

**CÓDIGO 1583 – ETAPAS PRELIMINARES PARA ESTUDOS DE AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE UMA BARRAGEM DE TERRA QUANTO AO USO E REBAIXAMENTO DO NÍVEL DO RESERVATÓRIO PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO DURANTE A CRISE HÍDRICA**

**Adriana Verchai de Lima Lobo** <sup>(1)</sup>

Doutoranda e Mestre em Engenharia Civil (Materiais) e Engenheira Civil formada pela Universidade Federal do Paraná, e Especialista em Saneamento Ambiental, Especialista em Segurança de Barragens e Especialista em Gestão de Recursos Hídricos pelo IFCE. Atua a 20 anos no Saneamento (obras, planejamento, operação e manutenção de ETAS, reservatórios, captações e barragens em atividades relacionadas à instrumentação de barragens, estudos geotécnicos) e atualmente desenvolve trabalhos na Área de Pesquisa e Inovação da Sanepar.

**Alex Sandro Franco de Souza** <sup>(2)</sup>

Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Especialista em Gerenciamento Estratégico em Projetos, Administrador de Empresas, Técnico em Edificações. Lecionou nas áreas de Engenharia e Administração (Técnico, graduação e pós-graduação). Atuando a 22 anos em Saneamento (Finanças, Administração, Planejamento, Operação, Meio Ambiente, Treinamento) e atualmente desenvolve trabalhos na Área de Pesquisa e Inovação da Sanepar.

**Gustavo Rafael Collere Possetti** <sup>(3)</sup>

Doutor e Mestre em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, com especialização em Fotônica e Automação em Processos de Petróleo e Gás Natural. Engenheiro Eletricista, com ênfase em Eletrônica e Telecomunicações, pela UTFPR; e, em Engenharia Ambiental, pela UFPR. Atualmente é Gerente da Pesquisa e Inovação da Companhia de Saneamento do Paraná. Desenvolve projetos com foco em bioenergia e eficiência energética, instrumentação, metrologia e métodos quantitativos.

**Endereço** <sup>(1)</sup>: Rua Engenheiros Rebouças, 1376, Rebouças - Curitiba - PR - CEP: 80215-900 - Brasil - Tel: +55 (41) 3330-3071 – 08002000115- Whatsapp (41) 99682-9640 e-mail: [adrianalobo@sanepar.com.br](mailto:adrianalobo@sanepar.com.br)

## RESUMO

O relatório de previsão climática da primavera de 2021 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) indicou uma maior possibilidade de chuvas abaixo da média em quase toda a região do Estado do Paraná, o que é consistente com a tendência histórica de diminuição das chuvas na bacia do Rio Paraná desde a década de 1990, com uma intensificação nos anos 2000. Isso levou a uma situação de emergência hídrica no Paraná, situação que foi decretada pelo governo do Estado em 2020 e 2021. A região de Curitiba depende do Sistema de Abastecimento Integrado de Curitiba e Região Metropolitana (SAIC). Devido à seca intensa em 2020 e 2021, os reservatórios do SAIC sofreram redução significativa nos níveis e volumes de água armazenados chegando a 28% de sua capacidade total em agosto de 2020. Essa foi a maior crise hídrica dos últimos 90 anos da história do Estado do Paraná, vários reservatórios atingiram cotas próximas dos mínimos históricos, porém mantiveram descargas constantes visando a manutenção da geração de energia ou do abastecimento público. Nesses casos, com os reservatórios em cotas mais baixas e com volume menor, a variação do nível d'água no talude de montante da barragem de terra varia de maneira diferente dos níveis de quando a barragem e reservatório estão em operação normal ou fora de uma crise hídrica. Tendo em vista o comportamento atípico dos níveis dos reservatórios, e a partir da indicação da boa prática da engenharia de barragens, quando muda o regime operacional ou há rebaixamento do nível de água do reservatório, devem ser reavaliados os aspectos da segurança destas estruturas, através de análises geotécnicas para as condições de rebaixamento rápido, a fim de conhecer sobre como estas estruturas se comportam nestas condições. Este artigo traz luz as etapas importantes desta investigação técnica minuciosa do extenso arcabouço de documentação de um empreendimento como este, dados sobre a instrumentação e desempenho, como foram construídas e comportaram-se durante a construção e enchimento do reservatório, conhecer parâmetros geotécnicos dos materiais do maciço da barragem e fundação, as observações registradas de campo realizadas à época de investigação preliminares durante fase de concepção, projeto e construção; ; obter dados hidro meteorológicos da região, de modo a obter o “*as-built*” da geometria da estrutura, visando modelar a seção típica de modo fidedigno a estrutura em campo para inferir a este modelo numérico e vice versa, e obter resultados sobre seu desempenho durante este período de atípico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barragens, Abastecimento Público, Crise Hídrica, Reservatório e Talude.

## INTRODUÇÃO

Para realização de qualquer estudo geológico, geotécnico, hidrológico, hidro geológico, hidrotécnico com foco na segurança de barragens, é primordial ter em mãos todas as informações conhecidas das características de cada parte da barragem, que possam ser inferidas as partes desconhecidas, sejam elas seções, materiais, instrumentação ou método construtivo, para ter condições de modelar o comportamento da estrutura, através de métodos ou modelos numéricos. A Sanepar possui grandes barragens em operação, que abastecem Curitiba e região metropolitana e uma população urbana de mais de 3,5 milhões de pessoas. Em 2020 o Estado do Paraná enfrentou uma das maiores crises hídricas dos últimos 90 anos, da sua história, os reservatórios dessas barragens atingiram cotas próximas dos mínimos históricos e mantiveram descargas constantes visando a manutenção do abastecimento público da grande Curitiba e região metropolitana. Nesses casos, com os reservatórios em cotas mais baixas e com volume menor, a variação do nível d'água no talude de montante da barragem varia de maneira diferente dos níveis de quando a barragem está em operação normal. Tendo em vista o comportamento atípico dos níveis dos reservatórios das barragens, foi elaborado um estudo geotécnico detalhado a fim de aprimorar o conhecimento sobre o comportamento destas estruturas visando a segurança e prevenção de situações mais críticas que poderiam vir a ocorrer, em paralelo com o desenvolvimento de um sistema integrado de monitoramento. O documento "Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas" de 2003 da Eletrobrás, cita que para garantia de estabilidade ao escorregamento de taludes devem ser verificados quatro casos de carregamento: final de construção, percolação estável, rebaixamento rápido e sísmica. O trabalho foi realizado juntamente com a equipe técnica da Sanepar e da Fundação Parque Tecnológico Itaipu – Brasil, o qual teve participação na execução de análises geotécnicas voltadas à condição de rebaixamento rápido e no desenvolvimento de sistemas de monitoramento. Ocorre que, tendo em vista que as barragens foram construídas em diferentes períodos, inclusive em décadas diferentes e, consequentemente, projetadas por diferentes empresas, foi necessária uma análise minuciosa a partir de um extenso arcabouço de documentação sobre as barragens da região metropolitana de Curitiba, que contemplam informações de projeto básico, executivo, *as-built* e informações de monitoramento, detalhada da documentação sobre as estruturas, assim como análise dos relatórios de desempenho e instrumentação, a fim de obter como resultado um panorama geral sobre a saúde das estruturas durante o período de comportamento atípico.

## OBJETIVOS

Demonstrar as etapas que antecedem a modelagem numérica, tais como a partir de análises das séries históricas dos níveis dos reservatórios e da instrumentação, para definir os períodos que serão simulados posteriormente, a fim de verificar o comportamento do fator de segurança sob estas condições, demonstrar estas etapas importantes desta investigação técnica minuciosa do extenso arcabouço de documentação de um empreendimento como este, a partir de dados sobre a instrumentação e desempenho, como foram construídas e comportaram-se durante a construção e enchimento do reservatório, conhecer parâmetros geotécnicos dos materiais do maciço da barragem e fundação, as observações registradas de campo realizadas à época de investigação preliminares durante fase de concepção, projeto e construção; dados hidro meteorológicos da região, de modo a obter o "*as-built*" da geometria da estrutura, visando modelar a seção típica de modo fidedigno a estrutura em campo para inferir a este modelo numérico e vice e versa, visando a modelagem numérica com resultados sobre o desempenho da estrutura durante este período de atípico.

## METODOLOGIA UTILIZADA

As condições críticas para estabilidade mediante um rebaixamento rápido estão associadas a diversos fatores como, amplitude da variação do nível de água do reservatório durante o rebaixamento, velocidade de rebaixamento, geometria da estrutura, permeabilidade do solo, entre outros. Por isso, a importância de estudos de caso com condições reais de operação do reservatório, com a devida validação e calibração do modelo, a fim de verificar a estabilidade da estrutura para condições específicas de comportamento. Ressalta-se que as análises realizadas visaram, a partir da documentação e informações disponibilizadas pelo empreendedor, elaborar um modelo geotécnico representativo para as simulações de fluxo e estabilidade voltadas à observação das variações de fator de segurança do talude de montante mediante rebaixamento rápido.

Para elaboração dos estudos devem ser disponibilizados projetos da barragem com seções instrumentadas contendo, em sua maioria, informações do maciço compactado, sistema de drenagem e instrumentação da barragem, bem como documentos e projetos intitulados como “*as-built*” que indicam refletir a realidade de campo da barragem e também das estruturas associadas como vertedouros, casa de máquinas, tomadas de água, bem como referente à instrumentação. Os desenhos das seções elaborados durante o diagnóstico da segurança da barragem podem trazer informações importantes que podem ser utilizados para complementar as informações retiradas de documentos e/ou de projetos e relatórios antigos, principalmente porque podem conter alterações nas seções típicas devido às condições inerentes à fase de construção, manutenção ou operação da barragem, e que dependendo da magnitude, podem vir a mudar toda a seção típica de projeto, que afetará o resultado do estudo, condições de contorno e parâmetros de entrada da modelagem.

Na ocasião foi revisitada uma vasta documentação das barragens com o propósito de:

- Verificar observações de campo realizadas à época de investigação e construção;
- Obter informações “*as-built*” da geometria das estruturas;
- Verificar as análises de fluxo e estabilidade realizadas à época de projeto e durante período de operação das estruturas;
- Verificar parâmetros geotécnicos dos materiais do corpo da barragem e fundação;
- Verificar informações de levantamentos topográficos;
- Obter histórico de dados de instrumentação;
- Obter histórico de dados hidro meteorológicos da região.

Após análise da documentação, foi possível elaborar o modelo geotécnico das principais seções das barragens concentrando as informações mais atualizadas disponíveis (geometria, instrumentação, sondagens, materiais, etc). Este modelo foi utilizado para análises geotécnicas de fluxo e estabilidade visando verificar as condições de fluxo e estabilidade do talude de montante para rebaixamento rápido durante a crise hídrica ocorrida, assim como prever situações de rebaixamentos rápidos que possam vir a ocorrer. As análises geotécnicas tiveram por base, além dos documentos de referência dos empreendimentos, dados pluviométricos disponíveis no portal HidroWeb da Agência Nacional de Águas (ANA) e no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A área onde estão localizadas as barragens e reservatórios de abastecimento de Curitiba e Região Metropolitana apresenta, segundo o Inventário de Estações disponível no HidroWeb, diversas estações pluviométricas ativas. A Estação Curitiba (código 83842) possui registros de 29 anos completos de dados disponíveis no site do INMET, sendo então adotada como representativa da pluviometria local. A Estação Curitiba localiza-se sob as coordenadas 49° 13' 48" de latitude Sul e 25° 27' 00" de longitude Oeste, e situa-se a 923,5 metros acima do nível do mar à aproximadamente 11,5 km de distância da Barragem Iraí, 18,7 km da Barragem Passaúna, 14,5 km da Barragem Piraquara II e 21,5 km da Barragem Piraquara I. A região de estudo apresenta sazonalidade pluviométrica bem definida, com período úmido no verão e seco no inverno. O total médio anual, determinado a partir dos registros de 29 anos completos de 1981 a 2010, é de 1.575,8 mm, sendo o total médio mensal mínimo em agosto (74,0 mm) e o máximo em janeiro (218,3 mm). O Estado do Paraná passou por uma das maiores crises hídricas da sua história, registrando chuvas abaixo da média desde 2018, tendo sido agravada em março de 2020. De agosto a outubro de 2020, o regime de chuvas ficou entre 50% e 70% abaixo da média em todo o Paraná, com uma situação ainda mais preocupante na Região Metropolitana de Curitiba. O déficit hídrico na região, onde o impacto no abastecimento público é mais grave, foi de 346 milímetros durante 2020. Até a data 29/10/2020, o nível das barragens que compõem o Sistema de Abastecimento Integrado de Curitiba e Região Metropolitana estava em 27,5%, um dos mais baixos de sua história.

## **GEOMETRIA (BARRAGEM E FUNDAÇÃO) MATERIAIS COM PARÂMETROS DEFINIDOS**

Para definição das seções de estudo, é primordial conhecer toda a documentação técnica ou *databook* da barragem e estruturas associadas, documentos de referência como: projeto básico, executivo, “*as-built*”, “*as-is*”, instrumentação, boletins de ensaios dos materiais, controle tecnológico dos materiais, histórico de construção, registros e relatórios técnicos operacionais de manutenção e operação da barragem. Como o olho humano é insubstituível, devem também ser coletadas informações em visitas in loco, visando confrontar com os documentos existentes e avaliar os diversos critérios. Para realização dos estudos de segurança de barragens, seja ele estudo de estabilidade, fluxo e percolação ou de rebaixamento rápido, existe uma condição básica, é necessário utilizar os parâmetros geotécnicos conhecidos seja de ensaios ou de bibliografias relativos às características do solo da região onde a barragem foi construída (tipo de material, peso específico, etc.), tais como permeabilidade e resistência ao cisalhamento, pois para os estudos de estabilidade, percolação e

rebaixamento rápido a permeabilidade dos materiais é um parâmetro bastante importante. O cenário ideal para as análises de rebaixamento rápido consiste em utilizar parâmetros efetivos obtidos por meio de ensaios triaxiais adensados não drenados (CU – *Consolidated Undrained*). No caso destes estudos foram encontrados relatórios com resultados destes ensaios para alguns materiais da barragem no relatório de investigações geotécnicas realizados à época de projeto.

### **INSTRUMENTAÇÃO SUFICIENTE PARA VALIDAÇÃO DA ANÁLISE DE FLUXO**

O cenário ideal para os estudos de rebaixamento rápido é a utilização dos níveis de água a montante (nível do reservatório) e jusante (indicadores de nível d'água) como condições de contorno e a utilização dos instrumentos do maciço e fundação para validação/calibração e, eventualmente, ajuste do modelo. Assim, quanto maior o número de instrumentos na seção distribuídos ao longo do maciço e fundação, maior a probabilidade de um modelo numérico representativo do comportamento da estrutura.

### **TALUDE DE MONTANTE EM CONTATO COM RESERVATÓRIO**

A operação de barragens requer mudanças no nível da água do reservatório constantes, as quais podem modificar ao longo do tempo o fator de segurança contra o deslizamento do talude a montante de barragens de terra. Os fatores de segurança de taludes de montante tendem a variar numa faixa maior e com maior velocidade, pois o talude encontra-se diretamente em contato com a pressão do reservatório. Essa tensão aplicada é dissipada no maciço e exerce menor influência no fator de segurança do talude de jusante.

### **GEOMETRIA DAS SEÇÕES DE ANÁLISE**

Em caso de várias seções atendendo às condições anteriores, é selecionada aquela com diferenças geométricas e/ou geotécnicas relevantes, indicativas de menor fator de segurança quando à estabilidade. Tal escolha visa analisar sempre as condições críticas, tornado o estudo de rebaixamento rápido a favor da segurança. Alguns critérios de escolha são em função de características geométricas.

### **ESCOLHA DA SEÇÃO (ÕES) A SER (EM) ESTUDADA (S)**

As seções instrumentadas da barragem, podendo ser escolhida as mais instrumentadas, com instrumentos, no filtro, galeria, no maciço e fundação. O próximo critério para definição da seção a ser estudada pode ser a altura e a não existência de bermas de equilíbrio, que contribuem para a estabilidade do talude. Ao analisar o relatório sobre Avaliação Geológico-Geotécnica da RPSB, notou-se que a seção escolhida para as análises de estabilidade, considerou a seção crítica, por estar próxima ao leito original do rio, mas isso pode variar de cada sítio ou estrutura, ou ainda de cada engenheiro analista. Para as análises de percolação foram utilizados os dados dos instrumentos da seção conhecida.

### **SEÇÃO COMO EXECUTADO**

Durante a construção, geralmente ocorre alguns ajustes no projeto original, visando a adequação às condições de fundação encontradas no campo e a otimização do aproveitamento dos materiais de construção. Os principais ajustes encontrados nos estudos e documentos consultados que impactaram diretamente a modelagem da seção da barragem em estudo:

- Eliminação da zona exterior do maciço de montante e inferior do maciço de jusante, o que resultou na utilização de um mesmo material em todo o maciço da barragem;
- Alteração da geometria do tapete horizontal na porção de jusante da barragem, uma vez que o tapete drenante foi executado em uma elevação inferior à definida em projeto, de forma que a estrutura ficou em contato diretamente com a fundação;
- Alteração na geometria do dreno do pé para adequação com a escavação executada, uma vez que com a colocação do tapete drenante em contato com a fundação conforme citado na alínea anterior, foi necessário proceder com ajustes no encontro entre o dreno de pé e o tapete drenante;
- Alterações no coroamento da barragem a partir da execução de contra flecha de sobre-elevação variável, desde valor zero até o valor máximo de 0,90 m na zona mais alta da barragem, fazendo com que a cota de coroamento da barragem, em alguns trechos, esteja na EL. 892,20 m. Durante a

modelagem foi admitido que o material presente na sobre elevação (entre a EL. 891,30 e 891,20) é o mesmo material utilizado no corpo do aterro (argila compacta);

- Alterações na geometria dos veios drenantes a jusante e a montante do núcleo e substituição da camada contínua de areia por drenos descontínuos constituídos por brita envolvida por geotêxtil. Além disso, o veios drenantes superior de jusante foi executado apenas entre as estacas 30+7,5 m e 47+7,5 m. Dessa forma, a jusante da seção P6', localizada na estaca 16+9 m, executou-se apenas um veios drenantes na porção inferior do maciço (EL. 882,75 m). Visto que não há informações a respeito das especificações técnicas do geotêxtil utilizado, como simplificação do modelo numérico, os veios drenantes foram modelados como uma camada de solo granular equivalente com o material utilizado no filtro vertical;
- Detalhamento do rip-rap, uma vez que foi executada uma camada que permitiu a interligação do enrocamento com os veios drenantes presentes no talude de montante;
- Redução do filtro vertical nos últimos 2 metros a partir do topo para 0,60 m;
- Deslocamento do eixo da barragem, cerca de 50 m para montante do local previsto em projeto básico, motivando reforço do programa de investigações complementares através da realização de sondagens para reconhecimento da fundação da barragem.
- Registra-se que foram executados tratamentos de fundação por meio de injeções entre as estacas 29+3,6 m e 51+15,4, não impactando na seção de estudo P6', uma vez que se encontra na estaca 16+9,0 m.

## SEÇÕES CONFORME ATUALIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO

A partir dos boletins de instalação dos novos instrumentos, durante a manutenção e operação da barragem, foi possível realizar a validação das características das camadas de solo presentes nas seções em função da identificação dos materiais encontrados durante as perfurações necessárias à instalação. Nos boletins de instalação dos instrumentos da porção de jusante da seção P6' (PC-66A, PC-65A e PC64A) é verificada presença de material compatível com o núcleo, apresentando perda de água na altura do filtro e interceptando a fundação na altura compatível com a interface entre os materiais ZG3 e ZG1B. O boletim de instalação do piezômetro locado na porção de jusante do maciço (PC-62A) indica a interceptação de material argiloso representativo do núcleo da barragem, compatível com sua cota de instalação.

## LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

Com a instalação de novos marcos geodésicos, foi realizada a topografia e o georeferenciamento de topos dos instrumentos da Barragem, conforme apresentado na Tabela 1 1.

**Tabela 1 – Novas cotas de boca dos instrumentos**

Instrumento	Cota da boca do tubo antiga	Nova cota de boca do tubo	Diferença
PC-61	891,68	892,11	0,43
PC-62A	891,69	892,66	0,97
PC-63	891,725	892,12	0,39
PC-64A	891,81	892,74	0,93
PC-65A	891,84	892,67	0,83
PC-66A	891,87	892,60	0,73
PC-67	880,414	Não localizado	-

A partir dos desenhos elaborados em função deste levantamento, observa-se uma diferença de 0,28 m entre a cota de coroamento de sobre-elevação da barragem verificada nos documentos de projeto como executado (EL. 892,20 m) e da cota de coroamento identificada em campo (na EL. 892,48 m). A inclinação do paramento de jusante se manteve a mesma de projeto: 1V:2H. Nesta ocasião, também foi determinado o nível de água no pé da barragem na EL. 879,50, representativa do espelho de água existente na região e conforme pode ser observada na Figura. Atribui-se a existência deste espelho de água à execução de valas de drenagem sugeridas em projeto para a região da várzea do rio, que tinham como objetivo a drenagem das regiões a cotas mais baixas, assim como o rebaixamento do lençol freático aflorante na região. Na época da construção, determinou-se a EL. 887,50 para o nível de água a jusante em exploração normal.

**Figura 1 – Imagem da região da Barragem com destaque para o espelho de água de jusante / Fonte: Google Earth, 2022**



A existência deste espelho de água também foi confirmada em campo durante a visita realizada na barragem de pela equipe. Registra-se a incerteza quanto a elevação do terreno abaixo do espelho de água, no local no qual seria a vala de preenchimento de jusante. Dessa forma, o presente estudo adotou como premissa que a vala de jusante do perfil P6' não foi preenchida e encontra-se alagada. A partir destas informações, a geometria da seção P6' foi recomposta com a superfície levantada em 2016, assim como foram atualizados no desenho a cota de instalação dos instrumentos.

### **EXISTÊNCIA PRÉVIA DE ANÁLISES DE ESTABILIDADE PARA REBAIXAMENTO RÁPIDO**

O principal objetivo de realizar o estudo em seções já estudadas anteriormente é proporcionar uma comparação entre o comportamento previsto e observado na barragem. Dos documentos disponibilizados, o mais provável era encontrar estudos de rebaixamento rápido nos relatórios sobre Avaliação Geológico-Geotécnica que compõem a Revisão Periódica de Segurança de Barragens, todavia, este documento cita que o estudo não foi realizado visto que o rebaixamento rápido foi considerado improvável, ou seja não foi considerada a possibilidade de acontecer, premissa esta que deve ser considerada nas próximas revisões periódicas de segurança das barragens. Na ausência desses estudos para a barragem, as análises de estabilidade referente à condição de fluxo permanente foram consideradas como critério no momento de definição das seções, visto que geralmente são realizadas nas seções mais altas consideradas críticas para condições de estabilidade do talude de jusante.

A memória de projeto da barragem pode apresentar simulações de rebaixamento rápido para os perfis considerados mais representativos à época (P3, P18, P20 e um perfil típico correspondente à zona central da barragem). Os trabalhos de investigação conduzidos no âmbito dos estudos da barragem podem se distribuir três fases, a saber:

- Estudos e Projetos relativos à Construção da Barragem: o relatório agrega informações a respeito das investigações realizadas no Projeto Básico assim como das investigações complementares executadas à época da elaboração do documento. Essas investigações, em especial as sondagens à percussão e rotativas, serão mencionadas na sequência para definição da permeabilidade das diferentes camadas da fundação. Este documento apresenta uma descrição e caracterização bastante detalhada dos materiais disponíveis para construção, com base em interpretações de ensaios laboratoriais e de investigações de campo.

- Memória Técnica composta por Revisão do Projeto Base e Projeto para Concorrência, Assistência Técnica e Gerenciamento da Obra: este relatório agrega os estudos anteriores apresentando as modificações realizadas no projeto devido a características construtivas, assim como apresenta a complementação das investigações geotécnicas por meio da realização de novas sondagens para conhecimento da fundação, assim como dos materiais utilizados durante a construção. Cita-se, especialmente as sondagens rotativas realizadas na fundação, na qual foram realizados ensaios de infiltração para conhecimento das características hidráulicas dos materiais. Além disso, o documento dispõe de resultados de ensaios realizados durante a construção para assegurar o controle de qualidade da mesma.
- Diagnóstico do Comportamento e Segurança da Barragem : este estudo foi realizado com o objetivo de diagnosticar o comportamento e segurança da barragem e suas estruturas anexas tomando como base a inspeção visual das estruturas e zonas adjacentes, o monitoramento resultante da leitura dos equipamentos instalados na barragem e trabalhos de investigação geotécnica por meio de sondagens à percussão para caracterização da situação dos aterros **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Nesta fase também foram realizados ensaios laboratoriais em amostras retiradas de campo **Erro! Fonte de referência não encontrada.** representativas do maciço da barragem.

### PARÂMETROS ADOTADOS

Os coeficientes de permeabilidade dos materiais que constituem a fundação da barragem foram definidos com base na análise dos resultados dos ensaios de infiltração (solos) e dos ensaios de perda de água sob pressão (realizados em rocha). Relativamente aos materiais que constituem o corpo da barragem, a projetista cita que foram adotados coeficientes de permeabilidade com base nos resultados obtidos através dos ensaios de permeâmetros de carga variável realizados em laboratório, no que diz respeito aos materiais da Formação Guabirota-tinguis e coluviões. Para os materiais de filtro e dreno, os valores dos coeficientes foram estimados em função de suas características granulométricas. A Tabela 2 a seguir apresenta um resumo dos coeficientes adotados para os diferentes materiais descritos nos itens anteriores.

**Tabela 2 – Coeficientes de Permeabilidade**

Material		Coeficiente de Permeabilidade (k) [cm/s]	
		Kv	Kh
	Proteção de talude de montante (rip-rap)	$1 \times 10^1$	$1 \times 10^1$
	Maciços e zona central da Barragem (núcleo)	$2 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$
	Filtros e veias drenantes	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$
	Dreno do pé de jusante	$1 \times 10^0$	$1 \times 10^0$
	Preenchimento da vala de montante	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
	Camada superior da Fundação (ZG4)	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$
	Camada intermediária da Fundação (ZG3)	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
	Camada inferior da Fundação (ZG1B)	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$
	Topo de rocha (ZG1A)	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$

As características mecânicas dos materiais utilizados no sistema de drenagem e no rip-rap foram determinadas pela projetista em função da distribuição granulométrica destes. As propriedades dos demais materiais foram determinadas em função da análise e ponderação dos resultados de prospecção geotécnica. O resumo destes parâmetros é apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3 – Parâmetros de Resistência**

Material	Peso Específico ( $\gamma$ ) [KN/m <sup>3</sup> ]	Coesão (c') [KPa]	Ângulo de Atrito ( $\phi'$ ) [°]
Proteção de talude de montante (rip-rap)	20	0	40
Maçãos e zona central da Barragem (núcleo)	19	10	30
Filtros e Veios Drenantes	19	0	35
Dreno de pé	20	0	36
Preenchimento Vala de montante	16	0	20
Camada superior da Fundação (ZG4)	16	0	20
Camada intermediária da Fundação (ZG3)	16	0	25
Camada inferior da Fundação (ZG1B)	19	0	29
Topo de rocha (ZG1A)	Impenetrável		

Registra-se que, em um primeiro momento, a coesão dos materiais (com exceção do núcleo) foi adotada igual a zero, assim como foi feito pela projetista durante as simulações de projeto. Além de representar uma situação conservadora, esta decisão foi tomada com o objetivo de tornar as simulações do presente estudo o mais próximo possível com as de projeto e, assim, poder realizar comparações entre os resultados previstos e os contemplados no presente estudo.

### CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO DOS FATORES DE SEGURANÇA

Nas análises de estabilidade é corrente a utilização de fatores de segurança como critério de aceitação dos resultados. Os valores mínimos aceitáveis dos valores de segurança variam de acordo com o tipo de solicitação considerado e a fase da vida útil da barragem (construção, operação e rebaixamento rápido, sismos), assim como variam de acordo com a publicação utilizada como referência. No Brasil, usualmente consideram-se os valores indicados pela Eletrobrás publicados no manual “Critérios de projeto civil de Usinas Hidrelétricas” em 2003. Adicionalmente, citam-se as publicações da Agência Nacional de Águas (ANA, 2016b) e a referência bibliográfica do livro publicado pelo engenheiro Paulo Cruz (Cruz, 2005), consultor internacional de renome na temática de segurança de barragens no país. Entre as publicações internacionais, os critérios publicados pelo *Bureau of Reclamation* dos Estados Unidos (USBR, 2011) é comumente utilizado.

### SEÇÃO-TIPO FINAL

Com base no exposto nos itens anteriores, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a seção final do perfil P6' utilizada no estudo realizado. **Inserir figura!!**

### VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O módulo SLOPE/W, foi utilizado para as análises numéricas, disponibiliza diversos métodos de cálculo de equilíbrio limite para análises de estabilidade, entre eles: Morgenstern-Price, Spencer, Fellenius, Bishop. Dessa forma, a primeira etapa de simulação de estabilidade foi realizada para análise de sensibilidade e escolha do método de cálculo a ser utilizado nas simulações subsequentes. As condições de fluxo analisadas no presente estudo são as apresentadas a seguir.

- **CASO 01:** regime permanente – período estável do reservatório utilizado para a calibração e validação do modelo numérico de estudo;
- **CASO 02:** regime transiente – rebaixamento durante período representativo da crise hídrica observada nos últimos anos;
- **CASO 03:** regime transiente – cenários hipotéticos;

- **CASO 3.1:** Rebaixamento completo a partir do nível máximo normal do reservatório até o pé da barragem em 24 horas;
- **CASO 3.2:** Rebaixamento completo a partir do nível máximo normal do reservatório a uma velocidade de 108,47 cm/dia por vários dias até atingir o pé da barragem.

A modelagem da seção em estudo, bem como sua calibração tendo em vista um maior grau de representatividade da estrutura de campo só foi possível a partir da disponibilização de informações atualizadas quanto a geometria, instrumentação e seus registros, histórico do nível do reservatório, levantamento topográfico atualizado e registro dos parâmetros geotécnicos obtidos por meio de ensaios triaxiais e de permeabilidade. Nesta etapa, foram observados os resultados da simulação e as informações foram comparadas com a instrumentação e constatações de campo a fim de calibrar o modelo com eventuais alterações nas condições de contorno, permeabilidades, anisotropia, geometria, nível do reservatório, entre outros. Tendo em vista a importância destes dados de instrumentação durante o presente estudo, assim como sua relevância para o monitoramento da barragem e estrutura associadas, recomenda-se manter o registro destes instrumentos, bem como do nível do reservatório. Os resultados obtidos com as simulações utilizando os critérios de calibração quanto à permeabilidade dos materiais, as geometrias e condições de contorno foram considerados representativos visto que, mesmo quando classificado como homogêneo, existe uma heterogeneidade do solo decorrente de sua formação, transporte e/ou condições de compactação, além disso, cita-se a extensão das seções (que possuem condições de contorno apenas nas extremidades), as simplificações adotadas no modelo e as incertezas inerentes à modelagem numérica.

Registra-se que o nível de água no talude de jusante da barragem foi mantido constante em todas as análises realizadas, na EL. 879,50 identificado por meio do levantamento topográfico de 2016, a fim de representar o espelho de água existente na região.

Recomenda-se, em análises futuras, aplicar uma condição de contorno de fluxo transiente nesta região, por meio de aplicação do nível de água diário (ou em outra periodicidade em que se tiver registro disponível) proveniente de instrumentação. Neste sentido, recomenda-se a instalação de instrumentos que possibilitem a medição de nível no espelho de água presente a jusante da barragem.

Com o modelo numérico calibrado e validado, foram simuladas as condições de operação do reservatório entre 01/04/2018 a 17/08/2021 na barragem por meio da aplicação de fluxo transiente considerando a variação diária do nível de água do reservatório para este período. De maneira geral, as simulações mostraram que os instrumentos instalados nas seções de interesse apresentam pequena variação ao longo do período, porém, acompanhando as variações do nível do reservatório. Quando comparados com os registros de campo, estas leituras mostram comportamento convergentes. Durante estas análises foi possível observar a mudança na freática ocorrida durante as etapas de cálculo ocasionadas pelo rebaixamento real do reservatório. Os resultados destas análises foram utilizados como *input ou* entrada de dados na próxima etapa do estudo para verificar o possível efeito destes rebaixamentos quanto à estabilidade do maciço de solo.

Na sequência, foram simulados cenários de fluxo hipotéticos, a fim de avaliar o comportamento do maciço quando submetido a deplecionamento completo do reservatório, considerando a maior velocidade de rebaixamento já observada no histórico da barragem (108,47 cm/dia registrado em 30/04/2020). Nestes cenários é possível observar a dissipação de poro pressões no interior do maciço quando este é submetido a rebaixamentos rápidos, e mostra o que após 50 dias decorridos de um deplecionamento hipotético a freática é horizontalizada. As condições críticas para estabilidade mediante um rebaixamento rápido estão associadas a diversos fatores como, amplitude da variação do nível de água do reservatório durante o rebaixamento, velocidade de rebaixamento, geometria da estrutura, permeabilidade do solo, entre outros. Por isso, a importância de estudos de caso com condições reais de operação do reservatório, com a devida validação e calibração do modelo, a fim de verificar a estabilidade da estrutura para condições específicas de comportamento. Ressalta-se que as análises realizadas visaram, a partir da documentação e informações disponibilizadas pelo empreendedor, elaborar um modelo geotécnico representativo para as simulações de fluxo e estabilidade voltadas à observação das variações de fator de segurança do talude de montante mediante rebaixamento rápido de uma seção representativa do maciço.

## RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos com o projeto foram os modelos geotécnicos das principais seções de cada uma das estruturas, associado ao conhecimento acumulado durante o desenvolvimento dos mesmos, as análises de fluxo e estabilidade das referidas seções visando análise do comportamento durante a crise hídrica e cenário de

operação hipotética. Além disso, o desenvolvimento do sistema de monitoramento integrado ficará como legado para a Sanepar como ferramenta de otimização da análise de instrumentação e inspeções visuais.

As ações de gestão da segurança de barragens durante a crise hídrica proporcionaram à equipe da Sanepar um avanço significativo no entendimento do comportamento das estruturas assim como uma otimização na análise de dados de instrumentação, variáveis hidro meteorológicas, desenhos técnicos e inspeções visuais por meio do sistema integrado de monitoramento.

## **ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

As informações sobre o modelo geotécnico poderão ser utilizadas em futuros estudos mediante atualização das informações e subsidiam a equipe de engenharia em análises rápidas e eficientes do comportamento das estruturas. As informações sobre as análises de fluxo e estabilidade podem nortear futuras ações de segurança de barragens juntamente com a operação do reservatório. Além disso, o conhecimento adquirido no processo foi consolidado nos vídeos gravados para gestão do conhecimento com futuros colaboradores que passem a atuar na segurança de barragens. Os sistemas otimizam o tempo de análise de informações, reduzem a probabilidade de erros e proporcionam confiabilidade dos dados devido a padronização em servidores de base de dados próprios da Sanepar. Além dos resultados diretos do modelo, os dados tratados e as informações de desenhos, instrumentação, dados hidro meteorológicos entre outros foram organizados em uma base de dados única e inseridos em um sistema integrado de monitoramento que propicia a equipe da Sanepar uma análise eficiente dos dados diminuindo o tempo necessário para interpretação e tomada de decisão.

## **CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES**

Recomenda-se que eventuais replicações das simulações utilizando o modelo disponibilizado sejam realizados com a devida cautela observando a finalidade que o modelo foi elaborado e realizando as atualizações e adequações pertinentes, seja por atualização das condições de contorno (exemplo: nível do reservatório, eficiência dos sistemas de drenagem, nível de água a jusante, etc.), dados da instrumentação (como alteração nos padrões de leituras, instalação de novos instrumentos, etc), novas informações sobre as características dos materiais e geometria (provenientes de novos ensaios laboratoriais ou de campo, por exemplo), entre outros. A interpretação dos resultados deve ser realizada por engenheiro especialista em barragens com capacidade técnica de avaliar o contexto geral sob os pontos de vista geológico-geotécnico, de instrumentação e demais áreas de conhecimento relativos a barragens.

Conforme citado, as atividades deste estudo foram realizadas visando obtenção dos fatores de segurança do talude de montante mediante condições reais e hipotéticas de operação com vistas à análise de rebaixamento rápido, que está relacionado a um dos modos de falha associados a barragens de aterro. No âmbito de análises de estabilidade, recomenda-se a continuidade dos estudos de maneira mais detalhada utilizando, por exemplo, abordagem probabilística.

De maneira geral, recomenda-se a realização de estudos contínuos abrangendo o comportamento geral da estrutura e analisando outros modos de falha, como por exemplo erosão interna, recalques, eficiência dos sistemas de drenagens, entre outras. O sistema integrado de monitoramento contempla módulos voltados à coleta de dados em campo (aplicativos mobile) tanto de instrumentos como de inspeções visuais, transformada dos dados brutos em variáveis de engenharia, gestão dos dados e desenhos. Para propiciar o armazenamento de todos os dados em uma base de dados única, foi desenvolvida uma codificação específica para identificação dos instrumentos por barragem, sempre vinculando ao código original a fim de perpetuar análises históricas.

A elaboração dos modelos geotécnicos proporcionam as equipes de segurança de barragens um aprendizado contínuo durante o período de desenvolvimento e, visando propiciar o repasse e a gestão do conhecimento, foram realizadas gravações de vídeos em plataforma Ead visando o repasse da informação para futuros colaboradores que venham a atuar no assunto.

Recomenda-se, em análises futuras, aplicar uma condição de contorno de fluxo transiente nesta região, por meio de aplicação do nível de água diário (ou em outra periodicidade em que se tiver registro disponível) proveniente de instrumentação. Neste sentido, recomenda-se a instalação de instrumentos que possibilitem a medição de nível no espelho de água presente a jusante da barragem. As atividades foram realizadas pela equipe de segurança de barragens da Sanepar juntamente com a equipe técnica do Centro de Competência em Estruturas de Barragens da Fundação Parque Tecnológico Itaipu – Brasil (FPTI-BR), que realizou a execução das análises geotécnicas voltadas ao rebaixamento rápido e desenvolvimento de sistemas de monitoramento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Lista de Termos para o Thesaurus de Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas. Brasília, 2014.
2. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens – Diretrizes para Elaboração de Projeto de Barragens. Brasília, 2016a.
3. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens – Guia de revisão periódica de segurança de barragem. Brasília, 2016b
4. ALMEIDA, P. F. D. Análise de estabilidade de barragens de aterro em fase de esvaziamento. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2013.
5. BRESSANI, L. A.; FAVERO, D. E. G.; SIMÕES, E. B.; SMIRDELE, C. D. Influência da Permeabilidade no Tempo de Resposta de Diferentes Tipos de Piezômetros na UHE Dona Francisca. XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul – GEOSIL 2019. Joinville, 2019.
6. CEDERGREN, H.R. *Seepage, Drainage, and Flor Nets*. John Wiley and Sons, New York/USA, 1977.
7. BUREAU OF RECLAMATION. Design Standards No 13: Embankment Damns. Chapter 4: Static Stability Analysis. 2011.
8. BRASIL. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE). Glossário de termos hidrológicos. Brasília: DNAEE, 1976
9. CÂNDIDO, E. Modelagem Hidrogeológica aplicada à Análise de Transporte de Contaminantes: Estudo Prospectivo da Propagação de Contaminação em Aquífero Livre Poroso. Belo Horizonte, 2018
10. CRUZ, P. T. 100 Barragens Brasileiras. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
11. ELETROBRÁS (Centrais Elétricas Brasileiras S. A.). Critérios de projeto civil de Usinas Hidrelétricas. CBDB, 2003. 278 p.
12. FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G. *Geotechnical Engineering Of Dams*. A. A. Balkema Puclishers. New York, 2005.
13. GERSCOVICH, D. Fluxo em Solos Saturados. Faculdade de Engenharia - Departamento de Estruturas e Fundações - UERJ, 2011.
14. GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD. *Seepage Modeling with SEEP/W*. July 2012 Edition.
15. GUIDICINI, G.; SANDRONI, S.; MELLO, F. Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragem e obras anexas no Brasil [livro eletrônico. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2021.
16. INSTITUTO ÁGUA E TERRA (IAT). Glossário Geológico. Disponível em: <<https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Glossario-Geologico>> . Acesso em: Fevereiro de 2022.
17. IPT/ABGE. Glossário Geotecnologia Ambiental, 2008.
18. LEBIHAN, J.P.; LEROUEIL, S. Transient water flow through unsaturated soils –implications for earth dams. REGIMA. 2000.
19. MINAS GERAIS. Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). Glossário de termos: gestão de recursos hídricos e meio ambiente. Belo Horizonte: IGAM, 2008.
20. PINYOL, N. M., E. E. ALONSO, S. OLIVELLA. Rapid drawdown in slopes and embankments. *Water Resources Research*,44, 2008.
21. PORTO, Rodrigo de Melo. Hidráulica Básica. 4ª Edição. EESC USP, 2006. Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2017.
22. PARQUE TECNOLÓGICO ITAIPU\_PTI.BRASIL. Relatório Final da Barragem\_3200-2022-SAN-GEO-RT-0102\_ ESTUDOS SOBRE REBAIXAMENTO RÁPIDO DO RESERVATÓRIO – BARRAGEM IRAÍ NÁLISE DE FLUXO E ESTABILIDADE SEÇÃO P6’ – ESTACA 16+9,00 m, 2022.
23. SILVEIRA, J. F. A. Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento. São Paulo: oficina de textos, 2006.
24. UNESCO. Glossário hidrológico internacional. Paris: UNESCO, 1983.