSANTE</i>		
<b>CARREGAMENTO NORMAL</b>		
Fx = 0	Yg = 0,00	Mx = 0,00 t.m

APÊNDICE I – PLANILHA ELETRÔNICA

<b>CARREGAMENTO EXTRAORDINÁRIO</b>		
Fx = -4,5	Yg = 1,00	Mx = -4,50 t.m
<b>FORÇAS INSTABILIZANTES</b>		
<b>EMPUXO DE MONTANTE</b>		
<b>CARREGAMENTO NORMAL</b>		
ha = 21,00	y = 7,00	Mx1 = 1543,50
Fx1 = 220,50		
<b>Fx = 220,50</b>	<b>Y = 7,00</b>	<b>Mx = 1543,50</b>
<b>CARREGAMENTO EXTRAORDINÁRIO</b>		
ha = 22,50	y = 7,50	Mx1 = 1898,44
Fx1 = 253,13		
<b>Fx = 253,13</b>	<b>Y = 7,50</b>	<b>Mx = 1898,44</b>
<b>SUBPRESSÃO</b>		
<b>DRENO INOPERANTE</b>		
<b>CARREGAMENTO NORMAL</b>		
Fy 1 = 210,8085	Xa = 3,35	Ma = 705,40
<b>Fy = 210,81</b>	<b>Xa = 3,35</b>	<b>Ma = 705,40</b>
Fy 1 = 210,81	Xb = 13,38	Mb = 2821,60
<b>Fy = 210,81</b>	<b>Xb = 13,38</b>	<b>Mb = 2821,60</b>
<b>CARREGAMENTO EXTRAORDINÁRIO</b>		
Fy 1 = 195,75075	X = 3,35	My = 655,01
Fy 2 = 60,23	X = 0	My = 0,00
<b>Fy = 255,98</b>	<b>X = 2,56</b>	<b>Ma = 655,01</b>
Fy 1 = 195,75075	Xb = 13,38	Mb = 2620,06
Fy 2 = 60,23	Xb = 10,0385	Mb = 604,63
<b>Fy = 255,98</b>	<b>Xb = 12,60</b>	<b>Mb = 3224,69</b>
<b>DRENO OPERANTE</b>		
<b>CARREGAMENTO NORMAL</b>		
Pressão no lugar do dreno	8,72	
Fy1 = 47,94	X = 7,29	Ma = 349,42
Fy2 = 33,78	X = 8,21	Ma = 277,16
Fy3 = 0,00	X = -2,75	Ma = 0,00
Fy4 = 63,53	X = -0,32	Ma = -20,36
<b>Fy = 145,25</b>	<b>X = 4,17</b>	<b>Ma = 606,22</b>

## APÊNDICE I – PLANILHA ELETRÔNICA

Pressão no lugar do dreno	8,72		
Fy1 =	47,94	X =	17,33
Fy2 =	33,78	X =	18,24
Fy3 =	0,00	X =	7,29
Fy4 =	63,53	X =	9,72
<b>Fy =</b>	<b>145,25</b>	<b>X =</b>	<b>14,21</b>
			<b>Mb = 830,69</b>
			<b>Mb = 616,26</b>
			<b>Mb = 0,00</b>
			<b>Mb = 617,40</b>
			<b>Mb = 2064,34</b>
<b>CARREGAMENTO EXTRAORDINÁRIO</b>			
Pressão no lugar do dreno	9,22		
Fy1 =	50,69	X =	7,29
Fy2 =	36,53	X =	8,21
Fy3 =	43,73	X =	-2,75
Fy4 =	45,31	X =	-0,32
<b>Fy =</b>	<b>176,26</b>	<b>X =</b>	<b>3,03</b>
			<b>Ma = 369,47</b>
			<b>Ma = 299,73</b>
			<b>Ma = -120,26</b>
			<b>Ma = -14,52</b>
			<b>Ma = 534,41</b>
Pressão no lugar do dreno	9,22		
Fy1 =	50,69	X =	17,33
Fy2 =	36,53	X =	18,24
Fy3 =	43,73	X =	7,29
Fy4 =	45,31	X =	9,72
<b>Fy =</b>	<b>176,26</b>	<b>X =</b>	<b>13,07</b>
			<b>Mb = 878,33</b>
			<b>Mb = 666,43</b>
			<b>Mb = 318,73</b>
			<b>Mb = 440,32</b>
			<b>Mb = 2303,82</b>
<b>ASSOREAMENTO</b>			
Altura de assoreamento	2,53		
<b>Fx =</b>	<b>2,40</b>	<b>Y =</b>	<b>0,84</b>
			<b>Mx = 2,02</b>
<b>EFEITOS SÍSMICOS</b>			
<b>VERTICAL</b>			
<b>Fy =</b>	<b>18,92</b>	<b>Xa =</b>	<b>3,38 m</b>
		<b>Xb =</b>	<b>13,42</b>
			<b>Ma = 63,90</b>
			<b>Mb = 253,79</b>
<b>HORIZONTAL</b>			
<b>Fx =</b>	<b>30,58</b>	<b>Yg =</b>	<b>9,52 m</b>
			<b>Ma = 291,24</b>
			<b>Mb = 291,24</b>
<b>PRESSÃO HIDRODINÂMICA</b>			
<b>CARREGAMENTO NORMAL</b>			
<b>Fx =</b>	<b>12,03</b>	<b>Yg =</b>	<b>8,40</b>
			<b>Mx = 101,06</b>
<b>CARREGAMENTO EXTRAORDINÁRIO</b>			
<b>Fx =</b>	<b>13,81</b>	<b>Yg =</b>	<b>9,00</b>
			<b>Mx = 124,33</b>

APÊNDICE I – PLANILHA ELETRÔNICA

HIPÓTESE 1

CARREGAMENTO

NORMAL

EXTRAORDINÁRIO

DRENOS

INOPERANTE

OPERANTE

OPÇÕES

EFEITOS SÍSMICOS

ASSOREAMENTO

ESFORÇOS DE CÁLCULO	
ALTURA DO NÍVEL DA ÁGUA	
NA Mont. = 21,00	NA Jus. = 0,00

ESFORÇOS CONSIDERADOS			
ESFORÇOS ESTABILIZANTES			
PESO PRÓPRIO		EMPUXO DE JUSANTE	
Fy = -630,52	Ma = -2130,12	Fy = 0,00	Ma = 0,00
	Mb = -8459,592		Mb = 0,00
ESFORÇOS INSTABILIZANTES			
EMPUXO MONTANTE		SUBPRESSÃO	
Fx = 220,50	Ma = 1543,50	Fy = 210,81	Ma = 705,40
	Mb = 1543,50		Mb = 2821,60
ASSOREAMENTO		EFEITOS SÍSMICOS	
Fx = 2,40	Ma = 2,02	Fx = 30,58	Ma = 355,14
	Mb = 2,02	Fy = 18,92	Mb = 545,02
PRESSÃO HIDROSTÁTICA			
Fx = 12,03	Ma = 101,06		
	Mb = 101,06		

SOMA DAS FORÇAS			
ESTABILIZANTES			
Fx = 0,00		Ma = -2130,12	
Fy = -630,52		Mb = -8459,59	
INSTABILIZANTES			
Fx = 265,51		Ma = 2707,12	
Fy = 229,72		Mb = 5013,20	
RESULTANTES			
Fx = 265,51		Ma = 576,99	
Fy = -400,80		Mb = -3446,39	

FATORES DE SEGURANÇA		
Segurança ao deslizamento	Segurança a tombamento	Segurança a flutuação
fd = 2,64	ft = 1,69	ff = 2,74



APÊNDICE I – PLANILHA ELETRÔNICA

HIPÓTESE 2

CARREGAMENTO

NORMAL

EXTRAORDINÁRIO

DRENOS

INOPERANTE

OPERANTE

OPÇÕES

EFEITOS SÍSMICOS

ASSOREAMENTO

ESFORÇOS DE CÁLCULO			
ALTURA DO NÍVEL DA ÁGUA			
NA Mont. =	22,50	NA Jus. =	3,00

ESFORÇOS CONSIDERADOS			
ESFORÇOS ESTABILIZANTES			
PESO PRÓPRIO		EMPUXO DE JUSANTE	
Fy = -630,52	Ma = -2130,12	Fy = -4,50	Ma = -4,50
	Mb = -8459,592		Mb = -4,50
ESFORÇOS INSTABILIZANTES			
EMPUXO MONTANTE		SUBPRESSÃO	
Fx = 253,13	Ma = 1898,44	Fy = 145,25	Ma = 534,41
	Mb = 1898,44		Mb = 2303,82
ASSOREAMENTO		EFEITOS SÍSMICOS	
Fx = 2,40	Ma = 2,02	Fx = 30,58	Ma = 355,14
	Mb = 2,02	Fy = 18,92	Mb = 545,02
PRESSÃO HIDROSTÁTICA			
Fx = 13,81	Ma = 124,33		
	Mb = 124,33		

SOMA DAS FORÇAS			
ESTABILIZANTES			
Fx =	0,00	Ma =	-2134,62
Fy =	-635,02	Mb =	-8464,09
INSTABILIZANTES			
Fx =	299,92	Ma =	2914,33
Fy =	164,17	Mb =	4873,62
RESULTANTES			
Fx =	299,92	Ma =	779,71
Fy =	-470,85	Mb =	-3590,47

FATORES DE SEGURANÇA			
Segurança ao deslizamento	Segurança a tombamento	Segurança a flutuação	
fd = 2,57	ft = 1,74	ff =	3,87

APÊNDICE I – PLANILHA ELETRÔNICA

HIPÓTESE 3

CARREGAMENTO

NORMAL

EXTRAORDINÁRIO

DRENOS

INOPERANTE

OPERANTE

OPÇÕES

EFEITOS SÍSMICOS

ASSOREAMENTO

ESFORÇOS DE CÁLCULO		
ALTURA DO NÍVEL DA ÁGUA		
NA Mont. =	21,00	NA Jus. = 0,00

ESFORÇOS CONSIDERADOS			
ESFORÇOS ESTABILIZANTES			
PESO PRÓPRIO		EMPUXO DE JUSANTE	
Fy = -630,52	Ma = -2130,12	Fy = 0,00	Ma = 0,00
	Mb = -8459,592		Mb = 0,00
ESFORÇOS INSTABILIZANTES			
EMPUXO MONTANTE		SUBPRESSÃO	
Fx = 220,50	Ma = 1543,50	Fy = 145,25	Ma = 606,22
	Mb = 1543,50		Mb = 2064,34
ASSOREAMENTO		EFEITOS SÍSMICOS	
Fx = 0,00	Ma = 0,00	Fx = 0,00	Ma = 0,00
	Mb = 0,00	Fy = 0,00	Mb = 0,00
PRESSÃO HIDROSTÁTICA			
Fx = 0,00	Ma = 0,00		
	Mb = 0,00		

SOMA DAS FORÇAS			
ESTABILIZANTES			
Fx =	0,00	Ma =	-2130,12
Fy =	-630,52	Mb =	-8459,59
INSTABILIZANTES			
Fx =	220,50	Ma =	2149,72
Fy =	145,25	Mb =	3607,84
RESULTANTES			
Fx =	220,50	Ma =	19,60
Fy =	-485,27	Mb =	-4851,75

FATORES DE SEGURANÇA		
Segurança ao deslizamento	Segurança a tombamento	Segurança a flutuação
fd = 3,57	ft = 2,34	ff = 4,34