

Gestão de risco, Monitoramento e Projeto de Recuperação da Drenagem de Pé da UHE Salto-GO

Risk Management, Monitoring and Design of the Foot Drainage Recovery of Salto HPP

Luan Rodrigo de Almeida Souza (1); Eduardo Henrique Viecilli Martins de Mello (2)

(1) MSc., Engenheiro Civil, Intertechne Consultores / Faculdade IDD
(2) MSc., Engenheiro Civil, Prefeitura Municipal de Curitiba / Faculdade IDD

Resumo

Em resposta à pressão da sociedade pela garantia da segurança das barragens existentes, grandes empreendedores vêm buscando continuamente a melhoria da gestão da segurança de suas barragens, através de novos protocolos de identificação, mitigação e gerenciamento dos riscos. O presente trabalho apresenta um estudo de caso da barragem de terra da margem direita da UHE Salto, onde foi identificado durante a rotina de inspeções sinais de comportamento anômalo do sistema de drenagem no pé da barragem. Em se tratando de uma canaleta de drenagem executada sob uma berma de equilíbrio da barragem, a recuperação do sistema consiste de uma obra de grande porte, exigindo da equipe técnica do empreendedor e das consultorias envolvidas a previsão de um plano de acompanhamento e intensificação do monitoramento até a definição do *timing* técnico e operacional para execução das ações corretivas necessárias. O desenvolvimento do trabalho seguiu as seguintes etapas: 1) Estudos para diagnóstico e entendimento dos mecanismos de falha e evolução das manifestações das anomalias associadas; 2) Intensificação do monitoramento a partir da criação de uma rotina de inspeções visuais periódicas, instalação de novos instrumentos, monitoramento a partir de televisionamento e medidas de vazão e volume de material carregado; 3) Desenvolvimento do projeto de recuperação e de instrumentação permanente; 4) Elaboração de um plano de contingência e ações emergenciais considerando cenários críticos. As ações definidas foram implementadas gradativamente e desenvolvidas ao longo de aproximadamente dois anos enquanto se planejava a logística das obras. Em geral o quadro se manteve estável até março de 2021, com evolução na deterioração da tubulação de concreto e aumento do volume de material carregado, entretanto não houve sinais de percolação descontrolada (erosão interna). As ações realizadas foram acompanhadas pela equipe de segurança de barragens e gestão de riscos da CTG *HeadQuarter* na China, e as obras de recuperação foram executadas entre abril e outubro de 2021, na janela hidrológica favorável.

Palavra-Chave: Segurança de barragens, monitoramento, erosão interna, gestão de riscos

Abstract

In response to pressure from society to guarantee the safety of existing dams, great entrepreneurs are continually seeking to improve the management of the safety of their dams, through new protocols for the identification, mitigation and management of risks. The present work presents a case study of the earth dam on the right bank of the Salto HPP, where signs of anomalous behavior of the drainage system at the foot of the dam were identified during the inspection routine. As the drainage channel were executed under the dam's equilibrium berm, the system's recovery consists of a large work, requiring the technical team of the entrepreneur and the consultants involved to provide a plan for intensifying the monitoring until the definition of the technical and operational timing for the execution of the necessary corrective actions. The development of the work followed the following steps: 1) Studies to better understand the mechanisms of failure; 2) Intensification of monitoring through a routine of periodic visual inspections, installation of new instruments, ROV-aided inspections and measurements of flow and volume of material carried; 3) Development of the recovery project and permanent instrumentation; 4) Elaboration of a contingency plan and emergency actions considering critical scenarios. The defined actions were gradually implemented and developed over approximately two years while planning the logistics of the works. In general, the picture remained stable until March 2021, with an evolution in the deterioration of the concrete pipe and an increase in the volume of material carried, however, there were no signs of uncontrolled percolation (internal erosion). The actions were monitored by the dam safety and risk management team of CTG *Head Quarter* in China, and the works were carried out between April and October 2021, in a favorable hydrological window.

Keywords: Dam safety, dam monitoring, internal erosion, risk management

1 Introdução

O risco relacionado a uma estrutura pode ser definido como a medida da probabilidade e intensidade de um efeito adverso para a vida, saúde ou meio ambiente (ICOLD, 2005).

As barragens são estruturas vitais para o desenvolvimento socioeconômico do país. No entanto, tais estruturas expõem a população e o meio ambiente a riscos e impactos muito significativos, uma vez que a falha de uma barragem possui, quase sempre um dano associado alto que envolve a perda de vidas humanas e impactos ambientais de grande magnitude. No Brasil, frente aos acidentes que ocorreram na última década, houve uma mudança de postura geral que envolveu a sociedade civil organizada, legislação, órgãos e entidades públicas e privadas, com objetivo de melhorar as boas práticas em relação a segurança de barragens.

De maneira geral, os procedimentos referentes à supervisão das condições de barragens, antes da promulgação da Lei Nacional 12.334 de 2010 que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB, constituíam iniciativas isoladas de empreendedores (Neves, 2018).

Atualmente, os grandes empreendedores vêm buscando continuamente melhorias da gestão da segurança das barragens, através da incorporação de aprimoramento dos processos internos, novos protocolos de identificação e ações a serem tomadas para mitigar riscos e gerenciá-los tendo em vista o planejamento das intervenções necessárias, desde corriqueiras até obras de maior complexidade.

Cada vez mais tem-se incorporado a cultura de que somente com um grande esforço de melhoria da gestão da segurança, as barragens poderão atender as necessidades da população, sem representarem uma fonte permanente de riscos inaceitáveis (Menescal, 2009).

Neste contexto, a análise de risco torna-se uma importante ferramenta para a avaliação da performance e segurança desse tipo de empreendimento. Estando, portanto, em linha com a Lei 14.066/2020, que alterou a Lei 12.334/2010, e estabeleceu sanções mais rigorosas, conforme os danos causados pelo empreendimento.

Especificamente, em se tratando de barragens de terra, onde segundo as publicações do ICOLD (1995) e ICOLD (1988) as causas relacionadas à percolação pela fundação e pelo corpo da barragem (erosão interna) juntas somam mais da metade das causas de ruptura, a gestão do risco compreende a fase de entendimento dos mecanismos de falha e o conhecimento de como é a manifestação da anomalia para permitir um projeto de instrumentação assertiva direcionada ao problema e da definição do *timing* para executar as ações corretivas.

Tendo em vista o exposto acima, este trabalho tem o objetivo de apresentar o estudo de caso da UHE Salto, onde durante as inspeções de rotina realizada em 2018 foi identificada uma anomalia no pé da barragem em um trecho onde os elementos de drenagem originalmente projetados, trincheira drenante e canaleta coletora, foram recobertos por uma berma de equilíbrio executada no fim do período de construção em 2010, o que danou o funcionamento da drenagem livre, gerando carreamento de material e pequenas subsidências.

O presente trabalho detalha o processo de gestão e manutenção de riscos utilizado na identificação e diagnóstico da anomalia no sistema de drenagem e no planejamento à longo prazo da intervenção, tomando todas as ações necessárias para acompanhar a evolução das anomalias e criando um plano de contingência conforme as boas práticas de segurança de barragens.

2 Estudo de Caso – UHE Salto

2.1 Descrição do Empreendimento e Unidade de Análise

A UHE Salto está localizada no rio Verde, afluente pela margem direita do rio Paranaíba, nos municípios de Caçu (margem esquerda) e Itarumã (margem direita), estado de Goiás. O arranjo geral do Empreendimento, conforme apresentado na Figura 1, constitui-se de: um barramento, compreendendo uma barragem de terra fechando toda a ombreira direita e o leito do rio; uma estrutura com vertedouro dotado de duas comportas tipo segmento, situado na margem esquerda, próxima ao leito do rio; uma estrutura com tomada d'água junto ao vertedouro, à sua esquerda; e barragem de terra fechando o restante da ombreira esquerda. Na mesma figura é possível ver o estaqueamento, representado a cada 100m, que identifica cada trecho de interesse.

A extensão total do barramento é aproximadamente 2.500m e com altura máxima de 36m. O sistema de drenagem interno da barragem é composto por filtro vertical, dreno horizontal e uma trincheira drenante no pé do aterro, contando ainda com uma canaleta de drenagem a jusante da trincheira. A Figura 2 apresenta uma seção transversal da barragem e na Figura 3 um detalhe do pé da barragem da margem direita que ilustra a situação após a finalização da construção, com a canaleta tapada pelo aterro da berma no pé da barragem da margem direita.

A casa de força tem 2 unidades geradoras do tipo Francis de eixo vertical, com potência instalada total de 116 MW.

A fundação das barragens em ambas as margens é formada por sequência de maciço rochoso basáltico, solos de alteração de basalto, sobrepostos por colúvio de sedimentos finos.

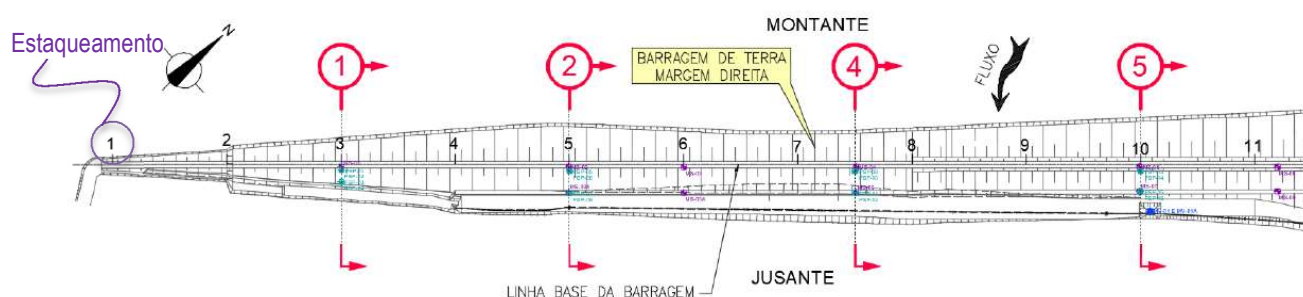


Figura 1.a – Arranjo Geral da UHE Salto – Barragem de terra – Margem direita

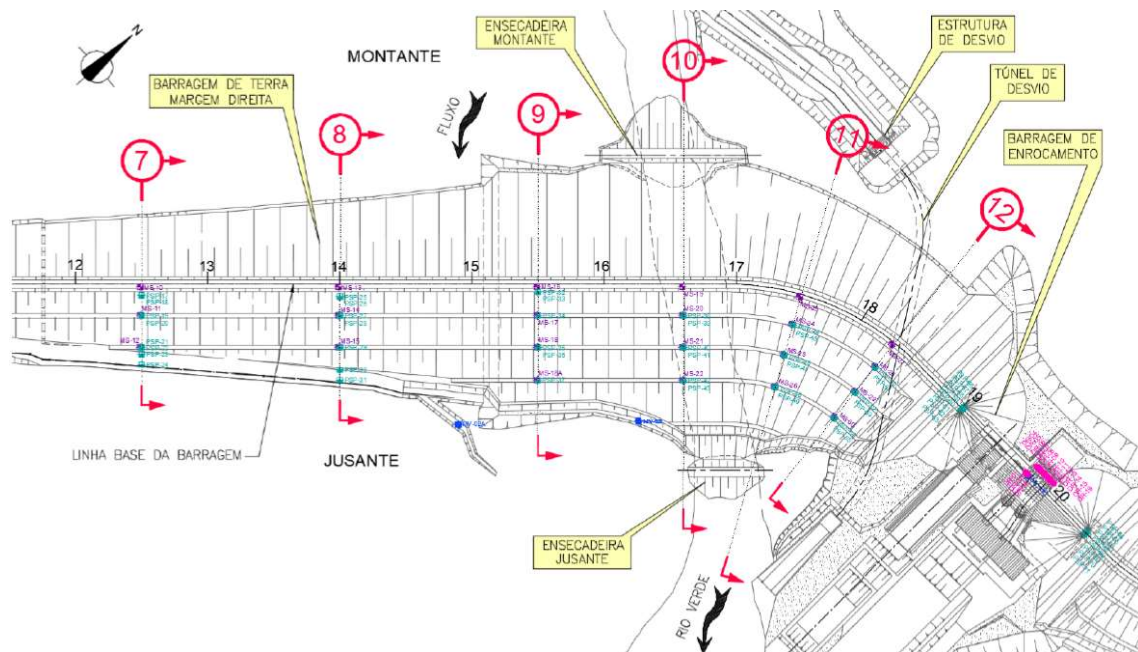


Figura 1.b – Arranjo Geral da UHE Salto – Barragem de terra - Margem Direita e Leito do Rio

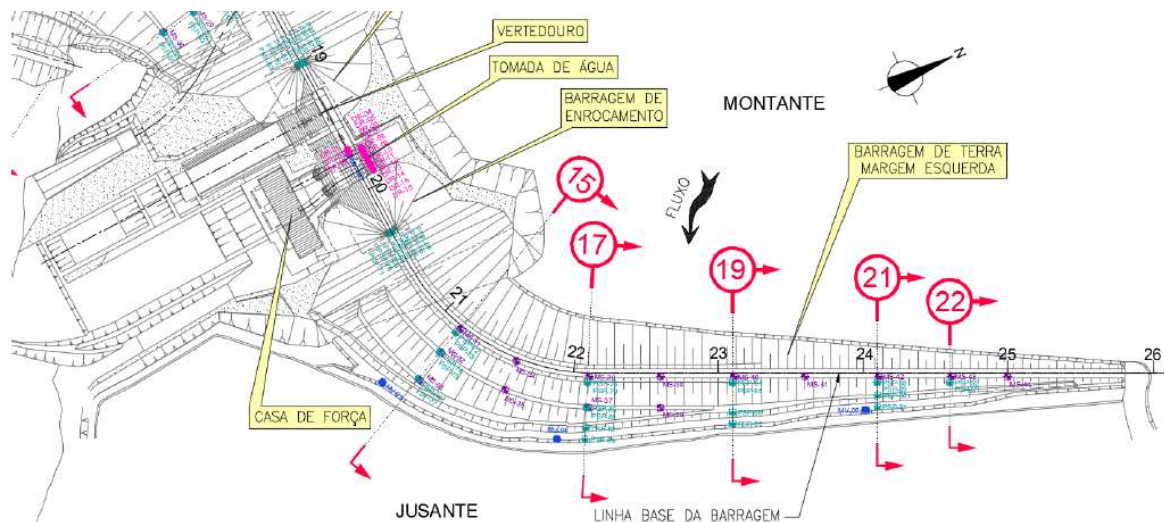


Figura 1.c – Arranjo Geral da UHE Salto – Barragem de terra – Margem Esquerda

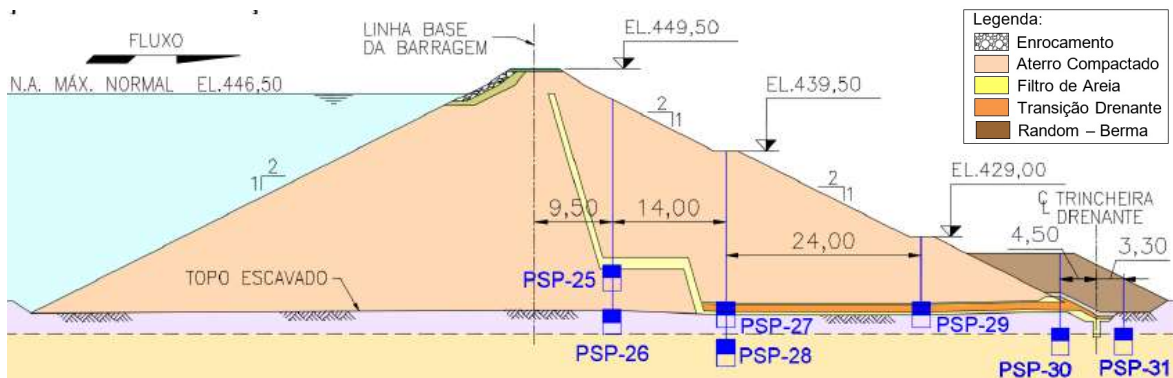


Figura 2 – Seção Representativa da Barragem de Terra (Estaca 14+0,00m)

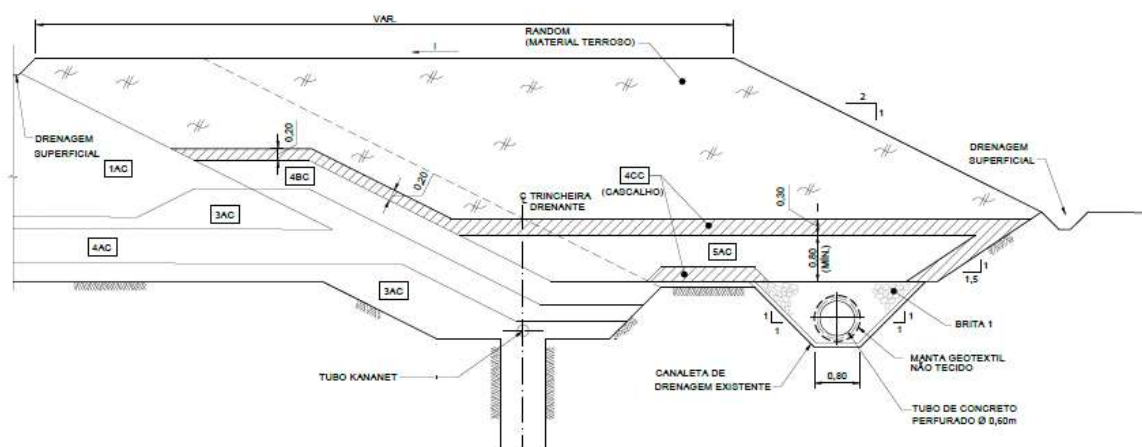


Figura 3 – Detalhe do pé da Barragem da Margem Direita com destaque para a canaleta sob o aterro

Na Tabela 1 está reproduzida a relação de instrumentos em operação atualmente na barragem da margem direita UHE Salto.

Tabela 1 – Instrumentos instalados na barragem de terra da margem direita da UHE Salto

Instrumentos	Localização	Quantidade	Frequência de Leitura
Piezômetros Standpipe	Seções 1 a 8	31	Quinzenal
	Seções 9 a 12	24	
Medidor de Vazão	Barragem da Margem Direita	5	Quinzenal
Marco Superficial	Barragem da Margem Direita	33	Semestral / Bimestral
Marco Fixo	Área a jusante da barragem	4	Semestral

3 Identificação da Anomalia no Sistema de Drenagem

Por solicitação da equipe técnica da CTG BRASIL foi realizada em janeiro de 2018 uma inspeção da barragem da UHE Salto, onde se constatou a presença de concentração de material fino e granular depositados na caixa de aproximação do medidor de vazão MV-02A, situado na estaca 14+90,00 na margem direita da barragem.

O carreamento de finos foi primeiramente observado durante e após o enchimento do reservatório, em 2010. Durante o enchimento do reservatório, foi detectada uma vazão elevada no sistema interno de drenagem e pressão piezométrica também elevada nos piezômetros situados na fundação da barragem. Em consequência da maior incidência de água e saturação local, detectou-se gradientes de saída suficientes para o início de carreamento de finos areno-siltosos pelas juntas de construção e eventuais fissuras nas canaletas de drenagem.

Em conjunto com as informações coletadas nos relatórios de inspeção e dados de monitoramento de pressões piezométricas e de medidores de vazões, foi realizada uma avaliação do comportamento da barragem. Como produto dessa avaliação, recomendou-se que fossem realizadas filmagens por sistema de inspeção robotizada e inspeções dos

poços de visitas. Essas inspeções visavam avaliar as condições internas dos tubos de drenagem, detectando possíveis anomalias e desgastes dos tubos, identificar e caracterizar o material fino coletado.

As investigações realizadas indicaram que o trecho crítico de degradação do sistema de drenagem está situado entre as estacas 4+00 e 8+00 (estaqueamento na Figura 1). Detectou-se danos localizados na geratriz inferior da tubulação de concreto e trechos com reparos dos tubos. Além disso, verificou-se trechos com concentração de fluxo entre as juntas e desgaste da geratriz inferior do tubo, provavelmente ocasionado pelo arraste de partículas de quartzo e sílica provenientes do material mais arenoso arrastado.

Com base nisso, recomendou-se que fosse recuperado todo o sistema de drenagem situado na região da berma de equilíbrio, com recuperação das linhas de proteção e eliminação do risco de continuidade de carreamento de finos. Para tanto, será substituído o sistema de drenagem de pé por tubos de PEAD e expandida a área abrangida pelo filtro invertido, além da implantação de novos instrumentos para monitoramento da região.

No entanto, em função das restrições de trabalho impostas pela pandemia do COVID-19 e dos riscos associados à saúde das equipes, foi avaliada a possibilidade de postergação das obras para que os trabalhos se desenvolvam dentro do período da janela hidrológica do ano corrente, entre abril e meados para fim de novembro. Para garantir as condições de segurança e identificação de anomalias decorrentes do mau funcionamento do sistema de drenagem, foi proposto o plano de intensificação do monitoramento durante esse período, até início das obras.

4 Análise de Risco e Medidas de Contingência

Em função da natureza e importância das obras a serem realizadas, considerando que todas as atividades serão desenvolvidas com o reservatório cheio, foram identificados os riscos apresentados na Tabela 2, inerentes às atividades a serem executadas. São listadas também as medidas de contingência, que visam minimizar a probabilidade de ocorrência de acidentes e a vulnerabilidade das áreas com potencial para serem afetadas.

É importante ressaltar que a execução das obras previstas não implicará em interferências na operação da usina, sendo assim, não há riscos adicionais quanto as condições de operação de vertedouro, casa de força e demais estruturas do empreendimento, exceto no caso de emergência.

Na Tabela 2 a seguir estão listados os riscos levantados, assim como o risco associado e medida adotada de mitigação do risco.

Tabela 2 - Identificação dos cenários de risco para as Obras: Ameaça/Risco/Mitigação

Cenário 01	Ameaça:	Remoção da berma de equilíbrio e escavação do pé da barragem.
	Risco:	Risco de escorregamento dos taludes pela exposição prolongada a condição de segurança não ideal ($FS < 1,50$, condição provisória). Nessa situação a instabilização pode ser deflagrada por instabilidade global dos taludes e/ou por um processo de erosão regressiva interna (<i>piping</i>).
	Mitigação:	O projeto prevê a execução das obras em trechos reduzidos, de até 50 m entre eixos, para diminuir o tempo de exposição ao risco e permitir, em caso de alguma emergência, a realização de ação imediata. Além disso, estarão disponíveis nas proximidades da praça de trabalho pilhas de material de contingência (pedra de mão, brita e areia), que permitam a execução de filtros invertidos para bloquear a ocorrência de processos erosivos.

Cenário 02	Ameaça:	Elevação do nível de água no pé da barragem na área escavada.
	Risco:	Risco de escorregamento dos taludes pela elevação do nível freático e exposição prolongada a condição de segurança não ideal ($FS < 1,50$, condição provisória), por descalçamento.
	Mitigação:	O projeto prevê o controle do nível freático por meio de rebaixamento do nível freático com ponteiros e monitoramento com medidores de nível de água em todos os trechos, além de prever a mobilização de equipamentos reservas que poderão ser acionados rapidamente.
Cenário 03	Ameaça:	Alta precipitação durante a execução das obras.
	Risco:	Paralisação dos serviços e consequente aumento do tempo de exposição a condição de segurança não ideal, somados ao risco de elevação dos níveis de água e implicação no aumento do risco de escorregamentos.
	Mitigação:	Previsão de início e término das obras em período de estiagem (abril a setembro).
Cenário 04	Ameaça:	Falha do sistema de bombeamento.
	Risco:	Inundação da área escavada e elevação do nível freático.
	Mitigação:	Previsão de bombas reserva e redundância de sistema de bombas, peças de reposição para os serviços de rebaixamento do lençol freático, além de bombas reservas para serviços menores de esgotamentos locais.
Cenário 05	Ameaça:	Interrupção no fornecimento de energia.
	Risco:	Inundação da área escavada e elevação do nível freático no trecho de intervenção.
	Mitigação:	Previsão de fonte alternativa de energia – gerador a diesel, para o caso de falha ou mau funcionamento. No caso de interrupção no fornecimento de energia deve ser priorizado o serviço de rebaixamento.
Cenário 06	Ameaça:	Ausência de iluminação natural no local da obra em período noturno.
	Risco:	A obra será executada em horário comercial, quando a condição de iluminação natural é adequada. Em situações emergenciais, como a necessidade do fechamento rápido da escavação que pode avançar no período noturno, a ausência de iluminação pode causar riscos de execução inadequada do serviço e de acidentes aos colaboradores.
	Mitigação:	Disponibilidade de sistema de iluminação noturna adequada à condição de execução da obra, em caso de necessidade.

Além dos cenários de risco identificado, o estado de emergência se caracteriza quando o cenário encontrado representar alta probabilidade de ruptura da barragem no curto prazo, devendo ser tomadas medidas para prevenção, ou então, redução dos danos decorrentes do colapso da barragem.

A declaração de estado de emergência (Situação de Alerta, Nível 3 descrita no PAE da usina) ocorrerá quando uma das partes envolvidas entender que uma situação adversa encontrada afeta a estrutura da barragem de maneira severa e que a ruptura, ou acidente, pode acontecer a qualquer momento.

Nesse caso faz-se necessário acionar o Plano de Ação de Emergência - PAE da UHE Salto e seguir as ações esperadas para o nível de resposta correspondente ao estado de

emergência, que incluem o acionamento de procedimentos de aviso e alerta para evacuação da população localizada a jusante, o protocolo de comunicação interna e externa à defesa civil e demais órgãos e instituições listadas no fluxo de comunicação. Em seguida deve-se definir e implantar as ações preventivas e corretivas previstas no PAE que podem incluir o rebaixamento emergencial do nível do reservatório e adoção de novos procedimentos operacionais até uma nova verificação da situação para declaração de um novo nível de resposta.

Além dos riscos identificados para as atividades de obra, foram identificados os cenários de riscos relacionados à postergação das obras, inicialmente em função do planejamento das obras e posteriormente em função da pandemia de COVID.

Considerando o histórico relativamente estável no acompanhamento das anomalias registradas nos relatórios de inspeção e acompanhamento realizado pela equipe da CTG Brasil, foram propostas medidas de intensificação do monitoramento, conforme descrito em detalhes no item 5.

Na Tabela 3 a seguir está apresentado o plano e medidas de contingência em caso de postergação das obras, assim como o risco associado e medidas de mitigação a serem adotadas.

Tabela 3 – Plano de Ação e Medidas de Contingência – Postergação das obras: Ameaça/Risco/Mitigação

Cenário 01	Ameaça:	Subsidências / afundamentos pontuais da berma sobre o tubo de concreto e PVs.
	Risco:	Risco de ocorrência de pontos de erosão desencadeada pelo fluxo constante de água, principalmente nas juntas da tubulação de concreto e encontro com os poços de visita.
	Mitigação:	Realizar inspeções periódicas da tubulação com ROV e inspeções visuais da superfície. Caso seja notado pontos críticos, poder-se-á realizar intervenções pontuais para reparo da tubulação e controle da erosão.
Cenário 02	Ameaça:	Elevação do nível freático no pé do corpo da barragem principal.
	Risco:	Risco de escorregamento dos taludes pela elevação do nível freático.
	Mitigação:	Monitoramento a partir dos piezômetros existentes e de novos medidores de nível de água ao longo de toda a berma. Em caso de verificação de elevação do nível de água, poder-se-á realizar intervenções pontuais pela própria equipe da CTG Brasil.
Cenário 03	Ameaça:	Indício de erosão interna regressiva (<i>piping</i>).
	Risco:	Efeito conjugado de aumento progressivo da vazão de percolação e do carreamento de material fino, ocorrência de subsidências, surgências devido a percolação, zonas visivelmente saturadas em direção ao corpo principal da barragem, erosão em trechos ao longo do sistema de drenagem.
	Ação:	Deverá estar disponível nas proximidades da barragem da margem direita estoque de materiais de contingência (pedra de mão, brita e areia) que permita a rápida execução de filtro invertido para bloquear a ocorrência de processos erosivos.

5 Intensificação do Monitoramento

A seguir é apresentada a Tabela 4, com um resumo das recomendações de intensificação do monitoramento da UHE Salto até o início das obras de recuperação. As frequências de leitura foram estabelecidas baseadas na rotina já implantada pelas equipes de campo do empreendedor.

Tabela 4 – Recomendações para intensificação do monitoramento da UHE Salto

Monitoramento	Local	Quantidade	Frequência de Leitura
Inspeção Local	Toda barragem da margem direita	-	2x Semana
Inspeção com ROV	Todo o comprimento da tubulação (Est. 2+50,00 e a Est. 14+50,00)	6 campanhas	Bimestral
Instalação de Marco Superficial	Dois marcos, em seções a cada 50 m	50	Mensal
Verificação do nível de água no pé da barragem	A cada 100 m	13	2x Semana
Limpeza dos medidores de vazão e registro do volume de material acumulado	MV-01 e MV-02A	-	Quinzenal

5.1 Rotina de Inspeção Local

A partir de 2019 foi implementada uma rotina de monitoramento específica para a região da berma de equilíbrio, com inspeções semanais e registro fotográfico para acompanhamento.

Além da rotina já implementada, o plano de intensificação do monitoramento durante o período de postergação das obras incluiu a inspeção local ao longo da berma, duas vezes por semana, com objetivo de verificar a ocorrência de afundamentos, zonas úmidas e outras manifestações na superfície.

5.2 Acompanhamento da Piezometria

Na barragem de terra da margem direita existem nove seções instrumentadas com o objetivo de monitorar as pressões piezométricas na fundação da barragem e ao longo do tapete drenante.

Todos os instrumentos encontram-se abaixo dos níveis de atenção estabelecidos. De modo geral, os piezômetros presentes no tapete drenante se apresentam sem carga ou com cargas pequenas, e os piezômetros de fundação apresentam leituras estabilizadas nos últimos dois anos.

A Figura 4 ilustra a seção instrumentada da estaca e a Figura 5 e Figura 6 apresentam respectivamente, o histórico da piezometria do corpo da barragem e da fundação.

The graph displays the NA Montante for ten different PSPs over a period of more than a decade. The data shows that while most PSPs maintain a constant NA Montante, PSP-19 and PSP-21 experienced a sharp initial increase followed by a period of stability at a higher level. PSP-25 had a slight downward trend, while the remaining PSPs (27, 29, 32, 34, 35, 37) remained unchanged throughout the period.

PSP	Initial NA Montante (€)	Final NA Montante (€) (Dec 2020)
PSP-19	425.00	446.00
PSP-21	423.00	445.00
PSP-25	433.00	430.00
PSP-27	425.00	425.00
PSP-29	419.00	419.00
PSP-32	409.00	409.00
PSP-34	419.00	419.00
PSP-35	409.00	409.00
PSP-37	409.00	409.00
NA Montante	409.00	409.00

10

5.3 Obras Preliminares de Desvio da Drenagem Superficial

Foi notado durante as inspeções que durante os períodos de chuva havia contribuição externa de material na caixa dos medidores de vazão proveniente das canaletas de drenagem superficial.

As obras de desvio da drenagem superficial foram executadas entre junho e agosto de 2020, com objetivo de retirar essa contribuição externa e proporcionar maior confiabilidade nas leituras de vazão e volume de material coletado para acompanhamento da degradação da tubulação do sistema de drenagem.

5.4 Obtenção de Material de Estoque e Contrato com Fornecedores de Equipamentos

Também como parte do Plano de Contingência, após a análise de risco foi identificada a necessidade da disponibilidade de materiais em estoque para execução rápida de filtro invertido. Os materiais foram obtidos pela equipe da CTG com volume suficiente para executar um filtro invertido em uma extensão de 50 m no pé da barragem, e foram submetidos para análise da granulometria para confirmar sua adequabilidade como material para execução do filtro invertido. A Figura 7 mostra as pilhas de material estocado.

Ainda, foi verificada, dentro do contrato de fornecimento já existente com empresa da região, a disponibilidade para acionamento rápido e fornecimento de equipamentos de construção e operadores, se necessário.



Figura 7 – Estoque de material de contingência

5.5 Instalação de Novo Marcos Superficiais na Berma de Equilíbrio

Foram instalados novos marcos superficiais para controle topográfico de recalques, pelo menos a cada 50 m ao longo da berma de equilíbrio. Os marcos instalados foram instalados conforme esquema mostrada na Figura 8, dois por seção, um mais a montante próximo ao corpo principal da barragem e um próximo a borda da berma, totalizando 50 novos marcos.

O objetivo do controle foi acompanhar possíveis tendências de movimentação, não percebidas visualmente. Considera-se que para a finalidade do monitoramento a precisão do método é suficiente para indicar deslocamentos provocados pelo avanço das anomalias no sistema de drenagem.

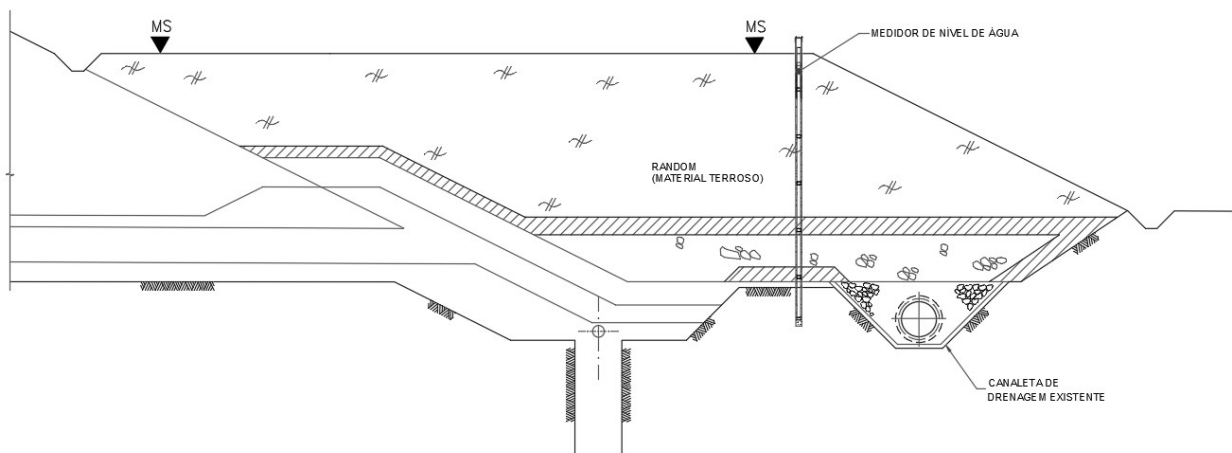
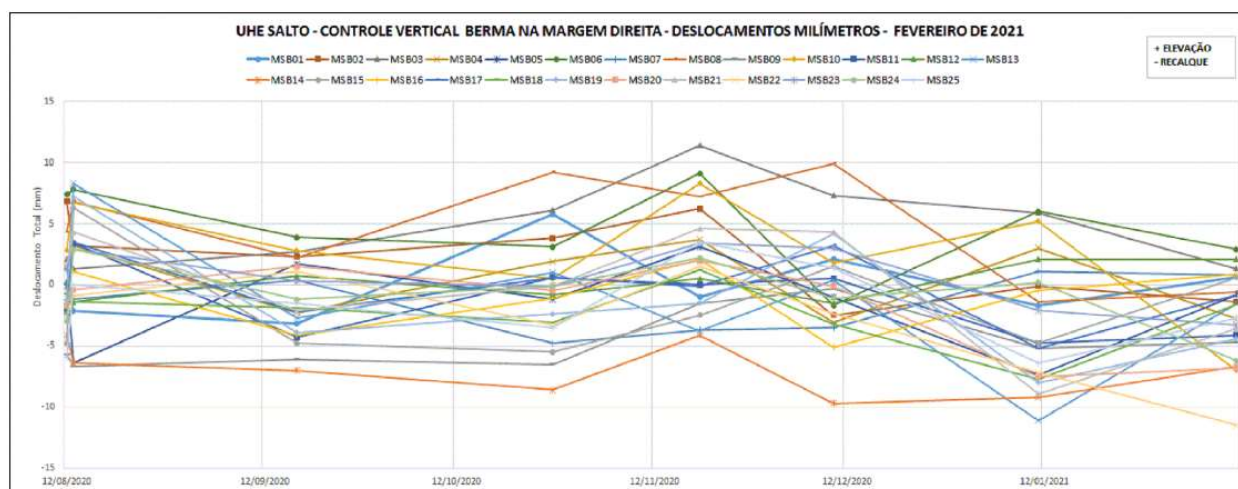


Figura 8 – Ilustração da posição dos marcos superficiais e medidor de nível de água em relação a uma seção típica da bermagem de equilíbrio

As leituras de controle topográfico realizadas nos novos marcos superficiais sobre a bermagem, MSB, indicam que não houve movimentação expressiva.

A Figura 9 e Figura 10 mostram de forma gráfica, respectivamente, os recalques e deslocamentos horizontais, onde, embora pouco representativo por conta da imprecisão e variabilidade do método, nota-se que não há direcionamento preferencial indicando movimento da bermagem. Em termos quantitativos, o maior deslocamento no sentido montante-jusante aconteceu no marco MSB-39, medindo deformação de 1,06 cm. O maior recalque foi evidenciado no marco MSB-14, medindo 1,11 cm e a maior movimentação da seção no marco MSB-08 de 1,16 cm.



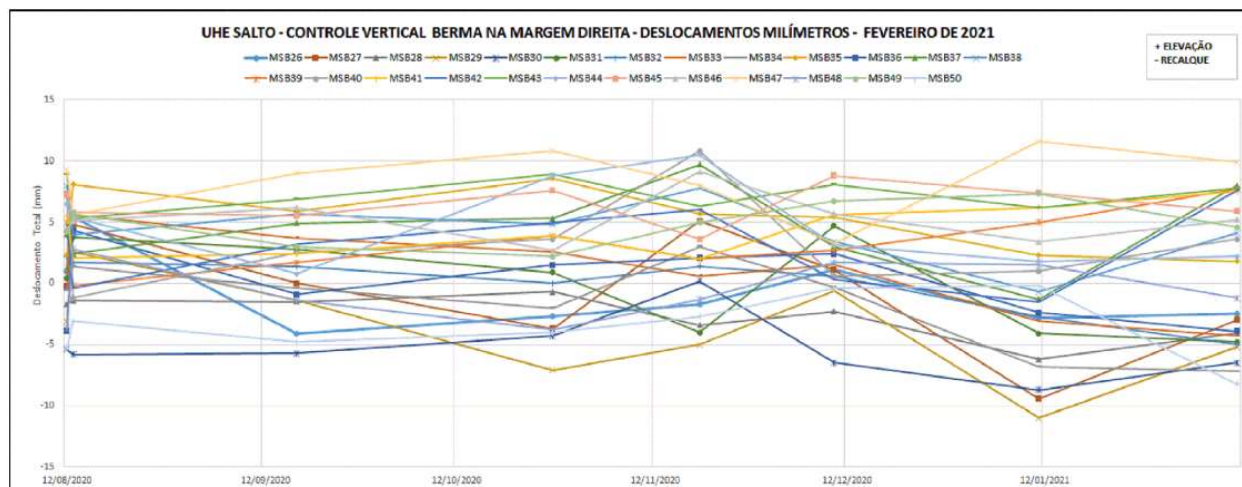


Figura 9 – Recalques – Novos Marcos Superficiais

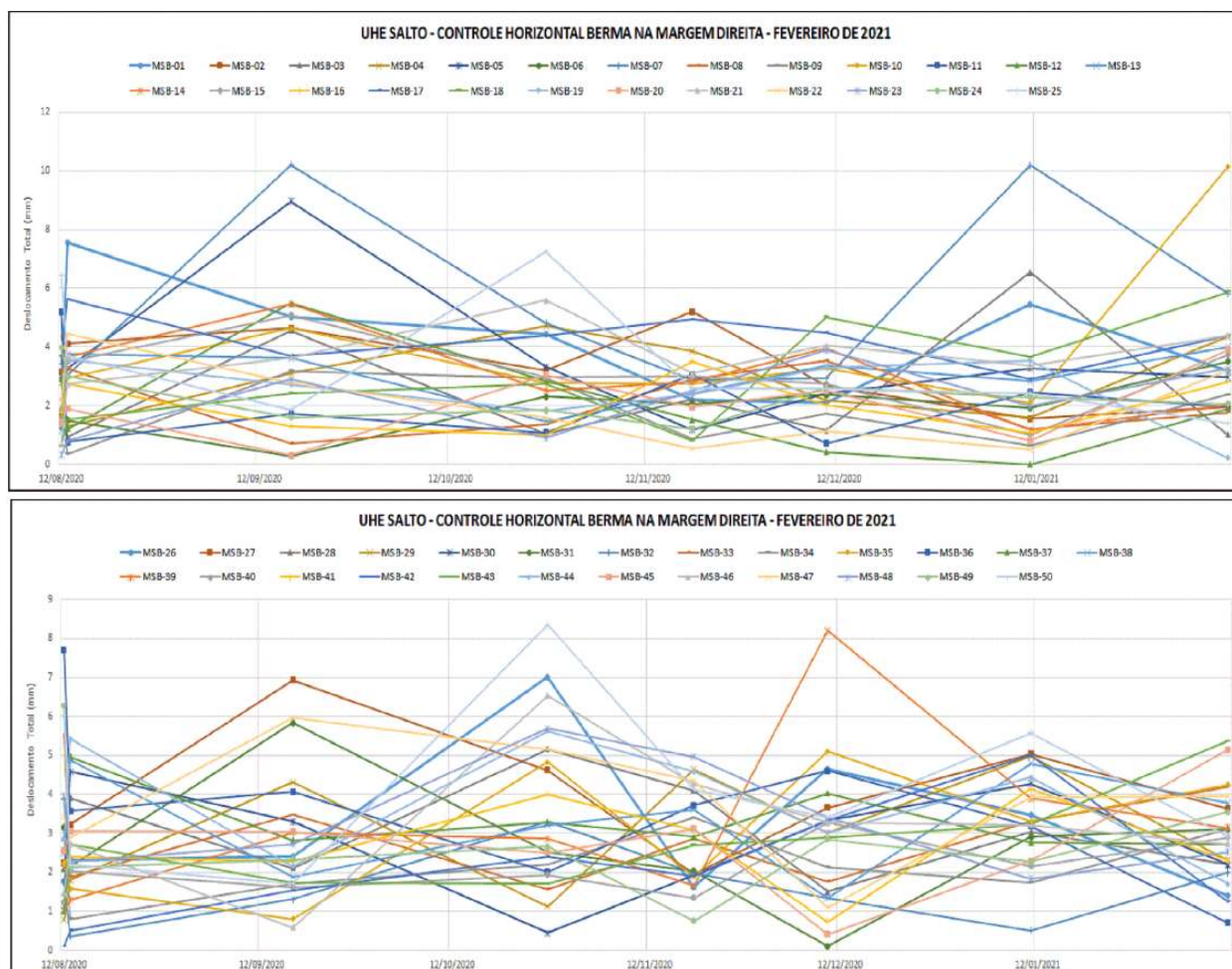


Figura 10 – Deslocamentos horizontais – Novos Marcos Superficiais

5.6 Instalação de Medidores de Nível de Água

Os medidores de nível de água foram instalados ao longo da bermã de equilíbrio, na posição ilustrada na Figura 8, com objetivo de acompanhar periodicamente sinais de elevação ou decréscimo abrupto do nível de água, indicando a incapacidade do sistema de drenagem em captar a vazão de percolação ou novos rompimentos na tubulação. A conclusão da instalação dos 14 novos medidores ocorreu em novembro de 2019.

De modo geral, verificou-se que os níveis permaneceram estáveis. Os valores de referência para acompanhamento foram definidos a partir da cota de topo do tubo de concreto perfurado na canaleta de drenagem. Dessa forma, em conjunto com a análise da lâmina de água dentro da tubulação chegada por ROV, esses valores são indicativos da eficiência do sistema de drenagem em captar a água de percolação e direcionar para os medidores de vazão, e não estão ligados à estabilidade do maciço.

A análise dos valores mostra que os medidores NA002, NA003 e NA004 localizados entre as estacas 3+0,00 e 6+0,00, apresentam níveis de água próximos ou superiores à cota da tubulação, servindo de indício de insuficiência no sistema de drenagem. Esses medidores de nível d'água encontram-se em sela topográfica, que pode indicar maior fluxo de água na seção. Em paralelo, verificou-se infiltração pelo topo do tubo e água corrente no fundo do tubo de drenagem na inspeção por ROV na região do poço de visita na estaca 5+0,00.

5.7 Inspeção Periódica da Tubulação de Drenagem com ROV

Foi contratada empresa especializada para realização de novas inspeções com sistema de televisionamento utilizando ROV (*Remotely Operated Vehicle*) para acompanhamento da situação da degradação da tubulação de drenagem, com a frequência bimestral, para investigar se havia uma piora visível da condição da tubulação ao longo dos meses até o início das obras. A Figura 11 ilustra o modelo utilizado e o posicionamento do ROV na tubulação a partir do poço de visita.



Figura 11 – Ilustração do robô utilizado da inspeção e posicionamento a partir do poço de visita

A última campanha de investigação da tubulação e de ensaio do material coletado havia sido realizada entre outubro de 2018 e fevereiro de 2019.

A partir da análise comparativa entre os vídeos foi possível concluir que no trecho situado entre as estacas 3+20,00 a 10+10,00 aproximadamente, se encontram os principais registros de anomalias, como a identificação de arraste de materiais, quebra de parte do concreto das manilhas, desgaste por abrasão, entre outras ocorrências. Ainda, foi possível verificar que pontualmente aconteceram novas quebras e crescimento dos buracos.

A Figura 12 ilustra a análise comparativa entre a campanha de investigação de 2018 e a campanha mais recente realizada em fevereiro de 2021 em dois trechos. No primeiro, entre as estacas 4+00 e 5+00, é possível observar que a tubulação encontra-se íntegra, com pequenos danos no concreto, no entanto nas emendas é possível notar que o geotêxtil que envolvia o tubo está rasgado e foi empurrado para dentro do tubo. Nesse trecho foi notado acúmulo de material no fundo, em época de maior nível de água dentro da tubulação, e água limpa e corrente quando o nível baixava.

Já a segunda imagem comparativa, tomada entre as estacas 5+00 e 6+20,00, mostra o trecho com registro de concreto danificado, como quebra na parte superior da tubulação, revestimento externo aparente e ferragem exposta, além de material em deposição em processo de arraste pelo fluxo de água.

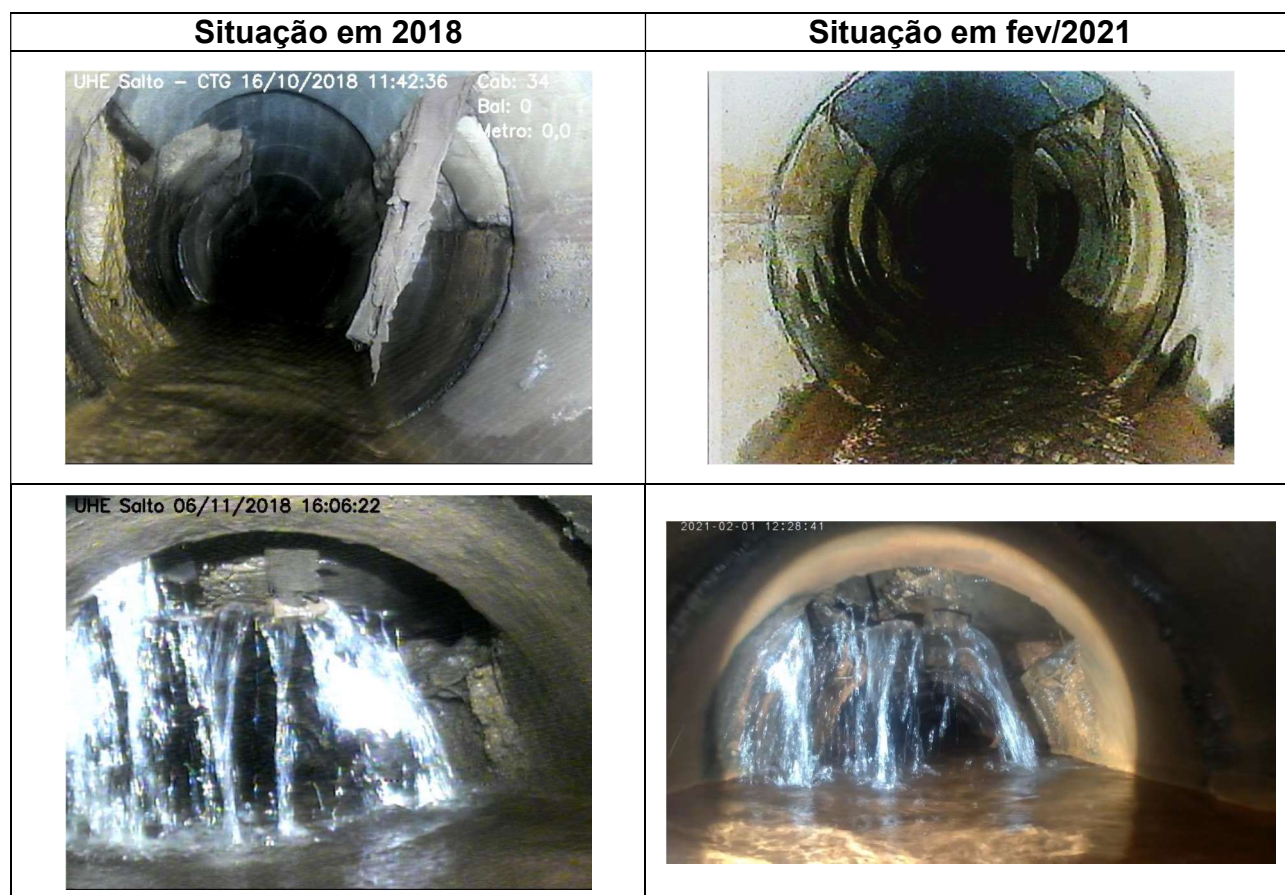


Figura 12 – Situação da tubulação de drenagem – Análise comparativa dos trechos entre as estacas 4+0,00 e 5,00 e entre as estacas 5+00 e 6+20,00

5.8 Acompanhamento dos Medidores de Vazão

Os medidores de vazão que captam as percolações que ocorrem através da barragem da margem direita, medidores MV-01 e MV-02, mostram tendência de estabilização.

Os medidores MV-01A e MV-02A, que medem a vazão que passa pela canaleta de drenagem da berma de equilíbrio da margem direita mostram variações relacionadas à sazonalidade, em que durante o período de estiagem as vazões lidas são menores.

Os gráficos apresentados na Figura 13 indicam o histórico de leituras desses instrumentos. Não se observa nenhuma mudança brusca de comportamento que possa indicar um estado anômalo de percolação de água pela fundação.

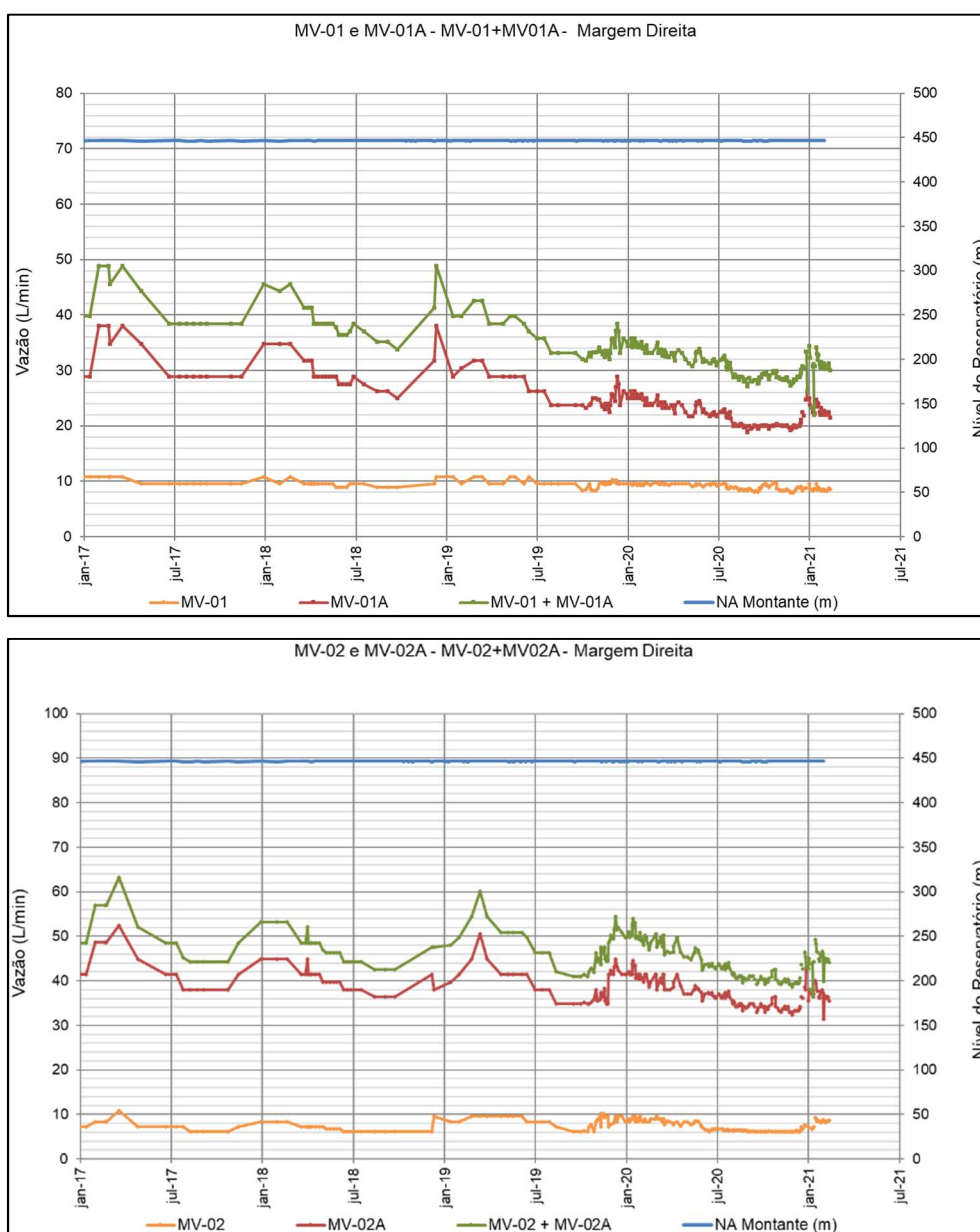


Figura 13 – Histórico das leituras dos medidores de vazão 01/01A e 02/02A

5.9 Acompanhamento do Volume de Material Carreado

A Figura 14 apresenta o histórico das medidas de volume de material coletado na caixa dos medidores de vazão. A coleta de material acumulado na caixa dos medidores vem seguindo uma frequência de duas leituras mensais, conforme recomendado.

Os dados do histórico apontam que o volume de material coletado no medidor MV-01A eram, em geral, pequenos. No entanto, houve uma elevação abrupta do volume coletado no início de fevereiro de 2021. Nessa data o material retido na caixa do medidor totalizou 104 l. Após a coleta e secagem do material, constatou-se que o material se trata de uma areia fina.

O trecho de influência do medidor de vazão MV-01A situa-se entre as estacas 1+29,00 a 10+6,55. Dessa forma, tanto o fluxo quanto o material coletado são provenientes de todo o trecho mencionado. A inspeção em ROV não indicou potenciais anomalias na tubulação que compreende o MV-01A ou alterações relevantes entre as inspeções que possam indicar a origem do diferente material visualizado.

O histórico do material coletado no MV-02A apresenta tendência semelhante, alcançando o valor máximo também no início de fevereiro de 2021 de 96 l. A inspeção por ROV não indicou mudanças relevantes no trecho tubulação que compreende o MV-02A.

O aumento do volume de material coletado e aumento das vazões registradas não refletiram nos demais instrumentos, que continuaram a apresentar suas medidas constantes.

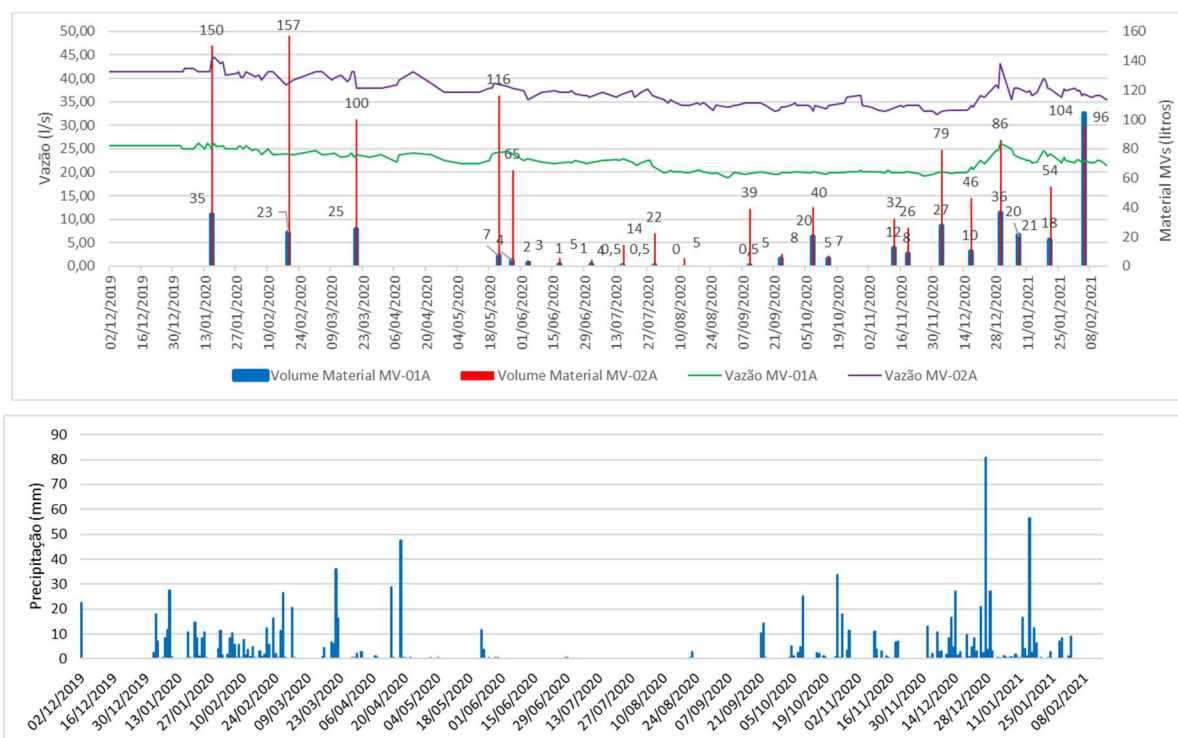


Figura 14 – Histórico de Leituras – Volume de material coletado – Medidores MV-01A e MV-02A

6 Projeto de Recuperação

Os tipos de serviços de construção e logística a serem executados estão descritos na Especificação Técnica do Projeto (INTERTECHNE, 2020) para contratação dos serviços de recuperação da drenagem de pé do talude cujos principais aspectos estão listados a seguir:

a) Serviços gerais, mobilização e limpeza da área:

Inclui-se a mobilização dos equipamentos e mão de obra, abertura de vias de acesso internas, estabelecimento e manutenção do canteiro de obras e instalações industriais, locação e demarcação das obras, entre outros serviços. Inclui-se também o desmatamento e destocamento da área objeto das obras de recuperação assim como a limpeza e preparação das áreas de execução das obras.

b) Rebaixamento do nível freático na área de intervenção e manejo das águas;

Execução do rebaixamento do nível freático local por meio de ponteiros filtrantes, com acompanhamento da efetividade por meio de medidores de nível de água, além de sistema de esgotamento nas áreas de construção, visando executar os trabalhos sem riscos de carreamento de finos e proporcionando o lançamento adequado dos diversos materiais previstos no projeto ou através de necessidades que se observe durante a realização dos trabalhos.

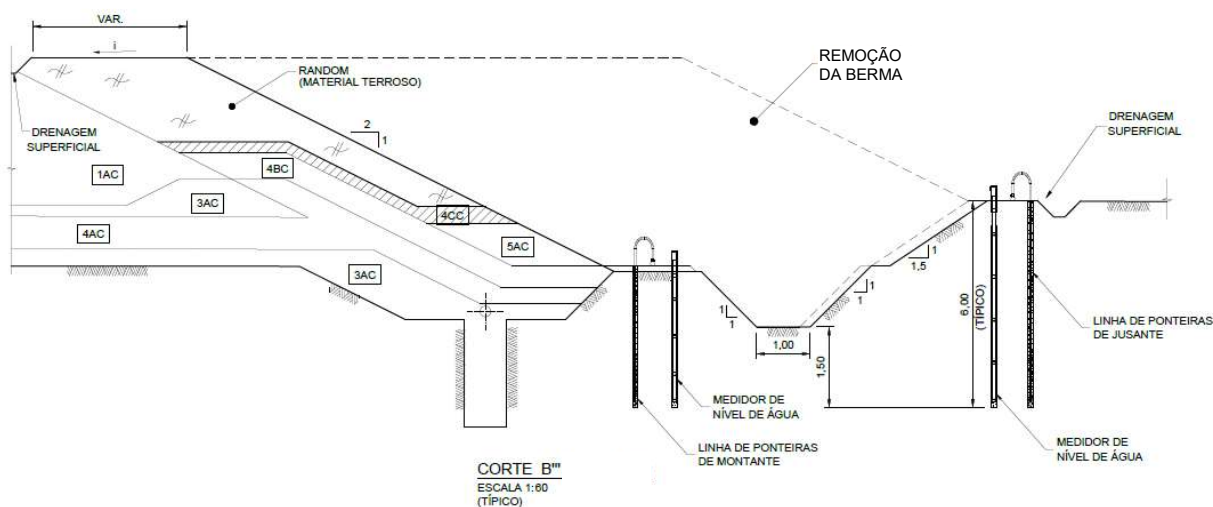


Figura 15 – Esquema de rebaixamento do nível freático com duas linhas de ponteiros filtrantes

c) Planejamento das escavações, estoque e bota-fora;

Inclui-se o planejamento das pilhas de estoque e áreas de bota-fora e a escavação da berma de equilíbrio e da região da trincheira incluindo os materiais de construção para filtro, transições e enrocamento, remoção da canaleta de concreto e tubo drenante de concreto perfurado.

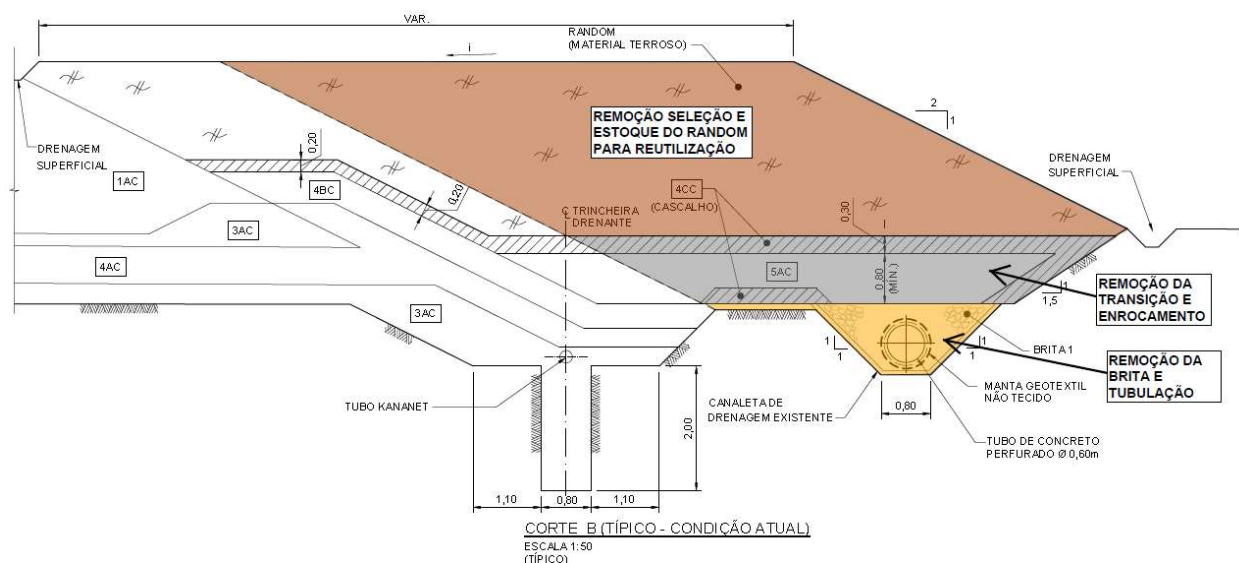


Figura 16 – Materiais a serem removidos para substituição do tubo concreto na canaleta de drenagem

d) Substituição do sistema de drenagem de pé por tubos de PEAD;

Aquisição do tubo de PEAD especificado ou similar, desde que aprovado pela projetista, e relação das atividades para instalação e montagem do mesmo.



Figura 17 – Ilustração da célula escavada e instalação de tubo de PEAD sobre berço de brita e areia

e) Recomposição do aterro compactado da berm de equilíbrio;

Inclui-se a obtenção dos materiais de construção definidos no projeto ou conforme disponibilidade local, desde que aprovada pela projetista, a recomposição do aterro da canaleta de drenagem (preenchimento inicial) e a recomposição do aterro compactado da berm de equilíbrio.

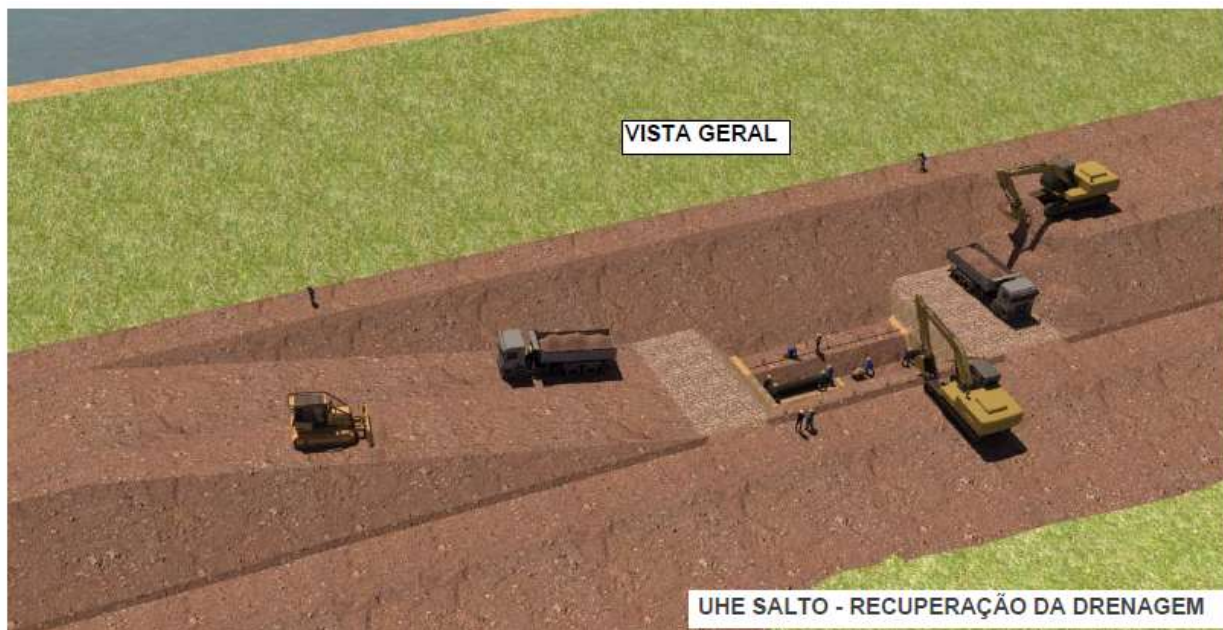


Figura 18 – Vista geral da sequência de construção



Figura 19 – Detalhe do avanço das atividades

f) Restituição da drenagem superficial e proteção dos taludes.

Restauração da proteção superficial através de plantio de grama e restituição da drenagem superficial dos taludes após a execução do aterro.

g) Instrumentação adicional

Instalação de 10 novos piezômetros permanentes e medidores de nível de água previstos no projeto de recuperação da barragem da margem direita, visando uma maior robustez do sistema de monitoramento de segurança da barragem.

7 Plano de Contingência – Rebaixamento de Emergência

A concepção da usina considera que o reservatório da UHE Salto deve operar sem grandes deplecionamentos, sendo considerado como a fio d'água, mantendo o nível de água de montante na cota 446,50 m apenas com pequenas oscilações resultantes da operação da usina e variações das vazões afluentes ao reservatório.

Por esse motivo, entre outras justificativas técnicas, o projeto da seção da barragem considera que a proteção a montante com *rip-rap* se estende desde a cota da crista, 449,50m, até a cota 445,50 m.

Nesse contexto, em um cenário de emergência onde seja necessário o rebaixamento rápido do nível de água de montante para cotas inferiores à cota do *rip-rap*, além da estabilidade, deve ser levado em consideração questões referentes a erodibilidade do material do talude de montante quando exposto.

Neste caso, caracteriza-se como cenário de emergência, o surgimento de infiltrações e percolação de água não controlada durante a execução das obras de recuperação, que exija como medida de segurança previamente estudada o rebaixamento do nível de água do reservatório.

Para a verificação da estabilidade dos taludes da barragem de terra da margem direita durante o cenário de emergência estabelecido foram analisados quatro cenários de rebaixamento considerando diferentes vazões afluentes no reservatório.

7.1 Metodologia de Análise

7.1.1 Cenários Avaliados

Os cenários hipotéticos de rebaixamento estão apresentados na Nota Técnica NT-OO-08-2019 “Estudo do Rebaixamento Contingencial do Reservatório da UHE Salto” de maio de 2020 (documento interno). Os cenários consideram as vazões afluentes conforme transcritos a seguir:

- Cenário I – C1: Média correspondente aos 10% menores registros nos meses de agosto que compõem a série histórica, ou seja, 94 m³/s;
- Cenário II – C2: Afluência considerando 100% Média de Longo Termo (histórico de 1931 a 2018) da UHE Salto no mês de agosto, 118 m³/s;
- Cenário III – C3: Média correspondente aos 10% maiores registros nos meses de agosto da série histórica. 149 m³/s;
- Cenário IV – C4: Adicionalmente, será explorado um cenário sob restrição de vazão vertida máxima, limitando uma das comportas à abertura máxima de 10m. Reduzindo, portanto, a vazão vertida máxima de 1.925 m³/s para 1.760 m³/s, nesse cenário a vazão de entrada será equivalente à vazão média de longo termo (MLT) observada no mês de agosto (118 m³/s).

Dados os cenários fundamentais, a seguir é apresentada uma tabela resumo dos principais marcos e tempos medidos de rebaixamento:

Tabela 5 - Cotas medidas à cada 24h nos primeiros 7 dias no horizonte de estudo

Dias	N.A Atingido no tempo (m)			
	C1	C2	C3	C4
1	443,62	443,65	443,70	443,92
2	441,51	441,57	441,66	442,00
3	439,80	439,89	440,01	440,45
4	438,43	438,54	438,69	439,17
5	437,33	437,46	437,63	438,12
6	436,44	436,60	436,79	437,26
7	435,73	435,90	436,12	436,56

7.1.2 Parâmetros Geotécnicos dos Materiais

Os parâmetros geotécnicos dos materiais do corpo do aterro e da fundação utilizados nas análises numéricas foram os estimados com base nos resultados dos ensaios de laboratório realizados para o desenvolvimento do projeto da UHE Salto conforme explicitado nas memórias de cálculo do projeto executivo. Para os demais materiais, os parâmetros foram obtidos de bibliografia e experiência em projetos com materiais semelhantes.

Para análises transientes, que consideram o ritmo de rebaixamento, foi necessário definir a curva característica (curva de retenção) e as curvas de permeabilidade não saturada dos materiais.

A Tabela 6 resume os parâmetros adotados.

Tabela 6 – Parâmetros Geotécnicos dos Materiais

Material	Coesão c' (tf/m ²)	Âng. de Atrito ϕ' (°)	Peso Específico γ (tf/m ³)	Permeabilidade k (cm/s)
Aterro Compactado	1,0	33°	1,85	$k_v = 2 \cdot 10^{-6}$ $k_h = 2 \cdot 10^{-5}$
Filtro	0,0	30°	1,90	$1 \cdot 10^{-2}$
Transições	0,0	30°	2,00	$5 \cdot 10^{-1}$
Rip-Rap	0,0	45°	2,20	1
Berma de Equilíbrio – Enrocamento	0,0	40°	2,00	1
Berma de Equilíbrio – Random	0,0	32°	1,80	$1 \cdot 10^{-4}$
Fundação (Colúvio de Arenito)	0,4	23°	1,50	$2 \cdot 10^{-3}$
Fundação (Residual de Basalto)	2,0	30°	1,70	$1 \cdot 10^{-4}$
Fundação (Cascalho)	0,0	33°	1,90	$5 \cdot 10^{-3}$

7.2 Resultados das Análises de Estabilidade

Todas as análises foram realizadas em termos de tensões efetivas, através do método de equilíbrio limite (método de Spencer) por meio do software Slope/W. As análises de fluxo transiente foram realizadas utilizando o método dos elementos finitos utilizando o software SEEP/W.

Em todas as seções foram pesquisadas superfícies de ruptura circular ao longo do período de rebaixamento do reservatório, sendo apresentado na Figura 20 um exemplo da condição mais crítica de rebaixamento para a seção da estaca 12+50 com indicação do respectivo tempo em relação ao início do rebaixamento da cota do reservatório.

Na Tabela 7 são mostrados os fatores de segurança encontrados entre todos os cenários de rebaixamento analisados. Conforme mostrado, no intervalo de tempo de 0 a 7 dias, o ritmo rápido de rebaixamento não é suficiente para dissipação das poropressões e o corpo da barragem fica parcialmente saturado.

Em todos os casos analisados, o fator de segurança encontrado foi igual ou superior ao requerido. Com base nas seções analisadas e nos parâmetros de resistência adotados para a análise, é possível atestar a estabilidade global da barragem de terra em situação de rebaixamento contingencial do reservatório.

Tabela 7 – Cenários de Rebaixamento – Fatores de segurança por tempo decorrido

Tempo Decorrido	Margem Direita						Leito	Margem esquerda	
	Seção 01	Seção 02	Seção 04	Seção 05	Seção 07	Seção 09	Seção 10	Seção 15	Seção 19
0 h (Inicial)	2,07	2,35	2,37	2,32	2,45	2,71	2,61	2,36	2,09
1 h	2,06	2,43	2,46	2,39	2,47	2,69	2,58	2,36	2,09
2 h	2,07	2,42	2,48	2,39	2,43	2,64	2,54	2,37	2,09
3 h	2,08	2,38	2,45	2,39	2,39	2,60	2,51	2,38	2,10
4 h	2,09	2,36	2,42	2,36	2,36	2,56	2,49	2,40	2,11
6 h	2,02	2,31	2,35	2,28	2,29	2,48	2,42	2,41	2,13
8 h	1,97	2,28	2,31	2,23	2,24	2,42	2,37	2,35	2,05
11 h	1,91	2,25	2,28	2,18	2,20	2,37	2,32	2,30	1,97
14 h	1,86	2,20	2,23	2,13	2,14	2,31	2,27	2,24	1,89
18 h	1,82	2,13	2,15	2,06	2,06	2,20	2,21	2,16	1,79
1d	1,77	2,06	2,05	2,01	2,00	2,10	2,16	2,09	1,68
1,17 d	1,75	1,99	1,98	1,96	1,96	2,02	2,14	2,05	1,62
1,42 d	1,74	1,90	1,90	1,93	1,93	1,96	2,13	2,00	1,56
1,75 d	1,81	1,84	1,83	1,90	1,92	1,93	2,08	1,90	1,52
2d	1,82	1,79	1,79	1,86	1,90	1,90	2,06	1,85	1,52
2,63 d	1,84	1,68	1,68	1,74	1,84	1,85	1,99	1,72	1,58
3d	1,84	1,63	1,64	1,70	1,83	1,84	1,97	1,67	1,59
4d	1,86	1,55	1,58	1,60	1,80	1,80	1,93	1,57	1,60
5d	1,87	1,51	1,58	1,53	1,73	1,77	1,86	1,53	1,61
6d	1,88	1,49	1,59	1,48	1,68	1,75	1,81	1,54	1,62
7d	1,89	1,49	1,65	1,45	1,64	1,74	1,77	1,55	1,63

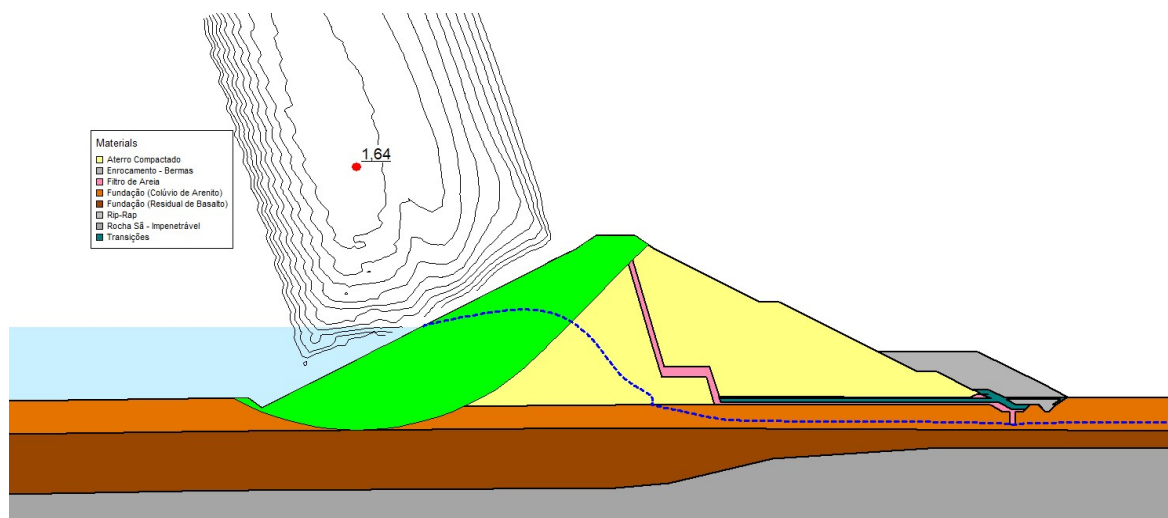


Figura 20 – Margem Direita – Condição Crítica Seção 7 (Est. 12+50,0) – Cenário I - Tempo decorrido: 7 dias

8 Considerações Finais

O presente trabalho apresentou uma síntese dos estudos e ações realizadas para identificar e planejar as intervenções corretivas no sistema de drenagem de pé da UHE Salto com vista ao gerenciamento dos riscos. A partir do trabalho desenvolvido, a seguir apresentam-se as seguintes considerações finais.

- Destaca-se a fluxo de informação entre o profissional de campo que, a partir da detecção de um volume expressivo de material na caixa do medidor de vazão, comunicou a equipe técnica, que contratou serviços de consultoria e de investigação que culminaram no consenso de que haveria a necessidade de execução de obras de recuperação do sistema de drenagem.
- Nessa etapa foi envolvida uma equipe técnica experiente para juntos identificarem os principais riscos associados às obras, que incluem a remoção da berma de equilíbrio de exposição da barragem a fatores de segurança inferiores aos de projeto, resultando, entre outras ações, na especificação de necessidade de execução das obras em trechos pequenos, com rebaixamento do nível freático e com material de contingência à disposição.
- As ações de intensificação do monitoramento trouxeram segurança para as equipes envolvidas no sentido de que a velocidade de evolução da degradação do sistema foi compatível com o tempo de planejamento para execução das obras, de modo que as obras puderam ser iniciadas no tempo certo;
- A partir das ações de monitoramento em andamento foi possível desenvolver com detalhe o projeto de recuperação, que consiste em atividades de escavação, rebaixamento do nível freático, substituição da tubulação de concreto danificada por tudo de PEAD perfurado, recomposição da berma de equilíbrio e instalação de instrumentação permanente adicional;

- Como verificação adicional, incluída do plano de contingência, foram realizadas análises de estabilidade para os cenários de rebaixamento contingencial indicados pela equipe de operação. Os resultados indicam que o talude de montante atende aos critérios de aceitação quanto a estabilidade global dos taludes, com fatores de segurança acima do mínimo necessário. No entanto, vale ressaltar que, em caso de rebaixamento do reservatório, o nível de água à montante estará situado abaixo da cota do enrocamento de proteção. Dessa forma, o solo compactado da barragem ficará exposto e suscetível a processos erosivos, pela ação de ondas e ventos, que podem acarretar no carreamento do material e escorregamentos localizados.

9 Referências Bibliográficas

ÁVILA, J. P. **Segurança de Barragens e Sistema de Gestão de Risco** – Disponível em: <https://www.pimentadeavila.com.br/gestao-de-riscos-gestao-de-seguranca-e-gestao-da-emergencia/> Acesso em: 04 abr. 2021.

BRASIL. **Lei nº 12.334**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens [...], Brasília, 20 de setembro de 2010.

BRASIL. ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – **Resolução Normativa nº 696**. Estabelece critérios para classificação, formulação do Plano de Segurança e realização da Revisão Periódica de Segurança em barragens fiscalizadas pela ANEEL de acordo com o que determina a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, Brasília, de 15 de dezembro de 2015.

ICOLD - International Commission On Large Dams. **Dam Failures Statistical Analysis. Bulletin 99**, 1995.

ICOLD – International Commission on Large Dams. **Risk Assessment in Dam Safety Management. Bulletin 130**, 2005.

ICOLD - International Commission On Large Dams. **World Dam Register 1988**. 1998.

INTERTECHNE CONSULTORES S.A. **Projeto de Recuperação do Sistema de Drenagem da UHE Salto**. Curitiba, 2020.

INTERTECHNE CONSULTORES S.A. **UHE Salto – Barragem de Terra da Margem Direita - Diagnóstico da Situação com Base em Investigações**. Curitiba, 2018.

INTERTECHNE CONSULTORES S.A. UHE Salto - **Plano de Ação e Contingência para o Monitoramento**. Curitiba, 2020.

MELO, F. A. C. **Processos de Gestão de Segurança de Barragens estruturados aplicando as boas práticas de Gerenciamento de Projetos**. Monografia (Especialização) *Não publicado*. Faculdades IDD. 2019.

MENESCAL, R.A. **Gestão da Segurança de Barragens no Brasil: Proposta de um Sistema Integrado, Descentralizado, Transparente e Participativo**. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 769 p., 2009.

NEVES, L. P. **Segurança de Barragens – Legislação Federal Brasileira em Segurança de Barragens Comentada**. Brasília. 2018.