

Proposta Para Definição de Níveis de Controle em Estruturas com Restrição de Acesso

Custódio Junio Reis

Engenheiro Geotécnico, DF+ Engenharia Geotécnica e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, MG, Brasil, creis@dfmais.eng.br

Fabiano Jerônimo Moreira Sossai

Mestre em Geotecnia, BVP Geotecnia e Hidrotecnia, Belo Horizonte, MG, Brasil, fabiano.sossai@bvp.eng.br

Lucas Gonçalves de Faria

Engenheiro Geotécnico, BVP Geotecnia e Hidrotecnia, Belo Horizonte, MG, Brasil, lucas.faria@bvp.eng.br

Thiago Borges Gomes Moreira

Mestre em Geotecnia, BVP Geotecnia e Hidrotecnia, Belo Horizonte, MG, Brasil, thiago.moreira@bvp.eng.br

RESUMO: Os níveis de referência ou níveis de controle da instrumentação, que na mineração ficaram conhecidos pelo termo “Carta de Risco” são uma ferramenta importante para o acompanhamento dos níveis de segurança recomendados para as estruturas e tem como principal objetivo auxiliar no monitoramento e tomadas de decisões quanto ao comportamento esperado das estruturas geotécnicas. Em fevereiro de 2022, entrou em vigor a Resolução nº 95 da Agência Nacional de Mineração (ANM), que definiu com mais detalhes os aspectos que caracterizam cada um dos níveis de alerta e emergência, em potencial, que possam indicar o comprometimento da segurança de uma barragem. Uma situação específica que vem acontecendo é o caso das estruturas onde já foi acionado o nível de emergência por questões de fatores de segurança abaixo do preconizado e o acesso às estruturas é restrito, não possibilitando novas investigações para melhor entendimento da situação da barragem ou a implantação de obras de reforço para aumentar a segurança das estruturas. Nestes casos específicos, uma alternativa para a definição de níveis de controle da instrumentação é trabalhar com o histórico de informações de monitoramento para propor níveis de controle para os instrumentos existentes, de maneira que seja garantido que as situações de carregamento na estrutura sejam inferiores aos já observados historicamente e que a não causaram problemas. O objetivo desse trabalho é propor uma metodologia baseada nas variações máximas diárias já ocorridas no histórico da estrutura após atingir a geometria final e nos últimos anos de operação além dos níveis máximos identificados num histórico recente e após paralisação. As indicações se baseiam no fato de a estrutura já ter vivenciado tal situação em algum momento de sua existência e ainda continuar numa condição meta estável, mesmo que sabidamente não atingindo os fatores de segurança exigidos para uma barragem.

PALAVRAS-CHAVE: Níveis de Controle; Barragens; Segurança.

ABSTRACT:

The reference levels or instrumentation control levels, known in mining as the "Risk Chart," are an important tool for monitoring the recommended safety levels for structures and aim to assist in monitoring and decision-making regarding the expected behavior of geotechnical structures. In February 2022, Resolution No. 95 of the National Mining Agency (ANM) came into effect, which defined in more detail the aspects that characterize each of the alert and potential emergency levels that may compromise the safety of a dam. A specific situation that has been occurring is the case of structures where the emergency level has already been triggered due to safety factors below the recommended level, and access to the structures is restricted, preventing further investigations to better understand the dam's situation or the implementation of reinforcement works to increase the structures' safety. In these specific cases, an alternative for defining instrumentation control levels is to work with the monitoring information history to propose control levels for existing instruments, ensuring that the loading situations on the structure are lower than those historically observed and that did not cause problems. The aim of this work is to propose a methodology based on the

maximum daily variations that have already occurred in the structure's history after reaching the final geometry and in the last years of operation, in addition to the maximum levels identified in a recent history and after shutdown. The indications are based on the fact that the structure has already experienced such a situation at some point in its existence and still remains in a near-stable condition, even though it is known not to meet the safety factors required for a dam.

KEYWORDS: Control Levels; Dams; Safety

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço do conhecimento técnico sobre comportamento mecânico dos rejeitos e sobre as estruturas construídas com este material, nos últimos anos tem-se observado um aumento expressivo de análises e revisões de condição de estabilidade de algumas barragens na mineração brasileira. O avanço no conhecimento técnico foi seguido pelo avanço na legislação vigente que aborda o tema no Brasil, com a publicação de leis, portarias, decretos etc.

A Agência Nacional de Mineração (ANM), em sua publicação mais abrangente sobre o tema (Resolução 95/2022) dentre outros temas, trata sobre os níveis de emergência de barragens de mineração e características para classificação e enquadramento no Nível de Alerta e nos dois Níveis de Emergência, sendo que no nível de emergência mais restritivo, não é possível acessar a estrutura ou sequer a região a jusante da barragem, caracterizada pela zona de Auto salvamento, inviabilizando uma possível aquisição de novas informações sobre as barragens que se enquadram no Nível de Emergência 3 (NE3).

O banco de dados da ANM, disponível para consulta pública, indica que em julho de 2024, oito estruturas se enquadram em uma condição de Nível de Emergência 02 e 03, essa classificação ocorre em alguns casos específicos, onde a barragem não atende aos critérios de segurança para condições não drenadas de carregamento, mas ainda está numa condição estável ou meta estável para as condições drenadas de carregamento.

O não atendimento ao critério de estabilidade a condições não drenadas, pode está relacionada a avaliação ao carregamento não drenado considerando resistências de pico, ou na simulação de uma condição de liquefação (residual).

A condição não drenada, ocorre quando os efeitos de carregamento sobre um solo, influem em uma alteração das condições de poropressão no meio, onde a ação do carregamento é superior ao tempo de drenagem do solo. Conforme descrito por Terzaghi e Peck (1996) em condições reais, esse fenômeno irá ocorrer quando um carregamento externo for aplicado sobre o solo, e a geração de poropressão devido a esse carregamento ocorre no tempo a uma taxa superior que a capacidade do solo de drenar/dissipar a poropressão, esse efeito também pode ser simulado em laboratórios, com a realização de ensaios de compressão triaxiais adensados e em condições não drenadas.

Para esses casos avalia-se as condições de resistência do solo sobre uma condição não drenada (Su), Duncan et. al (2014) a define como a resistência que o solo oferece quando carregado até a ruptura sobre as condições de carregamento não drenado.

O segundo caso de avaliação de estabilidade sobre uma condição não drenada está ligado ao fenômeno de liquefação, tal fenômeno pode entendido como um efeito de amolecimento de solos contráteis, saturados e sem coesão durante o cisalhamento não drenado, (Pirete.W e Gomes. R, C,2013). Esse fenômeno pode ter como gatilho, carregamentos estáticos (ações de sobrepeso, elevações de nível d'água, etc) ou carregamentos dinâmicos (eventos sísmicos, vibrações, etc.). Nesses casos simula-se a resistência do solo em uma condição de resistência não drenada residual.

O não atendimento ao critério de estabilidade sobre esses cenários é o caso de algumas barragens alteadas para montante, e nesses casos até que se execute a descaracterização/ descomissionamento da estrutura, é necessário manter o monitoramento da barragem e tentar prever situações de risco iminente e uma das ferramentas utilizadas para esse monitoramento é avaliando a instrumentação e seus níveis de referência, que devem ser propostos com base nas características de projeto, comportamento esperado para a barragem durante sua vida útil e revisado periodicamente com base nos históricos de leituras e eventos observados na barragem.

Com base nessa necessidade de definição de níveis de referência para a instrumentação e na impossibilidade de acessar uma estrutura NE3 para a aquisição de novas informações, neste artigo é proposta uma metodologia para utilizar na definição de níveis de referência de indicadores de nível d'água e piezômetros com base no comportamento histórico da estrutura e válido apenas para condições drenadas de carregamento, visto que para o exemplo apresentado, para a situação de avaliação de estabilidade com parâmetros não drenados a estabilidade já não era garantida.

2 METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta neste trabalho, tem por premissa a avaliação geotécnica de uma barragem de contenção de rejeitos, cuja performance da estrutura indica um não atendimento das condições estabelecidas na legislação vigente, perante os critérios da resolução de nº 95 da Agência Nacional de Mineração (ANM).

Surge-se uma hipotética necessidade de se estabelecer níveis de referência para piezômetros e indicadores de nível d'água existentes, visando um monitoramento contínuo e restabelecendo novos níveis de referência para verificação da performance da estrutura e suas condições estruturais, visto que os primeiros já foram superados.

Entende-se níveis de referência como intervalos contidos em uma carta de risco (carta de segurança), relacionado a fatores de segurança, onde cada intervalo normalmente representa a estabilidade global da estrutura em termos de sua resistência (Ribeiro e Espósito, 2016).

No Art. 40 da Resolução nº 95 da ANM em vigor desde fevereiro de 2022, são definidos os aspectos que caracterizam cada um dos níveis de referência em potencial, que possam comprometer a segurança de uma barragem, sendo eles:

I - Nível de Alerta:

- a) Quando identificada situação descrita no inciso I do art. 40;
- II - Nível de Emergência 1 (NE1):
- b) quando a barragem de mineração estiver com Categoria de Risco Alta;
- c) Quando for detectada anomalia com pontuação 6 (seis) na mesma coluna do Quadro 3 - Matriz de Classificação Quanto à Categoria de Risco (1.2 - Estado de Conservação) do Anexo IV em 4 (quatro) EIR seguidos;
- d) Quando for detectada anomalia com pontuação 10 (dez) no EIR;
- e) Qualquer situação elencada no § 1º do art. 5º da Resolução;
- f) Quando o Fator de Segurança drenado estiver entre $1,30 \leq FS < 1,50$ ou Fator de Segurança não drenado de pico estiver entre $1,20 \leq FS < 1,30$ ou quando o Fator de Segurança não drenado de pico estiver entre $1,20 \leq FS < 1,50$ para os casos elencados no inciso I, § 5º, do art. 54 da Resolução;
- g) Para qualquer outra situação com potencial comprometimento de segurança da estrutura.

III - Nível de Emergência 2 (NE2):

- a) Quando o resultado das ações adotadas na anomalia referida no inciso I for classificado como “não controlado”, de acordo com a definição do § 1º do art. 31 desta Resolução;
- b) Quando o Fator de Segurança drenado estiver entre $1,10 \leq FS < 1,30$ ou Fator de Segurança não drenado de pico estiver entre $1,00 \leq FS < 1,20$.

IV - Nível de Emergência 3 (NE3):

- a) A ruptura é inevitável ou está ocorrendo;
- b) Quando o Fator de Segurança drenado estiver abaixo de 1,10 ou Fator de Segurança não drenado de pico estiver abaixo de 1,00.

Portanto, quando o fator de segurança para condição não drenada, obtido por uma análise de estabilidade pelo método de equilíbrio limite, atingir valores inferiores a 1,0, em uma ou mais seções em análise, a barragem

deve se manter inacessível, incluindo também sua Zona de Alto Salvamento (ZAS), ficando assim impossibilitada a realização de novas investigações e a instalação de novos instrumentos.

Nesse caso específico, uma vez que quando a estrutura não apresenta perda de performance, deve-se determinar os níveis de controle em função de cenários hipotéticos simulando condições de perda de resistência ou condições anormais de operação com base no projeto, estabelecendo-se assim, horizontes com valores normais de operação, atenção, alerta e emergência. Quando a estrutura já se encontra em um nível de emergência, com os limites antes definidos já superados ou as condições esperadas em projeto não atendidas, faz-se necessário a definição de novos limites para que se estabeleça referências para um monitoramento contínuo de avaliação da performance da estrutura.

Para a elaboração da Carta de Risco para estruturas que já se encontram em nível de emergência, deverá ser considerado os instrumentos localizados nas regiões críticas, ou seja, os locais onde se encontram as seções críticas das análises de estabilidade.

Para o caso hipotético estudado, como as análises já apresentam um fator de segurança por equilíbrio limite inferior a 1.0 para o cenário não drenado de pico, o método para definição dos novos níveis de referência deverão ser aplicados para os cenários onde se simula as condições de estabilidade perante a um estado de carregamento drenado. Tal hipótese é válida, pois caso haja algum evento que mobilize a resistência não drenada da estrutura, neste caso, a barragem entraria em colapso.

Importante destacar que é interessante fazer essas avaliações com dados dos instrumentos no intervalo em que a estrutura estiver na condição similar ao vivenciado atualmente, por exemplo, em caso de uma estrutura desativada, esses valores de referência devem ser indicados com base nos dados de instrumentação pós desativação. Da mesma forma, deve-se evitar utilizar dados de instrumentação de épocas em que a barragem tinha outra geometria (ex.: etapas anteriores de alteamento, antes de obras de implantação de aterros para reforço da barragem etc.)

Para fins de sensibilidade, recomenda-se analisar também a seção com as máximas leituras ocorridas nos últimos 3 anos de operação.

3 RESULTADOS

Com a aplicação da metodologia de avaliação e definição dos níveis de controle, traz-se um exemplo hipotético de uma seção crítica de uma Barragem, onde o Fator de Segurança por equilíbrio limite para o cenário “Não Drenado de Pico” se encontra com um Fator de Segurança menor do que 1,00. Se enquadrando nesse caso em em uma situação de emergência, Nível 3, perante os critérios de classificação da resolução nº 95 da ANM, como ilustrado na figura 1.

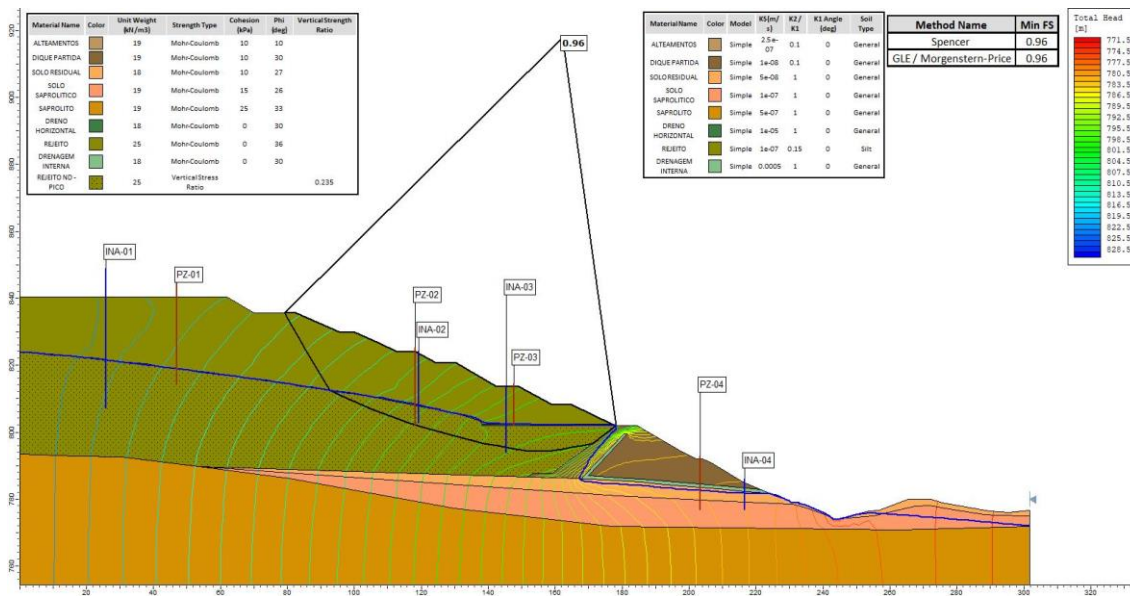


Figura 1: Cenário Não Drenado de Pico para a seção utilizada como exemplo para estudo. (BVP, 2024)

Na Tabela 1 são apresentadas as leituras registradas em cada instrumento locado na seção de análise e em seguida, uma análise de estabilidade para o cenário “Drenado”, simulando as leituras registradas nos instrumentos indicados na tabela.

Tabela 1: Leituras indicadas atualmente pra os instrumentos locados na seção de análise. (BVP, 2024)

Instrumento	Leituras Atuais
PZ-01	818,60m
PZ-02	807,04m
PZ-03	802,36m
PZ-04	784,00m
INA-01	821,44m
INA-02	807,80m
INA-03	802,41m
INA-04	781,78m

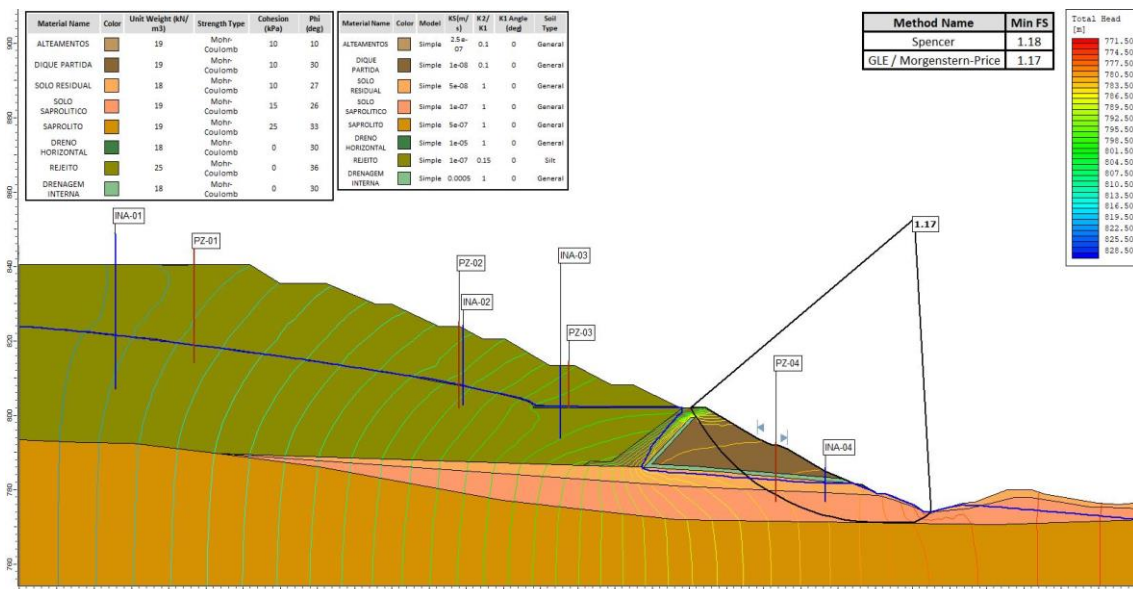


Figura 2: Análise de estabilidade para o cenário Drenado, com as atuais leituras dos instrumentos (BVP,2024)

As máximas leituras atingidas na estrutura após sua paralisação são apresentados na Tabela 2, juntamente com a análise do cenário drenado de pico para essa condição de leitura dos instrumentos.

Tabela 2: Leituras máximas registradas pra os instrumentos locados na seção de análise. (BVP, 2024)

Instrumento	Máximos Históricos
PZ-01	819,40m
PZ-02	808,15m
PZ-03	803,99m
PZ-04	785,12m
INA-01	822,00m
INA-02	808,00m

Instrumento	Máximos Históricos
INA-03	804,40m
INA-04	782,36m

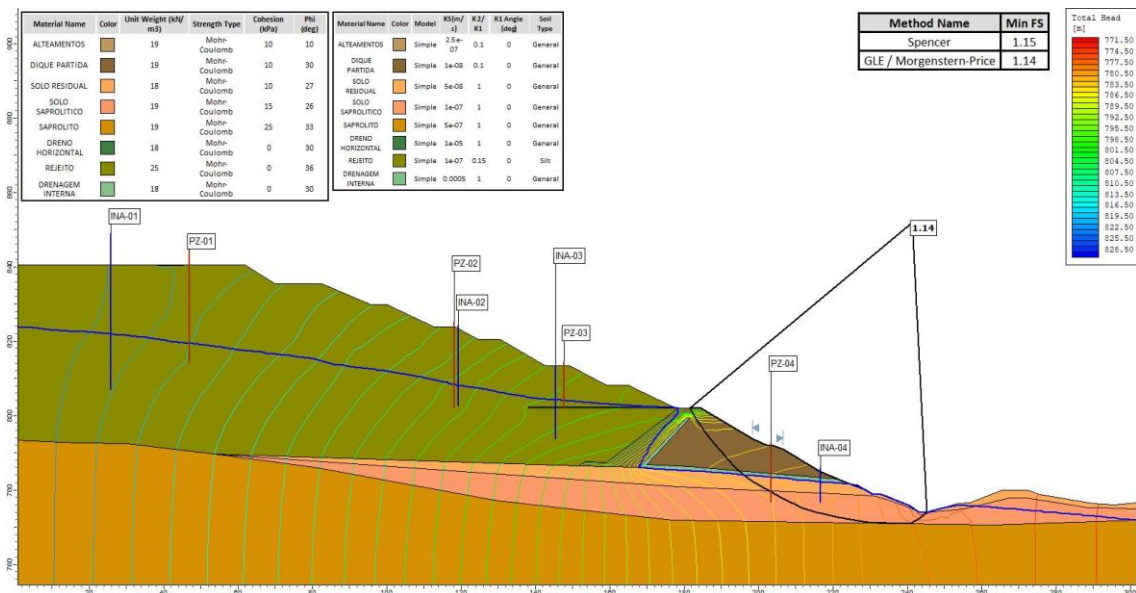


Figura 3: Análise cenário drenado com as máximas leituras históricas dos instrumentos. (BVP,2024)

Ficam definidos como níveis de referência as máximas leituras dos instrumentos localizados na região mais crítica para a barragem, após paralisação da operação na estrutura, sendo essa região o Dique de Partida da Barragem, nesse exemplo. Outra informação importante observada é que outras regiões da estrutura experimentaram um incremento de poropressão, influenciado pela aumento da carga piezométrica, entretanto essa condição não alterou a região da superfície crítica de ruptura.

Para esse caso de aplicação da metodologia proposta, se estabeleceram como níveis de controle para seção apresentada as leituras máximas atingidas pelos instrumentos PZ-04 e INA-04, e, de acordo com o histórico de leitura dos instrumentos, a variação máxima atingida pelos instrumentos num período de 24 horas nos últimos 3 anos, conforme apresentado na Tabela 3, e os gráficos dos instrumentos a seguir:

Tabela 3: Níveis de controle definidos para os instrumentos críticos da seção analisada. (BVP,2024)

INSTRUMENTO	NÍVEL DE CONTROLE MÁXIMOS HISTÓRICOS	NÍVEL DE CONTROLE MÁXIMA VARIAÇÃO DIÁRIA
PZ-04	785,12m	0,29cm
INA-04	782,36m	0,76cm

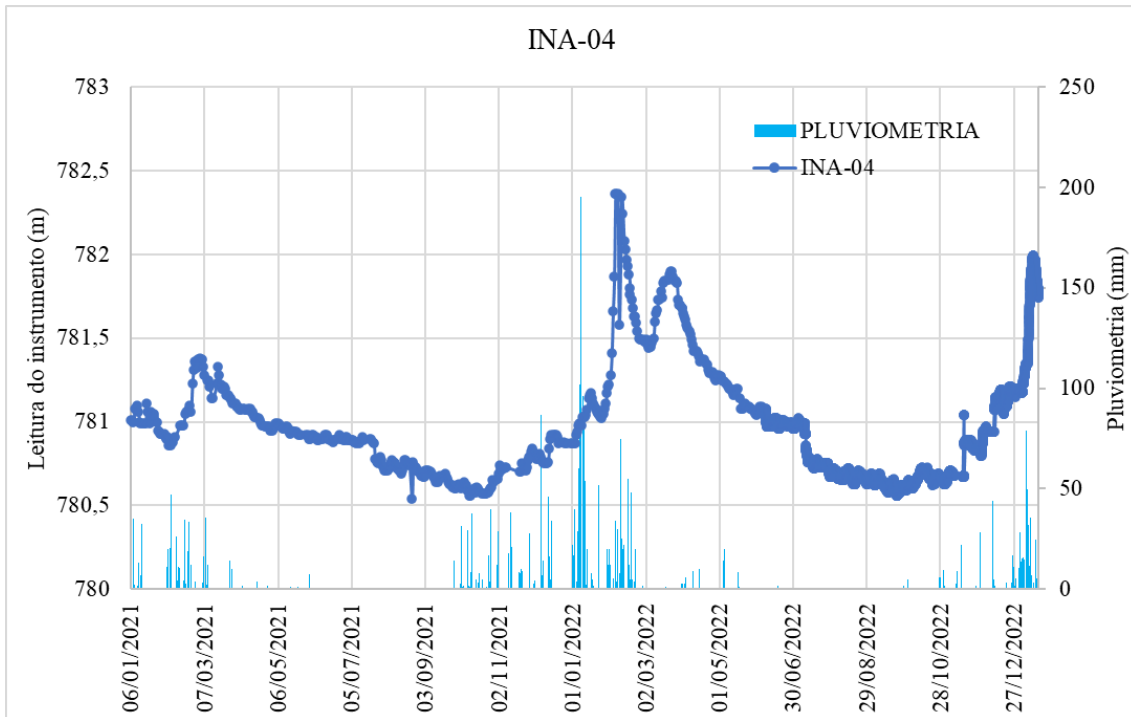


Figura 4: Histórico de leitura dos últimos três anos do INA-04 com indicação da Pluviometria. (BVP,2024)

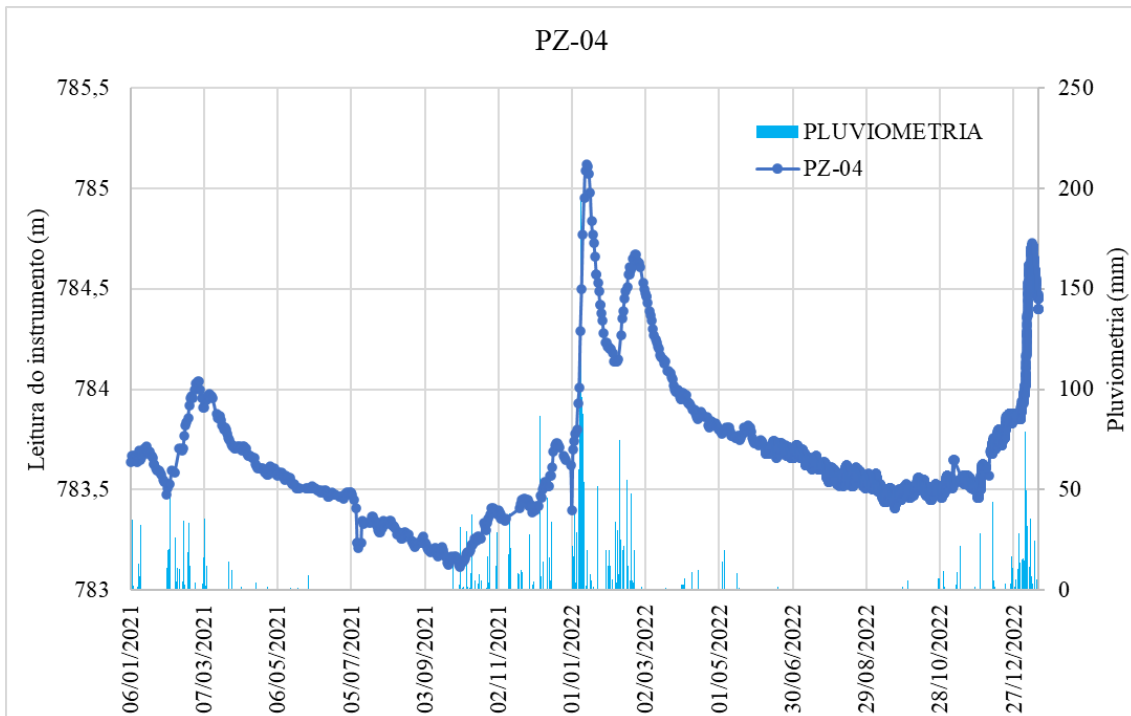


Figura 5: Histórico de leitura dos últimos três anos do PZ-04 com indicação da Pluviometria. (BVP,2024)

Observa-se que a mudança para os valores máximos históricos dos instrumentos, resulta numa queda do Fator de segurança da estrutura, porém não altera seu nível, nem sua condição de estabilidade.

4 CONCLUSÃO

O proposto trabalho deverá ainda ser aprimorado, a metodologia aqui apresentada é altamente particular, e para reaplicação do método, devem ser consideradas e avaliadas todas as particularidades da estrutura de contenção de rejeitos em questão.

Cabe salientar que não só de Piezômetros ou Indicadores de nível d'água devem ser constituídos os níveis de referência da instrumentação (carta de risco) quando elaborados, devem ser levados em consideração também outros instrumentos como medidores de deslocamento e medidores de vazão, além de fatores como precipitação pluviométrica que podem vir a ocorrer na estrutura, movimentações causadas por máquinas e obras na região ou próximo à barragem, dentre outros fatores a depender das particularidades da estrutura a ser estudada.

Os níveis de referência adotados para os instrumentos levaram em consideração os níveis máximos históricos observados na estrutura e a máxima variação diária observada num período de tempo em que a estrutura apresentou-se em condição similar de carregamento ao cenário atual. Tais indicações se baseiam no fato de a estrutura já ter vivenciado tal situação em algum momento de sua existência e não ter ocasionado um carregamento não drenado na estrutura, ainda continuando numa condição meta estável, mesmo que sabidamente não atingindo os fatores de segurança exigidos por norma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.028: Mineração - *Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BRASIL. Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.

Duncan, J.; Wright, S. G; Brandon, T.L.; (2014) *Soil Strength and Slope Stability*, 2nd ed., Wiley, Hoboken, New Jersey, USA.

Pirete, W; Gomes, R.C. *Tailings Liquefaction Analysis Using Strength Ratios and SPT/CPT Results*, *Soils and Rocks*, São Paulo, 36(1): 37-53, January-April, 2013.

Ribeiro, S.M; Espósito, T. *Avaliação de Segurança de Barragens: Piping como Critério para Elaboração de Carta de Segurança - XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG)*, Belo Horizonte, MG, 2016

Terzaghi, K.; Peck, R.B.; (1996) *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd ed., McGraw Hill, New York, NY, USA, 549 p.