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/COBRAMSEG2026.4/7

Análise Comparativa de Representação das Poropressões e Superfícies Potenciais de Ruptura na Estabilidade de Taludes de Barragem de Terra

Alana Stern Retzlaff
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, Brasil, alanasternr@gmail.com

Karina Retzlaff Camargo
Professora da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande, Brasil, karinacamargo@furg.br

Antônio Marcos de Lima Alves
Professor da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande, Brasil, antonioalves@furg.br

RESUMO: Este trabalho avalia o impacto de diferentes abordagens metodológicas no Fator de Segurança (FS) da Barragem do Chasqueiro, uma estrutura de terra homogênea, localizada no extremo sul do Brasil. A análise de estabilidade foi realizada no *software Slide®,* focando no talude de montante sob nível normal do reservatório, da seção mais alta da barragem. A metodologia consistiu em comparar três métodos de representação das poropressões: a Linha de Fluxo Superior (LFS) de Casagrande, admitindo-se condição hidrostática; uma linha piezométrica automática definida pelo *software* a partir da LFS; e a análise de fluxo por Elementos Finitos (FEA) em regime permanente. Paralelamente, comparou-se a pesquisa de superfícies de ruptura circulares e não circulares. Os resultados indicaram que os cenários modelados com análise de fluxo via FEA apresentaram valores de FS superiores aos dos métodos simplificados. A LFS hidrostática estimou poropressões mais elevadas, reduzindo a resistência ao cisalhamento e o FS. Conclui-se que, embora o FEA e as superfícies não circulares representem um aprimoramento técnico realista, a abordagem simplificada (LFS de Casagrande com superfícies circulares) resulta em valores menores de FS. Isso evidencia o caráter conservador do método tradicional.

PALAVRAS-CHAVE: Segurança de Barragens, Taludes, Fator de Segurança.

ABSTRACT: This study evaluates the impact of different methodological approaches on the Safety Factor (SF) of the Chasqueiro Dam, a homogeneous earth structure. The stability analysis was performed using the Slide® software, focusing on the upstream slope under normal reservoir level conditions, at the highest section of the dam. The methodology consisted of comparing three methods for representing pore pressures: the upper flow line (LFS) based on Casagrande's construction and assuming hydrostatic conditions; an automatic piezometric line defined by the software from the LFS; and steady-state groundwater flow analysis using the Finite Element Method (FEA). Concurrently, the search for circular and non-circular potential failure surfaces was compared. The results indicated that the scenarios modeled with FEA flow analysis presented higher SF values than the simplified methods. The hydrostatic LFS estimated higher pore pressures, thereby reducing shear strength and SF. It is concluded that, although FEA and non-circular surfaces represent a realistic technical improvement, the simplified approach (Casagrande's LFS with circular surfaces) results in lower SF values. This highlights the conservative nature of the traditional method.

KEYWORDS: Dam Safety, Slopes, Safety Factor.

1 INTRODUÇÃO

As barragens de terra desempenham um papel fundamental na gestão de recursos hídricos, garantindo o abastecimento em períodos de estiagem e atuando no suporte a atividades socioeconômicas. Contudo, o envelhecimento natural e a manutenção inadequada dessas infraestruturas podem representar significativos riscos, o que torna imprescindível a realização de avaliações contínuas de segurança estrutural e operacional (ANA, 2023). Inserida nesse contexto, a Barragem do Chasqueiro, localizada em Arroio Grande, no extremo sul do estado do Rio Grande do Sul (RS), opera há quase cinco décadas e constitui uma obra de vital importância para a atividade orizícola na região sul do estado.

A avaliação da segurança geotécnica dessas estruturas inclui a análise de estabilidade de seus taludes, um procedimento complexo onde a água atua como um dos principais agentes deflagradores de instabilidade (Marques Filho e Geraldo, 1998). O fluxo interno gera poropressões que afetam a tensão efetiva e, consequentemente, reduzem a resistência ao cisalhamento do maciço (Pinto, 2006). Para a determinação do Fator de Segurança (FS), é essencial a correta representação dessas poropressões, que pode ser conduzida por métodos analíticos tradicionais, como a construção gráfica da Linha de Fluxo Superior (LFS) de Casagrande (1937) (associada a uma rede de fluxo também aproximada, ou admitindo-se condição hidrostática a favor da segurança), ou mediante abordagens numéricas modernas, a exemplo do Método dos Elementos Finitos.

Em paralelo à modelagem do fluxo, a análise de estabilidade pelo princípio do equilíbrio limite (Abramson *et al*., 2001) é diretamente condicionada à geometria adotada para a superfície potencial de ruptura. Embora a pesquisa por superfícies circulares seja amplamente empregada na prática da engenharia, a verificação por meio de geometrias não circulares representa um aprimoramento técnico, proporcionando uma simulação mais realista das condições de falha, principalmente em solos não homogêneos. A escolha dos métodos de representação das poropressões e do formato da superfície crítica pode gerar variações nos resultados, impactando o diagnóstico do nível de segurança da barragem.

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo avaliar o impacto de diferentes abordagens metodológicas no Fator de Segurança (FS) da Barragem do Chasqueiro, uma estrutura de terra homogênea, ao realizar uma análise comparativa entre métodos distintos para a representação das poropressões no maciço e dos modos potenciais de ruptura, utilizando o *software Slide*® .

2 CENÁRIO DE ESTUDO

A Barragem do Chasqueiro, estudada por este trabalho, localiza-se em Arroio Grande, cidade do extremo sul do Rio Grande do Sul (Figura 1). Conforme o Decreto nº 1.148, de 26 de maio de 1994, a barragem e seu respectivo sistema de irrigação constituem obras públicas sob a administração da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). A gerência dessa estrutura na universidade é de competência da Agência de Desenvolvimento da Lagoa Mirim (ALM). De acordo com a ALM (2023), a Barragem do Chasqueiro encontra-se em operação desde 1983 e tem a função de abastecer a rede principal do Distrito de Irrigação do Arroio Chasqueiro (DIBAC). A barragem possui 1200 m de extensão e três seções transversais típicas: (i) até a cota 26 m; (ii) entre as cotas 26 e 32 m; e (iii) acima da cota 32 m, conforme mostra a Figura 2.

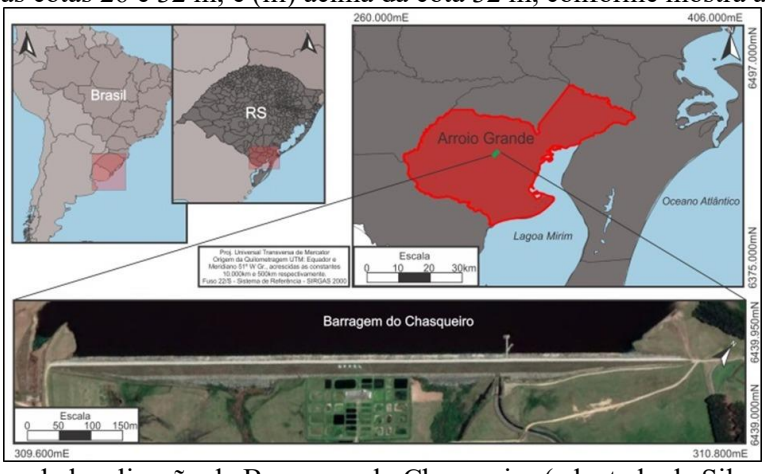


Figura 1. Mapa de localização da Barragem do Chasqueiro (adaptado de Silva *et al.*, 2023).

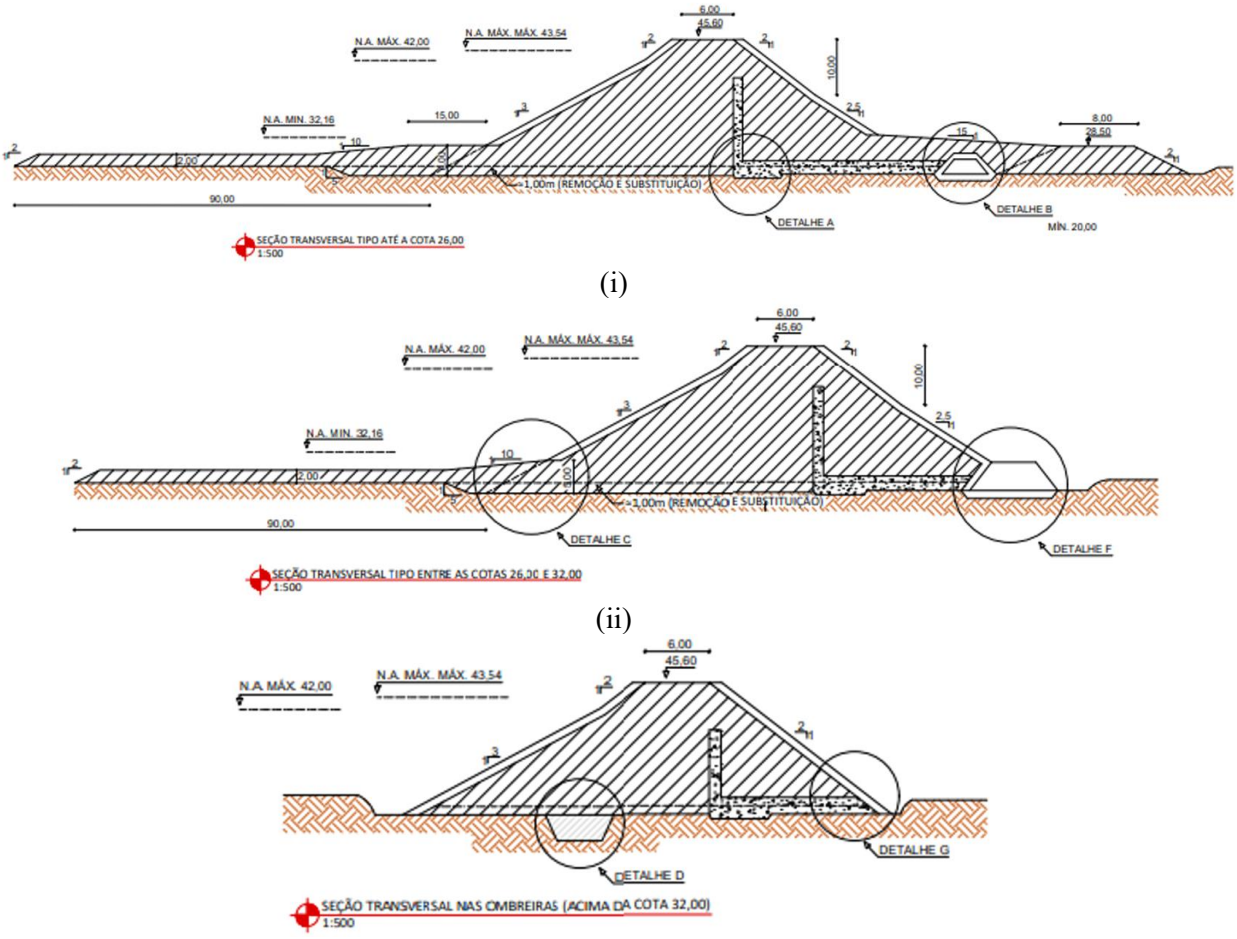


Figura 2. Seção transversal típica a: (i) até a cota 26 m; (ii) entre as cotas 26 e 32 m; e (iii) acima da cota 32 m, Adaptado por ALM (2023) de SONDOTÉCNICA (1976).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para este trabalho foram realizados os estudos referentes à seção 3, cota acima de 32 m, para o talude de montante e considerando o nível normal do reservatório. A seção foi reproduzida com as mesmas dimensões e inclinações indicadas por ALM (2023) e (SONDOTÉCNICA, 1976). Finalizada a seção no *software AutoCAD*®, a mesma foi importada ao *software Slide*® e, de posse dos resultados dos ensaios de caracterização geotécnica, avaliação do comportamento mecânico, correlações e determinação da linha de fluxo superior, os parâmetros geotécnicos da seção analisada foram estabelecidos. Foram realizadas diferentes simulações para obtenção do FS da barragem: (i) poropressões calculadas a partir da Linha de Fluxo Superior (LFS), construída pelo método gráfico de Casagrande, admitindo condição hidrostática; (ii) poropressões calculadas a partir de uma linha piezométrica localizada abaixo da LFS de Casagrande, definida automaticamente pelo software com base na inclinação da superfície da água, sendo esta, útil para a aproximação da perda de carga devido à percolação; (iii) poropressões determinadas pelo software a partir do Método dos Elementos Finitos (FEA – Finite Element Analysis) para analisar fluxos de água subterrânea em regime permanente (*steady-state*), utilizando elemento triangular de 6 nós. Por fim, foi realizada uma análise comparativa entre os modos potenciais de ruptura: (iv) superfície circular (*Grid Search*); e (v) superfície não circular (*Path Search*). Além disso, conforme os dados do projeto básico (SONDOTÉCNICA, 1976), considerou-se que o solo de fundação não é isotrópico com relação à permeabilidade (sendo ky/kx a razão entre os coeficientes de permeabilidade vertical e horizontal). A Figura 3 ilustra a seção 3 da barragem inserida no software. Na imagem é possível identificar também as camadas que a compõem e o nível d´água (NA), além da barra de ferramentas do programa. O nível do reservatório representado na figura é o de operação normal.

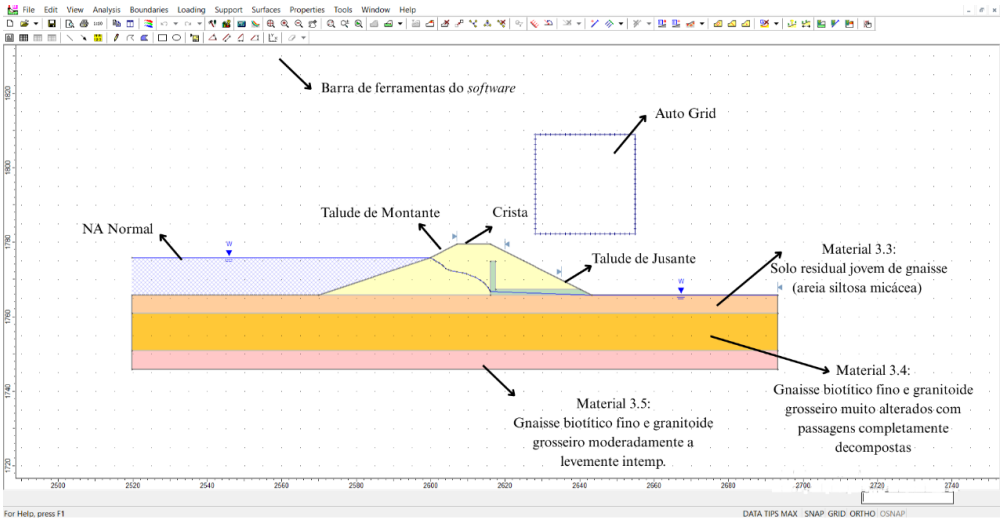


Figura 3. Representação da geometria da seção da Barragem do Chasqueiro e das camadas de fundação no *software Slide®*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 apresenta a comparação entre a Linha de Fluxo Superior (LFS) considerando a condição hidrostática (Hu=1) e a superfície freática obtida via Método dos Elementos Finitos (FEA). Nota-se que a LFS hidrostática se posiciona acima da linha gerada pelo modelo numérico, indicando estimativas de poropressões mais elevadas no interior do maciço. Pelo princípio das tensões efetivas, o aumento das pressões neutras reduz a resistência ao cisalhamento do solo disponível na superfície de ruptura. Isso justifica o comportamento observado nas análises, explicando por que os Fatores de Segurança (FS) obtidos com a abordagem simplificada resultam em valores menores e mais conservadores do que os calculados via FEA.

A Tabela 1 sumariza os resultados obtidos através das simulações realizadas para cada um dos cenários considerados. Nela, Hu=1 representa a condição hidrostática (i); e Hu=Auto representa a condição de fluxo (ii). Observa-se que os cenários modelados com análise de fluxo por FEA (iii) resultaram em Fatores de Segurança significativamente superiores em comparação aos métodos simplificados (i e ii). Dentre os métodos de equilíbrio limite, Fellenius apresentou consistentemente os menores valores de FS, enquanto Spencer e GLE/Morgenstern-Price forneceram os FS mais elevados.

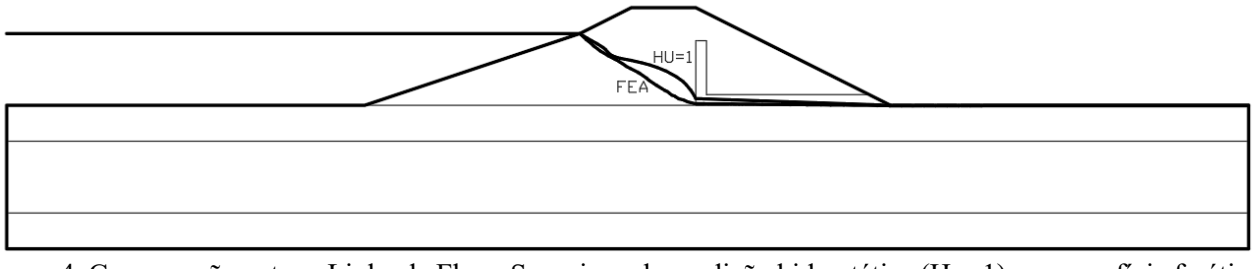


Figura 4. Comparação entre a Linha de Fluxo Superior sob condição hidrostática (Hu=1) e a superfície freática obtida por Elementos Finitos (FEA).

Tabela 1. Fatores de Segurança (FS) para diferentes cenários de análise.

Cenário de Análise		Fator de Segurança (FS)
Water Level – Hu =1 Superfície Circular (Grid Search)		Water Level – Hu =1 Superfície Não Circular (Path Search)
Bishop	2,172	2,185
GLE/Morgenstern-Price	2,187	2,232
Janbu Simplified	2,018	2,058
Fellenius	2,007	1,989
Spencer	2,187	2,252
Water Level – Hu =Auto Superfície Circular (Grid Search)		Water Level – Hu =Auto Superfície Não Circular (Path Search)
Bishop	2,202	2,229
GLE/Morgenstern-Price	2,215	2,274
Janbu Simplified	2,052	2,102
Fellenius	2,033	2,005
Spencer	2,217	2,283
Análise de Fluxo FEA – Heterogêneo Isotrópico (ky/kx=1 – maciço) Superfície Circular		Análise de Fluxo FEA – Heterogêneo Isotrópico (ky/kx=1 – maciço) Superfície Não Circular
Bishop	2,954	2,91
GLE/Morgenstern-Price	2,966	3,077
Janbu Simplified	2,711	2,722
Fellenius	2,699	2,689
Spencer	2,964	3,074
Análise de Fluxo FEA – Heterogêneo Anisotrópico (ky/kx=0,2 – maciço) Superfície Circular		Análise de Fluxo FEA – Heterogêneo Anisotrópico (ky/kx=0,2 – maciço) Superfície Não Circular
Bishop	2,922	2,881
GLE/Morgenstern-Price	2,934	2,978
Janbu Simplified	2,683	2,696
Fellenius	2,675	2,662
Spencer	2,932	3,04

5 CONCLUSÕES

As análises comparativas conduzidas neste estudo permitiram avaliar o impacto de diferentes abordagens metodológicas na determinação do Fator de Segurança (FS) dos taludes da Barragem do Chasqueiro. Constatou-se que o emprego de métodos numéricos, como a análise de fluxo por elementos finitos (FEA), aliado à pesquisa de superfícies potenciais de ruptura não circulares, representa um aprimoramento técnico, refletindo de maneira mais realista as condições de percolação e os mecanismos de falha. Por outro lado, a representação das poropressões por meio da Linha de Fluxo Superior (LFS) viabiliza a aplicação de métodos probabilísticos, como o *Point Estimate Method* (PEM) e o *First-Order Second-Moment* (FOSM), mesmo em *softwares* desprovidos de ferramentas de elementos finitos. Em termos de resultados, demonstrou-se que a abordagem simplificada (combinação do método analítico de Casagrande para a LFS com superfícies circulares) resultou em Fatores de Segurança inferiores aos dos métodos refinados. Essa subestimativa do FS possui relevância prática por evidenciar o caráter conservador do método tradicional, que se posiciona a favor da segurança ao basear a avaliação da estabilidade em um cenário mais crítico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abramson, L. W.; Lee, T. S.; Sharma, S.; Boyce, G. M. (2001) *Slope Stability and Stabilization Methods*, John Wiley & Sons, 2nd ed. New York, p. 330-378.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Relatório de Segurança de RSB 2023. Disponível em: <https://www.boletimdosaneamento.com.br/relatorio-de-seguranca-de-barragens-ana/> Acesso em: 12 de fevereiro de 2026.

ALM – Agência de Desenvolvimento da Lagoa Mirim (2023) *Diagnóstico e Prognóstico do Distrito de Irrigação do Arroio Chasqueiro.* Relatório Técnico.

Brasil. Decreto Nº 1.148 de 26 de maio de 1994. Brasília – DF. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=DEC&numero=1148&ano=1994&ato=20bkXTq1UNFpWTd68>. Acesso em 10 de fevereiro de 2026.

Casagrande, A. (1937) Seepage Through Dams. In: *Contributions to Soil Mechanics.* Boston: Boston Society of Civil Engineers. p. 295-336.

Marques, P. L. F.; Geraldo, A. (1998) Barragens e reservatórios. In: *Geologia de Engenharia*. Oliveira, A. M. S.; Brito, S. N. A., São Paulo: ABGE, Cap. 24, p. 397-418.

Pinto, C. S. (2006) *Curso básico de Mecânica dos Solos*. São Paulo: Oficina de Textos.

Silva, J. L. da.; Camargo, K. R.; Collares, G. L.; Bruch, A. F. (2023) Uso de GPR para a identificação de instrumentação em subsuperfície na Barragem do Chasqueiro – Arroio Grande/RS/Brasil. *Revista Prociências*. v. 6, n. 1, p. 2–17. DOI: *10.15210/prociencias.v6i1.6376*. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/prociencias/article/view/25975> Acesso em: 1 mar. 2026.

SONDOTÉCNICA (1976) *Projeto Básico do Distrito de Irrigação do Arroio Chasqueiro.* Relatório Técnico.