



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE



CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

OTIMIZAÇÃO DE BARRAGENS DE TERRA E DE CONCRETO
CONSTRUÍDAS SOBRE SOLOS ARGILOSOS

PEDRO JÚLIO CASTRO DOS SANTOS

POMBAL/PB

2023

PEDRO JÚLIO CASTRO DOS SANTOS

**OTIMIZAÇÃO DE BARRAGENS DE TERRA E DE CONCRETO
CONSTRUÍDAS SOBRE SOLOS ARGILOSOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado a Coordenação de Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campus Pombal, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia.

Orientador: Prof. Eduardo Morais de Medeiros

Coorientador(a): Eng.(a) Larissa Layerr Oliveira de Medeiros

POMBAL/PB

2023

S237o

Santos, Pedro Júlio Castro dos.

Otimização de Barragens de terra e de concreto construídas sobre solos argilosos / Pedro Júlio Castro dos Santos. - Pombal, 2023.

64 f. : il. color.

Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2023.

"Orientação: Prof. Dr. Eduardo Morais de Medeiros, Profa. Eng. Larissa Layerr Oliveira de Medeiros."

Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Solo de Fundação. 3. Construção de Barragens. 4. *Softwares*. 5. *Excel*. 6. *Solver*. I. Medeiros, Eduardo Morais de. II. Medeiros, Larissa Layerr. III. Título.

CDU 624(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

PEDRO JÚLIO CASTRO DOS SANTOS

**OTIMIZAÇÃO DE BARRAGENS DE TERRA E DE CONCRETO CONSTRUÍDAS
SOBRE SOLOS ARGILOSOS**

Trabalho de Conclusão de Curso do discente PEDRO JÚLIO CASTRO DOS SANTOS **APROVADO** em 03 de outubro de 2023 pela comissão examinadora composta pelos membros abaixo relacionados como requisito para obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL pela Universidade Federal de Campina Grande

Registre-se e publique-se.



Assinado digitalmente por
EDUARDO MORAIS DE
MEDEIROS:06778859466
Razão: Eu atesto a precisão e a
integridade deste documento
Localização: Pombal/PB
Data: 2023.10.09 11:00:29-03'00'

Prof. Dr. Eduardo Morais de Medeiros
(Orientador – UFCG)

Prof. Me. Arthur Coutinho de Araújo Pereira
(Membro Interno – UFCG)

Prof.ª. Eng.ª. Larissa Layerr Oliveira de
Medeiros
(Coorientadora – IFPB)

Prof. Dr. Paulo Xavier Pamplona
(Membro Externo – UFCG)

“Não é a força mas a constância dos
bons resultados que conduz os homens à
felicidade.”

-Friedrich Nietzsche

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar meios e métodos para conseguir chegar até aqui e a todos que contribuíram de alguma forma para a minha formação na graduação em engenharia civil da UFCG, Campus Pombal, em especial a (aos):

A minha mãe por todos os esforços feitos para conseguirmos vencer mais uma etapa em nossas vidas.

A minha irmã, Clara, por toda a amizade e paciência nos momentos mais difíceis.

Aos outros familiares e colegas de faculdade por se mostrarem sempre prestativos e complacentes.

A banca avaliadora, a professora Suelen, por me dar apoio em momentos difíceis durante minha graduação e por ser uma ótima orientadora de monitoria, e, principalmente, ao professor Eduardo por me fornecer o tema deste trabalho que me deixou extremamente satisfeito por englobar três grandes áreas que admiro, a Geotecnia, Métodos numéricos (Cálculo Numérico) e a Programação/Informática.

Aos outros responsáveis do corpo docente do campus CCTA pela paciência e por passar os seus conhecimentos de suas devidas áreas ao longo desses 5 anos de aprendizado.

A direção e a coordenação do centro pelo esforço e comprometimento, sempre, em atender os alunos de forma eficiente.

A assistência estudantil por proporcionar a pessoas de baixa renda e não residentes da cidade do Campus, como é o meu caso, os meios necessários para o mantimento do aluno durante todo o curso.

E, por fim, e não menos importante, ao corpo discente e docente representante do Campus CCTA e dos outros Campus da UFCG que sempre buscaram lutar pelos direitos dos estudantes.

RESUMO

Sabe-se que os projetos de engenharia civil possuem grandes custos e que muitas vezes são mal dimensionados e acabam apresentando ineficiências como fissuras e, em último caso, o rompimento trazendo, dessa forma, riscos à população e ao meio ambiente local. A otimização vem justamente para solucionar esses problemas através de métodos matemáticos com o auxílio de *softwares* que agem perante os cálculos das diversas possibilidades envolvendo o estudo abordado. Portanto, para onerosas estruturas como as barragens, que desempenham importantes funções na sociedade quanto a armazenagem de água e a geração de energia elétrica, estima-se os custos operantes de sua construção e eficiência estrutural perante os diversos tipos de materiais de sua composição. A implementação deste trabalho proporcionará uma melhor visão de qual material será o melhor para se empregar na construção da barragem, concreto ou terra, do ponto de vista econômico e qualitativo técnico e estrutural e o melhor tipo de solo de fundação, solo argiloso mole ou duro, visando uma melhor eficiência do sistema como um todo, tudo isso graças ao módulo *Solver* do *software Excel* que permitiu otimizar o comprimento da base da seção transversal da barragem hipotética analisada. Ao final do processo de otimização obteve-se satisfatórios resultados acerca do comprimento da base da barragem, comparando-se com os resultados encontrados em Massad (2010), e os valores dos coeficientes de segurança quanto ao deslizamento e ao tombamento dentro dos limites permitidos pela Eletrobrás (2003). Tornou-se possível, também, analisar que o volume de material a ser empregado na construção da barragem de concreto é cerca de cinco vezes menor se comparado com a barragem de terra, entretanto, devido ao alto custo relativo por metro cúbico que o concreto apresenta, notou-se, também, que as situações envolvendo a barragem de concreto apresentaram valores de custo, por metro linear, quase dez vezes maiores em relação a barragem de terra. Portanto, a barragem de terra apresentou o melhor material em termos de economia de custos para a obra. Entretanto, para uma maior segurança atrelada a uma menor utilização de material, e conseqüentemente menor área de implantação, o concreto tornou-se o mais indicado. Verifica-se, por fim, que para um solo argiloso menos resistente (argila mole) o fator de segurança da obra quanto ao deslizamento diminui drasticamente, o que acarreta uma situação mais vulnerável que poderá exigir maior volume de material a ser empregue e um maior custo de implantação da obra.

Palavras-chave: *Softwares; Excel; Solver; Solo de fundação.*

ABSTRACT

It is known that civil engineering projects entail significant costs and often suffer from inadequate design, resulting in inefficiencies such as cracks and, in extreme cases, structural failure, posing risks to both the population and the local environment. Optimization techniques, aided by mathematical methods and *software* tools, are employed to address these issues by calculating various possibilities within the scope of the studied problem. Therefore, for costly structures like dams, which play vital roles in society regarding water storage and electricity generation, the construction's operating costs and structural efficiency concerning different materials in their composition are estimated. This work's implementation will provide a better understanding of which material is more suitable for building the dam, concrete or earth, from both an economic and technical-quality perspective. It will also determine the most suitable type of foundation soil, whether soft clayey soil or hard soil, aiming for improved system efficiency as a whole. All of this is made possible through the *Solver* module of *Microsoft Excel*, which optimizes the length of the hypothetical dam's cross-sectional base. At the end of the optimization process, satisfactory results regarding the length of the dam's base were obtained, compared to findings in Massad (2010), and the values of safety coefficients for sliding and overturning remained within the limits allowed by Eletrobrás (2003). It was also possible to analyze that the volume of material required for constructing the concrete dam is approximately five times smaller compared to the earth dam. However, due to the relatively high cost per cubic meter of concrete, situations involving the concrete dam showed nearly ten times higher cost values per linear meter compared to the earth dam. Therefore, the earth dam proved to be the more cost-effective material for the project. However, for enhanced safety combined with reduced material usage and consequently a smaller footprint, concrete became the more recommended choice. Finally, it is observed that for less resistant clayey soil (soft clay), the safety factor concerning sliding significantly decreases, making the situation more vulnerable and potentially requiring a greater volume of material and higher implementation costs.

Keywords: *Softwares; Excel; Solver; Foundation soil.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma Quanto a Metodologia Adotada.....	20
Figura 2 - Esquema da Seção Transversal da Barragem.....	22
Figura 3 - Representação das medidas do nível de água a jusante.....	31
Figura 4 - Forças geradoras de momento em relação ao ponto “O”.....	36
Figura 5 - Guia “Dados” da Planilha em <i>Excel</i>	39
Figura 6 - Guia “Forças” da Planilha em <i>Excel</i>	40
Figura 7 - Guia “Momentos” da Planilha em <i>Excel</i>	41
Figura 8 - Guia “Otimização” da Planilha em <i>Excel</i>	41
Figura 9 - Dados de Entrada no <i>Solver</i>	42
Figura 10 - Tela de Resultado do <i>Solver</i>	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pesos Específicos dos Materiais de acordo com a Tabela 5.1 da Eletrobrás (2003).....	25
Tabela 2 - Restrições quanto ao deslizamento e suas respectivas limitações.....	38
Tabela 3 - Restrições quanto ao tombamento e suas respectivas limitações.....	38
Tabela 4 - Coeficientes de Segurança Obtidos para o Deslizamento da Estrutura.....	43
Tabela 5 - Coeficientes de Segurança Obtidos para o Tombamento da Estrutura.....	43
Tabela 6 - Valores Obtidos para a Base das Barragens.....	44
Tabela 7 - Custo relativo de alguns tipos de barragens, levando em conta só os materiais e seus volumes.....	44
Tabela 8 - Volume de Material Obtido para as Barragens.....	46
Tabela 9 - Custo de Material das Barragens.....	48

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CCN - Condições de carregamento normal

CCR - Concreto compactado com rolo

CCTA - Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar

Eletrobrás - Centrais Elétricas Brasileiras

NAVFAC - Naval Facilities Engineering Command

PB - Paraíba

SPT - Standard Penetration Test

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande

USACE - United States Army Corps of Engineers

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo Geral.....	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
3.1 Softwares Utilizados.....	17
3.2 Fontes Pesquisadas.....	18
3.3 Metodologia.....	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	21
4.1 Conhecendo a Barragem.....	22
4.2 Dados da barragem.....	23
4.2.1 Peso específico do material.....	24
4.2.2 Ângulo de atrito e coesão do solo de fundação.....	26
4.3 O Processamento da Barragem.....	26
4.3.1 Função Objetivo.....	27
4.3.2 Restrições (Verificação Quanto à Estabilidade Global da Barragem).....	27
I) SEGURANÇA QUANTO AO DESLIZAMENTO.....	28
I.I) Pressões da Água.....	29
I.II) Forças Peso.....	30
I.III) Forças de Subpressão.....	32
I.IV) Forças de Empuxo.....	33
II) SEGURANÇA QUANTO AO TOMBAMENTO.....	34
II.I) Momentos Estabilizadores e Tombadores.....	35
4.3.3 Apresentação da Planilha em Excel.....	39
4.3.4 Otimização Utilizando o Solver.....	42
4.3.5 Valores Obtidos.....	43
5. CONCLUSÕES.....	48

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
APÊNDICE A - TABELAS DO EXCEL REFERENTES A BARRAGEM DE CONCRETO SOBRE SOLO DURO.....	53
APÊNDICE B - TABELAS DO EXCEL REFERENTES A BARRAGEM DE CONCRETO SOBRE SOLO MOLE.....	56
APÊNDICE C - TABELAS DO EXCEL REFERENTES A BARRAGEM DE TERRA SOBRE SOLO DURO.....	59
APÊNDICE D - TABELAS DO EXCEL REFERENTES A BARRAGEM DE TERRA SOBRE SOLO MOLE.....	62

1. INTRODUÇÃO

Os projetos de engenharia civil devem ser executados com certo cuidado respeitando os limites de segurança impostos pelas normativas de acordo com tipo de obra. Este processo de busca e análise crítica da situação exige ao engenheiro a necessidade da criação de meios e métodos que facilitem a obtenção da melhor solução para o problema, tendo em vista os diversos caminhos que a mesma poderá ter.

Nos métodos determinísticos há o conhecimento de todos os valores e parâmetros envolvidos no problema a ser analisado, porém, devido à existência de muitos dados de projeto e incertezas, considera-se, portanto, estes dados representados por variáveis que serão realocadas a depender da situação levando em consideração a possibilidade de não haver falha na estrutura. Para Brasil (2019, p.14), essa análise das diversas soluções e viabilidade de execução trata-se do processo de otimização.

Otimização é o processo de se determinar entre várias opções de um objeto aquela que é a melhor possível dentro de certos critérios de escolha e limitações, com os recursos disponíveis. No projeto de um empreendimento, o tempo todo, procura-se o melhor desempenho nas suas diversas disciplinas: análise, projeto, fabricação, vendas, pesquisa, desenvolvimento etc. Essa é praticamente a definição de *projeto ótimo*. (Brasil, 2019, p. 14)

A otimização de obras traz maior eficiência para o projetista e lhe garante dados que anteriormente viriam a ser incertos. Desse modo, quando se trata de economia, a otimização retorna uma variável presente no dimensionamento da estrutura, sendo esta, geralmente, uma de suas dimensões a qual será reduzida e relacionada com o valor de custo, em reais por unidade de medida (geralmente em metros cúbicos), visando-se uma análise dos gastos com material em sua construção. Isso é importante principalmente para obras de grande porte como as barragens, a qual a otimização pode atuar como forma de garantir maior economia ou confiabilidade estrutural.

Nesse contexto, Massad (2010, p.173), define barragens como elementos construídos há milênios pelo homem para a contenção de água e até de resíduos. Como o nome já simboliza, o seu objetivo de “Barrar” a água busca exercer funções de extrema importância para a sociedade como a reservação de água, tanto para o consumo

humano como para o regadio, e o fornecimento de energia elétrica. A sua estrutura é projetada para suportar diversas ações que afetam sua estabilidade, sendo extremamente importante investir no âmbito da segurança. A barragem de concreto é um dos modelos mais resistentes, no entanto, assim como para as barragens de terra, faz-se necessário uma análise de estabilidade para o seu adequado dimensionamento, de modo a evitar incidentes com graves consequências.

Atrelado a isso, de acordo com Chiossi (2013, p.253), o projeto de uma Barragem deve levar em consideração dois importantes fatores: A Segurança da Obra e o Custo da Obra. A otimização surge para permitir o entrelaçamento entre esses dois fatores a partir de métodos probabilísticos e aplicações de códigos computacionais.

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). Isso se dá, a partir da aplicação de fórmulas e restrições em um determinado *software* que fornece rapidamente ao usuário o resultado da maximização ou minimização de alguma variável empregada na função objetivo adotada, que será peça chave no dimensionamento da estrutura.

Dessa forma, com o advento dos métodos numéricos aplicados em códigos e ferramentas computacionais, proporciona-se ainda uma maior eficiência para o estudo das barragens, seja na otimização de alguma medida para utilizar cada vez menos material em sua confecção ou para determinar materiais, dimensões e/ou o solo de fundação a fim de alcançar uma situação ótima de estabilidade global da barragem.

Nos capítulos 1, 2 e 3 deste trabalho será apresentada uma introdução acerca do tema, os objetivos da pesquisa e as fontes e ferramentas escolhidas juntamente com a metodologia adotada, respectivamente. No capítulo 4 serão demonstradas as equações utilizadas no processo de otimização (função objetivo, ações estabilizadoras e desestabilizadoras da barragem e as restrições quanto à estabilidade global da estrutura) juntamente com o processo de otimização propriamente dito e algumas análises referentes aos resultados obtidos. Por fim, no capítulo 5 discorre-se acerca das considerações finais consistindo em uma análise crítica acerca das situações analisadas e da importância da aplicabilidade deste tipo de trabalho para a Engenharia Civil.

Resumindo, no capítulo dos materiais e métodos serão apresentadas as ferramentas utilizadas, as fontes pesquisadas e as metodologias seguidas, a qual estará inserido todo o trâmite quanto a sequência do trabalho. Em seguida tem-se uma abordagem acerca dos resultados obtidos trazendo uma discussão quanto ao estudo da estrutura da barragem com relação às equações das ações estabilizadoras e desestabilizadoras (pressões, forças e momentos) utilizadas nas equações das restrições definidas quanto a estabilidade global da barragem (deslizamento e ao tombamento) para posterior implementação dos dados e das equações na execução da otimização no *software* escolhido. Ao final da pesquisa, conclui-se a análise comparando os resultados obtidos nas planilhas, referentes a base da seção transversal, o volume de material e os custos por metro linear, para cada situação adotada a fim de definir a mais favorável para o engenheiro projetista da barragem.

2. OBJETIVOS

Este trabalho objetiva apresentar uma proposta de otimização de barragens a partir da utilização de ferramentas computacionais permitindo, assim, uma abordagem econômica comparativa entre os possíveis materiais empregados na construção da barragem (concreto ou terra) e o tipo de solo de fundação (mole ou duro).

2.1 Objetivo Geral

Apresentar uma proposta de otimização de barragens com o uso do módulo *Solver* do *Excel* visando a minimização do comprimento da base da barragem que acarretará menores custos de materiais empregados na confecção da barragem, respeitando as restrições impostas quanto ao tombamento e ao deslizamento da estrutura.

2.2 Objetivos Específicos

- Definir o problema, o objetivo e as restrições da situação analisada;
- Otimizar as quatro situações escolhidas;
- Obter resultados referentes ao quantitativo de material a ser empregue na obra;
- Obter resultados referentes ao custo da obra;

- Correlacionar os resultados obtidos com os resultados encontrados em Massad (2010);
- Realizar uma análise das soluções propostas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Atualmente o mercado de trabalho voltado para a Engenharia civil vem se moldando e se adequando às novas tecnologias, torna-se de suma importância aplicar os dimensionamentos que anteriormente eram feitos manualmente, aos *softwares* que podem ser acessados e utilizados sem grandes dificuldades.

Portanto, para Brasil (2019, p.14), a existência do processo computadorizado tornou-se algo positivo para a engenharia, fornecendo suporte lógico, como planilhas e calculadoras especializadas que permitem grande auxílio aos profissionais de engenharia tornando, assim, os projetos cada vez menos trabalhosos.

3.1 *Softwares* Utilizados

O *Excel* é um *software* bastante útil e necessário para todos os profissionais da engenharia tendo em vista suas múltiplas utilizações mediante a planilhas que oferecem suporte lógico para diversos ramos do mercado de trabalho, sendo desde o dimensionamento de estruturas, a definição de orçamentos, delimitação de áreas, entre outros. Ademais, para o dimensionamento das barragens torna-se importante o auxílio do *software* para cálculos complexos, como é o caso dos equacionamentos referentes a verificação quanto à estabilidade global da obra, e a obtenção de medidas inicialmente incertas no qual são retornadas com precisão e eficiência pela ferramenta *Solver* que permite o reajuste de possibilidades para as células variáveis previamente definidas.

De acordo com Rodrigues (2020), o *Solver* é uma ferramenta que permite resolver diversos tipos de problemas de otimização e encontrar soluções ideais para determinadas variáveis, sujeitas a um conjunto de restrições.

De acordo com Prado (2023) o *Solver* foi desenvolvido pela *Frontline Systems* e lançado em 1990 como parte do *Excel* 3.0. Todavia isso, desde então ele vem sendo atualizado e aprimorado para oferecer mais recursos e funcionalidades aos usuários do *Excel*.

Segundo o suporte da Microsoft (2021):

O *Solver* é um suplemento do *Microsoft Excel* que você pode usar para teste de hipóteses. Use o *Solver* para encontrar um valor ideal (máximo ou mínimo) para uma fórmula em uma célula — conforme restrições, ou limites, sobre os valores de outras células de fórmula em uma planilha. O *Solver* trabalha com um grupo de células, chamadas variáveis de decisão ou simplesmente de células variáveis, usadas no cálculo das fórmulas nas células de objetivo e de restrição. O *Solver* ajusta os valores nas células variáveis de decisão para satisfazer os limites sobre células de restrição e produzir o resultado que você deseja para a célula objetivo. (Microsoft, 2021)

Já para Sacoman (2012), o programa *Microsoft Excel* trata-se de uma ferramenta poderosa que permite resolver problemas de otimização, mais especificamente o seu módulo *Solver* que otimiza a célula objetivo da planilha (função objetivo) destacando-se a variável aleatória e as demais equações escritas nas células da planilha (restrições).

Desse modo, o *Excel* (versão 2007-365) através do seu suplemento *Solver* será utilizado na etapa de otimização deste trabalho, a qual se dará graças ao seu uso na determinação do comprimento da base da barragem, a partir de equações pré-estabelecidas, garantindo-se uma solução “ótima” para o problema definido.

3.2 Fontes Pesquisadas

A área de estudo das barragens de terra ainda há muito o que se explorar, apesar de existirem muitos materiais na *web* que fornecem informações a respeito das mesmas, os materiais contendo o seu dimensionamento é mais escasso. Contudo, devido à ausência de normas técnicas brasileiras, para os critérios de projeto de Barragens, serão empregadas na metodologia do trabalho as recomendações do guia da USACE (1995), o Manual de Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás (2003), referências bibliográficas como Massad (2010) e Chiossi (2013) e artigos científicos como Krüger (2008) e Carvalho (2020), entre outros trabalhos.

Chiossi (2013) a partir de sua bibliografia, a qual diz respeito à geologia aplicada à engenharia, forneceu o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento do problema e objetivo da pesquisa.

O livro de Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia de Massad (2010), tornou-se uma excelente fonte de dados referentes ao comprimento da base, ao volume de material e ao custo relativo de diversos tipos de barragens para posterior comparativo com os resultados obtidos no trabalho.

O artigo do Krüger (2008), sobre a análise de confiabilidade estrutural aplicada à barragens de concreto, forneceu as restrições adotadas para a estabilidade da estrutura quanto ao deslizamento e quanto ao tombamento e o artigo da USACE (1995), relativo ao estudo de barragens de gravidade, proporcionou algumas recomendações quanto à segurança à flutuação da barragem.

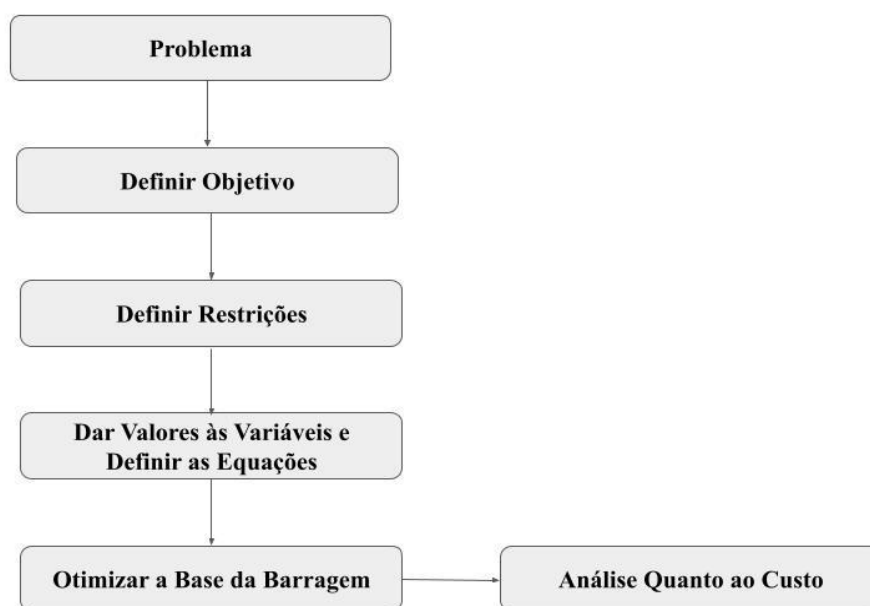
Nesse mesmo contexto, foi-se utilizado, também, o Manual de Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás (2003), para definir os coeficientes de segurança para projetos de barragens, levando em consideração a estabilidade da estrutura quanto ao deslizamento e ao tombamento, e dados acerca do peso específico dos materiais utilizados.

Carvalho (2020), baseando-se no modelo proposto por Garcia (2012) referente a metodologia para estimar a probabilidade de falha das barragens de gravidade de concreto quanto ao deslizamento da estrutura oferecendo contextos de riscos, elaborou o trabalho utilizando-se de uma barragem hipotética com seção transversal triangular para o estudo acerca da otimização de estruturas de concreto baseada em confiabilidade usando o MATLAB, a qual mostrou ser a principal fonte para este trabalho por fornecer os dados referentes aos níveis d'água a montante e a jusante, altura da barragem e a função objetivo do processo de otimização.

3.3 Metodologia

De acordo com Andrade (1989), as etapas para a realização da simulação consiste nos seguintes passos: Formulação do Problema; Coleta de Dados; Identificação das variáveis aleatórias que serão otimizadas; Formulação do Modelo; Avaliação do modelo e a Realização das Simulações.

O procedimento geral para a elaboração da pesquisa segue o fluxograma da Figura 1.

Figura 1: Fluxograma Quanto a Metodologia Adotada

Fonte: Autoria própria

Para a obra de uma barragem o que define o seu custo é justamente o volume/quantidade de material em metros cúbicos a ser utilizado. O volume é uma grandeza que depende das outras medidas da barragem (base, altura e comprimento). Muitas vezes o projetista já tem conhecimento da altura da barragem tendo em vista que, a mesma não poderá ser menor do que o nível de água a montante já pré-estabelecido em uma possível visita a campo, restando apenas definir o comprimento e a base da mesma. Atrelado a isso, para projetos com custos definidos linearmente (custo por metro linear) a única medida que resta para ser definida é a base da barragem. Sendo assim, a base da seção transversal triangular de uma barragem qualquer permite calcular o volume de material a ser empregado e, conseqüentemente, pode-se definir os custos da obra a partir deste volume calculado. Portanto, o problema em questão é definir a economia da obra, que se dará a partir da menor base da seção transversal da barragem. Tendo isso em mente, os dados para o pressuposto problema foram devidamente pesquisados e incluídos nas equações necessárias.

Quanto a criação dos algoritmos toma-se como base os procedimentos do método utilizado por Carvalho (2020), na análise quanto a confiabilidade das barragens de concreto, a qual se embasou na determinação de algumas variáveis como a altura da barragem e as alturas dos níveis de água no modelo proposto por Garcia (2012) voltado

para a estimativa da probabilidade de falha das barragens de concreto quanto ao deslizamento da estrutura. Diferentemente de Carvalho (2020), que elaborou o trabalho com foco na confiabilidade estrutural da barragem de concreto, aqui faz-se necessário dados adicionais como o peso específico do solo e do material a ser utilizado na barragem, sendo o principal objetivo otimizar a variável aleatória “Base” no *software Excel*, declarada nas equações pela letra “B”, a qual será obtido o seu valor mínimo necessário considerando as situações de projeto para barragens de terra e de concreto envolvendo os tipos de solo de fundação (argila mole ou dura).

Já para a formulação do modelo, empregou-se restrições dadas por Krüger (2008), às quais estão diretamente ligadas aos estados limites globais da barragem analisada.

Para a formulação do problema simula-se os custos da barragem levando-se em consideração duas situações: a aplicação do método considerando o solo de fundação mole; e a aplicação do método considerando o solo de fundação duro. No geral, serão obtidas quatro situações: a situação para a barragem de concreto sobre solo mole; para a barragem de terra sobre solo mole; para a barragem de concreto sobre solo duro; e para a barragem de terra sobre solo duro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

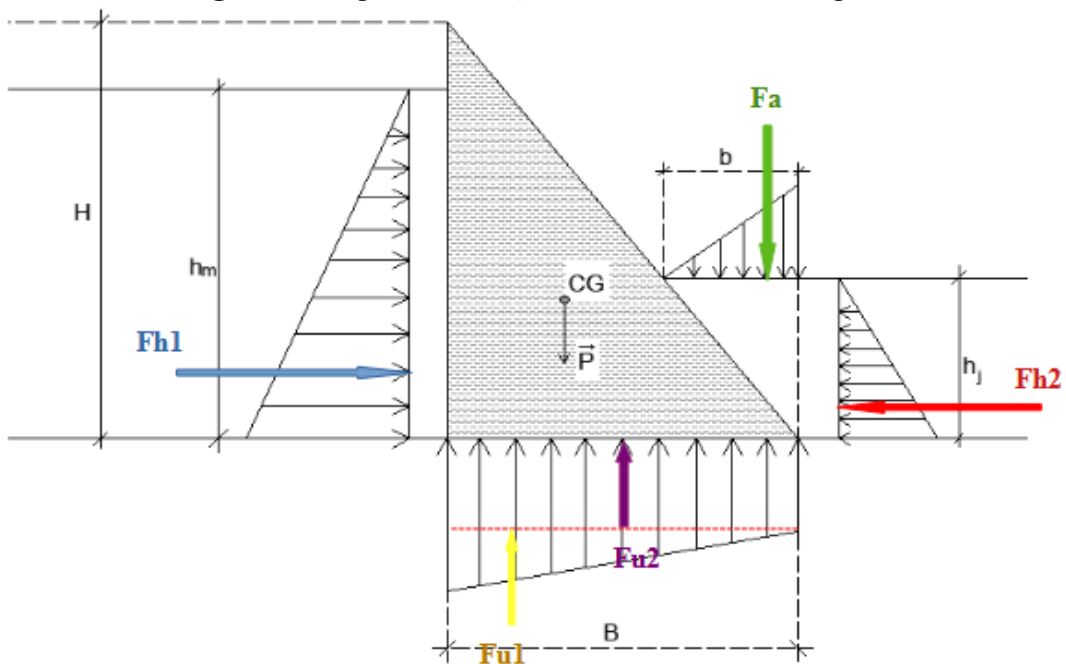
Antes de se obter os resultados é importante conhecer os detalhes acerca da barragem, como os seus níveis de água, os pesos específicos dos materiais e do solo de fundação e a coesão barragem-fundação. Após isso defini-se as ações estabilizadoras e desestabilizadoras da barragem que serão utilizadas nas restrições do processo de otimização.

A seguir serão abordadas as características da barragem (níveis d’água, peso específico do material e do solo e a coesão) para posterior definição da função objetivo e restrições a serem empregues no processo de otimização do *software*, necessitando-se também, de uma análise quanto a estabilidade global da estrutura, devendo-se conhecer as forças hidrostáticas para a análise da estabilidade quanto ao deslizamento e os momentos estabilizadores e desestabilizadores para a análise da estabilidade quanto ao tombamento.

4.1 Conhecendo a Barragem

As barragens de gravidade, como aponta Massad (2010), funcionam em função do seu próprio peso. A barragem de gravidade também pode ser considerada, de acordo com Jesus (2011), como uma “estrutura maciça, com a secção transversal triangular dimensionada para que o peso próprio permita mobilizar grande parte da resistência necessária às forças que sobre ela atuam”. Neste trabalho adotou-se um modelo de barragem similar ao adotado por Carvalho (2020) onde teremos a presença de uma barragem de gravidade. O esquema da seção transversal da barragem, com a presença de suas medidas e as principais forças estabilizantes e desestabilizadoras, está representado na Figura 2.

Figura 2: Esquema da Seção Transversal da Barragem



Fonte: Adaptada de Carvalho (2020)

Sendo:

CG: Centro de gravidade;

H : A altura da seção transversal da barragem;

h_m : Altura do nível de água a montante;

h_j : Altura do nível de água a jusante;

B: Base da seção transversal da barragem;

b: Base da seção transversal do carregamento distribuído da força F_a ;

P: Força peso da barragem;

F_a : Força peso da água a jusante;

F_{h1} : Força de empuxo da água a montante;

F_{h2} : Força de empuxo da água a jusante;

F_{u1} : Força de subpressão a montante;

F_{u2} : Força de subpressão a jusante;

4.2 Dados da barragem

A densidade da água adotada foi de 1000 kg/m^3 e uma aceleração da gravidade de $9,80 \text{ m/s}^2$, já os demais dados, de acordo com Carvalho (2020), foram embasados no modelo de García (2012). Para a altura da barragem (H) adota-se 92 metros, o nível de água a montante (hm) de 82,5 metros, o nível de água a jusante (hj) de 26 metros. Vale destacar que o comprimento da barragem foi adotado como uma variável **unitária** nos **cálculos de equilíbrio**, com foco na obtenção da base da seção transversal da barragem.

Ao longo da seção de uma barragem podem aparecer alguns elementos, como a galeria de drenagem, uma passagem interior utilizada para realizar inspeções. Para esta barragem hipotética, optou-se pelo modelo de Carvalho (2020) com drenos inexistentes ou inoperantes, de modo a facilitar a análise de carregamentos e ações desestabilizadoras. Considerando-se também a não existência de outros tipos de fundação ao longo da barragem, como estacas ou outras alternativas, existindo apenas o solo de fundação em si.

Quando se trata de variável a ser alterada na otimização, neste trabalho, a única e principal variável para o processo de otimização será a base da barragem. Contudo, existem outras incógnitas que, a depender da situação escolhida para análise, vêm a ser alteráveis e implicam, também, certas mudanças no resultado final quanto à estabilidade da barragem. O ângulo de atrito do solo e a sua coesão, que irão variar a depender do tipo de solo de fundação selecionado na planilha, serão utilizados nos cálculos das

restrições quanto ao deslizamento. Já o peso específico do material da barragem irá variar a depender do tipo de barragem, concreto ou terra, selecionado na planilha utilizada, e, também, será utilizado no cálculo das restrições quanto ao deslizamento.

4.2.1 Peso específico do material

O Manual de Critérios de Projeto de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás de 2003 traz algumas recomendações acerca do material a se utilizar, inclusive os pesos específicos que devem ser adotados para cada tipo de material, presentes na Tabela 1, respeitando-se as devidas análises de laboratório ou “In Situ” se o tipo do material e características forem incertas.

Tabela 1: Pesos Específicos dos Materiais de acordo com a Tabela 5.1 da Eletrobrás (2003)

PESOS ESPECÍFICOS	
MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (kN/m³)
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	
Concreto armado convencional	25
Concreto massa - CCR e concreto simples	21 a 26 (depende do tipo de agregados)
Aço	78,5
Madeira	5 a 10
Água	10
ROCHAS	
Basalto denso	27 a 30
Leucobasalto	25
Basalto vesículo-amigdalóide	25 a 27
Brecha	21 a 24
Arenito	16 a 26
Siltito / Agilito	22 a 23
Granito	26 a 28
Quartzito	25 a 26
SOLOS	
"In situ" seco	14 a 16
"In situ" úmido	16 a 19
ATERROS	
Enrocamento:	
Compactado seco	18 a 21
Compactado úmido	20 a 22
Compactado saturado	22 a 24
Solos:	
Compactado seco	14 a 21
Compactado úmido	20 a 22
Compactado saturado	21 a 23
Argila:	
Compactada seca	17 a 19
Compactada úmida	19 a 21
Compactada saturada	20 a 22
Areia:	
Compactada seca	16 a 18
Compactada úmida	18 a 20
Compactada saturada	20 a 22

Fonte: Eletrobrás (2003)

De acordo com as recomendações da Eletrobrás (2003), para um barragem de terra composta por solos “In Situ” seco, o peso específico adotado para o material da barragem será de 15,5 kN/m³.

Já para a barragem de concreto será adotado um peso específico, ainda de acordo com a Eletrobras, de 25 kN/m³, relativo a barragens de concreto massa, concreto compactado com rolo (CCR) e/ou concreto simples.

A partir do peso específico e do volume do material pode-se definir sua massa pela Equação 1.

$$m = V \cdot \rho_{material} \quad (\text{Equação 1}),$$

onde:

m: Massa do material;

V: Volume de material;

$\rho_{material}$: Massa específica do material.

4.2.2 Ângulo de atrito e coesão do solo de fundação

Com relação aos solos de fundação, a escolha da coesão e do ângulo de atrito para solos de fundação duros ou moles seguem as recomendações dadas pelas normas da NAVFAC (1984) para solos não drenados. Para argila mole, com o SPT menor ou igual a 5, tem-se uma coesão de 1,75 tf/m² (0,0175 MPa) e um ângulo de atrito de 17,5°. Para uma argila considerada dura, com o SPT maior ou igual a 19, tem-se uma coesão de 45 tf/m² (0,45 MPa) e um ângulo de atrito de 30°.

A adoção destes valores pressupõe razoável conhecimento dos parâmetros de resistência dos materiais e do solo envolvidos na obra, como recomenda o Manual de Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás (2003).

4.3 O Processamento da Barragem

O problema trabalhado neste estudo é conhecer a menor base possível para a seção transversal das barragens de gravidade de concreto e de terra. A partir dessa base define-se os custos necessários para a implantação das mesmas e sua posterior comparação.

4.3.1 Função Objetivo

Partindo-se do princípio que o objetivo do estudo é comparar os custos envolvendo os dois tipos de barragem de gravidade, concreto e terra, tem-se que o problema inicial dá-se em definir a base de cada barragem para ser possível determinar o volume gasto com material e, posteriormente, comparar os custos envolvidos em cada situação adotada.

O objetivo será representado através de uma função para posterior aplicação no algoritmo, função esta denominada de função objetivo e, para este caso, trata-se da área da seção transversal da barragem triangular a qual está presente na Equação 2, de acordo com Carvalho (2020).

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

onde:

$f_{obj}(B)$: Função objetivo que será minimizada na planilha, em função da Base da barragem;

H: Altura da seção transversal da barragem;

B: Comprimento da base da barragem.

Percebe-se que a função objetivo da barragem triangular depende unicamente da base da barragem, que, por sua vez, será declarada como a variável da otimização. Logo, substituindo a altura da barragem já pré-definida como 92 metros na Equação 2, tem-se que a função objetivo dada pela Equação 3.

$$f_{obj}(B) = 46 \cdot B \quad (\text{Equação 3}).$$

Para se conhecer a menor base possível de cada barragem de gravidade, a depender do solo de fundação, otimiza-se a função objetivo dada que estará interligada com suas respectivas restrições. Portanto, será necessário abordar conceitos de estabilidade global das barragens de gravidade para aplicá-los nesta etapa.

4.3.2 Restrições (Verificação Quanto à Estabilidade Global da Barragem)

Em todo projeto de barragem é necessário proceder previamente de uma análise da estrutura quanto a sua estabilidade levando em consideração duas condições

importantes: segurança contra o deslizamento e segurança contra o tombamento. Existe também a verificação contra a flutuação, porém, como aponta a USACE (1995), opta-se por não fazer a verificação, tendo em vista que as probabilidades de falhas inerentes a esta condição são sempre muito baixas.

Com o problema definido, deve-se identificar as restrições do problema a partir de algumas formulações. As restrições, neste caso, dependerão da natureza da estabilidade, portanto, requerem uma análise para ambos os casos, deslizamento e tombamento. A análise dos estados limites é feita de acordo com Krüger (2008) e a Eletrobrás (2003).

A etapa de definição das restrições quanto a segurança para o tombamento e para o deslizamento da barragem é a mais importante para o projeto visando uma maior eficiência estrutural da mesma, atrelado a resistência e durabilidade, seguindo condições impostas por bibliografias, artigos e outros materiais didáticos.

D) SEGURANÇA QUANTO AO DESLIZAMENTO

Quanto ao deslizamento analisa-se a necessidade que a barragem terá de se deslocar a depender das forças desestabilizadoras. De acordo com a Eletrobrás (2003), deve-se selecionar as superfícies de ruptura de modo que sejam incluídos todos os planos que apresentarem menor resistência, ou os submetidos a tensões críticas na estrutura, na fundação ou no contato estrutura-fundação. Dessa forma, entram nas equações para o deslizamento da estrutura, o ângulo de atrito do solo e a coesão do mesmo.

A verificação da segurança quanto ao deslizamento será avaliada apenas na base da estrutura, desconsiderando possíveis presenças de estacas e outros tipos de fundação. Haverá três restrições, dadas de acordo com Krüger (2008), pelas Equações 4, 5 e 6.

$$\lambda_d = \frac{(\gamma A + Fy)tg(\varphi) + CB}{Fx} \quad (\text{Equação 4})$$

$$(\gamma A + Fy)tg(\Phi) + CB \geq \lambda_d Fx \quad (\text{Equação 5})$$

$$g(x) = (\gamma A + Fy)tg(\Phi) + CB - Fx \quad (\text{Equação 6}),$$

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;

$tg(\Phi)$: Tangente do ângulo de atrito interno do solo de fundação;

C: Coesão do solo de fundação;

B: Comprimento da base da barragem;

Fx: Soma das componentes horizontais das forças hidrostáticas.

O fator de segurança quanto ao deslizamento (escorregamento), como aponta o Manual de Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás (2003), deve ser maior ou igual a 1,5 para uma Condição de Carregamento Normal (CCN).

Na Equação 5 a condição deverá ser satisfeita de modo que o fator de segurança ao deslizamento multiplicado pela soma das componentes horizontais das forças hidrostáticas não poderá ser maior do que a parcela à esquerda da Equação na qual está relacionada com as componentes verticais das forças hidrostáticas.

Soma das Forças Verticais >> Soma das Forças Horizontais.

Para a equação do estado limite do deslizamento (Equação 6), deve-se adotar um valor superior a zero visto que a parcela das forças horizontais não poderá exceder o valor das componentes verticais.

$$g(x) = (\gamma A + Fy)tg(\Phi) + CB - Fx \geq 0.$$

As formulações referentes a pressões hidrostáticas, forças hidrostáticas (empuxo, subpressão e peso) e momentos (estabilizadores e tombadores) foram baseados no Projeto e Análise de Confiabilidade de um Muro de Aproximação de Vertedouro de Cheroto (2009).

I.I) Pressões da Água

Nas barragens consideram-se as pressões da água a montante e a jusante da obra tendo relação direta com a configuração, o tipo de carga distribuída provocada pela mesma e a altura de água a montante e a jusante da barragem.

É importante salientar que as pressões atuantes na barragem modelo estarão em ação a montante e a jusante da mesma, dessa forma, estarão em função de seus respectivos níveis d'água.

A pressão exercida pelo nível d'água a montante da barragem é dada pela Equação 7.

$$P_m = \rho a . g . h_m \quad (\text{Equação 7}).$$

E a pressão exercida pelo nível d'água a jusante da barragem é dada pela Equação 8.

$$P_j = \rho a . g . h_j \quad (\text{Equação 8}),$$

onde:

P_m : Pressão da água montante da barragem;

ρa : Massa específica da água;

g : Aceleração da gravidade;

h_m : Altura de água a montante;

P_j : Pressão da água a jusante da barragem;

h_j : Altura de água a jusante.

I.II) Forças Peso

Existem duas forças de peso atuando no sistema, a força peso da barragem e o peso da água sobre a barragem localizada a sua jusante. O peso da barragem é facilmente determinado pela expressão da Equação 9:

$$P = m . g \quad (\text{Equação 9}),$$

onde:

P : Força peso da barragem;

m : Massa do material;

g : Aceleração da gravidade.

Tendo em vista que, para determinar a massa do material multiplica-se a massa específica pelo volume do mesmo, é possível reescrever a Equação 9 para a Equação 10:

$$P = (V \cdot \rho) \cdot g \quad (\text{Equação 10}).$$

Sendo o volume dado pela Equação 11.

$$V = \left(\frac{BH}{2}\right)L \quad (\text{Equação 11}).$$

Portanto, obtém-se a relação presente na Equação 12.

$$P = \left(\frac{BH}{2}\right)L \cdot \rho \cdot g \quad (\text{Equação 12}),$$

onde:

P : Força peso da barragem;

V : Volume de material;

B : Comprimento da base da barragem;

H : Altura da seção transversal da barragem;

L : Comprimento da barragem;

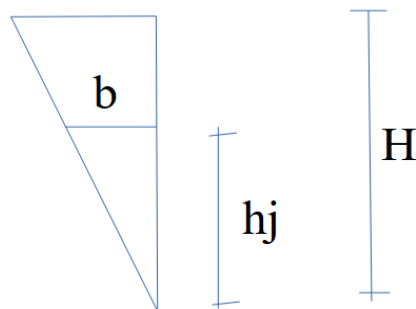
ρ : Massa específica do material;

g : Aceleração da gravidade.

Observa-se que foi possível deixar a equação da força peso da barragem em função da variável a ser otimizada (B).

Já a força peso da água segue o mesmo raciocínio, porém surge o comprimento da base da seção transversal de água a jusante (b), dado na equação 13, determinado através de uma relação de triângulos, observada na Figura 3, a qual foi-se possível deixá-lo em função do comprimento da base da barragem (B).

Figura 3: Representação das medidas do nível de água a jusante



Fonte: Autoria própria

$$b = \frac{B \cdot hj}{H} \quad (\text{Equação 13}).$$

Para a força peso da água tem-se a Equação 14, que pode ser rearranjada nas Equações 15 e 16.

$$F_a = m_a \cdot g \quad (\text{Equação 14})$$

$$F_a = (V_j \cdot \rho a) \cdot g \quad (\text{Equação 15})$$

$$F_a = \left(\frac{b \cdot hj}{2} L\right) \cdot \rho a \cdot g \quad (\text{Equação 16})$$

Substituindo a Equação 13 na Equação 16, tem-se:

$$F_a = \left(\frac{B \cdot hj^2}{2 \cdot H} L\right) \cdot \rho a \cdot g \quad (\text{Equação 17}),$$

onde:

F_a : Força peso da água a jusante da barragem;

m_a : é a massa da água;

V_j : Volume de água a jusante;

B : Comprimento da base da barragem;

b : Comprimento da base da seção transversal de água a jusante;

hj : Altura de água a jusante;

L : Comprimento da barragem;

ρa : Massa específica da água;

g : Aceleração da gravidade.

I.III) Forças de Subpressão

A subpressão, para Royer (2016), é a pressão exercida de baixo para cima pela água que se infiltra pela porosidade ou pela descontinuidade da fundação rochosa sob a barragem. Segundo a Eletrobrás (2003), em fundações contínuas, a subpressão deverá ser admitida como atuando sobre toda a área da base da barragem.

A montante da barragem há a presença da subpressão correspondente a altura hidrostática a montante e a jusante há a subpressão correspondente a altura hidrostática a jusante.

Para a força de subpressão a jusante da barragem (F_{u2}), obtém-se a Equação 18.

$$F_{u2} = P_j \cdot B \cdot L \quad (\text{Equação 18}),$$

onde:

F_{u2} : Força de subpressão a jusante;

P_j : Pressão da água a jusante da barragem;

B: Comprimento da base da seção transversal da barragem;

L: Comprimento da barragem.

Já para a força de subpressão a montante da barragem (F_{u1}), obtém-se a Equação 19.

$$F_{u1} = \frac{(P_m - P_j) B}{2} L \quad (\text{Equação 19}),$$

onde:

F_{u1} : Força de subpressão a montante;

P_m : Pressão da água a montante da barragem;

P_j : Pressão da água a jusante da barragem;

B: Comprimento da base da seção transversal da barragem;

L: Comprimento da barragem.

I.IV) Forças de Empuxo

Para a barragem existem duas formas de forças de empuxo, provocadas a montante e a jusante da barragem (F_{h1} e F_{h2} , respectivamente). F_{h1} dá-se pela Equação 20.

$$F_{h1} = \frac{P_m h_m}{2} L \quad (\text{Equação 20}),$$

onde:

F_{h1} : Força de empuxo da água a montante;

P_m : Pressão da água montante da barragem;

h_m : Altura de água a montante;

L: Comprimento da barragem.

Já F_{h2} dá-se pela Equação 21.

$$F_{h2} = \frac{P_j h_j}{2} L \quad (\text{Equação 21}),$$

onde:

F_{h2} : Força de empuxo da água a jusante;

P_j : Pressão da água a jusante da barragem;

h_j : Altura de água a jusante;

L: Comprimento da barragem.

Observa-se que, dentre todas as equações das forças hidrostáticas, as forças de empuxo são as únicas que não dependem do comprimento da base da seção transversal da barragem e, portanto, assumem valores constantes para o processo de otimização em questão.

II) SEGURANÇA QUANTO AO TOMBAMENTO

Quanto ao tombamento se analisa a necessidade que a barragem terá de se deslocar a depender das ações tombadoras (momentos). Para a Eletrobrás (2003), trata-se da relação entre o momento estabilizante e o momento de tombamento em relação a um ponto ou uma linha efetiva de rotação. Aqui também haverá três restrições, de acordo com Kruger (2008), dadas pelas Equações 22, 23 e 24.

$$\lambda_t = \frac{M_e}{M_t} \quad (\text{Equação 22})$$

$$M_e \geq \lambda_t M_t \quad (\text{Equação 23})$$

$$f(x) = M_e - M_t \quad (\text{Equação 24}),$$

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;

O fator de segurança quanto ao tombamento (escorregamento), como aponta o manual de Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás (2003), deve ser maior ou igual a 1,5 para uma Condição de Carregamento Normal.

Na Equação 23 a condição deverá ser satisfeita de modo que o fator de segurança ao tombamento multiplicado pela soma dos momentos tombadores não poderá ser maior do que a soma dos momentos estabilizadores.

Soma dos momentos estabilizadores >> Soma dos momentos tombadores.

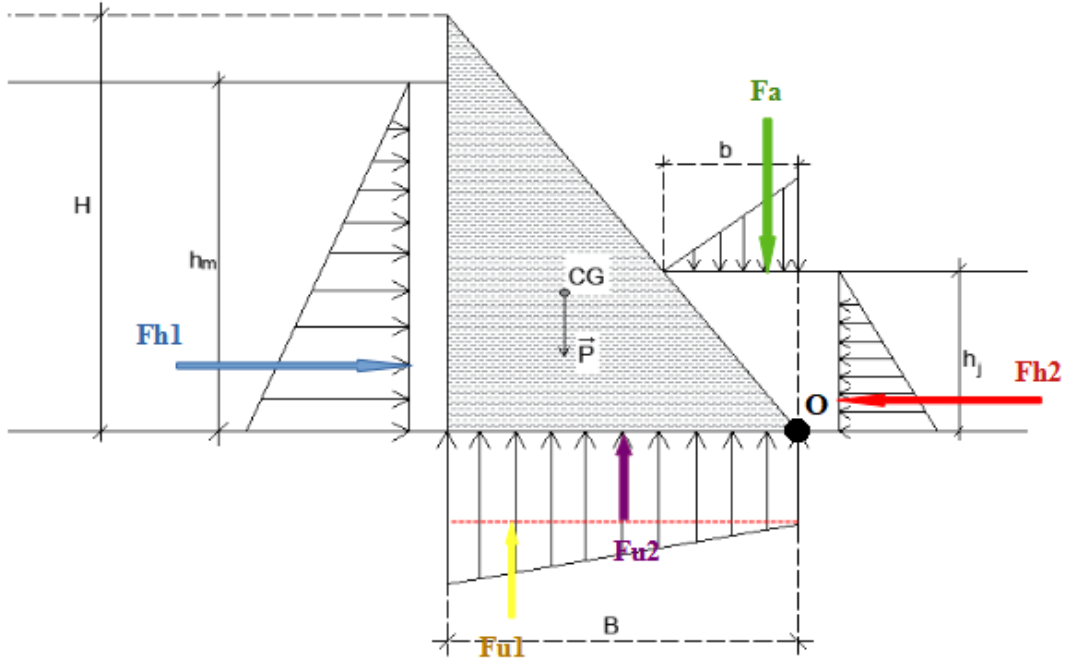
Já na Equação referente ao estado limite do tombamento (Equação 24), deverá ser maior do que zero visto que a parcela da soma dos momentos estabilizadores deverá ser maior do que a soma entre os momentos tombadores.

$$f(x) = M_e - M_t \geq 0.$$

II.I) Momentos Estabilizadores e Tombadores

O ponto a qual será tomado como base o giro da barragem em torno de seu eixo está representado na Figura 4 pela letra “O”, no qual, a partir dele, serão definidos os braços de alavanca para as seis forças hidrostáticas supracitadas. Sendo importante salientar que, a força peso da barragem também entra como hidrostática por está em função de H.

Figura 4: Forças geradoras de momento em relação ao ponto “O”



Fonte: Adaptada de Carvalho (2020)

Os **momentos estabilizadores**, neste caso, são os correspondentes às forças de empuxo da água a jusante (F_{h2}) e das forças pesos (P e F_a), dados pelas Equações 25, 26 e 27, respectivamente.

Momento da força de empuxo F_{h2} :

$$M_{h2} = F_{h2} \cdot \left(\frac{h_1}{3}\right) \quad (\text{Equação 25}).$$

Momento da força peso P :

$$M_P = P \cdot \left(\frac{2 \cdot B}{3}\right) \quad (\text{Equação 26}).$$

Momento da força peso F_a :

$$M_a = F_a \cdot \left(\frac{b}{3}\right) \quad (\text{Equação 27}).$$

Já os **momentos tombadores**, neste caso, são os correspondentes às forças de empuxo da água a montante (F_{h1}) e das forças de subpressão (F_{u1} e F_{u2}), dados pelas Equações 28, 29 e 30, respectivamente.

Momento da força de empuxo F_{h1} :

$$M_{h1} = F_{h1} \cdot \left(\frac{h_m}{3}\right) \quad (\text{Equação 28}).$$

Momento da Força de subpressão F_{u1} :

$$M_{u1} = F_{u1} \cdot \left(\frac{2 \cdot B}{3}\right) \quad (\text{Equação 29}).$$

Momento da Força de subpressão F_{u2} :

$$M_{u2} = F_{u2} \cdot \left(\frac{B}{2}\right) \quad (\text{Equação 30}).$$

É importante ressaltar que, de acordo com a Eletrobrás (2003), todos os fatores supracitados estão envolvidos no processo de análise quanto à estabilidade global da estrutura, portanto, não entram critérios de análise quanto a fissuras e outras deformações no qual a obra venha a apresentar ao longo de sua estrutura.

Resumindo, o problema aqui é definir os custos de implantação das barragens que estão em função do volume de material. Este volume é facilmente determinado quando se conhece a base da seção transversal da estrutura. Portanto, o objetivo é o comprimento da base da seção transversal da barragem:

Objetivo = B (Comprimento da base da seção transversal da barragem).

A função objetivo é uma função linear simples que está em função deste objetivo, sendo esta a área da seção transversal da barragem:

$$\text{Função Objetivo} = \text{Área} = \frac{H \cdot B}{2}.$$

As restrições propostas estão inseridas no contexto da estabilidade global da estrutura. Portanto, para o deslizamento, tem-se as Equações (supracitadas nas Equações 4, 5 e 6) e suas respectivas limitações, levando em consideração os

valores limites estabelecidos pela Eletrobrás (2003) para a Condição de Carregamentos Normais (CCN), representados na Tabela 2.

Tabela 2: Restrições quanto ao deslizamento e suas respectivas limitações

Equação	Operador	Limitação
$\lambda_d = \frac{(\gamma A + Fy)tg(\varphi) + CB}{Fx}$	\geq	1,5
$(\gamma A + Fy)tg(\Phi) + CB$	\geq	$\lambda_d Fx$
$(\gamma A + Fy)tg(\Phi) + CB - Fx$	\geq	0

Fonte: Autoria própria

Nesse mesmo sentido, a Tabela 3 dispõe das Equações (supracitadas nas Equações 22, 23 e 24) e suas respectivas limitações quanto ao tombamento da estrutura, também seguindo os critérios de projeto da Eletrobrás (2003).

Tabela 3: Restrições quanto ao tombamento e suas respectivas limitações

Equação	Operador	Limite
$\lambda_t = \frac{M_e}{M_t}$	\geq	1,5
M_e	\geq	$\lambda_t M_t$
$M_e - M_t$	\geq	0

Fonte: Autoria própria

4.3.3 Apresentação da Planilha em Excel

Após a definição das características da barragem juntamente com as ações utilizadas na análise quanto a estabilidade global da obra, dá-se início a otimização utilizando-se planilhas do *Excel* as quais serão postas os dados supracitados e as devidas equações que serão aproveitadas nas restrições do processo.

A planilha apresenta-se dividida em quatro abas/guias sendo estas “Dados”, “Forças”, “Momentos” e “Otimização”.

Na Guia “Dados”, apresentada na Figura 5, encontram-se as variáveis iniciais para o desenvolvimento da otimização. A partir das duas tabelas com títulos de “Barragem de Terra” e “Solo de Fundação Duro” opta-se pela escolha do material da barragem, Barragem de Terra ou Barragem de Concreto, e pelo solo de fundação desejado, Solo de Fundação Duro ou Solo de Fundação Mole, respectivamente. Para ambos os casos há parâmetros que podem variar a depender da escolha, como o peso específico do material para o tipo de barragem selecionada e o ângulo de atrito e a coesão do solo a depender do solo de fundação requerido.

Figura 5: Guia “Dados” da Planilha em *Excel*

Barragem de Terra	
Altura da barragem:	H = 92,00 m
Base da barragem:	B = 353,57 m
Comprimento da barragem:	L = 1,00 m
Área da seção transversal da barragem:	A = 16264,21 m ²
Peso específico do material:	$\gamma = 15,50 \text{ kN/m}^3$
Massa específica do material:	$\rho = 1581,63 \text{ Kg/m}^3$
Volume do material:	V = 16264,21 m ³
Massa do material:	m = 25724005,72 Kg
Aceleração da gravidade:	g = 9,80 m/s ²
Custo para a implantação (R\$/m ³):	CI = 10,14

Solo de Fundação Duro	
Ângulo de atrito:	$\phi = 30,00^\circ$
Coesão:	C = 0,4500 MPa
Tangente do ângulo de atrito:	$\text{tg}(\phi) = 0,58$

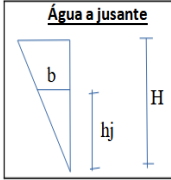
+ Dados	
Forças	Momentos
Otimização	

Fonte: Autoria própria

Em “Forças”, apresentado na Figura 6, encontram-se os outros dados referentes aos níveis, massa e volume de água e os cálculos para as forças hidrostáticas. As formulações supracitadas para ambas as forças apresentam-se embutidas nas células do *software* a qual são declaradas.

Figura 6: Guia “Forças” da Planilha em *Excel*

OUTROS DADOS	
Massa específica da água:	$\rho_a = 1000 \text{ Kg/m}^3$
Nível da água à montante:	$h_m = 82,50 \text{ m}$
Nível de água à jusante:	$h_j = 26,00 \text{ m}$
Volume de água a jusante:	$V_j = 1298,98 \text{ m}^3$
Massa da água:	$m_a = 1298984,64 \text{ Kg}$



Água a jusante

FORÇAS HIDROSTÁTICAS		
Pesos	Empuxos	Subpressões
$P = 252095,26 \text{ kN}$	$F_{h1} = 33350,63 \text{ kN}$	$F_{u1} = 97885,79 \text{ kN}$
$F_a = 12730,05 \text{ kN}$	$F_{h2} = 3312,40 \text{ kN}$	$F_{u2} = 90089,58 \text{ kN}$

SOMA DAS FORÇAS	
Horizontais	Verticais
$F_x = 30038,23 \text{ kN}$	$F_y = 76849,93 \text{ kN}$

FORÇAS HIDROSTÁTICAS

Fonte: Autoria própria

Na Aba “Momentos” expressa-se os momentos calculados para cada tipo de força existente na barragem e os momento resultante para o tombamento e para a estabilização, demonstrada na Figura 7.

Figura 7: Guia “Momentos” da Planilha em *Excel*

MOMENTOS	
Momento proveniente do empuxo (Fh1)	Mh1 = 917142,19 kN.m
Momento devido a força de subpressão (Fu1)	Mu1 = 23072972,88 kN.m
Momento devido a força de subpressão (Fu2)	Mu2 = 15926476,85 kN.m
Momento devido a peso próprio da barragem (P)	Mp = 59422176,86 kN.m
Momento proveniente do peso da água (Fa)	Ma = 424003,56 kN.m
Momento proveniente do empuxo (Fh2)	Mh2 = 28707,47 kN.m

SOMA DOS MOMENTOS	
Tombadores	Estabilizadores
Mt = 39916591,92 kN.m	Me = 59874887,88 kN.m

FORÇAS HIDROSTÁTICAS	

+ Dados | Forças | **Momentos** | Otimização

Fonte: Autoria própria

Por fim, em “Otimização”, presente na Figura 8, denota-se às seis restrições impostas para as situações de Deslizamento e Tombamento da estrutura, utilizadas, dessa forma, em conjunto com a função objetivo para definirem o comprimento da base da barragem e o seu custo final.

Figura 8: Guia “Otimização” da Planilha em *Excel*

Restrições	
Deslizamento	Tombamento
$\lambda d = 11,62$	$\lambda t = 1,50$
$349022,99 \text{ kN} \geq 349022,99 \text{ kN}$	$59874887,88 \text{ N.m} \geq 59874887,88 \text{ kN.m}$
$g(x) = 318984,77$	$f(x) = 19958295,96$

Função Objetivo (fobj = 46 . B)
16264,21

Custo da Barragem
R\$ 164.919,09

Fonte: Autoria própria

4.3.4 Otimização Utilizando o Solver

Com as funções definidas nas demais Guias da planilha, foi-se utilizada a aba da ferramenta *Solver*, do *Microsoft Excel*, para configurar os dados de entrada do processo referentes a função objetivo, o tipo de otimização (maximização ou minimização), a célula variável e o conjunto de restrições, demonstrado na Figura 9.

Figura 9: Dados de Entrada no Solver

The image shows the Solver dialog box in Microsoft Excel. The 'Célula objetivo' (Target Cell) is set to '\$B\$15'. Under 'Otimizar para' (To:), the 'Mínimo' (Min) radio button is selected. The 'Células variáveis' (Variable Cells) field is set to '\$Dados.\$D\$7'. The 'Conjunto de restrições' (Constraints) section contains a table with the following entries:

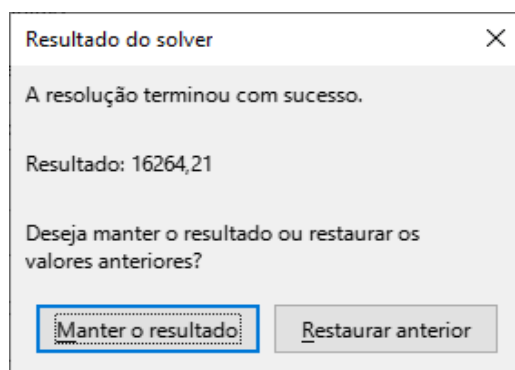
Referência de célula	Operador	Valor
\$D\$7	=>	1,5
\$B\$8	=>	\$D\$8
\$D\$9	=>	0
\$G\$7	=>	1,5

At the bottom of the dialog, there are buttons for 'Ajuda', 'Redefinir tudo', 'Opções...', 'Fechar', and 'Resolver'.

Fonte: Autoria própria

A função objetivo trata-se de uma função linear, porém, as restrições impostas quanto ao tombamento resultam em funções quadráticas devido a multiplicação da força, que, em alguns casos, já possui a variável de decisão embutida nas formulações supracitadas, e o braço de alavanca que muitas vezes depende do valor da base. Portanto, as restrições quanto ao tombamento caracterizam-se como funções não lineares da variável de decisão, sendo assim, nas “Opções” o método de processamento a ser escolhido é o “Não Linear”.

Após serem executadas todas as tentativas o *software* fornece, com um certo tempo de processamento, o resultado final para a função objetivo respeitando todas as restrições impostas, como demonstrado na Figura 10.

Figura 10: Tela de Resultado do *Solver*

Fonte: Autoria própria

4.3.5 Valores Obtidos

Ao finalizar a otimização utilizando o módulo *Solver* foram obtidos valores referentes aos fatores de segurança quanto ao deslizamento e ao tombamento, presentes nas Tabelas 4 e 5, respectivamente. Todas as situações analisadas apresentaram coeficientes de segurança acima ou iguais aos valores limites estabelecidos pela Eletrobrás (2003) para a Condição de Carregamentos Normais (CCN).

Tabela 4: Coeficientes de Segurança Obtidos para o Deslizamento da Estrutura

CASOS	DESLIZAMENTO		
	FS OBTIDO	FS LIMITE	RAZÃO = (FS OBTIDO/FS LIMITE)
CONCRETO - ARGILA DURA	3,32	1,50	2,21
CONCRETO - ARGILA MOLE	1,50	1,50	1,00
TERRA - ARGILA DURA	11,62	1,50	7,75
TERRA - ARGILA MOLE	3,66	1,50	2,44

Fonte: Autoria própria

Tabela 5: Coeficientes de Segurança Obtidos para o Tombamento da Estrutura

CASOS	TOMBAMENTO		
	FS OBTIDO	FS LIMITE	RAZÃO = (FS OBTIDO/FS LIMITE)
CONCRETO - ARGILA DURA	1,50	1,50	1,00
CONCRETO - ARGILA MOLE	1,66	1,50	1,11
TERRA - ARGILA DURA	1,50	1,50	1,00
TERRA - ARGILA MOLE	1,50	1,50	1,00

Fonte: Autoria própria

Quanto ao comprimento da base da seção transversal da barragem, para ambas as situações, os resultados estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6: Valores Obtidos para a Base das Barragens

Comprimento da Base da Seção Transversal da Barragem		
	Barragem de Concreto	Barragem de Terra
Solo de Fundação Duro	66,77 m	353,57 m
Solo de Fundação Mole	76,84 m	353,57 m

Fonte: Autoria própria

É de suma importância fazer o comparativo dos resultados obtidos pelo *software* com a Tabela 7.2 do livro **Obras de terra: curso básico de geotecnia** (Massad, 2010, p.183) referente ao “Custo relativo de alguns tipos de barragens, levando em conta só os materiais e seus volumes”, sendo importante destacar a **ausência de fontes atualizadas relativas aos custos das barragens de concreto e de terra**. Nela há a presença do comprimento da base da seção transversal da barragem e o seu respectivo volume em função de sua altura (H) demonstrados na Tabela 7.

Tabela 7: Custo relativo de alguns tipos de barragens, levando em conta só os materiais e seus volumes

Tipo de Barragem	Base	Volume (m³/m)	Custo relativo
Terra homogênea	5,5 H	2,75 H ²	1
Enrocamento	3,7 H	1,8 H ²	1,5
Aterro hidráulico	10 H	5 H ²	0,7
Concreto massa	0,8 H	0,4 H ²	5

Fonte: Massad (2010, p.183)

Para fins de comparação com os resultados obtidos para a base da Barragem de Concreto e de Terra, substitui-se a altura pré definida nesta situação, de 92 metros, nas situações propostas pelo autor na Tabela 7 para as barragens de terra homogênea e barragem de concreto.

Comprimentos da Base de acordo com Massad (2010, p.183):

$$Base da Barragem de Concreto = 0,8H = 73,6 m$$

$$Base da Barragem de Terra = 5,5H = 506 m$$

Comparando o valor da base calculado de acordo com Massad (2010, p.183) e o valor obtido pela otimização para o solo de fundação mais resistente (duro), no qual está mais próximo da situação adequada ou real, obtém-se o seguinte erro percentual para ambas as barragens:

$$E(\%)_{CONCRETO} = \frac{|(B_{MASSAD} - B_{OTIMIZAÇÃO})|}{B_{MASSAD}} \times 100 = 9,28\%$$

$$E(\%)_{TERRA} = \frac{|(B_{MASSAD} - B_{OTIMIZAÇÃO})|}{B_{MASSAD}} \times 100 = 30,12\%$$

Observa-se que, assumindo o valor do autor como um acerto de 100% (Valor Real) o erro obtido para a base da barragem de concreto (9,28%) foi extremamente pequeno. Porém, para a barragem de terra (solo “In Situ” seco) o mesmo se apresentou um pouco maior (30,12%) por, evidentemente, não se tratar de um material de constituição parecida com a declarada por Massad (2010, p.183) (Barragem de Terra Homogênea). Entretanto, esse valor divergiu ainda mais devido a ausência de outras análises cruciais para obras envolvendo solo como estudos de percolação das águas na estrutura. Além disso, como recomenda a Eletrobrás (2003), para um dimensionamento completo das barragens deve ser dada uma atenção especial não só as condições de Estado Limite de Perda de Equilíbrio Global analisadas aqui, mas, também, ao Estudo Limite Quanto a Perda Parcial da Estrutura, sendo elas:

- Tensões na base da fundação e na estrutura;
- Estabilidade elástica (flambagem)
- Vibrações;
- Deformações e recalques;

Sendo este último fator o mais relevante quando se tem um solo de fundação mole, no qual possui alta compressibilidade e baixa resistência ao cisalhamento. Vale

salientar que a Tabela 4 evidenciou este fato principalmente para a barragem de concreto que possui um maior peso específico para uma menor área de aplicação, aumentando a tensão no solo de fundação. Tanto para a barragem de concreto como para a barragem de solo “In Situ” esse fator de segurança quanto ao deslizamento da barragem na situação de solo duro apresentou um valor acima do limite estabelecido, fato que não acontece para o solo mole, a qual apresenta menor ângulo de atrito e menor coesão conferindo-lhe maior instabilidade em sua superfície, resultando, portanto, em uma redução no fator de segurança quanto ao deslizamento Barragem-Fundação.

Além disso, ao analisar as seguintes relações percebe-se que, a barragem de concreto possui um menor comprimento de base para ambas as situações sendo cerca de cinco a seis vezes menor para o solo de fundação composto por argila dura e de quatro a cinco vezes menor para um solo de fundação constituído por argila mole.

Solo de Fundação Duro:

$$\frac{\text{Base da Barragem de Terra}}{\text{Base da Barragem de Concreto}} = \frac{353,57}{66,77} \approx 5,30$$

Solo de Fundação Mole:

$$\frac{\text{Base da Barragem de Terra}}{\text{Base da Barragem de Concreto}} = \frac{353,57}{76,84} \approx 4,60$$

Os resultados obtidos para a Base da Barragem estão diretamente ligados com o volume de material a ser gasto na construção da mesma. Dessa forma, os valores obtidos para o volume de material a ser gasto por metro, a depender da situação escolhida, estão presentes na Tabela 8.

Tabela 8: Volume de Material Obtido para as Barragens

Volume, por metro, de Material Gasto para a Implantação da Barragem		
	Barragem de Concreto	Barragem de Terra
Solo de Fundação Duro	3071,58 m³	16264,21 m³
Solo de Fundação Mole	3534,45 m³	16264,21 m³

Fonte: Autoria própria

Nota-se, que o volume de material gasto também é cerca de cinco vezes menor para a construção da Barragem de Concreto se comparado com o resultado obtido pela otimização para a Barragem de Terra.

$$\frac{\text{Volume de Material na Barragem de Terra}}{\text{Volume de Material na Barragem de Concreto}} = \frac{16264,21}{3071,58} \approx 5,30$$

Observa-se ainda que para solos moles há um aumento considerável na base da barragem, isso se dá, segundo Massad (2010, p.197), devido ao solo de fundação necessitar, como já foi citado anteriormente, de um controle quanto a sua percolação, se o solo for mole ele apresenta baixa permeabilidade, baixa capacidade de suporte e alta compressibilidade, características essas que dificilmente podem ser melhoradas. Sendo assim, esse aumento no volume de material é evidenciado ainda mais para a **barragem de concreto**, sendo a relação entre seu volume sobre solo mole e o seu volume sobre solo duro correspondente a 1,15.

$$\frac{\text{Volume de Material da Barragem de Concreto em Solo Mole}}{\text{Volume de Material da Barragem de Concreto em Solo Duro}} = \frac{3534,45}{3071,58} \approx 1,15$$

Já para a **barragem de terra** os valores referentes aos volumes de materiais mantêm-se constantes devido ao seu comprimento da base da seção transversal não se alterar. Isso ocorre, todavia, pelo fato do *software* realocar, neste caso, a medida da base da barragem sempre a depender da segurança quanto ao tombamento da estrutura visto que, para o deslizamento os fatores de segurança apresentam-se muito acima do limite imposto, para ambas as situações envolvendo a barragem de terra. Para o tombamento o que traz a instabilidade é a redução da base da barragem, portanto, se a obra permanecer segura quanto ao deslizamento, sem reduzir ainda mais o ângulo de atrito do solo e sua coesão, o algoritmo irá realocar os valores da base a depender apenas da segurança quanto ao tombamento da estrutura, o que resulta em um mesmo resultado para ambas as situações envolvendo a barragem de terra.

O método para a determinação da base da Barragem de concreto, acerca do solo de fundação em argila dura, retornou uma base de 66,77 metros. 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/m³ para a Barragem de Terra (Código 050101) e 344,04 Reais/m³ 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. A Tabela 9 demonstra os custos obtidos para as demais situações.

Tabela 9: Custo de Material das Barragens

Custo de Material da Barragem			
	Custo Relativo por m ³	Solo de Fundação Duro	Solo de Fundação 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

Fonte: Autoria própria

Acerca dos custos, notou-se que as barragens de concreto apresentam valores quase dez vezes maiores do que as barragens de terra, o dobro do custo relativo proposto por Massad (2010, p.183), entretanto, tanto para o autor como para o Ministério do Desenvolvimento Regional (2021), é evidente que “as barragens de concreto são as mais caras, donde o seu uso vem a ser, em geral, restrito às estruturas anexas ou auxiliares” (Massad, 2010, p.183). Atrelado a isso deve-se atentar, de acordo com Massad (2010), para o fato de que a estrutura de preços é sempre dinâmica, variável no tempo e no espaço, dependendo de fatores como custos dos combustíveis, da energia, dos insumos básicos, etc., além do fato da Tabela 7 referente aos custos relativos de materiais de diversas barragens ser do ano de 2010, cerca de 13 anos atrás, por falta de fontes bibliográficas contendo esses custos atualizados.

5. CONCLUSÕES

Tomando como base a execução desta análise apenas pelo Estado de Equilíbrio Global (Deslizamento e Tombamento), na obtenção das medidas da base da seção transversal da barragem, tornam-se satisfatórios os resultados obtidos dentro dos limites impostos pelo Manual da Eletrobrás (2003).

A Partir dos resultados obtidos torna-se possível efetuar algumas observações com relação às Barragens e o seu solo de fundação. É importante citar previamente sua interferência no resultado final em ambos os casos, tendo em vista que a análise foi feita em cima da situação crítica da barragem a qual consiste na análise quanto ao **deslizamento** e ao **tombamento** da estrutura considerando como fundação apenas o próprio solo. O solo não provê resistências adicionais quanto ao deslizamento se tratando apenas de sua coesão e de seu ângulo de atrito, observa-se que o **peso** da

estrutura é o principal agente contra o deslizamento e o tombamento da estrutura. Portanto, isso acarreta em uma barragem com **maior peso** e, conseqüentemente, **maior volume**. Sendo assim, a segurança da obra está ligada a um maior volume da estrutura, o que acarretou em um custo, da barragem de concreto, muito elevado, cerca de dez vezes o valor da barragem de terra.

Apesar disso, esse estudo permite o conhecimento das características de ambas as barragens para situações de estabilidade global quanto ao deslizamento e ao tombamento, tendo em vista que a barragem de terra resultou em custos muito menores, mas com volumes muito maiores se comparado aos obtidos pela barragem de concreto, o que, para muitos projetistas, pode ser uma desvantagem pelo grande porte que essa obra terá, optando-se, muitas vezes, pela barragem de concreto para reduzir a área de implantação da obra.

Para uma barragem de grande porte avalia-se principalmente o grande impacto ambiental (desmatamento) que a mesma irá causar na região devido a sua grande área de implantação, afetando a vegetação, os recursos hídricos e outros fatores locais, além disso para uma obra de terra consideravelmente grande o engenheiro precisará de uma grande área de empréstimo de solo e de despejo/implantação. Porém, a barragem de concreto também acarreta desvantagens além do seu alto custo por se tratar de uma obra geralmente empregada não só no barramento da água, mas, também, como usina hidrelétrica podendo acarretar a intensificação da degradação e erosão dos solos locais, a alteração do microclima e a poluição do ar e da água. Sendo assim, o engenheiro deverá avaliar a área disponível tanto de empréstimo como de implantação, o objetivo da obra e os riscos que a sua implantação poderá causar em virtude de seu tamanho e/ou do material da mesma.

Conseqüentemente, esse comparativo entre os volumes de materiais e seus respectivos custos nos proporciona o conhecimento de qual das quatro situações analisadas será, conseqüentemente, a de menor porte ou a mais econômica, sendo, portanto, avaliada graças ao resultado obtido pelo processo de otimização que retornou o comprimento da base (B) definida pelo processo decorrente de inúmeras tentativas elaboradas pelo *Excel*. Desse modo, a análise é fundamental para que as barragens sejam dimensionadas do ponto de vista econômico e tecnicamente seguro, determinando de forma precisa as suas dimensões a fim de se obter um menor porte para a estrutura gerando segurança, eficiência e economia para a obra.

Portanto, esse trabalho buscou oferecer alternativas para a construção de barragens a depender do material a ser empregado, sendo este variando entre concreto e terra, para os diferentes tipos de solo de fundação. Percebe-se que, com o auxílio da ferramenta computacional *Excel*, vê-se uma melhora em determinar as incertezas da construção das barragens para o projetista. Tendo em vista isso, observa-se as inúmeras vantagens que o mesmo promove como a economia de tempo graças ao seu trabalho automatizado, economia de inúmeras horas de tarefas repetitivas, um maior senso analítico para com a situação analisada, facilidade em resolver problemas, raciocínio lógico para desenvolver fórmulas complexas e que exigem precisão nos resultados, como é o caso das barragens, e por se tratar de um *software* fácil e amplamente utilizado no mercado de trabalho.

Nota-se o avanço da tecnologia atrelada a *softwares* que permitem o aperfeiçoamento das aplicações de projetos de engenharia civil conferindo-lhes, com eficiência, obras seguras com base em critérios de projeto cabendo ao projetista, entretanto, escolher a situação mais adequada para o seu projeto, seja pela análise quanto à estabilidade da obra, pelos recursos disponíveis (espaço, tempo, dinheiro, mão de obra, etc.) e/ou a análise econômica seguindo critérios a qual a sua obra estará inserida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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 [...]. Pombal-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.
- ELETRORBRÁS (Centrais Elétricas Brasileiras S. A.). **Critérios 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 Companhias Industriais: O CASO DA CAMPANHIA VALE DO RIO DOCE**. Revista de Contabilidade e Organizações, FEA-RP/USP, 2010.
- JESUS, R. D. **Otimização 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, Faïçal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- MICROSOFT. **Definir e resolver um problema usando o Solver**. 2021. *Microsoft Support*. Disponível em: <<https://support.microsoft.com/pt-br/office/definir-e-resolver-um-problema-usando-o-solver-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>>. Acesso em: 07 de outubro de 2023.
- Ministério do Desenvolvimento Regional. **Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste 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.

PRADO, Lauro Jorge. **COMO USAR O SOLVER PARA RESOLVER PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO NO EXCEL**: Resolver problemas complexos com facilidade usando o *Solver* do *Excel*. LinkedIn, 2023. Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/como-usar-o-solver-para-resolver-problemas-de-otimiza%C3%A7%C3%A3o-prado>>. Acesso em: 07 de outubro de 2023.

RODRIGUES, Leonardo. **Conheça o Solver, suas funcionalidades e aprenda como utilizar essa poderosa ferramenta!** Aprenda o que é e como usar a função *solver* do *microsoft excel*, uma ferramenta que irá te ajudar a solucionar problemas e otimizar suas planilhas. Voitto, 2020. Disponível em: <<https://www.voitto.com.br/blog/artigo/solver>>. Acesso em: 07 de outubro de 2023.

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.

APÊNDICES

APÊNDICE A - TABELAS DO *EXCEL* REFERENTES A BARRAGEM DE CONCRETO SOBRE SOLO DURO

Barragem de Concreto	
Altura da barragem:	$H = 92,00 \text{ m}$
Base da barragem:	$B = 66,77 \text{ m}$
Comprimento da barragem:	$L = 1,00 \text{ m}$
Área da seção transversal da barragem:	$A = 3071,58 \text{ m}^2$
Peso específico do material:	$\gamma = 25,00 \text{ kN/m}^3$
Massa específica do material:	$\rho = 2551,02 \text{ Kg/m}^3$
Volume do material:	$V = 3071,58 \text{ m}^3$
Massa do material:	$m = 7835651,53 \text{ Kg}$
Aceleração da gravidade:	$g = 9,80 \text{ m/s}^2$
Custo para a implantação (R\$/m ³):	$CI = 344,04$

Solo de Fundação Duro	
Ângulo de atrito:	$\varphi = 30,00^\circ$
Coesão:	$C = 0,4500 \text{ MPa}$
Tangente do ângulo de atrito:	$\text{tg}(\varphi) = 0,58$

OUTROS DADOS	
Massa específica da água:	$\rho_a = 1000 \text{ Kg/m}^3$
Nível da água à montante:	$h_m = 82,50 \text{ m}$
Nível de água à jusante:	$h_j = 26,00 \text{ m}$
Volume de água a jusante:	$V_j = 245,32 \text{ m}^3$
Massa da água:	$m_a = 245319,59 \text{ Kg}$

$\frac{b}{B} = \frac{h_j}{H}$	$b = 18,87 \text{ m}$
B	

PRESSÕES	
Montante:	$P_m = 808500,00 \text{ Pa}$
Jusante:	$P_j = 254800,00 \text{ Pa}$

FORÇAS HIDROSTÁTICAS		
Pesos	Empuxos	Subpressões
$P = 76789,38 \text{ kN}$	$F_{h1} = 33350,63 \text{ kN}$	$F_{u1} = 18486,21 \text{ kN}$
$F_a = 2404,13 \text{ kN}$	$F_{h2} = 3312,40 \text{ kN}$	$F_{u2} = 17013,86 \text{ kN}$

SOMA DAS FORÇAS	
Horizontais	Verticais
$F_x = 30038,23 \text{ kN}$	$F_y = 43693,45 \text{ kN}$

MOMENTOS	
Momento proveniente do empuxo (Fh1)	Mh1 = 917142,19 kN.m
Momento devido a força de subpressão (Fu1)	Mu1 = 822924,45 kN.m
Momento devido a força de subpressão (Fu2)	Mu2 = 568036,35 kN.m
Momento devido a peso próprio da barragem (P)	Mp = 3418324,43 kN.m
Momento proveniente do peso da água (Fa)	Ma = 15122,58 kN.m
Momento proveniente do empuxo (Fh2)	Mh2 = 28707,47 kN.m

SOMA DOS MOMENTOS	
Tombadores	Estabilizadores
Mt = 2308102,98 kN.m	Me = 3462154,48 kN.m

Restrições	
Deslizamento	Tombamento
$\lambda_d = 3,32$	$\lambda_t = 1,50$
99608,82 kN \geq 99608,82 kN	3462154,48 N.m \geq 3462154,48 kN.m
$g(x) = 69570,59$	$f(x) = 1154051,49$

Função Objetivo (fobj = 46 . B)
3071,58

Custo da Barragem
R\$ 1.056.744,80

**APÊNDICE B - TABELAS DO EXCEL REFERENTES A BARRAGEM DE CONCRETO
SOBRE SOLO MOLE**

Barragem de Concreto	
Altura da barragem:	$H = 92,00 \text{ m}$
Base da barragem:	$B = 76,84 \text{ m}$
Comprimento da barragem:	$L = 1,00 \text{ m}$
Área da seção transversal da barragem:	$A = 3534,45 \text{ m}^2$
Peso específico do material:	$\gamma = 25,00 \text{ kN/m}^3$
Massa específica do material:	$\rho = 2551,02 \text{ Kg/m}^3$
Volume do material:	$V = 3534,45 \text{ m}^3$
Massa do material:	$m = 9016445,74 \text{ Kg}$
Aceleração da gravidade:	$g = 9,80 \text{ m/s}^2$
Custo para a implantação (R\$/m ³):	$CI = 344,04$

Solo de Fundação Mole	
Ângulo de atrito:	$\varphi = 17,50^\circ$
Coesão:	$C = 0,0175 \text{ MPa}$
Tangente do ângulo de atrito:	$\text{tg}(\varphi) = 0,32$

OUTROS DADOS	
Massa específica da água:	$\rho_a = 1000 \text{ Kg/m}^3$
Nível da água à montante:	$h_m = 82,50 \text{ m}$
Nível de água à jusante:	$h_j = 26,00 \text{ m}$
Volume de água a jusante:	$V_j = 282,29 \text{ m}^3$
Massa da água:	$m_a = 282288,04 \text{ Kg}$

$\frac{b}{B} = \frac{h_j}{H}$	$b = 21,71 \text{ m}$
B	

PRESSÕES	
Montante:	$P_m = 808500,00 \text{ Pa}$
Jusante:	$P_j = 254800,00 \text{ Pa}$

FORÇAS HIDROSTÁTICAS		
Pesos	Empuxos	Subpressões
$P = 88361,17 \text{ kN}$	$F_{h1} = 33350,63 \text{ kN}$	$F_{u1} = 21271,99 \text{ kN}$
$F_a = 2766,42 \text{ kN}$	$F_{h2} = 3312,40 \text{ kN}$	$F_{u2} = 19577,76 \text{ kN}$

SOMA DAS FORÇAS	
Horizontais	Verticais
$F_x = 30038,23 \text{ kN}$	$F_y = 50277,84 \text{ kN}$

MOMENTOS	
Momento proveniente do empuxo (Fh1)	Mh1 = 917142,19 kN.m
Momento devido a força de subpressão (Fu1)	Mu1 = 1089633,60 kN.m
Momento devido a força de subpressão (Fu2)	Mu2 = 752136,47 kN.m
Momento devido a peso próprio da barragem (P)	Mp = 4526200,61 kN.m
Momento proveniente do peso da água (Fa)	Ma = 20023,80 kN.m
Momento proveniente do empuxo (Fh2)	Mh2 = 28707,47 kN.m

SOMA DOS MOMENTOS	
Tombadores	Estabilizadores
Mt = 2758912,25 kN.m	Me = 4574931,88 kN.m

Restrições			
Deslizamento		Tombamento	
$\lambda_d = 1,50$		$\lambda_t = 1,66$	
45057,34 kN \geq 45057,34 kN		4574931,88 N.m \geq 4574931,88 kN.m	
$g(x) = 15019,11$		$f(x) = 1816019,62$	

Função Objetivo (fobj = 46 . B)
3534,45

Custo da Barragem
R\$ 1.215.991,05

APÊNDICE C - TABELAS DO EXCEL REFERENTES A BARRAGEM DE TERRA SOBRE SOLO DURO

Barragem de Terra	
Altura da barragem:	$H = 92,00 \text{ m}$
Base da barragem:	$B = 353,57 \text{ m}$
Comprimento da barragem:	$L = 1,00 \text{ m}$
Área da seção transversal da barragem:	$A = 16264,21 \text{ m}^2$
Peso específico do material:	$\gamma = 15,50 \text{ kN/m}^3$
Massa específica do material:	$\rho = 1581,63 \text{ Kg/m}^3$
Volume do material:	$V = 16264,21 \text{ m}^3$
Massa do material:	$m = 25724005,72 \text{ Kg}$
Aceleração da gravidade:	$g = 9,80 \text{ m/s}^2$
Custo para a implantação (R\$/m ³):	$CI = 10,14$

Solo de Fundação Duro	
Ângulo de atrito:	$\varphi = 30,00^\circ$
Coesão:	$C = 0,4500 \text{ MPa}$
Tangente do ângulo de atrito:	$\text{tg}(\varphi) = 0,58$

OUTROS DADOS	
Massa específica da água:	$\rho_a = 1000 \text{ Kg/m}^3$
Nível da água à montante:	$h_m = 82,50 \text{ m}$
Nível de água à jusante:	$h_j = 26,00 \text{ m}$
Volume de água a jusante:	$V_j = 1298,98 \text{ m}^3$
Massa da água:	$m_a = 1298984,64 \text{ Kg}$

$\frac{b}{B} = \frac{h_j}{H}$	
$b = 99,92 \text{ m}$	

PRESSÕES	
Montante:	$P_m = 808500,00 \text{ Pa}$
Jusante:	$P_j = 254800,00 \text{ Pa}$

FORÇAS HIDROSTÁTICAS		
Pesos	Empuxos	Subpressões
$P = 252095,26 \text{ kN}$	$F_{h1} = 33350,63 \text{ kN}$	$F_{u1} = 97885,79 \text{ kN}$
$F_a = 12730,05 \text{ kN}$	$F_{h2} = 3312,40 \text{ kN}$	$F_{u2} = 90089,58 \text{ kN}$

SOMA DAS FORÇAS	
Horizontais	Verticais
$F_x = 30038,23 \text{ kN}$	$F_y = 76849,93 \text{ kN}$

MOMENTOS	
Momento proveniente do empuxo (Fh1)	Mh1 = 917142,19 kN.m
Momento devido a força de subpressão (Fu1)	Mu1 = 23072972,88 kN.m
Momento devido a força de subpressão (Fu2)	Mu2 = 15926476,85 kN.m
Momento devido a peso próprio da barragem (P)	Mp = 59422176,86 kN.m
Momento proveniente do peso da água (Fa)	Ma = 424003,56 kN.m
Momento proveniente do empuxo (Fh2)	Mh2 = 28707,47 kN.m

SOMA DOS MOMENTOS	
Tombadores	Estabilizadores
Mt = 39916591,92 kN.m	Me = 59874887,88 kN.m

Restrições			
Deslizamento		Tombamento	
$\lambda_d = 11,62$		$\lambda_t = 1,50$	
349022,99 kN \geq 349022,99 kN		59874887,88 N.m \geq 59874887,88 kN.m	
$g(x) = 318984,77$		$f(x) = 19958295,96$	

Função Objetivo (fobj = 46 . B)
16264,21

Custo da Barragem
R\$ 164.919,09

APÊNDICE D - TABELAS DO EXCEL REFERENTES A BARRAGEM DE TERRA SOBRE SOLO MOLE

Barragem de Terra	
Altura da barragem:	$H = 92,00 \text{ m}$
Base da barragem:	$B = 353,57 \text{ m}$
Comprimento da barragem:	$L = 1,00 \text{ m}$
Área da seção transversal da barragem:	$A = 16264,21 \text{ m}^2$
Peso específico do material:	$\gamma = 15,50 \text{ kN/m}^3$
Massa específica do material:	$\rho = 1581,63 \text{ Kg/m}^3$
Volume do material:	$V = 16264,21 \text{ m}^3$
Massa do material:	$m = 25724005,72 \text{ Kg}$
Aceleração da gravidade:	$g = 9,80 \text{ m/s}^2$
Custo para a implantação (R\$/m ³):	$CI = 10,14$

Solo de Fundação Mole	
Ângulo de atrito:	$\varphi = 17,50^\circ$
Coesão:	$C = 0,0175 \text{ MPa}$
Tangente do ângulo de atrito:	$\text{tg}(\varphi) = 0,32$

OUTROS DADOS	
Massa específica da água:	$\rho_a = 1000 \text{ Kg/m}^3$
Nível da água à montante:	$h_m = 82,50 \text{ m}$
Nível de água à jusante:	$h_j = 26,00 \text{ m}$
Volume de água a jusante:	$V_j = 1298,98 \text{ m}^3$
Massa da água:	$m_a = 1298984,64 \text{ Kg}$

$\frac{b}{B} = \frac{h_j}{H}$	$b = 99,92 \text{ m}$

PRESSÕES	
Montante:	$P_m = 808500,00 \text{ Pa}$
Jusante:	$P_j = 254800,00 \text{ Pa}$

FORÇAS HIDROSTÁTICAS		
Pesos	Empuxos	Subpressões
$P = 252095,26 \text{ kN}$	$F_{h1} = 33350,63 \text{ kN}$	$F_{u1} = 97885,79 \text{ kN}$
$F_a = 12730,05 \text{ kN}$	$F_{h2} = 3312,40 \text{ kN}$	$F_{u2} = 90089,58 \text{ kN}$

SOMA DAS FORÇAS	
Horizontais	Verticais
$F_x = 30038,23 \text{ kN}$	$F_y = 76849,93 \text{ kN}$

MOMENTOS	
Momento proveniente do empuxo (Fh1)	Mh1 = 917142,19 kN.m
Momento devido a força de subpressão (Fu1)	Mu1 = 23072972,88 kN.m
Momento devido a força de subpressão (Fu2)	Mu2 = 15926476,85 kN.m
Momento devido a peso próprio da barragem (P)	Mp = 59422176,86 kN.m
Momento proveniente do peso da água (Fa)	Ma = 424003,56 kN.m
Momento proveniente do empuxo (Fh2)	Mh2 = 28707,47 kN.m

SOMA DOS MOMENTOS	
Tombadores	Estabilizadores
Mt = 39916591,92 kN.m	Me = 59874887,88 kN.m

Restrições	
Deslizamento	Tombamento
$\lambda_d = 3,66$	$\lambda_t = 1,50$
109903,49 kN \geq 109903,49 kN	59874887,88 N.m \geq 59874887,88 kN.m
$g(x) = 79865,26$	$f(x) = 19958295,96$

Função Objetivo (fobj = 46 . B)
16264,21

Custo da Barragem
R\$ 164.919,09