



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CÂMPUS CARAÚBAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FERNANDA ALVES CARVALHO

**AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA EM BARRAGENS DE PEQUENO PORTE -
ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM DO AÇUDE GRANDE**

CARAÚBAS - RN
2017

FERNANDA ALVES CARVALHO

**AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA EM BARRAGENS DE PEQUENO PORTE -
ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM DO AÇUDE GRANDE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), como
exigência final para obtenção do título de
Graduado em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Me Wellington Lorrان Gaia
Ferreira - UFERSA

CARAÚBAS - RN
2017

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998 . O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

C331a CARVALHO, FERNANDA ALVES CARVALHO.
AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA EM BARRAGENS DE PEQUENO
PORTE - ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM DO AÇUDE
GRANDE / FERNANDA ALVES CARVALHO CARVALHO. -
2017.
55 f. : il.

Orientador: Wellington Lorrán Gaia Ferreira
Ferreira.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2017.

1. Barragem de terra. 2. Patologias . 3.
Manutenção. I. Ferreira, Wellington Lorrán Gaia
Ferreira , orient. II. Título.

FERNANDA ALVES CARVALHO

**AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA EM BARRAGENS DE PEQUENO PORTE -
ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM DO AÇUDE GRANDE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil
da Universidade Federal Rural do Semi-Árido
(UFERSA), como exigência final para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

APROVADO EM 10/11/17

BANCA EXAMINADORA


Prof. Me. Wellington Lorrán Gaia Ferreira – UFERSA
Orientador - Presidente


Prof. Me Gilvan Bezerra dos Santos Junior
Primeiro Membro


Prof. Me. Paulo Henrique Araújo Bezerra
Segundo Membro


Prof. Me. Victor Hugo Gomes Alho – UFERSA
Segundo Membro

RESUMO

Inspecionar a segurança de uma barragem de terra depende basicamente da avaliação da estabilidade dos taludes e o levantamento da quantidade e severidade das patologias. Nesse contexto, a partir do diagnóstico da situação avaliada, é possível traçar um plano de manutenção corretiva para os problemas encontrados. Esse trabalho consiste no estudo de caso da barragem do Açude Grande, localizada na cidade de Caraúbas/RN. O estudo foi realizado a partir da análise dos projetos de ampliação da barragem, realizada no início do ano de 2017, bem como por meio de pesquisa bibliográfica sobre patologia em barragens de pequeno porte, além de ensaios em campo e vistorias utilizando a metodologia proposta pelo manual de inspeção e segurança de barragens, do Ministério da Integração Nacional. Ademais, foram realizadas análises de estabilidade de taludes, a fim de verificar as condições do estado atual da barragem. Por meio das vistorias, foram encontradas fissuras e erosões em toda a extensão da barragem, alguns casos de erosões apresentando mais de 1m de largura. Através das simulações, observou-se que os taludes apresentam uma inclinação acima do recomendado, o que pode ter gerado as anomalias detectadas. Dessa forma, a partir das informações coletadas e das análises, foi possível entender as razões que levaram ao surgimento das manifestações patológicas observadas, a fim de determinar a melhor forma de recuperação e manutenção da Barragem. Por fim, espera-se que os resultados obtidos possam auxiliar os órgãos responsáveis pela Barragem, para uma escolha acertada de manutenção.

Palavras-chave: Barragem de terra. Patologias. Manutenção.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Barragem de Oroville nos Estados Unidos.....	10
Figura 2 - Tipos de barragens.....	11
Figura 3 – Estruturas de uma barragem de terra homogênea	12
Figura 4 – Superfície de ruptura circular.....	13
Figura 5 - Exemplos de piping	16
Figura 6 - Rachaduras transversais.....	18
Figura 7 - Rachadura longitudinal.....	19
Figura 8 - Deslizamento ou escorregamento	19
Figura 9 - Depressões na crista da barragem.....	20
Figura 10 – Patologias derivadas da má manutenção.....	21
Figura 11 - Manutenção de erosões.....	23
Figura 12 - Ampliação da barragem.....	24
Figura 13 - Barragem do açude Grande	25
Figura 14 – Ortofoto Barragem 1	26
Figura 15 - Representação em planta baixa da inclinação do talude de jusante.....	28
Figura 16 - Representação da geometria da barragem no estado atual	28
Figura 17 - Perfil da Barragem 1, segundo o projeto	29
Figura 18 - Geometria a serem analisadas.....	31
Figura 19 - <i>Slide</i> : Características do material.....	32
Figura 20 - Esquema de simulações a serem realizadas.....	33
Figura 21 - Águas subterrâneas estacionárias	34
Figura 22 - Resultado gerado pelo software Slide	34
Figura 23 - Erosões na barragem 1.....	35
Figura 24 – Erosões na Barragem 2	36
Figura 25 - Vegetação no talude de jusante Barragem 2.....	36
Figura 26 - Rachadura longitudinal.....	37
Figura 27 - Problemas causados pela instabilidade.....	38
Figura 28 - Início das manifestações patológicas.....	40
Figura 29 - Registro da ampliação da barragem.....	42
Figura 30 - Geometria sugerida.....	43
Figura 31- Geometria ideal com <i>rip-rap</i> e enrocamento.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional das Águas

DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra a Seca

MI – Ministério da Integração Nacional

VANT - Veículo Aéreo Não Tripulado

CBDB - Comitê Brasileiro De Barragens

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

GC – Grau de Compactação

FS – Fator de Segurança

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVOS	9
1.1.1. Objetivo Geral	9
1.1.2. Objetivos Específicos	9
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	10
2.1.1. Estabilidade de Taludes	13
2.1. AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS SEGUNDO O MANUAL DE INSPEÇÃO E SEGURANÇA DE BARRAGENS	15
2.1.1. Percolações	16
2.1.2. Trincas ou Fraturas	17
2.1.3. Instabilidade de taludes	19
2.1.4. Depressões	20
2.1.5. Problemas Causados por Negligência na Manutenção.....	21
2.2. PROBLEMAS DEVIDO A AMPLIAÇÃO DE BARRAGENS	23
3. METODOLOGIA.....	25
3.1. ANÁLISE DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS	26
3.2. COLETA DE DADOS PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE	27
3.3 SLIDE	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1. ANÁLISE DAS PATOLOGIAS ENCONTRADAS NA BARRAGEM	35
4.2. SIMULAÇÕES DE ESTABILIDADE DOS TALUDES	39
4.3. DIAGNÓSTICO E PLANO DE MANUTENÇÃO.....	42
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
REFERÊNCIAS	49
ANEXO 1.....	52
ANEXO 2.....	54

1. INTRODUÇÃO

O nordeste brasileiro, por toda sua história, enfrenta problemas com a seca. Nessa região, a média anual de precipitação é de aproximadamente 600mm distribuídos no período de janeiro a maio, com a maioria dos rios de regime intermitente (ANA, 2012). Na tentativa de mudar esse quadro, no ano de 1909, foi criado o Departamento Nacional de Obras Contra a Seca (DNOCS), que durante todo o século XX realizou diversas obras de infraestrutura na região, como: pontes, portos, estradas, hospitais, usinas hidrelétricas e um total de 327 açudes públicos com capacidade de acumular 18,8 bilhões de metros cúbicos de água (DNOCS, 2016).

Apesar da significativa melhora no abastecimento de água em todo nordeste, segundo a Agência Nacional das Águas, ANA (2009), ainda existem regiões onde o abastecimento não é constante e há o risco real de desertificação. Diante dessa circunstância, com o intuito de armazenar água para o período de seca, continua-se construindo barragens; na maioria das vezes, essas construções diferenciam-se das realizadas pelo DNOCS, principalmente pelo porte, apresentando geralmente altura menor que 15 m (na maior parte, essas obras são realizadas pelos donos de fazendas, ou mesmo pelo município). Considerando o histórico de colapso de barragens, se faz necessária a conscientização do pequeno construtor com relação à segurança dessas estruturas. Quanto à evolução do conhecimento de barragens, suas rupturas e consequências, Sohler e Caldeira (2016) declaram:

Com o avanço na compreensão de fenômenos hidrológicos e hidráulicos, a tecnologia associado ao processo de construção e padrões regulatórios garantiram uma maior segurança durante toda a vida útil de uma barragem. No entanto, a percepção de risco relacionado a desastres também evoluiu, devido à demanda pública por maiores padrões de segurança e avaliação de estudos de risco (p.1033).

Nesse contexto, o estudo da segurança de uma barragem é essencial, pois sua ruptura pode comprometer a segurança de moradores do vale do rio, além de causar danos econômicos, sociais e ambientais. O estudo da segurança da barragem tem início na construção e continua durante toda a sua vida útil. Analisando o histórico dos rompimentos de barragens, são citadas cinco principais causas para a ruptura: colapso de um dos taludes, ruptura da fundação, *piping*, galgamento, isto é, nível do reservatório superior à altura da barragem, e por ações de guerras ou terrorismo (ELETROBRÁS, 2003).

Como exemplo da magnitude dos danos causados pelo rompimento de uma barragem, pode-se citar o ocorrido na China em 1975, um dos mais graves da história, com 230.000 mortes

(SANTOS, 2015). Dessa forma, mesmo o barramento sendo de pequeno porte, é necessário não apenas uma construção planejada, como também, o devido acompanhamento. Nesse contexto, o Ministério da Integração Nacional desenvolveu um manual de segurança e inspeção de barragens, analisando todas as possíveis patologias em barragens de terra, concreto e enrocamento, abordando suas causas, consequências e forma de resolução. Souza (2014) usou a metodologia do referido Manual na inspeção de seis barragens localizadas na região do Seridó do Rio Grande do Norte, sendo, ao final, destacados como seus maiores problemas, a falta de manutenção e a erosão; também foi enfatizada a importância do acompanhamento regular das barragens. Portanto, a importância de inspecionar a segurança de barragens de terra reside no fato de se poder evitar problemas mais complexos e de manutenção onerosa, ou até mesmo a sua ruptura.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar as condições de segurança da barragem do Açude Grande em Caraúbas/RN.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar as manifestações patológicas encontradas na Barragem do Açude Grande em Caraúbas/RN;
- Avaliar a estabilidade dos taludes da barragem por meio de simulações;
- Propor alternativas de manutenção para os problemas encontrados na barragem.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Barragem (Figura 1) é uma estrutura construída no leito de um rio a fim de armazenar água à montante. A capacidade de armazenamento dos reservatórios gerados por esta estrutura varia com o tamanho da barragem, desde pequenos barramentos com objetivo de abastecer apenas o consumo de uma fazenda, por exemplo, até barramentos com bilhões de metros cúbicos de capacidade. Além de reservar água, o reservatório ainda pode ser utilizado para navegação, piscicultura e como usina hidrelétrica, garantindo o desenvolvimento local (MOLLE e CARDIER, 1992).

Figura 1- Barragem de Oroville nos Estados Unidos



Fonte: adaptado de Engenhariacivil.com, 2017

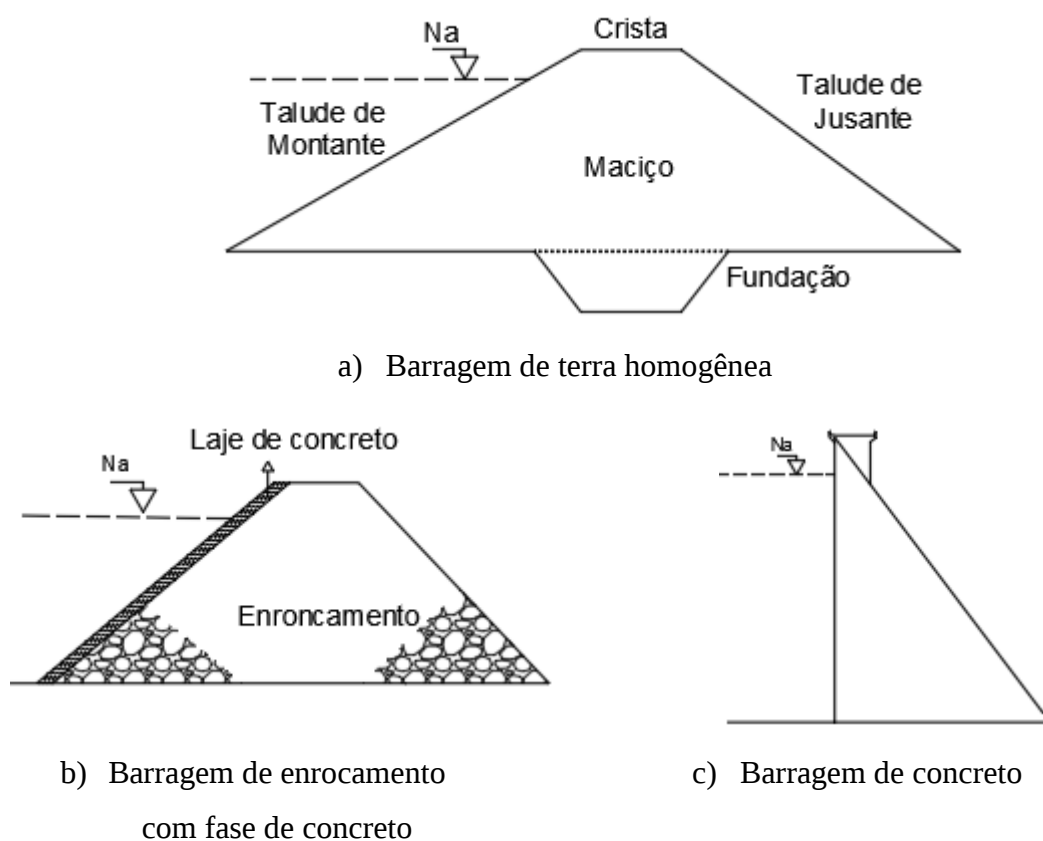
Assis *et al.* (2003) classifica as barragens, de acordo com finalidade, em duas categorias: (i) barragens de retenção e (ii) barragens de regularização. As barragens de retenção tem como finalidade reter as ondas de cheias, evitando danos a jusante, podendo reter ainda, sedimentos ou resíduos industriais. Por outro lado, as barragens de regularização são aquelas cujo objetivo é regular a vazão, isto é, armazenar água no período mais chuvoso e liberar essa vazão no período de seca, assegurando assim, atividades como a navegação, o aproveitamento hidrelétrico e o abastecimento da população.

Além da classificação com relação a finalidade, as barragens também podem ser caracterizadas quanto ao porte e o material utilizado para execução. Massad (2010) considera barragens de grande porte aquelas com altura superior a 15 m e comprimento de crista superior a 500 metros, com reservatório tendo capacidade superior a 1.000.000 m³ e vertedouro com vazão maior que 2.000m³/s. Molle e Cardier (1992) classificam barragens em quatro tipos, de acordo com a necessidade de recarga do reservatório. Açude de pequeno porte é aquele que

abastece durante uma estação de seca, ou seja, oito meses, em maiores períodos de estiagens a probabilidade de ficar sem água é grande. Já um açude é considerado de médio porte quando o mesmo pode passar até vinte meses sem receber água, equivalente a um ano de seca. Por fim, o açude de grande porte é aquele com reservatório perene quando pouco utilizado.

As barragens também podem ser classificadas quanto seu material. Massad (2010) divide as barragens em três categorias, de acordo com o material usado na construção do seu maciço (Figura 2): terra, enrocamento e concreto. Os barramentos construídas em concreto que podem ser divididas em barragens de gravidade, de concreto estrutural com contrafortes e em arco de dupla curvatura. As barragens de enrocamento, que são estruturas de pedra com elevado ângulo de atrito, e podem ser conjugadas com um núcleo de argila ou com uma membrana de concreto à montante. E por fim, as barragens de terra, que são o foco deste trabalho, que podem ter seu maciço homogêneo ou zoneado. Na Figura 2 (a), analisamos um barramento de terra homogênea e os seus elementos básicos.

Figura 2 - Tipos de barragens

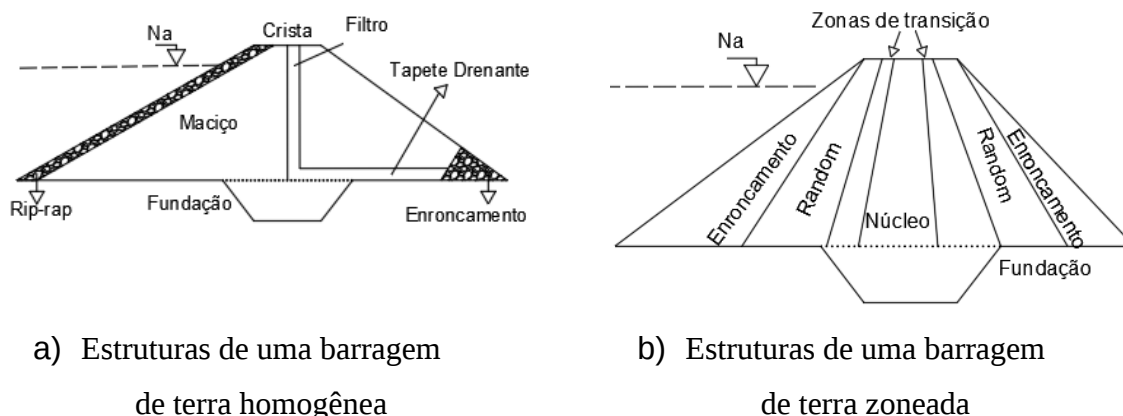


Fonte: Autoria própria

Massad (2010) chama a atenção para alguns pontos importantes quando se projeta uma barragem de terra homogênea, como a altura máxima de 15 m e a inclinação dos taludes, que devem assegurar a estabilidade da estrutura, especialmente em cenários críticos como mudanças bruscas no nível d'água no reservatório. Para garantir a estabilidade dos taludes, Stephens (2011) afirma que a inclinação à montante deve ser inferior a 1V:2H e à jusante esse valor não deve ultrapassar 1V:1,75H.

Algumas estruturas podem ser acrescentadas à barragem de terra homogênea que melhoram a estabilidade, como por exemplo: filtros horizontais e tapetes drenantes, que encaminham o fluxo de água, reduzindo a pressão neutra no talude a jusante; *rip-rap*, estrutura de pedras colocados a montante para reduzir o impacto das ondas sobre o talude; e enrocamentos, colocados à jusante para melhorar na estabilidade no pé do talude. A Figura 3 (a) apresenta, a título de exemplo, esses elementos juntos em uma barragem (Assis *et al.*, 2003).

Figura 3 – Estruturas de uma barragem de terra homogênea



Fonte: Autoria própria

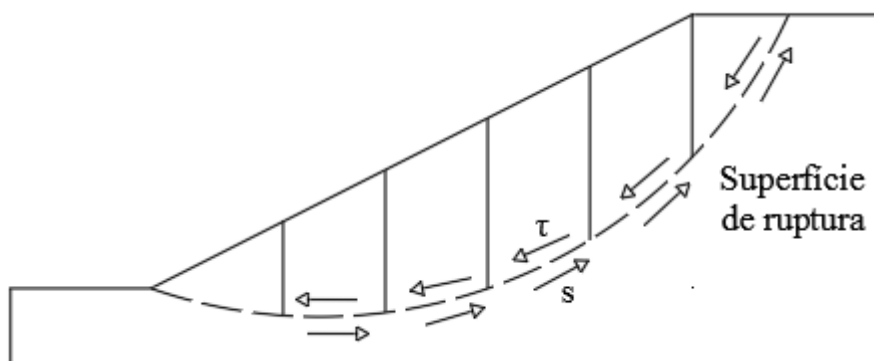
Assis *et al.* (2003) cita os elementos de uma barragem de terra zoneada, mostrados na Figura 3 (b). Algo importante a ser analisado é a permeabilidade dos materiais utilizados; o núcleo é o material de menor permeabilidade, seguido da zona de transição, por um material qualquer, random, e por um enrocamento permeável com um grande ângulo de atrito, que permite uma inclinação maior dos taludes. Fazer uma transferência suave entre permeabilidades é essencial para que o fluxo não mude de forma brusca, arrastando partículas de solo, causando erosão no interior do maciço, o *piping*.

2.1.1. Estabilidade de Taludes

De acordo com Cruden e Varnes (1996), citado por DAS (2014), existem cinco formas de rupturas de taludes causadas pela instabilidade: queda, que consiste no desprendimento de parte do talude; tombamentos, quando existe a rotação de parte do talude; escorregamentos, deslizamento do solo na superfície de ruptura; expansões laterais, deslizamento por translação lateral das partículas; escoamentos, “movimento, ladeira abaixo, da massa de solo, de forma similar à de fluidos viscosos” (BRAJA M. DAS, 2014, p. 469). Um dos maiores exemplos de rompimento de barragem por instabilidade de taludes, foi o reservatório de *Vajont*, na Itália, em 1963, a maior barragem do mundo em arco. Durante um período de intensas chuvas, o talude montando entrou em colapso, causando um escorregamento de 200 milhões de metros cúbicos de massa rochosa da estrutura. A ruptura causou a morte de três mil pessoas (MASSAD, 2010).

Quando se trata da superfície de ruptura, ela pode variar de acordo com o método e material utilizado, os mais comuns são as rupturas em arco de círculos (Figura 4), divididos em fatias ou lamelas, também conhecido como método das fatias. Na Figura 4 é mostrada a ação das forças sobre a estrutura e uma possível superfície de ruptura.

Figura 4 – Superfície de ruptura circular



Fonte: Autoria própria

No estudo de estabilidade de taludes, o método mais consolidado para realizar essa análise utiliza o cálculo do Fator de Segurança (FS), baseado na relação entre as forças resistentes que se opõem a ruptura ou a resistência de cisalhamento do solo (s), e a tensão cisalhante atuante, ou resistência mobilizada (τ), a qual induz a ruptura. A estabilidade depende do equilíbrio entre essas forças, como mostrado na Equação 1 (MASSAD, 2010).

$$F_s = \frac{s}{\tau} \quad (1)$$

A instabilidade do talude é atingida quando as tensões cisalhantes mobilizadas se igualam à resistência de cisalhamento, isto é, o valor de FS é igual a 1. Fatores externos podem contribuir para esse estado, como a redução da resistência do solo ou aumento das forças atuantes, como por exemplo: construções ou passagem de veículos no topo do talude, saturação do maciço, intemperismos, escavações no pé do talude, posição do nível da água, entre outros (DAS, 2007).

Na construção de barragens, é necessário um estudo do FS dos taludes para garantir que o mesmo tenha capacidade de suporte. Além do solo a ser utilizado, deve também ser observada a geometria dos taludes da barragem, pois quanto maior a inclinação, geralmente, menor o FS. Nesse contexto, existem algumas recomendações na literatura para que a inclinação dos taludes, utilizando materiais de qualidade, não ultrapasse 1V:1,75H (STEPHENS 2011). Porém, em cada caso devem ser analisadas todas as suas particularidades, a fim de construir uma estrutura não apenas segura, mas também economicamente viável.

O Comitê Brasileiro de Barragens - CBDB (2001), propõe, em casos ideais de materiais e compactação, os seguintes valores de FS sejam obedecidos (Tabela 1). Valores inferiores aos indicados serão aceitos, desde que justificados com cálculos de desempenho ou análises sofisticadas.

Tabela 1- Valores de FS recomendados pelo CBDB de acordo com as condições de carregamento

Condições de carregamento	Coefficiente Mínimo de Segurança	Talude
Percolação permanente com o reservatório na cota máxima normal	1,5	Jusante
Esvaziamento rápido	De 1,2 a 1,3	Montante
Término da construção, antes do enchimento do reservatório	De 1,25 a 1,3	Montante e Jusante

Fonte: CBDB, 2001

Um método mais refinado para o método das fatias foi proposto em 1955 por Bishop, o qual consiste em uma sucessão de interações entre os fatores de segurança, a fim de obter um resultado preciso, usando o primeiro valor de FS, obtido por métodos mais rústicos, para determinar um valor de F_1 mais próximo do real. O método utiliza a equação 2, onde: FS e FS_1 são os coeficientes de segurança, c' é a coesão efetiva do solo, ϕ' é o ângulo de atrito efetivo do solo, L é o comprimento da base da lamela, u é a poropressão e P é a força peso (MASSAD, 2010).

$$FS = \frac{\sum \left(c' \cdot L + \frac{P - u \cdot \Delta x - c' \cdot \Delta x \cdot \tan \theta / FS_1}{\cos \theta + \tan \phi' \cdot \sin \theta / FS_1} \cdot \tan \phi' \right)}{\sum (P \cdot \sin \theta)} \quad (2)$$

2.1. AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS SEGUNDO O MANUAL DE INSPEÇÃO E SEGURANÇA DE BARRAGENS

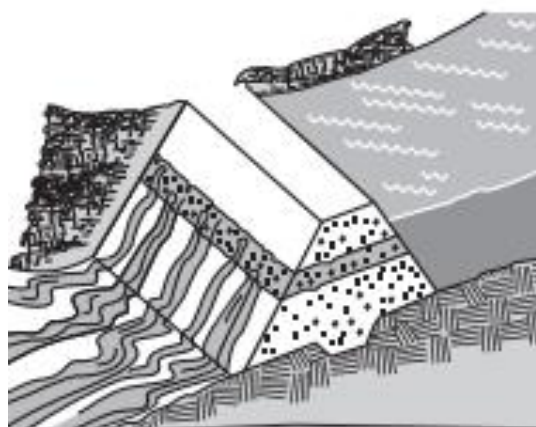
O Manual de Inspeção e Segurança de Barragens, elaborado pelo Ministério da Integração - MI (2012), tem como objetivo auxiliar na inspeção de barragens, alertando sobre as anomalias observadas, bem como as estratégias de manutenção, além de desenvolver uma metodologia para inspeção. O manual divide as anomalias verificadas na estrutura em cinco categorias: revência (percolação), trincas ou fraturas, instabilidade, depressões e problemas causados pela má manutenção. É válido reparar que o manual considera a percolação como patologia, porém, trata-se de um fenômeno que pode ser causado por patologias, além de poder causa-las. A seguir cada uma dessas categorias será detalhada, usando como principal fonte o manual do MI, por ser um dos poucos materiais encontrados na literatura a trabalhar o tema de patologia em barragens, abrangendo uma grande quantidade de anomalias e descrevendo-as.

A forma de interpretação do manual, no geral, é muito subjetiva, pois não apresenta parâmetros para a classificação de nenhuma anomalia, apesar de listar as classificações, o que permite interpretações ambíguas. A classificação do manual quanto ao nível de perigo usa os valores 0, 1, 2 e 3, representando, respectivamente perigo nenhum, atenção, alerta e emergência.

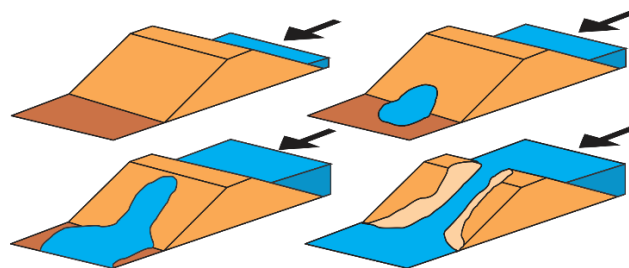
2.1.1. Percolações

O fenômeno da passagem de água pela fundação e maciço da barragem é conhecido como percolação. Quando controlada pelos dispositivos de drenagem é esperada, porém quando essa percolação passa a arrastar as partículas do solo de forma descontrolada ela pode causar problemas para a barragem. O arrastamento de partículas causa uma erosão interna conhecida como *piping*, do inglês, tubos, trata-se de um caminho pelo qual a água irá percorrer (MI, 2012). Massad (2010), lista como os principais condicionantes para o aparecimento de *piping* a ausência de filtros, compactação insuficiente ou desigual ao longo do maciço, fundação arenosa e ausência de transição adequada, com mudança gradativa da permeabilidade do solo. Quando a percolação pela fundação aumenta e a poropressão no pé do talude a jusante se iguala ao peso das partículas de solo, ocorre o fenômeno de areia movediça, a água reduz o atrito entre os grãos, fazendo com que o solo se comporte como um líquido, comprometendo a estabilidade da estrutura. A percolação também pode ocasionar a saturação de partes do maciço (Figura 5) ou da fundação, ocasionando uma redução da resistência e estabilidade da estrutura. A forma mais simples de identificar a percolação é procurar por áreas molhadas ou com excesso de vegetação (MI, 2012).

Figura 5 - Exemplos de piping



a) Área molhada em faixa horizontal



b) Evolução de piping

Fonte: (a) MI, 2012 (b) Modificado de Gregoretti *et al.*, 1979

Na Figura 5 (a), ilustra-se uma manifestação patológica ocasionada pela percolação; além de carregar partículas de solo, a água também satura o restante do maciço, podendo levar ao colapso da estrutura, como na Figura 5 (b). Nem sempre a percolação se apresentará como

na Figura 5, ela pode ser pontual, apenas no maciço ou à jusante, além de variar o valor da vazão, podendo ser até imperceptível (MI, 2012). Vale ressaltar que, existem elementos, como os filtros, que ajudam a controlar o transporte de água no interior da estrutura. Entretanto, caso se encontrem indícios de percolação não controlada, o manual de inspeção (MI, 2012) recomenda identificar e marcar os pontos de percolação e, se possível, medir a vazão e a turbidez da água. Se a turbidez estiver elevada significa que há muito material em suspensão, isto é, o fluxo está carregando material da fundação e maciço. Caso haja saída de material, é importante verificar a granulometria do material carregado, para melhor avaliar as dimensões da percolação (MI, 2012). É importante salientar que o manual de inspeção e segurança de barragens não classifica a percolação de forma objetiva; uma forma simples de identificar se existe um real risco da barragem romper seria classificar a percolação por área e vazão, auxiliando os avaliadores na tomada de decisões quanto a segurança e manutenção da anomalia. A descrição do manual é vaga e gera dúvidas quanto a gravidade da percolação, deixando a decisão final para o engenheiro responsável pela avaliação, porém, sem determinar parâmetros avaliativos, dar-se espaço para avaliações desiguais.

Depois de identificada a causa da percolação e a sua gravidade, cabe ao engenheiro responsável decidir a melhor forma de conter a anomalia. Um procedimento básico seria rebaixar do nível da água, de forma a localizar o ponto exato da percolação descontrolada, repor o material carregado e compactar (MI, 2012). Porém, é necessário definir a causa da percolação, pois se a causa for, por exemplo, material inapropriado, é provável que futuramente o problema volte a aparecer.

2.1.2. Trincas ou Fraturas

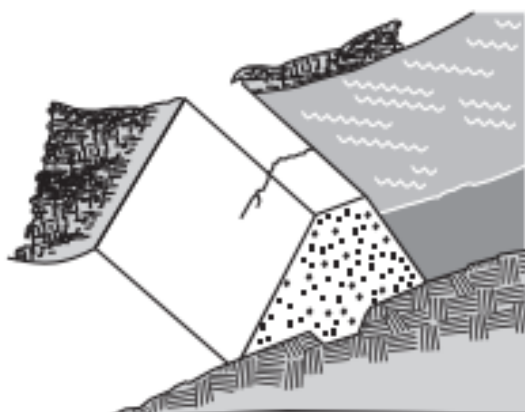
Trincas ou fraturas são classificadas em três categorias: trincas de ressecamento, longitudinais e transversais. A primeira categoria é considerada menos perigosa, podendo ter diversas geometrias e sendo causadas pela perda de umidade. As mesmas são comumente encontradas na crista e no talude de jusante. Se não tratada, durante o período de chuvas, a água pode encher as trincas fazendo com que o solo perca a resistência e movimente pequenas partes do maciço. O procedimento adequado quando se identifica esse tipo de fissuração é fotografar e registrar a localização, a direção, o comprimento e a profundidade; além de acompanhar para verificar se a fissura está ativa, ou seja, se continua aumentando (MI, 2012).

As trincas transversais (Figura 6) podem ser causadas por recalques diferenciais, o que indica materiais compressíveis e instabilidade na fundação, ou materiais compactados sobre

obreiras, solo sobre o qual a barragem foi construída, íngremes e irregulares. Em ambos os casos, a fissura transversal é perigosa, pois se atingir o nível d'água do reservatório pode criar um caminho para a passagem da água, além de permitir a entrada da água da chuva no maciço (MI,2012).

Identificar a causa é fundamental para a escolha da manutenção; no caso de recalques diferenciais, é essencial resolver o problema da instabilidade da fundação, a fim de evitar problemas mais severos adiante. O procedimento de monitoramento é o mesmo das trincas por ressecamento. Para realizar a manutenção, deve-se escavar uma profundidade superior a rachadura e realizar o preenchimento com material adequado e compactado (MI, 2012).

Figura 6 - Rachaduras transversais



a) Modelo de rachadura transversal

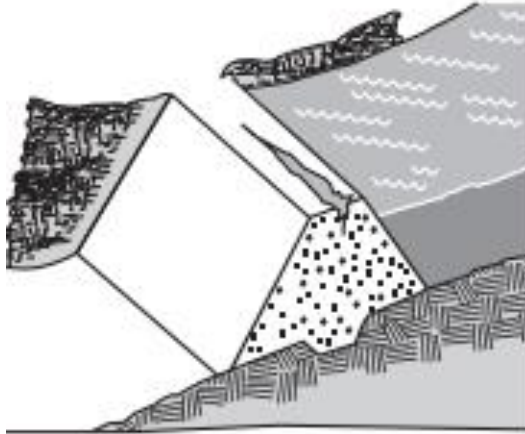


b) Rachadura transversal na crista da barragem Ipuzinho

Fonte: (a) MI, 2012 (b) Notícias de Pentecoste, 2017

Trincas longitudinais (Figura 7) podem ser causadas por recalques diferenciais, assentamentos desiguais entre seções adjacentes do talude, além de ser um indício de deslizamento do maciço. Após identificada a rachadura e sua causa, a mesma deve ser selada, pois é um ponto de instabilidade e permite a entrada de água no maciço (MI, 2012). Mesmo após a manutenção, a barragem deve ser inspecionada regularmente, principalmente se a antiga fissura foi causada por recalque diferencial ou atingiu o núcleo do maciço, pois se o problema inicial não foi resolvido é provável a aparição de novas rachaduras (CBDB, 2012).

Figura 7 - Rachadura longitudinal



Fonte: MI, 2012

2.1.3. Instabilidade de taludes

São indícios de instabilidade de taludes, anomalias do tipo deslizamento ou deslocamentos de massa do maciço (Figura 8), mais comuns no talude de montante, porém em casos severos pode ser observadas no talude de jusante. Normalmente, essas anomalias se apresentam em forma de arco e têm como principal causa a inclinação exagerada dos taludes. O procedimento inicial ao encontrar um deslizamento dessa categoria é fotografar, medir a extensão e profundidade, verificar indícios de percolação na área e buscar por trincas nas regiões próximas, especialmente acima. Se verificado que o deslocamento põe em risco a estabilidade do talude, é recomendado um estudo para indicar a causa do evento e o rebaixamento do nível da água, para que seja realizada a devida manutenção (MI, 2012).

Figura 8 - Deslizamento ou escorregamento



a) Esquema de um deslizamento



b) Deslizamento real da crista de uma barragem

Fonte: (a) MI, 2012 (b) Marangon, 2006

O Manual de Inspeção e Segurança de Barragens divide os deslizamentos em ruptura superficial e profunda, porém não define os parâmetros para a classificação. É atribuído ao engenheiro responsável pela inspeção, analisar o descolamento, sua localização e dimensões para então definir a periculosidade e forma adequada de manutenção.

2.1.4. Depressões

Depressões ou afundamentos (Figura 9) podem ser causados por recalques no maciço ou fundação, falhas na compactação ou terraplenagem e erosões. As depressões podem ser classificadas em recalques localizados ou afundamentos. No primeiro caso as inclinações são mais suaves, embora não seja um indicativo de perigo para a estabilidade da barragem, pode ser um sinal de problemas mais sérios, por isso deve-se registrar todo tipo de depressão com fotos e medições (MI, 2012).

Figura 9 - Depressões na crista da barragem



Fonte: MI, 2012

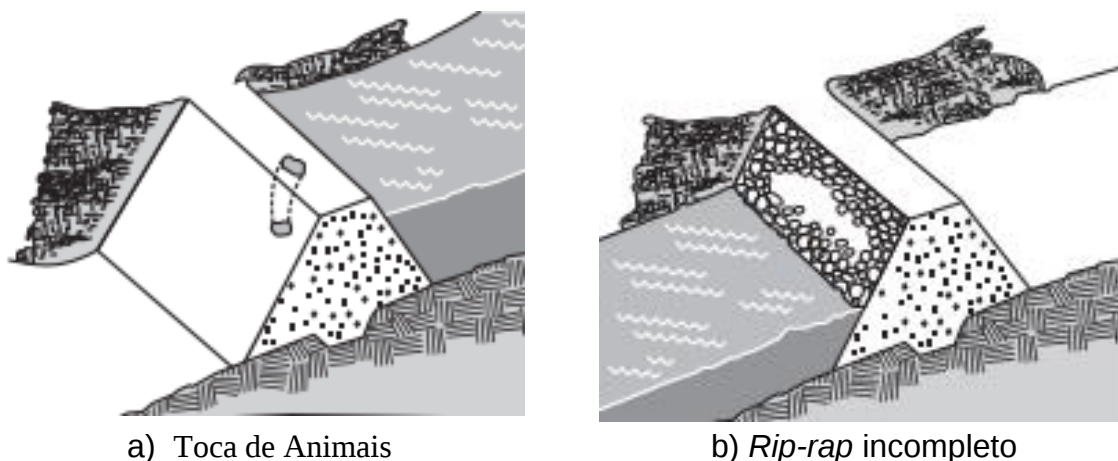
Os afundamentos são caracterizados pelas inclinações íngremes, mais acentuadas que as depressões por recalque, porém, mais simples de serem solucionadas. O maior problema do afundamento é que ele reduz a cota da barragem, permitindo a passagem de água, mas, comumente não é uma manifestação patológica e não compromete a segurança da barragem. Para a manutenção, deve ser feita uma análise a fim de determinar a causa da depressão e realizar preenchimento da mesma, de maneira uniforme (MI, 2012).

2.1.5. Problemas Causados por Negligência na Manutenção

É essencial uma manutenção preventiva anual, a fim de assegurar que a barragem, juntamente com suas estruturas associadas e equipamentos, esteja em perfeito funcionamento e segura. Cabe ao responsável pela estrutura assegurar as manutenções e fiscalizar para que não sejam construídas edificações próximas aos taludes, além de certificar-se de que os equipamentos de inspeção estão funcionando de forma adequada (CBDB, 2012). Os principais pontos a serem analisados nas manutenções anualmente são: erosão, vegetação, tocas e passagem de animais, proteção dos taludes, drenagem, remoção de entulhos no vertedouro e verificação dos equipamentos de inspeção, quando existentes (CBDB, 2012).

Formigueiros e tocas de pequenos animais (Figura 10 (a)), tatus em sua maioria, devem ser controlados, pois é um ponto de entrada de água para o maciço que pode causar instabilidade no talude. Os formigueiros devem ser tratados com formicidas e posteriormente deve-se preencher a abertura causada pelos animais. No caso de tocas, antes de fechar a galeria, deve-se expulsar os animais, preenchendo a toca com água ou fumaça. Outro problema causado por animais é a pastagem ou passagem de animais pelos taludes da barragem, essa pratica deve ser evitada, pois os animais podem retirar a proteção vegetal e a camada superficial do solo (MOLLE; CARDIER, 1992).

Figura 10 – Patologias derivadas da má manutenção



Fonte: MI, 2012

Nas barragens com proteção de pedras no talude, *rip-rap* ou enrocamento, deve-se verificar se o mesmo não se deteriorou, se as pedras não rolaram, ou até mesmo, foram removidas, sem autorização. Em áreas de *rip-rap* danificado (Figura 10(b)), o talude fica

desprotegido, susceptível às ações das ondas. Quando verifica-se esse problema, deve-se reestabelecer o talude e o *rip-rap* (MI, 2012).

Para garantir a segurança do talude, os sistemas de drenagem pluvial também devem estar funcionando de forma adequada. As canaletas, estruturas posicionadas na crista e nos taludes com o objetivo de direcionar o fluxo da água, não podem estar trincadas ou obstruídas. Se o sistema de drenagem não for eficiente, a água escoará para o maciço, causando instabilidade (MI, 2012). Outra forma de proteção dos taludes é o uso de vegetação rasteira, que reduz a velocidade do escoamento superficial da água da chuva, minimizando a erosão. Porém, é fundamental o controle de vegetação dos taludes, pois árvores de médio e grande porte podem ser um problema para segurança dos taludes (CBDB, 2012). De acordo com Molle e Cardier (1992), as raízes das plantas tendem a buscar por áreas molhadas, o que em uma barragem significa raízes buscando águas no talude de montante. Gerando um caminho de passagem de água, enquanto vivas, as plantas não oferecem grandes riscos, mas quando morrem o caminho formado pelas suas raízes fica livre para a passagem de água.

Na construção, todas as árvores devem ser removidas, tanto dos taludes como no pé do talude de jusante. Assim como durante a manutenção, a vegetação imprópria deve ser removida, cuidadosamente, e o talude deve ser reestabelecido (MOLLE e CARDIER, 1992). Porém, se por negligência na manutenção, for constatada uma árvore de médio ou grande porte, a mesma não pode ser, simplesmente, removida. Nessa situação, deve ser feita uma avaliação por um profissional capacitado, para determinar a melhor forma de remover a árvore sem danificar a estrutura. Em casos extremos, é necessário o rompimento controlado de parte do talude para a remoção segura da vegetação (MEES ENGENHARIA).

Existe divergência entre autores sobre o real perigo oferecido por árvores vivas de grande porte à segurança da barragem. Porém, o perigo quando a árvore morre é um consenso entre autores estudados. Como existe o perigo quando ocorre a morte da árvore, deve-se evitar uma manutenção de emergência, removendo a árvore antes da mesma se tornar um problema.

O problema mais comum em barragens é a erosão superficial dos taludes, podendo ser causado por problemas estruturais, drenagem ineficaz, ou talude sem proteção. A vegetação rasteira (recomendada para proteger o talude) nem sempre é plantada, porque as barragens são comumente construídas em períodos secos, fazendo com que a terra fique dura, dificultando o plantio. O dano causado pela água é pontual e causa fendas, que aumentam a cada chuva, para evitar uma ampliação das fendas, as mesmas devem ser fechadas como mostrado na Figura 11 (MOLLE e CARDIER, 1992).

Figura 11 - Manutenção de erosões

Cave o local da rachadura até encontrar terra firme



Molhe o local cavado



Preencher o local cavado com solo argiloso, úmido e sem matéria orgânica



Compacte o solo em camadas

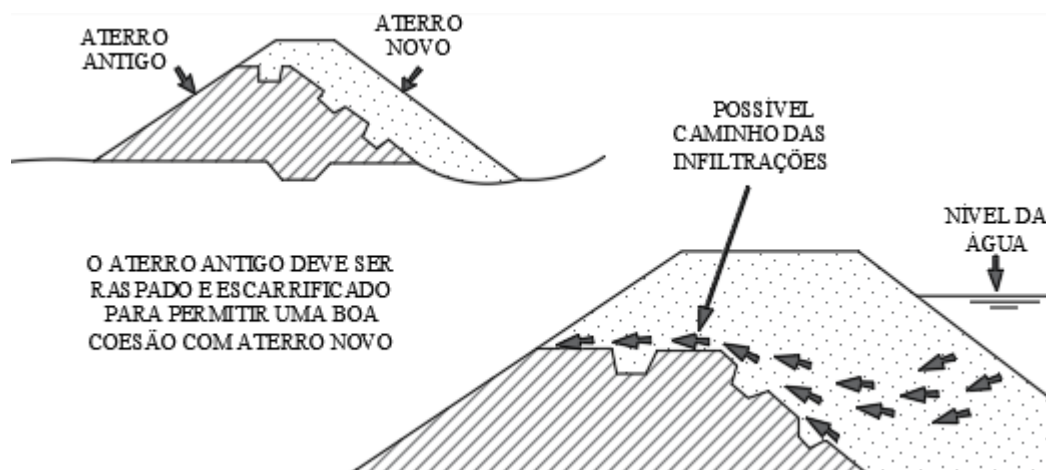


Fonte: Adaptado de Molle e Cardier, 1992

2.2. PROBLEMAS DEVIDO A AMPLIAÇÃO DE BARRAGENS

Segundo Molle e Cardier (1992), muitos podem ser os motivos para a ampliação de uma barragem, como estrutura subdimensionada ou aproveitamento maior da capacidade hídrica, porém, na prática, quando o barramento foi construído o seu porte foi limitado por falta de recursos. A ampliação (Figura 12) pode ser da altura e/ou do coroamento da barragem, na tentativa de aumentar a capacidade de armazenamento, ampliar o tráfego sobre a barragem, ou para solucionar antigos problemas de segurança.

Figura 12 - Ampliação da barragem



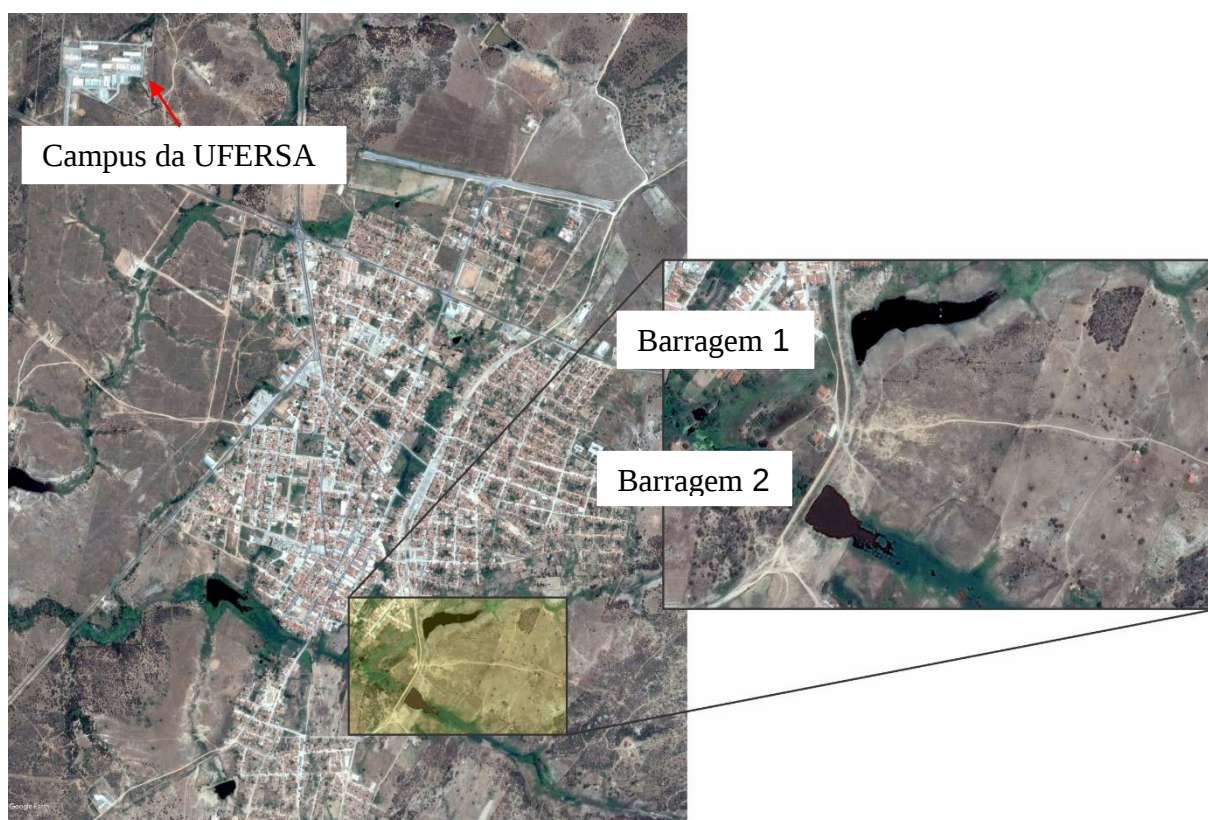
Fonte: Adaptado de Molle e Cardier, 1992

Como mostrado na Figura 12, a região de encontro da barragem antiga com o novo aterro é uma zona de possível caminho de infiltrações. Para evitar percolações, é necessário que toda a camada vegetal seja removida, o coroamento e o talude de montante sejam raspados e escarificados, para facilitar a aderência entre os aterros e, só então, a ampliação seja iniciada (MOLLE e CARDIER, 1992).

3. METODOLOGIA

Este trabalho é caracterizado como uma pesquisa do tipo teórica-empírica, na qual, inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre patologias em barragens de terra e os impactos desses defeitos na segurança da estrutura. Em seguida, de forma a avaliar a segurança de uma barragem de terra de pequeno porte utilizando os métodos e ferramentas encontradas na literatura, o presente trabalho avaliou o caso da barragem Açude Grande (Figura 13) que está localizada na cidade de Caraúbas/RN, bairro Leandro Bezerra. Essa barragem foi escolhida, por conta da disponibilidade de acesso; além disso, apesar de ela ter passado por uma reforma emergencial no início do ano de 2017, já é possível encontrar patologias em um nível aparentemente grave. A barragem é dividida no centro por uma rua não pavimentada. Dessa forma, para facilitar os estudos, a barragem foi dividida em duas: (i) a Barragem 1 à cima da rua (ii) a Barragem 2 à baixo.

Figura 13 - Barragem do açude Grande



Fonte: Modificada de *Google Earth*

3.1. ANÁLISE DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

Para auxiliar no levantamento da barragem foram usados os projetos da reforma que estão disponíveis no anexo 1. Após uma análise dos projetos e uma visita à barragem, foi constatado que a estrutura não era a mesma, logo, o projeto não seria apropriado para as demais análises a serem realizadas. Dessa forma, foram feitos dois levantamentos para conferir os dados do projeto, um levantamento topográfico com o objetivo de determinar as inclinações dos taludes, e um levantamento aéreo utilizando VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), a fim de levantar as medidas planimétricas do projeto e auxiliar na visualização das manifestações patológicas. A captura das imagens ocorreu nos dias 19 e 24 de junho de 2017. Foi utilizado um Multirotor *Phantom 3 Advanced*, da DJI, que capturou um total de 877 fotografias aéreas, necessárias para recobrir os 532 m de extensão das duas barragens. As imagens foram processadas no *software Photoscan*, onde foi gerada uma reconstrução 3D e uma ortofoto (Figura 14), que é a união de todas as imagens em escala uniforme, o que permite a sua utilização para medições topográficas.

No período entre os dias 1 e 4 de agosto, foram realizados os levantamentos topográficos e o levantamento das patologias descritas no manual de inspeção e segurança de barragens (Anexo 2). Porém, o manual propõe uma metodologia de acompanhamento contínuo da barragem, a fim de analisar a evolução das patologias no decorrer dos anos de operação da estrutura. Como o estudo teve um tempo delimitado, não foi possível comparar as evoluções das anomalias, então, foi realizado apenas o levantamento das patologias descritas no manual e encontradas em campo, além da medição das trincas, rachaduras, erosões e desmoronamentos, com intuito de quantificar os defeitos.

Figura 14 – Ortofoto Barragem 1



Fonte: Autoria Própria

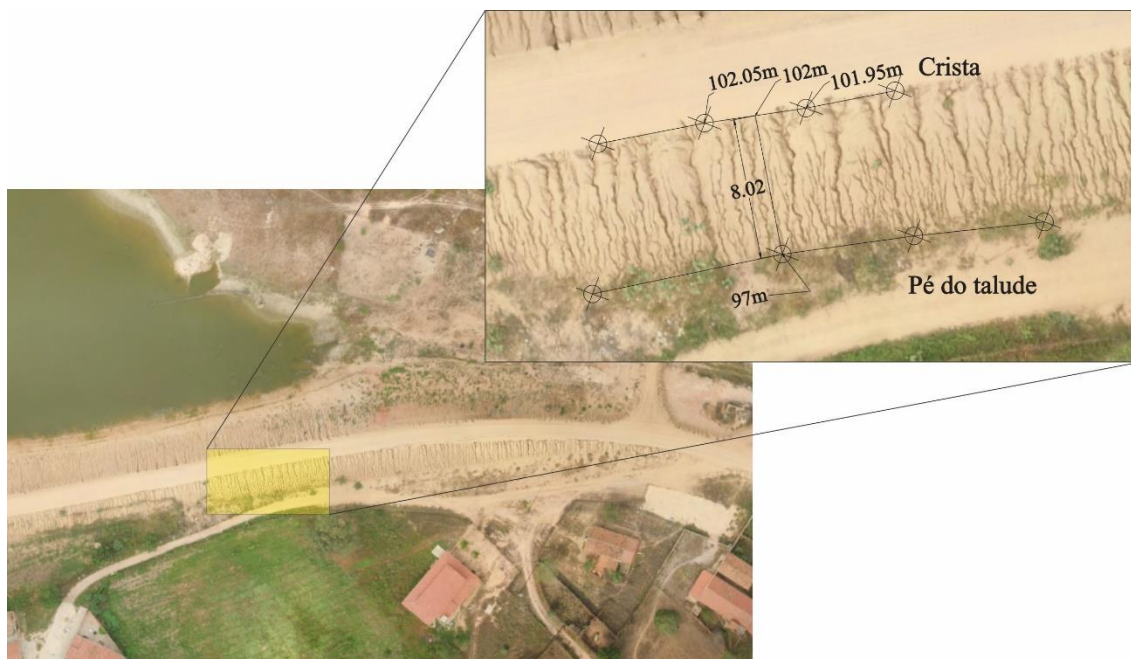
3.2. COLETA DE DADOS PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE

Os dados da geometria da barragem do projeto e do levantamento topográfico foram analisados e processados no software *Slide* 6.0, ferramenta que quantifica a estabilidade de taludes, a filtragem da água subterrânea por meio do método de elementos finitos, fluxos, pressões e gradientes. Os dados de entrada do programa são: geometria da estrutura, altura do nível da água, ângulo de atrito, coesão e carregamento sobre a estrutura (ROCSCIENCE, 2017). O método de análise de estabilidade de estrutura escolhido foi o método de Bishop.

Quanto às características do solo, já havia sido realizado um estudo com o material usado para construir a barragem, no início de 2017, nesse estudo o solo foi classificado como areia argilosa não plástica e foi usado um intervalo de atrito (25° a 35°) e coesão (0 a 5) e para permeabilidade foi adotado o valor de 10^{-7} cms, baseado em ensaios e dados da literatura. Esses dados (coesão e ângulo de atrito) serão usados da mesma forma, obedecendo o intervalo determinados em Nascimento (2017). Os valores da geometria foram retirados do projeto e das medições realizadas na barragem e o perfil usado nas simulações foi o de maior altura, ou seja, o caso considerado mais crítico.

Para auxiliar a medição em campo da inclinação dos taludes foi usada uma estação total, equipamento que precisa ser instalado em uma área em que não existam interferências entre a estação e o prisma. A água do reservatório e a inclinação impossibilitaram a medição nos taludes de montante; além disso, a quantidade de árvores dificultou a obtenção das medidas nos taludes de jusante. Por esses motivos, foi escolhido apenas um ponto para instalação do equipamento e realização das medições, localizado no talude de jusante da Barragem 1. Foram demarcados quatro pontos no pé do talude de e quatro pontos na crista. Os valores encontrados foram lançados no *software* AutoCAD 2018, juntamente com a ortofoto (Figura 15).

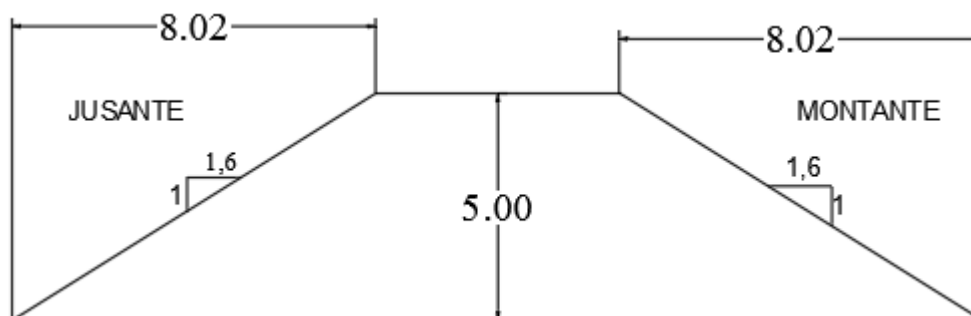
Figura 15 - Representação em planta baixa da inclinação do talude de jusante



Fonte: Autoria própria.

As coordenadas medidas através da estação total foram marcadas com círculos, em seguida, foi traçada uma *polyline* conectando os pontos, representando a linha do pé do talude e da crista. Foi traçada uma terceira linha, perpendicularmente a um dos pontos do pé do talude e a *polyline* da crista, criando assim um terceiro ponto, o valor da sua cota foi encontrado a partir da média da cota dos dois pontos mais próximos. A diferença das cotas do pé do talude e da crista é a altura da barragem naquele ponto e a distância entre eles é a distância horizontal, a partir desses dados foi gerada a inclinação do talude e espelhada para o talude de montante, devido à dificuldade de posicionar o equipamento a montante (Figura 16).

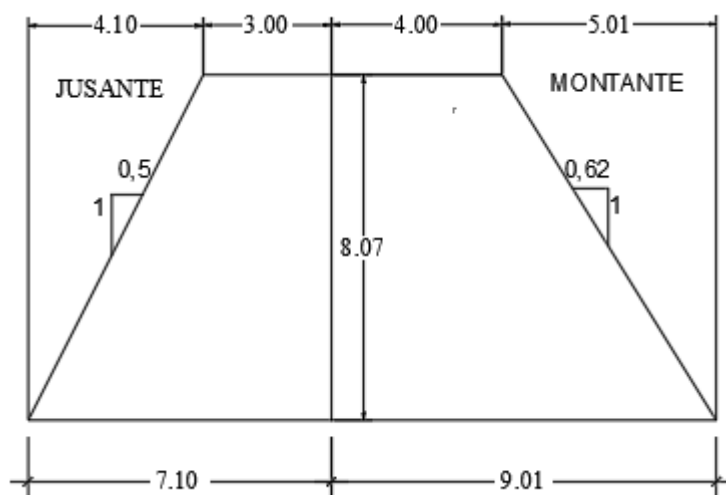
Figura 16 - Representação da geometria da barragem no estado atual



Fonte: Autoria própria.

Como visto anteriormente, recomenda-se que a inclinação do talude de jusante não ultrapasse $1V:1,75H$ e a do de montante, $1V:2H$. Neste caso, a inclinação foi de $1V:1,6H$, em ambos os taludes. Nas simulações, foi usada a altura máxima do projeto, que é de 8,07m, obedecendo a inclinação encontrada. Observa-se que a inclinação atual é superior às inclinações propostas no projeto para o ponto de maior altura, que são de $1V:0,5H$ para o talude de jusante e de $1V:0,62H$ para o talude de montante (Figura 17).

Figura 17 - Perfil da Barragem 1, segundo o projeto



Fonte: Prefeitura Municipal de Caraúbas, 2017.

Sabendo que um dos parâmetros necessários para a análise de estabilidade é o peso específico do solo, no dia 31 de agosto de 2017, foi realizado o ensaio do frasco de areia, que determina a massa específica “in situ”, de acordo com o método do DNER, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER-ME 092/94. O ensaio foi feito em três pontos da crista da barragem do Açude Grande: ponto 1, localizado no início da Barragem 1, próximo ao talude de montante; ponto 2, próximo ao eixo que divide as duas barragens, próximo ao talude de montante; ponto 3, no final da Barragem 2, próximo ao talude de jusante.

O ensaio consiste na realização de um furo na crista da barragem, todo o solo retirado é armazenado e pesado, posteriormente o furo é preenchido com uma areia com massa e massa específica conhecidos. Posteriormente o solo foi levado para o laboratório para a medição da umidade. A partir dos dados da massa específica da areia e da massa de areia necessária para preencher o furo, é possível calcular o volume do furo. A razão entre a massa do solo retirado do furo e o volume, é a massa específica aparente úmido (μ_h), como o solo foi preservado em um recipiente que não permitia a saída de umidade, no laboratório, foram retiradas amostras, pesadas e colocadas na estufa por vinte e quatro horas, em seguida, foram pesadas novamente.

A umidade (h) do solo é resultado da razão entre a massa da água e a massa de solo seca. A massa específica aparente do solo seco (μ_s), foi obtida através da Equação 3 (DNER, 1994).

$$\mu_s = \mu_h \frac{100}{100+h} \quad (3)$$

A média dos valores de massa específica aparente do solo seco é de 2,3270 g/cm³ (Tabela 2). Nas simulações referentes geometria atual será utilizado o valor colhido em campo, para que o modelo fique o mais próximo o possível da realidade.

Tabela 2 – Resultados do ensaio do frasco de areia

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Massa específica aparente úmido (g/cm³)	2,4448	2,3359	2,2012
Umidade (%)	0,65	1,49	1,50
Massa específica aparente do solo seco (g/cm³)	2,4446	2,3356	2,2009

Fonte: autoria própria

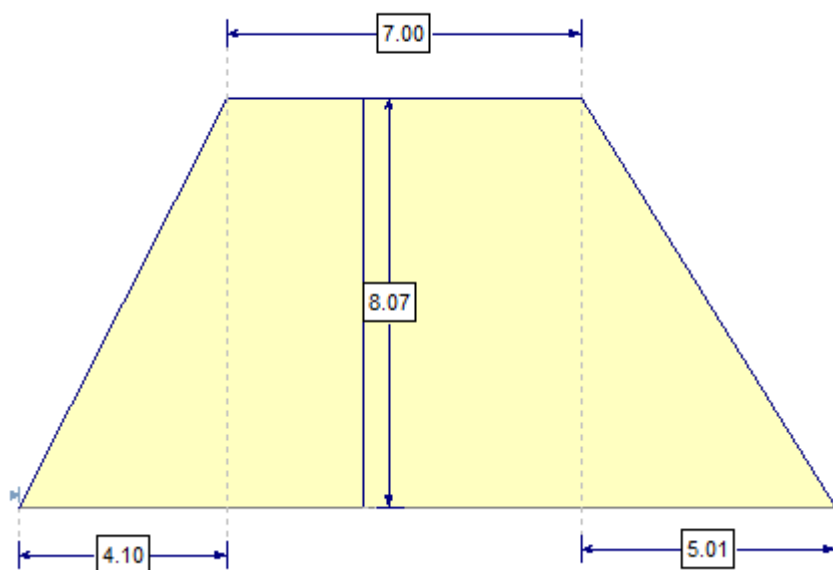
Nascimento (2017), realizou o ensaio de compactação Proctor Normal, que tem como objetivo relacionar a umidade do solo com a sua massa específica aparente seca quando compactado. No ensaio normal o solo é compactado em cinco camadas, por doze golpes em cada camada. Para o solo em questão, obteve-se uma massa específica máxima de aproximadamente 1,344g/cm³, esse valor será utilizado nas simulações da geometria de projeto (ABNT, 1986).

3.3 SLIDE

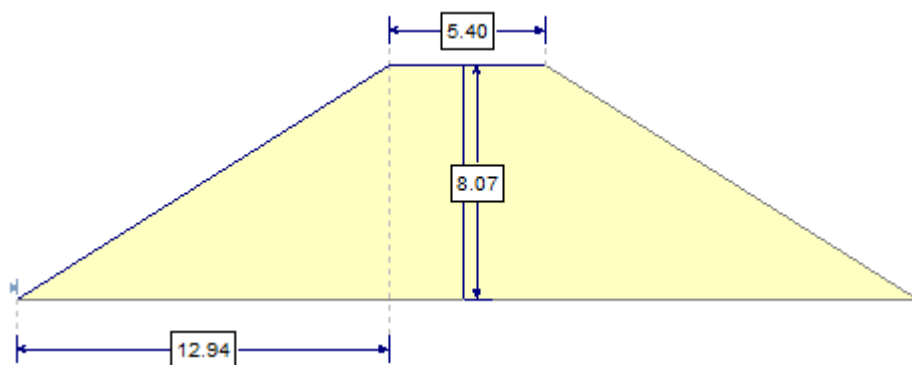
De acordo com o tutorial do *software Slide 6.0*, a primeira etapa para o cálculo da estabilidade de uma barragem é o desenho da geometria da estrutura. Essa representação pode ser feita com a ferramenta “mão livre” ou através de coordenadas, que permitem maior precisão ao usuário. Na Figura 18, ilustra-se a geometria utilizada nas simulações, de projeto e atual, da barragem do Açude Grande.

Figura 18 - Geometria a serem analisadas

a) Geometria de projeto



b) Geometria atual



Fonte: Autoria própria

A próxima etapa é a descrição do material que compõe a estrutura; o *software* permite que a ela seja composta por uma variedade de materiais, sendo as características pedidas: peso específico, ângulo de atrito e coesão (Figura 19).

Figura 19 - Slide: Características do material

Define Material Properties

Material 1

Name: Colour: Hatch:

Peso específico → Unit Weight: kN/m³ ☐ Saturated U.W. kN/m³

Strength Type: $\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi'$

Strength Parameters

Cohesion: kN/m² **Ângulo de atrito** → Phi: degrees

Water Parameters

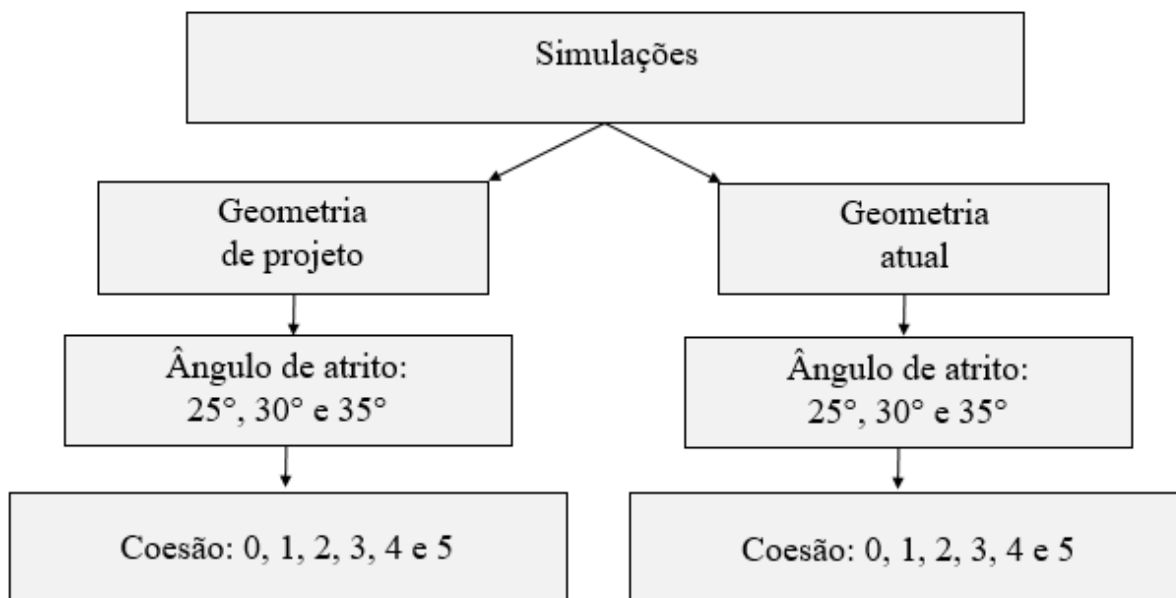
Unsaturated Shear Strength

Phi b: degrees Air Entry Value: kN/m²

☐ Show only properties used in model

Fonte: Autoria própria

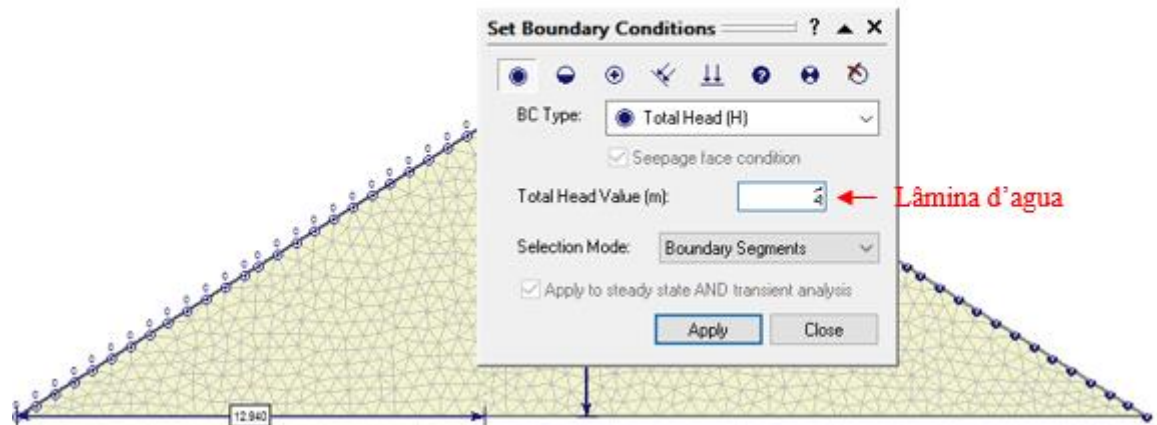
No caso em estudo, a barragem é homogênea (composta de apenas um material) com suas características definidas entre os intervalos apresentados em Nascimento (2017). As simulações serão realizadas conforme o esquema da Figura 20.

Figura 20 - Esquema de simulações a serem realizadas

Fonte: Autoria própria

Ao todo, serão realizadas setenta e duas simulações, variando os dados de entrada do material de acordo com a Figura 20. Para a análise do Slide 6.0, foi utilizada uma malha de elementos finitos de 1500 triângulos. Com relação às condições de contorno, foi considerada uma lâmina d'água igual a 2 m no pé de talude à montante, para todas as simulações. A Figura 21 apresenta a interface do programa, onde devem-se colocar as condições de contorno, a carga total, que é a soma da carga altimétrica e da carga piezométrica, nesse caso, como não existe uma carga altimétrica, a carga total é corresponde à altura da lâmina d'água. Ao clicar nas configurações de borda, abre-se a janela onde deve-se colocar essa informação.

Figura 21 - Águas subterrâneas estacionárias

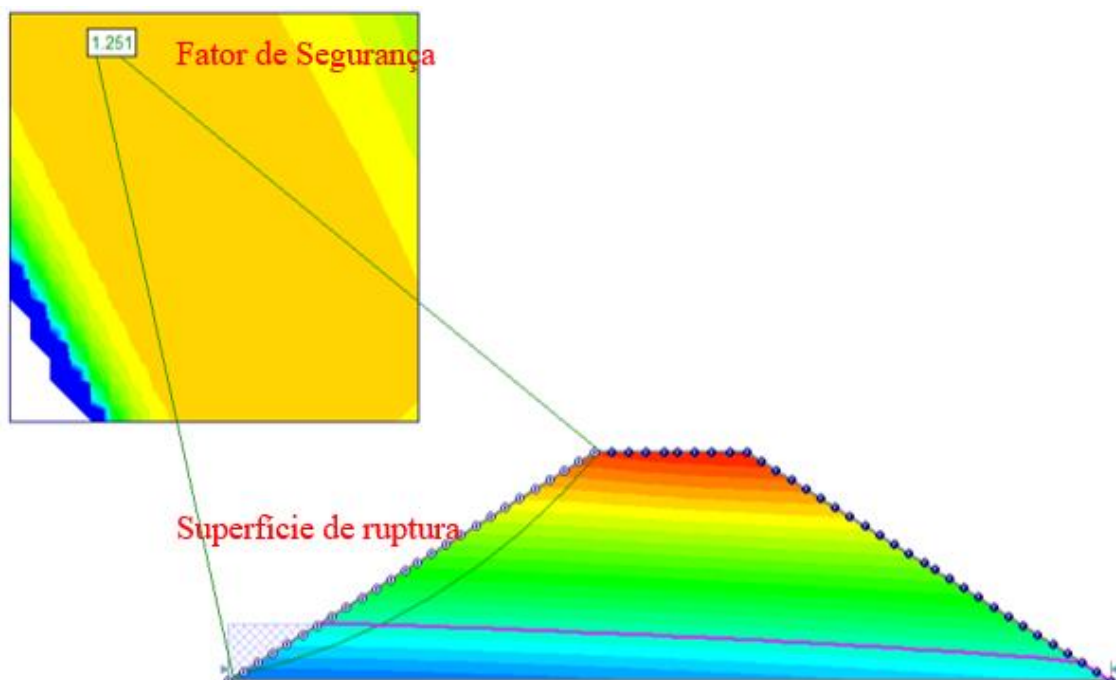


Fonte: Autoria própria

Trabalhamos com uma lâmina d'água de dois metros, valor aproximado de quando o reservatório encontra-se em sua capacidade máxima. Em seguida, deve-se indicar qual o talude que será analisado e iniciar a simulação na tecla *compute*.

Ao final das simulações, o *Slide* gera uma tela com os resultados, de modo que o Fator de Segurança (FS) encontra-se no centro do círculo que gera a superfície de ruptura (Figura 22).

Figura 22 - Resultado gerado pelo software Slide



Fonte: Autoria própria

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ANÁLISE DAS PATOLOGIAS ENCONTRADAS NA BARRAGEM

Usando as descrições das anomalias do Manual de Inspeção e Segurança de Barragens, foram encontradas as seguintes anomalias na barragem do açude grande: erosões, rachaduras transversais, rachaduras longitudinais, afundamentos, sinais de deslizamento e sinais de sumidouros. Além disso, constatou-se a existência de árvores, arbustos, tráfego de animais, lixo e entulhos no sangradouro e em construções próxima aos taludes.

Figura 23 - Erosões na barragem 1



Fonte: Autoria própria

Na Figura 23, pode-se visualizar o efeito da erosão nos taludes de montante e jusante em toda a extensão da Barragem 1. O Manual de inspeção e segurança de barragens sugere que as erosões sejam medidas e que seja definida a sua localização (taludes, crista ou sangradouro). Porém, outra problema é a impossibilidade de definição visível entre os taludes e a crista. Portanto, devido ao excesso de erosões, não foi seguida a metodologia do manual. As erosões estão em um nível de alerta, pois as mesmas são muito próximas e algumas apresentam profundidade e comprimento de até 1,7 m 1,5 m, respectivamente, permitindo que a água escoe para o maciço da barragem, o que pode gerar instabilidade.

Outro problema encontrado na barragem em questão foram pontos onde as erosões estão muito próximas e se unindo na crista, como pode ser visto na Figura 24. Essas erosões tendem a aumentar com o tempo, especialmente quando na presença de água, gerando áreas de instabilidade.

Figura 24 – Erosões na Barragem 2



Fonte: Autoria própria

Dentre as principais causas de erosão, podemos citar problemas estruturais, drenagem ineficaz ou talude sem proteção. A barragem do Açude Grande não possui sistema de drenagem, proteção dos taludes com *rip-rap* ou vegetação rasteira; os possíveis problemas na estrutura serão analisados nos próximos tópicos.

Na Figura 25, é possível observar a quantidade de árvores de grande porte encontradas no talude de jusante da Barragem 2; apesar de as árvores protegerem o talude contra a erosão, as suas raízes podem abrir caminhos para a passagem de água. Um sinal de que isso já está acontecendo é que a vegetação do talude não tem as mesmas características das vegetações próximas, que estão secas e sem vida, sendo isso um indicativo de umidade nas raízes das árvores.

Figura 25 - Vegetação no talude de jusante Barragem 2



Fonte: Autoria própria

Foram identificadas trincas pequenas transversais, próximo às erosões, ligando o talude de montante com o talude de jusante, e uma rachadura longitudinal ao longo da Barragem 2 (Figura 26) com profundidade de aproximadamente 30cm em alguns pontos. Entre as causas para esses tipos de rachaduras, podemos citar recalques diferenciais e assentamentos desiguais entre seções adjacentes do talude; além disso, elas podem ser um indício de deslizamento do maciço. Porém, é provável que as rachaduras transversais tenham sido originadas pelas erosões. Como a rachadura longitudinal é no mesmo local onde a barragem foi ampliada, a causa mais plausível é a de assentamento desigual, ou má execução da junção dos aterros.

Figura 26 - Rachadura longitudinal



Fonte: Autoria própria.

Quanto aos problemas causados por instabilidade dos taludes, foram encontrados afundamentos e sinais de deslizamento. O afundamento pode ser encontrado no final da Barragem 2, próximo ao sangradouro; a passagem de automóveis agravou esse problema, como ilustrado na Figura 27 (a). Os sinais de deslizamento podem ser vistos ao longo de toda a barragem como rachaduras longitudinais na forma de semicírculos, conforme a Figura 27 (b).

Figura 27 - Problemas causados pela instabilidade



a) Afundamento observado no final da Barragem 2



b) Sinais de deslizamento observados na Barragem 1

Fonte: Autoria própria.

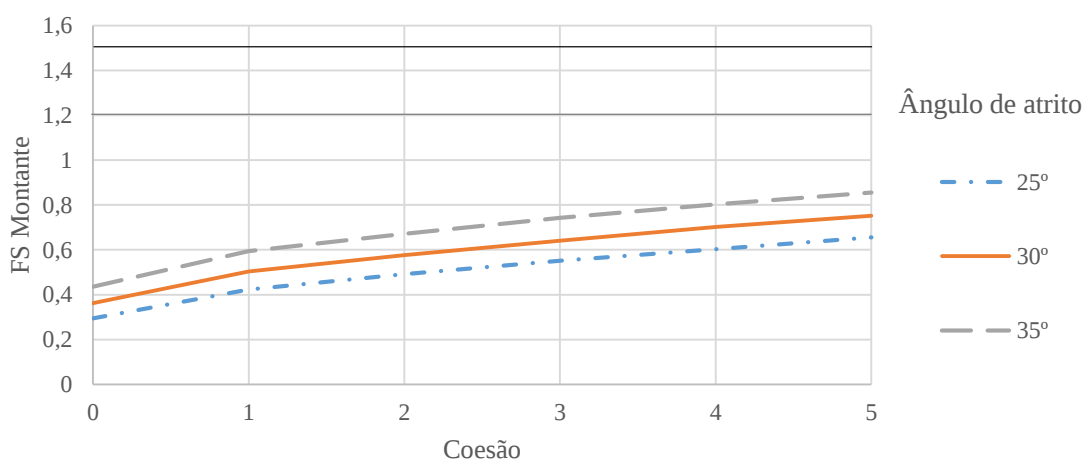
Também foram encontrados afundamentos causados pelo tráfego de animais, nos taludes, o que pode intensificar a erosão. Pontos com lixo e entulhos de construção no sangradouro foram também observados; apesar de não serem suficientes para obstruí-lo, é indicada a sua remoção. Foi constatado também que a largura da crista varia ao longo da barragem e encontra-se diferente dos valores de projeto.

4.2.SIMULAÇÕES DE ESTABILIDADE DOS TALUDES

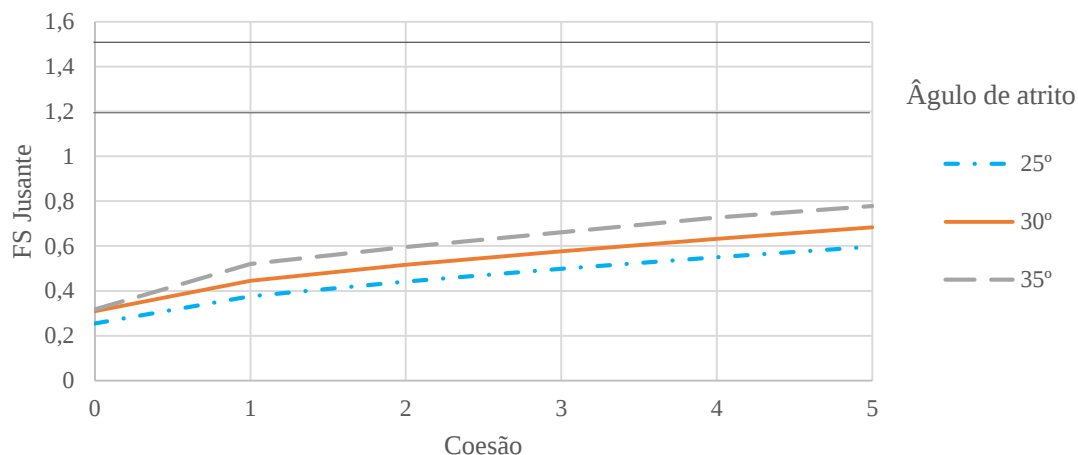
Os gráficos gerados a partir dos dados das simulações, apresentam, os valores de das coesões no eixo das abcissas e os valores de FS no eixo das ordenadas. Serão considerados aceitáveis valores de FS superiores a 1,2, sendo considerados ideias valores superiores a 1,5, como mostrado na Tabela 1.

Nos Gráficos 1 (a) e 1 (b), pôde-se verificar que, para a geometria proposta na ampliação da Barragem do Açude Grande, em nenhuma combinação de características do solo, o Fator de Segurança foi superior a 1. Isso significa que a resistência de cisalhamento do solo não seria capaz de resistir os carregamentos impostos na estrutura.

Gráfico 1 – FS utilizando a geometria de projeto



a) Fs para o talude de montante utilizando a geometria de projeto



b) Fs para o talude de jusante utilizando a geometria de projeto

Fonte: Autoria própria

Como constatado pelos valores de FS, a ampliação dos taludes foi realizada em uma inclinação muito inferior ao recomendado; por esse motivo, nas imagens do relatório da conclusão da obra (Figura 28), já é possível identificar algumas das manifestações patológicas comentadas. Portanto, a má inclinação dos taludes pode ter sido um dos principais responsáveis pelas anomalias geradas na estrutura.

Figura 28 - Início das manifestações patológicas

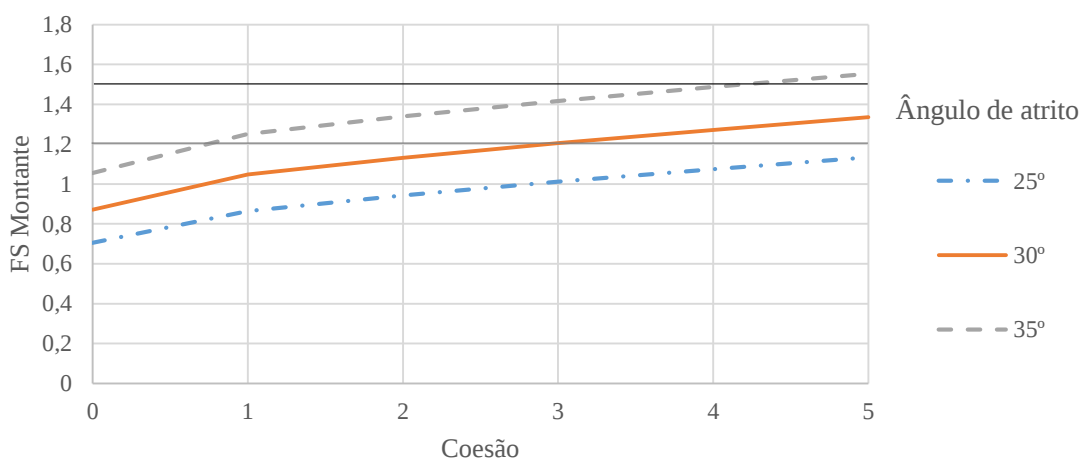


Fonte: Prefeitura Municipal de Caraúbas, 2017

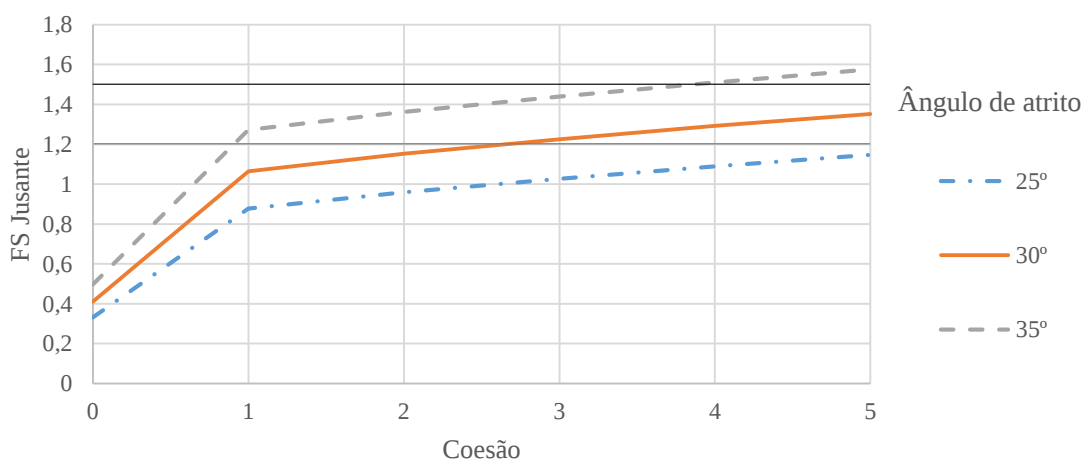
O Gráfico 2 apresenta os valores de FS considerando a geometria atual. Duas possíveis explicações para a diferença na geometria são o talude ter se desgastado, erodindo parte da

crista e esse material se depositando ao longo e no pé do talude, ea não obediências da inclinação de projeto na construção.

Gráfico 2 – Valores de FS considerando a geometria atual



a) Fs para o talude de montante utilizando a geometria atual



b) Fs para o talude de jusante utilizando a geometria atual

Fonte: Autoria própria

No Gráfico 2 (a), é possível constatar que, para o talude de montante, apenas para os valores de coesão igual a 5 e ângulo de atrito igual a 35° temos um FS superior a 1,5(valor recomendado). No talude de jusante, Gráfico 2 (b), duas combinações resultaram em um FS superior a 1,5, o ângulo de atrito de 35° e coesões de 4 e 5. Foi constatado também que os

valores de FS reduzem consideravelmente, apresentando valores inferiores a 0,5, quando o valor da coesão é 0; ou seja, deve-se evitar o uso desse tipo de solo.

4.3.DIAGNÓSTICO E PLANO DE MANUTENÇÃO

Como discutido no tópico anterior, a barragem atualmente enfrenta problemas com relação à estabilidade dos taludes e à falta de proteção deles, sendo essas as fontes mais prováveis para a maioria das manifestações patológicas encontradas. Como citado anteriormente, a principal causa para a trinca longitudinal foi uma compactação diferenciada entre o novo aterro e o antigo; além disso, a partir das imagens obtidas no momento da reforma, foi constatado que não houve a remoção da vegetação ou escarificação do talude antigo (Figura 29).

Figura 29 - Registro da ampliação da barragem



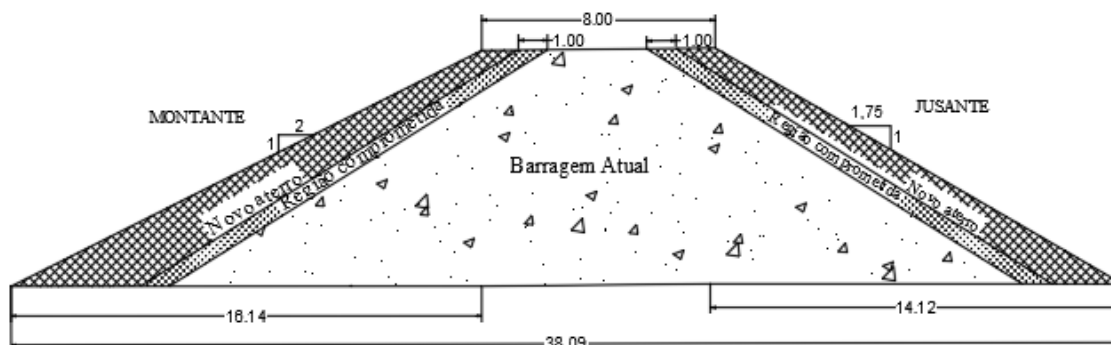
Fonte: Prefeitura Municipal de Caraúbas, 2017.

Unindo os valores dos FS e as manifestações patológicas, principalmente a erosão, que está presente em toda a extensão da barragem, pode-se afirmar que a estrutura não está estável e que medidas devem ser tomadas, de preferência antes da próxima estação chuvosa, que pode agravar o quadro de erosões do barramento. Além disso, foram feitas simulações para a estrutura atual com uma lâmina d'água hipotética de 5 m e o valor do FS pro talude de montante reduziu em 13%.

Como a causa da maioria das manifestações patológicas é a instabilidade da estrutura, recomenda-se uma nova geometria (Figura 30) para a barragem, seguindo os valores recomendados de inclinação e com a ampliação da crista para 8 m, garantindo que os veículos

trafeguem com segurança. Essa ampliação deve ser feita em ambos os taludes, após a remoção da parte danificada pela erosão e da vegetação, com escarificação do talude.

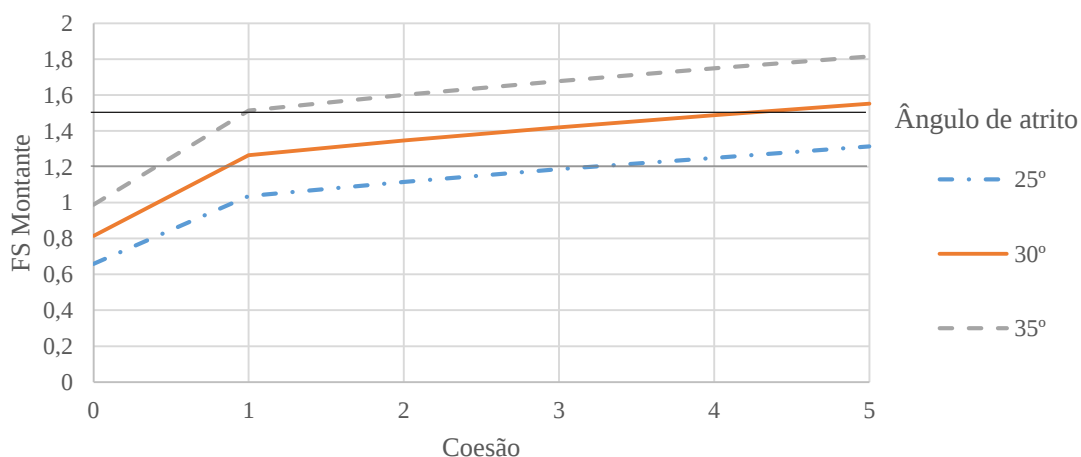
Figura 30 - Geometria sugerida



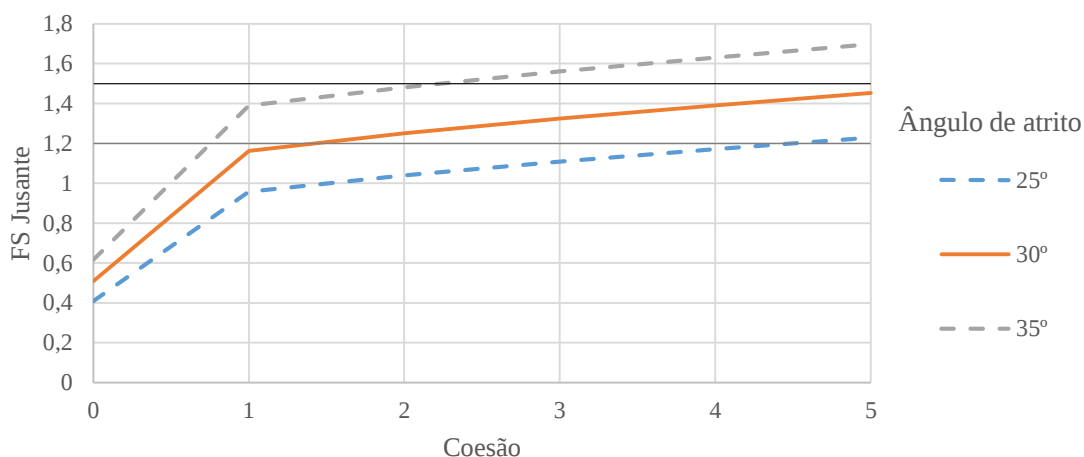
Fonte: Autoria própria

A forma de compactação usada na ampliação foi, em camadas de 25cm por um trator do tipo esteira (PREFEITURA MUNICIPAL DE CARAÚBAS, 2017). Recomenda-se utilizar um rolo compactador, compactando o solo em camadas de 25 cm. Além disso, recomenda-se ensaios de compactação em laboratório do material da jazida e ensaios “in situ” de frasco de areia e *speed*, para constatar se a compactação e umidade estão de acordo com o planejado. Foi realizada a simulação para obter os valores FS usando os mesmos dados de entradas das simulações anteriores (Gráfico 3).

Gráfico 3 – FS utilizando a geometria sugerida



a) Fs para o talude de montante utilizando a geometria sugerida



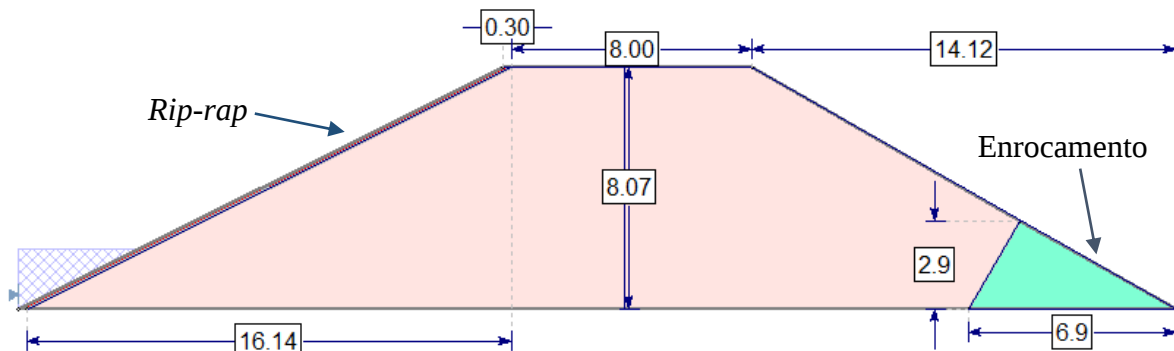
b) Fs para o talude de jusante utilizando a geometria sugerida

Fonte: Autoria própria

De acordo com o Gráfico 3, mesmo usando as inclinações recomendadas para os taludes, ainda verificam-se valores de FS inferiores a 1,5, para os ângulos de atrito inferiores a 35°. Para valores de FS superiores a 1,2, constatou-se que o solo não pode ter ângulo de atrito inferior a 30° ou coesão igual a 0. Dessa forma, para evitar problemas futuros, recomenda-se uma análise mais detalhada do solo a ser utilizado, para que o mesmo possua valores de ângulo de atrito superior a 35° e uma coesão maior que 2. Para a recuperação da trinca longitudinal e das pequenas trincas transversais ao longo da barragem, recomenda-se seguir as instruções de Molle e Cardier (1992), isto é, escavar até o final da trinca e preencher a vala com argila compactada em camadas. Como prevenção, recomenda-se: o plantio de vegetação rasteira ou colocação de *rip-rap* para proteção dos taludes; a remoção das árvores de grande porte do terreno à jusante, até a distância de 10 metros da barragem; e a construção de um sistema de drenagem superficial.

Como os valores de FS ficaram abaixo do recomendado, foi realizada uma nova simulação, com a adição do *rip-rap* à montante e enrocamento à jusante. O valor do ângulo de atrito para o material das novas estruturas é de 60°, o peso específico 21,2 kN/m³ e a coesão igual a 0, o qual tem como rocha de origem o basalto (DIVINO, 2010). O *rip-rap* foi simulado com uma espessura de 30cm e a geometria do enrocamento está de acordo com a Figura 31.

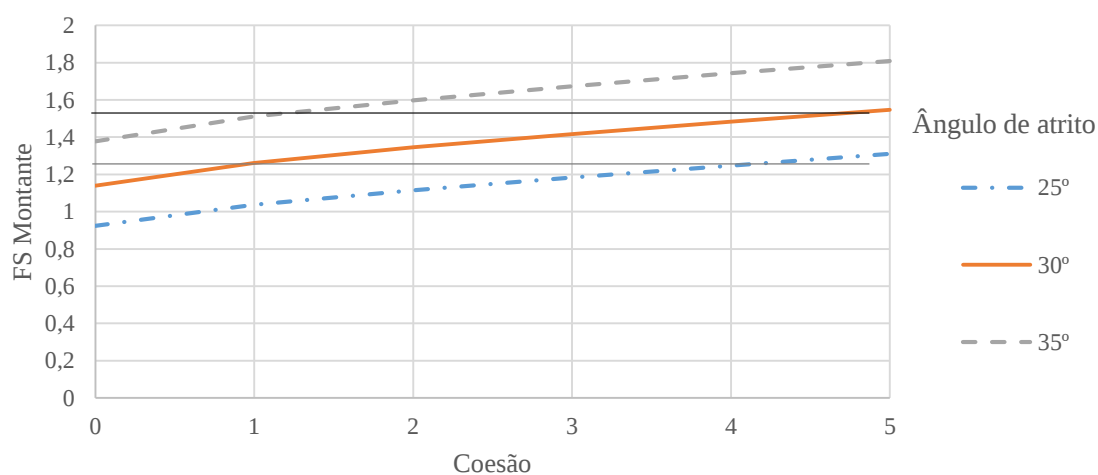
Figura 31- Geometria ideal com *rip-rap* e enrocamento



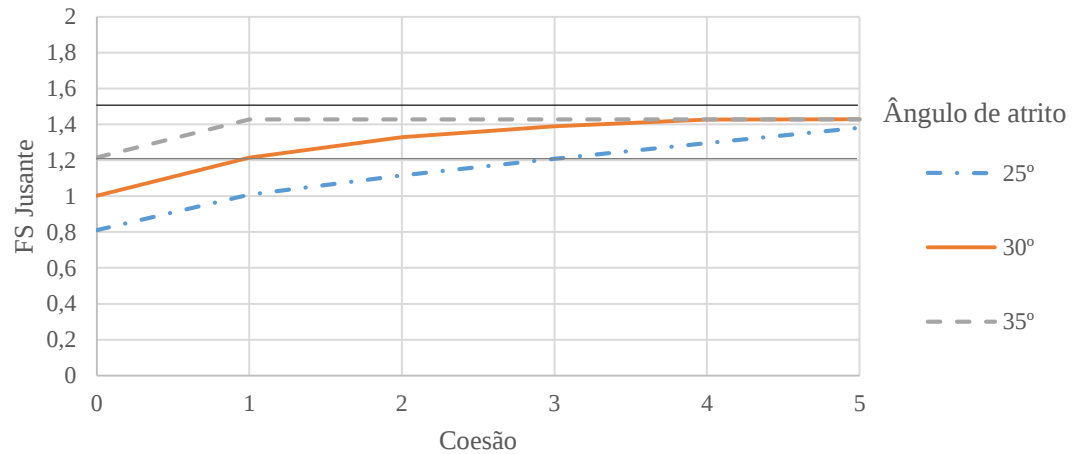
Fonte: Autoria própria

O uso do *rip-rap* no talude de montante, além de proteger a estrutura, também se mostrou como uma forma de aumentar em 30% o FS para as simulações com valores de coesão iguais a 0. Embora que, para o restante dos valores de coesão, o FS tenha permanecido o mesmo ou reduzido uma quantidade desprezível, 0,15%, ainda justifica-se a construção da estrutura; especialmente se não forem realizados ensaios em laboratório para caracterizar o solo, pois a mesma se estabiliza nos valores de FS. No Gráfico 4 (a), analisam-se os fatores de segurança para o talude de montante e, Gráfico 4 (b), para o talude de jusante..

Gráfico 4 – FS para geometria ideal com *rip-rap* e enrocamento



a) Fs para o talude de montante utilizando a geometria sugerida com *rip-rap* e enrocamento

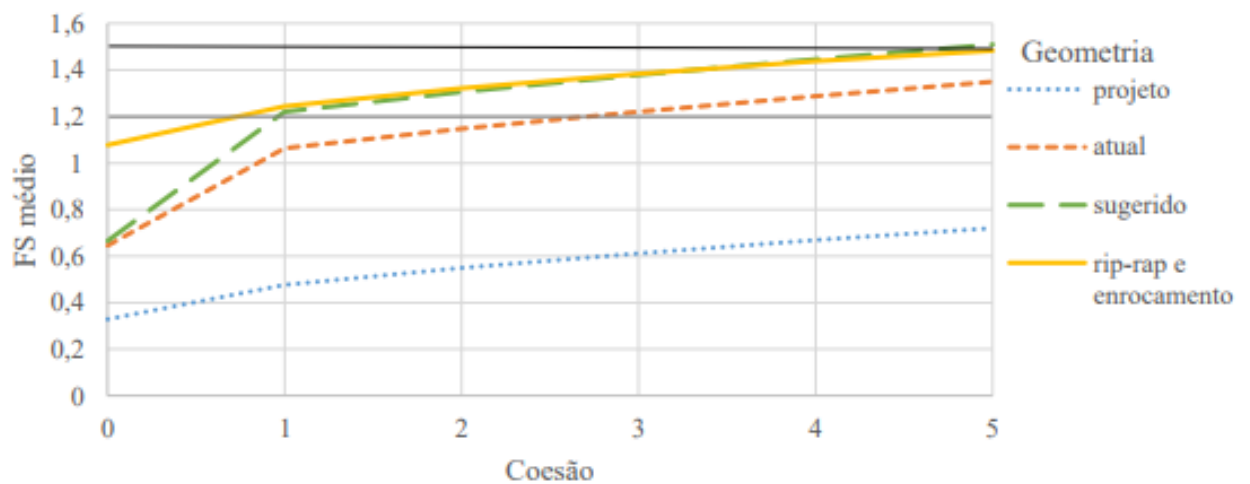


b) Fs para o talude de jusante utilizando a geometria sugerida com *rip-rap* e enrocamento

Fonte: Autoria própria

Com a construção do enrocamento, os valores de FS aumentam aproximadamente 50%, para o caso de coesão igual a 0 e ângulo de atrito igual a 25°, tornando a maioria dos FS superior a 1,2. Além disso, a curva do gráfico tem inclinações menores, o que indica FS mais estáveis que nas análises anteriores, como pode ser visto no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Valores médios de FS de acordo com a geometria escolhida



Fonte: Autoria própria

O Gráfico 5 apresenta os valores médios de FS (eixo das ordenadas) e a coesão (eixo das abscissas), sendo possível verificar as variações nos valores de FS em cada geometria analisada. Verifica-se que a curva referente à geometria de projeto está consideravelmente abaixo das demais, com todos os seus valores menores que 1,2. As curvas referentes à geometria atual e sugerida têm valores insatisfatórios para as coesões de 0 a 1, logo, a curva com os melhores resultados é a da geometria sugerida com adição de *rip-rap* e enrocamento; porém, como existem valores menores de que 1,2 para a coesão igual a 0, deve-se evitar solos com essa característica.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi analisada a segurança da Barragem do Açude Grande, localizada em Caraúbas/RN. Usaram-se duas formas para essa avaliação, o Manual De Inspeção e Segurança de Barragens e a análise de estabilidade de taludes por meio do *software Slide 6.0*. A metodologia do manual não foi seguida, pois o mesmo foi elaborado para uma análise contínua e anual, logo, usou-se apenas a descrição das manifestações patológicas (anomalias), suas possíveis causas e como tratá-las.

A principal dificuldade foi a classificação do nível das anomalias, pois o manual trata esse assunto de forma muito subjetiva, passando para o avaliador a tarefa de determinar se elas estão em estado inicial, de atenção, de alerta ou de emergência. De forma geral, a segurança da Barragem do Açude Grande encontra-se em estado de alerta, ou seja, as anomalias encontradas oferecem risco à estrutura da barragem. Foram consideradas como manifestações patológicas severas, a erosão, por estar presente em toda a extensão da barragem, além da trinca longitudinal observada na crista (com pontos onde a profundidade é superior a 30 cm), pois é um indicativo de instabilidade,.

As simulações no *software Slide* foram realizadas com variações nas características do solo (coesão e ângulo de atrito) e na geometria da barragem, onde foram gerados fatores de segurança para o projeto da ampliação, realizada em fevereiro de 2017, e para a geometria atual, que foi obtida através de um levantamento topográfico. Os resultados das simulações provaram que os taludes da barragem contavam com valores de FS no intervalo de 0,255 e 0,856 na ampliação, e com valores entre 0,331 e 1,576 para a geometria atual. Esses valores justificam as manifestações patológicas causadas por instabilidade (desabamentos, sinais de deslizamento e afundamentos); as erosões são provenientes da instabilidade e falta de proteção dos taludes.

A partir dos dados de instabilidade e das anomalias encontradas, foram propostas alternativas para a manutenção da estrutura e uma nova geometria, que segue os valores recomendados pela literatura para a inclinação dos taludes. Após a realização das simulações, considerando a estrutura recomendada, obteve-se valores de FS variando entre 0,490 e 1,814. Dessa forma, recomenda-se a realização de ensaios para garantir que o solo usado tenha valores que gerem FS superior a 1,5 (ângulo de atrito igual a 35° e coesão superior a 2); além de ensaios de compactação e umidade “in situ” para que a construção seja fiel ao projeto.

Foi sugerido também o uso de um sistema de drenagem combinado com alguma forma de proteção dos taludes, vegetação ou *rip-rap*, sendo a vegetação mais economicamente viável. Além disso, foram feitas análises para a estrutura idealizada com a adição dos elementos de *rip-rap* e enrocamento, onde foram encontrados valores com menores variações; para o FS de montante, os valores variam entre 0,923 e 1,809 e, para o talude de jusante, os valores ficaram no intervalo entre 0,81 e 1,428. Esses valores indicam que a construção desses elementos melhoraria a estabilidade da barragem, além de o *rip-rap* proteger o talude.

Como forma de continuação desse estudo, sugere-se a realização de ensaios para determinar o ângulo de atrito e coesão do solo, gerando simulações mais precisas, além da verificação dos resultados para energias de compactação diferentes (intermediária e modificada). Recomenda-se também realizar um estudo hidrográfico, a fim de elaborar um modelo do pior quadro possível que a barragem possa enfrentar e determinar quais as áreas afetadas em caso de rompimento da mesma.

REFERÊNCIAS

A Questão da Água no Nordeste. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Agência Nacional de Águas, 2012.

ASSIS, A. P; HERNANDES, H. M; COLMANETTI, J.P. **Apostila de barragens.** Brasília, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NRB 7182: Ensaios de compactação.** Rio de Janeiro, 1986.

BRASIL ENGENHARIA. **Rompimento da barragem e rejeitos da Samarco em Mariana.** Disponível em < <http://www.brasilengenharia.com/portal/noticias/noticias-da-engenharia/14684-rompimento-da-barragem-de-rejeitos-da-samarco-em-mariana>>. Acesso em: 17 de setembro de 2017.

Caderno regional da sub-bacia do Alto Jaguaribe / Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará; Eudoro Walter de Santana (Coordenador). – Fortaleza : INESP, 2009.

DAS, Braja. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** São Paulo: Cengage Learning, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 092/94: Solo - determinação da massa específica aparente “in situ”, com emprego de frasco de areia.** Brasília, 1994.

Departamento Nacional de Obras Contra a Seca. **DNOCS completa 107 anos contribuindo com o desenvolvimento do nordeste,** 2016. Disponível em: <<http://www2.dnocs.gov.br/gabcs/3294-dnocs-completa-107-anos-contribuindo-com-o-desenvolvimento-do-nordeste>>. Acesso em: 12 de junho de 2017.

DIVINO P. L. **Comportamento de enrocamento em barragens – Estudo de caso da barragem de Emborcação.** Ouro Preto, 2010.

ELETROBÁS. **Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas**. Rio de Janeiro, 2003.

ENGENHARIACIVIL.COM. **Imagem do dia: Colapso iminente da mais alta barragem dos Estados Unidos obriga à evacuação de quase 200 mil pessoas**. Disponível em: <<https://www.engenhariacivil.com/colapso-iminente-mais-alta-barragem-eua>>. Acesso em: 20 de setembro de 2017.

GREGORETTI, CARLO; MALTAURO, ALESSANDRO; LANZONI, STEFANO. **Laboratory Experiments on the Failure of Coarse Homogeneous Sediment Natural Dams on a Sloping Bed**. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, 2010.

Guia Básico de Segurança de Barragens. Comitê Brasileiro de Barragens. São Paulo, 2001.
Manual de Segurança e Inspeção de Barragens. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002.

MARANGON, M. **Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra**. Rio de Janeiro, 2006.

MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MEES ENGENHARIA. **Impacto de vegetações de grande porte em barragens**. Disponível em: <<http://www.meeseng.com/tecnica/rpt001.html>>. Acesso em: 31 de agosto de 2017.

MOLLE, François; CADIER, Eric. **Manual do pequeno açude**. Recife: SUDENE-DPG-PRN-DPP-WR, 1992.

NASCIMENTO, Famela A. A. **Análise da estabilidade do aterro para a ciclovia que ligará a cidade de caraúbas ao campus da ufersa**. Caraúbas, 2017.

NOTÍCIAS DE PENTECOSTE. **Preocupante: Parede do açude Ipuzinho em Itapaje apresenta rachadura**. Disponível em: <<http://www.noticiasdepentecoste.com/2013/10/preocupante-parede-do-acude-ipuzinho-em.html>> Acesso em: 20 de setembro de 2017.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CARAÚBAS. **Conclusão dos serviços de recuperação da parede do açude grande dia 06 de março de 2017.** Caraúbas, 2017.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CARAÚBAS. **Projeto para recuperação do barramento do Açude Grande.** Caraúbas, 2017.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CARAÚBAS. **Realização dos serviços de recuperação da parede do açude grande.** Caraúbas, 2017.

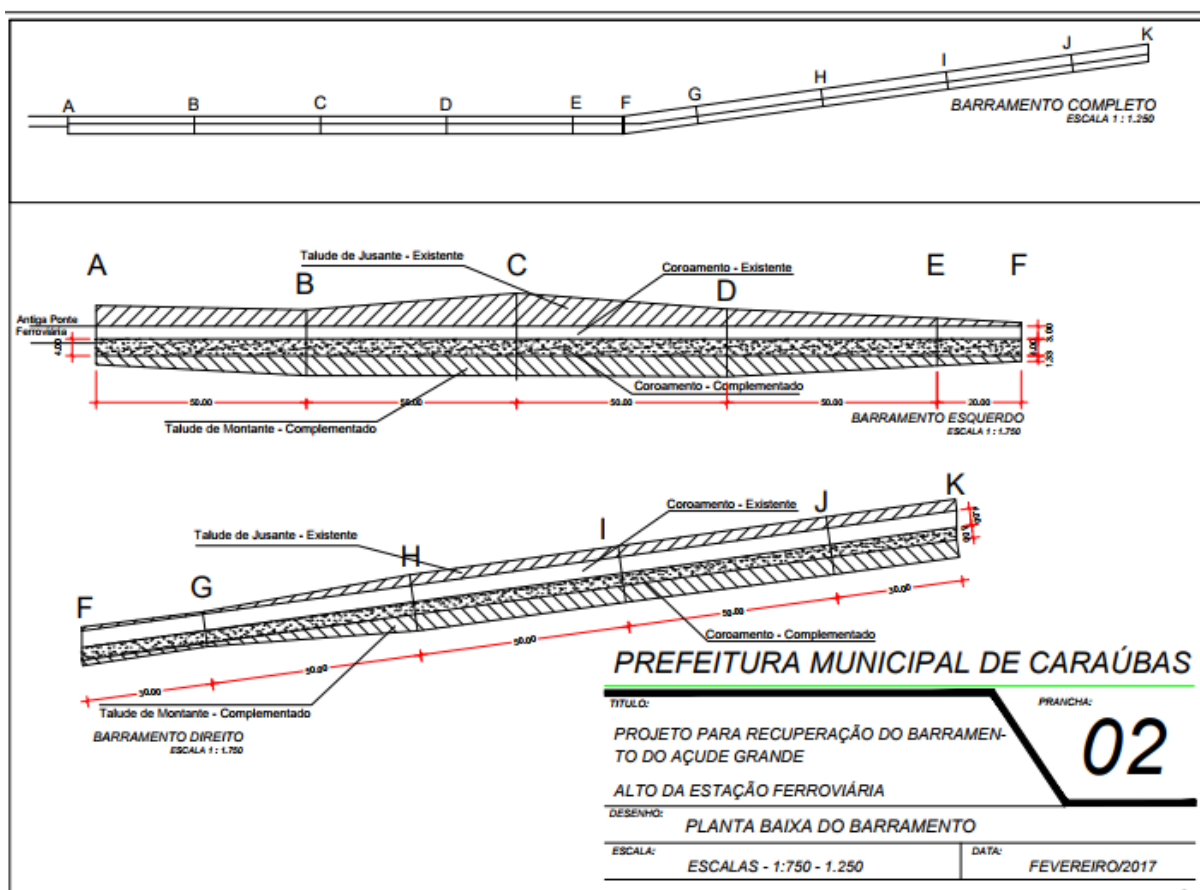
ROCSCIENCE. **Descrição do Software Slide.** Disponível em: <<https://www.rocscience.com/rocscience/products/slide>>. Acesso em: 11 de setembro de 2017.
ROCSCIENCE. **Slide Tutorials.** Canadá, 2010.

SOHLER A. S. S.; CALDEIRA L. M. M. S. **Safety of Dams: A Pathological Approach of Qualitative and Quantitative Risks.** Journal of Civil Engineering and Architecture, 2016, p.1033.

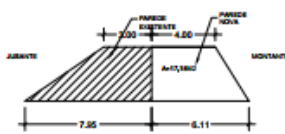
SOUZA, Andriele. **Avaliação das condições de segurança de barragens da região do Seridó do estado do Rio Grande do Norte.** Natal, 2014.

STEPHENS, T. Projeto detalhado. In: **Manual sobre pequenas barragens de terra**, FAO, 2011.

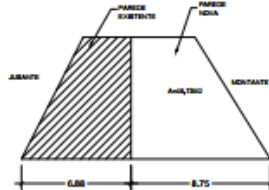
ANEXO 1



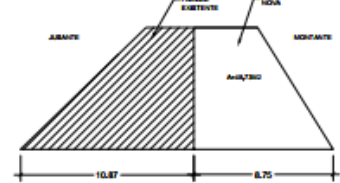
SEÇÃO - PONTO A



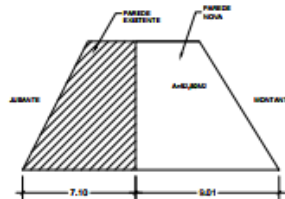
SEÇÃO - PONTO B



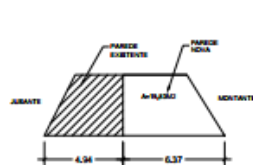
SEÇÃO - PONTO C



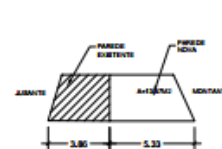
SEÇÃO - PONTO D



SEÇÃO - PONTO E



SEÇÃO - PONTO F



VOLUMES ACRESCIDOS:

TRECHO AB - $50x(17,18+48,73)/2 = 1.647,50 \text{ m}^3$ TRECHO BC - $50x(48,73+48,73)/2 = 2.436,50 \text{ m}^3$ TRECHO CD - $50x(48,73+52,50)/2 = 2.530,75 \text{ m}^3$ TRECHO DE - $50x(52,50+18,83)/2 = 1.808,25 \text{ m}^3$ TRECHO EF - $20x(18,83+13,57)/2 = 334,00 \text{ m}^3$ VOLUME TOTAL COMPACTADO = $8.757,00 \text{ m}^3$ VOLUME TOTAL TRANSPORTADO = $10.508,40 \text{ m}^3$
(Considerado empolamento de 20%)

PREFEITURA MUNICIPAL DE CARAÚBAS

TÍTULO:

PRANCHA:

PROJETO PARA RECUPERAÇÃO DO BARRAMENTO DO AÇUDE GRANDE

03

ALTO DA ESTAÇÃO FERROVIÁRIA

DESENHO:

SEÇÕES DO BARRAMENTO - ESQUERDO

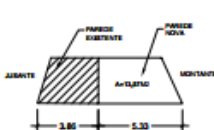
ESCALA:

ESCALA - 1:200

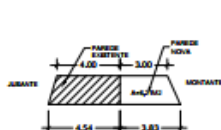
DATA:

FEVEREIRO/2017

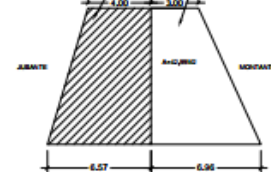
SEÇÃO - PONTO F



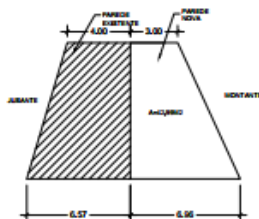
SEÇÃO - PONTO G



SEÇÃO - PONTO H



SEÇÃO - PONTO I



SEÇÃO - PONTO J



SEÇÃO - PONTO K



VOLUMES ACRESCIDOS:

TRECHO FG - $30x(13,57+6,21)/2 = 296,70 \text{ m}^3$ TRECHO GH - $50x(6,21+42,99)/2 = 1.230,00 \text{ m}^3$ TRECHO HI - $50x(42,99+42,99)/2 = 2.149,50 \text{ m}^3$ TRECHO IJ - $50x(42,99+46,20)/2 = 2.229,75 \text{ m}^3$ TRECHO JK - $30x(46,20+46,20)/2 = 1.386,00 \text{ m}^3$ VOLUME TOTAL COMPACTADO = $7.291,95 \text{ m}^3$ VOLUME TOTAL TRANSPORTADO = $8.750,34 \text{ m}^3$
(Considerado empolamento de 20%)

PREFEITURA MUNICIPAL DE CARAÚBAS

TÍTULO:

PRANCHA:

PROJETO PARA RECUPERAÇÃO DO BARRAMENTO DO AÇUDE GRANDE

04

ALTO DA ESTAÇÃO FERROVIÁRIA

DESENHO:

SEÇÕES DO BARRAMENTO - DIREITO

ESCALA:

ESCALA - 1:200

DATA:

FEVEREIRO/2017

ANEXO 2

DADOS GERAIS – CONDIÇÃO ATUAL

Barragem:	
Empreendimento:	
Região:	
Vistoriado por:	
Data da vistoria:	
Estado operacional da vistoria	
Superfície da água no reservatório	Ha
Armazenamento no reservatório	m ³
Nível máximo de operação - cota	m
Cota máxima da superfície da água no reservatório	m
Nível máximo histórico do reservatório	m
Barramento	
Tipo	
Altura	m
Comprimento da Crista	m
Descargas	
Vertedouro	m ³ /s
Obras de restituição	m ³ /s
Canal	m ³ /s
Descarregador de Fundo	m ³ /s
Tomada D'Água	m ³ /s

LISTA PARA INSPEÇÃO FORMAL DO AÇUDE

Legenda:

SITUAÇÃO:
NA – Não Aplicável
NE – Não Existente
PV – Primeira Vez
DS – Desapareceu
DI – Diminuiu
PC – Permaneceu Constante
AU – Aumentou
NI – Não Inspeccionado (Justificar)

NÍVEL DE PERIGO: (NP) (*)
0 - Nenhum
1 - Atenção
2 - Alerta
3 - Emergência

(*) NÍVEL DE PERIGO:

- 0 – Nenhum: anomalia que não compromete a segurança da barragem, mas que pode ser entendida como descaso e má conservação;
- 1 – Atenção: anomalia que não compromete a segurança da barragem a curto prazo, mas deve ser controlada e monitorada ao longo do tempo;
- 2 – Alerta: anomalia com risco à segurança da barragem, devem ser tomadas providências para a eliminação do problema;
- 3 – Emergência: risco de ruptura iminente, situação fora de controle.

