

IMPERMEABILIZAÇÕES DA OMBREIRA DIREITA DA PCH PIPOCA

Romildo D. Moreira Filho ¹; José Henrique Pereira ²; Maurício Giambastiani ³

Resumo – Após o enchimento do reservatório da PCH Pipoca, que aconteceu em agosto de 2011, verificou-se a existência de surgência d'água a jusante ao longo de uma junta de alívio sub-horizontal (SH) com material decomposto, além do carreamento de material arenoso de preenchimento da junta. Foram realizadas campanhas, sem sucesso, de injeção de calda de cimento em 2018 e poliuretano estrutural em 2019/2020 e a não interrupção do fluxo de água em velocidade ao longo da junta SH impediu a eficiência das injeções. Em 2021, após campanha de investigação de sondagens com televisionamento dos furos e utilizando a tecnologia hidro acústica em inspeção subaquática, gerando imagens de alta definição pelo método SeeSub®, foi possível propor e executar concretagem submersa de tamponamento da entrada da água no talude da galeria de desvio dentro do reservatório. Logo após, uma extensa campanha de injeção de calda de cimento e argamassa, conseguiu-se reduzir a vazão de 50 para 0,104 l/s.

Abstract – *After the filling of the PCH Pipoca reservoir, in August 2011, there was water infiltration downstream along a joint with decomposed material, in addition to the carry-over of sandy filling material of the joint. Unsuccessful campaigns were carried out to inject cement grout in 2018 and structural polyurethane in 2109/2020 and the non-interruption of the flow of water at speed along the joint impeded the efficiency of the injections. In 2021, after a drilling investigation campaign with televising the holes and using hydro-acoustic technology in underwater inspection, generating high definition images SeeSub®, it is possible to propose and execute submerged concreting to plug the water inlet into the slope of the diversion gallery inside the reservoir and an extensive campaign of injection of cement grout, later reducing the flow from 50 to 0.104 l/s.*

Palavras-Chave – injeção de calda de cimento; impermeabilização; gnaisses; junta de alívio.

¹ Geólogo, MSc., Cia Energética de Minas Gerais - Cemig, Belo Horizonte/MG, e-mail: moreira@cemig.com.br

² Geólogo, Intertechne Consultores S.A., Curitiba/PR, e-mail: jhp@intertechne.com.br

³ Geólogo, Intertechne Consultores S.A., Curitiba/PR, e-mail: mgi@inttpartner.com.br

1. INTRODUÇÃO

A PCH PIPOCA, de propriedade da HIDRELÉTRICA PIPOCA S/A (Cemig GT e Omega Energia), situa-se no rio Manhuaçu integrante da bacia do rio Doce, dista 380 km de Belo Horizonte e 8 km da cidade de Ipanema, localizada no leste do estado de Minas Gerais.

A barragem é constituída por quatro segmentos sendo da esquerda para a direita: a barragem de terra/enrocamento da margem esquerda, o vertedouro de crista livre, a galeria de desvio do rio e a barragem de concreto da margem direita. A obra foi construída entre 2008 e 2009 e teve o primeiro enchimento do reservatório em agosto de 2010. No dia 23/08/2010, com o reservatório atingindo o NA máx. normal (El. 399,5 m), foram observadas surgências de água (Figura 1, direita) a jusante (por volta da El. 388 m) conduzidas por uma junta sub-horizontal (SH) identificada e mapeada durante a construção, com uma vazão estimada de 50 l/s, naquela data ainda sem carreamento de material de preenchimento da junta ou do maciço rochoso.

Apesar do sucesso momentâneo do tamponamento superficial da junta decomposta em 2011, com o rebaixamento de 1 metro do nível do reservatório e o tratamento da feição, a vazão de percolação voltou a aumentar e em 2016 ficou evidenciado o carreamento de material de preenchimento das juntas e fraturas. Além disso, suspeitava-se da possibilidade do aumento de abertura das descontinuidades e formação de vazios/cavidades devido ao fluxo contínuo de água do reservatório ao longo dessas estruturas do maciço rochoso da ombreira direita.

Foram implementadas dessa forma campanhas de investigação geológico-geotécnica e de impermeabilização entre os anos de 2018 e 2021, inclusive com a execução de concretagem submersa de preenchimento da entrada de aberturas da junta decomposta dentro do reservatório, que serão descritas a seguir.

2. CARACTERIZAÇÃO DOS ESTUDOS E INTERVENÇÕES EXECUTADAS

2.1. Diagnóstico das Infiltrações

As escavações iniciais para a construção das estruturas de concreto na ombreira direita expuseram um maciço rochoso gnáissico pouco alterado e muito resistente, porém com junta de alívio sub-horizontal, muito persistente, preenchida de material rochoso alterado e muito fraturado de cor marrom, com presença de fluxo de água discreto (Figura 1, esquerda). Esta junta se estende desde a tomada d'água até 70 m a jusante do barramento, com espessura variável de poucos centímetros a até 60 cm (Figura 2).

Apesar da descontinuidade ter sido identificada como uma condicionante geológica potencialmente importante quanto a estanqueidade, os tratamentos de vedação propostos no projeto executivo foram apenas parcialmente executados durante o período de implantação das obras da usina. Esse tratamento, considerado insuficiente, consistiu na execução de um plug de concreto encaixado no negativo (*overbreak*) do talude de escavação da galeria de desvio (Figura 1, centro), afastado cerca de 10m a montante do barramento, que deixou uma abertura exposta da junta SH sujeita às ações de operação do reservatório.

Foram feitas inspeções através de mergulhadores, em 12/06/2020, que indicaram a existência de entradas pontuais de água pela junta SH. Foi ainda observado que um ponto muito importante de percolação se situava no contato entre a junta SH e o plug de concreto, a cerca de 6 m de profundidade do reservatório.

Em 2011, as primeiras avaliações mostraram a entrada de água do reservatório a partir de uma junta inclinada e de direção oblíqua ao talude vertical onde aflora a junta SH. Essa descontinuidade, foi exposta devido ao rebaixamento de 1 metro em cota do reservatório, tendo sido vedada com epóxi subaquático e o fluxo d'água experimentou uma notável diminuição de vazão desde os 50 l/s originais para aproximadamente 10 l/s.

No final de 2016 observou-se no medidor de vazão, instalado a jusante do barramento, a presença de areia proveniente da erosão do material de alteração da junta SH. A partir desta data o aporte de material sólido, recolhido no medidor de vazão, experimentou picos nos volumes depositados. O ciclo de maior acumulação não pareceu ser sensível a mudanças do nível do reservatório, porém, coincidia com a execução das sondagens investigativas e da perfuração para as campanhas de injeção profunda de impermeabilização.

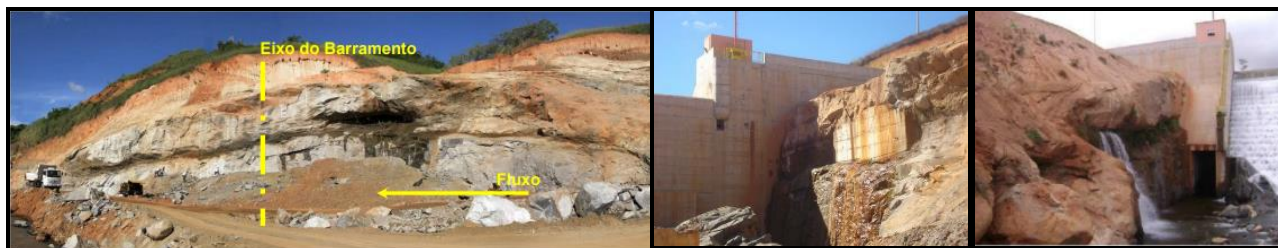


Figura 1. Talude da feição decomposta SH, plug de concreto e percolação de jusante.

2.2. Campanhas de Injeção de Impermeabilização

Foram realizadas três campanhas distintas de injeção de impermeabilização com o reservatório já instalado, sendo a primeira em 2018 de calda de cimento, a segunda entre 2019 e 2020 com injeção química do produto poliuretano estrutural. Finalmente em 2021 com a execução da concretagem submersa de tamponamento das entradas de água do reservatório adjacentes ao plug de concreto existente, seguido dos trabalhos de injeção de calda e argamassa de cimento.

A campanha de injeções de calda de cimento executada em 2018 não resultou na redução da vazão ou do carreamento de sólidos de preenchimento da junta SH. A análise das absorções de calda confirmou que o fluxo principal pelo maciço rochoso estava concentrado em uma faixa muito estreita na ombreira direita da barragem. Já a campanha de sondagens exploratórias, realizada entre julho e agosto de 2019, permitiu consolidar a posição da junta SH em diferentes profundidades e mostrou indícios da formação de pequenos vazios e cavidades devido ao carreamento do material de preenchimento das descontinuidades.

As injeções químicas, com o uso de poliuretano estrutural, executadas a partir de furos rotoperçussivos (em torno de 15 metros de profundidade) no maciço rochoso da ombreira direita, sendo uma linha a montante e outra a jusante do eixo da barragem, realizadas entre novembro de 2019 e março de 2020, também não resultaram efetivas para a redução da vazão e da quantidade de sólidos removidos da junta SH. Os televisionamentos realizados nos furos localizados na faixa do maior fluxo mostraram a presença cavidades de tamanho decimétrico alongada na direção de montante a jusante por onde circulava um fluxo de água com maior velocidade e suficiente para impedir a reação do poliuretano e sua expansão para o preenchimento dos vazios. Essas cavidades se desenvolveram aproximadamente entre as elevações 394 e 395 m.

Até o início da campanha de sondagens exploratórias e de tratamento do maciço rochoso em 2021, o processo de erosão interna na junta SH estava ativo. As velocidades do fluxo pelas descontinuidades do maciço rochoso conspiravam contra a eficiência de todas as injeções que se buscou executar nessas condições, favorecendo um processo de lavagem e diluição. Portanto, para que as ações visando reduzir as vazões e cessar o carreamento de material fossem efetivas foi fundamental reduzir significativamente a incidência de fluxo através das descontinuidades controlando todos os pontos de possível infiltração situados a montante do barramento, tanto na janela não tratada da junta SH, nas imediações do plug de concreto, como na região já tratada em 2011.

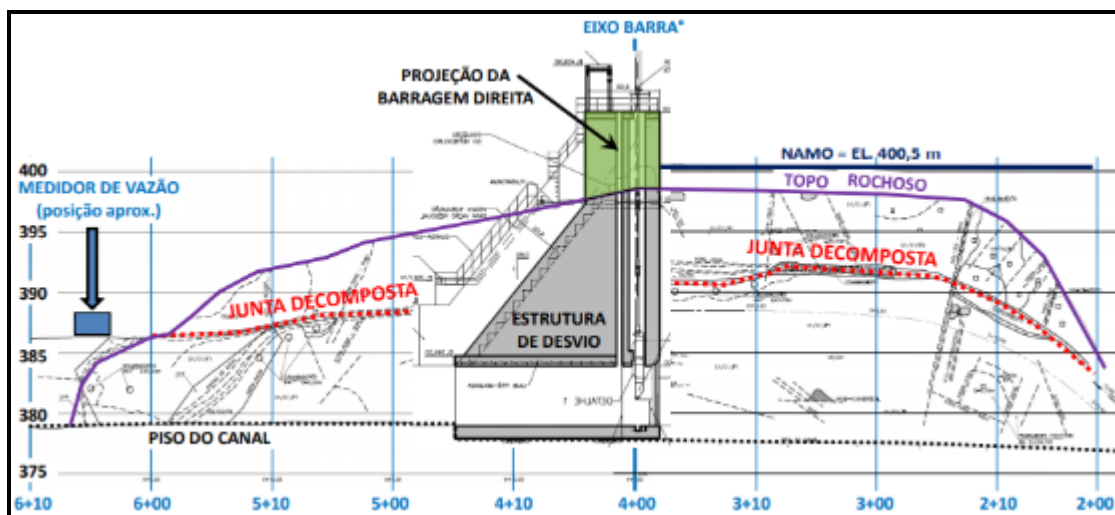


Figura 2. Seção ilustrativa transversal ao eixo do barramento, com a junta SH decomposta.

2.3. Soluções Implementadas em 2020 e 2021

A partir dos estudos e projetos elaborados em 2020 e 2021 foram cumpridas as seguintes etapas:

a) Execução de Imageamento subaquático do talude submerso entre a tomada d'água e o barramento buscando obter um modelo digital do terreno com identificação dos pontos de infiltração de água (Figura 3, esquerda);

b) Execução de uma campanha de sondagens exploratórias com televisionamento e ensaios de perda d'água sob pressão para consolidar o modelo geológico e identificar os vazios associados à junta SH;

c) Construção de novos plugs de concreto submersos, sendo um a montante e outro a jusante do plug preexistente, com o propósito de obstruir todos os pontos de infiltração, e desta forma reduzir a vazão e a velocidade do fluxo no interior do maciço rochoso, favorecendo desta forma a qualidade da injeção de calda e argamassa de cimento (Figura 3, direita e Figura 4);

d) Execução de uma campanha de injeções com calda de cimento e argamassa na área de montante e, no eixo do barramento sobre a barragem de concreto e a jusante do barramento na ombreira direita;

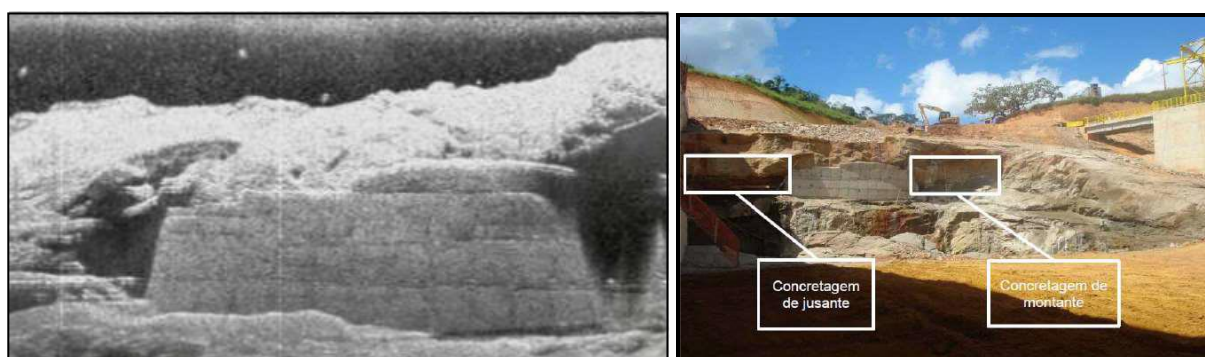


Figura 3. Imageamento subaquático SeeSub® e localização das concretagens submersas de 2021

Em dezembro/2020 foram executados os trabalhos de imageamento subaquático do talude submerso entre a tomada e o barramento, onde situa-se a junta SH e o plug de concreto executado durante as obras (Figura 3, esquerda). Esse imageamento foi utilizado para identificação e posicionamento da junta SH e do plug preexistente, como referência para os trabalhos de concretagem submersa. Esse sistema multifrequencial de aquisição de imagens subaquáticas é denominado SeeSub® e permitiu a obtenção de imagens subaquáticas associando

alta definição com grande área de cobertura em uma única imagem. A técnica proporcionou uma avaliação macroscópica das áreas de interesse (estruturas geológicas submersas, alterações no substrato rochoso, presença de depósitos de materiais etc.) para posteriormente fazer uma avaliação pontual detalhada das anomalias encontradas quanto a entrada da água do reservatório ao longo da junta SH. A análise integrada das imagens subaquáticas indicou um padrão de anomalia com maior extensão na lateral direita do plug pré-existente e de fraturas no maciço rochoso nas laterais superior esquerda e direita da estrutura civil.

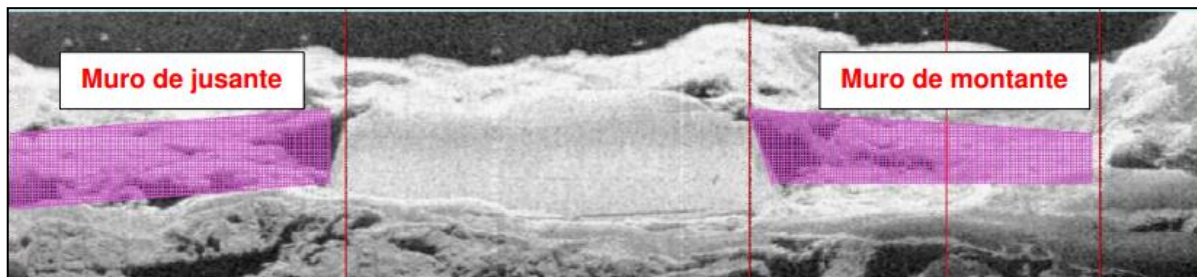


Figura 4. Localização dos plugs (muros) de concreto executados, dentro do reservatório, sobre a junta SH

A segunda etapa do trabalho consistiu na construção de dois plugs de concreto submerso de maneira a complementar o plug preexistente ao longo do traçado da junta SH (Figura 4). Essa atividade foi realizada entre junho e agosto de 2021 e se iniciou com inspeções subaquáticas de avaliação das condições locais e uso de corante na água que percolava pelo maciço rochoso até atingir o medidor de vazão situado a jusante do vertedouro, o que foi confirmado.

Posteriormente à inspeção subaquática foram executados pelos mergulhadores os serviços de vedação prévia ao longo da junta SH com a colocação de pequenas peças de madeira, estopas de cânhamo, serragem de madeira e finalmente aplicou-se tabatinga na proporção de 2:1 (solo: cimento) e obteve-se a redução das vazões de 14,30 para 1,80 l/s. Para garantia da vedação prévia, foi utilizada também massa epóxi bi componente sobre a tabatinga e foi observada ainda mais a redução das vazões no medidor de vazão de 1,80 para 0,78 l/s.

Devido às irregularidades da superfície rochosa para apoio e fixação das formas metálicas do processo de concretagem submersa, foram empilhados 150 sacos de areia/cimento (na proporção de 1:2) para formar a base plana das formas. Na sequência foram executadas as ancoragens na rocha e colocada a armadura de pele do concreto submerso.

O concreto submerso foi lançado em 3 camadas distintas por bloco e teve seu traço adaptado para as condições locais, sendo utilizado além dos agregados, água e cimento, sílica ativa, aditivos superplastificante e antidispersante, relação A/Ceq de 0,29 e a resistência obtida aos 7 e 14 dias foi de 19 e 29 MPa respectivamente.

Em paralelo aos trabalhos de concretagem submersa foram executadas as sondagens rotativas exploratórias, além de ensaios de perda d'água sob pressão e televisamento das paredes dos furos, para identificar e caracterizar a presença de vazios resultado da lavagem do preenchimento das descontinuidades. Foram realizadas 7 sondagens na ombreira direita com profundidades em torno de 15 metros e também foram utilizadas as sondagens das fases anteriores de investigação para a revisão do modelo geológico-geotécnico (Figura 5).

A junta SH separa dois ambientes geológicos distintos. Nas elevações acima da base da junta SH o maciço rochoso é formado por gnaisses e anfibolitos, com moderado a alto grau de alteração (A3 a A5), fraturamento F3 a F5 e alta permeabilidade, sendo frequentes a presença de vazios de tamanhos centimétricos devido a erosão do material de preenchimento das descontinuidades (Figura 5). Abaixo da junta SH o maciço rochoso possui consistência alta, praticamente sem alteração (A0-A1), é pouco fraturado (F1) e quase impermeável. Este zoneamento foi fundamental para ajustar os procedimentos de injeção especialmente na definição do tipo de calda ou argamassa a usar nos diferentes trechos. Isto ficou evidente nas absorções que ocorreram de calda/argamassa das injeções realizadas.

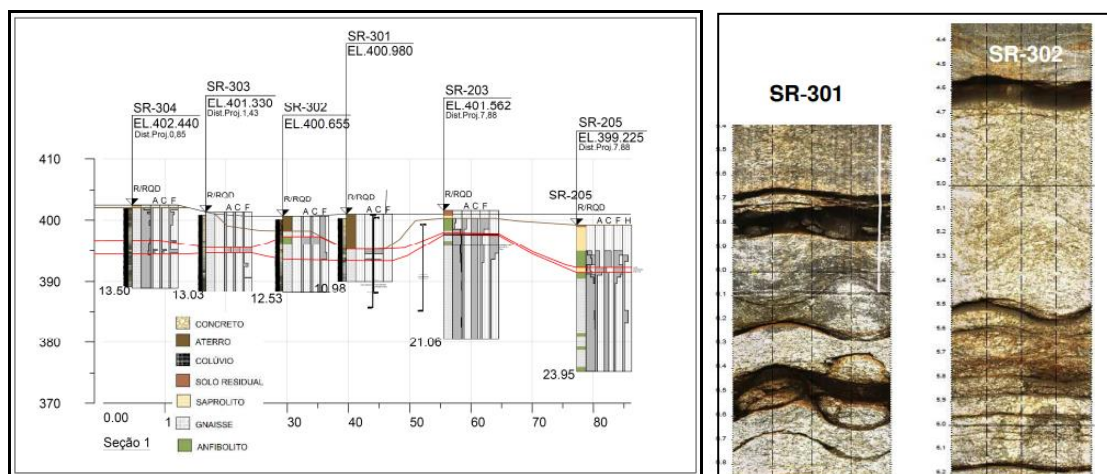


Figura 5. Seção: Junta SH – linha vermelha e vazios revelados no televisionamento dos furos de sondagem.

A campanha de injeções de impermeabilização foi executada entre agosto e novembro de 2021. O objetivo desta injeção foi a redução da permeabilidade do maciço rochoso a partir do preenchimento das fraturas abertas e dos vazios, produto da erosão interna do preenchimento da junta SH ao longo de 11 anos de fluxo de água no seu interior. A campanha foi planejada e executada seguindo o método de espaçamento divisional, processo pelo qual se realizam furos adicionais de injeção, à meia distância de dois furos previamente perfurados e injetados. Desta forma executou-se furos denominados primários, secundários e terciários. O projeto inicial contemplou a execução de 40 furos rotopercussivos primários (600m), 38 furos rotopercussivos secundários (570m), 30 furos rotopercussivos terciários (300m) e 4 sondagens rotativas de verificação (Figura 6).

A sequência executiva das injeções foi de montante para jusante e da direita para esquerda, de modo a ir preenchendo gradualmente os vazios conhecidos situados nas proximidades do barramento e do talude escavado em rocha da galeria de desvio.

As injeções foram iniciadas de forma ascendente, com calda 0,8:1,0 (A/C em peso) e caso a absorção superasse os 200 kg de cimento por metro a calda era engrossada para 0,6:1,0 e a pressão aumentada de 0,25 kg/cm². Se a absorção superasse os 500 kg de cimento por metro e não fosse atingida a pressão de injeção, a calda era novamente engrossada para 0,4:1,0. Caso, ainda assim, não se conseguisse atingir a “nega” após a injeção de mais 500 kg de cimento por metro com a calda mais grossa, a injeção seria suspensa por um período de 8 horas com furo aberto. Caso no reinício das injeções o furo continuasse absorvendo quantidades altas de calda (mais de 1.000 kg de cimento por m) o processo era repetido uma vez mais para dar por finalizado o furo. Para estes casos, eram executados furos adicionais localizados nas adjacências do furo em questão. Em algumas situações quando era constatada perda de água elevada no ensaio de perda d’água, a injeção começava a partir de caldas grossas ou diretamente com o uso de argamassa para o preenchimento de vazios.

A campanha de injeção mostrou resultados de absorções de cimento que mostraram claramente o preenchimento de grandes vazios no interior do maciço rochoso consolidando a vedação do mesmo, sendo que os furos identificados a seguir foram os que apresentaram as maiores absorções - P13 (100 kg/m de cimento), SR-301 (92,3 kg/m), PA1 (191,13 kg/m), SA-02 (4.293,4 kg/m) e o P1 (245 kg/m). Estima-se que o furo SA-02 posicionado no eixo da barragem de concreto tenha interceptado um vazio com volume de 4 m³.

Foram executadas 4 sondagens rotativas de verificação com o propósito de atestar a eficácia das injeções a partir dos resultados dos ensaios de perda d’água e do exame das imagens de televisionamento e testemunhos de sondagens. As informações encontradas confirmaram a qualidade das injeções no preenchimento de fraturas e vazios.

Alguns furos de injeção tiveram comunicação com o reservatório e com o medidor de vazão, por isso a necessidade de fechamento total da malha de injeção para se evitar o retorno do aumento de vazão no medidor de vazão, apesar de ter ficado praticamente nulo neste trabalho.

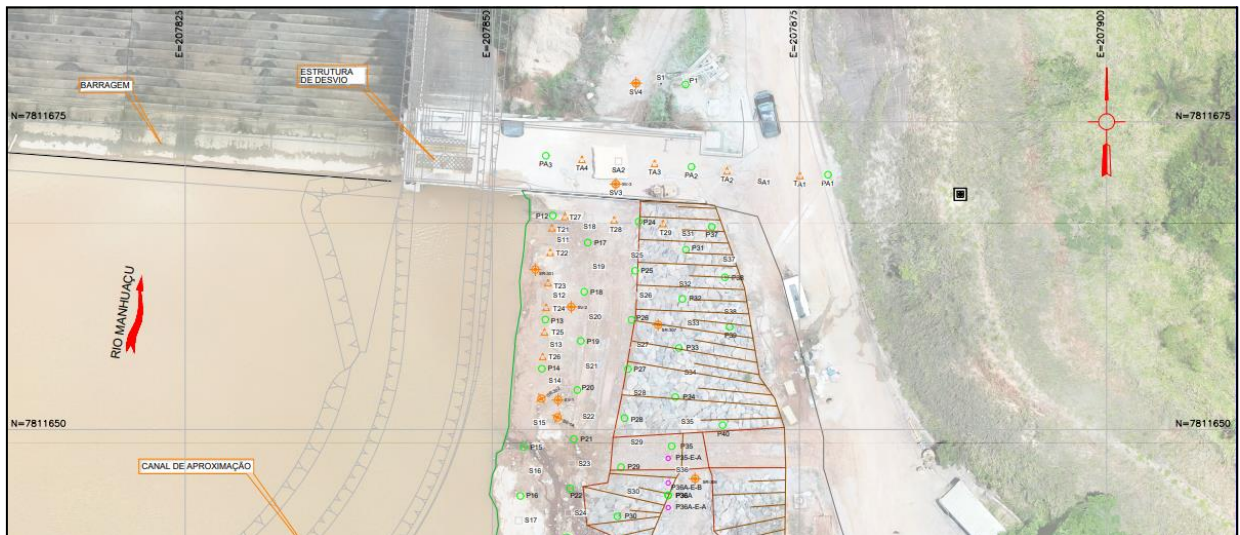


Figura 6. Planta de localização dos furos de injeção, sondagens exploratórias e de verificação.

A Figura 7 ilustra o comportamento de redução da vazão no medidor de vazão de jusante a medida que foram sendo concluídas as etapas dos trabalhos, tendo a vazão reduzida de 14,3 para 0,78 l/s após a conclusão das concretagens e praticamente anulada ao término das injeções.

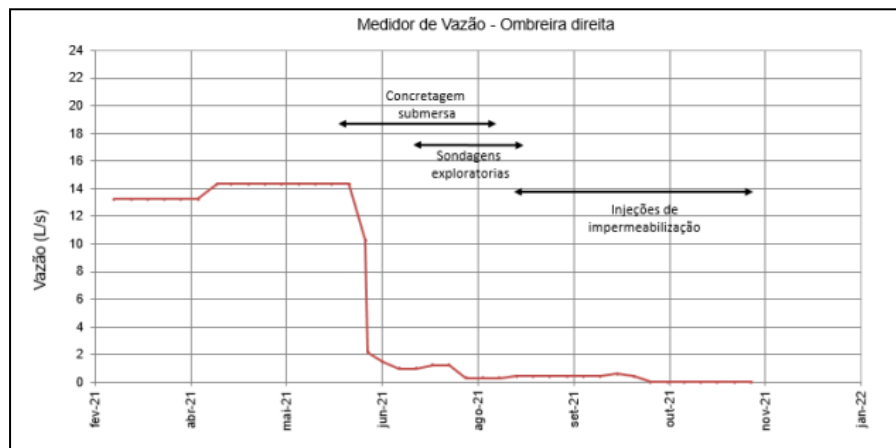


Figura 7. Evolução das medidas no medidor de vazão e etapas de execução dos serviços.

3. CONCLUSÕES

A Figura 7 acima ilustra que o controle das vazões registradas no medidor de vazão e também observadas no afloramento da junta SH no talude direito a jusante da barragem, foi exitoso atingindo quase 100% de redução nas vazões medidas e observadas ao longo da junta SH. O maior efeito para redução dessas vazões ocorreu com a construção dos plugs de concreto submerso onde as vazões passaram de 14,3 l/s para 0,78 l/s. Com isto foi controlado o alto fluxo de água circulante pelo maciço rochoso, responsável pela erosão dos materiais alterados ou inconsistentes presentes, principalmente na feição sub-horizontal que corta o maciço rochoso e que causava a comunicação montante-jusante.

A expressiva redução das vazões que percolavam pelo maciço rochoso, após a conclusão das concretagens submersas, possibilitou a eficácia do processo de injeção posterior, sem o risco de lavagem das caldas injetadas, possibilitando a redução gradativa das vazões medidas para

valores ainda menores. A eficiência no preenchimento dos planos de descontinuidade abertos e dos vazios existentes no subsolo evitou que o processo de erosão interna continue ao longo do tempo. A campanha de injeção do ano de 2021 permitiu o controle total da vazão e a obstrução da maioria dos vazios e fraturas abertas identificadas durante as investigações exploratórias e de injeção, fato este confirmado pelas sondagens de verificação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Cemig GT e a Omega Energia pelo apoio e disponibilidade dos dados e informações que viabilizaram a publicação deste artigo técnico e a empresa projetista Intertechne Consultores S.A. por todo o empenho e competência técnica na condução dos trabalhos que levaram a eficácia dos sistemas de investigação e impermeabilização da ombreira direita da PCH Pipoca.

REFERÊNCIAS

Relatório Interno HPSA-2038-PP-8-GE-G00-00-C-12-RV-0001 – PCH Pipoca – Relatório de Viagem – Setembro de 2020.

Relatório Interno HPSA-2038-PP-8-GE-G00-00-C-12-RT-0001 – PCH Pipoca – Relatório Diagnóstico – Dezembro de 2020.

Relatório Interno HPSA- 2038-PP-8-GE-G00-00-C-12-ET-0001 – PCH Pipoca – Especificação Técnica – Imageamento Subaquático do Maciço Rochoso na Margem Direita – Dezembro de 2020.

Relatório Interno HPSA-2038-PP-6-GE-G00-00-C-12-ET-0002 – Programa de investigações geológico-geotécnicas – Especificação Técnica - Janeiro de 2021.

Relatório Interno HPSA-2038-PP-8-GE-G00-00-C-12-ET-0003 - Programa de injeções de impermeabilização – Especificação Técnica - Fevereiro de 2021.

Relatório Interno HPSA-2038-PP-8-GE-G00-00-C-12-ET-0005 – PCH Pipoca – Programa de Trabalho Integrado – Tratamento da Vedação da Ombreira Direita da Barragem – Fevereiro de 2021.

Relatório Interno HPSA-Serviço de Inspeção por Imageamento Subaquático do Maciço Rochoso da Margem Direita – PCH Pipoca – Venturo Consultoria Ambiental Ltda – Dezembro de 2020.

Relatório Interno HPSA-Relatório Executivo Concretagem Submersa – PCH Pipoca – Valle Rio Negro Engenharia Subaquática – Agosto de 2021.

Relatório Interno HPSA-Data Book Progeo Engenharia Ltda. – Serviços de Investigação, Injeções e Televisionamento de furos – Novembro de 2021.

Relatório Interno HPSA-Relatórios Semanais da Assistência Técnica à Obra (ATO) – Junho a Dezembro de 2021.