

Journal of Engineering Research

ISSN 2764-1317

vol. 5, n. 9, 2025

... ARTICLE 4

Acceptance date: 23/12/2025

OTIMIZAÇÃO COMPUTACIONAL DA SEÇÃO TRANSVERSAL DE BARRAGENS DE TERRA E DE CONCRETO

Pedro Júlio Castro dos Santos

Eduardo Morais de Medeiros

Larissa Layerr Oliveira de Medeiros e Lima



All content published in this journal is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

Abstract: Civil engineering projects must be carried out with due care, respecting the safety limits established by standards according to the type of structure. This process of investigation and critical analysis requires engineers to develop tools and methods that facilitate the search for the most suitable solution, considering the several possible approaches to the problem. In deterministic methods, all values and parameters involved in the analysis are known; however, due to the large amount of design data and inherent uncertainties, these values are treated as variables that may be reassigned depending on the conditions, while ensuring that structural failure does not occur. This study employed optimization methods using Excel® and its Solver® module to compare, from both technical and economic perspectives, different dam configurations (concrete and earthfill) built on soft and stiff clayey soils. The analysis made it possible to determine the optimal base length of the cross-section and to assess the safety factors against sliding and overturning, all within normative limits. The results indicated that although the concrete dam requires a smaller volume of material, its cost is nearly ten times higher than that of the earthfill dam, highlighting the importance of optimization, through computational tools, in supporting decision-making in civil engineering projects.

Keywords: Optimization methods; sliding; overturning; safety factors; computational tools.

INTRODUÇÃO

Os projetos de engenharia civil exigem atenção rigorosa aos critérios normativos de segurança e desempenho. Diante

das inúmeras possibilidades de solução para cada desafio estrutural, torna-se essencial ao engenheiro o uso de métodos e estratégias que conduzam à alternativa mais eficiente, em termos técnicos e econômicos. Nesse contexto, a otimização se apresenta como um recurso estratégico para alcançar projetos mais racionais e eficazes.

A otimização é o processo de se determinar, entre diversas opções, aquela que melhor atende aos critérios de escolha, respeitando as limitações impostas e os recursos disponíveis. Na engenharia, essa prática está presente em diferentes etapas do projeto, como análise, dimensionamento e construção. Quando aplicada a grandes estruturas, como as barragens, a otimização permite reduzir incertezas, obter maior eficiência e garantir maior confiabilidade estrutural (Brasil, 2019).

A otimização é geralmente utilizada através de dados estatísticos para quantificar, por exemplo, as incertezas dos projetos de barragens, ou seja, ela cria números aleatórios, permitindo resolver uma grande quantidade de problemas com a simulação de cenários, como pressuposto por Garcia (2010). Com a inserção de ferramentas computacionais, esses métodos podem resolver problemas complexos ao buscar a maximização ou a minimização de variáveis críticas, como custo ou volume de material, dentro de parâmetros de segurança previamente estabelecidos.

Dessa forma, este estudo tem como objetivo analisar uma alternativa de aplicação da otimização na concepção estrutural da seção transversal de barragens maciças, associada ao uso de ferramentas computacionais. Propõe-se uma abordagem técnico-econômica comparativa entre os materiais empregados na construção, concreto

ou terra, e os tipos de solo de fundação, argila rija ou mole, visando à minimização do comprimento da base da barragem, de modo a atender às restrições de estabilidade e, consequentemente, reduzir os custos com material.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste trabalho baseia-se em um processo estruturado de simulação e otimização, conforme apresentado na Figura 1. As etapas consistem na formulação do problema, identificação das variáveis que serão otimizadas, definição das restrições, coleta de dados, formulação e execução do modelo e, por fim, análise dos dados.

Software utilizado

Para a etapa de otimização, foi utilizado o *Solver* — ferramenta disponível no *Microsoft Excel*. O *Solver* permitiu a determinação do comprimento ideal da base da barragem, a partir de equações previamente definidas, visando à minimização do custo associado à seção transversal, sem comprometer os critérios de estabilidade. A abordagem adotada assegurou o atendimento rigoroso das restrições técnicas, como os coeficientes mínimos de segurança ao tombamento e ao deslizamento, previstos em normas técnicas de projeto.

Seção transversal

A modelagem da seção transversal da barragem baseou-se no modelo proposto por Carvalho (2020). A geometria corresponde a uma barragem de gravidade com perfil triangular onde são indicados as dimensões e os vetores das principais forças atuantes, estabilizadoras e desestabilizadoras (Figura 2).

Dados do barramento

As dimensões e parâmetros adotados no modelo foram baseados em dados de Carvalho (2020) e García (2012). A barragem considerada possui altura de 92 metros, com o nível d'água a montante fixado em 82,5 metros e a jusante em 26 metros. A base da barragem foi tratada como variável de decisão no processo de otimização, sendo a modelagem realizada por unidade de comprimento.

Não foram considerados elementos estruturais adicionais, como estacas ou sistemas de drenagem, com o objetivo de isolar a influência da geometria da seção na estabilidade global. Os parâmetros geotécnicos utilizados seguem os valores recomendados por Eletrobrás (2003) e NAVFAC (1984): adotou-se para as barragens terra e de concreto um peso específico de 15,5 kN/m³ e 25 kN/m³, respectivamente.

Quanto ao solo de fundação foi analisado dois cenários distintos: a barragem sobre solo de fundação constituído por argila mole ou argila rija (Quadro 1).

Função objetivo

O objetivo principal da análise foi determinar a menor base possível para a seção da barragem que resultasse em custo mínimo da obra, respeitando as condições de estabilidade. Trata-se da área da seção transversal da barragem triangular (Equação 1).

$$f_{obj}(B) = \frac{H \cdot B}{2} \text{ (Equação 1),}$$

onde:

f_{obj} : Função objetivo;

B : Comprimento da base da barragem;

H : Altura da seção transversal da barragem.

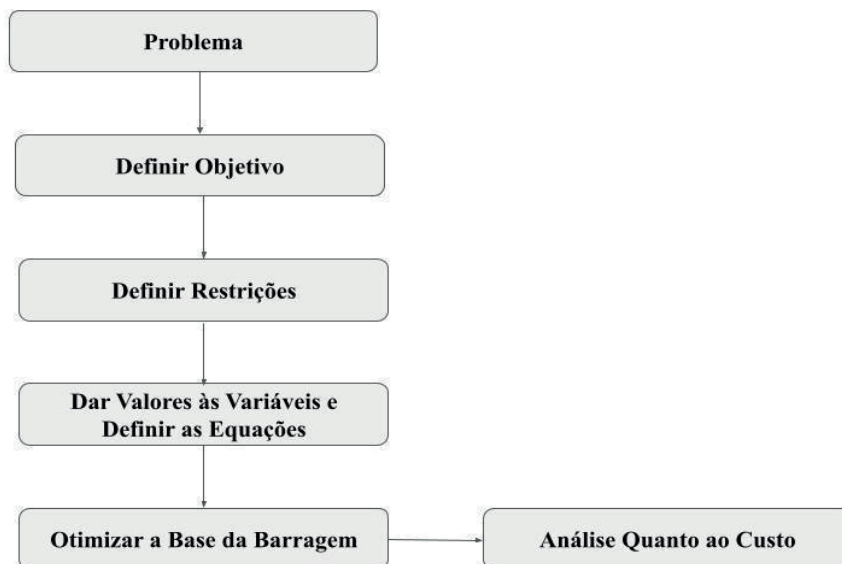


Figura 1 - Fluxograma da metodologia adotada Fonte: Autores (2025)

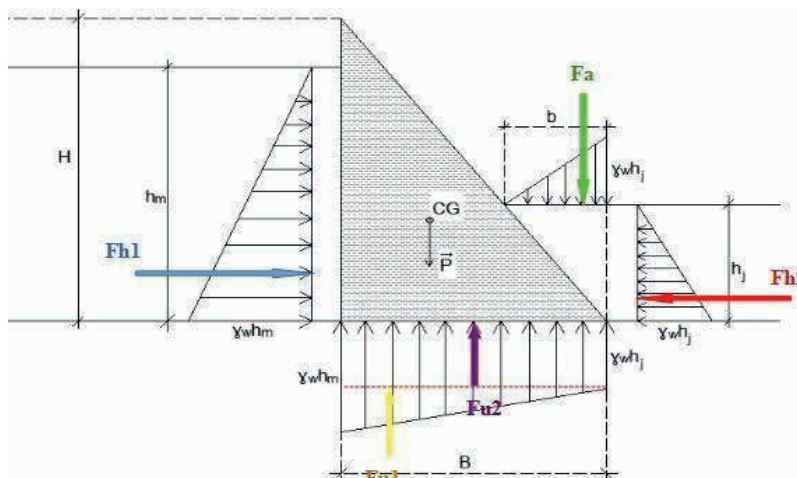


Figura 2 - Esquema da Seção Transversal da Barragem

Fonte: Adaptado de Carvalho (2020)

Propriedade	Argila Mole	Argila Rija
Tipo de comportamento	Não drenado	Não drenado
Coesão (c)	0,0175 MPa	0,45 MPa
Ângulo de atrito (ϕ)	17,5°	30°
Condição hidráulica	Saturada	Saturada
Considerações adicionais	Solo mole, baixa resistência	Solo consistente, alta resistência

Quadro 1 – Parâmetros adotados para os solos de fundação

Fonte: NAVFAC (1984)

Substituindo a altura da barragem já pré-definida como 92 metros na Equação 1, tem-se que a função objetivo depende unicamente da base da barragem, que, por sua vez, será declarada como a variável da otimização (Equação 2).

$$f_{obj}(B) = 46 B \text{ (Equação 2)}$$

Restrições

A verificação da estabilidade global da barragem foi conduzida em duas frentes complementares: segurança ao deslizamento e segurança ao tombamento. Seguindo as recomendações da Eletrobrás (2003), USA-CE (1995) e Krüger (2008), descartou-se a análise contra flutuação — usualmente irrelevante em barragens de gravidade — e concentrou-se nas ações hidrostáticas (pressões, pesos e subpressões) que atuam sobre toda a base da estrutura. Pressões a montante e a jusante foram calculadas a partir das alturas piezométricas correspondentes, enquanto os pesos próprios da barragem e da lâmina d'água a jusante foram relacionados diretamente ao comprimento da base (variável de otimização) para manter a coerência com o modelo de custo-mínimo.

Para o deslizamento, adotou-se o critério de estado-limite em que a componente resistente (força de atrito na interface barragem-fundação + coesão) deve ser, no mínimo, 1,5 vezes a soma das componentes horizontais hidrostáticas. Essa condição gera três restrições: definição do fator de segurança ($\lambda_d \geq 1,5$) (Equação 3), inequação de resistência que inclui peso específico, coesão e ângulo de atrito do solo (Equação 4), e função de estado-limite $g(x) \geq 0$, garantindo que a força horizontal não exceda a resistência disponível (Equação 5). As expressões para pesos, subpressões e empuxos foram

explicitadas, permitindo que cada parcela fosse escrita em função de B e, portanto, integrada ao algoritmo de otimização.

$$\lambda_d = \frac{(\gamma A + Fy) \operatorname{tg}(\varphi) + CB}{Fx} \text{ (Equação 3),}$$

$$(\gamma A + Fy) \operatorname{tg}(\varphi) + CB \geq \lambda_d Fx \text{ (Equação 4),}$$

$$g(x) = (\gamma A + Fy) \operatorname{tg}(\varphi) + CB - Fx \text{ (Equação 5),}$$

onde:

λ_d : Fator de segurança ao deslizamento;

$g(x)$: Equação do estado limite do deslizamento;

γ : Peso específico do material;

A : Área da seção transversal da barragem;

Fy : Soma das componentes verticais das forças hidrostáticas;

$\operatorname{tg}(\varphi)$: Tangente do ângulo de atrito interno do solo de fundação;

C : Coesão do solo de fundação;

Fx : Soma das componentes horizontais das forças hidrostáticas.

No tombamento, analisou-se a relação entre momentos estabilizadores (peso próprio da barragem, peso da água a jusante e empuxo a jusante) e momentos tombadores (empuxo a montante e subpressões). O fator de segurança λ_t também deve ser $\geq 1,5$ em condição de carregamento normal. Assim, a soma dos momentos estabilizadores, calculados em torno do ponto O na borda de jusante da base, precisa alcançar pelo menos 150 % dos momentos que promovem rotação. A função de estado-limite $f(x) = Me - Mt$ foi definida de modo a permanecer positiva durante o processo iterativo, garantindo que a seção otimizada satisfaça simultaneamente os critérios de deslizamen-

to e tombamento sem recorrer a elementos adicionais de fundação.

$$\lambda_t = \frac{M_e}{M_t} \text{ (Equação 6),}$$

$$M_e \geq \lambda_t M_t \text{ (Equação 7),}$$

$$f(x) = M_e - M_t \text{ (Equação 8),}$$

onde:

λ_t : Fator de segurança ao tombamento;

$f(x)$: Equação do estado limite do tombamento;

M_e : Soma dos momentos estabilizadores;

M_t : Soma dos momentos tombadores.

Otimização computacional

Com as funções previamente definidas nas guias da planilha, a ferramenta *Solver*^{*} do *Microsoft Excel*[®] foi utilizada para otimizar a função objetivo, especificando o tipo de otimização (minimização), a célula variável e o conjunto de restrições do problema (Figura 3). Embora a função objetivo fosse linear, as restrições associadas ao tombamento apresentaram comportamento não linear, em razão da presença de expressões quadráticas decorrentes da multiplicação entre forças e seus respectivos braços de alavanca, os quais dependiam diretamente da variável de decisão (comprimento da base da barragem). Por esse motivo, foi selecionado o método de solução “Não Linear” nas opções do *Solver*^{*}. Após o processamento, o *software* forneceu a solução ótima, respeitando todas as restrições impostas.

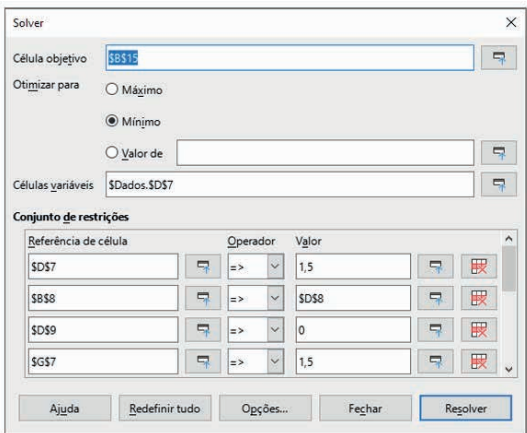


Figura 3 – Dados de entrada do Solver^{*}

Fonte: Autores (2025)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A otimização realizada por meio do *Solver*^{*} permitiu obter os valores mínimos da base da barragem que satisfazem as condições de estabilidade ao deslizamento e ao tombamento, conforme exigido pela Eletrobrás (2003) para a Condição de Carregamento Normal (CCN). Os coeficientes de segurança obtidos em todas as simulações foram iguais ou superiores aos valores mínimos recomendados (1,5), demonstrando a viabilidade dos modelos propostos. Notou-se que, no cenário mais crítico (barragem de concreto sobre solo mole), o fator de segurança atingiu exatamente o limite no deslizamento e bem próximo quanto ao tombamento da estrutura (Tabela 1), evidenciando o impacto negativo da baixa resistência e da elevada compressibilidade desses solos em barragens mais densas.

Em relação ao comprimento da base, observou-se que as barragens de terra requerem uma base maior do que as de concreto, independentemente do tipo de solo de fundação. Para solos rijos, a barragem de

concreto exigiu uma base de 66,77 m, enquanto a de terra necessitou de 353,57 m (para ambos os solos de fundação), sendo aproximadamente cinco vezes maior. Essa diferença impacta diretamente o volume de material necessário para a construção, o qual também se mostrou cinco vezes maior para barragens de terra ($16.264,21 \text{ m}^3/\text{m}$) quando comparado às de concreto sobre solo rijo ($3.071,58 \text{ m}^3/\text{m}$).

Adotando-se um custo relativo, de acordo com o Ministério do Desenvolvimento Regional no Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional Anexo I Tabela de Preços Referenciais Trecho IV- Ramal do Apodi (Tabela de Preços Referenciais Individuais de Benfeitorias e Cobertura Vegetal), de 10,14 Reais/ m^3 para a Barragem de Terra (Código 050101) e 344,04 Reais/ m^3 para a Barragem de Concreto (Código 050303), obtém-se uma barragem com um custo de R\$ 1.056.744,80 por metro linear, a partir do custo relativo proposto e o volume de material obtido graças a otimização da base (Quadro 2).

Quando comparados aos parâmetros teóricos propostos por Massad (2010), os resultados mostraram boa proximidade para a barragem de concreto, com um erro de 9,28%. Já para a barragem de terra, o desvio foi maior (30,12%), o que pode ser atribuído às simplificações do modelo, ausência de análises complementares como recalques e percolação, e à consideração de um solo “in situ”, que difere de um aterro homogêneo. Ressalta-se que o aumento da base para solos moles foi necessário apenas para a barragem de concreto, dado que o modelo realocou a base da barragem de terra com base nas condições de tombamento, mantendo o

comprimento inalterado em ambos os tipos de solo.

Por fim, os custos associados aos materiais revelaram que a barragem de concreto apresenta um custo por metro linear cerca de seis vezes maior do que a barragem de terra. No cenário mais econômico, barragem de terra sobre a argila rija, o custo foi estimado em R\$ 164.919,09/m, enquanto a opção mais cara (concreto sobre solo mole) chegou a R\$ 1.215.991,05/m. Esses resultados reforçam as conclusões de Massad (2010) e do Ministério do Desenvolvimento Regional (2021), que apontam o uso de barragens de concreto como economicamente viável apenas em estruturas auxiliares, sendo mais prudente optar por barragens de terra quando a viabilidade técnica e geotécnica permitir.

CONCLUSÕES

A análise baseada no Estado de Equilíbrio Global (deslizamento e tombamento) demonstrou que todas as configurações de barragens atendem às exigências de segurança da Eletrobrás (2003), sendo possível observar o impacto significativo do tipo de solo de fundação e do material da barragem sobre o volume e o custo da estrutura. Enquanto a barragem de concreto, devido ao seu maior peso específico, exige menor base e volume, ela apresenta custos substancialmente mais elevados — cerca de dez vezes maiores do que os da barragem de terra. Já a barragem de terra, embora economicamente mais viável, demanda uma base significativamente mais ampla, o que implica em maior área de implantação e, por consequência, maior impacto ambiental.

Essa comparação evidencia que a escolha do tipo de barragem deve considerar

Casos	Deslizamento	Tombamento	
	FS obtido	FS obtido	FS limite
Concreto - argila rija	3,3	1,5	1,5
Concreto - argila mole	1,5	1,7	1,5
Terra - argila rija	11,6	1,5	1,5
Terra - argila mole	3,7	1,5	1,5

Tabela 1 – Coeficientes de segurança obtidos para o deslizamento da estrutura

Fonte: Autores (2025)

	Custo relativo por m ³	Sobre argila rija	Sobre argila mole
Barragem de terra	R\$ 10,14	R\$ 164.919,09	R\$ 164.919,09
Barragem de concreto	R\$ 344,04	R\$ 1.056.744,80	R\$ 1.215.991,05

Quadro 2 – Custo por material

Fonte: Autores (2025)

uma série de fatores técnicos, econômicos e ambientais, como a disponibilidade de área para implantação, os objetivos da obra e os recursos disponíveis. A utilização do Excel como ferramenta de otimização se mostrou eficaz, permitindo avaliar múltiplas combinações com agilidade e precisão, auxiliando o engenheiro a tomar decisões mais seguras e fundamentadas. Assim, o estudo contribui para um dimensionamento eficiente das barragens, equilibrando segurança estrutural, viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental.

REFERÊNCIAS

- ARORA, J. S. Introduction to Optimum Design. 3rd ed. Waltham, Elsevier, 2012.
- ANDRADE, E. I. Introdução à Pesquisa Operacional – Métodos e Modelos para a Análise de Decisão. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Ed., 1989.
- BRASIL, Reyolando M. L. R. F.; SILVA, Marcelo Araujo da. **Otimização de projetos de engenharia**. São Paulo: Blucher, 2019. 174 p.
- CARVALHO, José Valderisso Alfredo de *et al.* **Otimização de Estruturas de Concreto Armado Baseada em Confiabilidade Usando o Matlab**. in: congresso brasileiro do concreto, 62., 2020. Florianópolis-Sc. Anais [...]. Pomal-Pb: Ibracon, 2020. v. 1, p. 1-15.
- CHEROTO, Julia Epichin. **Projeto e Análise de Confiabilidade de um Muro de Aproximação de Vertedouro**. Projeto de Final de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 68, 2009.
- CHIOSSI, Nivaldo José. **Geologia de engenharia**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 426 p.
- ELETROBRÁS (Centrais Elétricas Brasileiras S. A.). **Crêterios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. 2003.

GARCÍA, L. A.; BUENO, I. E.; LOMBILLO, A. S.; ORTUÑO, M. G. M. Methodology for estimating the probability of failure by sliding in concrete gravity dams in the context of risk analysis. **Journal Structural Safety**, v. 36-37, p. 1-13, 2012.

GARCIA, S.; LUSTOSA, P.; BARROS N. **Aplicabilidade Do Método De Simulação De Monte Carlo Na Previsão Dos Custos De Produção De Campanhias Industriais: O CASO DA CAMPANHIA VALE DO RIO DOCE**. Revista de Contabilidade e Organizações, FEA-RP/USP, 2010.

JESUS, R. D. **Optimização da Forma Estrutural de Uma Barragem**. 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.

KRÜGER, C. M. **Análise de Confiabilidade Estrutural Aplicada às Barragens de Concreto**. 2008. 146 f. Tese (Doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MASSAD, Façal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

Ministério do Desenvolvimento Regional. **Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Norte Setentrional**. Anexo I - Tabela de Preços Referenciais (Trecho IV): Tabela de Preços Referenciais Individuais de Benfeitorias e Cobertura Vegetal. Ramal do Apodi, p. 12, 2021.

NAVFAC DM 7.2, **Foundation and Earth Structures**, U.S. Department of the Navy, 1984.

ROYER, Júlio César. **Metodologia para a Definição de Alertas Dinâmicos para Subpressão em Fundações de Barragens de Concreto: O Caso da Barragem Principal de Itaipu**. 125 f. Tese (Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SACOMAN, Marco Antônio Rahal. **Otimização de Projetos Utilizando GRG, Solver e Excel**. Belém: COBENGE - XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2012.

USACE (U. S. Army Corps of Engineers). **Gravity Dam Design**. 1995.