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/COBRAMSEG2026.1/45

Inferência Bayesiana para Projetos de Barragens em Climas Tropicais

Darym Júnior Ferrari de Campos
Engenheiro Geotécnico, Progen S. A., MG, Brasil, darymferrari@gmail.com

Fernanda Rocha dos Reis Sol
Engenheira Geotécnica, Vale S. A., MG, Brasil, fernanda.Sol@vale.com

Murilo Pereira Borges
Engenheiro Geotécnico, Vale S. A., MG, Brasil, murilo.borges1@vale.com

Denis Duda Costa
Engenheiro Geotécnico, Progen S. A., MG, Brasil, denis.costa@progen.com.br

Stephanie Yumi Yokozawa
Engenheiro Geotécnico, Vale S. A., MG, Brasil, stephanie.yokozawa@vale.com

Paulo César Riquelme Gomide
Engenheiro Geotécnico, Vale S. A., MG, Brasil, Paulo.Cesar.Gomide@vale.com

Marcelo Franco Porto
Professor, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, Brasil, marcelo@etg.ufmg.br

Giovanna Alelvan
Professor, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, Brasil, giovannaalelvan@etg.ufmg.br

RESUMO: A variabilidade natural dos solos e das condições climáticas em regiões tropicais impõe desafios relevantes ao projeto de barragens de terra, especialmente na estimativa dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, como coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ). Tradicionalmente tratados de forma determinística e conservadora, esses parâmetros raramente incorporam a incerteza associada a diferentes campanhas de investigação. Este trabalho propõe uma abordagem baseada em inferência bayesiana para atualização contínua dos parâmetros geotécnicos, integrando evidências provenientes de três campanhas de ensaios triaxiais CIUsat realizadas em solo residual de filito localizado sob o corpo da barragem. As campanhas contemplaram diferentes condições sazonais e estados de carregamento, permitindo incorporar variabilidade climática e estrutural ao modelo. A inferência bayesiana resultou em distribuições posteriores consistentes, fornecendo envelopes estatísticos de resistência, regiões de alta densidade (HDI 95%) e intervalos de predição (PI 5%–95%), em contraste com estimativas pontuais determinísticas. A aplicação dos parâmetros inferidos em análises de estabilidade indicou fatores de segurança compatíveis com critérios normativos e probabilidade de falha nula. Os resultados demonstram que a abordagem bayesiana amplia a transparência e a robustez na avaliação da incerteza geotécnica em projetos de barragens.

PALAVRAS-CHAVE: Inferência Bayesiana, Barragens de Terra, Incerteza Geotécnica, Estabilidade de Taludes.

ABSTRACT: The natural variability of soils and climatic conditions in tropical regions poses significant challenges to the design of earth dams, particularly in the estimation of shear strength parameters such as cohesion (c) and friction angle (ϕ). Traditionally treated through deterministic and conservative approaches, these parameters seldom incorporate the uncertainty associated with multiple investigation campaigns. This study proposes a Bayesian inference framework for the continuous updating of geotechnical parameters, integrating evidence from three CIU triaxial test campaigns performed on a residual phyllite soil layer located beneath the dam body. The campaigns considered different seasonal conditions and loading states, enabling the incorporation of climatic and structural variability into the model. The Bayesian approach produced consistent posterior distributions, providing statistical strength envelopes, high-density intervals (95% HDI),

and prediction intervals (5%–95% PI), in contrast to deterministic point estimates. The application of the inferred parameters in slope stability analyses resulted in safety factors compliant with regulatory criteria and a zero probability of failure. The findings demonstrate that Bayesian inference enhances transparency and robustness in the assessment of geotechnical uncertainty in earth dam projects.

KEYWORDS: Bayesian Inference, Earth Dams, Geotechnical Uncertainty, Slope Stability.

1 INTRODUÇÃO

A caracterização dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos é um dos pilares para a análise de estabilidade em projetos de engenharia geotécnica, especialmente em estruturas críticas como barragens. Em materiais altamente intemperizados, como os solos residuais de filito, as incertezas associadas às condições de umidade, estado de tensões e variabilidade natural tornam desafiadora a definição de valores representativos de coesão e ângulo de atrito, por exemplo. De acordo com Wang et al. (2016), as incertezas geotécnicas são representadas por essa variabilidade natural dos materiais que compõem o solo. Outro possível fator causador de incertezas seria o aproveitamento ou realização de investigações em períodos anteriores às escavações e/ou aterros, como é o caso de barragens. Assim, abordagens tradicionais baseadas em regressão linear, embora amplamente utilizadas, podem não capturar toda a incerteza envolvida na estimativa desses parâmetros.

Neste estudo, investiga-se uma camada superficial de solo residual de filito, localizada diretamente sob o corpo de uma barragem de terra. Essa camada atua como interface crítica de transmissão de esforços entre o aterro e o maciço natural. Foram analisados os dados de três campanhas de ensaios triaxiais CIUsat, realizadas em diferentes épocas e condições sazonais. A metodologia adotada compreende a comparação entre uma abordagem determinística tradicional, baseada em regressão linear, e uma abordagem probabilística via inferência bayesiana para estimativa dos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

O presente artigo tem como objetivo avaliar os ganhos técnicos de como o uso da inferência bayesiana pode contribuir para a representação mais robusta da incerteza nos parâmetros geotécnicos, destacando sua aplicabilidade em um estudo de análise de estabilidade de talude de uma barragem de contenção de rejeitos e sua contribuição na tomada de decisão mais confiável em contextos geotécnicos.

2 METODOLOGIA

O A metodologia deste estudo foi estruturada em etapas sequenciais, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 1.

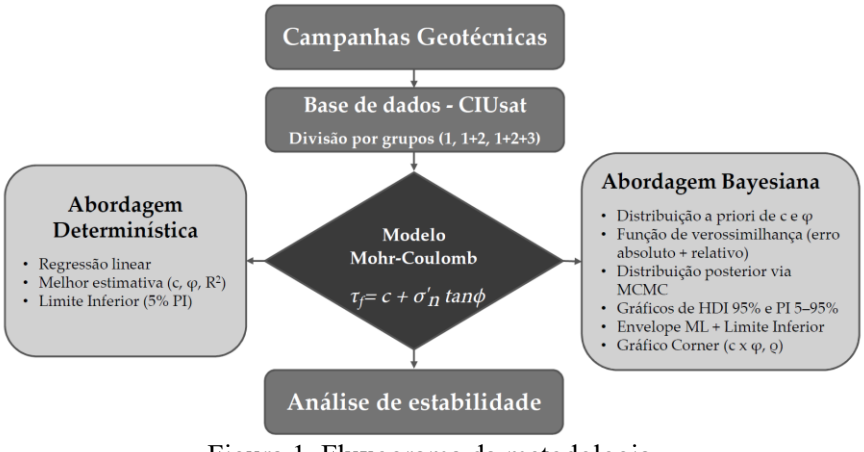


Figura 1. Fluxograma da metodologia.

De acordo com o fluxograma, utilizaram-se três campanhas de ensaios triaxiais CIUsat, realizadas em diferentes condições sazonais e operacionais. Os dados foram organizados em campanhas acumulativas (1, 1+2 e 1+2+3), tendo como modelo de resistência adotado o critério de MC. A análise determinística foi realizada por meio de regressão linear clássica para estimar a envoltória de ruptura. Do outro lado, na abordagem bayesiana, definiu-se uma função de verossimilhança com ponderação híbrida entre resíduos absolutos e relativos, e priors para coesão, ângulo de atrito e desvio padrão. A amostragem foi realizada por

MCMC com 10.000 iterações, resultando em envelopes probabilísticos, HDI 95% e intervalos de predição (PI 5–95%). A estrutura metodológica foi inspirada em Lezica e Contreras (2023), que demonstraram a eficácia da inferência bayesiana na estimativa de parâmetros geotécnicos e na captura da variabilidade estatística de dados acumulativos de campo e laboratório.

A camada superficial de solo residual de filito foi escolhida como foco da modelagem probabilística por sua alta sensibilidade, variabilidade e influência direta na estabilidade global da estrutura. Os parâmetros inferidos foram posteriormente utilizados em simulações no software Slide, da Rockscience®, comparando os efeitos das diferentes abordagens na avaliação do fator de segurança (FS).

4 ABORDAGENS DETERMINÍSTICAS E PROBABILÍSTICAS NA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

4.1 Estimativa Determinística dos Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento

Nesta etapa, empregou-se a regressão linear clássica pelo método dos mínimos quadrados para a estimativa dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, com base no critério de MC. As análises foram conduzidas separadamente para três conjuntos de dados acumulativos (Campanha 1, Campanha 1+2 e Campanha 1+2+3) referentes a ensaios realizados em solo residual de filito.

Ao todo, foram utilizados 59 ensaios triaxiais CIUsat, abrangendo uma ampla faixa de tensões normais efetivas, o que permitiu gerar envoltórias de resistência representativas para cada estágio das campanhas. A partir dos ajustes lineares, foram determinados o “best estimate” e “low bound” (estimativa inferior de resistência), considerando a extrapolação do limite inferior com base no ajuste aos valores mais conservadores dos dados. A Figura 2 a seguir apresenta os resultados obtidos para cada conjunto de dados analisado.

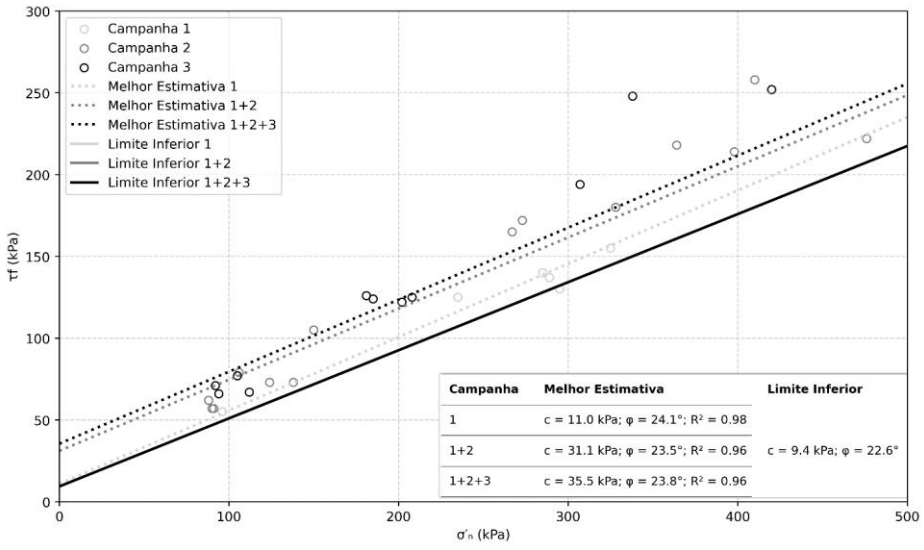


Figura 2. Estimativa dos parâmetros de resistência utilizando regressão linear convencional.

Observa-se que, à medida que os dados das campanhas são acumulados, ocorre um aumento progressivo nos valores de coesão estimados para os envelopes “best estimate”. O envelope da Campanha 1 apresentou os menores valores de resistência, refletindo as condições mais críticas da camada superficial de solo residual de filito durante o período chuvoso. Já os envelopes das Campanhas 1+2 e 1+2+3 indicam parâmetros mais elevados, compatíveis com as condições mais secas e adensadas das campanhas posteriores.

Os envelopes do tipo “low bound” permaneceram inalterados ao longo das três campanhas, uma vez que os ajustes lineares conservadores foram definidos com base nos pontos de menor resistência observados. Dessa forma, a incorporação de dados mais resistentes nas Campanhas 2 e 3 não influenciou o limite inferior da envoltória, que continuou a representar o cenário mais desfavorável identificado nos ensaios. Essa estratégia assegura coerência nos critérios de segurança e garante que as análises de estabilidade considerem, de maneira conservadora, as condições críticas do maciço investigado.

4.2 Estimativa Probabilística dos Parâmetros de Resistência via Inferência Bayesiana

Para representar explicitamente a incerteza associada aos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo residual de filito, adotou-se a inferência bayesiana como metodologia complementar à abordagem determinística, utilizando os mesmos conjuntos de dados. O modelo de resistência seguido foi o de MC, com parâmetros c, ϕ e στ, tratados como variáveis aleatórias. A função de verossimilhança foi construída com base em um modelo híbrido de resíduos, visando um ajuste balanceado, mitigando a superestimação de incertezas (caso fosse apenas residual relativo) e subestimação do intervalo (caso fosse apenas absoluto). Os priors foram definidos como não informativos, respeitando intervalos físicos coerentes a partir do conhecimento prévio do tipo de solo. A amostragem dos parâmetros foi realizada por meio do algoritmo de MCMC, método que permite explorar a distribuição posterior de forma estocástica, sendo descartadas as iterações iniciais (burn-in) para eliminar a influência das condições iniciais e garantir a convergência das cadeias.

Os resultados foram expressos graficamente por meio dos envelopes de máxima verossimilhança, regiões de alta densidade (HDI 95%), intervalos de predição (PI 5%–95%) e envelopes conservadores (“low bound”) baseados no percentil inferior da distribuição de τf. A seguir, são apresentados nas Figuras 3 a 5 os resultados da inferência bayesiana para cada conjunto de dados, por meio dos envelopes de resistência gerados a partir das distribuições posteriores, acompanhados dos gráficos corner plot, que ilustram a distribuição conjunta dos parâmetros estimados (c, ϕ, στ) e suas respectivas correlações.

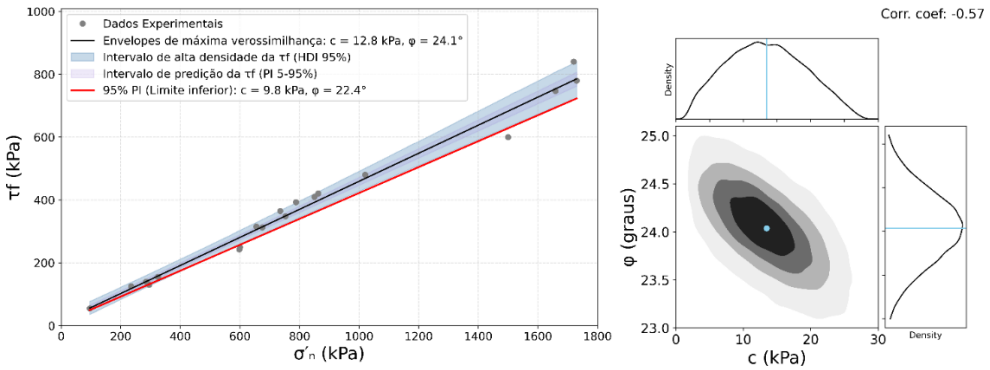


Figura 3. Campanha 1: envelopes de resistência e gráfico de canto (inferência bayesiana).

O envelope de resistência inferido para a Campanha 1 apresentou parâmetros de máxima verossimilhança c=12,7 kPa e ϕ=24,1°. O HDI 95% foi relativamente estreito para ϕ, indicando uma boa capacidade dos dados em restringir esse parâmetro, enquanto o intervalo de predição (PI 5%–95%) envolveu satisfatoriamente a dispersão dos dados experimentais. O envelope “low bound” foi estimado com c=9,8 kPa e ϕ=22,4°, representando uma condição conservadora para uso em análise de estabilidade. Ao lado, o gráfico corner plot correspondente evidencia uma distribuição levemente assimétrica para a coesão, com cauda à direita, enquanto a distribuição de ϕ é centrada e praticamente simétrica. A correlação entre c e ϕ foi moderadamente negativa (−0,57), demonstrando que os parâmetros ainda se compensam parcialmente, típico de conjuntos com menor amplitude de tensões e influência de dados menos informativos.

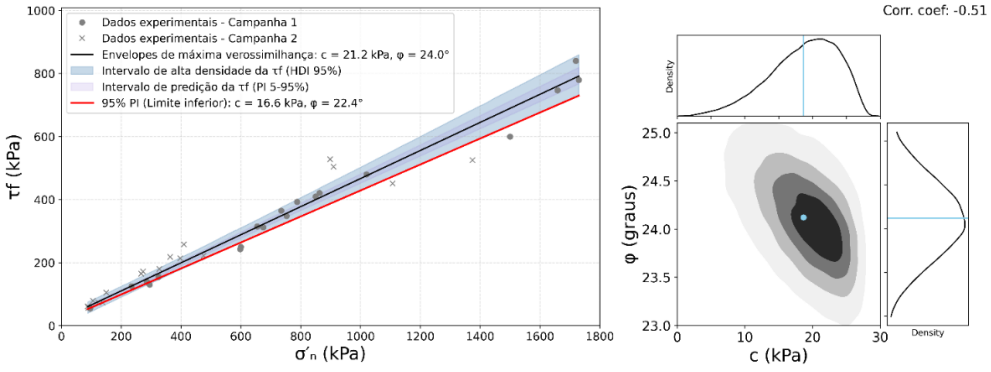


Figura 4. Campanha 1+2: envelopes de resistência e gráfico de canto (inferência bayesiana).

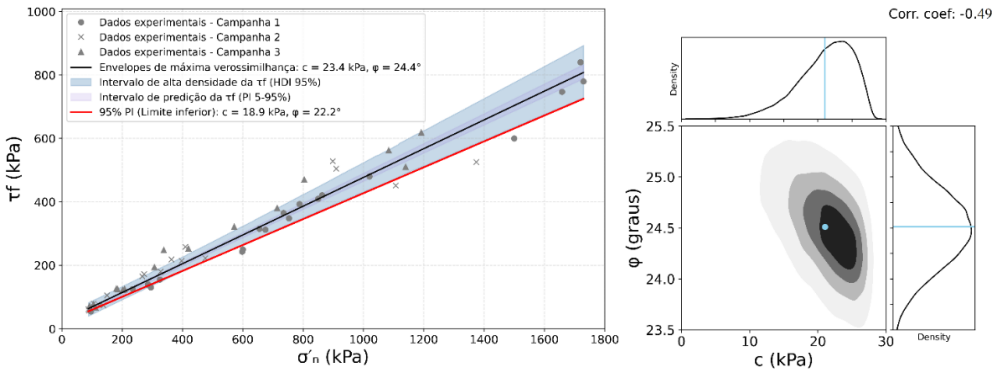


Figura 5. Campanha 1+2+3: envelopes de resistência e gráfico de canto (inferência bayesiana).

As análises bayesianas das Campanhas 1+2 e 1+2+3 apresentaram resultados semelhantes em termos de parâmetros de resistência ao cisalhamento. Em ambas, os envelopes de máxima verossimilhança indicaram valores elevados e consistentes para a coesão (c=21,2 e 23,4 kPa, respectivamente), tendo aumentado significativamente em relação à Campanha 1. Já o ângulo de atrito interno (ϕ=24,0° e 24,4°), mostra consistência do atrito interno mesmo com adição de mais dados. Essa estabilidade estatística também se refletiu nos envelopes "low bound", com valores de ϕ praticamente idênticos (ϕ=22,4° e 22,2°) e coesões próximas (16,6 e 18,9kPa), além de correlações negativas entre c e ϕ muito próximas (–0,51 e –0,50). Os gráficos corner plot confirmam esse comportamento, revelando distribuições semelhantes em forma e dispersão, com caudas levemente assimétricas, com cauda direita mais longa para coesão e alta concentração para ϕ. Os valores indicam que quanto mais dados, menor a necessidade de compensação entre parâmetros. Fisicamente, os dados estão cada vez mais capazes de distinguir a contribuição individual de c e ϕ.

Embora os resultados indiquem que os dados das Campanhas 1+2 já capturam de forma satisfatória a variabilidade estatística do solo analisado, a adição da Campanha 3 contribuiu para reforçar a confiabilidade e estabilidade dos parâmetros inferidos. Esse comportamento é característico da inferência bayesiana, que se beneficia da incorporação progressiva de novos dados para atualizar e refinar suas estimativas. Assim, ainda que haja um ponto de convergência nos resultados, novas campanhas de investigação continuarão sendo relevantes, especialmente quando associadas a mudanças no carregamento, nas condições de saturação ou no tempo, fortalecendo a base probabilística do modelo adotado.

4.3 Análise de Estabilidade com Base nos Parâmetros Estimados

A partir da geometria elaborada para o modelo (Figura 6) a seção geotécnica do perfil do solo foi gerada a partir de interpolações das campanhas executadas pela mesma empresa, contribuindo na elaboração do modelo geológico geotécnico. Além disso, é possível identificar as camadas de solo, aterro da barragem e o seu sistema de drenagem interna. A barragem foi projetada em aterro de solo compactado, por método convencional, e possui 61 metros de altura, taludes com 10m de altura, bermas com 5m de largura e inclinação entre bermas de 2H:1V. O software para a realização das análises de estabilidade foi o Slide da Rocsience®.

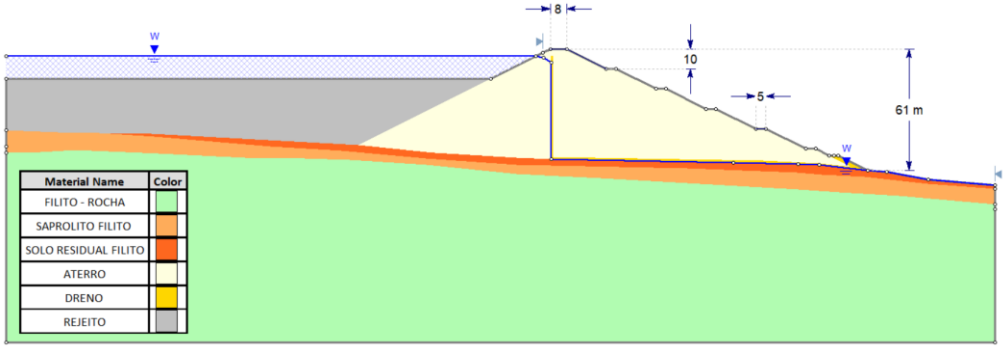


Figura 6. Modelo utilizado para as análises de estabilidade.

A metodologia utilizada para as simulações numéricas de análise de estabilidade, foi o método do equilíbrio limite, que consiste na subdivisão em fatias e a equação de equilíbrio de forças e momentos (Gerscovich, 2016). Adicionlamente, embora existam outros métodos analíticos e de modelagem física e numérica para análise de taludes, o método do equilíbrio limite continua sendo um método largamente utilizado na da engenharia geotécnica (Wang, Z., Li, A., & Yang, T., 2024). Estes métodos de equilibrio limite, quanto utilizados, possibilitam a verificação do FS com base, e para a presente pesquisa foram considerados os métodos de equilíbrio limite propostos por Bishop, Morgenstern-Price e Spencer, sendo considerado sempre o menor valor de FS entre os três métodos. Foram considerados que os materiais são isotrópicos e homogêneos, e adotadas superfícies de busca do tipo não-circular (Cuckoo Search), para superfície crítica de ruptura. Para a caracterização do comportamento mecânico dos solos, adotou-se MC. Os parâmetros utilizados nas análises encontram-se na Tabela 1. Vale destacar que a camada de residual de filito foi a única que variou os parâmetros.

Tabela 1. Parâmetros de resistência para análise de estabilidade – Solo Residual de Filito.

Material	**Campanha 1**			**Campanha 1+2**			**Campanha 1+2+3**		
	γ (kN/m³)	**c' (kPa)**	**ϕ' (º)**	**γ (kN/m³)**	**c' (kPa)**	**ϕ' (º)**	**γ (kN/m³)**	**c' (kPa)**	**ϕ' (º)**
Solo residual de filito **(Convencional – ML)**	18	11	24.1	19	31.1	23.5	18.6	35.5	23.8
Solo residual de filito **(Convencional – LB)**	18	9.4	22.6	19	9.4	22.6	18.6	9.4	22.6
Solo residual de filito **(Bayesianano – ML)**	18	13.53 ± 5.72	24.03 ± 0.43	19	18.73 ± 5.0	24.12 ± 0.48	18.6	21.12 ± 4.03	24.51 ± 0.42
Solo residual de filito **(Bayesianano – LB)**	18	9.8	22.4	19	16.6	22.4	18.6	18.9	22.2
Saprolito de filito	19	28	33	19	28	33	19	28	33
Filito – Rocha	20	60	35	20	60	35	20	60	35
Aterro	22	10	35	22	10	35	22	10	35
Filtro	19	5	35	19	5	35	19	5	35
Rejeito	22	0	20	22	0	20	22	0	20

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos a partir das análises de estabilidade foram organizados para comparar os desempenhos das três campanhas, considerando tanto a abordagem determinística convencional quanto a inferência bayesiana. As análises foram conduzidas para dois cenários: “Best estimate” (envelope médio ou de máxima verossimilhança) e “Low bound” (limite inferior conservador). A Tabela 2 apresenta os fatores de segurança resultantes, bem como as estatísticas de variabilidade associadas às análises probabilísticas.

Tabela 2. Parâmetros de resistência para análise de estabilidade – Solo Residual de Filito.

Analises	**Camp.**	**Abordagem Det.**	**Abordagem Bayesiana**
Melhor estimativa (ML)	1	FoS = 1.58	Mean FoS=1.62 (SD=0.048 / Range=1.49-1.75 / PoF=0%)
	1+2	FoS = 1.74	Mean FoS=1.67 (SD=0.035 / Range=1.56-1.77 / PoF=0%)
	1+2+3	FoS = 1.75	Mean FoS=1.69 (SD=0.025 / Range=1.61-1.76 / PoF=0%)
Limite inferior (LB)	1	FoS = 1.50	FoS = 1.50
	1+2	FoS = 1.52	FoS = 1.59
	1+2+3	FoS = 1.51	FoS = 1.61

De modo geral, observou-se um aumento gradual e coerente dos fatores de segurança com o acréscimo de dados nas campanhas. Na abordagem convencional, o FoS “best estimate” passou de 1,58 (Campanha 1) para 1,75 (Campanha 1+2+3). Na abordagem bayesiana, as médias dos FoS seguiram a mesma tendência, variando de 1,62 para 1,69, com probabilidade de falha nula (PoF = 0%) em todos os cenários. Os valores de desvio padrão e amplitude (range) indicam redução da variabilidade estatística com o aumento do banco de dados, refletindo maior confiabilidade nas estimativas com base na evidência acumulada.

No cenário “low bound”, a abordagem bayesiana apresentou FS ligeiramente superiores à convencional (1,61 contra 1,51 na Campanha 1+2+3), o que pode ser atribuído ao fato da análise bayesiana considerar a distribuição estatística de resistência como um todo, e não apenas os valores mínimos observados. Ambos os

métodos forneceram resultados consistentes, com FS > 1,5 em todos os casos. Os valores estão de acordo com recomendações como a ANCOLD (2012) e a GISTM (2020), que sugerem FS mínimos entre 1,3 e 1,5 para condições drenadas sob operação normal, além de indicarem probabilidades de falha <1% como referência para projetos com alto potencial de dano. No contexto brasileiro, a norma ABNT NBR 13028:2024 também estabelece diretrizes para a verificação de estabilidade de taludes, incluindo critérios distintos para análises drenadas e não drenadas. Considerando que os ensaios utilizados neste estudo foram do tipo CIUsat, os fatores de segurança obtidos mantêm-se dentro de faixas coerentes com os limites recomendados.

Embora as análises apresentadas neste estudo tenham sido baseadas principalmente no critério de ruptura de MC, a estrutura metodológica adotada permite a utilização de outros modelos de resistência ao cisalhamento sem alterações significativas no procedimento estatístico. A inferência bayesiana é particularmente flexível nesse aspecto, pois pode ser aplicada a diferentes formas funcionais que descrevem a relação entre tensão normal efetiva e resistência ao cisalhamento. Com o objetivo de ilustrar essa capacidade de adaptação metodológica, foi realizada uma simulação adicional utilizando um modelo potencial não linear ($\tau f = A \cdot \sigma_n'^{B}$) para representar a resistência ao cisalhamento, em que A e B são parâmetros do modelo obtidos por inferência bayesiana. Diferentemente dos parâmetros do critério de MC, esses coeficientes não possuem significado físico direto relacionado às propriedades do material, mas permitem ajustar uma curva de resistência capaz de representar adequadamente a tendência observada nos dados experimentais. A Figura 7 apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação desse modelo utilizando o conjunto das campanhas 1+2+3.

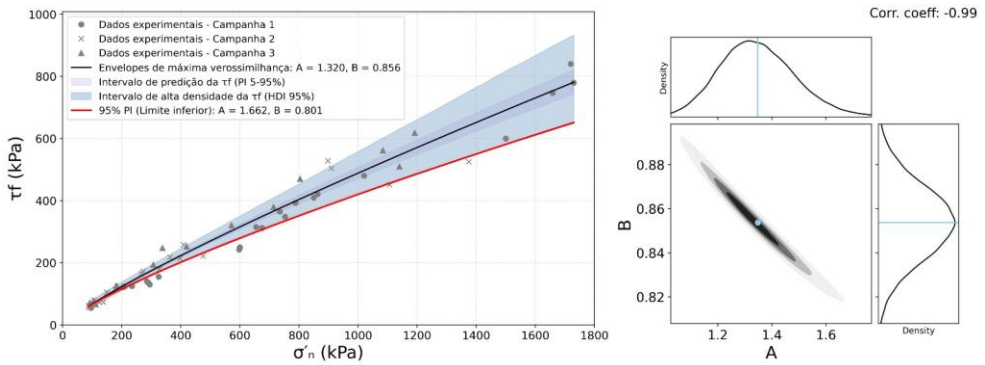


Figura 7. Campanha 1+2+3: Envelope de resistência (inferência bayesiana - modelo potencial não linear).

O envelope de máxima verossimilhança resultou em valores de A=1.320 e B=0.856, enquanto o intervalo de predição de 95% foi utilizado para definir um envelope conservador de resistência, representado pela curva inferior. A região sombreada entre os percentis de 5%-95% representa a faixa de incerteza associada às previsões do modelo, capturando de forma satisfatória a dispersão dos dados experimentais. Observa-se que o modelo potencial reproduz adequadamente a tendência crescente da resistência ao cisalhamento com o aumento da tensão normal efetiva, mantendo coerência com os dados experimentais das três campanhas. A forma não linear da curva permite capturar variações na rigidez do envelope de resistência ao longo da faixa de tensões analisada, o que pode ser particularmente útil em situações onde a relação linear do critério de MC não representa plenamente o comportamento do material.

Embora os parâmetros A e B não representem diretamente propriedades físicas do solo, o modelo potencial pode ser utilizado para gerar curvas de resistência equivalentes que podem servir como entrada em análises de estabilidade ou estudos paramétricos. Esse exercício demonstra que a abordagem bayesiana empregada neste trabalho não está limitada a um modelo constitutivo específico, podendo ser adaptada para analisar outros critérios de resistência ou relações empíricas entre tensão normal e resistência ao cisalhamento.

A integração entre abordagens determinísticas e probabilísticas reforça os princípios defendidos por Bowles (2001) e Whitman (1984), que destacam a importância de tratar incertezas não como ruídos a serem ignorados, mas como elementos centrais na tomada de decisão geotécnica fundamentada em risco. Enquanto a abordagem convencional fornece resultados rápidos e de fácil interpretação, a inferência bayesiana complementa o processo ao incorporar formalmente a incerteza, fornecer envelopes de resistência com significância estatística e apoiar decisões mais transparentes e alinhadas com os princípios de gerenciamento de risco. Essa dualidade metodológica oferece ao projetista não apenas maior robustez, mas também a capacidade de justificar tecnicamente as escolhas de parâmetros adotados.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma comparação estruturada entre abordagens determinísticas e probabilísticas para a estimativa de parâmetros de resistência ao cisalhamento de um solo residual de filito, com base em três campanhas triaxiais CIUsat realizadas sob diferentes condições sazonais e estruturais. Essa camada analisada foi determinante para o desempenho global da estrutura.

Os resultados demonstraram que a abordagem bayesiana foi eficaz em quantificar a variabilidade dos parâmetros geotécnicos, permitindo a construção de envelopes de resistência mais realistas e interpretáveis. A adição progressiva de dados entre as campanhas revelou estabilidade estatística nas estimativas, com redução de variância e convergência dos valores médios e conservadores (low bound), sem comprometer a representatividade física dos resultados. Quando aplicados a análises de estabilidade de taludes, os parâmetros inferidos produziram fatores de segurança compatíveis com diretrizes nacionais e internacionais, com destaque para a probabilidade de falha nula nos cenários probabilísticos avaliados.

A integração entre métodos determinísticos e bayesianos reforça a importância de modelos que não apenas estimem parâmetros médios, mas que incorporem de forma transparente a incerteza geotécnica ao processo de projeto. A abordagem utilizada contribui para uma engenharia de barragens mais crítica, adaptável e fundamentada em evidências, sobretudo em contextos de solos tropicais com elevada variabilidade natural. O uso contínuo de dados, aliado ao potencial de atualização da inferência bayesiana, pode fortalecer práticas de projeto mais seguras, informadas e coerentes com os desafios modernos da engenharia de barragens.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Vale pelo apoio técnico e institucional prestado durante o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD) (2012). Guidelines on the Consequence Categories for Dams, ANCOLD, Sydney.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 13028. *Projetos de barragens de mineração – Procedimento*. Rio de Janeiro.

Bowles, D.S. (2001) ALARP evaluation: Using cost effectiveness and disproportionate cost to justify risk reduction, Proceedings of the Australian Committee on Large Dams (ANCOLD). Conference on Dam Safety, ANCOLD, Sydney, pp. 89–106.

International Council on Mining and Metals (ICMM) (2020) Global Industry Standard on Tailings Management, ICMM, London.

Lezica, I.V. and Contreras, L.F. (2023) Application of Bayesian methods to the estimation of shear strength parameters for slope stability analysis of a TSF, *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 17(1), pp. 3–20.

Samat, S. (2016) *Thermomechanical modelling of ground response under environmental actions*. Doctoral Thesis. UPC, Departament d'Enginyeria Civil y Ambiental.

Wang, Y.; Cao, Z.; Li, D. (2016) Probabilistic Approaches For Geotechnical Site Characterization And Slope Stability Analysis. Hong Kong: Springer.

Wang, Z., Li, A., & Yang, T. (2024) Research on upper bound limit analysis of slope stability in open-pit mine based on least square principle. Heliyon, 10(2024), e37005.

Whitman, R.V. (1984) Evaluating calculated risk in geotechnical engineering, *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(2), pp. 145–188.