

JOELMA MAGALHÃES BRAGA

**INFLUÊNCIA DO ASSOREAMENTO NA ESTABILIDADE DAS
BARRAGENS DE CONCRETO.**

Artigo Científico apresentado ao Curso de Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil; Escola Politécnica; Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista em Segurança de Barragens.

Orientador: Prof. Dr. José Marques Filho

Salvador
Maio 2024

Influência do Assoreamento na Estabilidade das Barragens de Concreto.

Joelma Magalhães Braga

Resumo

As barragens de concreto sofrem influência de uma série de cargas que determinam suas condições de estabilidade e segurança. O assoreamento do reservatório, além de afetar a capacidade de armazenamento e prejudicar a operação do aproveitamento hidrelétrico, aumenta as cargas à montante da barragem, através de uma pressão normal ao paramento, podendo afetar a sua estabilidade. Neste trabalho é verificada a influência do assoreamento nos critérios de estabilidade de uma barragem de concreto à gravidade, traduzidos dos coeficientes de segurança que verificam as condições de resistência ao deslizamento e ao tombamento, bem como na tensão no contato concreto/fundação, estabelecidos nos critérios de projeto da Eletrobras. Também é estabelecida uma equação linear relacionando o assoreamento com o fator de segurança ao deslizamento, para utilização no controle do assoreamento visando a segurança da barragem.

Palavras-chave: barragens de concreto; estabilidade; segurança de barragens.

Abstract

Concrete dams are influenced by a series of charges that determine their stability and security conditions. Sedimentation in reservoirs affects storage capacity and hydraulic operation, increasing charges and barragem height through horizontal pressure, potentially affecting barragen stability. This work investigates the influence of sedimentation on stability criteria for a gravity concrete barragem, derived from safety coefficients assessing resistance to delamination and collapse conditions in Eletrobras project criteria. A linear equation is established relating sediment to the safety factor for delodging, aimed at controlling association to ensure dam safety.

Keywords: concrete dams, stability; sedimentation; dam safety.

1 INTRODUÇÃO

As barragens de concreto a gravidade são estruturas sólidas, projetadas de maneira que mantenham sua estabilidade frente às ações impostas a estrutura, através de sua forma geométrica, sua massa e por meio da resistência do concreto, nas interfaces concreto/concreto e concreto/fundação, e da fundação rochosa. O equilíbrio estático é garantido principalmente pelo próprio peso da estrutura (USCE, 1995), e por dependerem essencialmente de suas dimensões para se manterem estáveis e seguras, faz-se necessário um bom entendimento sobre como atuam as ações na estrutura (Loureiro, 2018)

O assoreamento dos reservatórios provoca impactos negativos nas barragens, primeiro pela redução do seu armazenamento útil, e segundo, em alguns casos, pela redução da capacidade das barragens para evitar cheias, trazendo riscos para a própria barragem e a jusante da estrutura. O processo de sedimentação à montante das barragens pode reduzir os fatores de segurança à estabilidade global para a qual foi a estrutura foi originalmente calculada. Por isso, os operadores das barragens devem acompanhar os sedimentos e detritos flutuantes à montante da estrutura, reparando os danos por eles causados e tomando medidas necessários para reduzir seus impactos (Adamo et. al., 2020).

O presente trabalho tem como objetivo geral verificar a influência do assoreamento na estabilidade de um bloco de uma barragem de concreto à gravidade em operação, através da verificação dos fatores de segurança ao deslizamento e ao tombamento, bem como na tensão na interface concreto/ fundação, calculados através dos Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas (Eletrobras, 2003).

O trabalho também estabelecerá uma equação que relacione a variação do assoreamento com o fator de segurança ao deslizamento, indicador de desempenho mais importante para barragens de concreto à gravidade (Oliveira et. al, 2003), modelada através de uma regressão linear, buscando propiciar sua utilização pelo operador da barragem, auxiliando no controle corretivo do assoreamento à montante da barragem, bem como na avaliação da estabilidade das estruturas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item será abordada a revisão bibliográfica que foi separada nos seguintes assuntos: barragens de concreto à gravidade, análise de estabilidade global e impactos do assoreamento nas barragens.

2.1 BARRAGENS DE CONCRETO À GRAVIDADE

Entre as barragens de concreto, uma das possíveis classificações é a de concreto à gravidade, que consiste em estruturas de concreto que mantêm sua estabilidade com as cargas de projeto devido à sua forma geométrica, à sua massa e à resistência do concreto, das juntas de construção de concreto/concreto, da interface concreto/fundação, e da fundação rochosa (U. S. Army Corps of Engineers, 1995).

Segundo Marques (2015), para diversos autores a verificação ao deslizamento juntamente com a verificação das tensões são os critérios mais importantes para garantir a segurança de barragens à gravidade. Para Znamensky (2007), quando há uma reserva de segurança segundo a condição de deslizamento, um acréscimo do coeficiente de segurança das demais verificações também é observado.

2.1.1 AÇÕES ATUANTES

Para o dimensionamento de barragens de concreto à gravidade, a determinação das cargas quem solicitam a estrutura é essencial (U. S. Army Corps of Engineers, 1995).

As principais ações atuantes em uma barragem de concreto são o peso próprio, o peso e pressões hidrostáticas, subpressão, pesos e pressões devido aos sedimentos, assim como as pressões devido a ações sísmicas, conforme Figura 1. Estes carregamentos são considerados usuais em uma estrutura de barragem (Eletrobras, 2003).

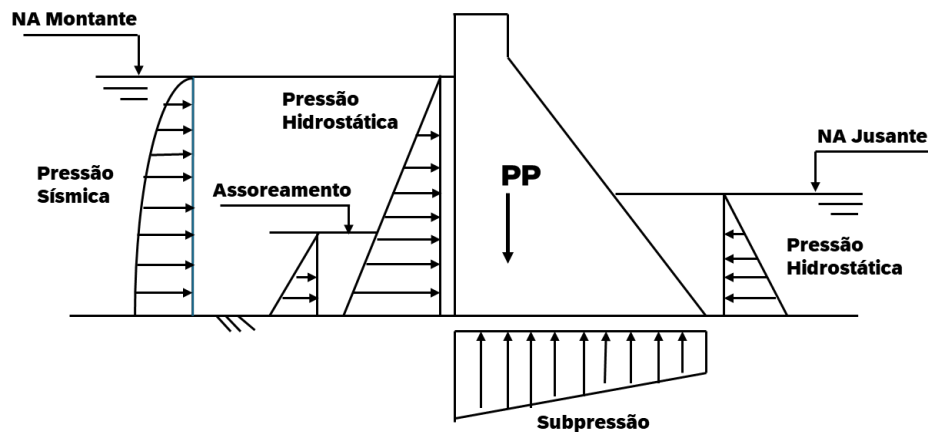


Figura 1 - Principais ações atuantes em uma seção típica de barragem a gravidade (Fonte: autora).

2.2 ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL

De acordo com a Eletrobras (2003), na análise da estabilidade global deve-se verificar o Estado Limite Último de Perda de Equilíbrio Global ou Parcial de estruturas, que são admitidas como um corpo rígido.

Em estruturas hidráulicas, a análise de segurança global deve ser feita para as principais estruturas, elementos estruturais e sistemas de interação entre fundações e estruturas submetidas aos diversos casos de carregamentos. Essa análise deve englobar a análise de estabilidade no contato concreto-rocha e em planos superiores e inferiores ao da fundação, bem como a análise de tensões e deformações, a definição dos coeficientes de segurança e a verificação entre as tensões atuantes e as tensões admissíveis dos materiais (Eletrobras, 2003).

Segundo a Eletrobras (2003), para que a verificação da estabilidade global de barragens de gravidade seja atendida é necessário que quatro condições se verifiquem: (a) segurança contra a flutuação (FSF); (b) segurança contra o deslizamento (FSD) no plano horizontal da base ou em outro plano potencial de deslizamento; (c) segurança contra o tombamento (FST) em qualquer plano horizontal que passe pela estrutura, pela base ou sob a base, e (d) as tensões admissíveis no concreto e na fundação não sejam excedidas.

Os critérios mencionados acima apresentam simplificações que consideram as estruturas infinitamente rígidas e como consequência supõe que as seções de interface com as fundações permanecem planas, chegando a equações de equilíbrio relativamente simples e já definidas pela Resistência dos Materiais. Essa metodologia também é conhecida pelo Método do Equilíbrio Limite.

2.2.1 COEFICIENTES DE SEGURANÇA

Para efeitos dos estudos, análises e comportamentos de estabilidade das estruturas hidráulicas, os coeficientes de segurança são descritos a seguir.

Geralmente, para as interfaces concreto/rocha e concreto/concreto é adotada a envoltória de Resistência de Mohr-Coulomb, ver Figura 2 abaixo, definida pelos parâmetros coesão e ângulo de atrito.

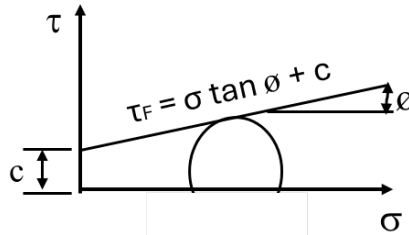


Figura 2 – Resistência de Mohr-Coulomb (Fonte: autora).

O **fator de segurança ao deslizamento (FSD)** refere-se a verificação da estabilidade das estruturas ao deslizamento (escorregamento), deve-se selecionar as 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 estrutura-fundação, sobre as quais a estrutura possa sofrer movimento de deslizamento como corpo rígido. A parcela de coesão deve ser incluída, exceto se as investigações de campo provarem o contrário.

O FSD, de acordo com a Eletrobras (2003), pode ser obtido por meio da seguinte equação:

$$FSD = \frac{\frac{\sum N_i \cdot \tan \phi_i}{FSD_\phi} + \frac{\sum c_i \cdot A_i}{FSD_c}}{\sum H_i} \geq 1,0$$

onde:

FSD ϕ = fator de redução da resistência ao atrito;

FSD c = fator de redução da resistência à coesão;

$\sum N_i$ = 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;

$\sum T_i$ = somatório das forças paralelas à superfície de deslizamento.

Os valores dos fatores de redução utilizados na verificação ao deslizamento indicam que a determinação da coesão é menos confiável que o ângulo de atrito, como pode ser observado no Quadro 1.

O fator de segurança ao tombamento (FST) é a relação entre o momento estabilizante e o momento de tombamento em relação a um ponto ou uma linha efetiva de rotação e, de acordo com a Eletrobras (2003), pode ser obtido por meio da seguinte equação:

$$FST = \frac{\sum Me}{\sum Mt}$$

onde:

$\sum Me$ = somatório dos momentos estabilizantes;

$\sum Mt$ = somatório dos momentos de tombamento.

Para momento estabilizante serão considerados os momentos de peso próprio, cargas permanentes mínimas e cargas devido a equipamentos permanentes. Para momento de tombamento serão considerados momentos gerados por cargas desestabilizantes, como subpressões, empuxos de terra e pressões hidrostáticas. Efeitos de coesão e atrito devem ser desprezados na verificação ao tombamento.

O fator de segurança a flutuação (FSF) é a relação entre o somatório das forças gravitacionais e o somatório das forças de subpressão e, de acordo com a Eletrobras (2003), pode ser obtido por meio da seguinte equação:

$$FSF = \frac{\sum V}{\sum U}$$

onde:

$\sum V$ = somatório das forças gravitacionais;

$\sum U$ = somatório das forças de subpressão.

Na verificação à flutuação, deverão ser desprezadas quaisquer contribuições favoráveis devidas à coesão e ao atrito entre blocos ou entre a estrutura e a fundação. As forças verticais deverão incluir as cargas permanentes mínimas das estruturas e o peso dos equipamentos já instalados. Todas as cargas acidentais devem ser ignoradas (Eletrobras, 2003).

O Quadro 1 a seguir, apresenta os valores dos fatores de redução da resistência por atrito (FSD ϕ) e da coesão (FSD c) e os fatores de segurança mínimos para FSF, FST e FSD adaptado

da Eletrobras, 2003), que devem ser adotados para as Condições de Carregamento Normal (CCN), Condições de Carregamento Excepcional (CCE), Condições de Carregamento Limite (CCL) e Condições de Carregamento de Construção (CCC).

Coeficientes de Segurança	Casos de Carregamentos							
	CCN		CCE		CCL		CCC	
FSF	1,3		1,1		1,1		1,2	
FST	1,5		1,2		1,5		1,3	
FSD	Fatores de redução da resistência do atrito e da coesão							
	<i>FSD_c</i>	<i>FSD_φ</i>	<i>FSD_c</i>	<i>FSD_φ</i>	<i>FSD_c</i>	<i>FSD_φ</i>	<i>FSD_c</i>	<i>FSD_φ</i>
	3,0 (4,0)	1,5 (2,0)	1,5 (2,0)	1,1 (1,3)	1,3 (2,0)	1,1 (1,3)	2,0 (2,5)	1,3 (1,5)

Quadro 1 - Fatores de Segurança e de Redução da Resistência do Atrito e da Coesão. Fonte: Eletrobras, adaptado pela autora.

Nos casos em que o conhecimento dos parâmetros de resistência dos materiais da fundação seja precário ou não apresentem constância de comportamento, devem-se adotar os valores entre parênteses para os fatores de redução do atrito e da coesão (Eletrobras, 2003).

2.2.2 ANÁLISE DE TENSÕES

A verificação da segurança em relação ao estado limite último de perda de equilíbrio global, de acordo com a Eletrobras (2003), deve ser complementada por análises de tensões e deformações, que deverão ser elaboradas para todos os elementos estruturais e de fundações, considerando-se os possíveis casos de carregamentos.

A análise de tensões na base das estruturas pode ser realizada através da fórmula para determinação das tensões normais nas seções transversais, a partir das solicitações de serviço, isto é, a partir de esforços não majorados por quaisquer coeficientes, na base da fundação ou em qualquer outro plano, constituído de materiais isótropos e homogêneos, resistentes a tração e a compressão, no regime da lei de Hooke (Eletrobras, 2003).

Assim, as tensões máximas na base ou ao longo de juntas de concretagem de uma barragem são obtidas junto às faces, de acordo com a seguinte equação:

$$\sigma_{máx,min} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W}$$

onde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = tensão máxima na base ou ao longo de juntas de concretagem da barragem;

N = somatório das forças verticais normais à base da fundação;

A = área da seção na base da fundação;

M = momento fletor resultante das forças atuantes em relação ao centroide da área;

W = módulo de rigidez da seção na base da fundação.

De acordo com os Critérios de Projeto da Eletrobras (2003) durante as verificações de estabilidade global das estruturas, na região do contato concreto/fundação, sempre que surgirem tensões de tração, deverá ser admitida a seção como frágil, não resistente à tração, resultando na abertura do contato. Em casos de ocorrência de sismo, não será considerada sua influência no cálculo da subpressão atuante na fundação.

No Caso de Carregamento Normal não é permitida abertura de junta de tração no contato concreto /fundação, portanto, a base deve estar totalmente comprimida. Para os demais casos de carregamento, admite-se uma abertura do contato limitada a 1/3 da seção de contato concreto/fundação (Eletrobras, 2003).

2.2.3 CRITÉRIOS DE PROJETO DA ELETROBRAS PARA DETERMINAÇÃO DA CARGA DE ASSOREAMENTO

De acordo com a Eletrobras (2003), o cálculo para determinar a componente horizontal da carga de assoreamento será feito através da fórmula de Rankine, desprezando-se a coesão:

$$P_s = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot (h_s)^2 \cdot \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$$

onde:

P_s = força horizontal de assoreamento (kN/m);

γ = peso específico do sedimento (kN/m³);

h_s = altura de cálculo (m);

φ = ângulo de atrito interno do material.

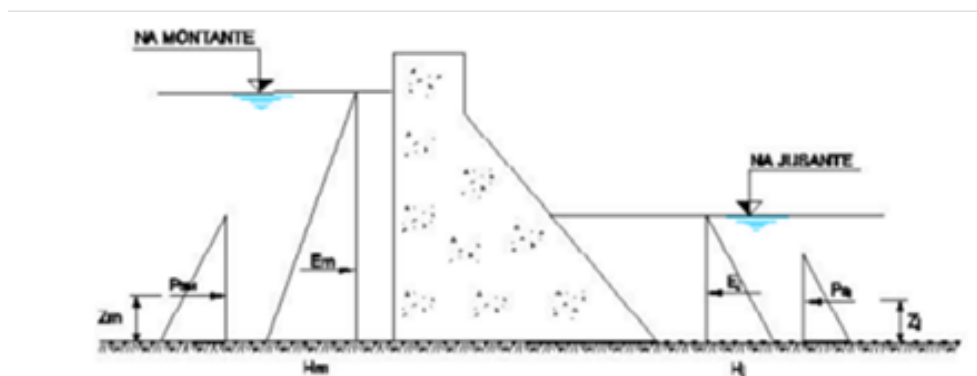


Figura 3 - Empuxo de Assoreamento (Fonte: Eletrobras, 2003),

Ainda, de acordo com a Eletrobras (2003) a pressão horizontal de assoreamento será considerada, conforme o caso, atuando sobre no mínimo 10% da altura da seção estrutural analisada.

2.3 IMPACTOS DO ASSOREAMENTO NAS BARRAGENS

Um dos impactos mais evidentes da sedimentação dos reservatórios é a perda da capacidade de armazenamento de água. Segundo Adamo et. al. (2020), o assoreamento de reservatórios de médio porte, causado por mudanças na morfologia dos reservatórios, pode causar impactos graves na operação das barragens e causar riscos à segurança de áreas a jusante, podendo inclusive reduzir os fatores de segurança para estabilidade da barragem conforme originalmente calculado.

Em usinas de geração elétrica o assoreamento dos reservatórios reduz a produção de energia, aumenta as cargas na barragem e comportas e danifica turbinas e outros equipamentos mecânicos. E, embora a sedimentação dos reservatórios do mundo represente uma séria ameaça à sustentabilidade das hidrelétricas, as orientações sobre a melhor forma de resolver o problema são limitadas (Schellenberg, et. al, 2023).

3 METODOLOGIA

Neste item será mostrada a metodologia utilizada para análise da estabilidade global de um bloco de uma barragem de concreto à gravidade, com apresentação de resultados e, em seguida, a análise da influência do assoreamento nos critérios de estabilidade e da tensão no contato concreto/fundação.

3.1 ANÁLISE DA ESTABILIDADE GLOBAL

Os métodos de avaliação da análise de estabilidade empregados nesse trabalho foram a abordagem determinística através das recomendações da Eletrobras (2003). Os cálculos efetuados foram realizados por meio das equações apresentadas na revisão bibliográfica através do uso de planilhas eletrônicas por meio do Software Microsoft Excel e validados com os resultados apresentados no Relatório de Avaliação da Barragem de Concreto, elaborado durante a última Revisão Periódica de Segurança de Barragem – RPSB, mostrando uma excelente coerência entre os valores.

Por razões de confidencialidade, alguns dados de identificação da estrutura não serão divulgados. Registra-se, no entanto, que as informações expostas nesse trabalho expressam de maneira fidedigna o comportamento da estrutura, nas hipóteses simplificadoras da análise, que se encontra atualmente em operação.

3.2 ESTRUTURA ANALISADA

A análise de estabilidade será realizada em um dos blocos da barragem de concreto que é do tipo gravidade. A análise é feita com a seção transversal do bloco.

Na Figura 4 é apresentada a seção transversal do bloco analisado, que corresponde ao bloco de maior altura da barragem em estudo, e o ponto A na base na fundação que serviu como referência para cálculos dos momentos necessários para verificação da estabilidade. Ressalta-se que para efeito de cálculo foi considerada a largura da seção como unitária.

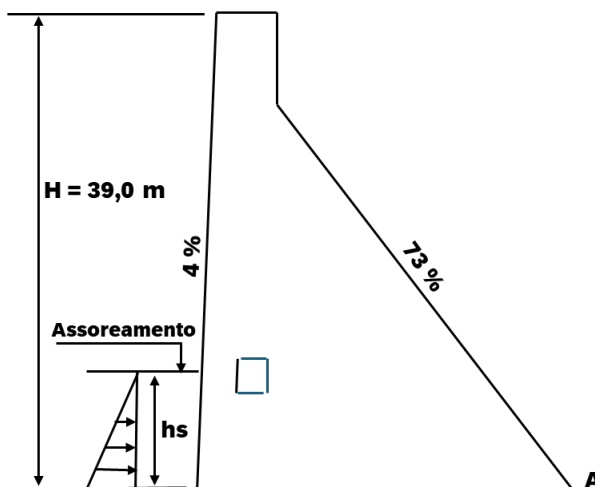


Figura 4 - Seção transversal do bloco analisado (Fonte: autora).

As propriedades específicas dos materiais adotadas para análise da estabilidade são apresentadas no Quadro 2 abaixo e são as mesmas utilizadas na RPSB.

Propriedades dos Materiais	
Peso Específico do Concreto (γ_{conc})	25 kN/m ³
Peso Específico da água (γ_a)	10 kN/m ³
Peso específico do material do assoreamento (γ_{ssub})	19 kN/m ³
Ângulo de atrito do material do Assoreamento (ϕ_{ssub})	30°
Coesão do maciço rochoso (c)	250,00 kPa
Ângulo de atrito do material rochoso (ϕ_{rocha})	38°

Quadro 2 - Propriedades dos Materiais utilizados nos cálculos (Fonte: autora).

3.3 CÁLCULO DO EMPUXO DE ASSOREAMENTO

Para o cálculo do empuxo do assoreamento foi considerada a altura do material de 12,00 m, mesmo valor utilizado na análise de estabilidade apresentada no Relatório de Avaliação da Barragem de Concreto da barragem em estudo, elaborado durante uma recente Revisão Periódica de Segurança de Barragem – RPSB, valor da batimetria realizada à época.

Para o peso específico do material assoreado foi utilizado o valor de 19 kN/ m³ (vide Quadro 2), valor utilizado no relatório da RPSB que considerou o caso mais desfavorável à segurança global da barragem analisada, e justifica a escolha citando Mason (1988), que diz que a massa específica do material assoreado pode ser considerada na faixa entre 16 kN/m³ e 19 kN/m³, para silte e vasa.

Registra-se que altura do material assoreado ($h_s = 12,00\text{ m}$), que corresponde a diferença entre a elevação do pé de montante da estrutura até a cota de elevação do material assoreado, é muito superior à altura mínima recomendada pela Eletrobras (2003) que é de 10% da altura da seção da estrutura analisada.

3.4 COMBINAÇÕES DE CARREGAMENTO CONSIDERADAS

As combinações de carregamento consideradas na análise são apresentadas no Quadro 3 a seguir. Os carregamentos destacados em negrito/italico correspondem as ações excepcionais que fazem parte de cada condição de carregamento considerada neste trabalho.

CCN - Condição de Carregamento Normal

- Empuxo da água no montante com nível d'água Máximo Normal;
- Empuxo da água na jusante com nível d'água Máximo Normal;
- Subpressão com Dreno Operante;
- Empuxo Assoreamento (montante);
- Empuxo Terrapleno (jusante).

CCE - Condição de Carregamento Excepcional:

- Empuxo da água no montante com nível d'água Máximo Normal;
- Empuxo da água na jusante com nível d'água Máximo Normal;
- Supressão com Dreno Operante;
- Empuxo Assoreamento (montante);
- Empuxo Terrapleno (jusante);
- ***Ocorrência de sismo.***

CCE1 - Condição de Carregamento Excepcional:

- Empuxo da água no montante com nível d'água Máximo Normal;
- Empuxo da água na jusante com nível d'água Máximo Normal;
- ***Supressão com Dreno Inoperante;***
- Empuxo Assoreamento (montante);
- Empuxo Terrapleno (jusante).

CCL - Condição de Carregamento Limite:

- ***Empuxo da água no montante com nível d'água Máximo Maximorum;***
- ***Empuxo da água na jusante com nível d'água Máximo Maximorum;***
- ***Subpressão com Dreno Inoperante;***
- Empuxo Assoreamento (montante);
- Empuxo Terrapleno (jusante).

Quadro 3 - Condições de Carregamento consideradas (Fonte: autora).

3.5 RESULTADOS DOS COEFICIENTES DE SEGURANÇA

O Quadro 4 a seguir, apresenta os resultados dos fatores de segurança em relação a flutuação, tombamento e deslizamento calculados, para cada combinação de carregamento apresentadas no Quadro 3, bem como a transcrição dos resultados apresentados na Avaliação da Barragem de Concreto da RPSB para o bloco em estudo, considerando a altura de cálculo para o assoreamento $h_s=12,00\text{ m}$.

VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE - Critérios da Eletrobras (2003)								
Coeficientes de Segurança	Calculados				RPSB			
	CCN	CCE	CCE1	CCL	CCN	CCE2	CCE3	CCL3A
FSD	1,09	1,44	1,51	1,57	1,05	1,39	1,46	1,53
FSD_{min}	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
FSD > FSD_{min}	(OK!)	(OK!)	(OK!)	(OK!)	(OK!)	(OK!)	(OK!)	(OK!)
FST	1,72	1,49	1,40	1,35	2,04	1,75	1,53	1,47
FST_{min}	1,5	1,2	1,2	1,1	1,5	1,2	1,2	1,1
FST > FST_{min}	(OK!)	(OK!)	(OK!)	(OK!)	(OK!)	(OK!)	(OK!)	(OK!)
FSF	4,12	3,68	2,65	2,34	5,13	4,98	2,75	2,44
FSF_{min}	1,3	1,1	1,1	1,1	1,3	1,1	1,1	1,1
FSF > FSF_{min}	(OK!)	(OK!)	(OK!)	(OK!)	(OK!)	(OK!)	(OK!)	(OK!)

Quadro 4 - Resultados dos Coeficientes de Segurança - Assoreamento ($h_s = 12,00$ m). Fonte: autora

É possível constatar que os valores obtidos atestam a verificação de estabilidade a flutuação, tombamento e ao deslizamento para o bloco analisado, a partir das condições analisadas e para os parâmetros adotados, fornecendo valores acima dos estabelecidos pela Eletrobras (2003). Além disso, observa-se uma boa coerência entre os valores dos coeficientes calculados com os valores apresentados na RPSB ($CNN_{Calculado} \times CNN_{RPSB}$; $CCE_{Calculado} \times CCE2_{RPSB}$; $CCE1_{Calculado} \times CCE3_{RPSB}$ e $CCL_{Calculado} \times CCL3A_{RPSB}$).

Salienta-se que nos cálculos da verificação da estabilidade ao deslizamento (FSD), apresentados no Quadro 4 acima, foram utilizados valores para os fatores de redução da resistência ao atrito e à coesão, que pressupõe razoável conhecimento dos parâmetros de resistência do maciço rochoso da fundação, conforme estabelecido pela Eletrobras (2003).

3.6 RESULTADOS DAS TENSÕES NA INTERFACE CONCRETO/FUNDAÇÃO

No Quadro 5 a seguir são apresentados os resultados das Tensões nas Fundações calculados para cada combinação de carregamento descritas no Quadro 3, considerando a altura de cálculo para o assoreamento $h_s = 12,00$ m.

TENSÕES NA FUNDAÇÃO (kN/m ²) - Critérios da Eletrobrás (2003)							
Calculadas							
CCN		CCE		CCE1		CCL	
Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante
60,14	689,39	-81,02	801,94	-61,56	677,07	-71,50	642,37
FS =	26,11 > 1 - (OK!)	FS =	44,89 > 1 - (OK!)	FS =	53,17 > 1 - (OK!)	FS =	64,66 > 1 - (OK!)
CCN: $\sigma_{adm\ máx} = 18.000,00$; CCE: $\sigma_{adm\ máx} = 36.000,00$ e CCL: $\sigma_{adm\ máx} = 41.538,46$							
RPSB							
CCN		CCE2		CCE3		CCL 3A	
Normal Máx. de Cálculo		Normal Máx. de Cálculo		Normal Máx. de Cálculo		Normal Máx. de Cálculo	
637,00		740,00		613,00		578,00	
FS =	28,26 > 1 - (OK!)	FS =	48,65 > 1 - (OK!)	FS =	58,73 > 1 - (OK!)	FS =	71,87 > 1 - (OK!)

Quadro 5 – Resultados das Tensões na Fundação - Assoreamento (hs = 12,00 m). Fonte: autora.

Os resultados calculados mostram que nos casos CCE e CCE1, em que se considera a carga excepcional decorrente do sismo e do dreno inoperante, respectivamente, ocorre abertura do contato concreto/ fundação de 9,18% e 8,33%, estando dentro do limite de 33% estabelecido nos Critérios da Eletrobras (2003). Além disso, observa-se uma boa coerência entre os valores tensões normais máximas calculadas, com os valores apresentados na RPSB ($CNN_{Calculado} \times CNN_{RPSB}$; $CCE_{Calculado} \times CCE2_{RPSB}$; $CCE1_{Calculado} \times CCE3_{RPSB}$ e $CCL_{Calculado} \times CCL3A_{RPSB}$).

3.7 INFLUÊNCIA DO ASSOREAMENTO SOBRE OS COEFICIENTES DE SEGURANÇA E SOBRE A TENSÃO NA FUNDAÇÃO

Visando a identificação da influência do assoreamento sobre as equações dos fatores de segurança ao deslizamento e ao tombamento, e sobre a tensão no contato concreto/fundação foi realizada uma análise de sensibilidade sobre as respectivas equações apresentadas nos itens 2.2.1 e 2.2.2.

Para a análise de sensibilidade, o assoreamento teve seus valores variando uniformemente do valor mínimo (1,00 m) ao máximo (32,0 m), por incrementos (1,0 m), enquanto os demais parâmetros das equações ficaram inalterados em seu valor, sendo os mesmos valores adotados na RPSB (Quadro 2). O valor máximo adotado para a altura do assoreamento corresponde ao valor necessário para ultrapassar o limite de estabilidade do Fator de Segurança ao Tombamento, que demonstrou ser menos sensível ao assoreamento.

Os valores dos coeficientes de segurança e das tensões calculadas foram organizados em gráficos para análise e comparação entre as equações, apenas para a Condição de Carregamento Normal (CCN), condição que corresponde as combinações de ações que ocorrem durante a operação normal da barragem.

3.7.1 RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – COEFICIENTES FSD E FST

Os resultados da análise de sensibilidade dos coeficientes de segurança ao deslizamento e ao tombamento podem ser vistos no gráfico a seguir (Figura 5), variando-se da mesma forma o assoreamento na barragem. Os eixos das ordenadas apresentam linhas pontilhadas representando os limites de equilíbrio de estabilidade para os fatores analisados (acima estável e abaixo instável).

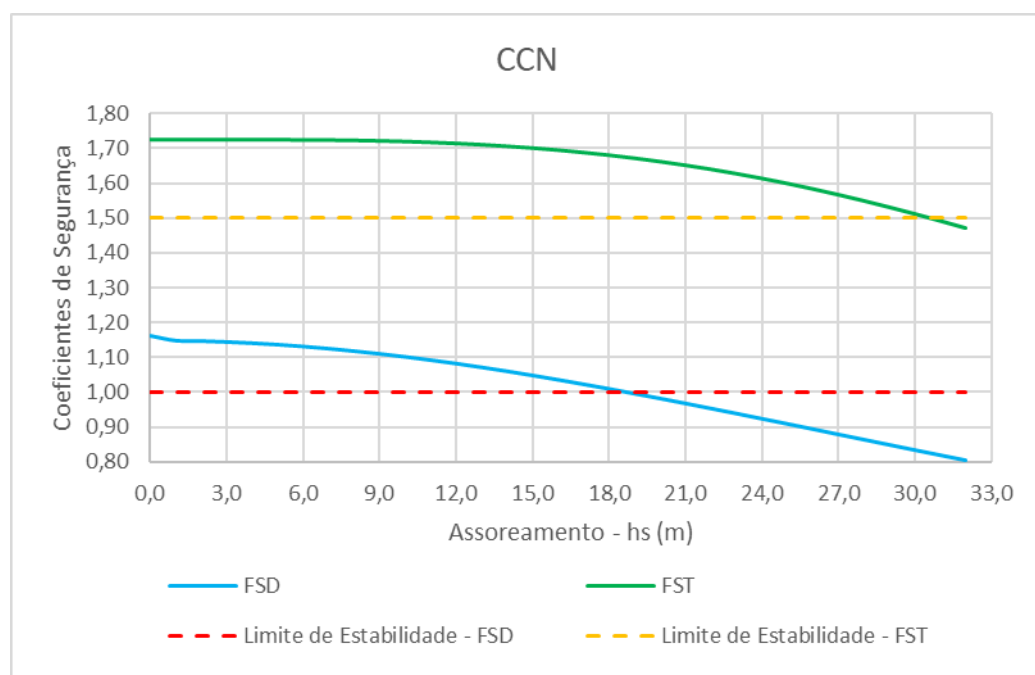


Figura 5 - Análise de sensibilidade do FSD e do FST – CCN (Fonte: autora).

A partir da análise do gráfico mostrado acima, percebe-se que o assoreamento tem seus valores inversamente proporcionais aos valores dos Fatores de Segurança (FSD e FST). Verifica-se, portanto, que o assoreamento contribui para a instabilidade da estrutura analisada quanto maior for seu valor.

Fica evidente ainda que o assoreamento tem maior peso no fator de segurança ao deslizamento, sendo sua influência mais significativa que no fator de segurança ao

tombamento. Verificou-se este mesmo padrão de comportamento para as demais condições de carregamento consideradas.

3.7.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE – TENSÃO NO CONTATO CONCRETO/FUNDAÇÃO

Também foi realizada a análise da influência do assoreamento sobre a tensão na interface concreto/fundação. O resultado é mostrado na Figura 6 abaixo, na qual observa-se um aumento na tensão de jusante com o aumento do assoreamento.

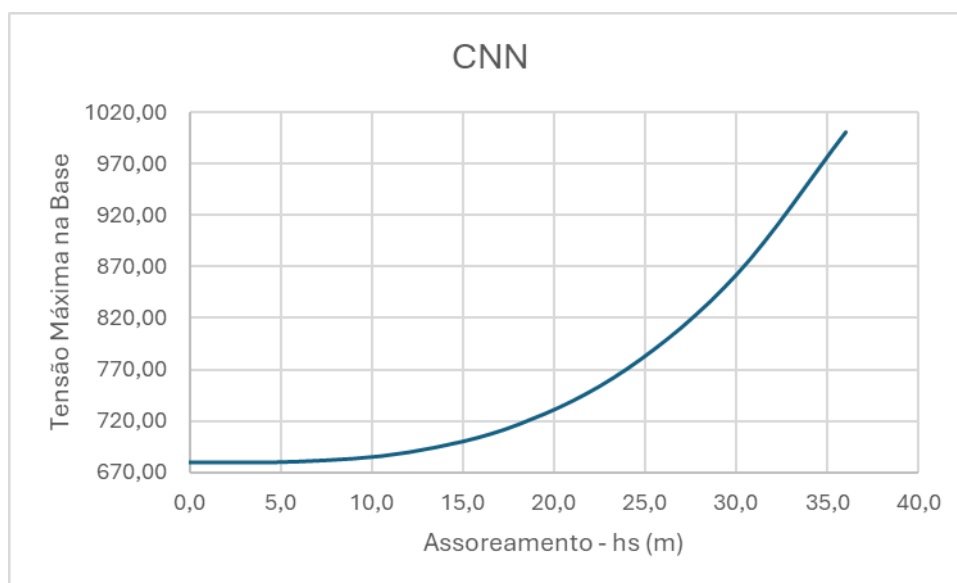


Figura 6 - Tensão Máxima na Base da Estrutura – CNN (Fonte:autora).

Verificou-se o mesmo padrão de comportamento da Tensão Máxima para as demais condições de carregamento consideradas. Além disso, verificou-se o surgimento de tensões de tração na face de montante da base, resultando na abertura do contato. Para esses casos de carregamento, admite-se uma abertura do contato limitada a 1/3 da seção de contato concreto / fundação (Eletrobras, 2003), e os resultados se encontram todos dentro desse limite.

3.8 REGRESSÃO LINEAR SIMPLES

Neste trabalho foi determinada uma equação através da regressão linear simples, em termos da variação do assoreamento (variável independente) apenas para o fator de segurança ao deslizamento - FSD (variável dependente), visto este ser considerado o indicador de estabilidade mais importante para uma barragem de concreto à gravidade, considerando o caso de carregamento CNN, ou seja, condição de ocorrência durante a operação normal da barragem.

Segundo Mahaluça (2019), a regressão linear simples é uma técnica estatística que analisa a relação entre duas variáveis quantitativas: a variável independente (x) e a variável dependente (y), com objetivo determinar a equação que melhor representa a relação existente entre essas variáveis e, a partir desta equação, fazer previsões para a variável resposta. O coeficiente de determinação, também conhecido como R^2 , é uma métrica que indica o quanto a linha de regressão se ajusta aos dados. O coeficiente de determinação varia de 0 a 1 (ou 0 a 100%), sendo que quanto mais próximo de 1 (100%), melhor o ajuste do modelo considerado.

O conjunto de dados (x,y) para a análise de regressão linear simples são apresentadas na Tabela 1 do APÊNDICE A, cujas variáveis foram definidas como, x = Assoreamento à Montante da Barragem, y = Fator de Segurança ao Deslizamento.

A Figura 7 apresentada a seguir, ilustra a sobreposição da equação de regressão linear calculada em relação aos dados apresentados na Tabela 1 do APÊNDICE A, apresentando uma boa aproximação.

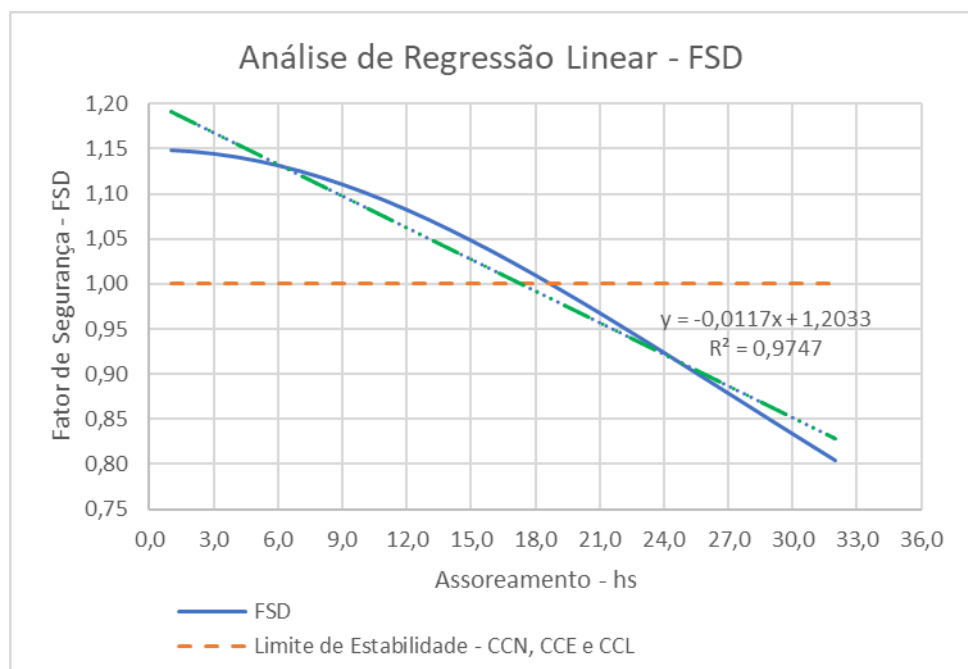


Figura 7 - Análise de Regressão Linear - FSD.

A análise de regressão linear foi realizada através Software Microsoft Excel chegando-se na equação abaixo.

$$FSD = -0,0117.h_s + 1,2033$$

A regressão linear apresentou um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9747$, confirmando o quanto a equação consegue estimar previsões para fator de segurança ao deslizamento, ou seja, com boa precisão.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado a verificação da influência, de forma aproximada, do assoreamento na estabilidade de uma barragem de concreto à gravidade, através de uma análise de sensibilidade que considerou a variação da altura do assoreamento sobre os fatores de segurança ao deslizamento e ao tombamento, bem como sobre a tensão na interface concreto/fundação, utilizando os critérios da Eletrobras (2003).

Os resultados apresentados na análise de sensibilidade realizada neste trabalho mostram a influência do assoreamento no sentido de diminuir os fatores de segurança, principalmente quanto ao deslizamento da barragem, bem como em aumentar a tensão máxima na base da estrutura.

Este trabalho também apresentou uma equação linear relacionando o assoreamento com o fator de segurança ao deslizamento escrita de forma mais simples, com o objetivo de ser ferramenta que poderá ser utilizada para o controle da operação do empreendimento, auxiliando na gestão da retirada do material assoreado por dragagem, serviço caro.

Sugere-se que seja realizado em pesquisas futuras, para complementar o presente trabalho, a análise da influência da variação dos parâmetros de coesão e do ângulo de atrito da fundação sobre as condições de estabilidade da barragem em estudo, visto que o rompimento das barragens de concreto decorre, principalmente, de falhas na sua fundação.

Também se sugere que seja verificada a influência do assoreamento na estabilidade ao deslizamento das outras estruturas que compõem o barramento em análise, bem como o estabelecimento de suas respectivas equações de regressão, para determinação da que atende mas adequadamente ao fenômeno.

REFERÊNCIAS

Eletrobras. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. Outubro, 2003.

Relatório de Avaliação da Barragem de Concreto - Revisão Periódica de Segurança de Barragem – RPSB.

US Army Corps of Engineers. Gravity Dam Design. 1995. Disponível em: < https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-2200.pdf >. Acessado em abr. 2024.

Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian V., Laue J. and Knutsson S. (2021). Dam Safety: Sediments and Debris Problems. Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, Vol.11, No.1, 2021, 27-63 ISSN: 1792-9040 (print version), 1792-9660 (online).

Schellenberg, G., Donnelly, C. R., Holder, C. and Ahsan R. Dealing with Sediment: Effects on Dams and Hydropower Generation. Publicado em: 10/10/2023. Disponível em: < <https://www.hydroreview.com/world-regions/north-america/dealing-with-sediment-effects-on-dams-and-hydropower-generation/#gref> >. Acesso em 15 abr. 2024.

Marques, J. L. S. Estudo do Efeito da Inclinação das Ombreiras na Estabilidade de Barragens via Modelos Numéricos Tridimensionais. Curitiba, 2015.

Carvalho, N.O; Filizola Júnior, N.P; Santos, P.M.C e Lima, J.E.F.W. Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios. Brasília: ANEEL. 2000.

Loureiro, M. A. O. Estudo de Subpressões em Barragens de Concreto no Contexto da Segurança de Barragens. 101 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Mahaluça, F. A. Correlação e Regressão Linear. **2019**. Disponível em: < <https://www.researchgate.net/publication/330556342> >. Acesso em 15 abr. 2024.

APÊNDICE A

Tabela 1 - Fator de Segurança ao Deslizamento Calculado - CNN.

Assoreamento hs (m)	FSD Calculado
1,0	1,15
2,0	1,15
3,0	1,14
4,0	1,14
5,0	1,14
6,0	1,13
7,0	1,12
8,0	1,12
9,0	1,11
10,0	1,10
11,0	1,09
12,0	1,08
13,0	1,07
14,0	1,06
15,0	1,05
16,0	1,04
17,0	1,02
18,0	1,01
19,0	1,00
20,0	0,98
21,0	0,97
22,0	0,95
23,0	0,94
24,0	0,92
25,0	0,91
26,0	0,89
27,0	0,88
28,0	0,86
29,00	0,85
30,00	0,83
31,00	0,82
32,00	0,80

