

REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA DE BARRAGENS

ISSN: 2594-7451

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS

ANO V Nº 08 DEZEMBRO 2019 R\$ 30,00



FOTOS: DIVULGAÇÃO BARRAGEM RIO COLÔNIA





Fonte de Vida Sustentável no Semiárido Brasileiro

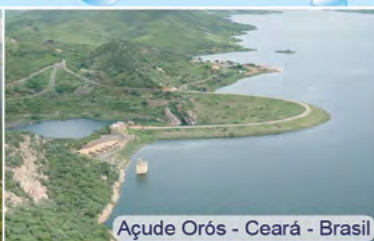
O Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) é a mais antiga Instituição Federal com atuação no semiárido nordestino, região também conhecida como “polígono das secas”. Sua principal política de ação é a construção de médias e grandes barragens, tendo em vista as características climáticas da região de sua atuação, caracterizada pela irregularidade de chuvas e pela intermitência dos rios, que fluem cheios na estação chuvosa e estancam na estação seca. Tal atuação visa atenuar os efeitos das estiagens severas, com o objetivo primordial de “acumular água na estação chuvosa para perenizar trechos de rios na estação seca”.



A construção desses barramentos garantem o atendimento da demanda dos usos múltiplos, tais como: abastecimento humano e industrial, dessedentação animal, irrigação, piscicultura, lazer, geração de energia, turismo e controle de cheias.

A água armazenada é fonte de desenvolvimento econômico e social, através da geração de oportunidades e de alternativas, proporcionando instalações de novos empreendimentos.

Neste cenário, o DNOCS destaca-se como empreendedor de 327 (trezentos e vinte e sete) barragens nos Estados do Nordeste brasileiro, perfazendo uma capacidade de armazenamento de cerca de 27,2 bilhões de m³, beneficiando milhões de famílias.





COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS – CBDB
REPRESENTANTE DA COMISSÃO INTERNACIONAL DE
GRANDES BARRAGENS (ICOLD-CIGB) NO BRASIL

DIRETORIA

PRESIDENTE - CARLOS HENRIQUE MEDEIROS

VICE-PRESIDENTE - JOSÉ MARQUES FILHO

DIRETOR-SECRETÁRIO - CELSO JOSÉ PIRES FILHO

DIRETOR TÉCNICO - DIMILSON PINTO COELHO

DIRETOR DE COMUNICAÇÕES - RICARDO AGUIAR MAGALHÃES

NÚCLEOS REGIONAIS - DIRETORES

BA – LÚCIO LANDIM FONSECA

CE – VANDA TEREZA MALVEIRA

GO/DF – HABIB SALLUM

MG – CLEBER JOSÉ DE CARVALHO

PR – ÉTORE FUNCHAL DE FARIA

PE – JOSÉ AQUINO DE SOUZA

RJ – GERALDO MAGELA PEREIRA

RS – LÚCIA WILHELM VÉRAS DE MIRANDA

SC – SÉRGIO CORRÊA PIMENTA

SP – PAULO VICTOR CASTELLO BRANCO BRAUM

COMISSÕES TÉCNICAS NACIONAIS - COORDENADORES

BARRAGENS DE CONCRETO

JOSÉ MARQUES FILHO

BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM FACE DE CONCRETO

BAYARDO MATERÓN

BARRAGENS DE REJEITOS

JOAQUIM PIMENTA DE ÁVILA

BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO

LEONARDO DE OLIVEIRA GUERRA DEOTTI

CONDICIONANTES REGULATÓRIOS À REALIZAÇÃO DE

BARRAGENS E RESERVATÓRIOS

RAYMUNDO JOSÉ SANTOS GARRIDO

FORMAS DE CONTRATAÇÃO DE SERVIÇOS DE ENGENHARIA

E CONSTRUÇÃO

RICARDO ANDRZEJEWSKI

HIDRÁULICA EM BARRAGENS

DIEGO DAVID BAPTISTA DE SOUZA

IMPACTO AMBIENTAL DE BARRAGENS E RESERVATÓRIOS

SANDRA ELISA FAVORITO RAIMO

OBRAS DE PROTEÇÃO E CONTENÇÃO DE FLUXO DE DETRITOS

DIMITRY ZNAMENSKY

PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO TÉCNICA

RICARDO AGUIAR MAGALHÃES

REGISTRO DE BARRAGENS

ÉTORE FUNCHAL DE FARIA

SEGURANÇA DE BARRAGENS

CARLOS HENRIQUE MEDEIROS

USOS MÚLTIPLOS DE RESERVATÓRIOS

FÁBIO DE GENNARO CASTRO

CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens

Rua Real Grandeza, 219 - Bloco C - Sala 1007

Bairro Botafogo - Rio de Janeiro/RJ - Brasil

CEP 22281-900 **FAX** 055 21 2528 5959

TELEFONES 055 21 2528 5320 | 055 21 2528 5283

E-MAIL cdbdb@cdbdb.org.br **WEB** www.cdbdb.org.br



Um momento para reflexão e ação

Por Carlos Henrique Medeiros

A principal função do CBDB é a de promover a discussão de temas relevantes, polêmicos e de interesse para a comunidade técnica e para a sociedade, com foco na observância da ética profissional, boa prática de engenharia de barragens brasileira e sua inserção no cenário internacional. Entretanto, é notória a influência da sociedade, da política e da comunidade técnica na busca de respostas para o que deu errado nos trágicos e graves acidentes de Mariana e Brumadinho. Esses eventos despertaram a atenção para questões de segurança, com destaque para a engenharia, o profissional de engenharia e a estrutura organizacional que gerencia e toma as decisões sobre a condição de segurança desses empreendimentos.

São acidentes que expõem falhas no sistema e agregam todos os atores envolvidos em projeto, construção, operação e manutenção das barragens. Ou seja: contratante e contratadas, reguladoras e fiscalizadoras, supervisão e consultoria. Precisamos tirar lições sobre o que não foi feito e os motivos de não ter sido feito. Os acidentes costumam mandar avisos. Quando acontecem, costumam deixar rastros. O modo de falha do acidente de Brumadinho não é padrão e não se aplica a todos os tipos de barragens, mesmas aquelas que foram banidas, como as barragens de rejeito construídas pelo método de alteamento por montante – elas têm se mantido íntegras em outros países. Foi criado um ambiente de pânico, decorrente da imagem cinematográfica e impressionante do rompimento da barragem de Brumadinho. Isso provocou uma onda de pressão dirigida, desproporcionalmente, para a engenharia de barragens brasileira.

Os acidentes nos obrigam a formular uma série de perguntas. Dentre elas, considero mais relevantes: Onde erramos e por que erramos? Quem errou? A engenharia? Os engenheiros? Os gestores e tomadores de decisão? O que devemos fazer para abortar o pânico instalado? Para onde vamos? Quais os impactos em nossa profissão? Qual deve ser o papel da academia? A lei não foi a vilã. Foram muitos os avanços alcançados com a legislação, sendo esse um dos protagonismos do CBDB e suas associações parceiras, todas empenhadas em demonstrar o erro de avaliação- hoje responsável pelas mudanças intempestivas da legislação através de projetos de lei que geram incertezas e preocupações.

Permanecem deficiências na fiscalização, com falta de pessoal, em número e qualificação técnica. Documentos de inspeção de barragens e Planos de Segurança de Barragens (PSB) são produzidos. No entanto, suas recomendações nem sempre são implementadas. Os Planos de Ação de Emergência (PAE) e Plano de Contingência (Plancon) são elaborados e seus procedimentos nem sempre são implementados. Eles demandam ajustes para que sejam efetivos. Existem falhas de comunicação com a população afetada.

A Lei No. 12.334/2010 levou 7 anos para ser sancionada e completa 9 anos de vigência. Infelizmente, ela tem sido objeto de mudanças rápidas e com viés não técnico, sem a devida análise criteriosa dos seus pontos fortes e fracos. O primeiro grande passo tem que ser a transparência em todas as ações, conforme pontuado na legislação. Precisamos deixar de falar para nós mesmos e levar as discussões aos tomadores de decisão e ao poder constituído.

Precisamos focar, de imediato, nas falhas oriundas de outras questões, como governança, compliance e/ou negligência na implementação de ações de segurança, e apostar no risco. É imperativo que se estabeleça um compromisso em defesa da apuração dos fatos geradores desses acidentes. Precisamos respostas para muitas perguntas, com prioridade e foco na gestão de risco.

Finalizo dizendo que, mudanças intempestivas na legislação podem fazer regredir os avanços alcançados ao longo dos últimos 9 anos. O CBDB permanece atento e aberto para contribuir nessas questões. Criamos fóruns para que isso aconteça. Que prevaleça a verdade técnica, a isenção e o bom senso na apuração das falhas. Mais que isso: que as lições sejam aprendidas!

ARTIGOS

06 DESAPARECEM 52 GW DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO**Tema:** Energia | **País / Edição:** Brasil / 2019**Autora:** José Marcos DONADON**10 AVALIAÇÃO DE RISCO EM BARRAGEM DE REJEITOS DE MINERAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO****Tema:** Barragem de Rejeito | **País / Edição:** Brasil / 2019**Autora:** Josias Eduardo Rossi LADEIRA, Karolina Isabela CORREA, Larissa Renata de Oliveira VILELA**17 ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE BARRAGENS DE CONCRETO POR MEIO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL – ESTUDO DE CASO****Tema:** Segurança de Barragem | **País / Edição:** Brasil / 2019**Autora:** Amanda de Moraes RICARDI, Euclides CESTARI Junior, Ludmilla Freitas PEREIRA, Lício Venâncio de OLIVEIRA da Silva**26 AVALIAÇÃO DA PROBABILIDADE DE RUPTURA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS POR INSTABILIZAÇÃO E GALGAMENTO****Tema:** Barragem de Rejeito | **País / Edição:** Brasil / 2019**Autora:** Gabriela Silveira VIRGILI, Isabela Moreira QUEIROZ**33 A INFLUÊNCIA DA ANISOTROPIA NA ANÁLISE DE SUBPRESSÃO NO VERTEDOURO DA UHE JIRAU****Tema:** BSegurança de Barragem | **País / Edição:** Brasil / 2019**Autora:** Marieli LOPES, André ASSIS

CAPA

Barragem do Colônia

Situada no município de Itapê, à margem a BA 120, a barragem do rio Colônia foi inaugurada pelo governador Rui Costa em julho de 2018. O empreendimento foi construído pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento (Embasa), com investimento de R\$111 milhões, sendo a operação da barragem de responsabilidade da Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia (Cerb). Seus principais objetivos são promover segurança hídrica na região, complementando o abastecimento de água do município de Itabuna e da localidade de Ferradas, e regularizar a vazão do rio Cachoeira, minimizando enchentes. Ao todo, o empreendimento beneficia cerca de 350 mil pessoas.

REVISTA BRASILEIRA DE

ENGENHARIA DE BARRAGENSPublicação de responsabilidade do CBDB
COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS

A Revista Brasileira de Engenharia de Barragens (RBEB) é uma publicação técnica aperiódica do Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), distribuída em todo o território nacional e direcionada aos profissionais que atuam na Engenharia de Barragens em geral e em obras associadas. Os artigos assinados são de expressa responsabilidade de seus autores e não refletem, necessariamente, a opinião do CBDB. Todos os direitos reservados ao CBDB. Nenhuma parte de seus conteúdos pode ser reproduzida por qualquer meio sem a autorização, por escrito, dos editores.

COMITÊ EXECUTIVOCARLOS HENRIQUE MEDEIROS
DIMILSON PINTO COELHO
RICARDO AGUIAR MAGALHÃES**COORDENAÇÃO EDITORIAL**

RICARDO AGUIAR MAGALHÃES

JORNALISTA RESPONSÁVEL

CLÁUDIA RODRIGUES BARBOSA

PROJETO GRÁFICO**E DIAGRAMAÇÃO**

URSULA FUERSTENAU

FOTOLITO / IMPRESSÃO

GRÁFICA COMUNICAÇÃO IMPRESSA

TIRAGEM

500 EXEMPLARES

A Revista Brasileira de Engenharia de Barragens (RBEB) tem por objetivo a publicação de artigos científicos e de relatos técnicos inerentes à Engenharia de Barragens em geral, de modo a explicitar os conhecimentos técnicos atualizados, que sejam úteis tanto para a operação das empresas que projetam, constroem ou operam barragens, como para os centros de pesquisa e as universidades que se dedicam ao desenvolvimento da Engenharia de Barragens.

O Conselho Editorial, abaixo nominado, é o órgão responsável pela definição da linha editorial e pela qualidade técnica dos trabalhos. Está composto por membros selecionados entre os sócios do Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB) com comprovada experiência profissional ou acadêmica em cada um dos 16 temas a seguir relacionados.

TEMAS E COMPOSIÇÃO DO CONSELHO EDITORIAL**BARRAGENS DE CONCRETO COMPACTADO A ROLO (CCR)**

FRANCISCO RODRIGUES ANDRILO, WALTON PACELLI DE ANDRADE

BARRAGENS DE FACE DE CONCRETO E DE NÚCLEO ASFÁLTICO

BAYARDO MATERÓN, CIRO HUMES

BARRAGENS DE REJEITO

JOAQUIM PIMENTA DE ÁVILA

BARRAGENS DE TERRA E DE ENROCAMENTO

CIRO HUMES, PAULO TEIXEIRA DA CRUZ, CASSIO BAUMGRATZ VIOTTI

CONCRETO, TECNOLOGIA E MATERIAIS

SELMO CHAPIRA KUPERMAN, WALTON PACELLI DE ANDRADE, JOSÉ MARQUES FILHO

ENERGIA

FLAVIO MIGUEZ DE MELLO, JERSON KELMAN, FRANCISCO LUIZ SIBUT GOMIDE

EQUIPAMENTOS HIDROMECÂNICOS

PAULO CEZAR FERREIRA ERBISTI, JOÃO CARLOS MATHEUS

GEOLOGIA DE ENGENHARIA

RICARDO ANTÔNIO ABRAHÃO

GEOTECNIA E FUNDAÇÕES

ALBERTO DE SAMPAIO FERRAZ JARDIM SAYÃO, MILTON ASSIS KANJI

HIDRÁULICA E VERTEDORES

MARCELO GIULIAN MARQUES, NELSON LUIZ DE SOUZA PINTO

HIDROLOGIA

HEINZ DIETER OSKAR AUGUST FILL, MÁRIO CICARELI PINHEIRO

INSTRUMENTAÇÃO

ARSENIO NEGRO JR., JOÃO FRANCISCO ALVES SILVEIRA, RUBEN JOSÉ RAMOS CARDIA

MEIO AMBIENTE

MARÍLIA PIRONI SCOMBATTI, SÍLVIA HELENE MENEZES PIRES

MUDANÇAS CLIMÁTICAS

MARIA ASSUNÇÃO FAUS DA SILVA DIAS

RECURSOS HÍDRICOS

BENEDITO PINTO FERREIRA BRAGA JÚNIOR

SEGURANÇA DE BARRAGENS

CARLOS HENRIQUE DE A. C. MEDEIROS, TERESA CRISTINA FUSARO

TÚNEIS

TARCÍSIO BARRETO CELESTINO

Mariana e Brumadinho: Defesa Civil somos todos nós!

Alexandre Lucas Alves & Rafael Pereira Machado

Nesses mais de 15 anos de trabalho com Defesa Civil no Brasil tivemos contato com desastres envolvendo barragens. Em 2003, ao iniciar os primeiros passos na equipe do Gabinete Militar do governo de Minas Gerais (MG), fomos “batizados” com Cataguases. Na ocasião, uma barragem de rejeitos industriais rompeu e poluiu a bacia do Rio Paraíba do Sul, afetando várias cidades mineiras e do Rio de Janeiro.

A repercussão produziu uma comoção nacional e avanços foram implementados, sobretudo no planejamento de resposta com a criação do denominado Plano Nacional de Prevenção, Preparação e Resposta Rápida a Emergências Ambientais com Produtos Perigosos (P2R2). As tentativas de evoluir no arcabouço legal e institucional continuaram através dos anos. Com o advento da Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010), a percepção de riscos envolvendo esses empreendimentos ficou definitivamente institucionalizada.

Paralelamente, talvez pela recorrência de acidentes de grande porte no País, o Sistema Nacional de Proteção Civil também foi se fortalecendo, especialmente nos níveis federal e estadual. A doutrina de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação em desastres foi incorporada pela agenda política e administrativa dos governos.

A produção de documentos referentes à situação física das barragens, o envolvimento e a responsabilização dos empreendedores, o cadastro nacional dessas infraestruturas e a atuação das agências reguladoras produziram uma sensação de controle e segurança na sociedade. Até que ocorreu o rompimento em Mariana (MG)!

O acontecimento provou que não bastam leis, documentos e cadastros para que tais fatos sejam evitados. O episódio demonstrou também a falta de preparo das instituições e das comunidades dos entornos em conviver e se preparar para os riscos existentes. Além disso, ficou evidente a importância/necessidade da organização e da implementação de defesas civis municipais fortes, capacitadas e empoderadas pelos prefeitos.

Infelizmente, 2019 nos trouxe a lição de Brumadinho (MG)! Apesar de indicar avanços nas ações de resposta, comparadas com as de Mariana, o evento trouxe à tona fragilidades da implementação da política, tanto em aspectos técnicos quanto em operacionais.

Mais do que um momento de reflexão e identificação de falhas pessoais e institucionais, vivemos uma oportunidade ímpar. Urge acreditarmos que a responsabilidade de gestão de riscos não pode ser atribuída a uma anotação de responsabilidade técnica ou a pessoas/instituições isoladas. Toda a sociedade deve se envolver exatamente como em um sistema interligado, dependente e proativo, onde cada um - poder público, setor privado e comunidade - entenda e produza seus processos completamente interligados visando a segurança global das populações locais.

Para tanto, o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil convoca a todos, absolutamente todos os atores com decisões políticas, contribuições técnicas e participação social na gestão de riscos em barragens, para somarmos esforços para que as mortes de Mariana e Brumadinho não se repitam e não sejam em vão.

Não podemos concluir sem cumprimentar e agradecer ao Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB) pelo exemplo de comprometimento e responsabilidade social que tem demonstrado ao longo de toda sua trajetória. Somos testemunhas! Durante os mais de 15 anos em que militamos na gestão de riscos e desastres sempre fomos atendidos de pronto quando acionamos o CBDB. A instituição há muito já entendeu que Defesa Civil somos todos nós!



Alexandre Lucas Alves
Secretário Nacional de
Proteção e Defesa Civil



Rafael Pereira Machado
Engenheiro Civil da
Defesa Civil Nacional

DESAPARECEM 52 GW DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

José Marcos DONADON | Engenheiro Civil EPUSP/78 – CEF

RESUMO

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), nos estudos do Plano Nacional de Energia (PNE) 2050, realizou um “levantamento” que totalizou um potencial hidrelétrico inventariado e não explorado de 52 GW, num total de 196 UHEs com potência acima de 30 MW. Em alienado descompasso com este “fato”, afirmou-se oficialmente que o Brasil vai precisar investir em energia para o futuro em função do aumento da demanda “e do esgotamento do potencial hidrelétrico”. “Desaparecem” assim, como que por encanto, 52 GW: 4 Itaipus, ou 5 Belo Montes, ou 6 Tucuruís, ou 15 Ilhas Solteiras, ou 43 Furnas, ou 248 Igarapavas. Enquanto isso, são anunciadas nucleares e PCHs, ambas com custo do MWh muito superior ao das UHEs, e a São Luiz do Tapajós, de 8.040 MW, jaz morta em armários.

ABSTRACT

The Energy Research Company – EPE, in the studies of the PNE 2050, had carried out a “survey” that totaled an inventoried and untapped hydroelectric potential of 52 GW, in a total of 196 HPSSs with power over 30 MW. In alienated mismatch with this “fact”, it was officially stated that Brazil will need to invest in energy for the future, due to increased demand “and the depletion of hydroelectric potential”. “Gone”, thus, as if by magic, 52 MW: 4 Itaipu hydroelectric plants, or 5 Belo Montes, or 6 Tucuruís, or 15 Ilhas Solteiras, or 43 Furnas, or yet, 248 Igarapavas. Meanwhile, nuclear and PCHs are announced, both with a much higher MWh cost than hydroelectric power plants, and São Luiz do Tapajós, 8.040 MW, lying dead in cabinets.



1. INTRODUÇÃO - A EPE

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE)^[1] tem o papel de gerar subsídios às entidades governamentais e agentes setoriais para definição de políticas e ações necessárias à garantia do suprimento de energia, de forma módica e ambientalmente sustentável, em prol do desenvolvimento econômico e social do País. Ela atua no planejamento do setor energético nacional, conduzindo os estudos e pesquisas que culminam na construção do conjunto de procedimentos que visam a realização da política necessária ao suprimento de energia.

Sua atuação requer ampla articulação com órgãos e instituições setoriais e extra-setoriais. Nesse sentido, a empresa estreita articulação com o Ministério de Minas e Energia (MME), com as agências reguladoras – Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP) e Agência Nacional de Águas (ANA), com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (NOS) e com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE).

No caso das participações nos leilões de energia, a relação se estende a outros órgãos, como a Casa Civil da Presidência da República, o Ministério do Meio Ambiente e o Tribunal de Contas da União, entre outros. Na elaboração dos planos de expansão, incluem-se, ainda, agentes setoriais e instituições de pesquisa nacionais e internacionais.

2. PLANO NACIONAL DE ENERGIA – PNE 2050

Em dezembro de 2018, a EPE publicou um trabalho denominado “Considerações sobre a Expansão Hidrelétrica nos Estudos de Planejamento Energético de Longo Prazo – Documento de Apoio ao PNE 2050”^[2]. Na introdução, este compêndio, fruto de profunda e extensa pesquisa, afirma que “A hidroeletricidade tem sido historicamente a principal fonte de geração do sistema elétrico brasileiro, representando 65% da capacidade instalada de seu parque gerador, e 80% da geração total em 2017. São múltiplos seus atributos: trata-se de uma fonte de geração renovável, economicamente competitiva, possuindo atributos benéficos ao sistema como sua flexibilidade operativa, sendo esta uma característica importante para resposta às flutuações de demanda”.

No capítulo 3, intitulado “O potencial hidrelétrico a ser considerado nos estudos do PNE 2050”, o trabalho contabiliza: “Em 2017, a EPE realizou um levantamento que totalizou um potencial hidrelétrico inventariado e não explorado de 52 GW, num total de 196 UHEs, considerando apenas aquelas com

potência acima de 30 MW. Esse potencial representa cerca de metade da atual capacidade instalada de hidrelétricas no Brasil, da ordem de 100 GW”.

3. O ESGOTAMENTO DO POTENCIAL HIDRELÉTRICO

Em janeiro de 2019, apenas um mês após o louvável trabalho acima ser publicado, os principais jornais do País^[3] divulgaram declaração oficial de que se pretende retomar o plano de construir até oito novas usinas nucleares em território nacional. A informação foi confirmada por meio de nota em defesa pela conclusão de Angra 3. Dizia uma das matérias: “Para o setor nuclear, a conclusão de Angra 3 é importante, pois traz escala a toda a cadeia produtiva do setor, desde a produção de combustível à geração de energia. Isso se torna ainda mais relevante quando se leva em conta que o Brasil vai precisar investir em energia para o futuro, em função do aumento da demanda e do “esgotamento do potencial hidrelétrico. (...) Por fim, o PNE 2030 prevê a construção de quatro a oito usinas nucleares no País. Cenário que tende a ser confirmado pelo PNE 2050, publicação aguardada para breve”.

4. DESAPARECEM 52 GW

Recapitulando, no item 2 consta que a EPE realizou um levantamento que totalizou um “potencial hidrelétrico inventariado e não explorado de 52 GW”. Um mês depois, no item 3 consta que “(...) declarou-se oficialmente que o Brasil vai precisar investir em energia para o futuro, em função do aumento da demanda “e do esgotamento do potencial hidrelétrico (...)”. “Desaparecem”, assim, como que por encanto, 52 GW, ou seja: quatro Itaipus, ou cinco Belo Montes, ou seis Tucuruís, ou 15 Ilhas Solteiras, ou 43 Furnas, ou ainda, 248 Igarapavas.

5. A PRIMEIRA NOVA USINA NUCLEAR DO BRASIL

Em abril de 2019 foi escolhido o local para a construção da primeira das oito novas usinas nucleares do Brasil: Itacuruba, no sertão de Pernambuco. A área fica nas margens do Rio São Francisco (as usinas precisam de água para o funcionamento e refrigeração do reator). Entretanto, segundo publicaram o Valor Econômico^[4] e outros jornais, “a possibilidade de construção de uma usina

nuclear naquele município, conforme previsto em estudo feito pela Eletronuclear, esbarra na legislação estatual, que, através do Artigo 216, veda a instalação de usina do tipo em Pernambuco. Estavam previstos 6,6 GW de nucleares em Itacuruba a um custo de, no mínimo, R\$ 30 bilhões”. O número é três vezes mais caro do que equivalentes grandes hidroelétricas, fora o custo do urânio enriquecido para a operação.

Existem no mundo 450 usinas nucleares operando em 33 países[5]. Após oito anos do trágico acidente de Fukushima (Japão, 2011), período no qual não foi construída nenhuma estrutura similar, é notável que está havendo um aquecimento no ramo. Em outras palavras: 50 usinas (retomadas ou novas) estão em construção atualmente.

Ocorre que, para honrar os compromissos assumidos na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP 21), especialmente sobre a redução de emissão dos gases do Efeito Estufa (EE), os países desenvolvidos, onde o potencial hidroelétrico foi esgotado “de verdade”, estão recorrendo às nucleares porque sabem que as eólicas e fotovoltaicas, além de intermitentes, não atendem grandes cargas.

Vale salientar que 1m² debaixo de um painel solar não produz nada. O mesmo 1m² inundado por uma UHE, além de resultar em uma geração de energia 10 vezes maior, proporciona criação de peixes, instalação de flutuantes para painéis solares (Balbina e Sobradinho), turismo, lazer, além de múltiplos usos de reservatórios, tais como controle de cheias, navegação interior, irrigação, abastecimento de água, etc.

6. SURGEM AS PCHS

Em junho de 2019, a revista Isto É[6] e outras mídias publicaram que em um debate sobre perspectivas socioambientais da matriz elétrica brasileira, com representantes do setor elétrico, “a implementação de 536 Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCHs) no País poderá resultar em investimentos de R\$ 70 bilhões nos próximos anos, e que os projetos básicos delas totalizam quase 8 mil MW de potência”. Entretanto, o MWh médio das PCHs custa 60% a mais do que o das grandes UHEs, como a São Luiz do Tapajós. Isso se dá devido ao fator de economia de escala, já embutido o custo da transmissão.

7. SÃO LUIZ DO TAPAJÓS

Conforme dissemos na 5ª edição desta Revista, o Complexo Hidroelétrico do Tapajós é composto por cinco UHEs: São Luiz,

Jatobá, Jamanxim, Cachoeira do Caí e Cachoeira dos Patos, totalizando 11.090 MW. A São Luiz foi projetada com a Casa de Força mais longa do mundo: 1.200 m (Itaipu tem 980m e Belo Monte tem 850m), para alojar 38 turbinas de 215 MW (as maiores do tipo Kaplan) com 37m de desnível. Sua potência de 8.040 MW equivale a mais do que os “quase” oito mil MW das 536 PCHs acima, e sua construção custaria 1/3 das mesmas, incluído o custo das linhas de transmissão em corrente contínua até os centros de consumo do Sudeste e Centro-Oeste.

No entanto, foram contratados consultores que desmoralizaram as 20.500 páginas de estudos socioambientais do Grupo de Estudos Tapajós, enquadrando o licenciamento do projeto no status de “cancelado”. Todas as 800 UHEs construídas no País inundaram 0,42% do território nacional. É como pegar 238 quarteirões de uma cidade e tirar um para as usinas. E isto sem descontar a área de inundação “antes” da construção delas, que corresponde à própria calha dos rios na cheia.

O reservatório da São Luiz, de 700 km², não é nada diante dos 4 mil km que o Brasil mede na horizontal e na vertical, e dos 8 mil km² que estão sendo desmatados por ano por madeireiros - um aumento de 60% neste ano (uma das consequências é que deixaremos de receber os 400 milhões de dólares da Noruega para a conservação da Amazônia).

8. CONCLUSÃO

Impressiona. Assusta. No breve espaço de tempo de meio ano, 52 GW inventariados e não explorados desaparecem em prol de nucleares caras que já de largada esbarram na legislação e caem. Então surgem as PCHs, também caras. Esta ciranda carente de planejamento gera insegurança para os detentores de ativos no setor, quer públicos ou privados, e espanta os 13 trilhões de dólares que orbitam o planeta à procura de bons investimentos. Exceção se faz à China! Pode ser que o idioma do setor elétrico no futuro seja o mandarim.

Enquanto isso, São Luiz mofa como cancelada dentro de armários do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Armários que talvez nem mais existam...

9. AGRADECIMENTOS

“Pela 1ª vez na história dos 136 anos de construção de hidroelétricas no Brasil, pois a 1ª entrou em operação em 1883 no Ribeirão do Inferno – MG[7], Belo Monte termina e não tem nenhuma outra para começar.”

O autor faz esta singela homenagem àqueles que se dedicaram à construção de uma das mais limpas matrizes energéticas do planeta, que, segundo a EPE, respondeu por 80% da geração total do Brasil em 2017.

Vocês prestaram um “serviço” à Nação, enquanto todos aqueles que hoje negligenciam, desprezam, sucateiam mais de um século de desenvolvimento de equipamentos, técnicas e mão de obra hidroelétrica, da mais humilde à mais especializada, prestam um “desserviço” à Nação.

10. PALAVRAS-CHAVE

Energia, hidroelétrica, nuclear, efeito estufa, esgotamento, insegurança, legislação.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://www.epe.gov.br/sites-pt/a-epe>
[2] <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Considera%C3%A7%C3%B5es%20sobre%20a%20Expans%C3%A3o%20Hidrel%C3%A9trica%20nos%20Estudos%20de%20Planejamento%20Energ%C3%A9tico%20de%20Longo%20Prazo.pdf>

- [3] <https://www.estadao.com.br/politica/republica/brasil-sofre-para-concluir-angra-3-mas-governo-quer-mais-oito-usinas-nucleares-6ma0ocle4eaviznfr3csm4zw/>

- [4] <https://www.valor.com.br/brasil/6199295/construcao-de-usina-nuclear-em-pe-esbarra-em-legislacao-estadual>

- [5] <http://agenciabrasil.ebc.com.br/internacional/noticia/2016-06/setor-nuclear-mundial-se-mobiliza-para-triplicar-numero-de>

- [6] <https://www.istoedinheiro.com.br/mme-quer-viabilizar-construcao-de-536-pequenas-centrais-hidreletricas/>

- [7] MELLO, Flavio Miguez de – A Century of Dam Construction in Brazil que consta no livro Top Most Dams of Brazil editado em 1977 pela Construção Pesada/CBGB.



José Marcos DONADON

Engenheiro Civil formado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1978. Trabalhou durante 40 anos na construção das Hidroelétricas de Itaipu, Porto Primavera, Salto Caxias e Passo São João. Há sete anos atua em Belo Monte. É concursado desde 2010 e trabalha na área de Engenharia da Caixa Econômica Federal. Afilhou-se ao CBDB em 1989 e tem 36 trabalhos publicados em Seminários Nacionais de Grandes Barragens.

AVALIAÇÃO DE RISCO EM BARRAGEM DE REJEITOS DE MINERAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO

Josias Eduardo Rossi LADEIRA | Engenheiro Civil, M.Sc – PUC Minas

Karolina Isabela CORREA | Estudante Engenharia Civil – PUC Minas

Larissa Renata de Oliveira VILELA | Estudante Engenharia Civil – PUC Minas

RESUMO

É sabido que algum nível de risco para a ocorrência de eventos catastróficos em barragens sempre existirá por toda sua vida útil, mesmo que todas medidas mitigadoras tenham sido utilizadas e por melhor que tenha sido a sua construção. Nesse contexto, foi realizada uma avaliação qualitativa de risco em barragem de rejeitos de mineração. A base é o uso de dados e/ou resultados decorrentes da análise de informações técnicas de construção e operação da referida barragem, de modo tal que têm influência sobre a segurança da mesma. Este artigo apresenta dados reais da aplicação do método Análise dos Modos e Efeitos das Falhas (*Failure Mode and Effect Analysis - FMEA*) com objetivo de alertar sobre os aspectos mais críticos para a manutenção da estabilidade desta barragem.

ABSTRACT

It is known that the risk of catastrophic events in dams will always exist throughout its useful life, however good construction has been and even if all mitigating measures have been used. In this context, a qualitative risk assessment was carried out, based on the use of data and / or results resulting from the analysis of technical information on the construction and operation of the dam, in a way that has an influence on the safety of the dam. This paper presents real data from a mining tailings containment dam, in which the analysis method known as Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) was applied, in order to alert the critical of the dam in relation to its stability.



1. INTRODUÇÃO

O rompimento de uma barragem gera um dano muito alto ao vale de jusante, pois além de ocasionar impactos econômicos, ambientais e sociais, pode provocar também inúmeras consequências, como por exemplo a perda de vidas.

Para manter a segurança dessas barragens vem sendo utilizado um método tradicional da engenharia baseado em normas de segurança e comprovado por um histórico de projetos e empreendimentos com registros de bom desempenho. Esse método constitui um meio efetivo de gerenciamento de risco.

Ciente das consequências causadas pelo rompimento de uma barragem para contenção de rejeitos de mineração, o estudo de caso tem como objetivo realizar análises acerca da estabilidade de uma barragem. Para isso foi usado o método de avaliação de risco denominado Análise dos Modos e Efeitos das Falhas (FMEA). Também foram levados em consideração os métodos construtivos, geotécnicos e a instrumentação da barragem em estudo.

Segundo a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM)[1], de 2010 a 2019, apenas no estado de Minas Gerais (MG), ocorreram seis acidentes envolvendo barragens de rejeitos de mineração, danificando extremamente o meio ambiente e o âmbito social.

Com isso, o presente artigo mostra a importância da gestão de risco em uma barragem para evitar os possíveis acidentes e falhas que impactam negativamente no ecossistema no entorno da mesma, assim como os decorrentes de um desastre em grande escala.

2. GESTÃO DE RISCO

Neste item é apresentado o conceito de gestão de risco com enfoque no método FMEA. O estudo mostra as etapas necessárias para se chegar em um número, qualitativo, que diz respeito ao possível modo de ruptura de uma barragem.

2.1. ANÁLISE DE RISCO DE RUPTURA EM ESTRUTURA DE BARRAMENTO

A análise consiste no uso da informação disponível para estimar o risco relativo para indivíduos ou populações, propriedades ou ambientes, decorrentes das condições de perigo apresentadas, envolvendo desagregação ou decomposição do sistema da barragem e fontes de perigo nas suas partes fundamentais. (Melo, 2014)^[2]

O processo de avaliação é ainda considerado muito complexo e com uma execução dispendiosa, mas muito útil para obras onde os riscos são elevados e associados com consequências relevantes. O conhecimento, ainda que pequeno das vulnerabilidades e desempenho da barragem, já assegura a validade de aplicação de tal processo de gestão. (Melo, 2014)

2.2. APRECIÇÃO DE RISCO NA GESTÃO PARA DECISÕES

Segundo Melo (2014), a apreciação de riscos trabalha com a definição de critérios de aceitabilidade e tolerabilidade dos mesmos. Tal operação ultrapassa a fronteira do mundo técnico da engenharia de barragens. Ela leva em conta um enfoque mais subjetivo do julgamento de valores, abrangendo interesses políticos, sociais, econômicos e legais.

Ainda conforme Melo (2014), os critérios de aceitabilidade e tolerabilidade representam os limites máximos admissíveis para o risco. A terminologia de divulgação aceita atualmente é definida pelo Health & Safety (HSE), órgão executivo designado à saúde e à segurança do Reino Unido, país que possui uma longa tradição de regulamentação nessa área.

Os resultados têm um papel fundamental no contexto da gestão de risco, pois é quando acontecem as tomadas de decisões.

2.3. CONTROLE DE RISCO

Segundo Pimenta (2009), citado por Melo (2014), a etapa de controle de risco trata do encerramento de um conjunto de atividades integradas, como ações de decisão, mitigação, prevenção, detecção, planos de emergência, revisão e comunicação de riscos. Segundo AS/NZS (1999) e ICOLD (2005), também apontados por Melo (2014), da perspectiva do gerenciamento, as opções de controle são agrupadas nas seguintes categorias:

- Evitar/eliminar o risco;
- Reduzir/prevenir a probabilidade de ocorrência;
- Reduzir/mitigar as consequências;
- Transferir o risco;
- Conservar/tolerar os riscos residuais.

2.4. MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO RISCO POR FMEA

A análise do risco é feita através da utilização de dados acessíveis para determinar probabilidade e frequência da ocorrência de alguns eventos, bem como a magnitude de suas consequências. Segundo Hartford e Baecher (2004), citado por Vianna (2015), a FMEA é um método de verificação de confiabilidade empregado para mapear e identificar as

implicações de eventos característicos que podem acontecer durante a atuação de um sistema de engenharia, além de priorizar as devidas ações necessárias. Ele é considerado como uma análise qualitativa.

Segundo Caldeira (2008)[3], a metodologia FMEA tem por objetivo eliminar ou controlar todos os modos de deficiência de um sistema que possa acarretar riscos ao seu funcionamento, e ainda torna possível avaliar os efeitos e a sequência de acontecimentos decorrentes de cada modo de falha.

Melo (2014) informa que o primeiro passo é decompor o sistema em itens onde cada um deles deve ter sua função explicitada. O modo de falha pode ser determinado conforme o funcionamento do “item” ao se observar falha ou incompetência de exercer a função desejada/esperada. Em contrapartida, o efeito é relacionado com as consequências, ou seja, com as implicações causadas quando o erro acontece.

Há uma enorme diversidade de apresentações dos formulários de FMEA presentes na literatura, não havendo uma padronização, afirma Melo (2014). Comumente eles apresentam os seguintes itens:

1. Identificação do sistema;
2. Identificação dos subsistemas, componentes (ou elementos);
3. Descrição da função dos componentes;
4. Modo de falha;
5. Efeito;
6. Causa;
7. Controle;
8. Índice de Ocorrência (O) = probabilidade da falha ocorrer;
9. Índice de Severidade (S) = impacto ou gravidade dos efeitos da falha;
10. Índice de Detecção (D) = eficiência (ou probabilidade) dos controles de detecção da falha;
11. Número de Prioridade de Risco (NPR ou RPN – Risk Priority Number) = produto dos índices de ocorrência, severidade e detecção.

As avaliações são feitas levando em conta variados critérios anteriormente estipulados. Cada autor emprega sua própria classificação conforme necessidade de caracterizar os índices, o que explica a gama de tabelas distintas. Melo (2014) explica que a ordem e a prioridade dos modos de falha pode ser efetivada por duas maneiras: pelo índice de criticalidade ou pelo NPR.

Pelo índice de criticalidade o mais comum é a interpretação por matrizes bidimensionais, o que resulta na matriz criticalidade. Através de sua identificação, cada modo de falha é apresentado nas células da matriz de risco.

3. METODOLOGIA

3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

Os levantamentos de dados ocorreram ao longo das diversas etapas que fazem a caracterização de um estudo com o intuito de ter conclusões realistas e correspondentes aos dados obtidos. Neste estudo de caso a coleta de informações abrangeu os seguintes aspectos:

- Análise do método construtivo da barragem em estudo e dos alteamentos realizados;
- Resultados e análises de risco através da ferramenta FMEA aplicada na barragem para contenção de rejeitos de minério em estudo.

Na análise do método construtivo, tanto do dique de partida quanto dos alteamentos, foram levados em consideração os dados descritos por outra pesquisa (Freitas, et al., 2016). Os resultados e análises dos instrumentos de monitoramento geotécnicos foram obtidos por meio do estudo feito pelos autores em uma barragem que não será identificada para resguardar a fonte de informações (por questões éticas e profissionais relacionadas com a empresa proprietária da barragem).

4. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso aqui apresentado foi referenciado a partir de um trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil (PUC Minas) anteriormente produzido para uma barragem de contenção de rejeitos de minério de ferro, localizada em Minas Gerais, de posse da própria mineradora. As informações foram usadas para subsidiar a aplicação do método de avaliação de risco FMEA. Segundo os autores (Freitas et al, 2016)[4], a barragem em ênfase é caracterizada como homogênea e compactada, e o método construtivo projetado foi por alteamentos a jusante.

Os autores (Freitas et al, 2016) afirmam que para a construção dos alteamentos podem ser utilizados materiais de empréstimo ou até mesmo o próprio rejeito, mas apenas as suas partículas grossas. O material foi lançado no talude de jusante e posteriormente compactado adequadamente. O grau de compactação foi assegurado pelo controle da umidade ótima e pela densidade seca máxima.

Investigações geotécnicas identificaram que o material da fundação é constituído por solo coluvionar e/ou aterro, seguido por solo residual de filito sobrejacente ao saprolito. Os autores (Freitas

et al, 2016) ressaltam que os alteamentos foram projetados para serem realizados em partes. O dique de partida foi a primeira etapa e estava com elevação na cota 1240 m e cerca de 30 m de altura. Os alteamentos subsequentes obedeceram a ordem de elevação de 10 m em 10 m, sendo o sexto alteamento o último.

Para a caracterização do material da área de empréstimo utilizado na execução dos alteamentos, Freitas et al (2016) realizaram os seguintes ensaios pela PUC Minas:

1. Análise granulométrica por sedimentação;
2. Limites de Atterberg (LL, LP);
3. Densidade real dos grãos pelo método do picnômetro;
4. Cisalhamento direto não drenado e não consolidado;
5. Compressão simples.

4.1. MÉTODOS CONSTRUTIVOS

Para efeitos de verificação e análise, os autores (Freitas et al, 2016) apresentaram os métodos construtivos e controles tecnológicos, bem como os elementos que constituem a barragem. Ver o Quadro 1.

4.2 ANÁLISE DE INSTRUMENTAÇÃO

Freitas et al (2016) apontam que a barragem em estudo possui instrumentos de monitoramento ao longo de todo o maciço que permitem a análise de indicadores durante toda a vida operacional da mesma. Esses instrumentos monitoram o nível d'água (indicador de nível d'água), a poropressão (piezômetro), os deslocamentos verticais e horizontais e o medidor de vazão na saída da drenagem interna.

Os valores lidos por todos os instrumentos estavam dentro da normalidade. Para Freitas et al (2016) houveram variações crescentes nos valores medidos para os instrumentos devido ao fato de a barragem ainda não estar operando em nível máximo. Ou seja, o aumento do seu nível tem sido progressivo e mensal.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir está o sistema de avaliação de risco em análises subdivididas em componentes básicos, potenciais modos de falha de cada componente e de cada função. As informações foram obtidas através da aplicação do método Análise dos Modos e Efeitos das Falhas (FMEA).

5.1 ANÁLISE DE RISCO PELO MÉTODO FMEA

Neste artigo, a análise feita com o método FMEA foi empregada como uma ferramenta que identifica os modos de falha e suas consequências. O objetivo foi descobrir os riscos que a barragem em estudo está sujeita. Este método, a partir da exposição isolada da possível falha no projeto, processo, construção e/ou operação, tem como objetivo gerar um plano para reduzir perigos e buscar ações de melhoria contínua.

Para a obtenção desses objetivos foram aplicados fatores de determinação, sendo eles:

- Modos potenciais de falha (Ocorrência)- Oi;
- Causas e efeitos (Severidade) – Si;
- Identificação das deficiências de projeto (Detecção)- Di.

Para cada falha identificada ao longo do processo são atribuídos índices para cada categoria. Esses índices podem variar de 1 a 5 ou de 1 a 10. Para o presente artigo, a partir de referenciais teóricos e para fins didáticos, a escala adotada varia de 1 a 5. Para isso foi elaborada a Tabela 01.

a) Índice de Ocorrência- Oi

Fonseca (2018)[5] afirma que o Índice de Ocorrência define a frequência em que as falhas podem ocorrer e que são proporcionais, ou seja, quanto maior o Oi, maior a probabilidade de ocorrência de falha.

MÉTODOS CONSTRUTIVOS	
LIMPEZA DA FUNDAÇÃO	1 - Retirada de materiais indesejáveis, removendo o solo superficial, matéria orgânica e os materiais que possuíam baixa capacidade de carga, identificado anteriormente através de sondagens. 2- Após concluídas as escavações necessárias e obrigatórias, a área onde foi construída a fundação, recebeu uma camada de solo argiloso, filtro e transições.
CONSTRUÇÃO DO MACIÇO PRINCIPAL	A qualidade na execução do aterro e da compactação se deu através do controle de terraplenagem e verificação dos parâmetros de compactação. As etapas de construção e controle da mesma deve garantir a compactação de forma homogênea, atendendo as propriedades geotécnicas especificadas previamente.
SISTEMA EXTRAVASOR	Foi utilizado um tempo de retorno de 500 anos para o dimensionamento hidráulico, e 10.000 anos para o dimensionamento da borda livre do barramento. Compõe a estrutura do sistema extravasor, os seguintes elementos: canal de aproximação, caixa de mudança de direção, canal rápido e bacia de dissipação.

QUADRO 1 –
Métodos
construtivos

b) Índice de Detecção- Di

Segundo Fonseca (2018), o Di avalia a probabilidade de se detectar os motivos das falhas antes delas ocorrerem. Ele é extremamente necessário, pois numa estrutura alguns mecanismos desencadeadores de acidentes não demonstram alertas claros ou em tempo de se evitar a falha. Uma rigorosa inspeção deve ser considerada para a estrutura.

c) Índice de Severidade- Si

O Si está relacionado com a gravidade da consequência da falha, ou seja, quanto maior o índice, mais grave será o efeito.

Nos itens a seguir são apresentados e discutidos os resultados deste estudo, correlacionando os mesmos através da ferramenta FMEA.

5.2 APLICAÇÃO DO QUADRO DE ANÁLISE FMEA

A etapa inicial para a elaboração do quadro do FMEA deste trabalho é a identificação e estruturação dos componentes da barragem de contenção de rejeitos de minério. O critério para a escolha dos sistemas e subsistemas é em função da importância dos componentes dessa barragem, de maneira a definir os possíveis modos de falhas e seus efeitos. No quadro 2 são apresentados os itens que exibiram maiores valores de RPNi. Eles são os que requerem maior atenção na análise de riscos.

Para a aplicação do FMEA foi considerado o cenário da disposição de rejeitos de minério de ferro da barragem em estudo. Desta forma, são apresentados os principais itens que compõem o sistema da barragem e seus respectivos subsistemas:

1. Corpo da barragem, composto por crista, núcleo, talude e fundação;
2. Sistema de drenagem interna, com saída de dreno de pé;
3. Sistema de drenagem superficial, com extravasor;
4. Sistema de monitoramento, com piezômetro, indicador de nível d'água e medidor de vazão.

TABELA 1 – índices FMEA

Para obter uma avaliação de risco através da ferramenta FMEA se utiliza os índices citados acima. Eles compõem o Número Potencial de Risco (RPN- *Risk Priority Number*), que é obtido através da multiplicação dos índices Oi, Di e Si.

QUADRO 2 – Quadro de aplicação FMEA

Função	Falha	Efeito final	Si	Causa	Oi	Controle	Tipo de controle	Di	RPNi
1. Corpo da barragem									
1.1 Núcleo									
Redução de condutividade hidráulica	Redução de percolação	Liquefação	5	Dissolução de materiais	2	Adequação de projeto, inspeção visual instrumentação	Prevenção e detecção	3	30
1.2 Talude alteado a jusante									
Reter rejeitos	Instabilização devido aos movimentos de massa do solo	Redução do volume do maciço - perda de estanqueidade do sistema - ruptura da barragem	5	Alteração físico-químicas dos solos, deficiente ligação entre as camadas de compactação	2	Adequação de projeto, inspeção visual instrumentação	Prevenção e detecção	2	20
1.3 Fundação									
Assegurar a estabilidade do maciço	Recalque por falha de capacidade de carga	Galgamento por rebaixamento e piping	5	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção e detecção	4	40
2. Sistema de drenagem interna									
2.1 Saída de dreno de pé (vazão de descarga)									
Monitorar eficiência do sistema de filtro	Saturação do maciço da barragem	Liquefação	5	Inadequação de projetos ou construção	2	Acompanhamento do volume de descarga em relação a variação do NA do reservatório	Prevenção e detecção	2	20
3. Sistema de drenagem superficial									
3.1 Extravasor									
Impedir a passagem da água sobre a barragem	Não ter capacidade suficiente para conduzir o volume total de água precipitada	Galgamento	5	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção e detecção	2	20

5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO QUADRO DE APLICAÇÃO DE FMEA

Com base nos resultados obtidos pelo Quadro 2 foram analisados os valores de RPNi.

5.3.1. ANÁLISE PARA ÍNDICE DE SEVERIDADE

Foi considerado que quanto maior o dano, maior a severidade. Tendo em vista que o grau de severidade leva em conta este fator, foi definido que o dano irreversível seria o que ocasiona enormes consequências, como perda de vidas, severos impactos ambientais, sociais e econômicos, ocasionados pelos diversos tipos de rupturas (liquefação, galgamento e piping). Sendo assim, este tipo de ocorrência deveria receber nota 5, o mais grave da escala. Para agravos de menores proporções e passíveis de correções ou prevenções foram adotados fatores decrescentes da escala já referida.

5.3.2. ANÁLISE PARA ÍNDICE DE OCORRÊNCIA

Para as probabilidades de ocorrência foram analisados os métodos construtivos da barragem em estudo. Como na execução do barramento foram adotados parâmetros executivos altos, é possível afirmar que a probabilidade da ocorrência de um efeito final grave é baixa. (Vale ressaltar que houve a substituição de todo o solo indesejável por solo argiloso, o grau de compactação e controle tecnológico foi adequado, os tempos de retorno para o sistema extravaso foram elevados, entre outras ações executadas). Portanto, os índices foram avaliados como baixos.

5.3.3. ANÁLISE PARA ÍNDICE DE DETECÇÃO

Com relação ao nível de detecção, quanto mais fácil a visualização e/ou detecção do problema, menor é o valor deste dano na escala. Portanto, problemas com fácil inspeção, monitoramento e manutenção foram avaliados com valores baixos. Para efeitos que ocorrem na parte interna ao barramento, como fundação e núcleo, as notas foram mais altas justamente porque são aspectos com maior dificuldade no controle e na detecção.

6. CONCLUSÃO

Estruturas de grande porte como barragens são potenciais causadoras de grandes danos quando falham. Tendo em vista os

desastres catastróficos ocorridos no Brasil entre 2015 e 2019, é fundamental a realização de uma melhor gestão de risco. Afinal, é com base nos relatórios gerados pelas análises que se torna possível verificar a perda de funcionalidade da estrutura de uma determinada barragem e, conseqüentemente, seu rompimento.

Devido à necessidade de acompanhamento contínuo em barragens, a análise de riscos, empregando a utilização da ferramenta FMEA, tem possibilitado identificar e ordenar os principais problemas que são causados pela perda de funcionalidade de suas estruturas, podendo levar ao rompimento do barramento.

Com base nos dados obtidos neste estudo foi possível verificar que no processo de execução do corpo da barragem, o bom conhecimento técnico foi de suma importância para garantir o alto grau de qualidade e segurança. Para isso foram feitos ensaios geotécnicos para a caracterização dos materiais seguindo as especificações previstas no projeto. Foram realizados também monitoramentos periódicos através de equipamentos específicos introduzidos no corpo da barragem e um adequado acompanhamento a fim de evitar o surgimento de falhas durante o processo de construção.

Para a gestão de risco da barragem em estudo foi aplicado o método FMEA. Ele possibilitou analisar de forma individual as estruturas que compõem o barramento. Através desta ferramenta foram identificados os pontos mais instáveis da barragem. Além disso, foram elaboradas soluções para atenuar possíveis falhas futuras nesses locais considerados críticos (pois eles comprometem a segurança e a estabilidade da barragem em questão).

7. PALAVRAS-CHAVE

Barragem; ruptura; gestão de risco; FMEA.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FEAM, Fundação Estadual do Meio Ambiente. Disponível em < <http://www.feam.br/> > Acesso em 09 de jul. de 2019
- [2] MELO, Alexandre Vaz de. Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: Estudo de caso de barragens da Cemig GT. Belo Horizonte, 2014.
- [3] VIANNA, Luiz Filipi Venturi. Metodologias de análise de risco aplicadas em planos de ação de emergência de barragens: auxílio ao processo de tomada de decisão. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade

Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <<https://posgrad.etg.ufmg.br/wp-content/uploads/2016/12/diss-059.pdf>>. Acesso em 20 mar.2019.

[4]CALDEIRA, Laura Maria Mello Saraiva. Análise de riscos em geotecnia: aplicação a barragens de aterro. Lisboa, 2008.

[5]FREITAS, Guilherme Henrique Dias et al. AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO: Um estudo de caso. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia civil)- Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

[6]FONSECA, Marcus Nicholas Esquivel. Análises dos modos de falhas e efeitos (FMEA) para avaliação de um acidente em barragem de rejeitos: um evento de mineração no Brasil. 2018. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Industrial) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018. Disponível em : <https://pei.ufba.br/sites/pei.ufba.br/files/dissertacao_marcus_nicholas_rev_21-02-2018_correcao_pos_rev_banca_01.pdf>. Acesso em 04 mai. 2019.



Josias Eduardo Rossi LADEIRA

Engenheiro Civil graduado pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUCMinas/1988). É especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho (UFMG/1991), em Engenharia da Qualidade (PUC/1993) e em Gestão Ambiental (PUCMinas/2001). Possui mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos com linha de pesquisa em avaliação de risco de estabilidade de barragem de terra para evitar impactos ambientais (UFMG/2007). Atua como coordenador do curso de Engenharia Civil e de cursos de pós-graduação da PUCMinas.



Karolina Isabela CORREA

É graduanda em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUCMinas/2019) e faz parte do programa Futuros Engenheiros (SENAI/2017). Atua como projetista nas áreas de terraplenagem, drenagem, pavimentação, sinalização, abastecimento de água, esgotamento sanitário e acesso rodoviário na empresa Geoline Engenharia.



Larissa Renata de Oliveira VILELA

É graduanda em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUCMinas/2019), técnica em Edificações (CEFET-MG/2014) e Auxiliar de Topografia (SENAI/2015). Trabalha na empresa Projelet como técnica em Edificações desenvolvendo projetos elétricos e afins.

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE BARRAGENS DE CONCRETO POR MEIO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL – ESTUDO DE CASO

Amanda de Moraes RICARDI | Engenheira Civil – Universidade Estadual Paulista

Euclydes CESTARI Junior | Engenheiro Civil MSc – Geometrisa Serviços de Engenharia Ltda

Ludmilla Freitas PEREIRA | Engenheira Civil – Geometrisa Serviços de Engenharia Ltda

Lício Venancius de OLIVEIRA da Silva | Engenheiro Eletricista – Água Limpa Energia S/A

RESUMO

A PCH Água Limpa, concessão outorgada à empresa Água Limpa Energia S.A, tem potência instalada de 14,0 MW e está localizada entre os municípios de Dianópolis e Novo Jardim, no estado do Tocantins. Construída com concreto compactado a rolo (CCR) e concreto de massa convencional (CCV), a barragem é composta por três estruturas. Este trabalho apresenta a análise da estabilidade dos barramentos por meio do método de elementos finitos, com auxílio do software ANSYS para estimar a distribuição das tensões no interior da barragem e verificar eventual tendência de ruptura localizada. Os resultados apresentaram Fatores de Segurança (FS) satisfatórios e tensões aceitáveis para compressão, tração e cisalhamento.

ABSTRACT

The hydropower plant Água Limpa, a company awarded to Água Limpa Energia SA, with an installed capacity of 14.0 MW, is located between the municipalities of Dianópolis and Novo Jardim, in the state of Tocantins. It was constructed with Compact Compact Velvety (CCV) and Conventional Mass Concrete (CMC), and is composed by three structures. This work presents an analysis of the data stability of the dam with the finite element method by means of the software ANSYS to estimate the parameters. The results presented satisfactory Safety Factors (SF) and acceptable tensions for compression, traction and shear.

1. INTRODUÇÃO

A PCH Água Limpa possui três estruturas de concreto: uma localizada entre a tomada d'água e a ombreira direita com 33,70 m de comprimento; outra entre a tomada d'água e o vertedouro de 22,50 m de comprimento; e a terceira entre o vertedouro e o fechamento em solo e enrocamento da ombreira esquerda possuindo 39,00 m de comprimento.

A estrutura tem 98,20 m de extensão em sua crista, que se encontra na elevação 542,00 m. Esta estrutura apresenta paramento de montante igual ao de jusante. A Figura 1 ilustra a vista de montante da barragem da PCH Água Limpa, cujos cortes B-B, D-D e E-E foram estudados.

Para a modelagem, em cada seção foi necessário calcular a área da seção que contribui para a estabilidade da barragem e a carga d'água para cada uma das condições de carregamento, sendo elas: Condição de Carregamento Normal (CCN), Condição de Carregamento Excepcional (CCE), que corresponde a uma combinação de ações com baixa probabilidade de ocorrência, considerando apenas uma ação excepcional, como condições hidrológicas excepcionais (N.A. máximo maximorum), efeitos sísmicos; e Condição de carregamento limite (CCL), que corresponde a uma combinação de ações com muito baixa probabilidade de ocorrência, considerando mais de uma ação excepcional, como a ocorrência simultânea de condições hidrológicas excepcionais e efeitos sísmicos.

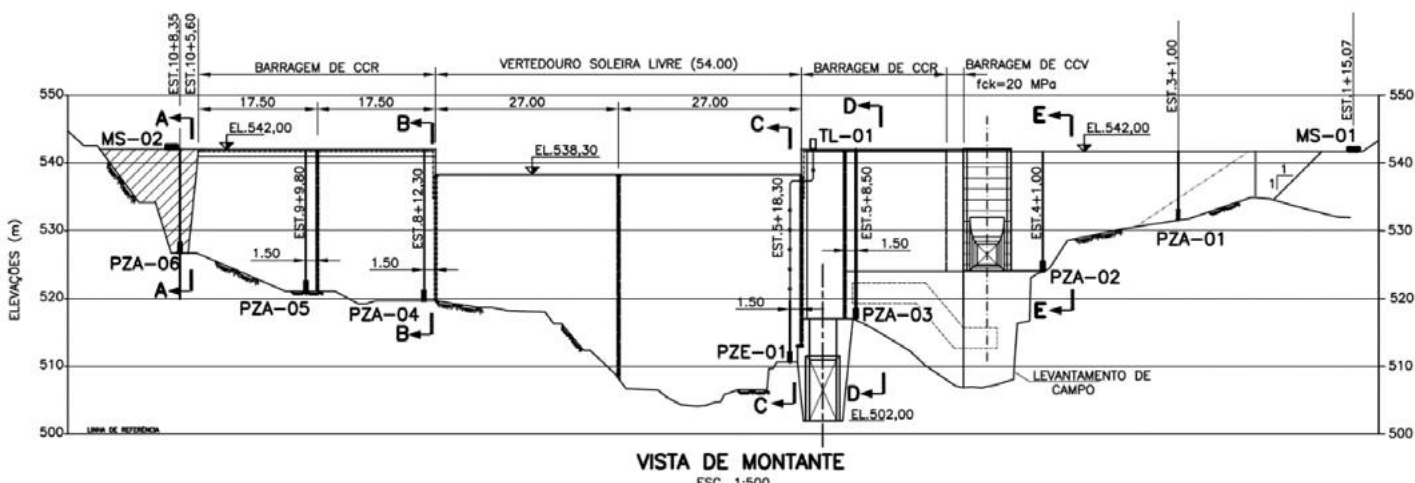


FIGURA 1 - Vista de montante da barragem da PCH Água Limpa (Água Limpa Energia, 2006)

2. METODOLOGIA

CONDIÇÕES DE CONTORNO

A verificação da segurança global da barragem de concreto foi feita por meio da análise da estabilidade, considerando inicialmente a estrutura como um corpo rígido e estudando três possíveis cenários de ruptura: flutuação, tombamento e deslizamento. Em uma segunda análise, foi utilizado o método de elementos finitos, com auxílio do software ANSYS, para estimar a distribuição das tensões no interior da barragem e verificar se há tendência de ruptura localizada. Os seguintes manuais foram usados como normas ou diretrizes na realização desta análise:

- Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas – Eletrobrás (2003);
- *Seepage Analysis and Control for Dams - U.S. Army Corps of Engineers* (1993);
- NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento (2003).

É importante ressaltar que para todos os cenários foi considerado para a subpressão um diagrama constante, variando linearmente, sem a presença de linhas de drenagem. Os seguintes parâmetros foram adotados:

	Concreto	Material Assoreado (Lodo do Fundo)	Fundação	Água
Peso Específico (kN/m ³)	24 (CCR) e 25 (CCV)	19	-	10
Ângulo de Atrito (°)	-	30	35	-
Coesão (kPa)	-	-	300	-
Resistência característica – fck	9	-	-	-

2.2 BASE DE CÁLCULOS

2.2.1 ESTABILIDADE

O cálculo de estabilidade da barragem foi feito com auxílio de uma planilha de cálculo. As equações utilizadas para calcular os esforços considerados para todos os casos:

$$P = \gamma_c \cdot \text{volume de concreto} \quad (1)$$

Onde: P- peso da barragem; γ_c : peso específico do concreto armado.

A presença de água, tanto a montante quanto a jusante, gera um empuxo proporcional à altura da coluna d'água.

$$E_{M,J} = \gamma_w \frac{H_{M,J}^2}{2} \quad (2)$$

Onde: $E_{M,J}$: Empuxo de Montante ou Jusante; γ_w : Peso específico da água; $H_{M,J}$: Altura da coluna de água a montante ou jusante.

A subpressão ocorre devido à percolação da água na fundação da barragem e se contrapõem ao peso, podendo causar a flutuação da estrutura. Esse esforço é calculado de maneira simplificada, admitindo que a pressão varia linearmente ao longo da barragem, sendo o seu valor total igual ao produto do volume do prisma de pressões, pelo peso específico da água que atua no centro geométrico do prisma.

$$U = \gamma_w \cdot \text{volume do prisma} \quad (3)$$

Onde: U: Subpressão; γ_w : Peso específico da água.

O manual da Eletrobrás (2003) recomenda que se considere o acúmulo de lodo no fundo do reservatório junto ao paramento de montante da barragem, correspondendo a 10% da lâmina d'água na face da barragem, tanto a montante quanto a jusante. Os dados de atrito e massa específica do lodo são estimativas e o lodo atua desfavorável a estabilidade da barragem. O empuxo devido ao lodo atua a um terço (1/3) da altura do prisma e pode ser calculado pela equação:

$$E_D = \frac{\gamma_s h_s^2}{2} \frac{(1 - \sin \varphi)}{(1 + \sin \varphi)} \quad (4)$$

Onde: E_D : Empuxo do material decantado; γ_s : Peso específico do material submerso; h_s : Espessura do material submerso, correspondente a 10% da altura da barragem; φ : Ângulo de atrito interno.

Os esforços sísmicos são considerados como localizados no centro geométrico da barragem. Estes esforços são considerados desfavoráveis e são representados considerando 3% do peso na vertical e 5% na horizontal. É recomendado pela Eletrobrás estudar o efeito hidrodinâmico caso ocorra um terremoto. Segundo Gerscovich (2012), a força e o momento gerado por este fenômeno podem ser calculados a partir das equações:

$$S = \frac{2}{3} \frac{0,817 H_M}{\sqrt{1 - 7,74 \left(\frac{H_M}{1000} \right)^2}} H_M \quad (5)$$

$$M = \frac{2}{5} S \cdot H_M \quad (6)$$

Onde: S: Força total no fundo do reservatório; p_0 : sobrepressão horizontal; H_M : Altura da coluna de água a montante; M: Momento gerado pela força S.

2.2.2 PERCOLAÇÃO NA BARRAGEM

A determinação dos Fatores de Segurança (FS) foi feita utilizando as equações apresentadas abaixo:

Fator de Segurança à Flutuação (FSF):

$$FSF = \frac{\Sigma \text{Forças gravitacionais}}{\Sigma \text{Forças de subpressão}} \quad (7)$$

Fator de Segurança ao Tombamento (FST):

$$FST = \frac{\Sigma \text{Momentos estabilizantes}}{\Sigma \text{Momento de tombamento}} \quad (8)$$

Fator de Segurança ao Deslizamento (FSD):

$$FSD = \frac{\frac{\Sigma(Ni) \cdot \tan(\phi_i)}{FSD\phi} + \frac{\Sigma(Ci \cdot Ai)}{FSDc}}{\Sigma Ti} \geq 1 \quad (9)$$

Onde: FSD = Fator de Segurança ao Deslizamento; $FSD\phi$ = Fator de redução da resistência ao atrito; $FSDc$ = Fator de redução da resistência à coesão; ΣNi = Somatório das forças normais à superfície de deslizamento em análise; ϕ_i = Ângulo de atrito característico da superfície de deslizamento em análise; Ci = Coesão característica ao longo da superfície de deslizamento; Ai = Área efetiva comprimida da estrutura no plano em análise; ΣTi = Somatório das forças paralelas à superfície de deslizamento.

Os fatores de redução mínimos a serem adotados estão expostos na Tabela 2. Entre parênteses estão os fatores de redução caso o conhecimento sobre a qualidade do solo seja precário ou o material não apresente comportamento constante.

Fatores de Segurança	Casos de carregamento			
	CCN	CCE	CCL	CCC
FSDc	3,0 (4,0)	1,5 (2,0)	1,3 (2,0)	2,0 (2,5)
FSD ϕ	1,5 (2,0)	1,1 (1,3)	1,1 (1,3)	1,3 (1,5)

TABELA 2 - Fatores de segurança (Eletrobrás, 2003)

2.2.3 FATORES DE SEGURANÇA REQUERIDOS

Na Tabela 3 estão os critérios de aceitação do manual “Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas”, elaborado pelas Centrais Elétricas Brasileiras S.A. em 2003.

Fatores de Segurança	Casos de carregamento			
	CCN	CCE	CCL	CCC
FSF >	1,3	1,1	1,1	1,2
FST >	1,5	1,2	1,1	1,3
FSD >	1,0	1,0	1,0	1,0

TABELA 3 - Fatores de segurança (Eletrobrás, 2003)

ANÁLISE DE TENSÕES NA BARRAGEM DE CONCRETO

Para fins de análises de tensões na estrutura da barragem de concreto, foi realizada uma análise estrutural. Para isso, a barragem foi seccionada em 3 porções:

- Barragem de Concreto de Margem Esquerda (CCR);
- Barragem de Concreto Central (CCR); e
- Barragem de Concreto de Margem Direita (CCV).

De posse dos projetos executivos da PCH Água Limpa foi possível gerar o modelo tridimensional destas estruturas no modo *Design Models* do software ANSYS. Foram efetuadas simulações para os casos de Condição de Carregamento Normal (CCN), Condição de Carregamento Excepcional (CCE1 e CCE2), Condição de Carregamento Limite (CCL).

2.3.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO E PARÂMETROS UTILIZADOS

Como condição de contorno, o contato de cada estrutura com a fundação foi considerado como um engaste. Já o contato entre as estruturas foi considerado como um apoio, considerando apenas compressão. O contato entre as estruturas das extremidades com as ombreiras foi considerado como um apoio com grau de liberdade restrito em Y e X.

A resistência característica do Concreto Convencional (CCV) utilizada na simulação foi retirada dos projetos executivos

disponibilizados pela contratante, com valores de 9MPa, 12MPa e 15 MPa (Face Montante). Já a resistência característica do Concreto Compactado a Rolo (CCR) foi adotada conforme dados presentes em literatura e projetos semelhantes (10 MPa).

O Módulo de Elasticidade Secante (E_{cs}) – o qual é utilizado nas análises elásticas de projeto especialmente para determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço, foi obtido a partir dos parâmetros estabelecidos na NBR 6118. O coeficiente de Poisson adotado foi de 0,2, de acordo com a mesma norma.

2.3.2 TENSÕES ADMISSÍVEIS

Segundo consta no manual “Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas”, elaborado pela Eletrobrás: “As tensões admissíveis de compressão e de tração serão sempre fornecidas em função da resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}), que deverá ser especificada nos desenhos do projeto executivo”. Para isso é preciso estabelecer as tensões admissíveis do concreto à compressão e à tração, norteadas pelas tabelas abaixo.

É importante calcular as tensões admissíveis nas fundações, obtida pela relação entre a capacidade de carga da fundação e seu

Caso de Carregamento	Tensão Admissível à Compressão
CCN	0,50.fck
CCC	0,55.fck
CCE	0,60.fck
CCL	0,65.fck

TABELA 4 - Valores de Tensões admissíveis do concreto à compressão (Eletrobrás, 2003)

Caso de Carregamento	Tensão Admissível à Tração
CCN	0,050.fck
CCC	0,055.fck
CCE	0,060.fck
CCL	0,065.fck

TABELA 5 - Valores de Tensões admissíveis do concreto à tração (Eletrobrás, 2003)

coeficiente de segurança. Esta, segundo o manual da Eletrobrás, consiste na capacidade de carga do material de fundação e deve ser obtida por métodos adequados, a partir de dados obtidos em ensaios “in situ” e de laboratório. Entretanto, por não dispormos destes valores, não foram calculados os valores de tensões admissíveis para a fundação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 FATORES DE SEGURANÇA

A Tabela 6 apresenta um resumo dos Fatores de Segurança encontrados para as seções estudadas.

CASO	CCN	CCE1	CCE2	CCL	Seção
FSF	2,78	2,56	2,51	2,34	B-B
FST	1,61	1,38	1,33	1,15	
FSD	1,45	1,81	1,81	1,80	
FSF	4,37	3,87	3,41	3,09	C-C
FST	1,81	1,52	1,48	1,26	
FSD	1,16	1,32	1,39	1,41	
FSF	3,15	2,88	2,85	2,63	D-D
FST	1,83	1,54	1,51	1,29	
FSD	1,59	1,90	1,91	1,90	
FSF	3,28	2,99	2,97	2,73	E-E
FST	1,91	1,59	1,58	1,34	
FSD	1,64	1,93	1,95	1,94	

TABELA 6 - Fatores de Segurança calculados para as seções de concreto

Com base nos valores calculados foi possível observar que a barragem de concreto apresenta um comportamento satisfatório. Para a seção do vertedouro foi feito um estudo mais detalhado, utilizando as pressões medidas nos relatórios de auscultação para estimar a distribuição de subpressão no contato entre a fundação e a barragem. Para as outras seções foram utilizados os dados de projeto para a distribuição de pressão.

3.2 BARRAGEM DE CONCRETO DE MARGEM DIREITA (CCV)

As Tabelas 7 e 8 apresentam a relação entre as tensões obtidas e as tensões admissíveis:

CCE	CCV- 9 MPa	Compressão (MPa)	Tração (MPa)
	Tensão Normal Simulada- σ_y	0,594	0,486
	Tensão Normal Simulada- σ_z	0,06	0,246
	Tensão Admissível (Eletrobrás, 2003)	5,4	0,54

TABELA 7 - Tensões Resultantes e Tensões Admissíveis – CCV 9 MPa

CCE	CCV- 12 MPa	Compressão (MPa)	Tração (MPa)
	Tensão Normal Simulada- σ_y	0,459	0,621
	Tensão Normal Simulada- σ_z	0,445	0,246
	Tensão Admissível (Eletrobrás, 2003)	7,2	0,72

TABELA 8 - Tensões Resultantes e Tensões Admissíveis – CCV 12 MPa

Em uma análise geral, as tensões observadas na estrutura não ultrapassaram os valores admissíveis considerados em norma para o CCE.

A Figura 2 apresenta o modelo tridimensional da barragem de concreto da margem direita (CCV) e o resultado das análises de deformação no sentido fluxo (eixo Z), de tensões normais (eixo y), tensões normais no sentido fluxo (eixo Z) e tensões cisalhantes no plano XZ.

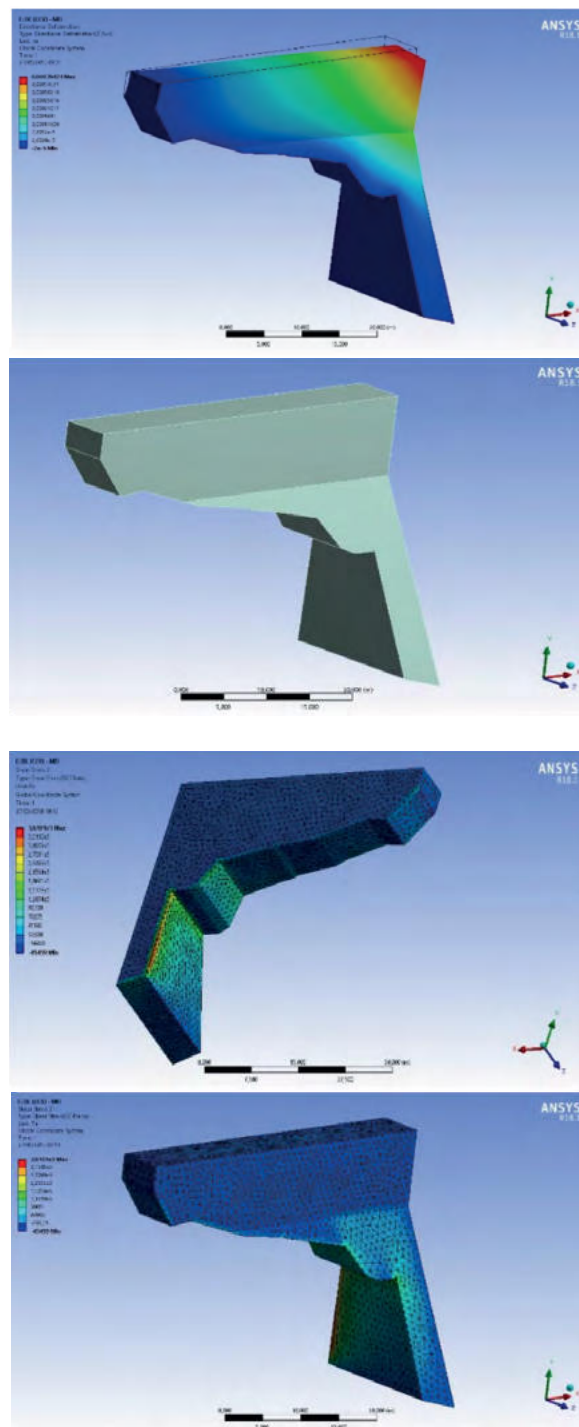


FIGURA 2 - Modelagem para a Barragem CCV Margem Direita

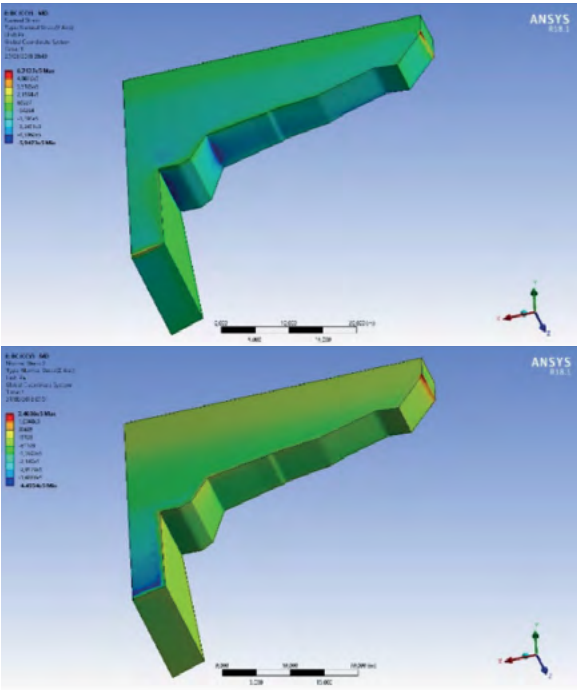


FIGURA 2 - Modelagem para a Barragem CCV Margem Direita

3.2.1 BARRAGEM DE CONCRETO CENTRAL (CCR)

As Tabelas 9 e 10 apresentam a relação entre as tensões obtidas e as tensões admissíveis:

CCE	CCV- 12 MPa	Compressão (MPa)	Tração (MPa)
	Tensão Normal Simulada- σ_y	0,72	0,35
	Tensão Normal Simulada- σ_z	0,49	0,49
	Tensão Admissível (Eletrobrás, 2003)	7,2	0,72

TABELA 9 -Tensões Resultantes e Tensões Admissíveis – CCV 12 MPa

CCE	CCR- 10 MPa	Compressão (MPa)	Tração (MPa)
	Tensão Normal Simulada- σ_y	0,92	0,00
	Tensão Normal Simulada- σ_z	0,95	0,00
	Tensão Admissível (Eletrobrás, 2003)	6,0	0,6

TABELA 10 -Tensões Resultantes e Tensões Admissíveis – CCR 10 MPa

Pelas análises fica perceptível que as tensões observadas na estrutura não ultrapassaram os valores admissíveis considerados em norma para o CCE. A Figura 3 apresenta o modelo tridimensional da barragem de concreto central (CCR) e o

resultado das análises de deformação no sentido fluxo (eixo Z), de tensões normais (eixo y), tensões normais no sentido fluxo (eixo Z) e tensões cisalhantes no plano XZ.

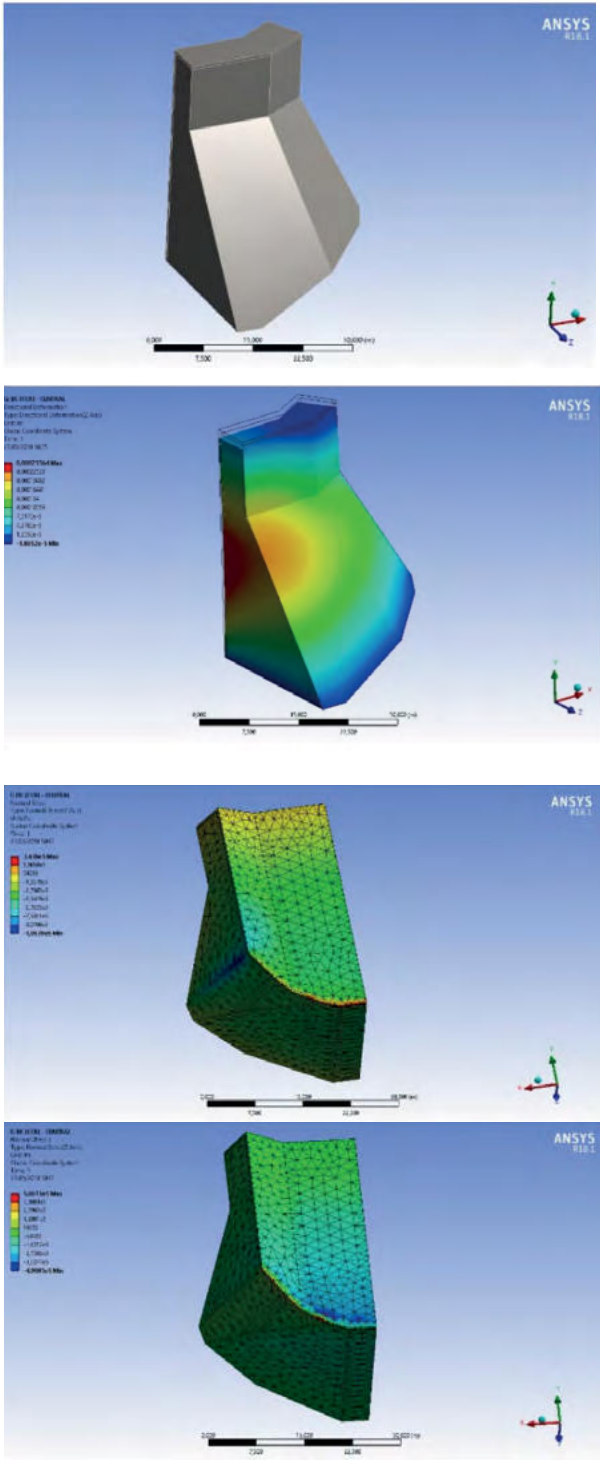


FIGURA 3 - Modelagem para a barragem CCR Central

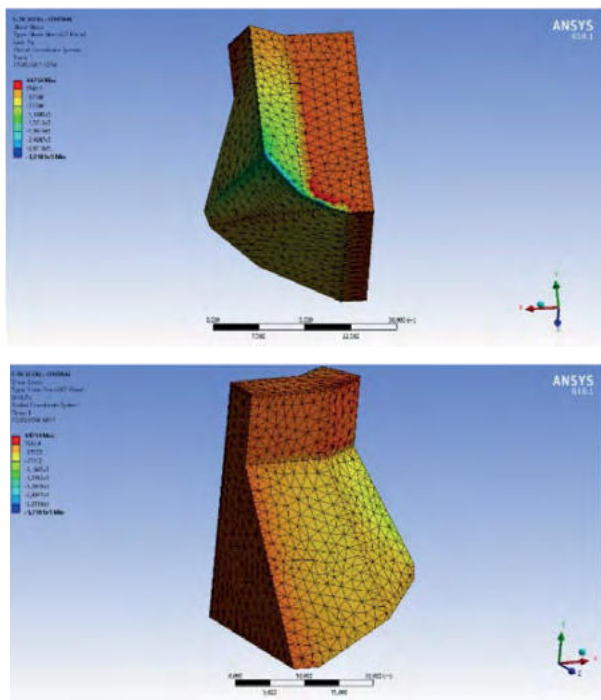


FIGURA 3 - Modelagem para a barragem CCR Central

modelo tridimensional da barragem de concreto da margem esquerda (CCR), os resultados das análises de deformação no sentido fluxo (eixo Z) e de tensões normais (eixo y), normais no sentido fluxo (eixo Z) e cisalhantes no plano XZ.

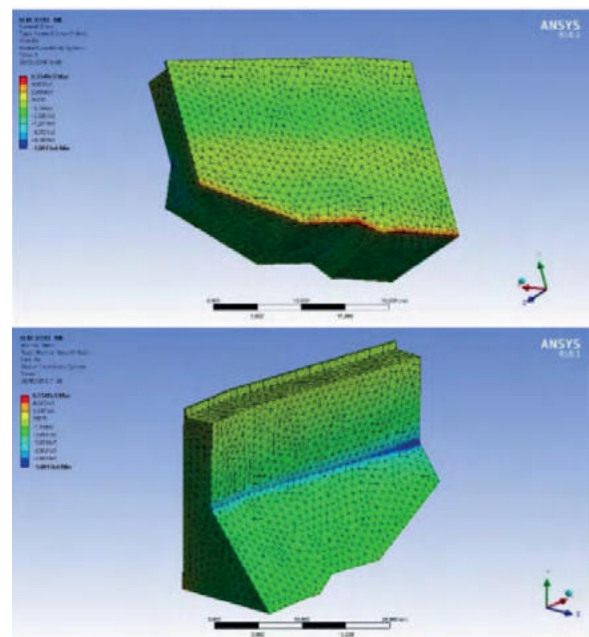
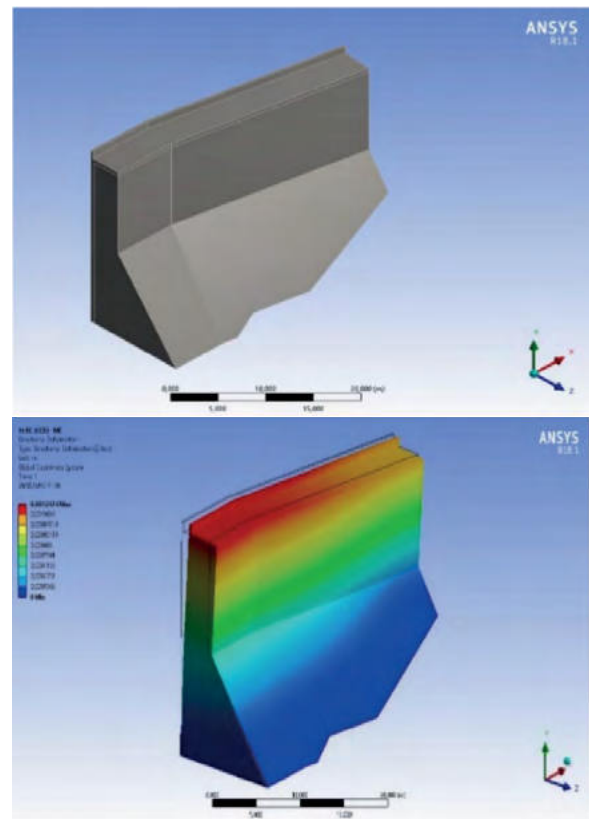


FIGURA 4 - Modelagem para a barragem de CCR da margem esquerda

3.2.2 BARRAGEM DE CONCRETO DE MARGEM ESQUERDA (CCR)

As Tabelas 11 e 12 apresentam a relação entre as tensões obtidas e as tensões admissíveis:

CCE	CCV- 15 MPa	Compressão (MPa)	Tração (MPa)
	Tensão Normal Simulada- σ_y	1,10	0,65
	Tensão Normal Simulada- σ_z	0,26	0,10
	Tensão Admissível (Eletrobrás, 2003)	9,0	0,9

TABELA 11 - Tensões Resultantes e Tensões Admissíveis – CCV 15 MPa

CCE	CCR- 10 MPa	Compressão (MPa)	Tração (MPa)
	Tensão Normal Simulada- σ_y	2,12	0,46
	Tensão Normal Simulada- σ_z	0,54	0,5
	Tensão Admissível (Eletrobrás, 2003)	6,0	0,6

TABELA 12 - Tensões Resultantes e Tensões Admissíveis – CCR 10 MPa

Pelas análises pode-se notar que as tensões observadas na estrutura não ultrapassaram os valores admissíveis considerados em norma para o CCE. A Figura 4 apresenta o

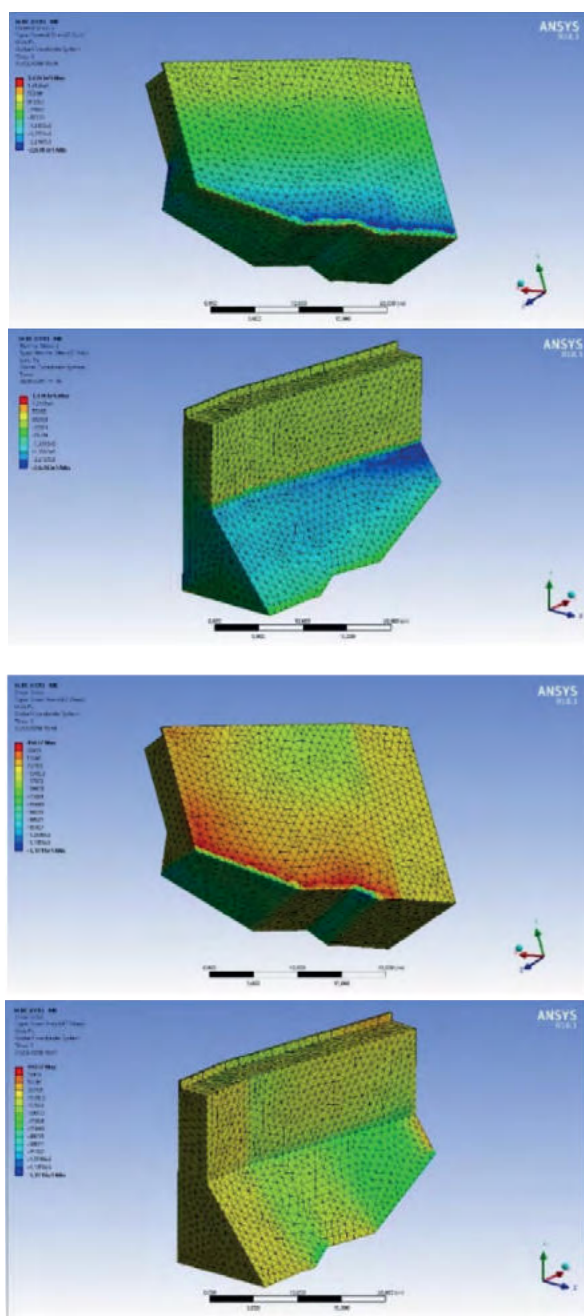


FIGURA 4 - Modelagem para a barragem de CCR da margem esquerda

4. RECOMENDAÇÕES E CONCLUSÕES

4.1 BARRAGEM DE CONCRETO – FATORES DE SEGURANÇA

A análise da barragem de concreto evidenciou que as seções analisadas da PCH Água Limpa apresentaram valores de Fator de Segurança (FS) satisfatórios e as condições de estabilidade do barramento estão dentro dos padrões de

segurança, considerando-se as exigências das Centrais Elétricas Brasileiras (Eletrobrás) e do Ministério da Integração Nacional, na maioria dos cenários. As seções de concreto apresentaram comportamento estável para as análises de estabilidade global com valores acima dos recomendados pela literatura.

4.2 BARRAGEM DE CONCRETO – ANÁLISE DAS TENSÕES ESTRUTURAIS

A análise de tensões no interior do barramento da PCH Água Limpa, por intermédio dos elementos finitos, demonstrou resultados admissíveis para os casos mais críticos de carregamentos para cada estrutura. As tensões máximas de compressão e tração obtidas nas simulações ficaram abaixo dos valores de tensões admissíveis, o que denota que a barragem possui comportamento estável. É importante evidenciar que não foram acusadas tensões de tração no interior das estruturas de concreto, apenas foram observados alguns picos de tensão concentrados em pontos diminutos e tensões de tração no contato da estrutura com a fundação. Quanto às deformações, estas são pequenas e dentro do aceitável para estruturas de concreto de grandes dimensões. As tensões de cisalhamento obtidas ficaram abaixo das máximas permitidas considerando tensões de cisalhamento máximas aceitáveis como 25% das tensões máximas de compressão.

Cabe salientar que foram necessárias algumas aproximações de valores de projetos a partir de dados da literatura. Portanto, para que haja validação da análise, são necessários o fornecimento dos parâmetros construtivos do concreto compactado a rolo e a coleta de dados in loco referente aos parâmetros físicos da fundação e ombreiras, de modo que sejam calculados os valores de tensões admissíveis na fundação e os Fatores de Segurança admissíveis para compressão na fundação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à Água Limpa Energia S.A. pela oportunidade de publicar o presente trabalho e por todo o apoio prestado, bem como pelo fornecimento de dados ao longo do desenvolvimento do estudo.

6. PALAVRAS-CHAVE

Vertedouro, concreto e estabilidade.

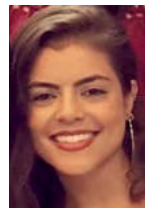
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ÁGUA LIMPA (2006). Projeto Executivo – Arranjo geral – Vista de montante seções típicas.
- [2] ELETROBRÁS (2003). Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. 279 p.
- [3] US ARMY CORPS OF ENGINEERS. Seepage analysis and control for dams. Washington, DC 20314-1000.
- [4] ABNT (2003). NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. ABNT NBR 6118:2003. 221 p.



Euclydes CESTARI Junior

É Engenheiro Civil, especialista em Segurança de Barragem pela Universidade de São Paulo (USP/2000). Possui mestrado em Recursos Hídricos pela Universidade Estadual Paulista (UNESP/2013). Atua como consultor no Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), sendo especialista em elaboração de Planos de Ação de Emergência e Planos de Segurança de Barragens. Também é diretor da empresa Geometrisa Serviços de Engenharia Ltda.



Amanda de Moraes RICARDI

É Engenheira Civil (2017) e trabalhou na Geometrisa- Segurança de Barragens, exercendo atividades relacionadas à segurança de barragens. Atualmente é aluna regular do programa de pós-graduação da Universidade Estadual Paulista (UNESP) de Ilha Solteira na área de Recursos Hídricos e Tecnologia Ambiental.



Ludmilla Freitas PEREIRA

É Engenheira Civil (2017) e Mestre em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais (2019) pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). Possui especialização em Segurança de Barragens e experiência em Manutenção Civil de Barragens, Modelagens Hidrodinâmicas, Meio Ambiente, Bacias Hidrográficas e Sistemas de Informações Geográficas (SIGs).



Lício Venancius de OLIVEIRA da Silva

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Goiás, já atuou como gestor de operação e manutenção pela empresa Engenharia São Patrício- ENGESP. Atualmente é coordenador de Operação e Manutenção das PCHs Areia e Água Limpa pela empresa Água Limpa Energia S.A.



Sinal de Qualidade

A Sirenes Beatek garante a segurança e a confiabilidade de seus produtos, resultados de 35 anos de pesquisa em tecnologia e inovação. Com atendimento comercial diferenciado e suporte técnico especializado, a Beatek prioriza a qualidade e a precisão de cada produto.

Produzimos uma linha completa de sirenes e campanhas comerciais e industriais.

Atendemos em todo o Brasil clientes com necessidades de informação sonora a curta e longa distância.

ENTRE EM CONTATO

WWW.BEATEK.COM.BR  **51 3338-4606**

BT-27C 30 e BT-27C 40
Sirenes de grande porte com função alto-falante
e possibilidade de acionamento remoto!



AVALIAÇÃO DA PROBABILIDADE DE RUPTURA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS POR INSTABILIZAÇÃO E GALGAMENTO

Gabriela Silveira VIRGILI | Engenheira Civil - Walm Engenharia e Tecnologia Ambiental
Isabela Moreira QUEIROZ | Engenheira Civil - Walm Engenharia e Tecnologia Ambiental

RESUMO

A análise de riscos de barragens consiste basicamente na quantificação do risco de ruptura da estrutura. Esta quantificação requer a definição das probabilidades e custo das consequências associadas aos riscos geotécnicos para seis esferas: saúde e segurança, meio ambiente, econômica, imagem da empresa, social e órgãos reguladores. Há quatro modos de falha principais associados à ruptura de barragens: galgamento, erosão interna, instabilização e liquefação. Desta forma, o presente trabalho tem como finalidade a avaliação da probabilidade de ruptura aplicada a uma barragem de rejeitos hipotética, associada aos modos de falha galgamento e instabilização. A estimativa da probabilidade foi realizada por meio de árvore de eventos e análises de estabilidade probabilísticas.

ABSTRACT

Risk analysis of dams is basically the quantification of the risk of failure of the dam. This quantification requires the definition of probability and cost of the consequences associated with geotechnical risks for six spheres: health and safety, environment, economic, corporate image, Social and regulatory bodies. There are four main failure modes associated with dam failure: overtopping, internal erosion, instabilization and liquefaction. Thus, the present work aims to evaluate the probability of failure applied to a hypothetical tailings dam, associated with the overtopping and instabilization failure modes. The estimated probability was accomplished through event tree, and probabilistic stability analysis.

1. INTRODUÇÃO

No processo de gestão de riscos geotécnicos são estabelecidos quatro modos de falha principais para as barragens: galgamento, erosão interna, instabilização e liquefação. Eles estão associados com as potenciais causas específicas que podem acarretar em uma eventual ruptura da barragem.

A ruptura corresponde à cessação da aptidão de um elemento ou do sistema para cumprir uma das funções para a qual foi projetado. Neste caso, a ruptura da barragem corresponde à cessação da sua capacidade de retenção de rejeito. Desta forma, o presente trabalho tem como finalidade a avaliação da probabilidade de ruptura aplicada a uma barragem de rejeitos hipotética inserida em uma área de mina, associada aos modos de falha galgamento e instabilização.

O galgamento de um maciço consiste na passagem da água pela crista e pode desencadear um processo erosivo. A consequência pode ser a ruptura global de uma barragem de rejeitos, seja construída com aterro convencional ou alteada com o próprio rejeito. Os fatores que podem resultar no galgamento de uma barragem podem ser divididos em: falhas decorrentes da operação do reservatório, configuração da praia de rejeitos e obstrução do vertedouro. Por sua vez, a probabilidade de falha está relacionada ao Tempo de Retorno do evento hidrológico e a probabilidade equivalente de ocorrência dos fatores de risco.

O estudo para analisar instabilização da barragem pode ser feito através de métodos determinísticos ou probabilísticos. Normalmente, uma análise de estabilidade é realizada para determinar as condições de projeto de tal maneira que a segurança mínima necessária seja garantida.

A análise probabilística se diferencia da determinística, principalmente, por considerar a variabilidade dos parâmetros. A maioria dos dados de entrada em uma análise de estabilidade de taludes não é conhecida com precisão. A variabilidade se deve à dispersão dos resultados de ensaios ou à variabilidade natural no valor da grandeza que existe de um ponto a outro no talude. Há, portanto, uma distribuição de valores para cada parâmetro, o que faz com que sejam considerados variáveis aleatórias.

Dessa maneira, é possível concluir que o próprio Fator de Segurança é uma variável aleatória que depende de muitas variáveis de entrada e possui sua própria distribuição.

2. ESTUDO DE CASO

A barragem analisada tem cerca de 15m de altura e uma inclinação 1V:2H. Seu sistema extravasor é do tipo poço-galeria. Os parâmetros médios($\bar{X}_i$) utilizados foram arbitrados de modo a obter Fator de Segurança determinístico médio da ordem de 1,50. Apesar de fictícios, os valores adotados são bastante representativos. A Figura 1 mostra o modelo geológico-geotécnico adotado considerando o nível freático passando pelo tapete drenante.

A curva cota-volume da barragem de rejeitos analisada está ilustrada na Figura 2:

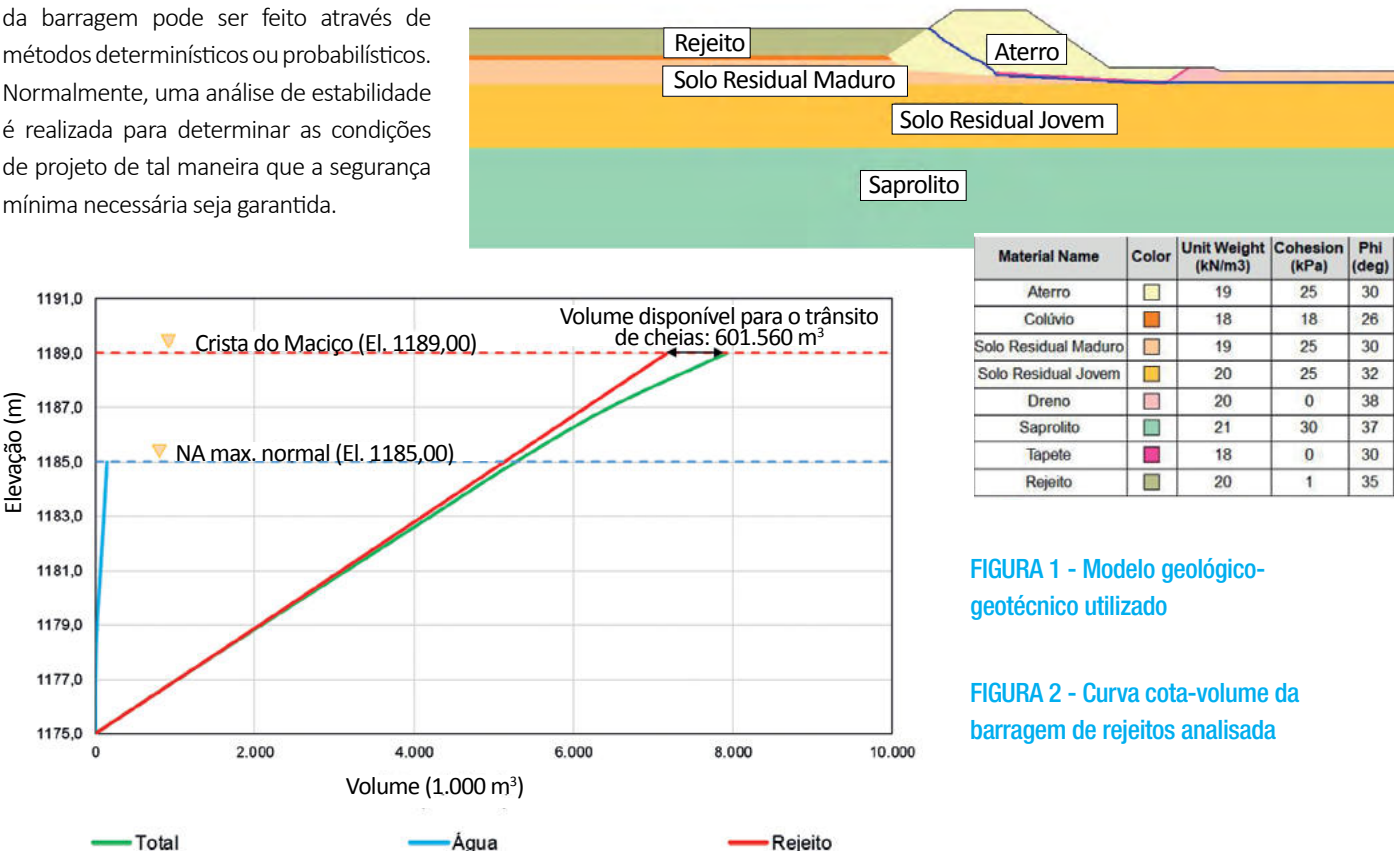


FIGURA 1 - Modelo geológico-geotécnico utilizado

FIGURA 2 - Curva cota-volume da barragem de rejeitos analisada

3. METODOLOGIA DE CÁLCULO

3.1 INSTABILIZAÇÃO

A análise de estabilidade probabilística incorpora a variabilidade de parâmetros-chave de entrada (variáveis aleatórias) resultando em uma faixa de valores de Fatores de Segurança que podem ser calculados a partir da combinação das variáveis aleatórias. Essa faixa de valores representa uma função de densidade de probabilidade de uma distribuição contínua de Fatores de Segurança, ilustrada pela Figura 3, onde a área da região hachurada no histograma corresponde à probabilidade de ruptura da estrutura, ou seja, corresponde à probabilidade do Fator de Segurança ser igual ou inferior a 1 (Pr [FS ≤ 1]). (Valerio, *et al.*, [1]).

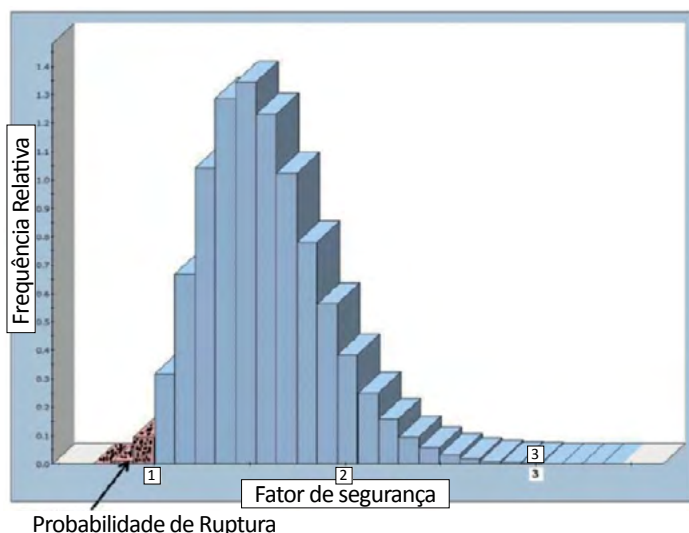


FIGURA 3 - Histograma do Fator de Segurança - probabilidade de ruptura. (Penna *et al.*, [2]).

O procedimento geral em considerar a variabilidade das propriedades dos materiais é ensaiar um número de amostras e depois utilizar os resultados dos ensaios para prever a variabilidade da população de onde as amostras foram retiradas. Observa-se que sempre haverá um grau de incerteza na estimativa final das propriedades da população.

Quando se tem um número suficiente de amostras, dados estatísticos (tais como média, desvio padrão, variância) podem ser diretamente calculados a partir dos valores das amostras. Além disso, podem ser feitos testes de ajuste dos dados às distribuições estatísticas, tais como mínimos quadrados, chi-quadrado, K-S, entre outros.

Caso não se tenha um número suficiente de dados com representatividade estatística, valores existentes das variáveis são assumidos como a média e os desvios padrão são estimados por meio do coeficiente de variação. Além disso, distribuições estatísticas de cada variável são assumidas com base nos valores médios e no desvio padrão. Limites máximos e mínimos são definidos em função do truncamento da distribuição (Assis *et al.*, [3]).

O coeficiente de variação tem se mostrado uma característica das propriedades e pode ser calculado a partir da seguinte equação [3]:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (1)$$

Onde:

CV = coeficiente de variação

σ = desvio padrão

μ = média

A determinação dos limites inferior e superior do intervalo de dados que representa a variável aleatória pode ser feita a partir de regras que se baseiam na distribuição normal. A Figura 4 apresenta uma função de densidade de probabilidade normal com a porcentagem de abrangência abaixo da curva para o valor médio ($\bar{x}$) mais ou menos um desvio padrão (σ), mais ou menos dois desvios padrão (2σ) e mais ou menos três desvios padrão (3σ) [2].

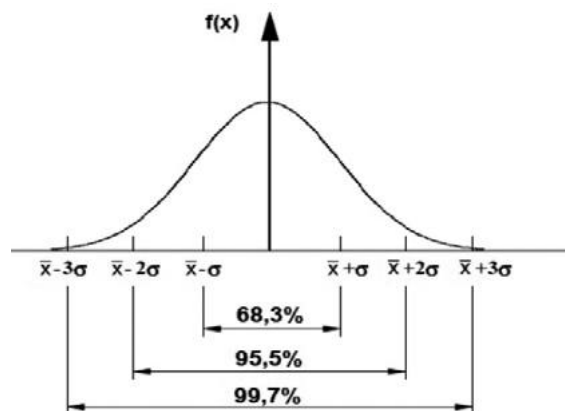


FIGURA 4 - Distribuição normal: desvio padrão e limites de variação [2]

Para mais ou menos três desvios padrão, 99,7% de todos os valores possíveis da variável aleatória estão incluídos neste intervalo. Similarmente, considerando mais ou menos dois desvios padrão esse valor passa a ser 95,5%. Finalmente, considerando mais ou menos um desvio padrão, 68,3% de todos os valores possíveis estão dentro deste intervalo [2].

A Tabela 1 apresenta faixas de coeficientes de variação dos parâmetros geotécnicos de interesse para análises de estabilidade de taludes. Essa tabela corresponde a uma compilação de valores encontrados na literatura.

Na análise de estabilidade serão avaliados os parâmetros que apresentam maior relevância/influência na variação do Fator de Segurança do dique. Desta forma, a variabilidade dos valores só será aplicada para os parâmetros do material que efetivamente

Parâmetro Geotécnico	Coefficiente de Variação (%)
Peso Específico	03 (02 a 08)
Coesão	40 (20 a 80)
Ângulo de Atrito Efetivo	10 (04 a 20)
Coesão Não Drenada	30 (20 a 50)

TABELA 1 – Valores típicos de coeficiente de variação [3]

impacta no FS, sendo que para os demais parâmetros será utilizado o valor médio.

As análises de estabilidade probabilísticas foram realizadas considerando ângulo de atrito, coesão e peso específico do aterro como variáveis aleatórias. Vale ressaltar que as análises de estabilidade probabilísticas foram feitas com o software Slide 6.0, desenvolvido pela Rocscience, considerando os critérios de resistência de Mohr-Coulomb, o método de equilíbrio limite de GLE/Morgenstern-Price e o método probabilístico de Monte Carlo. O método de Monte Carlo é um procedimento iterativo que abrange quatro passos, como descrito abaixo [3]:

- Estimativa das distribuições de probabilidade para cada um dos parâmetros de entrada considerados como variáveis;
- Geração de valores aleatórios para cada parâmetro;
- Cálculo dos valores das forças atuantes e resistentes e verificação se as forças resistentes são maiores do que as atuantes;
- Repetição do processo N vezes ($N > 100$) e, em seguida, determinação da probabilidade de ruptura P_f de acordo com a seguinte equação:

$$P_f = \frac{N - M}{N} \quad (2)$$

Parâmetro Geotécnico	Valor Médio ($\bar{x}$)	Desvio Padrão (σ)	Dois Desvios Padrão (2σ)			
			Relativo Mínimo	Relativo Máximo	Valor Mínimo	Valor Máximo
Aterro - Ângulo de Atrito ($^\circ$)	30	3	6	6	24	36
Aterro - Coesão (kPa)	25	10	20	20	5	45
Aterro - Peso Específico (kN/m ³)	19	0,57	1,14	1,14	17,86	20,14

TABELA 2 – Variáveis aleatórias e valores utilizados nas análises

Onde:

M é o número de vezes em que a força resistente excedeu as forças atuantes (ou seja, que o Fator de Segurança é maior que 1,0).

O número de iterações realizadas para atingir a convergência pelo Método Monte Carlo depende do nível de confiança (α) admitido para o caso em estudo e pode ser estimado de acordo com a seguinte equação:

$$N = \left(\frac{Z_{\alpha/2}^2}{4\alpha^2} \right)^n \quad (3)$$

Onde:

N = Número de tentativas;

Z = Parâmetro de confiabilidade;

α = Tolerância;

n = Número de variáveis.

Sendo assim, para três variáveis aleatórias e um nível de tolerância α igual a 10%, o número de iterações mínimas necessárias pelo método de Monte Carlo, estimado pela Equação 3, seria de aproximadamente 310.000.

Para os casos em que o número de iterações foi insuficiente para o cálculo da probabilidade de obtenção de Fatores de Segurança inferiores a unidade, calculados durante a simulação pelo Método Monte Carlo, a área do histograma referente a essa probabilidade foi calculada pela Equação 4 apresentada a seguir.

DIST.NORM.N(x; média; desvio padrão; cumulativo)

Na Tabela 2 (final da página) estão apresentadas as informações associadas ao ângulo de atrito, coesão e peso específico dos materiais utilizados nas análises probabilísticas. Destaca-se que foi adotada uma variação de dois desvios padrão ao redor da média, de modo a ajustar o truncamento para que o mesmo represente os limites físicos e de aceitabilidade dos parâmetros geotécnicos (limites superior e inferior) dos materiais.

3.2 GALGAMENTO

O galgamento consiste basicamente na passagem da água pela crista, que ocorre quando a estrutura não possui capacidade suficiente frente a passagem de eventos de chuva, o que pode acarretar na sobrelevação do nível de água do reservatório, podendo verter sobre a crista do barramento. A passagem de água pela crista dá início a um processo erosivo no talude de jusante da barragem. Isso pode resultar na formação da brecha de ruptura da estrutura.

A análise determinística da probabilidade de ocorrência do galgamento em um barramento é calculada a partir de uma análise hidrológica, avaliando o trânsito de cheias de eventos de chuva pelo reservatório. O trânsito de cheias é determinado considerando apenas os deflúvios superficiais resultantes da transformação chuva-vazão na bacia de contribuição, sendo adotados eventos de chuvas com diferentes tempos de retorno para avaliação.

Para definir a probabilidade de galgamento é possível realizar a avaliação de diferentes cenários considerando situações não esperadas de projeto ou operação. Dentre os possíveis cenários são usualmente avaliadas as seguintes circunstâncias:

- Redução do volume disponível para amortecimento de cheias, seja causado por disposição de rejeito diferente do previsto em projeto, ou escorregamento de taludes no entorno do reservatório;
- Total ou parcial obstrução do sistema extravasor, alterando sua capacidade de vertimento;
- Capacidade de descarga insuficiente para eventos de chuva extremos.

Para todos os cenários deverá ser verificado o evento de chuva que gera uma sobrelevação do nível de água do reservatório que supere a elevação do coroamento do barramento em estudo, ou seja, o tempo de retorno simulado que resulta no galgamento do maciço. Na avaliação de um cenário atípico de operação, ou seja, relacionado a um evento que irá gerar a redução da curva cota-volume do reservatório ou a restrição da curva de descarga do sistema extravasor, sendo esse considerado um evento crítico, a

$$P_{\text{galgamento (evento crítico)}} = P_{\text{evento crítico}} \times \frac{1}{TR_{\text{considerando evento crítico}}} \quad (5)$$

probabilidade de galgamento será determinada pelo produto das probabilidades, conforme indicado na equação a seguir:

Onde:

$P_{\text{galgamento (evento crítico)}}$: é a probabilidade de galgamento do maciço

devido a ocorrência de um evento externo que modifique a segurança hidráulica da estrutura. Exemplo: obstrução do vertedouro, redução do volume de amortecimento, etc;

$P_{\text{(evento crítico)}}$: é a probabilidade de ocorrência do evento estudado que gera alteração na segurança hidráulica do barramento;

$TR_{\text{considerando o evento crítico}}$: é o tempo de retorno simulado que resultou no galgamento do maciço para a nova situação de segurança hidráulica causada pelo evento externo estudado.

Para a quantificação dos modos de falha relacionados aos fatores de redução da curva cota-volume do reservatório e/ou restrição da curva de descarga do sistema extravasor, podem ser utilizados descritivos verbais que definem a chance de ocorrência de um evento, conforme experimentos realizados por Reagan *et al.* [4]. Para tal, pode ser utilizada a Tabela 3, que apresenta uma proposta para a definição de probabilidades equivalentes de um

DESCRIÇÃO VERBAL PROBABILIDADE	PROBABILIDADE EQUIVALENTE	INTERVALO
Virtualmente impossível	0,01	0,00 - 0,05
Muito improvável	0,10	0,02 - 0,15
Improvável (pouco provável)	0,15	0,04 - 0,45
O evento tem boas chances de não ocorrer	0,25	0,02 - 0,75
Não se tem informação sobre as chances do evento ocorrer ou as chances de ocorrência são iguais (neutro)	0,50	0,25 - 0,85
Provável	0,75	0,25 - 0,85
Muito provável	0,80	0,03 - 0,99
Praticamente certo	0,90	0,75 - 0,99
Virtualmente certo	0,99	0,90 - 1,00

TABELA 3 - Correspondência entre a descrição verbal da chance de ocorrência do evento e o valor de probabilidade Vick, S. G , Lichtenstein, S. e Newman, J.R. *apud* Lauriano [5]

evento com base em descritivos verbais.

A definição da probabilidade de ocorrência de galgamento na barragem de rejeito em estudo foi realizada considerando a obstrução do sistema extravasor. Para esse cenário foi adotado o nível de água do reservatório na soleira do vertedouro obstruído, ou seja, o reservatório encontra-se em sua capacidade de amortecimento de cheias quando se der o início do evento de chuva extremo.

A transformação chuva vazão será realizada de maneira simplificada, considerando um coeficiente de escoamento de 1,00 para a chuva direta sobre o reservatório, e o coeficiente de escoamento de 0,55 para a área de contribuição por tratar-se de uma região de Mina, com a presença de solo exposto.

Considerando a área do reservatório igual a 0,15km² e a área de contribuição é de 0,73km², o volume de água foi determinado pelas seguintes equações:

Duração	Chuva (mm) TR = 10.000	Vol. precipitação direta (m³)	Vol. precipitação indireta (m³)	Vol. Total (m³)
24 horas	297	44.550	119.246	163.796
2 dias	388	58.200	155.782	213.982
3 dias	472	70.800	189.508	260.308
5 dias	602	90.300	241.703	332.003
7 dias	707	106.050	283.861	389.911
10 dias	833	124.950	334.450	459.400
15 dias	1031	154.650	413.947	568.597
20 dias	1.174	176.100	471.361	647.461
30 dias	1.401	210.150	562.502	772.652

TABELA 4 – Volume afluente – TR 10.000 anos

Vol. precipitação direta = Precipitação x Área do reservatório x $C_{\text{reservatório}}$ (6)

Vol. precipitação indireta = Precipitação x Área de contribuição x $C_{\text{área contribuição}}$ (7)

Vol. total = Vol. precipitação direta + Vol. precipitação indireta (8)

O cálculo das chuvas de projeto foi realizado a partir da análise de frequência das amostras de chuva máximas anuais de uma estação pluviométrica localizada próxima ao barramento em estudo, utilizando os dados consistidos de altura de chuva diária.

Os quantis obtidos com 10.000 anos de período de retorno e durações variando de 1 dia a 30 dias estão apresentados na Tabela 4 a seguir, assim como o seu respectivo volume escoado afluente ao reservatório da barragem de rejeito.

Conforme apresentado na Figura 2, o volume disponível para trânsito de cheias é de 601.560m³. Nesse sentido, para o cenário de obstrução do sistema extravasor, um evento chuvoso com 10.000 anos de tempo de retorno e 20 dias de duração resulta em galgamento da barragem.

4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Na Tabela 5 são mostrados os resultados obtidos pela análise de estabilidade probabilística considerando o modo de falha

Número de Desvios	FS médio Probabilístico	Desvio Padrão de FS s [FS]	Probabilidade de Ruptura Pr
$\pm 2\sigma$	2,346	0,297	$3,0 \times 10^{-6}$

TABELA 5 – Resultados das análises probabilísticas

instabilização por meio da formulação apresentada na Equação 4.

Conforme descrito no Item 2.0, o sistema extravasor da

barragem em estudo é do tipo poço-galeria. Por causa de suas características, a sua obstrução é provável de ocorrer, pois é uma estrutura de difícil manutenção. Sendo assim, a probabilidade de obstrução é de 0,75, conforme Tabela 3.

Para o cenário avaliado, conforme apresentado no Item 3.2, um evento de precipitação decamilenar, que possui probabilidade de ocorrência equivalente a 1×10^{-4} , ocasiona o galgamento da barragem em estudo.

Com base na equação 5 é possível dizer que a probabilidade de galgamento da barragem de rejeito para o cenário avaliado é de $7,5 \times 10^{-5}$.

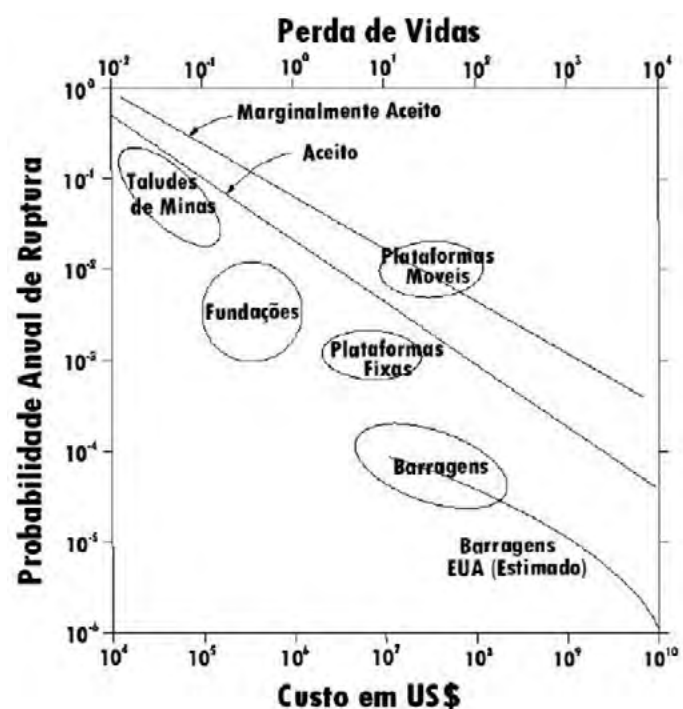


FIGURA 5 - Probabilidades de ruptura aceitáveis (Baecher, 2003)

Avaliando os resultados obtidos também é viável apontar que a probabilidade de ruptura da barragem é da ordem de 10^{-4} , o que é aceitável segundo ICOLD [6].

Vários autores e instituições desenvolveram gráficos (“F-N Charts”) para o gerenciamento do risco em função da probabilidade de ruptura e das consequências (vidas humanas, construções afetadas, prejuízos, etc.), como demonstra a Figura 5, para diferentes tipos de construções.

Baecher [7] mostra diferentes probabilidades de ruptura aceitáveis de acordo com o tipo de estrutura a ser construída. No caso de barragens uma probabilidade de ruptura da ordem de 10^{-4} é aceitável (Figura 5).

A probabilidade de ruptura admissível deve ser em função do risco que se queira assumir e das consequências associadas à ocorrência destes.

G.AP-002/01, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 177 P.

[4] REAGAN, R., MOSTELLER, F. and YOUTZ, C. (1989) – “Quantitative Meanings of Verbal Probability Expressions.” Journal of Applied Psychology 74(3): 433–442.

[5] LAURIANO, W.A., PIMENTA A.J., CORTEZ R.J., SILVA L.C.A.A. (2017). Discussões Sobre os Modos de Falha e Risco de Galgamento de Barragens de Rejeitos. II Seminário de Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeitos - SGBR, Belo Horizonte, MG.

[6] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD (2011). Bulletin Nº 139- Improving Tailing Dams Safety: Critical Aspects of Management, Design, Operation and Closure.

[7] BAECHER, G. B. & CHRISTIAN, J. T. (2003). Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. John Wiley And Sons, England.

5. PALAVRAS-CHAVE

Ruptura de barragem de rejeitos; galgamento; instabilização

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VALERIO, M; CLAYTON, C. D'AMBRA, S. & YAN, C. (2013). An Application of a Reliability Based Method to Evaluate Open Pit Slope Stability. Slope Stability 2013, Brisbane, Australia.
- [2] PENNA, D.C., ROCHA, F.F., ASSIS, A. & DRUMMOND, G. (2017). Influência da Variabilidade dos Parâmetros Geotécnicos na Probabilidade de Ruptura de Barragens. II Seminário de Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeitos- SGBR, Belo Horizonte, MG.
- [3] ASSIS, A.P., ESPÓSITO, T.J., GARDONI, M.G. & SILVA, P.D.E.A. (2001). Métodos Estatísticos Aplicados a Geotecnia. Publicação



Isabela Moreira QUEIROZ

Engenheira Civil graduada pela Fundação Mineira de Educação e Cultura (FUMEC/2013). Possui experiência profissional em Geotecnia em projetos de barragens de terra e enrocamento, pilhas de estéril e rejeitos, projetos de descomissionamento de barragens, análise de estabilidade determinística e probabilística, análise de tensão e deformação, análise de liquefação e análise de risco geotécnicos. Trabalhou na empresa Pimenta de Ávila (2014-2015). Atua desde 2016 na Walm Engenharia e Tecnologia Ambiental.



Gabriela Silveira VIRGILI

Engenheira Civil graduada pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG/2014). Atua na área de recursos hídricos aplicado à mineração. Possui experiência em estudos de disponibilidade hídrica, dimensionamento de reservatórios e sistemas extravasores de barragens, assim como estudos de ruptura hipotética e plano de ação emergencial para tais estruturas. Trabalhou na BVP Engenharia de 2014 a 2015 e na Costa Consultoria e Projetos de 2015 a 2016. Desde 2016 está na Walm Engenharia e Tecnologia Ambiental.

A INFLUÊNCIA DA ANISOTROPIA NA ANÁLISE DE SUBPRESSÃO NO VERTEDOURO DA UHE JIRAU

Marieli LOPES | Docente, MSc. - Universidade Comunitária da Região de Chapecó

André ASSIS | Docente, Phd – Universidade de Brasília

RESUMO

As cortinas de injeção e os sistemas de drenagem são uma alternativa na redução do efeito da subpressão nas bases de barragens de concreto e melhoramento das condições hidráulicas e mecânicas do maciço rochoso. Este trabalho implantou um tratamento de fundação otimizado através da redução do espaçamento entre os furos de drenagem, considerando a anisotropia do maciço rochoso e a avaliação da subpressão por modelagem numérica. A adoção da anisotropia aumenta a subpressão em até 6% e a redução do espaçamento entre os drenos diminui este efeito em até 9%. Conclui-se que a drenagem é fator preponderante quando o problema do projeto é a diminuição do efeito de subpressão e que a anisotropia não deve ser desconsiderada desta análise.

ABSTRACT

Grout curtains and drainage systems are an alternative in reducing the effect of underpressure on the bases of concrete dams and improving the hydraulic and mechanical conditions of the rock mass. This work implanted an optimized foundation treatment by reducing the spacing between the drainage holes, considering the anisotropy of the rock mass and evaluation of the subpressure by numerical modeling. Adoption of the anisotropy increases the underpressure by up to 6% and the reduction of the spacing between the drains decreases this effect by up to 9%. It is concluded that drainage is a preponderant factor when the problem of the project is the decrease of the effect of underpressure and that the anisotropy should not be disregarded from this analysis.

1. INTRODUÇÃO

A subpressão é um esforço no sentido de baixo para cima que age em direção oposta ao efeito do peso próprio da estrutura de concreto e aumenta a instabilidade desta estrutura em relação ao tombamento e deslizamento. O estudo dos efeitos da subpressão foi iniciado em 1888 por Francis, que foi o primeiro também a introduzir os sistemas de drenagem nas fundações para redução desta força [1].

Para melhoramento das condições das fundações de barragens de concreto, são utilizados os tratamentos profundos, compostos por cortinas de injeção com calda de cimento e drenagem vertical. As cortinas de injeção funcionam na redução das vazões pela fundação devido ao aumento do caminho de escoamento. Em maciços rochosos muito fraturados, a penetração da calda auxilia no enrijecimento da fundação, aumentando os parâmetros de resistência mecânica e diminuindo os parâmetros de condutividade hidráulica.

Os furos de drenagem agem diretamente no efeito de subpressão por reduzir a área do diagrama formado abaixo da base da estrutura de concreto. Assim, com a redução desta área, há a diminuição da resultante das forças de água, que é a subpressão.

Comumente são utilizadas tanto as cortinas de injeção, como os furos de drenagem nos projetos hidrelétricos, mesmo que as discussões sobre a necessidade destas cortinas de injeção sejam polemizadas desde 1932 [2]. Terzaghi motivou a discussão devido ao uso indiscriminado das caldas de cimento para tratamento de fundação, tornando as obras onerosas e não funcionais no que tange à redução do efeito da subpressão.

Fator importante na análise de fluxos em meios fraturados é heterogeneidade e anisotropia. A heterogeneidade dos maciços rochosos, criada por diferenças de litologia e estruturas geológicas distintas, afeta a distribuição das pressões hidrostáticas e as forças de percolação - onde as linhas equipotenciais se concentram nas regiões menos permeáveis. Já a anisotropia, no que se refere à permeabilidade, corresponde à duas componentes perpendiculares entre si e que podem ter diferentes distribuições de equipotenciais [3].

Este trabalho tem por finalidade propor um sistema de tratamento de fundação otimizado para redução do efeito de subpressão, avaliando a influência da anisotropia do maciço rochoso nestes esforços.

2. ESTUDO DE CASO

A Usina Hidrelétrica de Jirau foi construída a 120 km da capital do estado de Rondônia, Porto Velho, próximo ao distrito de Jaci Paraná, em uma ilha do Rio Madeira, denominada de Ilha do Padre. A usina tem capacidade de geração de 3750 MW, energia capaz de abastecer mais de 10 milhões de residências [4], ocupando a 5ª posição no ranking das barragens brasileiras [5].

O complexo da UHE Jirau é formado por estruturas de concreto (casas de força, vertedouro e tomada d'água), terra (barragens), enrocamento-terra (barragem) e enrocamento-asfalto (barragem principal). O vertedouro possui capacidade de vazão de 82600 m³/s, com 18 vãos e comprimento de soleira de 64 m. A Figura 1 apresenta uma imagem aérea do vertedouro, vista de jusante.



FIGURA 1 - Vista de jusante do vertedouro durante a construção

A usina opera com cota de 90 m (montante) e 70 m (jusante). O reservatório atinge uma área de 361,6 km² [4], fazendo parte das novas concepções de barramentos, as quais utilizam turbinas do tipo bulbo, compostas por eixo e gerador horizontal [6].

Na região do empreendimento existem granitos da formação da Suíte Intrusiva São Lourenço-Caripunas, com estruturas de deformação pouco expressivas e descontinuidades formadas por zonas de cisalhamento sub-horizontais, denominadas de Dx (Figura 2).

Em superfície, o maciço granítico apresenta-se muito fraturado e pouco alterado. As principais descontinuidades do vertedouro são direcionadas em N20E/84SE (paralela ao fluxo do rio) e N84W/85NE (perpendicular ao fluxo do rio) com superfícies rugosas e preenchimento milimétrico de mineral verde. Comparadas com estas, as descontinuidades Dx (também paralelas ao fluxo do rio) são menos frequentes.

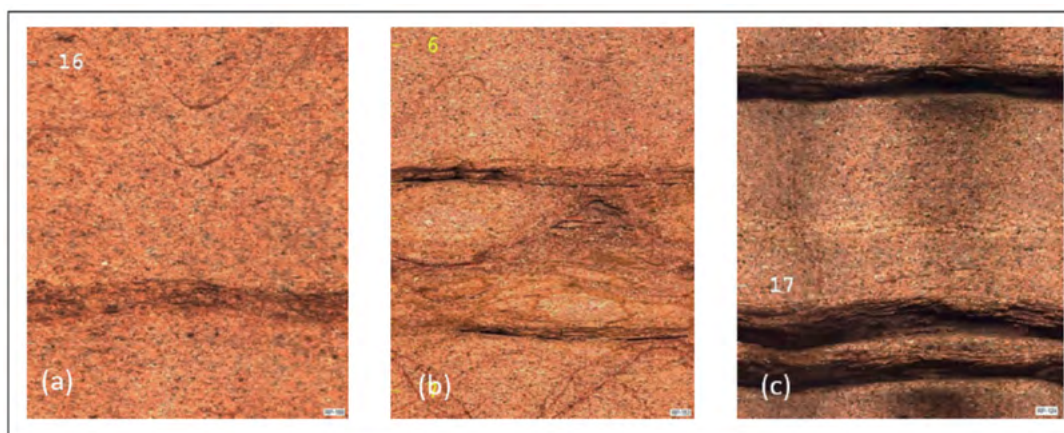


FIGURA 2 - Característica das fraturas Dx – Esc. 1/10 a) DX1(somente discagem); b) DX2 (vazios e discagens); c) DX3 (somente vazios)

Porém, elas são mais abertas e mais alteradas que as duas outras famílias, comprometendo a percolação da calda de cimento das cortinas de injeção.

O tratamento de fundação foi executado pelo método convencional de Houlby [7], com abertura de furos de forma *split-spacing*, com furos primários, secundários e terciários obrigatórios, espaçados a cada 3 m. A linha de furos obrigatórios fica disposta no paramento montante da galeria do vertedouro, com profundidade de 20 m (vertical) e inclinação de 20°/montante. As linhas central e jusante, com mesma profundidade, mas com inclinação de 15° e 10°, respectivamente, foram destinadas para furos eventuais.

A abertura dos furos eventuais obedeceu ao critério de consumo de calda de 30 kg/m, caracterizando uma condutividade baixa, com coeficiente de permeabilidade entre 10⁻⁵ a 10⁻⁴ cm/s. Utilizaram-se caldas com fator A/C de 0,5:1 e 0,7:1, sem aditivos e ensaios Environmental Protection Agency (EPA) foram executados nos furos primários intercalados, a cada 24 m, seguindo o Boletim 02 da ABGE [8].

Os furos de drenagem foram dispostos a jusante da galeria, verticais, com 20 m de profundidade, espaçados a cada 3 m. Os furos de injeção foram abertos de forma rotopercussiva, com 76 mm de diâmetro, assim como os furos de drenagem, com diâmetro de 90 mm.

O sistema de vedação da UHE Jirau foi estudado em 2015, quando foi verificada a condição de permeabilidade do maciço rochoso antes e depois da execução da cortina de injeção. Concluiu-se que o maciço rochoso possuía, antes do tratamento, condutividade hidráulica de 10⁻⁵ cm/s; depois do tratamento este valor diminuiu para 10⁻⁶ cm/s. Esses resultados indicam a boa característica hidráulica do maciço de fundação, podendo ser otimizado o seu tratamento [9].

3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A otimização do tratamento de fundação se deu através da redução dos furos de injeção do projeto original, eliminando os furos terciários obrigatórios. Assim, no Modelo de Tratamento Otimizado (MTO), os furos obrigatórios foram os primários e os secundários, espaçados entre si com 6 m. Os furos de drenagem para o MTO foram aumentados, reduzindo o espaçamento anterior de 3 m para 1,5 m entre eles.

A subpressão foi determinada por modelagem numérica, utilizando o software SEEP/W da GeoStudio®. Foram definidos três modelos hidrogeológicos com dimensões de 1,35B x 0,9B; 1B x 1B; 2B x 2B (B = base do vertedouro) e foi escolhido aquele que melhores resultados apresentasse ao longo da rede de fluxo. As discontinuidades Dx foram descartadas, adotando maciço homogêneo e anisotrópico, considerando um coeficiente de anisotropia para o granito de 2,5 [10], sendo k_x/k_y o coeficiente de anisotropia.

As condições de contorno dos modelos foram a carga do reservatório de montante (90 m), de jusante (70m) e nos drenos, determinadas por duas metodologias: Eletrobrás [11] e Andrade [1]. A Equação 01 apresenta a subpressão no dreno pelo método de Andrade [1], em que j e d são as distâncias do dreno até os paramentos de montante e jusante, H_d é a carga hidráulica na boca do dreno, λ é o fator de forma da drenagem e o espaçamento entre os furos, ϕd é o diâmetro e B é a dimensão da base da barragem.

$$S_d = \frac{(H_m.j) + (H_j.d) + (j.d.\lambda.H_d)}{(j.d.\lambda) + B} \quad (1)$$

O fator de forma da drenagem λ para esta metodologia pode ser adotada para o maciço homogêneo isotrópico (Equação 2) e homogêneo anisotrópico (Equação 3), onde X é transformada anisotrópica ($X = \sqrt{\frac{k_x}{k_y}}$) e k_x/k_y é o coeficiente de anisotropia.

$$\lambda = \frac{2\pi}{e \ln\left(\frac{e}{\pi \phi d}\right)} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{e \cdot X \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot e \cdot X}{\pi \cdot \phi \cdot [1,5 \cdot (X + 1) - \sqrt{X}]}\right)} \quad (3)$$

Para o método da Eletrobrás [11], considerando a drenagem operante, foi utilizada a Equação 04.

$$H_{dm} = H_j + \frac{1}{3}(H_m - H_j) \quad (4)$$

4. RESULTADOS

O modelo hidrogeológico adotado foi o segundo, com dimensões 1B x 1B, conforme a Figura 3. Ela apresenta uma seção típica com a cortina de injeção inclinada 20º/montante e uma cortina de drenagem vertical.

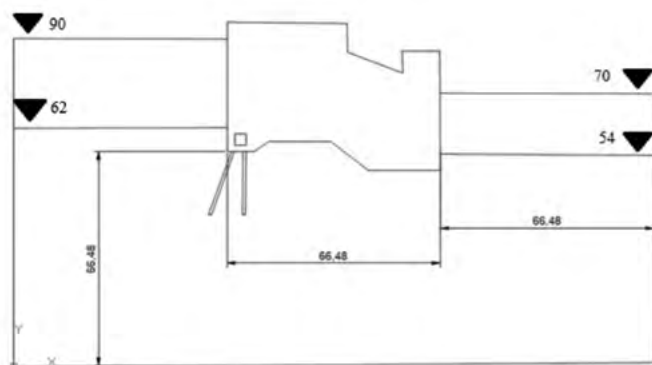


FIGURA 3 - Modelo hidrogeológico 1B x 1B

O coeficiente de permeabilidade do maciço rochoso foi tomado segundo os resultados de EPA antes da execução da cortina de injeção, denominado de k_x , com magnitude de 10^{-4} cm/s (bloco mais crítico do vertedouro). A condutividade da cortina de injeção também foi determinada pelos ensaios EPA. Porém, estes foram executados após o fechamento

do tratamento por furos de verificação. A denominação do coeficiente de permeabilidade da injeção e seu valor é $k_i = 4 \times 10^{-6}$ cm/s. Por último, na cortina de drenagem, foi adotada uma vazão segundo a sua carga média dimensionada pela Equação 01. Esta condutividade, k_d , apresentou uma magnitude de $5,4 \times 10^{-4}$ cm/s para a condição isotrópica e anisotrópica.

A espessura da cortina de injeção foi determinada pelo bulbo de atuação da calda de cimento levantado pelo máximo volume injetado no projeto, equivalendo a 80 cm. A espessura dos drenos foram dimensionadas pela vazão e pelo coeficiente de permeabilidade. No projeto original a espessura adotada foi de 1 m, e no MTO, 0,5 m.

A Figura 4 apresenta o modelo numérico, discretizado com 8916 nós e 8818 elementos quadriláteros e triângulos. A malha geral é de 2 x 2 m com refinamento na região do tratamento de 0,25 m.

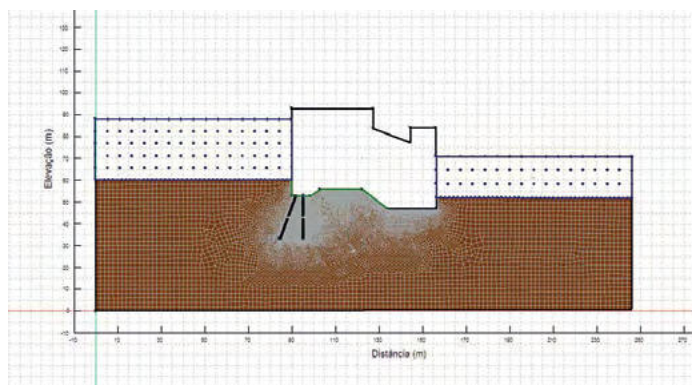


FIGURA 4 - Discretização da malha do modelo numérico

Os diagramas de subpressão para o projeto original e MTO foram determinados considerando as condições de contorno de Eletrobrás [11] e Andrade [1]. A Figura 5 apresenta um dos diagramas, para o maciço homogêneo e isotrópico. As Tabelas 1 e 2 demonstram os resultados de subpressão e cargas na base do vertedouro depois da modelagem numérica.

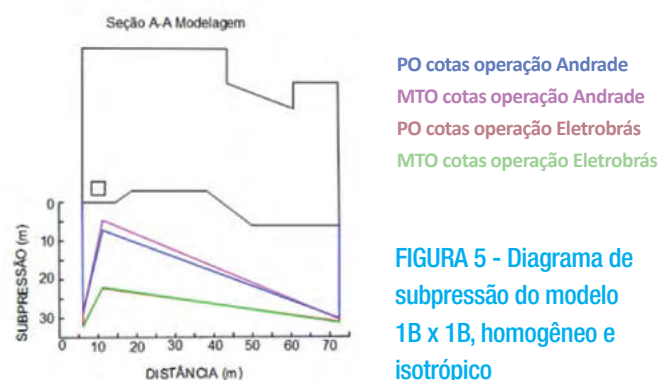


FIGURA 5 - Diagrama de subpressão do modelo 1B x 1B, homogêneo e isotrópico

Dados	PROJETO ORIGINAL		MTO	
	Eletrobrás	Andrade	Eletrobrás	Andrade
Carga Montante Hm (m)	31,6	28,3	32,1	28,4
Carga Jusante Hj (m)	24,8	24,3	25,0	24,4
Carga Dreno Hd (m)	22,1	7,2	22,0	4,6
Subpressão U (kN/m)	1673,1	1154,8	1677,2	1151,1

TABELA 1 - Resultados da modelagem numérica para modelo homogêneo e isotrópico

Dados	PROJETO ORIGINAL		MTO	
	Eletrobrás	Andrade	Eletrobrás	Andrade
Carga Montante Hm (m)	31,6	28,7	32,1	28,9
Carga Jusante Hj (m)	24,8	24,0	25,0	24,2
Carga Dreno Hd (m)	22,1	9,5	22,0	5,6
Subpressão U (kN/m)	1673,1	1222,8	1677,2	1099,5

TABELA 2 - Resultados da modelagem numérica para modelo homogêneo e anisotrópico

A partir dos resultados apresentados, a introdução da anisotropia não afetou os resultados obtidos pelo critério da Eletrobrás [11] por não considerar o fator de forma λ , diferentemente daquilo que foi encontrado para o critério de Andrade [1]. No projeto original, a adoção da anisotropia aumentou 32% da carga do dreno; no MTO, 25%. Consequentemente, a resultante final da subpressão foi elevada em 6% no projeto original e 3% no MTO. Entretanto, nenhum destes valores ultrapassou os encontrados para Eletrobrás [11].

Outra observação relevante é a redução da subpressão quando o número de furos de dreno foi aumentado. A redução da subpressão no MTO foi de 6 e 9%, para maciços isotrópico e anisotrópico, respectivamente. Salienta-se a importância do sistema de drenagem na influência direta da diminuição dos esforços da água na base do vertedouro, confirmando a eficiência da proposta do MTO para esta finalidade.

Neste projeto, a cortina de injeção não apresentou influência na subpressão, mantendo os valores de poropressão na base do barramento com as mesmas magnitudes de seções em que não houve projeto de vedação.

- A redução da subpressão pelo MTO se dá pela alteração da cortina de drenagem, através do aumento de furos e da diminuição do espaçamento. Isso faz com que o método apresentado por Andrade [1] seja menos conservador que o da Eletrobrás [11];
- Para esta pesquisa, a cortina de injeção não foi eficiente na redução da subpressão na base do vertedouro, uma vez que os resultados das seções sem cortina de injeção e com cortina apresentaram os mesmos resultados na modelagem numérica. Esta afirmação se deve ao fato do maciço rochoso da UHE Jirau possuir baixa condutividade hidráulica, confirmando o que havia sido discutido na referência [9];
- A anisotropia do maciço rochoso afeta o resultado final da subpressão, com aumento de 3% no caso do MTO. Essa influência só é observada no método de Andrade [1] pela alteração na magnitude do fator de forma λ . Como o espaçamento entre drenos foi reduzido no MTO, o efeito da anisotropia também é menor se comparado ao projeto original (onde a anisotropia elevou a subpressão em 6%), salientando a funcionalidade desta proposta para a UHE Jirau.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados no Item 4, é possível concluir que:

- A proposta do Modelo de Tratamento Otimizado (MTO) é eficiente na redução da subpressão, com diminuição de até 9% nas análises por modelagem numérica;

6. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à Energia Sustentável do Brasil (ESBR) pelo fornecimento e liberação dos projetos executivos e relatórios, além da divulgação desta pesquisa. Da mesma forma, agradecem à Construções

e Comércio Camargo Corrêa pela liberação dos dados de injeção durante a execução do empreendimento, bem como agradecem à aluna Cassiana Reis pelo auxílio neste trabalho.

7. PALAVRAS-CHAVE:

Subpressão, cortina de injeção, sistema de drenagem, anisotropia

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANDRADE, R.M. (1988) - “Mecânica do escoamento em maciços fraturados”, livro editado pela Engevix, Rio de Janeiro.
- [2] COSTA, W. (1991) – “Tratamento de impermeabilização de fundações de barragens: será mesmo necessário”, anais do congresso XIX Seminário Nacional de Grandes Barragens, CBDB, Aracajú.
- [3] OLIVEIRA, A.M.S (1981) – “Estudo da percolação d’água em maciços rochosos para o projeto de grandes barragens”, dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [4] ENERGIA SUSTENTÁVEL DO BRASIL (2017) – “A usina”, Disponível em <http://www.energiasustentaveldobrasil.com.br/a-usina>, Acesso em 25 de abril de 2017.
- [5] CHIOSSI, N. (2013)- “Geologia de Engenharia”, livro editado pela Oficina de Textos, São Paulo.
- [6] SILVA, P. J (2014) – “Usinas Hidrelétricas do século 21: Empreendimentos com restrições à hidroeletricidade” artigo publicado na Revista Engenharia Nº 619, São Paulo.
- [7] HOULSBY, A.C (1990) – “Construction and Design of Cement Grouting”, livro editado pela John Wiley & Sons, New York.
- [8] OLIVEIRA, A. et. al. (1975) – “Ensaio de perda d’água sob pressão: Diretrizes”, manual editado pela ABGE, São Paulo.

[9] LOPES, M.B. (2015) – “Análise da eficiência do sistema de vedação da fundação em granito de uma barragem de concreto”, dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

[10] ZANGH, L (2017) – “Engineering Properties of Rocks.”, livro editado pela Elsevier, Tucson.

[11] ELETROBRÁS, Centrais Elétricas Brasileiras S.A (2003) – “Critério de projeto civil de Usinas Hidrelétricas”, manual editado pelo CBDB, São Paulo.



André ASSIS

André Assis é professor titular da Universidade de Brasília (UnB), atuando nas áreas de túneis, barragens e gestão de riscos geotécnicos. Graduou-se pela própria UnB (1980) e obteve seu doutorado pela Universidade de Alberta, Canadá (1990). Foi professor visitante na Universidade de Nevada, EUA e no Instituto Federal Tecnológico de Lausanne, Suíça. Foi presidente do Comitê Brasileiro de Túneis (CBT), da Associação Internacional de Túneis e do Espaço Subterrâneo (ITA) e da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS).



Marieli LOPES

Marieli Lopes é professora titular da Universidade Comunitária da Região de Chapecó (Unochapecó), atuando nas áreas de engenharia de barragens, taludes em maciços rochosos e fundações profundas. Graduou-se em Engenharia Civil na própria Unochapecó (2008) e obteve seu mestrado na Universidade Federal de Ouro Preto (2015), onde conclui seu doutorado (2020). Foi engenheira na Construções e Comércio Camargo (2008-2015), atual Camargo Corrêa Infra, atuando em projetos como UHE Foz do Chapecó, UHE Jirau e Expansão da Estrada de Ferro Carajás. Atualmente é coordenadora do curso de Engenharia Civil na Unochapecó.

1. INTRODUÇÃO

Os trabalhos a serem apresentados ao Conselho Editorial da Revista Brasileira de Engenharia de Barragens do CBDB deverão ser inéditos, não tendo sido antes publicados por quaisquer meios. Apenas profissionais qualificados deverão ser aceitos como autores. Profissionais recém-formados ou estagiários poderão ser aceitos, desde que participem como colaboradores.

2. EXTENSÃO DO TRABALHO

Os trabalhos, para serem aceitos para divulgação, deverão ter no máximo dez páginas, incluindo as ilustrações, esquemas e o sumário em português e inglês. Os trabalhos que excederem este número de páginas serão devolvidos aos autores para sua eventual redução.

3. TIPO DE ARQUIVO MAGNÉTICO

Os trabalhos a serem recebidos pelo Conselho Editorial da Revista Brasileira de Engenharia de Barragens do CBDB deverão estar em formato Word 97 for Windows ou superior. Não serão recebidos arquivos em separado, isto é, com o texto e as ilustrações em arquivos diferentes. As ilustrações deverão ser agrupadas no corpo dos trabalhos em formato JPEG.

4. NÚMERO DE AUTORES E COAUTORES

Os autores e coautores estão limitados a um número máximo de quatro, ou seja, um autor e até três coautores. Os trabalhos com mais de quatro participantes serão devolvidos aos autores para atendimento a esta diretriz. Caso haja mais colaboradores no trabalho, os mesmos poderão ser citados em Agradecimentos (ver item 10).

5. CONFIGURAÇÃO DE PÁGINA

A configuração de página deve obedecer a seguinte formatação:

Margens:

- Superior: 2,5 cm;
- Inferior : 2,0 cm;
- Esquerda: 2,5 cm;
- Direita: 2,5 cm;
- Medianiz: 0 cm.

A partir da margem:

- Cabeçalho: 1,27 cm;
- Rodapé: 1,27 cm.

Tamanho do Papel:

- A4 (21 x 29,7 cm);
- Largura: 21 cm;
- Altura: 29,7 cm;
- Orientação: retrato em todo o trabalho.

6. PADRÃO DE LETRAS E ESPAÇAMENTO

Os trabalhos deverão ser digitados em arquivo Word 97 for Windows ou superior, com as seguintes formatações de fonte:

Fonte:

- Arial;
- Tamanho 12 em todo o trabalho.

Parágrafo:

- Espaçamento entre linhas: simples;
- Alinhamento: justificado;
- Marcadores como o desta linha (traço) poderão ser utilizados sempre que necessário.

7. PÁGINA DE ROSTO

Apenas na primeira página deverá constar o Cabeçalho (ver item 7.1).

O título do trabalho deverá ser escrito a 60 mm do topo (configurar apenas esta página com margem superior de 6 cm), em letra maiúscula, em negrito e centralizado na página. Na sequência deverão ser apresentados os nomes dos autores, com os respectivos títulos profissionais e instituição (ver item 7.3). Em seguida, o Resumo e o *Abstract* (ver item 7.4).

A página de rosto deve ser limitada a uma única página, ou seja, todas as informações necessárias devem estar nela contidas (título, nome e cargo dos autores, Resumo e *Abstract*).

7.1 - Cabeçalho

O Cabeçalho, a ser apresentado apenas na página de rosto, está indicado no exemplo a seguir. A fonte é Arial 10, iniciais em maiúscula ou versalete (conforme a versão do Word 97 for Windows ou superior). Na primeira linha deve ser digitado: Comitê Brasileiro de Barragens. Na segunda linha: Revista Brasileira de Engenharia de Barragens do CBDB.

Na terceira linha: a data; exemplo: 11 de abril de 2013.

7.2 – Título do trabalho

O título do trabalho deve ser digitado em letra maiúscula, negrito e alinhamento centralizado. Este é o único item do trabalho que recebe negrito.

7.3 – Autores e coautores

Os nomes dos autores deverão ser apresentados com apenas um dos sobrenomes todo em letras maiúsculas. Abaixo do nome de cada um dos autores deverá ser indicado, com letras maiúsculas iniciais, o título profissional (Consultor, Título Universitário, Diretor Técnico, Coordenador Geral, etc) e ao lado, separado por um traço, a empresa ou instituição do autor (ver também item 4).

7.4 – Resumo / Abstract (item sem numeração)

Cada trabalho deverá ser iniciado por um resumo em português, não excedendo dez linhas, seguido de um resumo (também de no máximo

dez linhas) em inglês (*Abstract*), para permitir seu cadastramento por organismos internacionais. Para auxiliar na versão dos resumos para o inglês, consultar os dicionários técnicos do CBDB/ICOLD disponíveis no site www.cbdb.org.br.

Serão devolvidos os trabalhos que não apresentarem adequadamente o Resumo e o respectivo *Abstract*.

Quando houver necessidade, o Resumo e o *Abstract* poderão ter mais que dez linhas, desde que caibam na página de rosto e não haja discordância com os demais itens desta diretriz.

8. ITEMIZAÇÃO GERAL

Os itens principais do trabalho deverão ser numerados sequencialmente, com a Introdução recebendo o N° 1 e as Referências Bibliográficas recebendo o número final. Estes deverão ser digitados com letra maiúscula e centralizados na linha, com recuo esquerdo de 0,50 cm.

Exemplo:

1. INTRODUÇÃO

Os itens secundários serão alinhados sempre à esquerda, com a designação sequencial, por exemplo: 2.1, 2.2, 2.3, etc., em minúsculo com apenas a primeira letra em maiúsculo, usando a formatação em maiúscula ou versalete, conforme a versão do Word 97 for Windows ou superior. Caso haja a necessidade de nova itemização, a mesma deverá ser, por exemplo: 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, etc., em itálico, com as letras minúsculas e somente a primeira letra maiúscula.

Exemplo:

2.1 Item Secundário

2.1.1 Item Terciário

O primeiro parágrafo, após cada item ou subitem, deverá ser iniciado uma linha após o título do item (ou subitem), com alinhamento justificado.

A primeira palavra deverá começar junto à margem esquerda.

Entre um parágrafo e outro deverá sempre ser deixada uma linha de espaçamento, sendo que entre a última linha do último parágrafo e o item seguinte deverão ser deixadas duas linhas.

9. CONCLUSÕES

Neste item o(s) autor(es) deverá(ão) apresentar de forma bem sucinta as principais conclusões ou recomendações que resultaram de sua pesquisa, trabalho ou relato de um determinado evento técnico. (Adaptado das “Diretrizes para apresentação de trabalhos para seminários, simpósios e workshops organizados pelo CBDB” do XXIX Seminário Nacional de Grandes Barragens (SNGB), Porto de Galinhas, PE, 2013).

Trabalhos sem uma conclusão final serão devolvidos aos autores para as devidas complementações.

10. AGRADECIMENTOS (item opcional)

A critério do autor, poderão ser apresentados agradecimentos às empresas e/ou pessoas que contribuíram para a elaboração do trabalho, sempre após o item Conclusões.

11. PALAVRAS-CHAVE

Após os Agradecimentos, deverá ser apresentada uma relação de no mínimo três e no máximo cinco palavras-chave, para possibilitar a localização do trabalho em função das mesmas na versão eletrônica dos anais (CD). Caso não haja Agradecimentos, o item Palavras-Chave deverá ser apresentado após o item Conclusões.

12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

O item Referências Bibliográficas é o último. Ele encerra o trabalho. Deverá estar posicionado após o item Palavras-chave. O padrão para a apresentação das referências bibliográficas é o mesmo da Comissão Internacional das Grandes Barragens (ICOLD), conforme diretrizes a seguir, com exemplo ilustrativo:

Todas as referências bibliográficas deverão ser indicadas no texto com a numeração respectiva;

Todas as referências apresentadas deverão ser numeradas sequencialmente (na ordem em que aparecem no texto) mostrando o número em destaque e entre colchetes após a citação;

O nome do(s) autor(es) deverá(ão) ser apresentado(s) em letras maiúsculas, com o sobrenome por extenso, seguido das iniciais do primeiro nome e dos nomes intermediários, separadas por ponto;

Na sequência, deverá ser indicado, entre parênteses, o ano de publicação dos anais ou do livro consultado, com hífen ao final;

Na sequência, indicar entre aspas o título do trabalho ou do livro consultado, com apenas a primeira letra maiúscula e com vírgula ao final;

Indicar na sequência os anais em que o trabalho foi apresentado, seguido do tema, volume dos anais e país ou cidade em que o mesmo foi realizado.

Exemplo:

O texto deverá estar com alinhamento justificado e recuo especial com deslocamento de 1,00 cm (Formatar Parágrafo).

Exemplo:

[1] DUNNICLIFF, J. (1989) – “Geotechnical Instrumentation for Field Performance”, livro editado pela John Wiley & Sons, Inc., New York;

[2] HOWLEY, I., McGRATH, S. e STEAWRT, D. (2000) – “A Business Risk Approach to Prioritizing Dam Safety Upgrading Decisions”, Anais Congresso Internacional ICOLD, Beijing, Q.76 – R.17;

[3] SILVEIRA, J.F.A. (2003) – “A Medição do Coeficiente de Poisson em uma de Nossas Barragens”, Anais XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens – CBDB, Salvador, BA.

13. ILUSTRAÇÕES

As eventuais ilustrações dos trabalhos técnicos, sejam elas figuras, gráficos, desenhos ou fotos, deverão estar sempre incorporadas ao texto, não devendo ser apresentadas em separado. Ao formatar a figura, o layout deve ter a disposição do texto alinhada e o texto deve estar com o alinhamento centralizado. Todas as referidas ilustrações deverão ser identificadas pela palavra “FIGURA” e numeradas sequencialmente. A palavra “FIGURA”, sua numeração e título deverão ser apresentados imediatamente abaixo das respectivas ilustrações, também com o alinhamento centralizado. O título de cada figura deverá ser escrito com a primeira letra em maiúsculo. A referência a elas no texto do trabalho deve ser em minúsculo, apenas com a inicial em maiúscula.

As fotos ou outras ilustrações quaisquer poderão ser apresentadas em cores, sempre que necessário. Caso sejam utilizadas cores para representar desenhos e figuras, deverá haver convenções de representação que permitam identificações independentes da cor.

As ilustrações poderão ser apresentadas com a orientação retrato ou paisagem, ou seja, poderão ser giradas na página de forma a mudar a sua orientação. A configuração da página deve permanecer sempre orientada como retrato para garantir a posição do rodapé uniforme em todo o documento (ver item 5). Desta forma, o título da ilustração também permanecerá com a orientação retrato. Não serão aceitos trabalhos com as ilustrações em separado ou em outro programa que não seja o Word 97 for Windows ou superior.

14. TABELAS

As tabelas deverão ser incorporadas ao texto, não devendo ser apresentadas em separado. A tabela deverá ter alinhamento centralizado. O tamanho da fonte pode ser inferior ao especificado para todo o trabalho (Arial 12), desde que o conteúdo permaneça legível e a fonte não seja inferior a Arial 7. Todas as referidas tabelas deverão ser identificadas pela palavra “TABELA” e numeradas sequencialmente. A palavra “TABELA”, sua numeração e título deverão ser apresentados abaixo da mesma e também centralizados. O título das tabelas deverá ser escrito com a primeira letra em maiúsculo. A referência a elas no texto do trabalho deve ser em minúsculo, apenas com a inicial em maiúscula.

As tabelas poderão ser apresentadas com a orientação retrato ou paisagem, ou seja, poderão ser giradas na página de forma a mudar a sua orientação. A configuração da página deve permanecer sempre orientada como retrato, para garantir a posição do rodapé uniforme em todo o documento (ver item 5). Desta forma, o título da tabela também permanecerá com a orientação retrato.

15. SIMBOLOGIA E FÓRMULAS

Todas as grandezas físicas deverão ser expressas em unidades do Sistema Métrico Internacional. As equações e fórmulas devem ser localizadas à esquerda e numeradas, entre parênteses, junto ao limite direito na mesma linha, deixando uma linha em branco entre as equações/fórmulas e o texto. Todos os parâmetros das equações e fórmulas deverão ser indicados com suas respectivas unidades. A referência a elas no texto do trabalho deve ser com a palavra “Equação” ou “Fórmula” e o respectivo número ao lado, ou seja, em minúsculo, apenas com a inicial em maiúscula.

16. TEMÁRIO / CONTRIBUIÇÕES

O tema deverá ser indicado pelo autor, quando do encaminhamento do trabalho ao Conselho Editorial da Revista Brasileira de Engenharia de Barragens do CBDB.

Caso o Conselho Editorial não concorde com o assunto selecionado pelo autor, este poderá ser eventualmente deslocado para outro tópico. Se o trabalho não se encaixar em nenhum dos temas selecionados para o evento mas apresentar bom nível técnico, poderá ser publicado como Contribuição Técnica.

17. LÍNGUA

Todos os trabalhos a serem publicados na Revista Brasileira de Engenharia de Barragens do CBDB deverão ser elaborados em língua portuguesa, assim como todas as ilustrações que o acompanham deverão conter legenda também em português. Apenas os trabalhos citados como referências bibliográficas deverão estar na língua original em que os mesmos foram elaborados.

Os trabalhos eventualmente recebidos pelo Conselho Editorial em outro idioma (que não seja o acima mencionado) serão encaminhados de volta aos autores para sua tradução para o português.

18. LICENÇA PARA PUBLICAÇÃO DOS TRABALHOS

Para que o trabalho seja aceito é necessário que um dos autores envie autorização devidamente preenchida e assinada.

19. FOTO E CURRÍCULO DOS AUTORES

Deverão ser enviados, anexos aos artigos, uma foto 3x4 em alta resolução e um mini currículo, com até 400 caracteres, de cada um dos autores.

CBDB | SEMANA DE BARRAGENS 2020

Á G U A E E N E R G I A

PROGRAMAÇÃO

- ▶ III Simpósio de Gestão de Riscos para Segurança de Barragens de Rejeitos - Edição Internacional - STDS
- ▶ Workshop sobre Pequenas e Médias Hidrelétricas - XII SMPCHS
- ▶ III Reunião Técnica de Acidentes e Incidentes de Barragens - ETIAB
- ▶ Simpósio Rios Doce e Paraopeba - Impactos e Soluções
- ▶ Ciclos de Palestras sobre:
 - Ações de Defesa Civil para Melhorar a Interação entre os Planos de Emergência e Contingência
 - Usinas Hidrelétricas Reversíveis
 - Planos de Ação de Emergência em Áreas Extensas e Populosas
 - A Segurança Nacional de Infra-estruturas Críticas - Barragens
 - Ações do Grupo de Emergência do Governo Federal Brasileiro

Simpósio de Investigação, Desenvolvimento e Inovação Tecnológica de Barragens

IBRAM - Apresentação do *Mining Hub*

UFMG - Apresentação do *Outlab*

UFMG - Apresentação e demonstração de trabalhos práticos em barragens desenvolvidos por laboratórios / áreas de pós-graduação sobre:

- Biologia / Ciências Sociais / Concreto / Eletro-eletrônica / Geotecnia / Hidráulica / Mecânica / Minas e Metalurgia

PARTICIPE!

INSCRIÇÕES E PATROCÍNIO:

11 a 14/05/2020
UFMG – Belo Horizonte
Minas Gerais - Brasil

**MAIOR EVENTO SOBRE
BARRAGENS JÁ REALIZADO**

P A R A A V I D A

► Mini Cursos:

- Análise de Instrumentação de Barragens
- Dambreak e Hec-ras
- Métodos Geofísicos e Remotos para Monitoramento de Segurança de Barragens
- Patologias de Concreto em Barragens
- Análise e Interpretação de Inclínômetros

► Cursos ministrados pelas Comissões Técnicas do CBDB:

- CT04 – Hidráulica de Vertedouros
- CT06 – Barragens de Enrocamento com Face de Concreto
- CT08 – Formas de Contratação de Serviços de Engenharia e Construção de Barragens
- CT09 - Ciclo de Conferências sobre Meio Ambiente e Barragens de Rejeitos
- CT11 – Estudo e Contenção de Corridas Detríticas

► Reunião Aberta do Comitê Técnico do CBDB:

- CT02 - Comissão Técnica e Segurança de Barragens
- CT03 - Comissão Técnica de Barragens de Concreto
- CT05 - Comissão Técnica de Barragens da Terra e do Rocha
- CT07 - Comissão Técnica de Barragens de Rejeitos
- CT13 - Comissão Técnica de Condições Regulatórias de Barragens e Reservatórios

► Conversando sobre Barragens com Ana - Aneel - ANM - Ibama

► Encontro sobre Barragens com as Associações Similares

► Palestras de Patrocinadores

O Comitê Brasileiro de Barragens tem a honra de ser apoiado por sócios coletivos e mantenedores.

Venha engrandecer ainda mais este time. Associe-se através do e-mail cbdb@cbdb.org.br.

SÓCIOS MANTENEDORES



SÓCIOS COLETIVOS

