

DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGEM DE REJEITOS DE MINERAÇÃO NA GRANDE SÃO PAULO: INTEGRAÇÃO ENTRE HIDRÁULICA E GEOTECNIA APLICADA

Lucas Deroide do Nascimento

Engenheiro Civil, Reconverte Planej. Projetos, São Paulo, Brasil, lucas.nascimento@reconverte.com.br

Rodrigo Martins Lucci

Eng. Civil Hidráulico, Reconverte Planej. Projetos, São Paulo, Brasil, rodrigo.lucci@reconverte.com.br

Ana Cristina Akinaga Hatori

Engenheiro Civil, Reconverte Planej. Projetos, São Paulo, Brasil, ana.hatori@reconverte.com.br

José Antonio Gonçalves

Engenheiro Geólogo, Reconverte Planej. Projetos, São Paulo, Brasil, jag@reconverte.com.br

Marco Antonio de Souza Martins

Eng. de Minas, Embu S.A. Engenharia e Comércio, São Paulo, Brasil, mmartins@embusa.com.br

RESUMO: A Barragem BA-4 da Pedreira Juruáçu (Embu S.A.), situada no distrito de Perus (município de São Paulo) está cadastrada no SIGBM (Sistema de Gerenciamento de Barragens de Mineração) com DPA (Dano Potencial Associado) alto, em função das características geométricas da estrutura e da existência de população a jusante. A barragem, com 45 m de altura máxima do maciço e 403 m de comprimento da crista, foi construída pelo método de alteamento a jusante. O projeto de descaracterização foi desenvolvido pela Reconverte Planejamento e Projetos introduzindo o conceito de 'escoamento superficial controlado', a partir da criação de zonas específicas de escoamento na superfície do antigo reservatório, capeado com solos argilosos, impondo uma dinâmica hidráulica que reduziu a velocidade da água, diminuindo, assim, a vazão afluyente ao exutório e possibilitando a manutenção do sistema extravasor existente no barramento. O projeto implantado demonstrou que o conceito de escoamento controlado, associado à construção de estruturas hidráulicas adaptadas às condições geotécnicas do rejeito, foi uma solução eficiente para a descaracterização da barragem. O escoamento controlado permitiu reduzir a velocidade da água e seu potencial erosivo, permitindo a construção de canais com tecnologia, relativamente simples e com materiais de baixo custo. Com a necessidade de imposição da vazão de projeto (TR=10.000 anos), o escoamento superficial controlado propiciou a manutenção da estrutura extravasora existente, evitando obras de redimensionamento da escada hidráulica para que comportasse uma chuva decamilenar.

PALAVRAS-CHAVE: Escoamento controlado, descaracterização de barragem, geotecnia aplicada.

ABSTRACT: The BA-4 dam at Pedreira Juruáçu (Embu S.A.), located in the district of Perus (municipality of São Paulo), is registered in the SIGBM system with a high DPA, due to the geometric characteristics of the structure and the existence of a population downstream. The dam, with a maximum height of 45 m and a crest length of 403 m, was built using the downstream raising method. The de-characterization project was developed by Reconverte Planejamento e Projetos introducing the concept of 'controlled surface runoff', based on the creation of specific runoff zones on the surface of the old reservoir, capped with clay soil, imposing a hydraulic dynamic that reduced the speed of the water, thus reducing the flow to the outlet and making it possible to maintain the existing overflow system in the dam. The implemented project demonstrated that the concept of controlled surface runoff, associated with the construction of hydraulic structures adapted to the geotechnical conditions of the tailings, was an efficient solution for de-characterizing the dam. The controlled runoff made it possible to reduce the speed of the water and, consequently, its erosive potential, allowing the construction of channels with relatively simple technology and low-cost materials. With the need to impose the design flow rate (TR 10,000 years), controlled surface runoff made it possible to maintain the existing overflow structure, avoiding the need to resize the hydraulic ladder to accommodate decamillennial rainfall.

KEYWORDS: Controlled runoff; dam de-characterization, applied geotechnics.

1 INTRODUÇÃO

A Barragem BA-4, construída em 1988 para armazenar rejeitos do beneficiamento de granito, passou por sete alteamentos até alcançar a cota final de 796,10 m em 2016.

A mudança do processo de beneficiamento de úmido para seco e o descomissionamento do reservatório de rejeitos, no primeiro semestre de 2020, determinou o início do projeto de descaracterização da barragem. Em outubro de 2022, a Embu concluiu a etapa final das obras previstas pelo Plano de Metas para descaracterização de BA-4, com o capeamento total da área do reservatório e implantação de canais superficiais e dispositivos hidráulicos.

A descaracterização efetiva de uma estrutura é o resultado de um plano de gestão ambiental que deve reunir as informações técnicas necessárias, desenvolver projetos, implementando ações e metas que permitam atingir às condições de segurança adequadas à reconversão da área para novo uso.

2 PREMISSAS E CRITÉRIOS ADOTADOS

No projeto de descaracterização da Barragem BA-4 foram adotadas práticas e critérios consagrados para seu desenvolvimento.

Para subsidiar as avaliações de estabilidade foram coletadas amostras do rejeito e amostras indeformadas do aterro e da fundação da estrutura. As amostras de rejeito foram ensaiadas na mesma condição de saturação encontrada na barragem, para permitir a avaliação do comportamento atual do material encontrado no reservatório. Foram realizados em cinco amostras do rejeito, retirados em diferentes pontos e profundidades, ensaios de identificação tátil-visual, análise granulométrica, limites de consistência, densidade real, umidade, concentração volumétrica de sólidos, ensaios reológicos em rampa de taxa de cisalhamento, ensaios de cisalhamento direto e teste de rampa inclinada. Em amostras indeformadas (duas do aterro da barragem e quatro amostras indeformadas da fundação) foram realizados ensaios triaxiais do tipo CIU_{SAT} , com medidas de pressão neutra, complementados pela caracterização total das amostras.

O monitoramento de BA-4 consiste em 23 medidores de nível d'água, instalados no maciço e no interior do reservatório, para acompanhamento das variações da linha freática em cinco seções principais de análise.

As análises de estabilidade foram realizadas em termos de tensões efetivas, adequadas para esta fase de longo prazo da estrutura e com a posição do nível freático em uma condição hidrostática estável. As análises foram realizadas através do *software* Slide[®] por três métodos de cálculo, em conformidade com a NBR 13.028/2017. Os referenciais sísmicos utilizados foram aqueles recomendados pela Eletrobrás (2003).

Com relação aos estudos hidrológicos, considerou-se a definição da vazão de projeto para um período de retorno de 10.000 anos, para atender aos critérios de segurança hidráulica da ANM no processo de descaracterização da estrutura.

O sistema de drenagem superficial, fundamentado sob o conceito de escoamento superficial controlado, foi projetado para receber as águas precipitadas, direcioná-las a zonas distintas de escoamento e conduzi-las pelos canais de drenagem até o curso d'água natural, fora das dependências do empreendimento. Para isso, o sistema foi definido de forma que transformasse a precipitação de projeto de TR=10.000 anos em vazão compatível com a capacidade de descarga da escada hidráulica existente, o que minimizou significativamente o custo das obras hidráulicas de descaracterização. O desenvolvimento dos estudos para a concepção do sistema compreendeu a seguinte sequência de elaboração: verificação da capacidade de descarga da escada hidráulica existente, pré-dimensionamento dos canais, definição da geometria e cálculos para a transição do canal trapezoidal para o canal retangular, dimensionamento dos canais com modelagem bidimensional e configuração das zonas de escoamento diferenciado.

3 PROJETOS

3.1 Descaracterização da Estrutura

A etapa inicial do projeto de descaracterização, a rigor, teve início em 2020 com o descomissionamento do reservatório, quando o processo de beneficiamento foi alterado, eliminando todos os produtos que dependiam de água para produção, cessando o lançamento de polpa de rejeitos no reservatório. A premissa conceitual para a descaracterização foi a reintegração da estrutura do barramento e da área do reservatório à

morfologia do entorno antropomorfizado, sem prejuízos ao meio ambiente, garantindo sua estabilidade, proporcionando segurança à população a jusante, além de viabilizar uma futura utilização da área do antigo reservatório.

Como intervenções na dinâmica das águas pluviais foram implantados desvios na região da cava de Juruagu, ocasionando a redução drástica do afluxo das águas da área de contribuição e das descargas de águas superficiais no antigo reservatório. O reservatório recebeu, então, uma camada de aproximadamente 1,5 m de solo argiloso, como um paramento limitante à infiltração das águas pluviais que incidem diretamente sobre a superfície.

A concepção do sistema de escoamento superficial se baseou na estratégia de não promover alteração no sistema extravasor, mesmo considerando-se uma chuva decamilenar. Essa premissa norteou os estudos para a avaliação da possibilidade de se trabalhar com dispositivos de retardo para o tempo de permanência das águas afluentes à área do reservatório, até o lançamento no vertedouro do barramento. Dessa forma, a dinâmica do escoamento superficial foi projetada para captar as águas de uma precipitação de TR=10.000 anos e encaminhá-las para o exutório, promovendo um trânsito hidráulico tal, que cuja vazão fosse compatível com a capacidade de descarga da escada hidráulica existente e, também, não alterasse o volume de escoamento atual dos canais naturais a jusante, cujas margens encontram-se ocupadas por moradias das comunidades do entorno.

O sistema de escoamento superficial consistiu, basicamente, na subdivisão da área do reservatório em três áreas com dinâmicas hídricas distintas para o escoamento das águas superficiais (*runoff*), denominadas ZEC, ZED e ZEL (Figura 1).

A Zona de Escoamento Direcionado (ZED), com inclinação média de 0,1%, tem o objetivo de receber e direcionar as águas precipitadas nesta região para um setor afastado do barramento, denominado ZEL.

A Zona de Escoamento Lento (ZEL), tem capacidade de receber as águas da ZED e direcioná-las para o canal trapezoidal construído no perímetro do reservatório. A ZEL, capacitada pra reter temporariamente a precipitação recebida da ZED, tem seu ponto mais baixo coincidente com a entrada do canal trapezoidal na ZEC, não gerando, assim, nenhuma reservação de água.

A Zona de Escoamento do Canal (ZEC) é a área perimetral da lateral direita do reservatório e contém o canal periférico que a margeia. A ZEC tem função de transportar as águas precipitadas diretamente para o canal.



Figura 1- Áreas de dinâmica de escoamento superficial e direcionamento das águas pluviais.

Os dispositivos hidráulicos do canal periférico da ZEC foram divididos em três setores com geometrias diferentes. O trecho inicial, que recebe as águas da ZEL, tem geometria trapezoidal e é revestido por geocélulas, até o canal de transição que ‘ordena’ o fluxo até o com o canal retangular de concreto armado que, por sua vez, direciona para a escada hidráulica.

3.2 Geotecnia aplicada

3.2.1 Parâmetros dos Materiais

Os parâmetros de resistência adotados para os materiais mais representativos nas análises de segurança da estrutura (solos do aterro do maciço e da fundação) foram baseados em ensaios laboratoriais disponíveis. Os materiais que não possuem ensaio específico foram correlacionados em referências bibliográficas e valores de NSPT apresentados nas sondagens executadas durante a vida da estrutura. Os parâmetros foram divididos principalmente em três diferentes materiais, sendo eles: aterro, fundação e rejeito.

O aterro do barramento é composto por materiais, predominantemente, constituídos por argila arenosa ou argila silto-arenosa e silte argilo-arenoso, de consistência média a dura. O NSPT médio é de 15 golpes, chegando até 37 golpes em maiores profundidades. Após análise dos resultados dos ensaios triaxiais do tipo CIUSat adensado rápido, foram adotados os parâmetros geotécnicos efetivos apresentados na Tabela 1.

A fundação, de acordo com as sondagens realizadas, está praticamente apoiada em solo residual constituído por silte arenoso. As sondagens indicam que o solo residual tem NSPT médio de 23 golpes, chegando até o impenetrável em maiores profundidades. Após análise dos resultados dos ensaios triaxiais do tipo CIUSat adensado rápido, foram adotados os parâmetros geotécnicos efetivos apresentados na Tabela 1.

Nas sondagens realizadas antes do início do processo de descaracterização, o rejeito, composto por camadas constituídas de areia fina e média, intercaladas por camadas de silte argiloso ou arenoso, apresentava N_{SPT} médio de 5 golpes e, nas camadas mais superficiais, N_{SPT} de 1 ou 2 golpes. O rejeito amostrado em diferentes pontos e profundidades foi submetido a ensaios de cisalhamento e, após análise dos resultados, foram adotados os parâmetros geotécnicos apresentados na Tabela 1. Por se tratar de um material areno-siltoso com umidade superior a 20%, a mudança da velocidade do ensaio de cisalhamento não alterou a resistência, comprovando que os transientes de excesso de poropressões (ou mesmo os transientes de alteração de sucção) do ensaio se dissiparam muito rápido, como era de se esperar. Dentro destas condições, a não saturação não interfere na resistência ao cisalhamento.

Tabela 1 - Parâmetros geotécnicos adotados para o aterro compactado, fundação e rejeito.

Material	C' (kPa)	Φ' (o)
Aterro compactado	11	32
Fundação BA-4	33	29
Rejeito BA-4	23	24

3.2.2 Análise de Estabilidade

As análises de estabilidade foram realizadas através da consolidação de todos os dados existentes ao longo da vida útil do barramento. Foram desenvolvidas com o programa Slide 8.0[®] e os fatores de segurança foram calculados pelo método do Equilíbrio Limite, utilizando-se três métodos de cálculo: Morgenstern-Price, Bishop Modificado e Spencer, considerados rigorosos para superfícies de ruptura circulares, fundamentados pelo critério de resistência de Mohr-Coulomb.

Para a realização das análises de estabilidade foram confrontados os principais aspectos determinantes: a geometria (seção transversal) da barragem, os parâmetros geotécnicos adotados para os materiais e os níveis piezométricos atuantes nos cálculos. Os resultados das análises de estabilidade global para as cinco seções (Figura 2), adotando-se a última leitura do N.A. e com os valores de parâmetros supracitados, estão indicados resumidamente na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultado da análise de estabilidade global para a Barragem BA-4.

Seção	Método		
	Morgenstern-Price	Bishop Modificado	Spencer
A-A'	2,30	2,30	2,30
B-B'	2,28	2,29	2,28
B-B' - taludes berma pré carga	1,72	1,73	1,72
C-C'	2,23	2,24	2,23
D-D'	2,35	2,35	2,35
E-E'	2,29	2,29	2,30

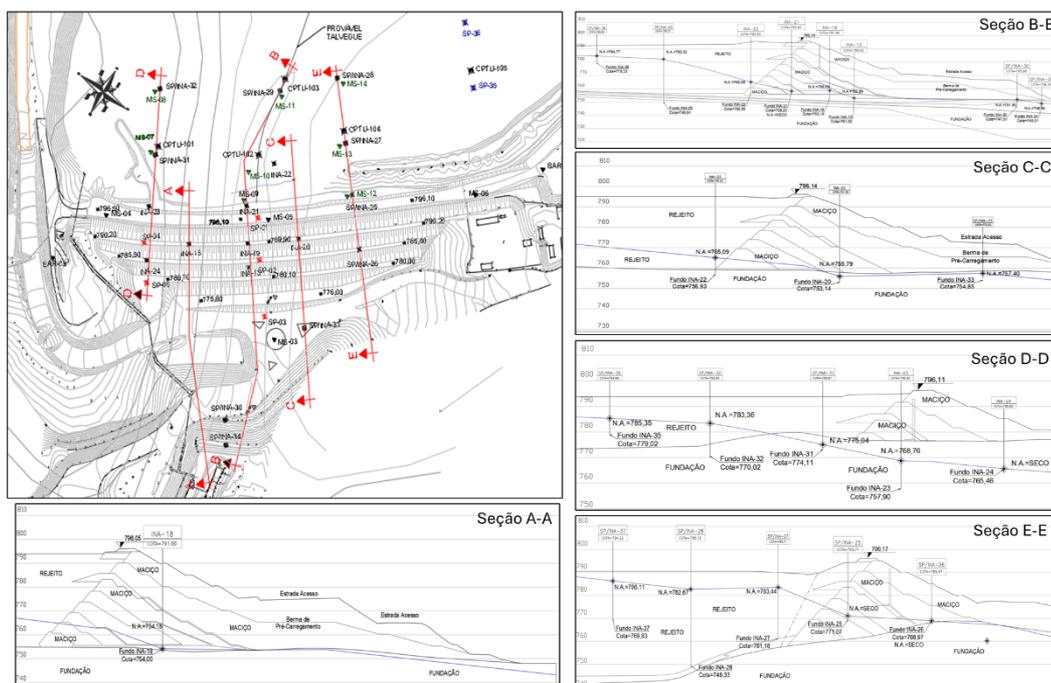


Figura 2 – Planta e Seções de Análise.

Observou-se que a superfície crítica de ruptura se desenvolve integralmente no maciço do 7º Alçamento, não sendo influenciada pelo nível d'água que se encontra profundo e estável no contato maciço/fundação da barragem, com tendência de rebaixamento na região do reservatório capeado. O fator de segurança (FS) atende ao fator mínimo de segurança prescrito pela NBR 13.028:2017, para condição normal de operação ($FS > 1,50$). Os fatores de segurança são elevados e representam robustez na segurança geotécnica, na geometria e nos materiais empregados na construção da estrutura.

Em complemento, realizou-se uma análise utilizando a recomendação de Eletrobrás (2003) com a avaliação das condições da estrutura, face a sismos naturais ou induzidos, utilizando análise pseudoestática, adotando cargas sísmicas correspondentes a acelerações de 0,050 g na direção horizontal e 0,030 g na direção vertical. A Tabela 3 ilustra os fatores de segurança obtidos.

Tabela 3 - Resultado da análise de estabilidade global (sismo Eletrobrás).

Seção	Método		
	Morgenstern-Price	Bishop Modificado	Spencer
B-B'	1,99	2,00	2,00

3.3 Estudos Hidrológicos

O objetivo deste estudo foi o de definir a chuva de projeto para o período de recorrência igual a 10.000 anos e, assim, aplicar sobre a área de estudo modelada com malha computacional bidimensional, definindo as vazões para o escoamento superficial.

A Barragem BA-4, situada no município de São Paulo, encontra-se na bacia do Córrego Andado, na cabeceira do Ribeirão Perus. As chuvas de projeto desse estudo foram determinadas a partir de medições pluviométricas nas proximidades da região da Pedreira Juruagu. Optou-se por uma análise local estatística para o conhecimento da magnitude dos eventos que podem ocorrer com uma determinada frequência. O período de retorno (tempo de recorrência) de um evento é entendido como o tempo médio (em anos) em que esse evento é superado ou igualado pelo menos uma vez. É definido como:

$$T = 1/F \quad (1)$$

Onde,

T = período de retorno, em anos;
 F = frequência de um evento hidrológico.

Os dados hidrológicos apresentam variações sazonais que podem ser irregulares e onde ocorrem extremos e diferentes sequências de valores que caracterizam as variáveis como aleatórias. Assim, variáveis hidrológicas estarão sempre associadas a uma probabilidade de ocorrência e técnicas estatísticas, aplicadas para avaliar a ocorrência de fenômenos hidrológicos com determinada magnitude. Trata-se de uma estimativa de risco ou de probabilidade de ocorrência.

As distribuições de probabilidades notáveis que usualmente se adaptam aos extremos na hidrologia e usadas neste estudo são: Normal, Log Normal, Gumbel, Gama e Log Pearson. Com a distribuição probabilística selecionada, conseguiu-se a correlação entre as chuvas diárias e suas recorrências. Comparando-se os resultados obtidos da análise estatística para as distribuições probabilísticas que apresentaram as melhores aderências aos valores observados (Gumbel, Log Normal e Normal), escolheu-se a distribuição Gumbel, pois foi a que apresentou as menores diferenças quadráticas e, também, valores para períodos de retorno maiores com maior proximidade aos valores de campo.

Nas simulações hidrológicas as precipitações finais adotadas para a área da Pedreira Juruaçu, são as apresentadas na Tabela 4 para os períodos de retorno de 100 e 10.000 anos.

Tabela 4 - Chuvas de Projeto Finais para o Posto Perus.

TR (anos)	Chuva de Projeto (mm)
100	158,5
10.000	256,9

A modelação hidrológica foi realizada por meio do *software* de previsão de vazões HEC-HMS (Hydrologic Modelling System) desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers).

O modelo hidrológico adotado foi National Resource Conservation Service (NRSC) que considera o método de perdas por infiltração com a determinação do CN (*Curve Number*) para todas as sub-bacias da área de estudo, calcula qual parte da chuva gera o escoamento superficial. Na área de projeto (ver Figura 3) não foi considerada a infiltração no solo e sim o escoamento da chuva total sobre a área de contribuição.

O percurso das águas referente ao restante da área do empreendimento direciona as águas para a propriedade vizinha, denominada de TELC, retornando ao percurso natural que existia antes do início da cava (Figura 3). A área em azul é a contribuição interna do reservatório, as demais estão direcionadas à área vizinha.

As áreas de contribuição foram consideradas de acordo com a concepção do sistema de drenagem. Conforme a Figura 4, as áreas foram assim definidas:

- *Zona de Escoamento Direcionado (ZED)*: ocupa cerca de 53% da área do antigo reservatório, a água da chuva escoar em uma superfície com declividade de 0,1% e é direcionada à Zona de Escoamento Lento;
- *Zona de Escoamento Lento (ZEL)*: área do antigo reservatório, localizada na parte mais distal do barramento, ocupa uma área em torno de 19%, é responsável pelo recebimento das águas pluviais, incidentes sobre a área do reservatório e em áreas adjacentes ao empreendimento, as quais são conduzidas pelo Canal Periférico pertencente a ZEC.
- *Zona de Escoamento do Canal (ZEC)*: ocupando cerca de 28% da área do reservatório original, escoar as águas de chuvas pelo Canal Periférico (de fundo e lateral) até o sistema extravasador;
- *Áreas Adjacentes*: compostas pelas áreas externas à Barragem BA-4.

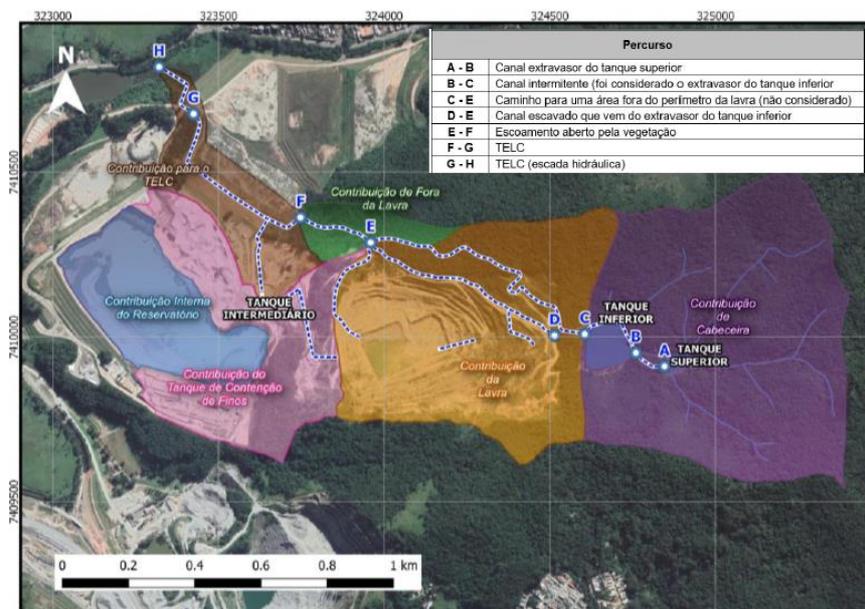


Figura 3 – Percurso das águas direcionadas para TELC. (Adapt. Google Earth, Maxar Technologies, 2019).

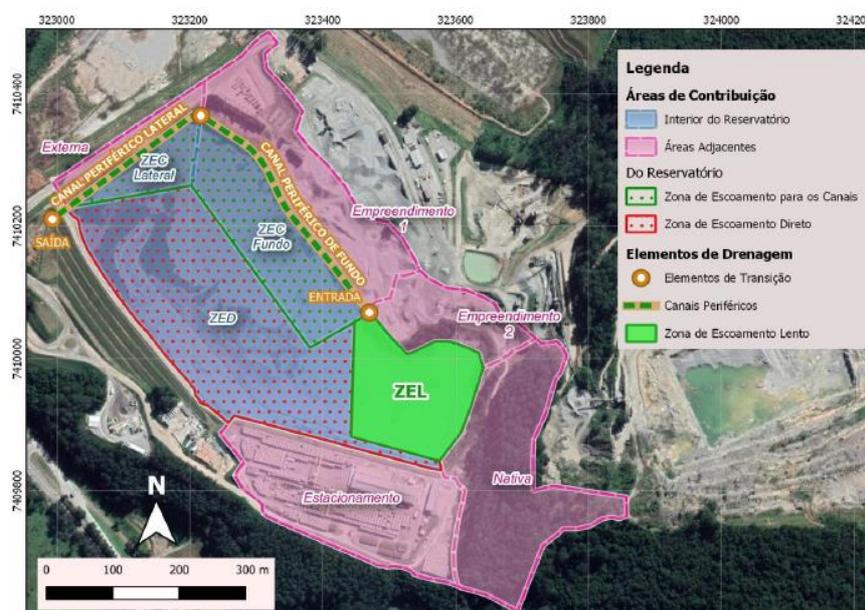


Figura 4 - Áreas de contribuição consideradas. (Adapt. Google Earth, imagem Maxar Technologies, 2019).

3.4 Estudos Hidráulicos

A elaboração desse estudo teve como objetivo dimensionar o sistema de drenagem superficial, de forma que as vazões geradas fossem compatíveis com a capacidade de descarga da escada hidráulica existente. O dimensionamento foi elaborado conforme apresentado nos itens subsequentes.

3.4.1 Verificação da Capacidade da Descarga da Escada Hidráulica Existente

A capacidade de descarga da escada hidráulica existente foi verificada para a vazão do vertedor Poço 1 que é de 5 m³/s e para uma vazão 20% acima, 6,0 m³/s. A transição entre o fluxo *nappe flow* e *skimming flow* está relacionada à vazão e, de forma geral, com a geometria dos degraus.

Com o levantamento de campo foram identificados seis lances da escada hidráulica existente, com diferentes configurações de degraus, para os quais foram verificados os tipos de escoamentos. Com relação aos muros laterais da escada hidráulica existente, que apresenta uma altura de 1,2 m, se fez necessário a verificação da altura do escoamento bifásico gerado no regime *skimming flow*. Este constatou que comporta

o escoamento para as vazões de 4,5 e 5 m³/s, porém, pode transportar até 9 m³/s, sem que ocorra o transbordamento pelos muros laterais.

3.4.2 Pré-dimensionamento dos Canais

O pré-dimensionamento dos canais teve como premissa a vazão máxima equivalente à capacidade de descarga da escada hidráulica existente igual a 5 m³/s. Desta forma, o sistema de drenagem não transportará para as estruturas hidráulicas existentes, a jusante da barragem, vazões superiores para a quais estas foram projetadas.

3.4.3 Dimensionamento da Transição do Canal Trapezoidal para o Canal Retangular

O dimensionamento da transição tem como objetivo definir o comprimento da mudança de seção para não ocorrer grandes diferenças de NA entre as seções e evitar turbulência no escoamento. A transição foi dimensionada segundo (Chow, 1959), com um comprimento total de 34 m, para as características das seções de montante e de jusante, trapezoidal com a largura da superfície da água igual 17,35 m e a seção retangular igual a 2 m.

3.4.4 Dimensionamento dos Canais com Modelagem Bidimensional

Após o pré-dimensionamento dos canais, o sistema de canais e as zonas de escoamento foram dimensionadas por meio de modelagem hidrodinâmica bidimensional rain-on-grid ou seja chuva sobre a rede, para a definição das dimensões do sistema de drenagem. A condição de contorno utilizada foi a precipitação referente à chuva excedente, calculada nos estudos hidrológicos atualizados.

O Modelo Digital de Terreno representa o projeto das zonas de escoamento e demais áreas de contribuição adjacentes. O resultado da modelagem bidimensional indica que a vazão na saída do sistema de drenagem é de 5,14 m³/s, inferior à capacidade de escoamento da escada hidráulica, que pode transportar até 9 m³/s sem a ocorrência de transbordamento pelos muros laterais. Como o sistema de drenagem implantado seguiu, rigorosamente, o projeto de descaracterização da barragem, o objetivo de não alterar as vazões efluentes foi alcançado e, assim, não há impactos hidrográficos previstos, atendendo, também, ao objetivo de transformar a precipitação de TR=10.000 anos em vazões compatíveis com a capacidade de descarga da escada hidráulica existente, o que evitou intervenções de grande porte no barramento, minimizando eventuais riscos, acelerando o cronograma de implantação e diminuindo significativamente o custo das obras de descaracterização.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A descaracterização de BA-4 apresentou como inovação a introdução do conceito de escoamento superficial controlado. A setorização do escoamento superficial permitiu subdividir a área impermeabilizada do reservatório em sucessivas zonas de retardo, obrigando ao escoamento superficial seu direcionamento a um canal periférico. Essa solução permitiu a manutenção do vertedouro, escadas hidráulicas e dos equipamentos hidráulicos existentes, mesmo impondo-se a vazão da TR=10.000 anos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem, especialmente, a Leonardo Motta e Márcio Gonçales pela extrema competência com que efetivaram os trabalhos de implantação do projeto e, extensivamente, a todos os profissionais das duas equipes técnicas que souberam conduzir com harmonia as atividades de projetos e obras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHOW, V. T. (1959) *Open Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill.

ELETOBRAS (2003) *Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas* - Comitê Brasileiro de Barragens-CBDB/CIGB/ICOLD