XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/39

Elaboração de carta de risco em barragem de terra

Dellane Stephani Carvalho dos Santos
Mestre em geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, stephanidscs@gmail.com

Gabriel Machado de Almeida
Engenheiro civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, gabrielmachado@bsgconsultoria.com.br

Roberto Pimentel de Sousa Júnior
Mestre em geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, robertopimentel@bsgconsultoria.com.br

RESUMO: O estudo apresenta a elaboração de cartas de risco para duas barragens de terra, denominadas A e B, com o objetivo de definir níveis de controle dos instrumentos de monitoramento e associá-los a condições de estabilidade do talude. Na pesquisa fundamenta-se a importância da gestão de segurança de barragens, viabilizando a identificação precoce de anomalias e a tomada de decisões técnicas baseadas em critérios quantitativos. Foram aplicados dois métodos distintos para a determinação dos níveis de controle, de acordo com o porte das estruturas. Para a barragem A, de grande porte (25,5 m), os níveis de Atenção, Alerta e Emergência foram estabelecidos a partir dos fatores de segurança (FS) obtidos em análises de estabilidade com valores de FS iguais a 1,50, 1,30 e 1,10, respectivamente. Já para a barragem B, de pequeno porte (5,5 m), os níveis de controle foram definidos com base na distância da linha piezométrica em relação à face do talude de jusante, uma vez que mesmo sob condição crítica o FS manteve-se acima do limite mínimo para o nível de Atenção. As simulações numéricas foram no software GeoStudio 2021.4, utilizando o método de equilíbrio limite de Morgenstern-Price. Conclui-se que a carta de risco constitui uma ferramenta essencial para o acompanhamento operacional e o gerenciamento integrado da segurança, permitindo a adoção de medidas preventivas e emergenciais de forma sistemática, fundamentada e compatível com o porte de cada barragem.

PALAVRAS-CHAVE: Carta de risco, nível de controle, barragem de terra.

ABSTRACT: This study presents the development of risk maps for two earth dams, referred to as Dam A and Dam B, with the objective of defining control levels for monitoring instruments and associating them with slope stability conditions. The research is grounded in the need to enhance dam safety management by enabling early detection of anomalies and supporting technical decision-making based on quantitative criteria. Two distinct methods were applied to determine the control levels according to the size of each structure. For Dam A, a large structure (25.5 m high), the Attention, Alert, and Emergency levels were established based on safety factors (FS) obtained from stability analyses, with FS values of 1.50, 1.30, and 1.10, respectively. For Dam B, a small structure (5.5 m high), the control levels were defined according to the distance between the phreatic line and the downstream slope face, since even under critical conditions the FS remained above the minimum threshold for the Attention level. Numerical simulations were performed using the GeoStudio 2021.4 software, applying the Morgenstern–Price limit equilibrium method. It is concluded that the risk map represents an essential tool for operational monitoring and integrated safety management, enabling the implementation of preventive and emergency actions in a systematic, evidence-based manner consistent with the characteristics and scale of each dam.

KEYWORDS: Risk map, control levels, earth dam.

1 INTRODUÇÃO

A Carta de Risco é um dos instrumentos mais relevantes na gestão da segurança de barragens, pois estabelece, de forma técnica e objetiva, os níveis de controle e ação relacionados ao comportamento estrutural e hidráulico do empreendimento. Ela serve como base para a tomada de decisão rápida e fundamentada em

situações de anomalias, permitindo que operadores e engenheiros identifiquem, interpretem e respondam adequadamente às alterações no desempenho da barragem. Esse documento integra o Plano de Segurança da Barragem (PSB) e o Plano de Ação de Emergência (PAE), conforme preconizado pela Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010), sendo obrigatório para empreendimentos classificados como de médio e alto potencial de dano associado.

A importância da Carta de Risco é amplamente reconhecida em estudos de casos reais. A tragédia da Barragem de Fundão (Mariana-MG, 2015) e, posteriormente, o rompimento da Barragem I da Mina Córrego do Feijão (Brumadinho-MG, 2019) evidenciaram a necessidade de instrumentos preditivos e protocolos de alerta eficazes. Em ambos os eventos, investigações apontaram falhas nos sistemas de monitoramento e na comunicação entre níveis de atenção e emergência, ressaltando o papel crucial de uma Carta de Risco bem estruturada para prevenir perdas humanas e ambientais (Freitas e Silva, 2019).

A Carta de Risco deve conter níveis graduais de controle, definidos conforme parâmetros geotécnicos e hidráulicos representativos, tais como pressão neutra, nível piezométrico e deformações estruturais. De modo geral, são estabelecidos quatro estágios principais: Nível Normal: condição de estabilidade com comportamento dentro dos limites de projeto; Nível de Atenção: leituras dos instrumentos se aproximam do limite de segurança estabelecido, exigindo aumento da frequência de monitoramento e avaliação das causas; Nível de Alerta: indica situação crítica, com risco de instabilidade crescente e requer medidas corretivas imediatas e inspeções intensificadas; Nível de Emergência: representa condição de risco iminente de ruptura, com fator de segurança próximo da unidade, demandando acionamento imediato das autoridades e execução do PAE, incluindo a evacuação da população a jusante.

No presente trabalho, a Carta de Risco foi elaborada a partir da análise de estabilidade de duas barragens de terra, denominadas Barragem A e Barragem B, com alturas de 25,5 m e 5,5 m, respectivamente. As avaliações foram realizadas para os níveis de referência correspondentes aos estados de Atenção, Alerta e Emergência. As análises numéricas foram conduzidas no software GeoStudio 2021.4, utilizando o método de equilíbrio limite de Morgenstern-Price, com base em parâmetros geotécnicos obtidos de ensaios de laboratório.

2 CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM

A barragem A possui altura máxima de 25,5 m e é composta por um aterro compactado e homogêneo, com crista de 7 m de largura na elevação 800,50 m. É dotado de um sistema de drenagem interna formado por um filtro vertical de areia, com continuidade sob o talude de jusante através de um tapete horizontal de areia, tendo na extremidade um dreno de pé de enrocamento com transições granulares. O talude de montante recebeu proteção com enrocamento (*rip-rap*) e possui inclinação igual a 1V:2H desde a crista até uma berma de 5 m de largura, posicionada na elevação 791,50 m. Deste ponto em diante o talude assume a inclinação 1V:3H até o pé. A barragem fica localizada em uma região caracterizada por área de rochas pré-cambrianas e granito-gnáissicas.

Os parâmetros geotécnicos da barragem A utilizados nas simulações foram advindos de ensaios de laboratório e boletins de sondagem SPT e estão apresentados na Tabela 1. Os dados foram determinados por meio de uma média ajustada dos dados devido a algumas discrepâncias pontuais entre os valores obtidos devido variações naturais do solo, erros experimentais ou heterogeneidade do maciço. Quanto à geometria analisada, adotou-se a seção típica da barragem da Figura 1.

Além disso, a barragem A dispõe de 8 (oito) Indicadores de Nível d'Água, mas 2 (dois) estão desativados; 4 (quatro) poços de monitoramento e 3 (três) piezômetros, além de 4 (quatro) piezômetros elétricos e 4 (quatro) inclinômetros.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos usados nas simulações – Barragem A.

Material	Peso específico γ (KN/m³)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Aterro Compactado	18,94	9,17	27,46
Fundação: Aluviões	18,45	18,67	32,33
Fundação: Solo Residual	18,09	17,38	29,75
Areia	17,00	0,00	35,00
Enrocamento	18,00	0,00	35,00

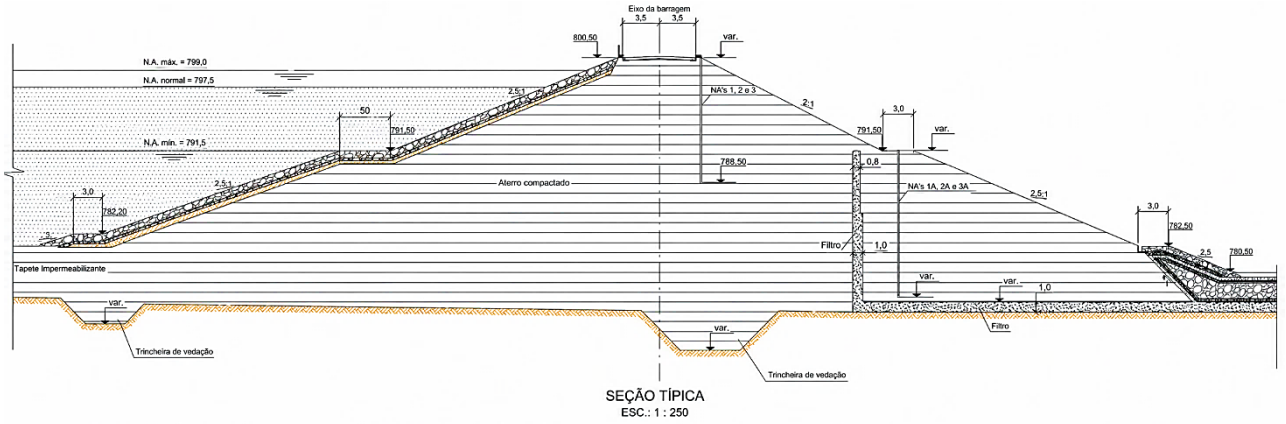


Figura 1. Seção típica da barragem A.

A barragem B possui altura máxima da ordem de 5,5 m. Segundo documentos antigos da fase de projeto, o aterro é homogêneo, com crista de 6 m de largura na elevação 817,50 m. O maciço é dotado de um "lençol filtrante" sob o talude de jusante, tendo na extremidade um dreno de enrocamento com dreno de manilhas perfuradas de barro vibrado, que conduzem as águas percoladas para o talvegue próximo à saída da descarga de fundo.

O talude de montante recebeu proteção com enrocamento (*rip-rap*) e possui inclinação igual a 1V:3H. O talude de jusante possui inclinação igual a 1V:2,5H. Para o controle da percolação pelas fundações, foi implantado a montante um tapete impermeabilizante de solo com as mesmas características do maciço da barragem, com espessura de 1,50 m.

Quanto à geometria analisada, adotou-se a seção E – E da barragem B, apresentada na Figura 2. Os parâmetros geotécnicos da barragem B utilizados nas simulações foram advindos dos ensaios de laboratório disponibilizados pela empresa e estão apresentados na Tabela 2.

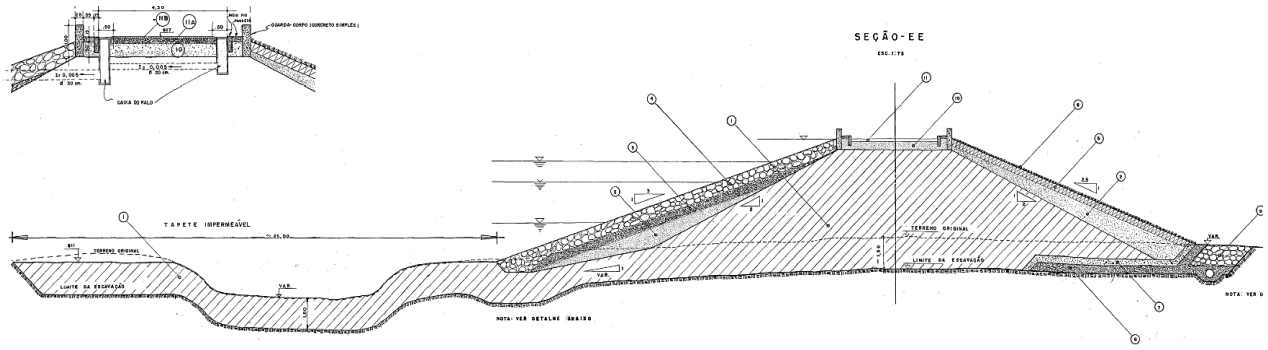


Figura 2. Seção E-E – Barragem B.

Tabela 2. Parâmetros geotécnicos usados nas simulações – Barragem B.

Material	**Peso específico (kN/m³)**	**Coesão (kPa)**	**Ângulo de atrito (°)**
Aterro da barragem	15,72	17,47	30,27
Fundação - aluvião	18,05	26,00	15,00
Fundação - Solo Residual	18,05	19,25	28,75
Areia - filtro	17,00	0,00	35,00
Enrocamento	18,00	0,00	35,00

Foram realizados 6 (seis) furos de sondagem a percussão em 2004, em duas seções transversais à barragem B, interceptando o maciço e fundação. Tais sondagens tiveram por objetivo a instalação de 6 indicadores de nível d'água (INA), sendo aproveitados para caracterizar os materiais durante a perfuração.

O material do maciço foi caracterizado como argila silto arenosa vermelha, consistência média. Na fundação, foram interceptados sedimentos aluvionares, constituídos por areias fofas a médias. Os resultados não são conclusivos na identificação de possíveis dispositivos de drenagem interna no maciço da barragem.

Na mesma campanha de campo e laboratório, foram executados ensaios de caracterização geotécnica e ensaios triaxiais do tipo CIU (*Consolidated Isotropic Undrained*), com corpos de prova previamente saturados, moldados a partir de amostras deformadas coletadas em trincheiras abertas no corpo do aterro.

Os ensaios triaxiais foram realizados em corpos de prova compactados na umidade ótima e grau de compactação na energia do Proctor Normal. Portanto, não são representativos da condição "*as is*" do maciço, pois não foram determinados em amostras indeformadas.

3 MÉTODOS

A elaboração da carta de risco consiste em análise de estabilidade de talude para obteção dos níveis de controle dos instrumentos instalados na estrutura. Usou-se os parâmetros geotécnicos apresentados na Tabela 1 (Barragem A) e Tabela 2 (Barragem B). Nas simulações numéricas, as análises foram realizadas no módulo Slope/W, do software GeoStudio 2021.4., utilizando o método de equilíbrio limite de Morgenstern-Price, e sem análise acoplada de percolação. Assim, a linha piezométrica foi ajustada manualmente na simulação para identificar, em cada instrumento da barragem, qual cota da água (nível de controle) no maciço resultaria no fator de segurança desejado. Os Fatores de Segurança são, respectivamente, iguais a 1,50, 1,30 e 1,10 para os níveis de "Atenção", "Alerta" e "Emergência", conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Níveis de Segurança dos Instrumentos.

NÍVEIS DE SEGURANÇA (NS)		FATORES DE SEGURANÇA DE REFERÊNCIA (FS)
Normal		FS ≥1,50
Atenção		1,30 ≤ FS < 1,50
Alerta		1,10 ≤ FS < 1,30
Emergência		FS <1,10

Na barragem A, os instrumentos foram separados em 8 seções, onde em cada seção estão instalados Indicadores de Nível d'Água (INA), ou Poços de Monitoramento (TSL), Piezômetros (PZ) ou Piezômetros elétricos (PZE). Os instrumentos de cada seção são: Seção 0: PZE-01 e PZE-02; Seção 1: INA-1 e INA-1A; Seção 1A: PZE-03 e PZE-04; Seção 2: TSL-1, TSL-3 e TSL-4; Seção 3: INA-100 e PZ-101; Seção 4: INA-2A; Seção 5: INA-103 e PZ-104; Seção 6: TSL-2 e INA-3A.

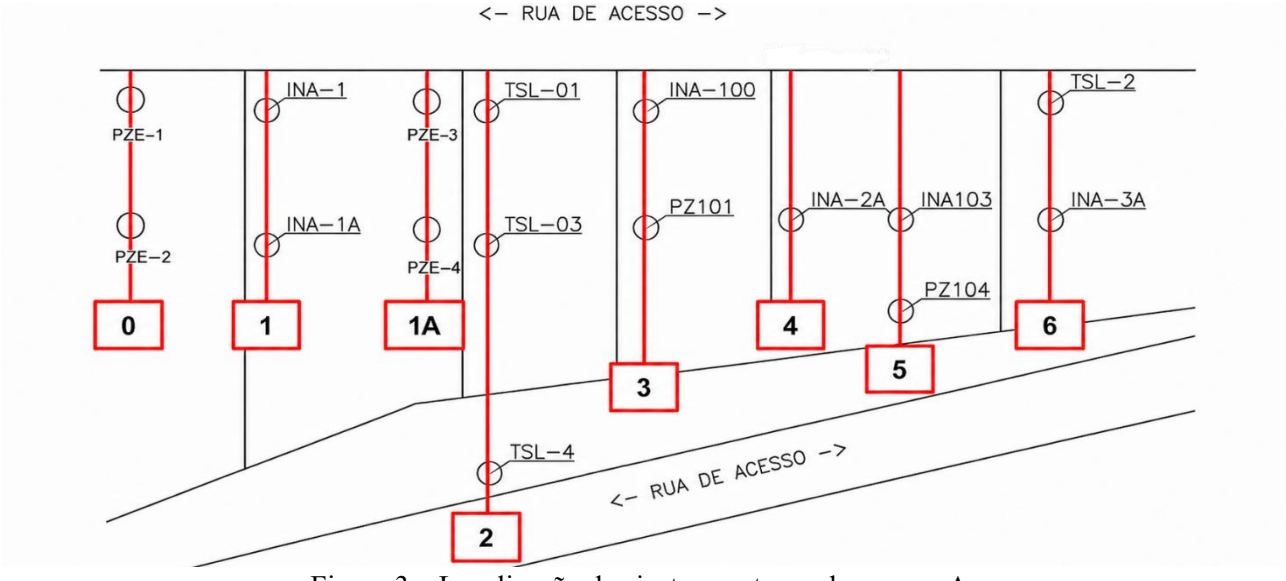


Figura 3 – Localização dos instrumentos na barragem A.

Contudo, como a barragem B é de baixa altura, cerca de 5,5 m apenas, a carta de risco não foi feita com base no Fator de Segurança (FS). Os níveis de controle foram definidos a partir da proximidade da superfície freática em relação à face do talude de jusante. Esse método justifica-se porque mesmo na simulação numérica para uma completa falha dos filtros, o Fator de Segurança não configura-se menor que 1,10 (Emergência). Os instrumentos na barragem, Indicadores de Nível d'água (INA), foram divididos em duas seções: Seção 1: INA-1, INA-2 e INA-3; Seção 2: INA-4, INA-5 e INA-6.

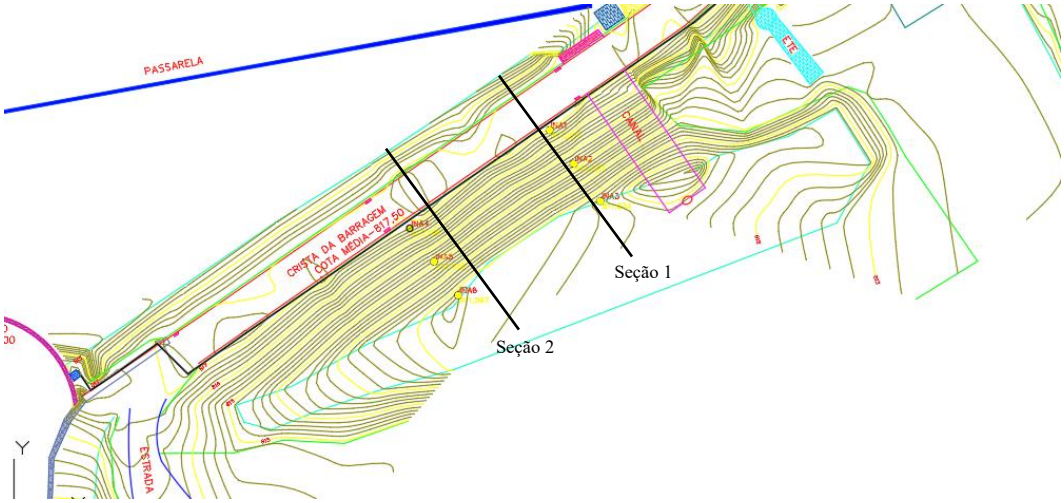


Figura 4 – Localização dos instrumentos na barragem B.

Nos instrumentos próximos à crista da barragem B, considerou-se apenas o nível de Atenção, correspondendo à leitura dos INAs na cota equivalente ao nível operacional do reservatório (815 m), uma vez que não se prevê a ocorrência de elevações superiores. Por isso, os níveis de Alerta e Emergência para estes instrumentos foram suprimidos da carta de risco. Além disso, o INA-6 foi soterrado em maio de 2023 e também foi excluído da carta de risco. Na Figura 5 ilustra-se, por exemplo, a seção 1 e os critérios dos níveis de controle. Abaixo estão as distâncias dos instrumentos em relação à face do talude de jusante:

- Próximos à crista (INA-1 e INA-4):
  - Atenção: nível operacional do reservatório na cota 815 m;
- Nos espaldares de jusante (INA-2 e INA-5):
  - Atenção: distante 1,0 m da face do talude;
  - Alerta: distante 0,75 m da face do talude;
  - Emergência: distante 0,50 m da face do talude;
- No pé do talude (INA-3):
  - Atenção: distante 0,75 m da face do talude;
  - Alerta: distante 0,50 m da face do talude;
  - Emergência: distante 0,30 m da face do talude;

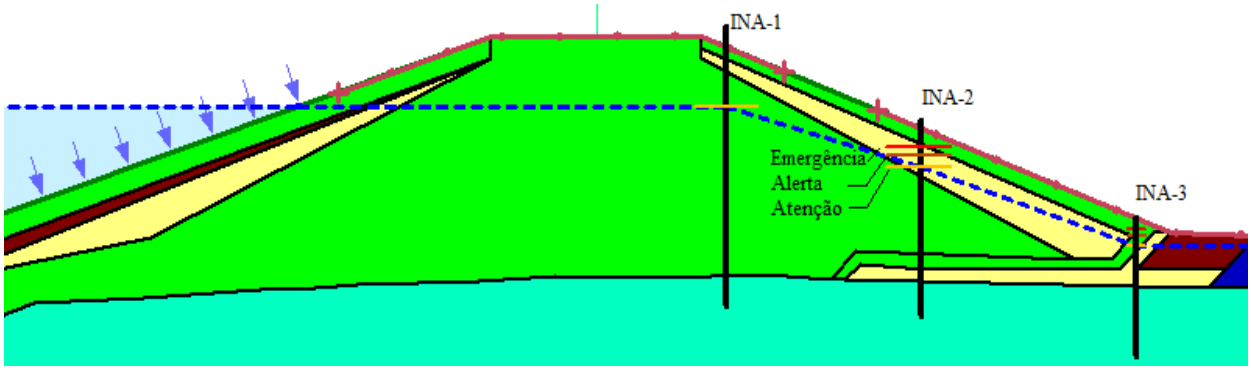


Figura 5. Critérios dos níveis de controle – seção 1 – Barragem B.

4 RESULTADOS

4.1 Barragem A

Em todas as seções, os níveis de "Atenção" e "Alerta" atingiram os fatores de segurança esperados. Entretanto, para o nível de "Emergência", o FS mínimo de 1,10 não foi alcançado. Neste caso, considerou-se como linha piezométrica crítica aquela que se aproxima até 1,0 m da face do talude, representando o limite operacional seguro antes de risco de instabilidade ou *piping*. Os níveis de controle de "Emergência" foram fixados nos valores máximos obtidos em cada análise, conforme Tabela 4 síntese. Na Figura 6 mostra-se a análise de estabilidade para o nível "Emergência" da seção 5.

Tabela 4. Fatores de Segurança das seções da barragem A.

Seção	Instrumentos	FS Atenção	FS Alerta	FS Emergência
0	PZE-01, PZE-02	1,506	1,302	1,157
1	INA-1, INA-1A	1,500	1,304	1,122
1A	PZE-3, PZE-4	1,506	1,302	1,157
2	TSL-1, TSL-3, TSL-4	1,500	1,303	1,111
3	INA-100, PZ-101	1,502	1,300	1,134
4	INA-2A	1,503	1,300	1,212
5	INA-103, PZ-104	1,503	1,308	1,231
6	TSL-2, INA-3A	1,502	1,301	1,123

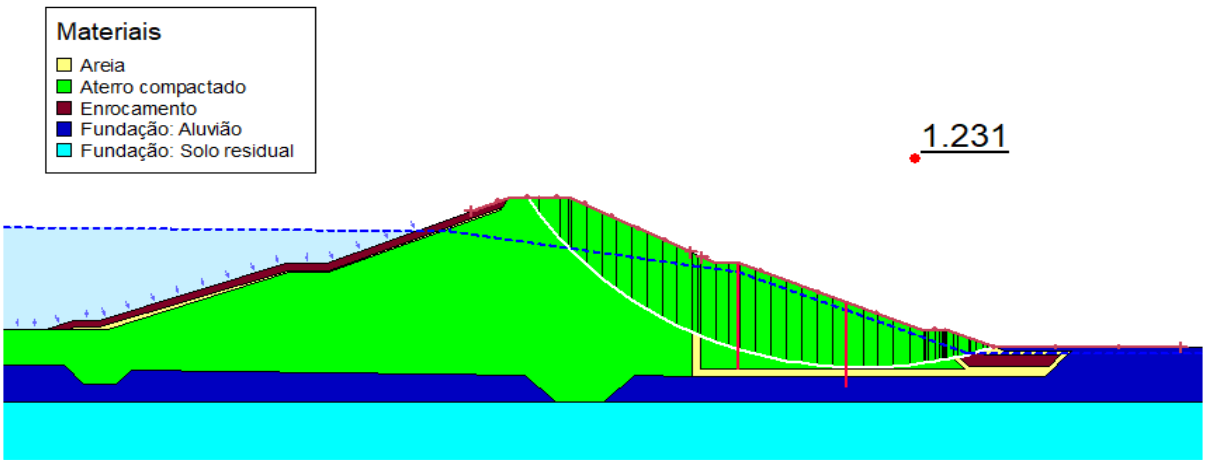


Figura 6. Nível de "Emergência" – Seção 5 (INA-103 e PZ-104) – Barragem A.

Na Tabela 5 apresenta-se as cotas correspondentes aos níveis de controle obtidos para cada instrumento ao atingir os Fatores de Segurança para "Atenção", "Alerta" e "Emergência".

Tabela 5. Níveis de referência dos instrumentos – barragem A.

Seção	Instrumento	Elevação (m)			Níveis de Controle		
		Boca do tubo	Terreno	Fundo	Atenção	Alerta	Emergência
					EL.(m)	EL.(m)	EL.(m)
0	**PZE-01**	800,15	800	777,45	794,2	796,8	797,5
	PZE-02	791,38	791	776,38	785,2	788	790
1	**INA-1**	800,61	800,50	788,50	795,49	795,9	797,5

	INA-1A	791,66	791,50	771,94	784,19	787,9	790,5
1A	**PZE-03**	800,16	800	775,16	794,2	796,8	797,5
	PZE-04	791,2	791	776,2	785,2	788	790
2	**TSL-1**	800,01	800,01	780,01	793,74	795,8	797,5
	TSL-3	790,37	790,37	773,37	784	787,4	790,2
	TSL-4	780,20	780,20	773,20	778,3	778,4	779
3	**INA-100**	800,1	799	758,89	794,7	796	797,5
	PZ-101	791	789,9	774,16	784,5	788,1	790,4
4	**INA-2A**	791,55	791,5	771,47	784,7	787,9	790,34
5	**INA-103**	791,32	790	777,04	786	788,9	790,33
	PZ-104	785,97	785,9	774,69	782	784,5	785
6	**TSL-2**	800,18	800,18	784,18	795,6	796,4	797,5
	INA-3A	791,71	790,3	-	784	787,6	790,5

4.2 Barragem B

A Seção 1 compreende instrumentos instalados na crista, talude de jusante e pé da barragem, respectivamente. As análises de estabilidade se basearam na Figura 5 para os níveis de controle de "Atenção", "Alerta" e "Emergência", resultando em fatores de segurança (FS), respectivamente, iguais a 2,255, 2,147 e 2,049. Os resultados indicam condição estável para todos os cenários, com redução gradual do FS conforme o aumento da cota da linha freática. Mesmo no nível de emergência, o FS permaneceu acima do mínimo exigido (Figura 7).

Na seção 2, os instrumentos estão localizados na crista e no espaldar de jusante. As análises também contemplaram os três níveis de controle da Figura 5, obtendo-se FS de 2,279 (Atenção), 2,240 (Alerta) e 2,218 (Emergência). Assim como na Seção 1, a estabilidade permanece satisfatória em todas as condições simuladas.

De acordo com a metodologia anteriormente estabelecida, foram obtidos os valores dos níveis de controle dos instrumentos para as seções instrumentadas. Na Tabela 7 apresenta-se esses valores.

Tabela 6. Fatores de Segurança das seções da barragem B.

Seção	**Instrumentos**	**FS Atenção**	**FS Alerta**	**FS Emergência**
1	INA-1, INA-2, INA3	2,255	2,147	2,049
2	INA-4; INA-5	2,279	2,240	2,218

Tabela 7 – Níveis de Referência dos Instrumentos – barragem B.

Seção	**Instrumento**	**Elevação (m)**			**Níveis de Controle**		
		Boca do tubo	**Terreno**	**Fundo**	**Atenção**	**Alerta**	**Emergência**
					EL.(m)	**EL.(m)**	**EL.(m)**
1	**INA-1**	817,297	816,9	809,26	815,00	-	-
	INA-2	814,587	814,3	808,97	813,27	813,60	813,83
	INA-3	811,834	811,5	807,82	811,00	811,25	811,45
2	**INA-4**	817,196	816,8	809,75	815,00	-	-
	INA-5	814,525	814,1	808,53	813,27	813,53	813,77
	INA-6	811,967	811,7	808,13	-	-	-

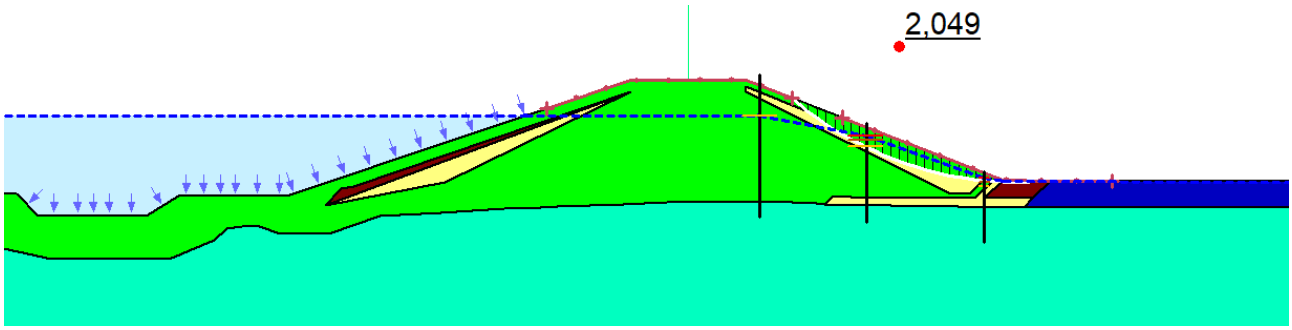


Figura 7. Nível de "Emergência" – Seção 1 (INA-1; INA-2 e INA-3) – Barragem B

5 CONCLUSÃO

No presente estudo apresentou-se a elaboração da Carta de Risco com base na determinação dos níveis de controle de "Atenção", "Alerta" e "Emergência" para duas barragens de diferentes alturas. A Barragem A, classificada como de grande porte (25,5 m), resultou nas simulações de estabilidade fatores de segurança correspondentes aos níveis de "Atenção" e "Alerta", não atingindo ao nível de "Emergência". Assim, as cotas instrumentais desse último nível foram definidas considerando a linha piezométrica posicionada a 1 m da superfície do talude de jusante.

Em contrapartida, a Barragem B, de pequeno porte (5,5 m), manteve fator de segurança superior ao mínimo exigido para o nível de "Atenção" (>1,50), mesmo sob condição crítica com o nível d'água atingindo o limite do talude de jusante. Dessa forma, os níveis de controle foram estabelecidos a partir das distâncias verticais entre a linha piezométrica medida pelos instrumentos e a face do talude, conforme parâmetros definidos em projeto.

As metodologias propostas asseguram que o documento resultante, a Carta de Risco, atue como um sistema técnico de alerta antecipado, essencial para a prevenção de acidentes e mitigação de danos em barragens de terra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA) (2016). *Manual do Empreendedor – Volume IV: Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência (PAE).* Brasília.

BRASIL (2010). Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Institui a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Diário Oficial da União, Brasília.

Freitas, C.M.; Silva, M.A. (2019). *Work accidents which become disasters: mine tailing dam failures in Brazil*. Revista Brasileira de Medicina do Trabalho, 17(1), p. 21–29. https://doi.org/10.5327/Z1679443520190405.