

Explorando Incertezas na Estabilidade de Barragens de Terra: Abordagem Probabilística

Antonino Neves Ripardo

Mestrando em Geotecnia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, ninoripardo1@gmail.com

Vanda Tereza Costa Malveira

Doutora em Recursos Hídricos, Universidade Estadual Vale do Acaraú, Fortaleza, Brasil, vanda_tereza@uvanet.br

RESUMO: Estudos têm apontado que métodos determinísticos para avaliação da estabilidade de taludes não são suficientes para tratar, de forma completa, das incertezas relativas aos parâmetros do solo, e a Engenharia Geotécnica utiliza de abordagens probabilísticas para aprimorar análises de estabilidade. O objetivo deste artigo é aplicar esta lógica para julgar as condições de segurança e estabilidade a partir de dez exemplos de barragens de terra do semiárido, considerando a condição de carregamento de regime permanente, e comparando os resultados com os fatores de segurança (FS) definidos em projeto. Foram obtidos os relatórios de estudos geotécnicos de cada barragem, para a coleta de parâmetros de estabilidade, tais como peso específico, coesão e ângulo de atrito, bem como elementos gráficos ilustrativos das seções dos maciços, para gerar modelagens numéricas. Para simular a realidade geotécnica, na qual os dados podem ser referenciados como variáveis contínuas, em cada exemplo, os parâmetros obtidos foram combinados aleatoriamente, possibilitando o cálculo de diversos FS por método determinístico, compondo amostragens. Foi aplicada a abordagem probabilística em todos os casos, utilizando a distribuição normal, para calcular a probabilidade referente ao risco de se obter FS menores que os definidos em projeto. A análise resultou em probabilidades maiores que zero em oito dos dez casos, pontuando a confiabilidade e maior abrangência das investigações geotécnicas como fatores importantes para a segurança geral de barragens de terra.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Risco, Retro Análise de Estabilidade, Probabilidade.

ABSTRACT: Studies show that the existing deterministic methods that are used to check slope stability can't completely resolve the uncertainty related to the soil properties on their own, and probabilistic approaches are being included as complements into Geotechnic Engineering projects. This paper aims to apply this same argument to judge the stability and security conditions of ten studied embankments from the semiarid region considering normal operational condition, comparing the obtained results with the factors of safety (FS) adopted in their projects. To collect the shear resistance parameters, such as unit weight, cohesion and internal friction, there were obtained official geotechnic studies reports, which include results from soil experiments. Also, there were obtained cross section illustrations of each dam. Geotechnic parameters may be treated as continuous variables, so to reflect this matter, the collected data were randomly combined in each case, and by using deterministic methods, there were obtained various FS, composing sample spaces for each dam. The applied probabilistic approach was normal distribution, and there were obtained probability values referred to the risk of occurrence of FS lower than the ones adopted in project. The calculated probabilities were higher than zero in eight of the ten cases, pointing reliability and greater geotechnic studies both as important factors to embankment dam security.

KEYWORDS: Risk Analytics, Stability Retro Analytics, Probability.

1 INTRODUÇÃO

As barragens desempenham um papel imprescindível na região do semiárido, provendo a segurança hídrica de boa parte da região, marcada pelo clima extremo e sensível à mudanças com o agravamento da crise climática global. As atividades de monitoramento destas obras retornam dados relevantes quanto à sua

operabilidade, vida útil e, principalmente, segurança estrutural, com destaque para a estabilidade. No caso das barragens de terra, seus maciços apresentam uma variabilidade natural de parâmetros, o que os torna suscetíveis a modificações. Isto gera incertezas que não podem ser ignoradas durante as análises de estabilidade. (Monteiro, 2021).

Os métodos determinísticos tradicionais de verificação de estabilidade retornam um único fator de segurança (FS), que é comparado com os valores mínimos recomendados para cada hipótese de carregamento considerada, mas eles, por si só, não refletem de forma completa a estabilidade de um maciço, tampouco incluem as incertezas quanto aos parâmetros em seus cálculos. Por isso, a Engenharia Geotécnica tem aprimorado estas verificações, implementando novos métodos de análise que incluem abordagens probabilísticas, com o intuito de superar as lacunas de imprecisão devido a estas incertezas (Sandoval, 2012).

Partindo-se do pressuposto que os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo (coesão, ângulo de atrito e peso específico) podem ser trabalhados como variáveis contínuas, já que podem assumir infinitos valores dentro de um intervalo definido, o mesmo pode-se dizer quanto aos FS, que são genericamente calculados pela razão entre as forças resistentes e solicitantes de um maciço (DAS, 2007). Desta forma, ao gerar uma amostragem com possíveis valores de FS, calculados com parâmetros reais obtidos em ensaios de laboratório, é possível realizar uma análise de risco de estabilidade aplicando uma função densidade de probabilidade, que retorna valores de probabilidade referentes à ocorrência de um determinado evento.

O presente trabalho tem como principal objetivo julgar as condições de segurança quanto à estabilidade a partir de dez barragens de terra do semiárido, por meio da aplicação de uma abordagem probabilística que se utiliza da distribuição normal em amostragens de variáveis aleatórias de FS, calculados numericamente em modelagens para refletir as condições de regime permanente, e tendo como base de comparação os valores definidos originalmente em projeto. Para obtenção destas amostragens, este trabalho inclui uma etapa de combinação aleatória dos parâmetros de resistência do solo, obtidos das bases de dados oficiais de cada barragem, individualmente, para o cálculo dos FS.

As probabilidades resultantes refletem certo grau de risco relacionado à ocorrência de valores de FS menores que os relatados em projeto, não necessariamente indicando uma ameaça quanto à instabilidade global das obras, mas chamando atenção para possíveis situações de segurança, devido às incertezas contidas nos parâmetros de resistência. Pretende-se, portanto, demonstrar a utilidade informacional que este tipo de abordagem pode oferecer em atividades de revisão periódica de barragens, enriquecendo seus relatórios com dados de fácil interpretação para toda a sociedade envolvida com estes empreendimentos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O processo envolvido no desenvolvimento da pesquisa pode ser seccionado em cinco partes, tal qual mostra a figura 1. Os dados oficiais coletados dos projetos de cada barragem foram utilizados para formar séries aleatórias e serem aplicados em modelagens numéricas de estabilidade que refletiam as condições de regime permanente. Os FS originados das modelagens compuseram as amostragens de cada caso, para serem analisadas sob a distribuição normal, resultando em valores de probabilidade quanto ao risco de obtenção de FS menores que os referenciados em seus projetos. Cada uma destas etapas está ilustrada na figura 1.

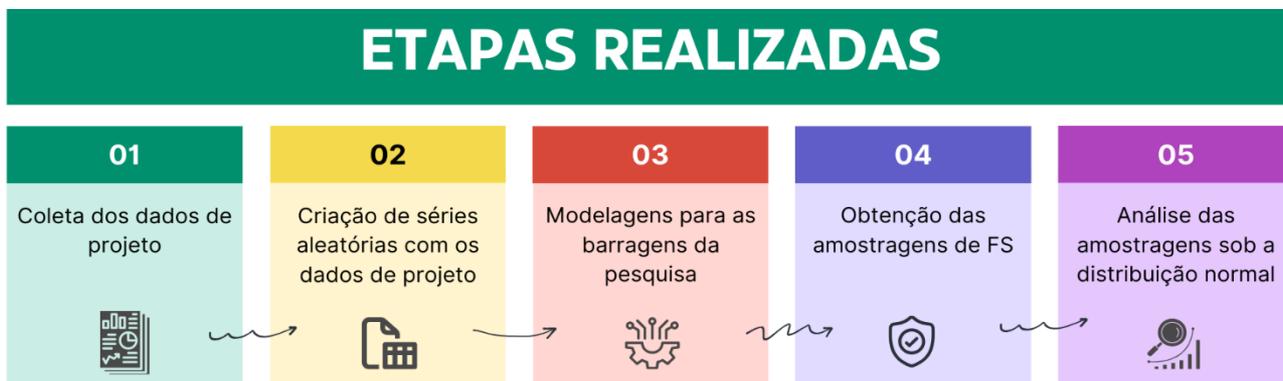


Figura 1. Fluxograma das etapas realizadas durante a pesquisa (Autor, 2024).

2.1 Parâmetros de entrada

Foram selecionados dez exemplos de barragens de terra do semiárido, escolhidas com base na disponibilidade de seus projetos virtualmente, e inclui barragens dos tipos homogênea, zoneada e mista com enrocamento. Os dados coletados foram os parâmetros de entrada necessários para as modelagens numéricas, sendo estes as ilustrações de suas seções transversais e os parâmetros de resistência do solo dos maciços, coesão (c'), ângulo de atrito (ϕ') e peso específico (γ), dados obtidos por meio de ensaios laboratoriais em solo, descritos nos relatórios de estudos geológico-geotécnicos dos projetos de cada barragem.

Os dados coletados dos relatórios serviram como base para gerar as combinações aleatórias de parâmetros para cada barragem individualmente, de forma a simular a variabilidade destes parâmetros em campo, devido às incertezas oriundas da natureza dos solos. O número de combinações foi definido pela quantidade de dados extraídos em cada caso. Os valores dos parâmetros, por sua vez, dependeram do tipo de material componente das zonas dos maciços em questão, dispostos da seguinte forma: zonas compostas por solo foram definidas por método de amostragem aleatória dos valores obtidos nos relatórios; zonas rochosas e de fundação foram definidas uniformemente pela geração de números aleatórios dentro de intervalos. Tais intervalos foram estipulados com base nos conhecimentos gerais quanto às propriedades físicas dos materiais em questão, incluídos na tabela 1. Foram consideradas como zonas rochosas os enrocamentos e drenos de pé, enquanto as fundações foram generalizadas em todos os casos como fundações permeáveis de areia média.

Tabela 1. Definição dos parâmetros de resistência quanto à zona de material analisada (Autor, 2024).

Material	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Maciço de solo	Amostragem aleatória dos valores obtidos dos relatórios		
Zona em rocha	22 a 24	0	45
Zona de fundação	19 a 22	0	30 a 33

2.2 Etapa de análise determinística e abordagem probabilística

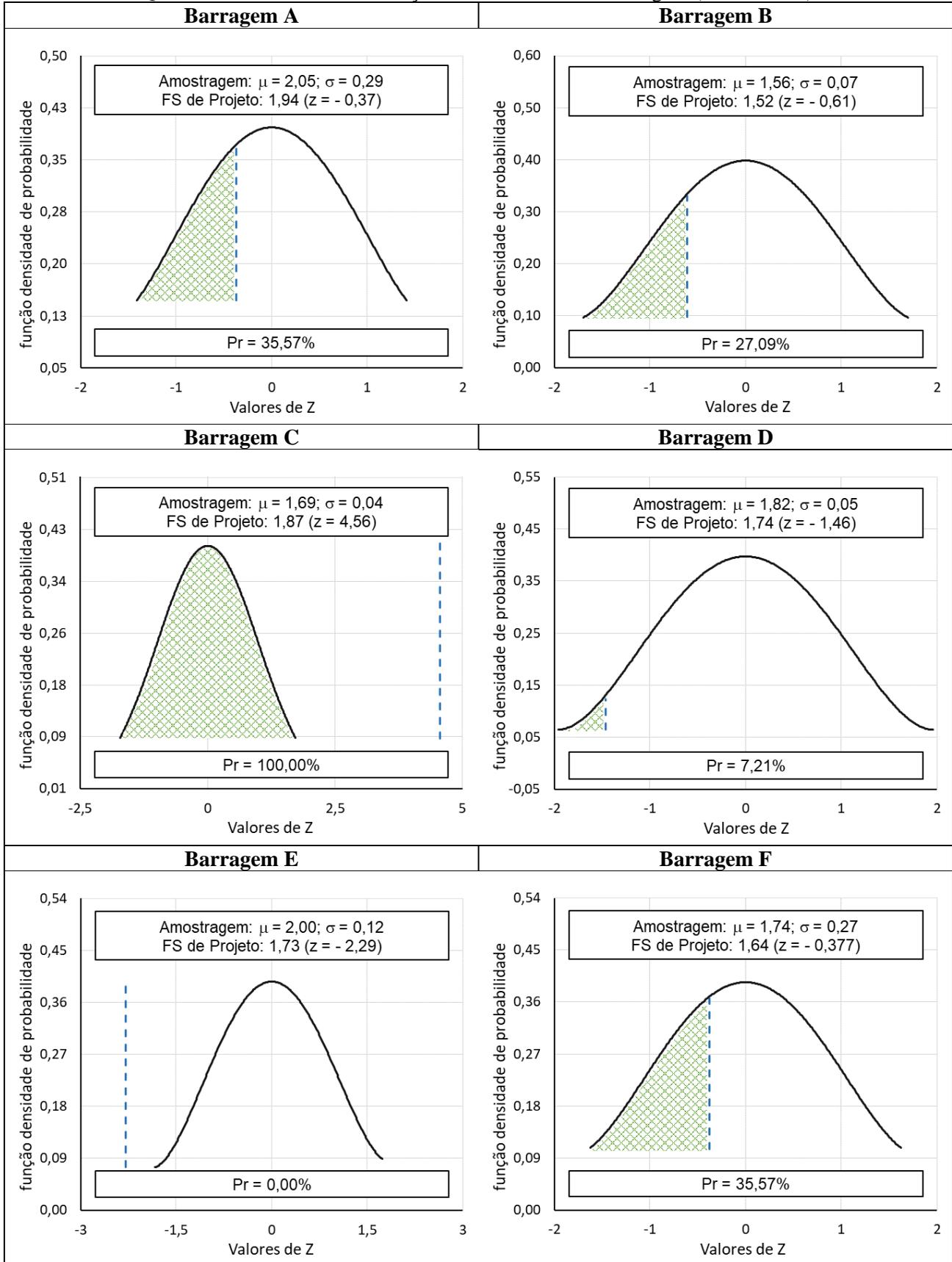
Após a definição das combinações para todos os casos, deu-se início às modelagens de análise de estabilidade determinísticas, através do método de Morgenstern Price, feitas em 2D, buscando simular a condição de regime permanente. Todas as combinações foram inseridas manualmente em seu respectivo modelo, cada uma resultando num valor de FS, representando as condições mais críticas de estabilidade possível, dados os valores aplicados, e formando os espaços amostrais de cada barragem para a abordagem probabilística.

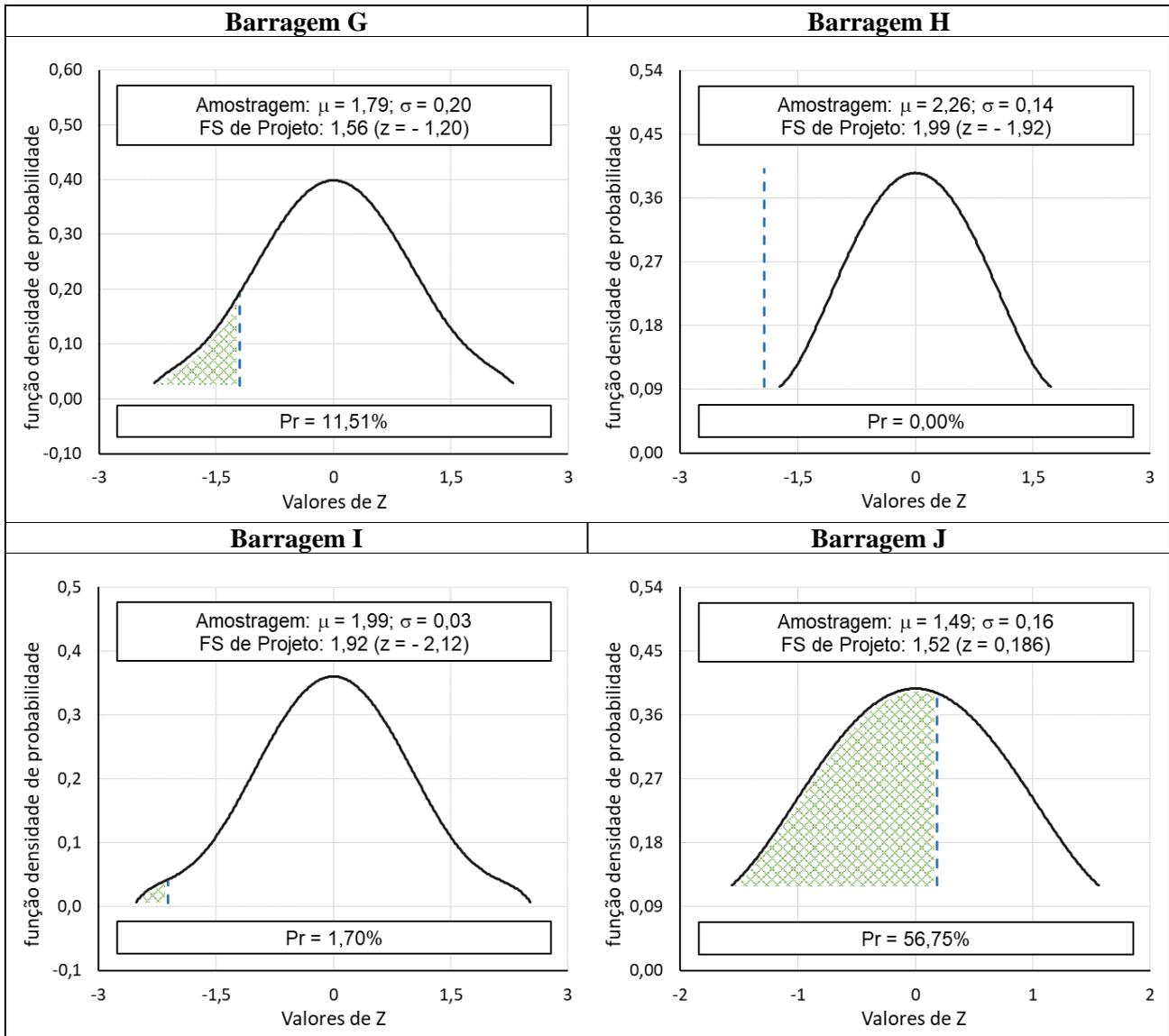
A escolha da distribuição normal para este trabalho se deu pela natureza aleatória contínua das variáveis em questão, e também pelo fato de que esta é uma das distribuições de probabilidade mais usadas em aplicações geotécnicas. Para sua abordagem, cada espaço amostral teve os valores de suas médias (μ) e desvios padrão (σ) destacados, para em seguida serem gerados os gráficos de suas respectivas funções densidade de probabilidade (fdp), com eixo x representando as variáveis das amostragens e o eixo y os próprios valores resolvidos destas funções. Com o intuito de facilitar a resolução, foi realizado o processo de “padronização” das variáveis, que as converte em variáveis padrão (Z), permitindo o uso da tabela de soluções da distribuição normal padrão, e anulando a necessidade de integrar as fdps para obter seus resultados.

3 RESULTADOS

Graficamente, os resultados de probabilidade quanto à ocorrência de determinados eventos numa distribuição normal são representados numa área delimitada abaixo da curva normal entre um intervalo requerido, que no caso deste trabalho, trata-se do risco de obtenção de valores de FS menores que os assinalados em projeto para a condição de regime permanente. O quadro 1 contém os gráficos de distribuição normal gerados para as amostragens de todos os exemplos de barragens (denominadas pelas letras de A a J), em que as probabilidades obtidas são representadas pelas suas respectivas áreas hachuradas limitadas à esquerda de retas verticais azuis, indicando o valor “padronizado” (z) do FS de projeto.

Quadro 1. Gráficos de distribuição normal de cada amostragem (Autor, 2024).





A figura 2 destaca por cores o grau de risco das probabilidades calculadas, em que probabilidades maiores que 50%, consideradas como altas para esta abordagem, são representadas pelas colunas laranjas, probabilidades entre 10% e 50%, consideradas médias, são indicadas pela cor verde, e probabilidades menores que 10%, consideradas baixas, possuem colunas de cor azul.

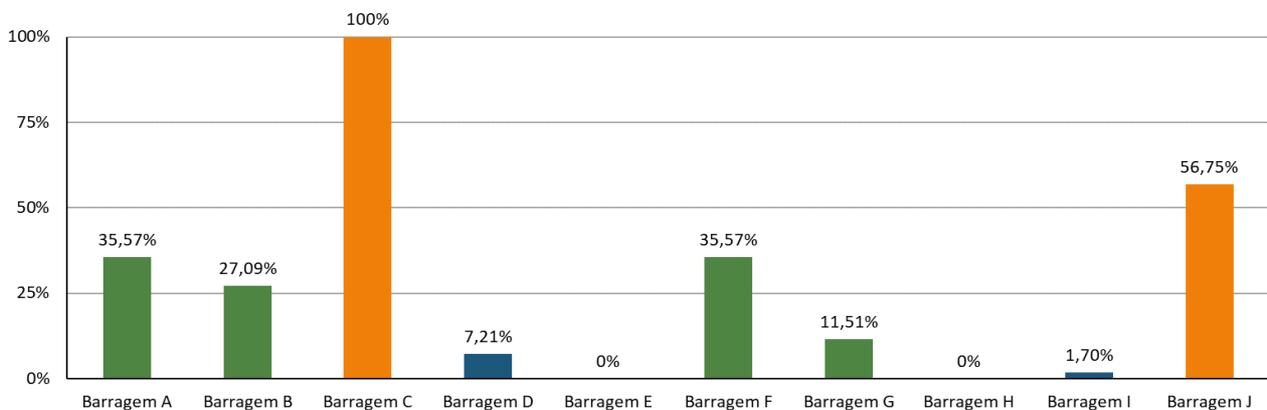


Figura 2. Risco de obtenção de FS menores que os de projeto (Autor, 2024).

4 CONCLUSÕES

Perante a metodologia adotada, que envolve a análise de resultados de simulações criadas com dados geotécnicos reais, descritos nos projetos dos empreendimentos em questão, podem ser levantados alguns pontos derivados dos resultados da abordagem probabilística, especialmente no que se trata da confiabilidade dos parâmetros obtidos via investigações de campo e ensaios em solo.

Dentre todos os casos, apenas duas das barragens avaliadas retornaram um risco nulo de que sejam obtidos FS menores que os de projeto, as barragens “E” e “H”, indicando que seus projetos apresentam coerência com suas respectivas amostragens, nas quais a abordagem foi realizada. Em contrapartida, o caso da barragem “C” reflete uma situação oposta, em que o risco é total, ou seja, todos os FS da amostra para este exemplo são menores que o relatado em seu projeto. Como a metodologia utilizou-se dos próprios parâmetros de projeto, que são oriundos do relatório de estudos geotécnicos, isto pode caracterizar uma confiabilidade menor quanto a estes dados, ou até mesmo uma possível imprecisão na divulgação dos resultados/cálculos das investigações.

Quanto aos outros casos, a maioria deles tratam-se de riscos com valores maiores que 10%, com exceção dos casos das barragens “D” e “I”, que apresentaram valores considerados baixos. De qualquer forma, o fato que há certo risco ligado a estes exemplos indica a necessidade de se realizar atividades de monitoramento voltadas a revisões de estabilidade das barragens em operação, regularmente, para identificação de possíveis eventos que causem impacto em seus maciços, reduzindo seus quadros de segurança.

Constatou-se ainda, que alguns casos apresentaram uma ampla base de dados, importante para a geração de amostragens mais precisas com a realidade. Outros casos, porém, não contaram com este mesmo benefício, e seus espaços amostrais resultantes apresentaram baixa variabilidade. Sabe-se que, dentre os parâmetros de resistência do solo, a coesão e o ângulo de atrito são os que detém o maior grau de impacto nos resultados de estabilidade, tornando desfavorável para um projeto de barragem a realização de poucos ensaios que retornam estes dados, tais como os ensaios de cisalhamento ou similares. Portanto, é importante enfatizar sobre a importância da ampliação de campanhas de investigação geotécnica, especialmente para aumentar a precisão das análises de estabilidade.

Os métodos adotados neste trabalho, bem como a abordagem probabilística realizada, buscam enfatizar os riscos vinculados às incertezas de parâmetros numa análise de estabilidade em maciços de terra, realizando uma comparação entre os valores de FS de projeto e amostragens de FS gerados por simulações realistas. Desta forma, recomenda-se a incorporação destes tipos de abordagem nas Revisões Periódicas de Segurança de Barragens (RPSB), do Protocolo Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), visto que seus resultados se mostram úteis para toda a sociedade envolvida em empreendimentos como os avaliados nesta pesquisa, desde os próprios investidores e trabalhadores, até a população de abrangência destas obras, com resultados de fácil representação e entendimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap), pelo apoio financeiro durante a pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, V.C., Filho, R.J.A.T., Puppi, R.F.K., Johann, A.D.R., Rose, J.L., Izzo, R.L.S. (2016) Taludes de Barragem: Análises Determinísticas e Probabilísticas – Estudo de Caso. *Geotecnia*, v. 136, p.49-60.
- Assis, H.B., Nogueira, C.G. (2023) Comparative study of deterministic and probabilistic critical slip surfaces applied to slope stability using limit equilibrium methods and the First-Order Reliability Method. *Soil and Rocks*, 46 (2), p.1-12.
- Azevedo, G.F., Carvajal, H. E. M., Souza, N.M. (2018) Análise de Ameaça de Deslizamentos pelo Uso de Abordagem Probabilística Aplicada a um Modelo de Estabilidade de Taludes Tridimensional. *Geociências*, 37 (3), p.655-668.

- Das, B. M. (2007) *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*, 6ª ed., Thompson Learning, São Paulo, SP, Brasil, 430 p.
- Fernandes, R.B., Sieira, A.C.C.F., Filho, A.P.M. (2022) Methodology for risk management in dams from the event tree and FMEA analysis. *Soil and Rocks*, 45(3), p.1-15.
- Fonseca, A.V., Fonseca, A., Oliveira, S. (2021) Fatores de segurança determinísticos em avaliação de estabilidade de barragens de rejeitos: uma reflexão. *Geotecnia*, v. 151, p.53-76.
- Lira, B.S., Sousa, M.N.M., Junior, O.F.S., Silvani, C., Nóbrega, E.R., Santos, G.C. (2020) Mass movements in the Northeast region of Brazil: a systematic review. *Soil and Rocks*, 43(4), p.1-17.
- Mendoza, C., Lozada, C. (2023) Influence of intrinsic variability in anthropic slopes. *Soil and Rocks*, 46 (3), p.1-12.
- Monteiro, F.F., Carneiro, A.A., Matos, Y.M.P., Alelvan, G.M. (2021) Análise probabilística e determinística da estabilidade de taludes em barragem de terra do estado do Ceará. *As Engenharias agregando Conhecimento em Setores Emergentes de Pesquisa e Desenvolvimento*, p.211-221.
- Penna, D.C.R., Rocha, F.F., Assis, A.P., Drummond, G. (2017) Influência da variabilidade dos parâmetros geotécnicos na probabilidade de ruptura de barragens. In: II Seminário de Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeitos – SGBR 2, Belo Horizonte. *II SGBR, CBDB*. v. 1, p. 1-13.
- Ramirez, R.G., Reis, J.C. (2015) Segurança e confiabilidade em estruturas de contenção: Estudo de caso. *Geotecnia*, v. 138, p.37-60.
- Sandoval, M.A.P., Romanel, C. (2012) *Análise Determinística e Probabilística da Estabilidade de Taludes*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro / PUC-Rio, 73-74.
- Schnaid, F., Mello, L.G.F.S., Dzialoszynski, B. S. (2020) Guidelines and recommendations on minimum factors of safety for slope stability of tailing dams. *Soils and Rocks*, 43 (3), p. 369-395.
- Silveira, V.L. (2023) Aplicação de Métodos Probabilísticos para Avaliação de Estabilidade de uma Barragem de Terra. *Revista Brasileira de Engenharia de Barragens, Comitê Brasileiro de Barragens*, 14, p. 23-29.