

Estudo de caso: proposta de metodologia para elaboração de carta de risco para barragem de concreto na mineração

Case study: proposed methodology for drawing up a risk chart for concrete dams in mining

Danton Silva, Eva Cardoso, Talyta Melo & Luana Pereira
Geotechnical Engineer, TPF Engenharia, Brazil, danton.silva@tpfe.com.br

Bruno D'Angelo & Vanessa Thums
Geotechnical Engineer, Vale S.A., Brazil

RESUMO: A gestão de risco em estruturas civis, tais como barragens, visa conhecer e gerenciar seus riscos associados, atender as legislações e as boas práticas ambientais, sociais e de governança (ESG). Para avaliar o desempenho da barragem é necessário desenvolver métricas de comparação dos dados obtidos in situ. Diante disso, o presente trabalho busca propor uma metodologia para elaboração da carta de risco de uma barragem de concreto. Foram propostos critérios para a definição dos níveis de controle, atenção, alerta e emergência, com base no histórico de monitoramento. Estes níveis foram estabelecidos para a régua do reservatório e para dois piezômetros instalados no contato da estrutura com a sua fundação, sendo que um destes instrumentos apresenta artesianismo. A metodologia proposta consistiu em realizar as verificações de segurança conforme critérios estabelecidos pela Eletrobrás (2003), variando os fatores de redução da coesão e do ângulo de atrito conforme valores apresentados para diferentes condições de carregamento e confiabilidade acerca dos parâmetros de resistência. Por fim, obtém-se com a definição dos níveis de controle uma ferramenta de avaliação de performance da barragem, visando nortear tomadas de decisão frente a situações possam acontecer na estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de concreto; carta de risco; níveis de controle; instrumentação.

ABSTRACT: In civil structures such as dams risk management aims to understand, manage their associated risks, to complying with legislation that requires this management and complying with good environmental, social and governance (ESG) practices. To assess the dam's performance, it is necessary to develop metrics for comparing the data obtained in situ. Therefore, this paper aims to present a proposed methodology for drawing up a risk chart for a concrete dam. Criteria were therefore proposed to define the levels of control, attention, alert, and emergency, based on the monitoring history. These levels were established both for the reservoir's ruler and for two piezometers installed at the contact between the structure and its foundation, one of these instruments exhibits artesian conditions. The proposed methodology consisted of performing safety checks according to criteria established by Eletrobrás (2003), varying the cohesion and friction angle reduction factors according to the values presented for different loading conditions and the reliability of the resistance parameters. Finally, with the definition of control levels, a tool for evaluating the performance of the dam is obtained, aiming to guide any decision-making in the event of dangerous situations occurring in the structure.

KEYWORDS: Concrete dam; risk chart; control levels; instrumentation.

1 INTRODUÇÃO

A prevenção de acidentes e gestão dos riscos associados em estruturas civis inicia desde a concepção do projeto e finaliza apenas na desativação/descharacterização. Enquanto as estruturas estão em operação e para além das inspeções visuais que devem ser realizadas periodicamente, um importante elemento para monitoramento contínuo da estrutura são os instrumentos presentes nas estruturas e, no caso, em barragens de concreto, a fim de avaliar a estabilidade da estrutura.

Na verificação à segurança física das barragens de concreto, a Eletrobrás (2003), a ABNT NBR 13.028/2017 e a US Army Corps of Engineers (1995), por exemplo, estabelecem diversos critérios para a segurança da estrutura, considerando estabilidade quanto à flutuação, tombamento, deslizamento, área mínima comprimida na base da estrutura, entre outros.

Veloso (2007), na proposta de elaboração de uma carta de risco para barragem de concreto, define três níveis de controle a partir

de análises numéricas de fluxo e colmatagem progressiva de drenos: um nível de atenção normal onde a subpressão obtida no modelo estão dentro do previsto para o cenário de condição normal, um nível de alerta quando o mesmo é superado e um nível de emergência quando é alcançado a condição de carregamento limite.

Nunes *et al.* (2023), ao definir níveis de controle para piezômetros e indicadores de nível de água em uma barragem de rejeito, estabelecem que os instrumentos podem estar em um destes quatro níveis: nível normal (verde), nível de atenção (amarelo), nível de alerta (laranja) e nível de emergência (vermelho).

Deste modo, o presente trabalho propõe a definição de níveis de controle de instrumentação (régua do reservatório e piezômetros) baseado nos critérios estabelecidos pela Eletrobrás (2003) para uma barragem de concreto de altura de, aproximadamente 9 m, localizada na região do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil).

2 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O objeto de estudo deste estudo é uma barragem de concreto, a qual foi construída na década de 1970, na região do quadrilátero ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Possui a finalidade de armazenamento e captação de água para operação da planta de beneficiamento de minério de ferro. Possui altura de, aproximadamente, 9 m e está assente em um maciço rochoso caracterizado como quartzítico sendo medianamente fraturado e consistente, possuindo ainda algumas lentes de sericita em seu interior.

Para avaliação da estabilidade foi considerado parâmetros de resistência conforme dados de literatura para materiais similares e histórico de avaliações da estrutura. Foi empregado valores de coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ') de 50 kPa e 35°, respectivamente, para o contato concreto-rocha; e peso específico obtido para o material da barragem de 22,67 kN/m³, conforme ensaios realizados *in situ*. Ademais, foi realizada a instalação de uma linha de tirantes na crista da barragem, espaçadas a cada 1,5 m na região do extravasor e 3,0 m nas ombreiras, a fim de melhorar a condição de estabilidade da estrutura, conforme é mostrado na Figura 1 a seção longitudinal da estrutura.

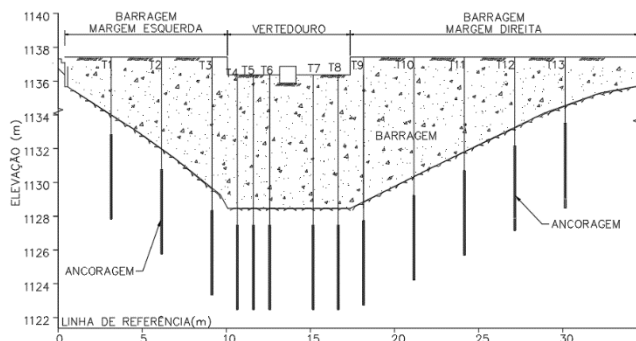


Figura 1. Seção longitudinal atual da barragem.

3 METODOLOGIA PARA ELABORAÇÃO DA CARTA DE RISCO

3.1 Verificações de estabilidade e forças atuantes

Conforme exposto pela Eletrobrás (2003) as verificações à flutuação, ao tombamento, ao deslizamento e às tensões na fundação e no concreto devem ser atendidas para atestar a estabilidade de uma barragem de concreto. Estas análises permitem soluções numéricas, no entanto, no presente estudo foi considerado as soluções analíticas sugeridas pela Eletrobrás (2003).

Para tanto considerou-se os seguintes carregamentos na estrutura, sendo detalhados um a um nos subitens que se seguem:

- Peso próprio da estrutura;
- Empuxo de água e do assoreamento;
- Subpressão hidrostática;
- Carga de tirantes;
- Forças sísmicas;
- Pressões hidrodinâmicas devido ao sismo.

Definiu-se ainda a coesão e o ângulo de atrito do contato concreto-rocha como 50 kPa e 35°, respectivamente, a partir de valores obtidos de literatura. Não foram disponibilizados resultados de

ensaios na fundação. Da estrutura de concreto foram extraídas duas amostras e conduzidos 6 ensaios de densidade e de ruptura a compressão simples, apontando um peso específico do concreto de 22,67 kN/m³ e resistência característica (f_{ck}) de 22,1 MPa.

3.1.1 Peso próprio

A seção do extravasor foi dividida em seção principal e bloco dissipador, sendo este último utilizado apenas na verificação ao deslizamento por ser a única análise em que a consideração do bloco dissipador torna a verificação mais conservadora.

A seção principal da seção extravasor (Figura 2a) é definida como a soma das áreas 1 a 4 (23 m²) e o bloco dissipador é caracterizado pela área 5 (2,43 m²). A área da seção ombreira (18,67 m²) é obtida da soma das áreas 1 a 7 da Figura 2b.

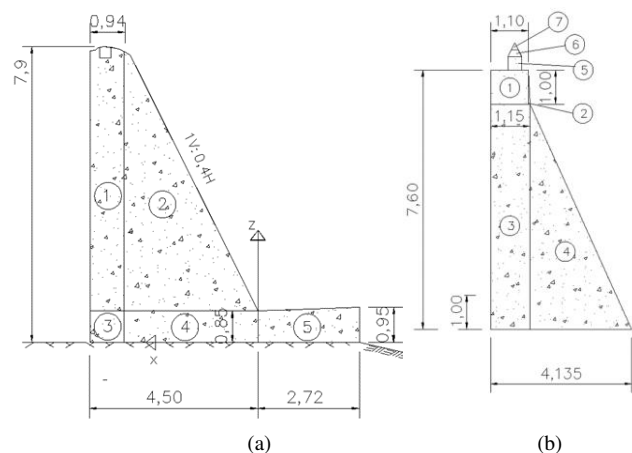


Figura 2. Detalhe das seções: (a) seção extravasor; (b) seção ombreira.

3.1.2 Empuxo de água e assoreamento

As pressões de água variam linearmente com a profundidade a partir do nível de água estabelecido, representado por diagramas triangulares ou trapezoidais. Na seção extravasor é fixado o nível de água a jusante de 0,95 m correspondente a altura do bloco dissipador. Para o nível normal de água a montante (na cota da soleira) é considerado um diagrama triangular de 0 a 7,9 m na seção extravasor e 0 a 7,1 m na seção ombreira. Já considerando o nível máximo do reservatório (atendendo a cheias de projeto com período de retorno de 500 anos em consonância com o dano potencial da estrutura segundo a NBR 13.028/2017) a coluna de água sobe em 0,19 m obedecendo um diagrama trapezoidal para a seção extravasor.

É definido em projeto que a pressão horizontal de assoreamento atua sobre 15% da seção extravasor e como a seção ombreira está em um ponto mais elevado, desconsidera-se tal esforço.

Para os cálculos são considerados peso específico da água (γ_w) e do assoreamento (γ_{assor}) como 10 kN/m³ e 19,2 kN/m³. A coesão e ângulo de atrito do material de assoreamento adotado foi de 0 kPa e 26°, respectivamente.

3.1.3 Subpressão hidrostática

São as pressões ascendentes devido à percolação da água abaixo da estrutura, como é destacado pela Eletrobrás (2003), na maior parte dos casos, é admitida uma simplificação da análise considerando

uma variação linear de perda de energia da região a montante até jusante.

Além disso, é considerado a subpressão integral no contato aberto (região do contato não comprimida) para os cenários onde a estrutura não está totalmente comprimida. No entanto, vale destacar que a aplicação de efeitos sísmicos ou dinâmicos de curta duração não acarreta aumento da subpressão nas zonas tracionadas ou diminuição da área comprimida.

3.1.4 Carga de tirantes

Os tirantes são constituídos por barras Dywidag com diâmetro nominal de 32 mm ancorados 5 m na rocha de fundação, espaçados de 1,5 e 3 m na seção extravasor e ombreira, respectivamente, possuindo carga de incorporação e de trabalho de 280 e 350 kN, respectivamente, conforme definido em projeto. Para a verificação ao tombamento, considera-se que toda a carga de trabalho do tirante pode ser solicitada. Para as demais verificações é considerada a carga de incorporação.

3.1.5 Força sísmica atuante na estrutura

Através de estudos sísmicos desenvolvidos para a própria região da mina, considerando uma probabilidade de excedência de 9,5% em 50 anos (período de retorno de 500 anos, compatível com os cálculos de trânsito de cheias) obtém-se uma aceleração de pico do solo máxima (α) de 0,033g. Este valor é considerado conservativo quando comparado com a NBR 15421/2023 que é de 0,025g. Para a aceleração vertical considera-se o valor de 2/3 da aceleração horizontal conforme indicado por Werner (1976).

3.1.6 Pressões hidrodinâmicas devido ao sismo

Conforme definido pela Eletrobrás (2003), as cargas hidrodinâmicas deverão ser determinadas utilizando a formulação mais desfavorável, Zangar (1952) ou Westergaard (1933 apud French Committee on Large Dams, 2002).

A Tabela 1 resume os valores obtidos pelas duas formulações para os níveis normais e máximos do reservatório, obtendo valores superiores através do método de Westergaard.

Tabela 1. Resumo do cálculo das pressões hidrodinâmicas.

Formulação	Seção	Extravasor		Ombreira	
Zangar	z=H (m)	7,90	8,09	7,10	7,29
	C	0,74	0,74	0,74	0,74
	Pe (kN/m ²)	1,92	1,96	1,72	1,77
	Ve (kN/m)	10,99	11,52	8,88	9,36
Westergaard	Me (kNm/m)	35,76	38,40	25,96	28,10
	Pe (kN/m ²)	2,28	2,34	2,05	2,10
	Ve (kN/m)	12,01	12,60	9,70	10,23
	Me (kNm/m)	37,96	40,76	27,56	29,83

3.2 Cenários de cálculo

As verificações consideram três condições de carregamento, as quais correspondem a:

- Condição de Carregamento Normal (CCN) que está associada a combinações de ações que apresentam grande probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura. Considerando, para tanto, o nível de água na cota da soleira do extravasor e sem efeitos sísmicos.

- Condição de Carregamento Excepcional (CCE) que está associada a combinações de ações com baixa probabilidade de ocorrência, considerando a ocorrência de apenas uma ação excepcional. Para este trabalho é considerado as condições CCE1 e CCE2, que correspondem a carga excepcional como o sismo e a cheia máxima, respectivamente, adotando um período de retorno de 500 anos.
- Condição de Carregamento Limite (CCL) que está associada a combinações de ações com muita baixa probabilidade de ocorrência considerando, deste modo, mais de uma ação excepcional. Para esta condição, considera-se o carregamento excepcional devido ao sismo e a cheia máxima, simultaneamente.

3.3 Fatores de segurança considerados

A avaliação dos valores limites a fim de atestar a segurança da estrutura foram definidos conforme preconizado pela Eletrobrás (2003), apresentados resumidamente na Tabela 2. Nela constam os fatores de segurança à flutuação (FSF), tombamento (FST), e fatores de redução ao deslizamento (FRD) para o ângulo de atrito e a coesão (considerando FSD=1), área mínima comprimida, tensões máximas de compressão (no concreto e na fundação) e tração no concreto.

Tabela 2. Verificações à segurança de acordo com as condições de carregamento.

	Caso de carregamento		
	CCN	CCE	CCL
FSF	1,3 ^a	1,1 ^a	1,1
FST	1,5 ^a	1,2 ^a	1,1
FRD _φ ^b	1,5 ^a (2,0 ^c)	1,1 ^a (1,3 ^c)	1,1 (1,3 ^c)
FRD _c ^b	3,0 ^a (4,0 ^c)	1,5 ^a (2,0 ^c)	1,3 (2,0 ^c)
%A _{comprimida} ^d	100%	66,7%	66,7%
σ _{adm} (compressão)	0,50 f _{ck}	0,60 f _{ck}	0,65 f _{ck}
σ _{adm} (tração)	0,050 f _{ck}	0,060 f _{ck}	0,065 f _{ck}
FSσ _{t,adm}	3,0 ^a (4,0 ^c)	1,5 ^a (2,0 ^c)	1,3 (1,5 ^c)

^a Valores compatíveis com os preconizados na ABNT NBR 13.028/2017.

^b Fatores de redução à resistência por atrito (FRD_φ) e coesão (FRD_c), considerando o fator de segurança ao deslizamento igual à 1,0.

^c Os valores entre parênteses devem ser adotados, segundo a Eletrobrás (2003), quando o conhecimento dos materiais é precário ou há heterogeneidade no comportamento.

^d A Eletrobrás (2003) afirma que no caso de carregamento normal (CCN) a base deve estar totalmente comprimida (100%) e, para os demais casos admite-se uma abertura de 1/3 da seção de contato concreto-fundação.

3.4 Critérios para estabelecimento dos níveis de controle

Do ponto de vista geotécnico, define-se no presente trabalho 4 níveis de controle associados aos instrumentos presentes na estrutura e o nível de risco associado à verificação da estabilidade: nível normal, atenção, alerta e emergência, sendo o nível normal àquele que não apresenta riscos plausíveis à estrutura e abaixo dos demais níveis. O nível de alerta está associado a um risco moderado que requer medidas de restrição de acesso, avaliação minuciosa da situação e ações corretivas a fim de melhorar o estado atual da estrutura. Deste modo, o nível de alerta é definido neste

trabalho a partir dos parâmetros designados na Tabela 2 a qual descreve as verificações mínimas à segurança.

Dá-se destaque ainda que os cenários de cálculo mais limitantes são as condições CCN e CCL, os quais serão utilizados na definição dos níveis de controle da instrumentação, e mais especificamente, a verificação ao fator de segurança ao deslizamento e a área de compressão mínima. Deste modo e compreendendo que há um precário conhecimento do material de fundação e do contato concreto-rocha, bem como os parâmetros de resistência que regem este contato, para o nível de atenção é adotado os valores conservadores dos fatores de redução ao atrito e coesão para a verificação ao deslizamento. Ademais, para a condição de carregamento normal são considerados os fatores de segurança da condição CCL como um nível elevado de risco à estrutura e, portanto, nível de emergência.

Já para a condição CCL, considera-se um nível de emergência quando se obtém fator de segurança inferior a 1 ao deslizamento quando não há redução da parcela do atrito ou coesão. Para a área mínima comprimida considera-se um nível de emergência como 50%, de modo que a resultante está aplicada nos 2/3 médios da base da estrutura, atendendo subjetivamente ao critério descrito pela US Army Corps of Engineers (1995) de que a resultante das cargas aplicadas na base da estrutura deve permanecer suficientemente dentro da área da base. A Tabela 3 apresenta os critérios estabelecidos para definição dos níveis de controle quanto ao fator de segurança ao deslizamento (FSD) e percentual mínimo de área comprimida (%A_c).

Tabela 3. Critério para estabelecimento dos níveis de controle (FSD e %A_c)

Verificações	Cenários	Atenção	Alerta	Emergência
FSD	CCN	FRD _φ = 2,0 FRD _c = 4,0	FRD _φ = 1,5 FRD _c = 3,0	FRD _φ = 1,3 FRD _c = 2,0
	CCL	FRD _φ = 1,3 FRD _c = 2,0	FRD _φ = 1,1 FRD _c = 1,3	FRD _φ = 1,0 FRD _c = 1,0
%A _c	CCN	-	< 100%	< 66,7%
	CCL	-	< 66,7%	< 50%

3.5 Metodologia de cálculo para obtenção dos níveis de controle da instrumentação

É definido inicialmente o nível de controle da régua do reservatório em função da carga de água a montante da estrutura nas duas seções de estabilidade. Para cada seção é definido um cenário de carregamento sem a influência do sismo (associado à condição de carregamento normal) e com a ação sísmica (associado à condição de carregamento limite), sem levar em consideração a leitura dos piezômetros presentes na estrutura.

Para os piezômetros, são estabelecidos os níveis de controle cuja célula de captação de carga piezométrica se localiza no contato concreto-fundação, a saber os PZ-02 e PZ-03 para as seções ombreira e extravasor, respectivamente. Para a condição CCN e CCL são fixados os níveis de água a montante da barragem como o nível operacional (cota da soleira) e o nível máximo (associado à cheia máxima para um período de 500 anos) e varia apenas a carga nos piezômetros, os quais se localizam, em seção, cerca de 0,21 m do paramento vertical de montante.

Quanto às subpressões, é admitido, para cargas piezométricas inferiores a carga de montante, que as subpressões variam linearmente nos pontos de controle de carga (a montante, no

instrumento e a jusante). Para cargas piezométricas superiores, é admitido pressão integral conforme obtido por meio do instrumento em toda a área tracionada no contato concreto-fundação, desconsiderando possíveis aberturas obtidas de carregamento sísmico conforme preconizado pela Eletrobrás (2003).

Quanto à posição dos instrumentos, é admitido que o piezômetro PZ-03 intercepta a seção extravasor e que o nível de controle estabelecido na seção da ombreira pode ser obtido pela variação linear de carga entre os piezômetros PZ-03 e PZ-02.

Deste modo, as leituras máximas na régua do reservatório (RR-01), e piezômetros PZ-02 e PZ03 ao longo do histórico de monitoramento foram nas elevações 1136,91 m, 1135,88 m e 1137,77 m. Sendo considerado a elevação 1136,09 m como a carga piezométrica máxima obtida por instrumentação na seção da ombreira. Estes valores serão comparados com os níveis de controle estabelecidos nas seções de análise a fim de avaliar o risco associado da estrutura a partir dos registros de monitoramento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Níveis de Controle da régua limnimétrica

4.1.1 Seção extravasor

A Tabela 4 apresenta os níveis de controle da régua RR-01 obtidos através de análises de estabilidade quanto ao deslizamento tomando por base a seção extravasor e para os cenários em condição de carregamento normal (sem sismo) e limite (com sismo). A Tabela 5, por sua vez, apresenta os níveis de controle (apenas alerta e emergência) associados ao percentual de área mínima comprimida na base da estrutura.

Tabela 4. Níveis de controle da régua associados à verificação ao deslizamento – seção extravasor.

Condição	Nível associado	FSD _φ	FSD _c	Elevação	%A _c associado
CCN	Atenção	2,0	4,0	1136,16	100,0%
	Alerta	1,5	3,0	1137,07	100,0%
	Emergência	1,3	2,0	1137,53	71,8%
CCL	Atenção	2,0	1,0	1137,26	73,2%
	Alerta	1,3	1,0	1137,66	39,1%
	Emergência	1,0	1,0	1137,85	21,1%

Tabela 5. Níveis de controle da régua associados à verificação da área mínima comprimida – seção extravasor.

Condição	Nível associado	%Ac associado	Elevação (m)
CCN	Alerta	< 100%	1137,14
	Emergência	< 66,7%	1137,60
CCL	Alerta	< 66,7%	1137,35
	Emergência	< 50%	1137,54

É possível observar que a condição de carregamento normal associado à verificação ao deslizamento apresenta as menores elevações para estabelecimento dos níveis de controle, sendo esta verificação a mais conservativa dentre as demais para os 3 níveis de riscos associados. Por outro lado, a verificação ao deslizamento e condição CCL apresenta os valores menos conservadores para todos os níveis de controle.

4.1.2 Seção ombreira

Analogamente ao realizado para a seção extravasor, na Tabela 6 e na Tabela 7 são apresentados os níveis de controle associados à verificação ao deslizamento e área mínima comprimida, respectivamente, para a seção ombreira e nos cenários com e sem a adoção de forças sísmicas.

Tabela 6. Níveis de controle da régua associados à verificação ao deslizamento – seção ombreira.

Condição	Nível associado	FSD _φ	FSD _c	Elevação	%A _c associado
CCN	Atenção	2,0	4,0	1135,12	100,0%
	Alerta	1,5	3,0	1135,96	99,7%
	Emergência	1,3	2,0	1136,20	77,2%
CCL	Atenção	2,0	1,0	1136,02	77,6%
	Alerta	1,3	1,0	1136,24	53,1%
	Emergência	1,0	1,0	1136,34	40,5%

Tabela 7. Níveis de controle da régua associados à verificação da área mínima comprimida – seção ombreira.

Condição	Nível associado	%A _c associado	Elevação (m)
CCN	Alerta	< 100%	1135,96
	Emergência	< 66,7%	1136,31
CCL	Alerta	< 66,7%	1136,13
	Emergência	< 50%	1136,27

Semelhantemente à análise obtida para a seção extravasor, a verificação ao deslizamento sem a consideração das forças sísmicas (condição CCN) apresenta os valores mais baixos de nível de água a montante do reservatório para estabelecimento dos três níveis de controle. De igual modo, a verificação ao deslizamento e condição CCL apresenta os valores mais elevados para estabelecimento dos níveis de controle, sendo este contra a segurança (menos conservador).

4.1.3 Níveis de controle estabelecidos

Como a condição de elevação do reservatório a montante da estrutura é igual em ambas as seções de análise, considera-se os critérios mais conservadores para estabelecimento dos níveis de controle. Deste modo, os níveis de atenção, alerta e emergência para a régua do reservatório do ponto de vista de análise geotécnica da estrutura são os valores obtidos para a verificação ao deslizamento na seção ombreira e condição CCN.

Dado a leitura máxima do instrumento e compreendendo que o nível do reservatório se encontra majoritariamente próximo à cota da soleira do extravasor, a régua RR-01 encontra-se em nível de alerta.

4.2 Níveis de Controle do piezômetro PZ-03

A Tabela 8 apresenta os níveis de controle do piezômetro PZ-03 (seção extravasor) calculados por meio de análises de estabilidade quanto ao deslizamento tomando por base os cenários em condição de carregamento normal (sem sismo) e limite (com sismo). Já a Tabela 9 apresenta os níveis de alerta e emergência associados ao percentual de área mínima comprimida na base da estrutura conforme critérios definidos no item 3.4.

Tabela 8. Níveis de controle do piezômetro PZ-03 associados à verificação ao deslizamento – seção extravasor.

Condição	Nível associado	FSD _φ	FSD _c	Elevação	%A _c associado
CCN	Atenção	2,0	4,0	1130,83	100,0%
	Alerta	1,5	3,0	1138,01	100,0%
	Emergência	1,3	2,0	1141,05	78,8%
CCL	Atenção	2,0	1,0	1138,44	75,7%
	Alerta	1,3	1,0	1140,39	42,9%
	Emergência	1,0	1,0	1141,01	23,9%

Tabela 9. Níveis de controle do piezômetro PZ-03 associados à verificação da área mínima comprimida – seção extravasor.

Condição	Nível associado	%A _c associado	Elevação (m)
CCN	Alerta	< 100%	1136,86
	Emergência	< 66,7%	1141,59
CCL	Alerta	< 66,7%	1139,15
	Emergência	< 50%	1140,10

Adotando as verificações mais conservadoras para estabelecimento dos três níveis de controle associado ao PZ-03, é definido o nível de atenção a partir da verificação ao deslizamento e condição normal de carregamento, correspondente à elevação 1130,83 m. Para os demais níveis, a área mínima comprimida foi a verificação mais limitante, para a condição de carregamento normal na definição do nível de alerta (correspondente à elevação 1136,86 m) e condição limite na definição do nível de emergência (correspondente à elevação 1140,10 m).

Dada a leitura máxima do instrumento na elevação 1135,88 m e a mínima histórica na elevação 1132,72 m, o piezômetro PZ-03 encontra-se em nível de atenção ao longo de todo o histórico de monitoramento. A Figura 3 apresenta o comparativo das leituras máximas e mínimas obtidas no piezômetro PZ-03 com os níveis de controle estabelecidos.

4.3 Níveis de Controle na seção ombreira

A Tabela 10 apresenta os níveis de controle associados à verificação ao deslizamento da estrutura em condição de carregamento normal (sem sismo) e limite (com sismo) na seção ombreira, a qual é comparado à projeção dos níveis piezométricos obtidos no PZ-02 e PZ-03. Já a Tabela 11 apresenta os níveis de alerta e emergência associados ao percentual de área mínima comprimida no contato concreto-fundação.

Tabela 10. Níveis de controle na seção ombreira associados à verificação ao deslizamento.

Condição	Nível associado	FSD _φ	FSD _c	Elevação	%A _c associado
CCN	Atenção	2,0	4,0	Seco	100,0%
	Alerta	1,5	3,0	1134,70	99,1%
	Emergência	1,3	2,0	1136,95	78,1%
CCL	Atenção	2,0	1,0	1134,19	75,8%
	Alerta	1,3	1,0	1136,26	50,7%
	Emergência	1,0	1,0	1136,71	41,3%

Tabela 11. Níveis de controle na seção ombreira associados à verificação da área mínima comprimida.

Condição	Nível associado	%Ac associado	Elevação (m)
CCN	Alerta	< 100%	1134,57
	Emergência	< 66,7%	1137,57
CCL	Alerta	< 66,7%	1135,67
	Emergência	< 50%	1136,30

Adotando as verificações mais conservadoras para estabelecimento dos três níveis de controle associado ao nível piezométrico na seção ombreira, é obtido de forma semelhante ao PZ-03, o nível de atenção a partir da verificação ao deslizamento e condição CCN e para os demais níveis, a área mínima comprimida foi a verificação mais limitante, para a condição CCN na definição do nível de alerta e condição CCL na definição do nível de emergência. Destaca-se que a condição seca da carga piezométrica na seção ombreira pode ser categorizado como uma situação normal ou de atenção, de modo que é inconclusivo caso este apresentasse condição seca.

Dada as leituras máximas dos instrumentos PZ-02 e PZ-03, e que a projeção dessas leituras na seção analisada corresponde a elevação 1136,09 m, como descrito no item 3.5, obtêm-se que os piezômetros PZ-02 e PZ-03 associados à seção ombreira correspondem ao nível de alerta para a leitura máxima dos instrumentos. As leituras mínimas históricas dos PZ-02 e PZ-03 correspondem às elevações 1134,95 m e 1132,72 m, que na seção corresponde a uma cota piezométrica na elevação 1132,97 m, que corresponde ao nível de atenção. A Figura 3 apresenta o comparativo das leituras máximas e mínimas obtidas na seção ombreira considerando a projeção dos piezômetros PZ-02 e PZ-03 com os níveis de controle estabelecidos.

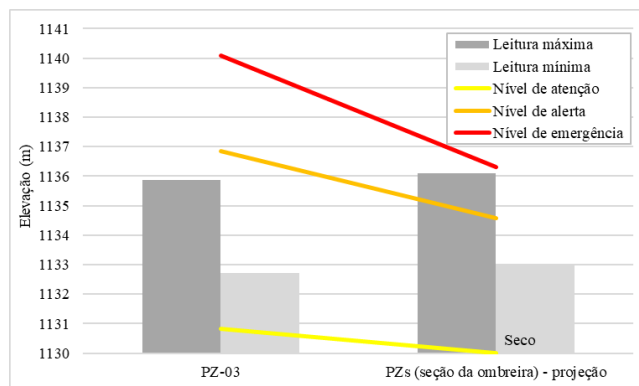


Figura 3. Comparativo entre as leituras máximas e mínimas e os níveis de controle estabelecidos.

5 CONCLUSÕES

Foram realizadas as verificações à estabilidade da barragem de concreto em questão utilizando às diretrizes fornecidas pela Eletrobrás (2003). Tendo em vista que as verificações quanto ao deslizamento e ao percentual de área mínima comprimida foram os mais limitantes dentre todas as análises, no presente trabalho, deu-se o enfoque no estabelecimento de critérios e obtenção dos níveis de controle associados a estas verificações. Para tanto, foram

utilizadas duas seções de análises, seção extravasor e seção ombreira, uma régua limnimétrica que mede os níveis de água a montante no reservatório e dois piezômetros localizados no contato concreto-fundação.

Para o estabelecimento dos níveis de controle para a régua limnimétrica, obteve-se que a seção ombreira apresentou os valores mais conservadores considerando a verificação ao deslizamento e a condição sem sismo (CCN), apontando uma condição atual de nível de alerta para o instrumento. Vale destacar que, caso considerasse apenas a seção extravasor, a régua se apresentaria em nível de atenção.

Quanto aos níveis de controle associados aos piezômetros, o nível de atenção foi definido a partir da condição normal sem sismo e verificação ao deslizamento. Os demais níveis foram obtidos a partir do percentual de área mínima comprimida para a condição sem sismo (nível de alerta) e com sismo (nível de emergência).

Para o piezômetro PZ-03 na seção extravasor, foi obtido um nível de atenção ao longo de todo o histórico de monitoramento. Para a seção ombreira, foi considerado que a cota piezométrica correspondente a seção pode ser obtida, simplificadamente, a partir de uma variação linear das cotas piezométricas extraídas dos piezômetros PZ-02 e PZ-03 dispostos a cerca de 0,21 m do paramento de montante e alinhados ao eixo longitudinal da barragem. As leituras máximas e mínimas históricas apontam que para a verificação do nível de controle associado aos piezômetros na seção ombreira varia de nível de atenção e alerta.

Deste modo, destaca-se que a instrumentação presente na estrutura aponta situações de atenção e alerta quanto à estabilidade física da estrutura, com maior risco na seção ombreira. Deste modo, é sugerido que sejam realizadas ações a fim de melhorar a condição de estabilidade da estrutura e a confiabilidade dos parâmetros geotécnicos atualmente adotados.

6 REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). 2017. NBR 13.028: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos. 3 ed. Rio de Janeiro.
- Eletrobrás. 2003. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. Eletrobrás e CBDB, Outubro/2003.
- French Committee on Large Dams. 2002. Small Dams - Guidelines for Design, Construction and Monitoring. Cemagref Editions, 2002.
- Nunes A.J.C., Cavalieri F., Lopes H.L.S., Lima A.P. and Rodrigues R.S. 2023. Deterministic and statistical analysis in the definition of triggered action response plans in tailings dams. *Proc. of Tailings and Mine Waste 2023*, Vancouver, Canada, 1793-1804.
- US Army Corps of Engineers. 1995. Engineering and Design – Gravity Dam Design. Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- Veloso I.G. 2007. Preparação de cartas de risco para o controle da estabilidade ao cisalhamento da barragem de concreto gravidade da usina hidrelétrica de Guilman-Amorim. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2007.
- Werner S.D. 1976. Engineering characteristics of earthquake ground motions. *Nuclear Engineering and Design*, 36 (3), 367-395.
- Zangar C.N. 1952. Hydrodynamic Pressures on Dams Due to Horizontal Earthquake Effects. Engineering Monograph, No. 11, Bureau of Reclamation, 1952.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.