

## Adequação estrutural da barragem de geração da PCH Francisco Gros

Arthur Andreetta

Engenheiro de Segurança de Barragens, Statkraft, Florianópolis, Brasil, arthur.andreetta@statkraft.com

Beatriz Vieira

Estagiária de Segurança de Barragens, Statkraft, Florianópolis, Brasil, beatriz.vieira@statkraft.com

Laura Zappellini Sassi

Estagiária de Segurança de Barragens, Statkraft, Florianópolis, Brasil, laura.sassi@statkraft.com

Marcela Jeiss

Gerente de Civil & Dam Safety, Statkraft, Florianópolis, Brasil, marcela.jeiss@statkraft.com

**RESUMO:** A Pequena Central Hidrelétrica Francisco Gros, localizada no rio Itapemirim, município de Alegre, Espírito Santo, é composta por dois barramentos que operam a fio d'água: um de derivação e outro de geração. A barragem de geração, objeto deste trabalho, é constituída por um vertedouro de soleira livre assentado no leito do rio até a ombreira direita e por uma barragem de concreto na margem esquerda. Sua fundação é composta por gnaisses de composição granítica, são e resistentes com ocorrência de juntas de alívio sub-horizontais persistentes próxima a superfície do topo rochoso. A passagem de cheias excepcionais, em janeiro de 2020, provocou a movimentação e arrancamento de blocos de rocha na bacia de dissipação, alterando a condição geométrica da fundação. Ainda, a Revisão Periódica de Segurança identificou que a estrutura não atendia aos critérios de estabilidade e borda livre para a cheia decamilenar. Desse modo, foi implantada solução de engenharia para atender os seguintes objetivos: recuperação e proteção da bacia de dissipação, reforço estrutural para estabilização, monitoramento complementar e garantir borda livre mínima. As adequações executadas consistiram em: laje de concreto com *flip* junto ao pé do vertedouro, atirantamento da estrutura, cinco piezômetros elétricos e mureta de proteção da crista. A obra foi executada em 6 meses, com a usina em operação, durante o período seco. Assim, a barragem de geração atende aos critérios de projeto atuais, bem como apresenta comportamento monitorado e satisfatório durante a passagem de cheias.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estabilidade, Fundação, Monitoramento.

**ABSTRACT:** Francisco Gros Small Hydroelectric Power Station, located on the Itapemirim river, municipality of Alegre, Espírito Santo, is made up of two dams that operate at run-of-river: one diversion dam and other for generation. The generation dam, purpose of this work, consists of a free overflow spillway and a concrete dam on the left bank. Its foundation is composed of sound gneisses and granitic rock mass, with the occurrence of persistent sub-horizontal relief joints close to the surface of the foundation. The exceptional floods in January 2020, caused rock blocks movement in the dissipation basin, changing the geometric condition of the foundation. Furthermore, the Periodic Safety Review identified that the structure did not meet the stability and freeboard criteria for the 10,000-year flood. Therefore, an engineering solution was implemented to meet the following objectives: recovery and protection of the dissipation basin, structural reinforcement to meet minimum stability criteria, complementary monitoring, and minimum freeboard. The rehabilitation and improvement works carried out consisted of concrete slab with flip at the foot of the spillway, anchoring, five electrical piezometers and a wall to protect the dam crest. The civil works was carried out in 6 months during the dry season, with the plant in operation. As a result of the implemented structure, the generation dam meets current design criteria, as well presents monitored and satisfactory behavior during floods.

**KEYWORDS:** Stability, Foundation, Monitoring.

## 1 INTRODUÇÃO

A Pequena Central Hidrelétrica Francisco Gros, pertencente à Statkraft Energias Renováveis S.A. está localizada no município de Alegre, estado do Espírito Santo, na sub-bacia do rio Itapemirim pertencente à bacia hidrográfica do Atlântico Sudeste. A usina foi inaugurada em 2009 e possui 29,00 MW. Este aproveitamento hidrelétrico é composto por dois barramentos, sendo um de derivação e outro de geração.

O barramento de derivação, localizado no rio Braço Norte Esquerdo, desvia parte da água do rio para o reservatório do barramento de geração, no Rio Braço Norte Direito, por meio de um túnel de adução, escavado em maciço rochoso de gnaiss. A confluência destes dois rios forma o rio Itapemirim a montante da casa de força da PCH Francisco Gros. O arranjo geral do empreendimento é apresentado na Figura 1.

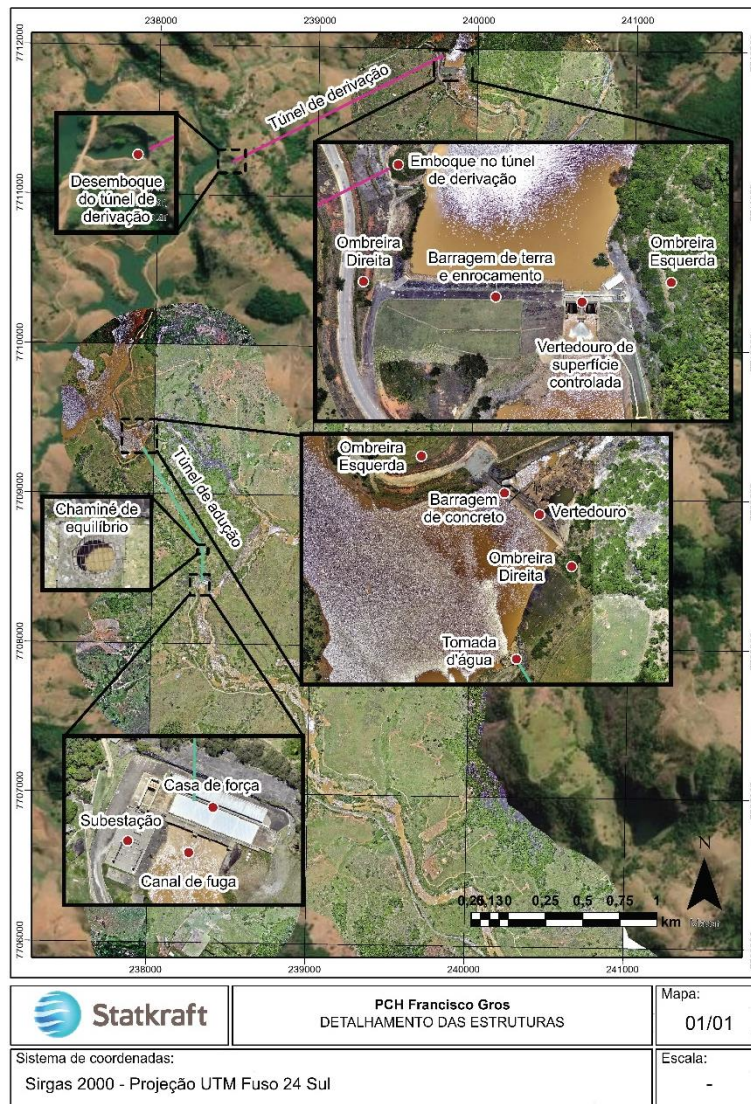


Figura 1. Arranjo geral do aproveitamento.

O arranjo geral do barramento de geração, foco deste trabalho, é constituído por uma barragem de concreto convencional, de 120,60m de comprimento, 6,00m de largura da crista no muro de fechamento esquerdo e 19,00m de altura máxima a partir da fundação no bloco da adufa, com a crista do muro de fechamento esquerdo na El. 200,00m, tendo toda sua fundação em maciço rochoso do tipo gnaiss.

O sistema extravasor da barragem de geração é composto por um vertedouro do tipo soleira livre no leito do rio de 55,00m de comprimento, com a soleira na El. 196,00m. Considerando-se a vazão decamilar instantânea de 952 m<sup>3</sup>/s afluente ao vertedouro, tem-se o NA do reservatório na El. 199,89 m.

Em 2020, as estruturas da PCH Francisco Gros passaram por chuvas excepcionais ocasionadas pelo fenômeno da Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS (INMET, 2020), sendo registrado na barragem de geração a vazão de 576 m<sup>3</sup>/s, correspondente a um período de retorno 100 anos. A passagem da cheia provocou a movimentação e arrancamento de blocos de rocha na bacia de dissipação bem como o depósito de blocos logo a jusante da estrutura.

Posteriormente, durante a Revisão Periódica de Segurança da Barragem, realizada em 2022, para a barragem de geração foi diagnosticado o não atendimento dos fatores de segurança para os casos de carregamento para a cheia decamilar do vertedouro, e ainda que a barragem de concreto não atendia a borda livre mínima a partir da revisão dos estudos hidrológicos, conforme os Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas (Eletróbrás, 2003).

Dessa forma, foi implantada solução de engenharia combinando-se o reforço estrutural para adequação da estrutura do vertedouro frente aos critérios de projetos atuais, proteção do maciço rochoso na bacia de dissipação e alteração do fluxo vertido de maneira a evitar-se a continuidade do processo erosivo junto ao pé do vertedouro. Além disso, a borda livre mínima frente aos critérios de projeto foram atendidas. Assim, a conceituação, definição e execução da solução implantada é o foco deste trabalho.

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA

As investigações da fundação da PCH Francisco Gros na época do projeto básico contaram com a realização de 26 sondagens mistas e rotativas e seus ensaios associados (SPT e ensaios de perda d'água sob pressão) na área de implantação do empreendimento, além de sondagens complementares realizadas após a escavação da fundação na barragem de geração.

A fundação da barragem de geração é caracterizada por um maciço rochoso medianamente fraturado, composto por gnaisse são e resistente, formado por quartzo, feldspato e biotita, com foliação metamórfica (variação da inclinação) e ocorrência de juntas de alívio sub-horizontais, com ao menos duas famílias de fraturas persistentes próximas à superfície do topo rochoso. Predominam fraturas abertas, com paredes planas e oxidadas, algumas com preenchimento milimétrico de argila. A foliação metamórfica que forma as juntas de alívio, quando aberta, em conjunto com as demais fraturas subverticais, leva à formação de blocos de tamanho métrico a centimétrico, que podem ser vistos a jusante. Em função das características da fundação, em projeto básico foi adotada a hipótese da existência de uma junta subhorizontal a 1,0m de profundidade nas análises de estabilidade e os respectivos parâmetros geomecânicos de fundação (Tabela 1).

Tabela 1 – Parâmetros geomecânicos da fundação.

Parâmetro	Valor
Ângulo de atrito concreto/rocha ( $\phi$ )	35°
Coesão concreto/fundação (c)	5,0 tf/m <sup>2</sup>

Como tratamentos de fundação, na época da construção, após a limpeza, foram executadas cortinas de injeção ao longo de todo o eixo do barramento e injeções complementares a montante e a jusante do eixo, de forma a preencher com calda de cimento as aberturas dos planos de descontinuidade do maciço rochoso. Complementarmente, foi executada uma cortina de drenos inclinados para alívio da subpressão na fundação da estrutura, instalados a partir dos degraus do vertedouro, mostrados na Figura 15, com 4m de comprimento em rocha e espaçados a cada 3m, totalizando 14 drenos.

Os resultados dos tratamentos de fundação se mostraram eficientes. Quanto aos drenos, apenas 3 entraram em operação apresentando alívio de subpressão, localizados na esquerda hidráulica próximo ao bloco da adufa (D103) e na direita hidráulica (D112 e D113). O fato de os demais não entrarem em operação indica que, caso haja alguma junta no trecho rochoso perfurado, esta encontra-se selada. Portanto, considera-se que a hipótese de projeto básico de uma junta subhorizontal contínua pela fundação é conservadora.

A ombreira direita é composta por rocha gnáissica sã e aparente, que suporta a barragem vertente. A jusante do vertedouro, na base da ombreira, verifica-se uma falha com abertura centimétrica e alto ângulo de mergulho, inclinada de 60°-70° no sentido da ombreira, que isoladamente não constitui risco geológico-geotécnico ao barramento, mas interage com as descontinuidades horizontalizadas e ajuda a compartimentar o maciço rochoso. Na ombreira esquerda, o fechamento é feito sobre o maciço rochoso, seguido por uma camada de saprolito.



### 3 COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DA FUNDAÇÃO

A operação do vertedouro em períodos de cheia, favorece a desarticulação dos blocos rochosos devido aos impactos gerados na bacia de dissipação causados pela alta velocidade da água vertida. A passagem da cheia excepcional na região do barramento em janeiro de 2020, provocou a erosões e deslocamento de blocos de rocha na bacia de dissipação, com escorregamento da rocha alterada e do solo de cobertura da ombreira direita, transportados a jusante, em função dos quase 2,5m de vertimento sobre a soleira livre, alterando a condição geométrica da fundação. O escorregamento se deu ao longo dos planos de foliação metamórfica do gnaisse, orientados de maneira desfavorável em relação à inclinação da encosta.

As Figura 2 e Figura 3 mostram a condição pós-cheias da região logo a jusante da barragem de geração.



Figura 2. Aspecto da área a jusante com blocos removidos.



Figura 3. Detalhe para horizonte de espessura de rocha removida no pé da barragem.

Embora não tenham sido identificadas fraturas na rocha que gerassem perdas na base da fundação da barragem, conclui-se que o processo erosivo poderia ser agravado pela continuidade das cheias, e, portanto, foi implantada base de proteção, conforme detalhado no item 3 deste artigo.

Já o mapeamento geológico-geotécnico para liberação de fundação da base de proteção da fundação e reforço do vertedouro caracterizou a fundação em rocha sã a pouco alterada (A1/A2), coerente (C1), pouco fraturada (F1) com fraturas fechadas (F), sem preenchimento, forma ondulada, áspera e com duas famílias de fraturas sub-horizontal (SH) e sub-vertical (SV).

No limite entre a direita hidráulica e a ombreira, na interseção entre duas fraturas de direção de mergulho convergente, foi identificada a presença de seixos rochosos indicados na Figura 4, que foram retirados até atingir a rocha sã. A protuberância rochosa remanescente do pós-cheia, observada na Figura 5 no leito do rio, retrata a alta coerência do maciço, o qual foi preservado após tentativa de desmonte para limpeza de fundação. Foi identificada presença de água na porção da direita hidráulica e central, oriunda de microfissuras na estrutura do vertedouro. Na esquerda hidráulica não foram identificados pontos de infiltração nem grandes alterações, conforme Figura 6.

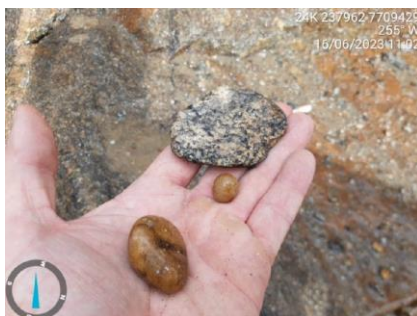


Figura 4. Presença de seixos rochosos.



Figura 5. Protuberância rochosa remanescente.



Figura 6. Esquerda hidráulica sem grandes alterações.

## 4 ATENDIMENTO AOS CRITÉRIOS ATUAIS

As estruturas da barragem de geração foram projetadas para uma TR 1.000 anos e verificadas para à cheia decamilenar, todavia, as adequações realizadas visaram atender a TR 10.000 anos, em atendimento as Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas (Eletrobrás, 2000), que traz tal determinação para estruturas que possuam perigo de danos humanos a jusante.

Como a Zona de Autossalvamento (ZAS) da PCH Francisco Gros apresenta cerca de 1000 pessoas potencialmente impactadas no distrito de Rive, município de Alegre, Espírito Santo, o Dano Potencial Associado (DPA) da usina é considerado alto, conforme a Resolução Normativa nº 1.064 (ANEEL, 2023). Desse modo, as adequações garantem o risco admissível aceitável conforme os critérios atuais.

Ademais, as adequações estruturais permitiram que o fator de segurança ao deslizamento (FSD) para a cheia milenar somada aos esforços sísmicos fossem de 0,92 e 0,88 (considerando o plano de falha sub-horizontal na fundação), para 1,04 e 1,05, respectivamente. Assim como as tensões de fundação passaram a convergir não sendo identificado mais abertura de junta para as simulações da cheia milenar e decamilenar.

Assim, o dimensionamento dos elementos do projeto foram realizados com base nos critérios atuais para atendimento à cheia decamilenar e, ainda que conservadoras, adotadas as premissas do modelo geológico-geotécnico de projeto, descritos nos itens 2 e 3.

### 4.1 Projeto Executivo

O projeto executivo definido para proteção do maciço rochoso na bacia de dissipação, adequação estrutural do vertedouro para a cheia decamilenar e atendimento a borda livre mínima compreende as estruturas demonstradas na figura 7 e figura 8 e descritas na sequência.

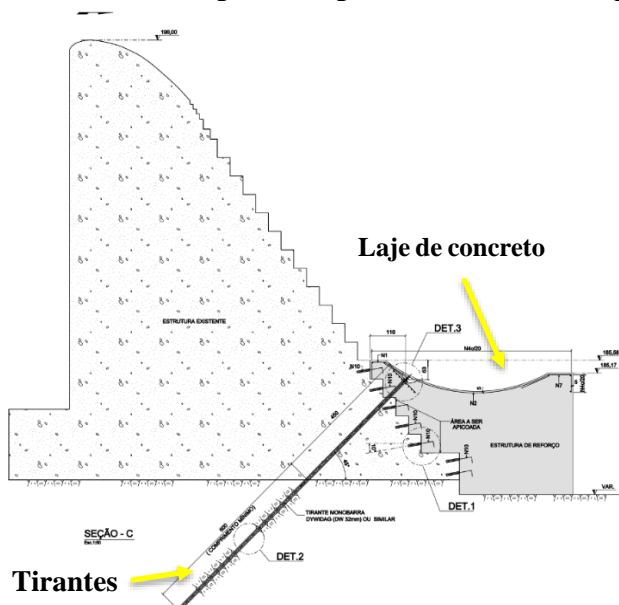


Figura 7. Reforço estrutural – Armadura.



Figura 8. Adequação das estruturas.

Laje de concreto de  $f_{ck}$  de 12 MPa junto ao pé do vertedouro em toda sua extensão de 3,24m de largura e altura variável conforme a fundação com uma média de 2,20m, com uma transição de 0,50m entre a estrutura existente (com sua área apicoada) e o concreto novo de  $f_{ck}$  de 25 MPa com barras de ligação N10 de 0,80m. A laje ainda é constituída por um flip hidráulico em sua superfície de concreto  $f_{ck}$  de 12 MPa.

Tirantes monobarra Dywidag (DW) de 32mm, que adentram na estrutura antiga em um ângulo de 45°, com no mínimo 6m de comprimento ancorados em rocha e aproximadamente 4,5m de trecho livre, espaçados a cada 2,70m, totalizando 16 tirantes.

Remoção blocos de rocha soltos até 30 m a jusante do pé do vertedouro, na área de influência do ressalto hidráulico. Após essa distância entende-se que o fluxo já não interfere na segurança da estrutura.



A cortina de drenos existente foi mantida, prolongando-se os mesmos com saída no *flip*. No entanto, não foi considerada para alívio de subpressões, ou seja, os drenos foram considerados inoperantes.

Com relação ao atendimento da borda livre, o guarda-corpo metálico existente na lateral e a montante na crista da barragem de concreto foi substituído por alvenaria, com altura de 1,10m em toda sua extensão, em atendimento a norma ABNT/NBR 14718, exceto na região da plataforma metálica de operação do stop-log da vazão sanitária, onde a mureta de concreto foi construída com 0,40m de altura, de modo a garantir a borda livre mínima necessária frente aos critérios estabelecidos.

## 4.2 Obra

As obras tiveram início em março de 2023 e foram finalizadas em novembro de 2023, tendo ocorrido durante todo o período seco de modo a garantir a segurança das atividades, havendo o monitoramento hidrológico contínuo por precaução para o caso de vertimentos, principalmente durante o mês de outubro, em que a incidência de chuvas já era mais provável de ocorrer.

As principais atividades realizadas para a proteção e adequações estruturais da bacia de dissipação e do vertedouro foram: (i) remoção e limpeza de blocos de rocha da base da laje até uma extensão de 30 m a jusante do vertedouro (figura 9); (ii) apicoamento da estrutura existente e instalação de barras de ligação entre a estrutura existente e o concreto novo; (iii) concretagem de regularização da fundação; (iv) concretagem da laje e flip (figura 10); (v) perfuração em concreto e rocha dos furos dos tirantes (figura 11); (vi) instalação e acabamento dos tirantes; (vii) instalação de instrumentação nos drenos existentes.

Paralelo as atividades na região do vertedouro, ocorriam as frentes de trabalho para adequação da borda livre da barragem de concreto, sendo: (i) remoção do guarda-corpo metálico; (ii) perfuração e chumbamento de barras de ligação; (iii) execução de armagem; (iv) montagem de formas; e (v) concretagem. As figuras 12 a 14 ilustram as obras finalizadas.



Figura 9. Remoção de blocos de rocha



Figura 10. Concretagem da laje e flip



Figura 11. Perfuração em concreto e rocha para os tirantes



Figura 12. Reforço estrutural do vertedouro



Figura 13. Mureta de proteção para atendimento da borda livre



Figura 14. Cabine de leitura da instrumentação instalada

## 5 MONITORAMENTO

Para a complementação do monitoramento da barragem, além das já realizadas inspeções rotineiras mensais e inspeções de segurança regular anuais, foram instalados cinco piezômetros

elétricos (PZE) de corda vibrante em alguns dos furos dos drenos de fundação existentes, selecionados conforme o comportamento observado, dando a preferência pelos que apresentavam pressão ou água em seu interior.

Todos os piezômetros foram posicionados nas extremidades de fundo dos drenos, com o objetivo de minimizar a probabilidade de instalação dos instrumentos acima do ponto de contato entre concreto e rocha, devido a incertezas relacionadas à elevação dessa região. A seguir, a Figura 15 apresenta a localização dos instrumentos.

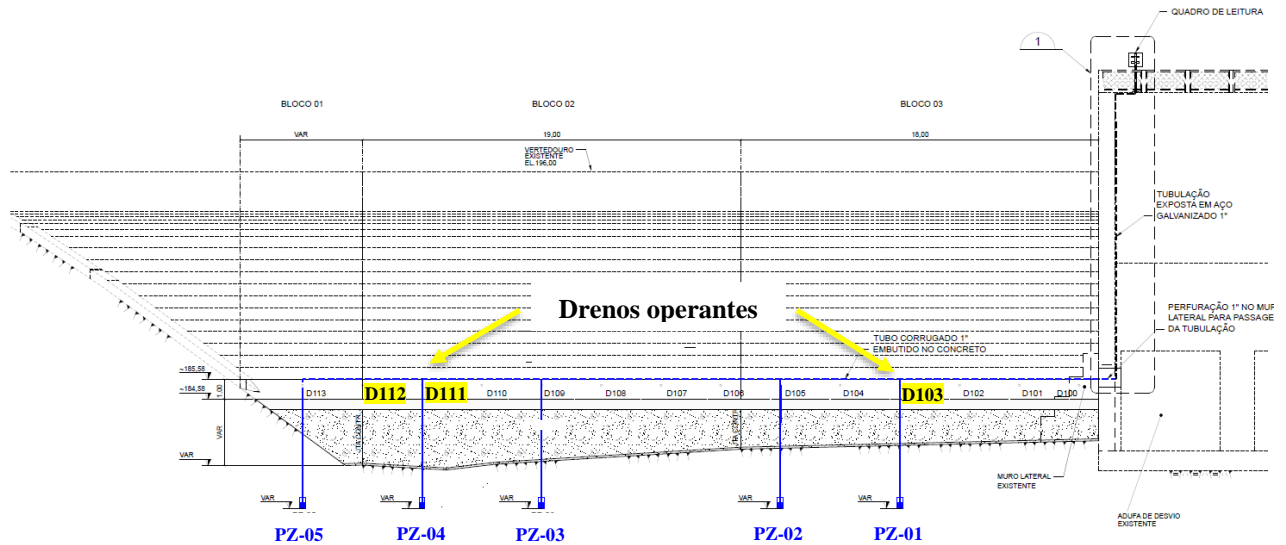


Figura 15. Instrumentação – Vista jusante do vertedouro

Os piezômetros foram lidos com frequência diária durante os primeiros dias após a instalação, com frequência gradualmente reduzida até a leitura mensal. Os resultados obtidos estão apresentados na figura 16 e representam valores abaixo do limite de atenção, este definido com base no diagrama de subpressão para o Caso de Carretamento Normal da estrutura (CCN). O nível do reservatório permaneceu abaixo do nível máximo normal (196,00m) no período analisado, conforme apresentado no gráfico da figura 16.

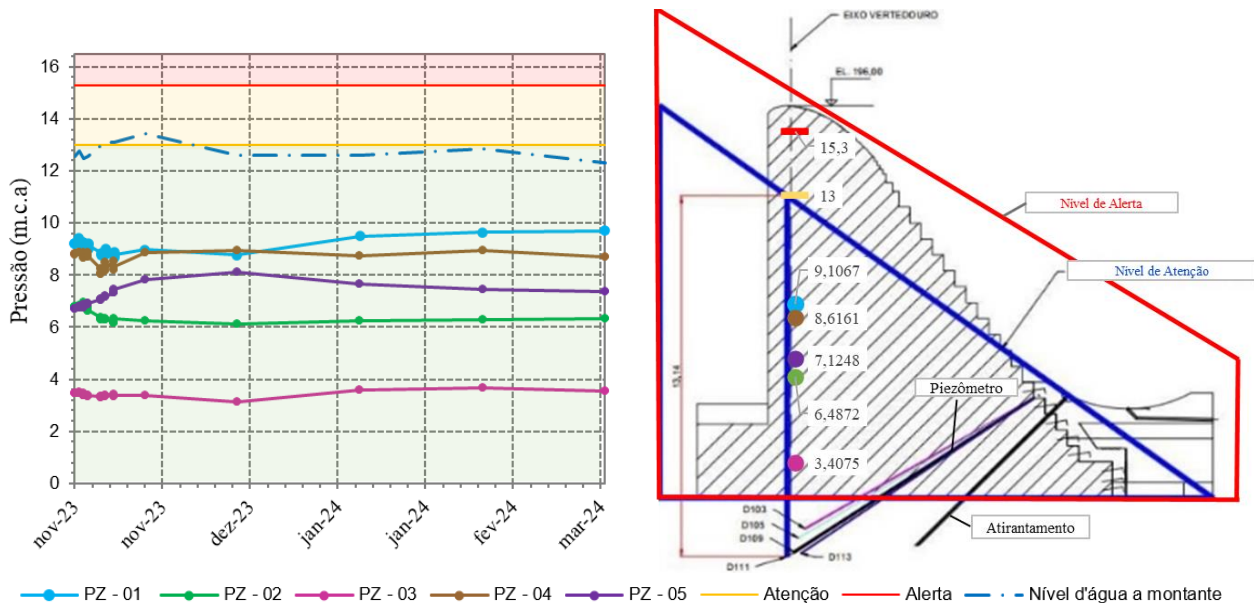


Figura 16. Valores de controle para os piezômetros elétricos

Os piezômetros PZ-01 e PZ-04 foram instalados em drenos com histórico operante de alívio de subpressão (D103 e D111, respectivamente), o que corrobora com os maiores resultados de subpressão obtidos.

O fato dos piezômetros PZ-02, PZ-03 e PZ-05 apresentarem subpressões menores e dos demais drenos não entrarem em operação indica que, caso haja alguma junta no trecho rochoso perfurado, essa se apresenta fechada, ainda, a carga piezométrica predominante na junta é inferior ao diagrama de subpressão levando em conta os drenos.

## 6 CONCLUSÕES

A adequação estrutural da barragem de geração da PCH Francisco Gros garantiu o atendimento aos critérios atuais considerados no Brasil, frente as questões de avaliação da estabilidade da barragem e condições de atendimento de borda livre mínima referentes para as cheias decamilenares.

O topo rochoso da bacia de dissipação e vale a jusante da estrutura agora encontram-se protegidos e reforçados para suportarem cheias excepcionais, vez que a limpeza dos blocos de rocha até a distância do ressalto hidráulico definido e a execução do *flip* sobre a laje de concreto estrutural promove uma alteração do comportamento hidráulico durante os vertimentos, evitando-se a recorrência do arrancamento de novos blocos de rocha da região.

A laje de concreto construída junto ao pé do vertedouro, somada ao atirantamento tanto da estrutura nova quanto da existente, principalmente, garantem as condições de estabilização requeridas para a passagem das cheias excepcionais de projeto da barragem (milénar) e decamilenar que podem vir a incidir sobre a estrutura. Além disso, a estrutura protege o topo rochoso junto ao pé do vertedouro.

O monitoramento complementar que foi adicionado ao barramento, por meio da instalação dos piezômetros elétricos, permite acompanhar o comportamento da estrutura frente a sua operação, principalmente quando da ocorrência de cheias excepcionais, que, por hora, comprovam a teoria das subpressões dentro dos padrões esperados e conforme as características geológico-geotécnicas observadas.

Por fim, a alteração dos guarda-corpos metálicos pela mureta de proteção em concreto garantiu a borda livre mínima necessária no caso da ocorrência de uma cheia decamilenar, impedindo um possível galgamento sobre a barragem de concreto da margem esquerda e dando ainda mais segurança para a estrutura.

Assim, o vale a jusante e sua população estão assegurados, vez que o barramento foi fortificado para um cenário decamilenar, dando ainda mais robustez e confiabilidade para sua operação.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Statkraft Energias Renováveis S.A. por permitir a utilização dos dados e informações aqui apresentadas para a publicação deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (Brasil). Resolução Normativa nº 1.064, de 2 de maio de 2023. – ANEEL, Brasil, 2023.

Centrais Elétricas Brasileiras S.A. - Eletrobrás (Brasil). Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas, 2000 - Eletrobrás, 2000. 458 p

Centrais Elétricas Brasileiras S.A. - Eletrobrás (Brasil). Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas, 2003 - 2ª edição, Eletrobrás, 2003. 279 p

Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. [FORTES CHUVAS ATINGEM OS ESTADOS DO ESPÍRITO SANTO E MINAS GERAIS \(inmet.gov.br\)](https://www.inmet.gov.br), publicado em 30 de janeiro de 2020. Acessado em 12 de abril de 2024.