

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

ASPECTOS FUNDAMENTAIS PARA A ANÁLISE DE
ESTABILIDADE DE TALUDES DE BARRAGENS
DURANTE REBAIXAMENTO RÁPIDO

VINÍCIUS MANFRINI OLIVEIRA SOUZA

ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM GEOTECNIA

BRASÍLIA / DF: JULHO/2016

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**ASPECTOS FUNDAMENTAIS PARA A ANÁLISE DE
ESTABILIDADE DE TALUDES DE BARRAGENS
DURANTE REBAIXAMENTO RÁPIDO**

VINÍCIUS MANFRINI OLIVEIRA SOUZA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**

**HERNÁN EDUARDO MARTÍNEZ CARVAJAL, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**RENATO SANTOS PAULINELLI RAPOSO, MSc (UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, JULHO de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

SOUZA, VINÍCIUS MANFRINI OLIVEIRA

Aspectos Fundamentais para a Análise de Estabilidade de Taludes de Barragens durante Rebaixamento Rápido. [Distrito Federal] 2016.

(ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2016)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Barragens

2. Estabilidade de Taludes

3. Rebaixamento Rápido

4. Modelagem Numérica

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, V.M.O. (2016). Aspectos Fundamentais para a Análise de Estabilidade de Taludes de Barragens durante Rebaixamento Rápido. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Vinícius Manfrini Oliveira Souza

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Aspectos Fundamentais para a Análise de Estabilidade de Taludes de Barragens durante Rebaixamento Rápido.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Vinícius Manfrini Oliveira Souza

viniciusmanfrini@gmail.com

Brasília/DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida.

À minha família pelo apoio e carinho incondicionais.

Aos professores da Universidade de Brasília pelos valiosos ensinamentos. Em especial ao Professor André Pacheco de Assis pela orientação deste Projeto Final.

Aos amigos pelo companheirismo e momentos de distração.

Aos colegas de Engenharia Civil pelo auxílio e troca de experiências durante o curso.

Aos funcionários e técnicos da Universidade de Brasília por tornarem possível o funcionamento desta.

RESUMO

O reservatório de uma barragem exerce uma força contrária ao movimento de deslizamento do talude de montante deste barramento. Em contrapartida, a presença de água no maciço diminui a estabilidade deste. Desta forma, o rebaixamento rápido do reservatório pode provocar a instabilidade da barragem. A análise de estabilidade de taludes durante o rebaixamento rápido depende de parâmetros que, muitas vezes, são de difícil determinação, assim, frequentemente esta análise é feita de forma simplificada, considerando que o abaixamento do nível d'água ocorre instantaneamente, ou seja, não há tempo para a dissipação da poropressão presente no maciço. Entretanto, este fenômeno acontece gradualmente e com a dissipação das pressões neutras. Assim sendo, este trabalho visa comparar estas duas formas de análise. Para isto, será utilizado o programa de elementos finitos *GeoStudio* para o estudo de percolação em regime permanente e transiente, que fornecerá parâmetros para a análise de estabilidade de taludes. Este estudo será feito para três seções simples de barragens, sendo uma homogênea, outra de enrocamento com núcleo argiloso de 40 metros de comprimento e, finalmente, uma barragem também de enrocamento, mas com um núcleo argiloso de 24 metros de comprimento.

Palavras-chave: barragens, estabilidade de taludes, rebaixamento rápido.

SUMÁRIO

Capítulo	Página
1. INTRODUÇÃO	01
1.1. MOTIVAÇÃO	01
1.2. OBJETIVOS	02
1.3. ESCOPO DO PROJETO	02
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
2.1. ASPECTOS GERAIS SOBRE BARRAGENS	04
2.1.1. ESTUDO DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO	05
2.1.2. ESTUDO DE PERCOLAÇÃO	07
2.1.3. ESTUDO DE ESTABILIDADE DE TALUDES	08
2.2. REBAIXAMENTO RÁPIDO	10
2.2.1. CASOS DE RUPTURA DURANTE O REBAIXAMENTO RÁPIDO	10
2.2.2. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DURANTE REBAIXAMENTO RÁPIDO	11
2.3. ANÁLISE DE FLUXO	19
2.3.1. LEI DE DARCY	20
2.3.2. EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE	20
2.3.3. CURVA CARACTERÍSTICA	23
2.3.4. FUNÇÃO PERMEABILIDADE	25
2.4. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES	26
2.5. OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS PARA MODELAGEM NUMÉRICA	26
2.5.1. ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL	26
2.5.2. PERMEABILIDADE	27
2.5.3. COMPRESSÃO TRIAXIAL CONSOLIDADO NÃO DRENADO (CU)	28
2.5.4. CURVA CARACTERÍSTICA	29

3. MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1. CARACTERÍSTICAS DAS BARRAGENS	30
3.2. UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE GEOSTUDIO	32
3.2.1. ANÁLISE DE FLUXO – SEEP/W	32
3.2.2. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES – SLOPE/W	36
4. RESULTADOS E ANÁLISES	39
5. CONCLUSÃO	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
3.1 – Parâmetros dos materiais em estudo.	31

LISTA DE FIGURAS

Figuras	Página
2.1 – Barragem de seção zonada, Barragem de São Simão, Brasil.	05
2.2 – Modelo linear.	06
2.3 – Modelo hiperbólico.	07
2.4 – Rede de fluxo em uma barragem de terra.	08
2.5 – Modelo de equilíbrio para solos não saturados.	12
2.6 – Representação gráfica da expressão de Fredlund et al..	14
2.7 – Variação do fator de segurança de um talude não saturado em função da sucção.	15
2.8 – Rebaixamento rápido.	15
2.9 – Elementos de uma curva característica.	23
2.10 – Diferentes formatos das curvas características de sucção dos solos em função da granulometria.	24
2.11 – Envoltória de resistência.	28
3.1 – Barragem homogênea de solo argiloso com filtro de areia.	30
3.2 – Barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 40 metros de comprimento e filtro de areia.	30
3.3 – Barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 24 metros de comprimento e filtro de areia.	31
3.4 – Curva característica da argila obtida no <i>GeoStudio</i> .	33
3.5 – Curva da função de permeabilidade da argila obtida no <i>GeoStudio</i> .	33
3.6 – Condições de contorno para análise de fluxo permanente.	34

3.7 - Condições de contorno para análise de fluxo transiente durante rebaixamento instantâneo.	35
3.8 – Curva de rebaixamento do reservatório em estudo.	36
3.9 – Malha de centros e raios para análise de estabilidade de taludes da barragem homogênea de solo argiloso.	37
3.10 – Malha de centros e raios para análise de estabilidade de taludes da barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 40 m de comprimento.	37
3.11 – Malha de centros e raios para análise de estabilidade de taludes da barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 24 m de comprimento.	38
4.1 – Etapas para a análise de estabilidade de taludes durante rebaixamento instantâneo e gradual do reservatório.	39
4.2 – Isolinhas de poropressão do fluxo permanente.	39
4.3 – Variação da poropressão ao longo do tempo na barragem homogênea durante rebaixamento instantâneo.	40
4.4 – Variação da poropressão ao longo do tempo na barragem homogênea durante rebaixamento gradual.	41
4.5 – Variação da poropressão ao longo do tempo na barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 40 m durante rebaixamento instantâneo.	42
4.6 – Variação da poropressão ao longo do tempo na barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 40 m durante rebaixamento gradual.	43
4.7 – Variação da poropressão ao longo do tempo na barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 24 m durante rebaixamento instantâneo.	44
4.8 – Variação da poropressão ao longo do tempo na barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 24 m durante rebaixamento gradual.	45
4.9 – Fator de segurança e círculo de ruptura da barragem homogênea para a condição de rebaixamento instantâneo.	46

4.10 - Fator de segurança e círculo de ruptura da barragem homogênea para a condição de rebaixamento gradual.	46
4.11 – Relação entre os fatores de segurança e o tempo de análise de estabilidade do talude de montante da barragem homogênea durante o rebaixamento instantâneo.	47
4.12 – Relação entre os fatores de segurança e o tempo de análise de estabilidade do talude de montante da barragem homogênea durante o rebaixamento progressivo.	48
4.13 – Fator de segurança e círculo de ruptura da barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 40 m de comprimento para a condição de rebaixamento instantâneo.	49
4.14 – Fator de segurança e círculo de ruptura da barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 40 m de comprimento para a condição de rebaixamento gradual.	50
4.15 – Fator de segurança e círculo de ruptura da barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 24 m de comprimento para a condição de rebaixamento instantâneo.	50
4.16 – Fator de segurança e círculo de ruptura da barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 24 m de comprimento para a condição de rebaixamento gradual.	51
4.17 – Relação entre os fatores de segurança e o tempo de análise de estabilidade do talude de montante da barragem de enrocamento com núcleo de 40 m durante o rebaixamento instantâneo.	52
4.18 – Relação entre os fatores de segurança e o tempo de análise de estabilidade do talude de montante da barragem de enrocamento com núcleo de 40 m durante o rebaixamento gradual.	52
4.19 – Relação entre os fatores de segurança e o tempo de análise de estabilidade do talude de montante da barragem de enrocamento com núcleo de 24 m durante o rebaixamento instantâneo.	53
4.20 – Relação entre os fatores de segurança e o tempo de análise de estabilidade do talude de montante da barragem de enrocamento com núcleo de 24 m durante o rebaixamento gradual.	53

LISTA DE SÍMBOLOS

a_v	Coefficiente de compressibilidade
CD	Ensaio triaxial adensado e drenado
CU	Ensaio triaxial adensado e não drenado
c	Coesão do solo
c'	Coesão do solo efetiva
Δe	Variação do índice de vazios
$\Delta \sigma'_v$	Variação das tensões verticais
ε	Deformação axial
E	Módulo de elasticidade ou módulo de <i>Young</i>
e_0	Índice de vazios inicial
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo
ϕ^b	Taxa de ganho de ângulo de atrito solo em relação à sucção matricial
γ	Peso específico do solo
h	Profundidade
σ	Tensão axial
σ'	Tensão normal efetiva
σ_s	Tensão de contato entre os grãos
k	Coefficiente de permeabilidade
UU	Ensaio triaxial não adensado e não drenado
u	Poropressão

u_a	Pressão do ar
u_w	Pressão da água
τ_f	Resistência ao cisalhamento na ruptura
∇v	Divergente do fluxo
χ	Porção da seção com água

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Barragens são estruturas construídas para armazenar e controlar a água, possibilitando o desenvolvimento de um país, por meio da irrigação, hidroeletricidade, retenção de resíduos minerais, abastecimento de água e controle de enchentes.

Devido à sua importância e aos avanços científicos, pesquisas demonstram que o número e a altura de barragens vêm crescendo em todo o mundo. Segundo a Comissão Internacional de Grandes Barragens, há, aproximadamente, 50 mil grandes barragens, ou seja, maiores que 30 metros, em operação (CIGB, 2008).

O início da construção de barragens no Brasil ocorreu entre 1877 e 1880 quando foi realizado o programa de combate à seca, o qual possibilitou a construção de diversas obras de engenharia para o acúmulo de água (Garrido, 2000). Entretanto, a grande demanda de barragens brasileiras deve-se à geração de energia elétrica.

A construção de barragens possibilita o desenvolvimento e atende a diversas necessidades humanas. Porém, há muitas críticas relacionadas aos impactos sociais e ambientais. E destacam-se os aspectos ligados à segurança. Os acidentes envolvendo barragens ocorridos por diversas causas demonstram que os barramentos não estão sendo bem planejados, projetados, construídos e/ou mantidos.

Nesse sentido, é essencial que sejam feitos estudos para realizar um bom projeto e para que eventuais problemas sejam previstos e evitados. A literatura recomenda que se estude as barragens em diversas fases, desde a sua construção a sua operação. Dentre essas fases, o rebaixamento rápido é a mais crítica, em razão da perda da ação estabilizadora da água. Entretanto, seu estudo é complexo e, muitas vezes, é elaborado de forma simplificada, devido à dificuldade de estabelecer os parâmetros corretos.

1.2. OBJETIVOS

A análise de estabilidade de taludes durante o rebaixamento rápido é bastante complexa devido à combinação de carregamentos e a dificuldade para determinar os parâmetros. Por essa complexidade, muitas vezes, este estudo é feito de forma simplificada, considerando que o nível d' água a montante é reduzido imediatamente.

Entretanto, sabe-se que, na realidade, a redução do nível do reservatório ocorre de forma gradual. Dessa forma, o presente trabalho pretende comparar as análises, feitas utilizando o *software* GeoStudio 2007, considerando o abaixamento do reservatório gradual e imediato.

Esta comparação tem o intuito de verificar em que situações o estudo simplificado fornece resultados satisfatórios, e quando há a necessidade de um tratamento mais realista com a utilização de parâmetros de adensamento e os relacionados a não saturação do solo.

Para obter esta conclusão, serão analisadas barragens com núcleos argilosos de diferentes dimensões e uma barragem de argila homogênea. A diferença da dimensão dos núcleos é em razão de que núcleos maiores estão mais próximos dos espaldares, assim, eles influenciam de forma mais significativa na estabilidade do talude de montante durante o rebaixamento rápido.

1.3. ESCOPO DO PROJETO

Este projeto está dividido em quatro capítulos, a seguir, são descritos os assuntos abordados em cada capítulo.

O Capítulo 1 apresenta a introdução sobre o tema estudado, também são explicitados os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica sobre aspectos gerais de barragens e são explicadas as questões envolvendo o rebaixamento rápido, bem como os casos de ruptura de barragens, a análise de estabilidade de taludes durante o rebaixamento rápido e a obtenção dos parâmetros.

No Capítulo 3, são determinadas as características e os materiais das barragens analisadas. Além disso, são explicados os métodos de análise.

No Capítulo 4, são explicitados os resultados e as análises destes.

Finalmente no capítulo 5, há as conclusões aprendidas com este trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ASPECTOS GERAIS SOBRE BARRAGENS

As barragens podem ser utilizadas para regularizar o regime hidrológico de um rio com a finalidade de aproveitamento hidrelétrico, navegação e/ou abastecimento d'água. E também pode ter o objetivo de reter água para amortecer a onda de cheias, evitando assim as inundações. Muitas vezes, uma única barragem possui mais de uma finalidade.

A escolha do tipo de barragem deve ser feita tendo-se em vista diversos critérios. Dentre eles, o emprego de materiais disponíveis na sua função mais rentável é o fator determinante. Além disso, deve-se atentar às demais características do local, tais como a forma do vale, a natureza da fundação, a sequência construtiva, as condições climáticas da região, entre tantas outras.

Quando se tem um vale aberto e o estudo de campo indica a presença de rocha em grandes profundidades, são usadas barragens de terra. Esse tipo de barragem é utilizado para pequenas e médias alturas, pelo fato de exigir menores declividades dos taludes de montante e jusante, que resultam em grandes volumes de terra.

Na falta de áreas de empréstimo com quantidades consideráveis de materiais pouco permeáveis para a construção de todo o aterro, a solução é projetar uma barragem com núcleo impermeável e espaldares com materiais permeáveis.

As dimensões do núcleo dependem da quantidade de material argiloso disponível, de suas características geotécnicas, além das condições climáticas da região onde o barramento será construído. Em relação à posição do núcleo, ele pode ser vertical ou inclinado, e isto decorre da relação entre as resistências dos materiais e das propriedades de compressibilidade da fundação. A Figura 2.1 é um exemplo de uma barragem zonada, na qual diferentes materiais constituem sua seção típica.

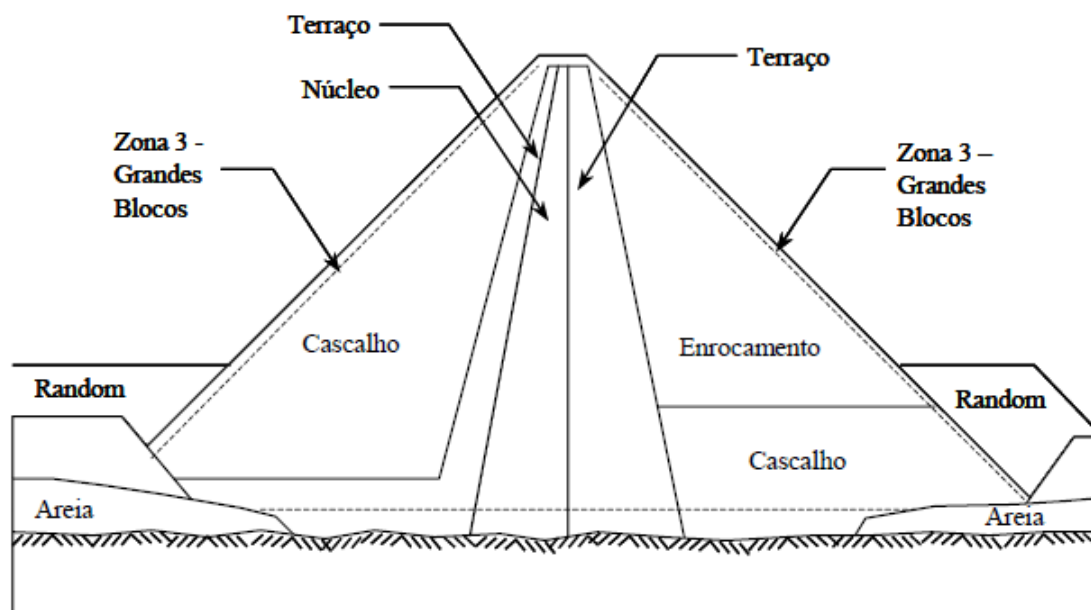


Figura 2.1 – Barragem de seção zonada, Barragem de São Simão, Brasil (Assis, 2003).

Normalmente, o projeto de barragens está associado a grandes empreendimentos, conseqüentemente, sua ruína pode acarretar grandes perdas econômicas, ambientais e de vidas humanas. Assim, a segurança de barragens deve ser tratada com muita importância e critério, buscando sempre um equilíbrio entre a técnica e a economia.

Segundo o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (2002), uma barragem segura tem que satisfazer as exigências necessárias que evitem incidentes e acidentes de aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais.

Dessa forma, após a escolha do tipo e da localização da barragem, são necessários estudos de tensão-deformação, percolação e estabilidade de taludes para determinar as características da seção típica do barramento. A estabilidade de taludes está relacionada com a propressão que atua na barragem, e esta é obtida pela análise de percolação. Já o estudo da tensão-deformação fornece os deslocamentos e os possíveis locais de ruptura da barragem.

2.1.1. Estudo de tensão-deformação

A análise de tensão-deformação é importante para prever possíveis trincas transversais, fissuras longitudinais, efeito de arco e concentração de tensões, desenvolvimento de zonas plásticas e danos na instrumentação da barragem. E essas

previsões possibilitam minimizar e evitar tais problemas (Chrzanowski; Massiera, 2004).

As propriedades bem representativas dos solos são essenciais para que o estudo de tensão-deformação seja o mais realista possível. Entretanto, a obtenção das propriedades que se referem ao comportamento tensão-deformação do solo é complexa, em razão de a maioria dos solos ser não linear, inelástica e dependente das tensões as quais o solo está submetido (Duncan *et al.*, 1980).

Essas propriedades são correlacionadas por meio de modelos constitutivos, sendo possível interpretar o comportamento tensão-deformação do material em estudo. Dentre os modelos conhecidos, destacam-se os modelos elástico linear e hiperbólico.

Os materiais elásticos lineares seguem um comportamento linear, ou seja, a tensão é proporcional à deformação, logo, seu módulo de elasticidade é constante. Esses materiais são regidos pela lei de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

Em que:

σ = tensão axial;

E = módulo de elasticidade ou de *Young*;

ε = deformação.

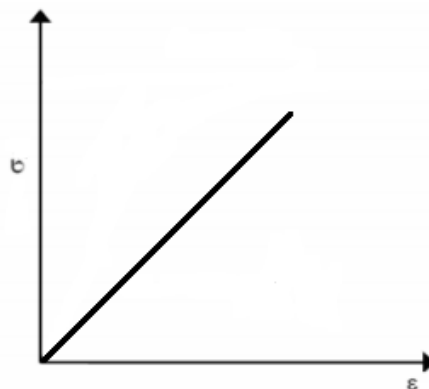


Figura 2.2 – Modelo linear.

Já o modelo hiperbólico considera que o solo é um material elástico não linear e que seu comportamento depende da tensão confinante. Esse modelo relaciona a tensão e

a deformação em curvas expressas por hipérbolas, sendo uma boa correlação com as curvas obtidas de ensaios de laboratório (Pereira, 2014).

A curva tensão-deformação do modelo hiperbólico pode ser representada pela equação proposta por Kondner (1963):

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon}{a+b\varepsilon} \quad (2.2)$$

Em que:

σ_1 e σ_3 = maior e menor tensão principal;

ε = deformação axial;

a e b = constantes determinadas experimentalmente.

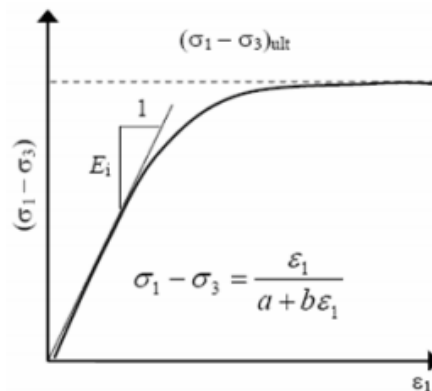


Figura 2.3 – Modelo hiperbólico (Duncan e Chang, 1970).

2.1.2. Estudo de percolação

A percolação é a causa de diversos problemas em uma barragem. Destacam-se o *piping*, que é uma erosão regressiva ocasionada pelo deslocamento das partículas de solo, a instabilização dos taludes devido às altas subpressões de fundação e a perda excessiva de água, que, dependendo da finalidade do barramento, pode ser algo muito grave.

A importância do estudo de percolação deve-se ao fato de que ele prevê a distribuição de pressões e o valor das vazões nas diversas áreas da barragem. Com isso, é possível obter os parâmetros para a análise de estabilidade e para o dimensionamento dos sistemas de impermeabilização e drenagem.

Segundo o Manual de Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás (2003), a análise de percolação deve ser feita em condições de operação e rebaixamento rápido. Na condição do reservatório em operação, o nível de água a montante deve ser o máximo normal e, a jusante da barragem, o nível é o mínimo. Já durante o rebaixamento rápido, o nível de água é o máximo e o mínimo normal do reservatório.

O traçado das redes de fluxo, como mostrado na Figura 2.4, é importante para definir os gradientes, as pressões neutras e as vazões. Entretanto, os valores de potenciais e velocidades de fluxo, que são utilizados para dimensionar os sistemas de drenagem e impermeabilização e analisar a estabilidade, são obtidos por meio do método de elementos finitos.

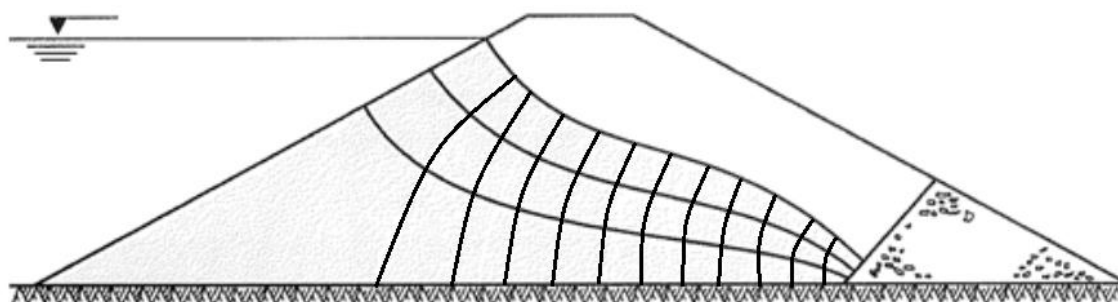


Figura 2.4 – Rede de fluxo em uma barragem de terra (Pinto, 2006).

2.1.3. Estudo de estabilidade de taludes

No que se refere à estabilidade dos taludes do barramento, os fatores de segurança devem ser verificados em cada fase de sua vida útil para que a análise seja a mais realista possível, pois se sabe que a barragem passa por diversas solicitações durante a fase construtiva, após a construção e ao longo do enchimento do reservatório.

Por isso, o Manual de Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás (2003) recomenda que a estabilidade ao escorregamento dos taludes seja verificada em determinadas condições de carregamento, tais como final de construção, rebaixamento rápido, percolação estável e sísmica. Além disso, pode ser verificada em casos específicos como quando são necessárias bermas de equilíbrio em estágios de construção ou nos casos de escavações no pé do talude já lançado da barragem.

Na condição de final de construção, o maciço ainda não teve tempo suficiente para adensar, assim, se ocorrer a ruptura, ela será da forma não drenada. Portanto, a envoltória de resistência em termos de tensões efetivas que será utilizada no estudo deverá ser obtida do ensaio não consolidado não drenado (UU) com medidas de poropressão. Recomenda-se que o fator de segurança seja de 1,3 nesta etapa. E deve ser analisada tanto para o talude de montante quanto para o talude de jusante, visto que ambos são passíveis de ruptura (Assis, 2003).

Já a condição de rebaixamento rápido é quando há a necessidade de abaixar rapidamente o nível d'água do reservatório. Isso ocorre devido questões operacionais ou mesmo em casos de emergência. O maciço já terá sofrido adensamento, mas dependerá das condições de drenagem da água intersticial, ou seja, da permeabilidade e compressibilidade do material.

Dessa forma, a ruptura se dará na situação não drenada, indicando a utilização de parâmetros obtidos de ensaios consolidados não drenados (CU). A análise de estabilidade para o rebaixamento rápido deve ser verificada apenas no talude de montante, uma vez que ele perderá a estabilização da água e sofrerá com a presença da poropressão aprisionada. Os fatores de segurança admitidos para essa fase serão de 1,3 para rebaixamento até o mínimo *minimorum* ou de 1,1 para rebaixamento total (Assis, 2003).

O caso de percolação estável ocorre durante a operação na qual o nível do reservatório terá atingido seu valor máximo, isto é, admite-se que o adensamento tenha ocorrido e que a percolação tenha se estabilizado. Logo, os parâmetros devem ser obtidos de ensaios consolidados drenados (CD). A estabilidade deve ser analisada apenas no talude de jusante, já que a água auxilia na estabilização. E o fator de segurança é de 1,5.

Apesar de o Brasil fazer parte de uma zona assísmica, é indicada a análise de estabilidade de taludes na presença de terremotos em razão de existir a possibilidade de sismos induzidos pelo enchimento do reservatório da própria barragem. A avaliação deve ser condicionada adotando-se cargas sísmicas com acelerações de 0,05 da aceleração da gravidade na direção horizontal e 0,03 na direção vertical. O coeficiente de segurança deve ser 1,0 tanto para o talude de montante quanto para o talude de jusante (Eletrobrás, 2003).

Os fatores de segurança para estabilidade podem variar por diversos motivos, tais como o solo do local, os riscos envolvidos, as consequências provocadas pela ruptura, qualidade das investigações de projeto, entre outros.

2.2 REBAIXAMENTO RÁPIDO

2.2.1. Casos de ruptura durante o rebaixamento rápido

Quando o nível d'água do reservatório abaixa, a influência estabilizadora da pressão da água sobre o talude é perdida. E a estabilidade do talude dependerá das poropressões existentes no maciço após o rebaixamento, que podem ser obtidas pela soma entre a poropressão antes do rebaixamento e a variação da poropressão induzida pelo abaixamento do nível d'água.

Apesar de os deslizamentos de taludes de montante durante o rebaixamento rápido serem graves, normalmente, não há risco de ruptura imediata, visto que o nível d'água fica abaixo da crista da massa afetada. Entretanto, escorregamentos de montante geram custos consideráveis e atrasos da obra (Sandroni, 2006).

Diversos deslizamentos de taludes de barragens ocorreram durante o rebaixamento rápido. Tais como a barragem *Pilarcitos* no sul de São Francisco nos Estados Unidos (W. A. Wahler & Associates, 1970), na barragem *Walter Bouldin* no Alabama, também nos Estados Unidos (Whiteside, 1976) e às margens do Rio Montaro no Peru (Lee e Duncan, 1975). Um caso no Brasil é o da barragem de Banabuiú, na qual ocorreu um deslizamento superficial da capa de rip-rap, nesse caso, uma deficiente compactação do solo sob o rip-rap também contribuiu para ocasionar o acidente (Sandroni, 2006).

Sherard (1953) estudou alguns casos de ruptura de barragens durante o rebaixamento rápido. A sua conclusão foi que esses acidentes aconteceram quando a altura do reservatório variou entre o nível máximo e a meia altura da barragem. Além disso, foram os rebaixamentos mais rápidos ou de maior amplitude que já haviam ocorrido no barramento. Segundo Sherard esse tipo de escorregamento não costuma ser superficial. Normalmente, as rupturas são profundas e associadas a fundações de baixa resistência.

2.2.2. Análise de estabilidade de taludes durante o rebaixamento rápido

A análise de estabilidade de taludes é feita com base nas forças atuantes na barragem, tais como o peso do solo e do revestimento, a pressão da água do reservatório, que atuam como fator de estabilização, e a poropressão no maciço, que contribui para a instabilidade do talude, pressionando o solo para o exterior e reduzindo o atrito entre as partículas.

A inclinação do talude deve ser estabelecida para suportar a combinação mais crítica, isto é, alta poropressão no maciço e o baixo nível de água no reservatório. Esta combinação ocorre quando a água do reservatório é mantida no seu nível mais alto durante um tempo suficiente longo para que o solo a montante se torne saturado, e é rebaixada rapidamente, ou seja, quando ocorre o rebaixamento rápido.

No estudo de rebaixamento rápido, deve-se considerar além da resistência do solo, a dissipação ou não das poropressões que podem permanecer em seu interior. A presença de água é importante nesta análise, pois ela diminui a resistência do solo diminuindo a tensão efetiva como é mostrado na Equação 2.3:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.3)$$

Em que:

σ' = tensão normal efetiva;

σ = tensão normal total;

u = poropressão.

Esta equação é uma ótima aproximação para solos saturados. Entretanto, não pode ser aplicado para solos não saturados, porque além da água, há também a presença do ar sob diferentes pressões. Tornando o estudo mais complexo, devido à compressão da fase gasosa e os efeitos da tensão superficial na água, que origina a sucção mátrica do solo (Lee et al., 1983).

Segundo Fredlund e Morgenstern (1977), além das fases líquida, gasosa e sólida, há a interface ar-água, chamada de membrana contrátil, sendo a tensão superficial sua característica mais importante. Esta interface ar-água comporta-se como uma membrana elástica.

Lee et al. (1983) apresenta um modelo que se aproxima da lei de tensão efetiva como é mostrado na Figura 2.5:

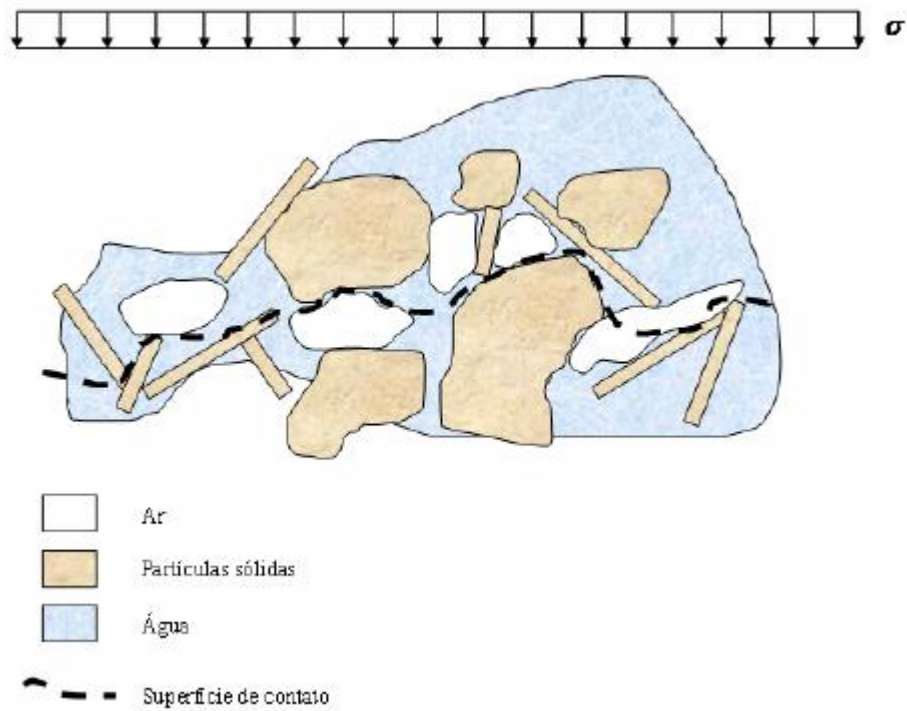


Figura 2.5 – Modelo de equilíbrio para solos não saturados (Lee et al., 1983).

Considerando,

σ_s = tensão de contato entre os grãos;

A_s = área de contato dos grãos;

u_w = pressão da água;

u_a = pressão do ar;

A_w = área da superfície da água;

A_a = área da superfície do ar, sendo $A = A - A_s - A_w$;

A = área total.

E para o equilíbrio, tem-se:

$$\sigma A = \sigma_s A_s + u_w A_w + u_a A_a \quad (2.4)$$

$$\sigma = \sigma_s \frac{A_s}{A} + u_w \frac{A_w}{A} + u_a \left(1 - \frac{A_s}{A} - \frac{A_w}{A}\right) \quad (2.5)$$

Como o termo $A_s/A \ll 1\%$, este pode ser desprezado, e o termo $\sigma' = \sigma_s A_s/A$ pode ser considerado como a tensão efetiva, é obtida:

$$\sigma = \sigma' + u_w \frac{A_w}{A} + u_a - u_a \frac{A_w}{A} \quad (2.6)$$

ou

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi (u_a - u_w) \quad (2.7)$$

Em que:

χ = porção da seção com água;

$(\sigma - u_a)$ = tensão normal líquida;

$(u_a - u_w)$ = sucção mátrica.

A Equação 2.7 foi apresentada por Bishop (1955) para representar a tensão efetiva para solos não saturados. Ela é uma reformulação da teoria de tensões efetivas proposta por Terzaghi com o acréscimo do parâmetro χ , que representa a influência da sucção na tensão efetiva dos solos (Machado e Vilar, 1998).

No caso de solos não saturados, χ é uma função do grau de saturação e parâmetros como tamanho das partículas, forma, sucção, história de tensões. Assim, considerando o critério de resistência de Mohr-Coulomb, a resistência de um solo não saturado pode ser representada por:

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \operatorname{tg} \phi' \quad (2.8)$$

Em que:

τ_f = resistência ao cisalhamento na ruptura;

c' = coesão efetiva;

ϕ' = ângulo de atrito efetivo.

Entretanto, o parâmetro χ é de difícil determinação, tornando a aplicação desta equação limitada.

Normalmente, o colapso de solos não saturados ocorre quando as condições de saturação são alteradas, ou seja, deformações com diminuição da sucção. Assim, o comportamento de solo não saturado deve ser analisado por meio de variáveis de estado independentes.

Segundo Fredlund e Morgenstern (1977), considerando o estado de tensão variável, a resistência ao cisalhamento de solos pode ser representada por:

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) \operatorname{tg} \phi' + (u_a - u_w)] \operatorname{tg} \phi^b \quad (2.9)$$

Em que:

ϕ^b = taxa de ganho de ângulo de atrito solo em relação à sucção matricial;

c = coesão do solo.

A formulação acima considera que o acréscimo de resistência ao cisalhamento é linearmente proporcional ao aumento da sucção mátrica. E pode ser representada como na Figura 2.6:

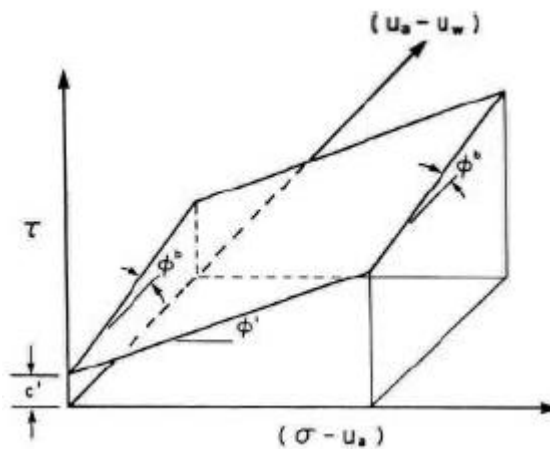


Figura 2.6 – Representação gráfica da expressão de Fredlund et al. (1978).

Para mostrar a influência da sucção na estabilidade de taludes, Ignacius (1991) apresenta um estudo que demonstra a redução do fator de segurança em função da redução da sucção. Esta variação é observada na Figura 2.7:

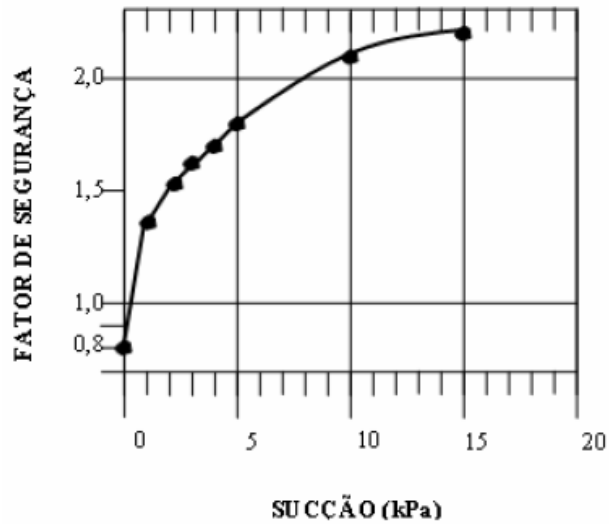


Figura 2.7 – Variação do fator de segurança de um talude não saturado em função da sucção (Ignacius, 1991).

Para um melhor entendimento sobre o que ocorre durante o rebaixamento rápido, considere a Figura 2.8:

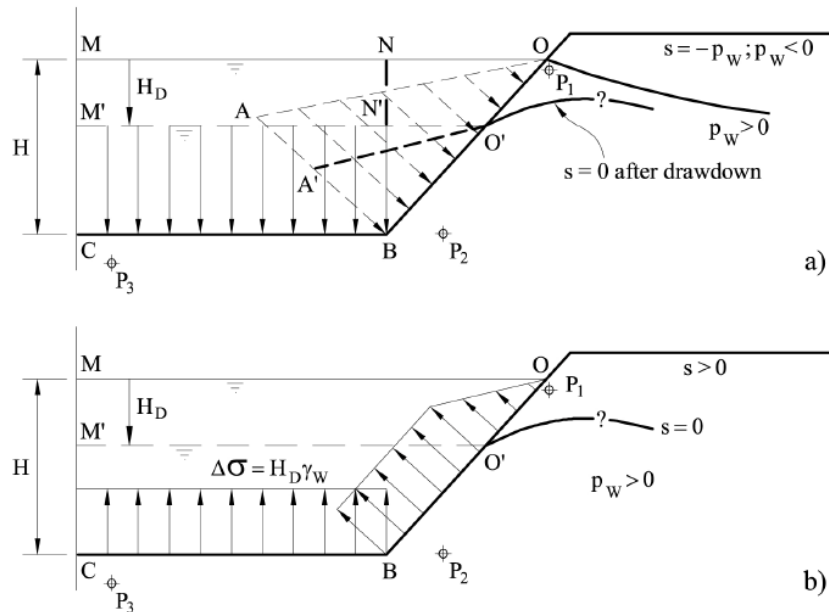


Figura 2.8 – Rebaixamento rápido. a) Tensões hidrostáticas atuando contra o talude de montante. b) Mudança das tensões induzida pelo abaixamento H_D (adaptado de Alonso e Pinyol, 2009).

Inicialmente, o nível d'água está na posição MO com altura H e está pressionando o talude de montante com tensões representadas por OAB. Abaixo da

linha de pressão zero, a poropressão é positiva e, acima desta linha, a poropressão é negativa, onde a sucção pode ser definida como $s = - p_w$.

Durante um determinado tempo, ocorre o rebaixamento do nível d'água até o nível M'N'O'. Este abaixamento implica uma mudança das tensões contra o talude, representada por O'A'B. Assim, o talude de montante é submetido a uma tensão de relaxamento com intensidade constante e igual a $\Delta\sigma = H_D \cdot \gamma_w$. Esta diferença de tensões pode ser observada na Figura 3.1(b) (Alonso e Pinyol, 2009).

A mudança das tensões totais induzidas pela redução do nível do reservatório gera uma variação da poropressão. Esta variação depende do comportamento de tensão-deformação do solo. Em um solo com comportamento elástico, a alteração da pressão neutra será igual à mudança das tensões.

A poropressão resultante não estará em equilíbrio com as novas condições de contorno, sendo assim, haverá um regime transiente. Caso a permeabilidade do solo seja alta, a pressão neutra se dissipará rapidamente, constituindo uma situação drenada. A velocidade de rebaixamento também deve ser considerada para definir se o talude reage de forma drenada ou não drenada.

Segundo Reinius (1954), relação entre a velocidade de diminuição do nível d'água do reservatório (V_{RR}) e a permeabilidade do maciço (k) pode ser representada pelo parâmetro adimensional:

$$\frac{k}{n \cdot V_{RR}} \quad (2.10)$$

Em que:

k = permeabilidade do maciço;

n = porosidade do maciço;

V_{RR} = velocidade de rebaixamento do reservatório.

Valores baixos deste parâmetro indicam uma situação não drenada, ou seja, a altura de água do maciço permanece acima do nível de água rebaixado do reservatório. E altos valores, maiores que 25 aproximadamente, correspondem a situações drenadas, isto é, o nível de água do maciço abaixa praticamente junto ao do reservatório.

Cruz (1996) afirma que há certa dificuldade de determinar a ordem de grandeza das poropressões atuantes nos pontos distribuídos na potencial superfície de ruptura. Esta dificuldade deve-se ao fato de que pode haver novas pressões neutras resultantes de esforços cisalhantes nas zonas envolvidas pelo rebaixamento. Assim, essas novas poropressões podem modificar os níveis piezométricos estimados por uma rede de fluxo de rebaixamento.

Com o objetivo de analisar a variação da poropressão, Cruz (1996) realizou alguns ensaios que foram realizados em células triaxiais, as quais possibilitava o controle das tensões principais e da poropressão. Desta forma, tentou-se simular a história de tensões a qual o solo da barragem é submetido nas situações de construção, de percolação com o reservatório cheio e de rebaixamento rápido.

Assim como Lowe e Karafiath (1959), Cruz escolheu cinco pontos localizados na base de lamelas de uma hipotética análise de estabilidade de taludes e foram obtidas as tensões principais de modo simplificado. As pressões neutras de fluxo em regime permanente e de fluxo perante o rebaixamento rápido foram determinadas por meio das redes de fluxo.

Na fase de ruptura dos ensaios, Cruz realizou três procedimentos diferentes: poropressão, no início da ruptura, igual à da rede de rebaixamento e ruptura provocada pela redução da tensão confinante; pressão neutra inicial estabelecida livremente no estágio anterior ao ensaio, correspondendo ao reservatório no nível de água máximo, e ruptura induzida pela redução da pressão; e poropressão durante a ruptura igual à da rede de fluxo de rebaixamento. Finalmente, concluiu-se que a envoltória efetiva para o caso de rebaixamento rápido se apresentou um pouco mais alta que a envoltória convencional, obtida em ensaios triaxiais. Além disso, observaram-se maiores poropressões na rede de rebaixamento.

Desta forma, percebe-se que a determinação do valor da variação da poropressão é complexa e sujeita a incertezas. Por esta razão, prefere-se evitar métodos que necessitam da estimativa da poropressão. Assim, opta-se por metodologias que utilizam envoltórias de resistência obtidas diretamente de ensaios; métodos que usam a envoltória de tensões efetivas e valores de poropressão obtidos de ensaios triaxiais não drenados ou que fazem análises de estabilidade com envoltória efetiva e valores estimados de pressões neutras.

A metodologia na qual a envoltória deve ser obtida em termos de tensões totais por meio de ensaios triaxiais adensados não drenados foi apresentada por Lowe e Karafiath (1959) e Lowe (1967). Neste método, as tensões da etapa de adensamento são estimadas para a situação de reservatório cheio e regime permanente de percolação. Por equilíbrio limite, é feita a estimativa das tensões para algumas lamelas considerando os parâmetros efetivos de resistência e as poropressões de percolação. A trajetória de tensões deve ser compatível com o que acontece perante o rebaixamento rápido. Assim, é feita a análise de estabilidade de taludes considerando o nível rebaixado do reservatório.

O método utilizado pelo *Corps of Engineers* consiste em análises de estabilidade realizadas por meio de uma envoltória de resistência constituída pela envoltória triaxial adensada drenada para baixas tensões, e pela adensada não drenada para altas tensões. Estes estudos são feitos em termos de tensões totais, ou seja, as poropressões não são levadas em consideração. Entretanto, o uso desta envoltória pode ser bastante conservador caso o solo impermeável esteja próximo do talude de montante, em razão de ser comum encontrar superfícies críticas rasas, paralelas ao talude e com fator de segurança baixo.

Além destes métodos, Bishop (1952) recomenda igualar a variação da poropressão (ΔU) com a variação de tensão devida à redução de peso na vertical acima do ponto analisado ($\Delta \gamma h$). Na determinação de $\Delta \gamma h$, deve-se considerar a variação da coluna de água e do peso específico de solo cujo nível de água tenha sido rebaixado. O valor de $\Delta \gamma h$ será negativo, indicando uma redução da poropressão. Vale ressaltar que a reação da poropressão ao rebaixamento rápido será diferente nos trechos saturados e nos não saturados. Nos pontos não saturados, o ar nos vazios poderá expandir sob a tendência à diminuição da pressão neutra, desta forma, a variação da poropressão será pequena. Por outro lado, nos trechos saturados, a redução da pressão neutra é mais acentuada, em razão de a tendência à expansão aliviar significativamente a poropressão.

Dentre os fatores que influenciam a estabilidade das barragens durante o rebaixamento rápido, destacam-se a mudança do nível de água do reservatório, a velocidade dessa alteração, o tipo de material que compõe o barramento e sua geometria.

Em relação à velocidade do rebaixamento, observa-se que se o abaixamento do nível d'água for lento permitindo que a dissipação da poropressão no maciço de montante acompanhe o nível do reservatório, não haverá problemas relacionados à estabilidade, pois se mantém um estado de equilíbrio entre a ação hidrostática na superfície do maciço e as poropressões no seu interior.

Além disso, o momento de maior instabilidade pode ocorrer para níveis de água mais elevados quanto mais lento for o abaixamento. Assim, se duas situações de rebaixamento ocorrerem com velocidades diferentes, no caso mais rápido, o fator de segurança mínimo poderá ser verificado para um nível do reservatório mais baixo que para velocidade mais lenta (Viratjandr e Michalowski, 2006).

No que se refere à permeabilidade, esta é maior na direção paralela à estratificação do que na direção perpendicular. Isto é importante no caso das barragens de aterro, pois estas são compactadas em camadas horizontais, sendo assim, estas camadas são estratificadas não apenas pelas diferenças de textura do solo, mas também ao grau de compactação das diferentes camadas. Além disso, quanto mais permeável for o material, maior será a facilidade para que as poropressões no seu interior se dissipem, tornando a estrutura mais estável.

A geometria do barramento também causa um efeito na estabilidade deste. O material constituinte de um talude tem a tendência de escorregar sob a influência da gravidade, se as tensões atuantes forem maiores que a resistência ao corte do solo, o talude será mais instável. Sabe-se que o aumento da inclinação de um talude causa um incremento das tensões atuantes. Sendo assim, quanto mais inclinado for o talude, menos instável ele será.

2.3. ANÁLISE DE FLUXO

Para realizar a análise do fluxo, é utilizado o *software* GeoStudio 2007, plataforma SEEP/W. E, por se tratar de um estudo durante o rebaixamento rápido, as simulações envolvem a percolação em fluxo permanente, ou seja, as condições de fluxo não variam com o tempo, e a percolação em fluxo transiente, quando há variação dessas condicionantes ao longo do tempo.

2.3.1. Lei de Darcy

A lei de Darcy (1856) é a equação básica para a percolação de água através dos solos e é expressa pelas Equações 2.11 e 2.12:

$$V = k \cdot i = K \frac{dh}{dl} \quad (2.11)$$

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (2.12)$$

Em que:

V = velocidade de descarga;

k = coeficiente de permeabilidade;

i = gradiente hidráulico;

h = carga de pressão;

l = comprimento do caminho de percolação;

A = área de seção transversal do solo onde a água percola;

Q = vazão de percolação.

Para o fluxo saturado unidimensional na direção y , sendo representado pela Equação 2.13:

$$V_y = k_y \frac{\partial h_w}{\partial y} \quad (2.13)$$

Em que:

V_y = velocidade do fluxo na direção y ;

k_y = coeficiente de permeabilidade;

$\frac{\partial h_y}{\partial y}$ = gradiente hidráulico.

2.3.2. Equação da Continuidade

A equação da continuidade representa a taxa de variação da umidade do solo para variações nos fluxos de entrada e de saída através do solo. Ou seja, ela estabelece

que a taxa de variação do fluxo de entrada e de saída é igual à taxa de variação de armazenagem de água no solo (Libardi, 2005).

Assim, conclui-se que a equação da continuidade demonstra que a variação da úmida volumétrica em um determinado tempo é igual à variação nas densidades de fluxo, como está expresso na Equação 2.14 (Fredlund, 1993).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \nabla v \quad (2.14)$$

Em que:

θ = umidade volumétrica;

∇v = divergente do fluxo.

E a definição do termo $\partial \theta$ é expressa por:

$$\partial \theta = - \partial \frac{V_w}{V_0} \quad (2.15)$$

Em que:

V_w = volume de água no elemento;

V_0 = volume inicial de água no elemento.

Como o fluxo do estudo é bidimensional, a Equação 2.14 é simplificada:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \quad (2.16)$$

Richards apresentou a equação que rege o fluxo transiente em meio poroso em meio anisotrópico da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h_y}{\partial y} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.17)$$

Como a permeabilidade é função da umidade volumétrica em meios não saturados, a equação 2.9 converte na equação 2.10.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(\theta) \frac{\partial h_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(\theta) \frac{\partial h_y}{\partial y} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.18)$$

Contudo, este estudo não considera a anisotropia do solo, por isso a equação

2.18 pode ser simplificada para:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(\theta) \frac{\partial h_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k(\theta) \frac{\partial h_y}{\partial x} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.19)$$

O *software* GeoStudio soluciona a equação de Richards por meio do método de elementos finitos. Para isso, há duas considerações: a condição de contorno, neste caso, é o termo Q, e a substituição do termo $\partial \theta$.

$$\partial \theta = m_w \partial (u_a - u_w) \quad (2.20)$$

Em que:

m_w = coeficiente de variação da umidade volumétrica em relação a variação da sucção mátrica;

u_a = pressão do ar;

u_w = pressão da água.

Considerando a pressão do ar igual a zero e a pressão da água em carga altimétrica:

$$(u_a - u_w) = \gamma_w (H - y) \quad (2.21)$$

Em que:

γ_w = peso específico da água;

H = carga altimétrica;

y = posição no eixo y.

Para fluxo transiente, a plataforma SEEP/W soluciona a Equação 2.22:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(\theta) \frac{\partial h_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k(\theta) \frac{\partial h_y}{\partial x} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial (H-y)}{\partial t} \quad (2.22)$$

Entretanto, a umidade volumétrica permanece constante no caso de fluxo permanente. Assim, a Equação 2.22 torna-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(\theta) \frac{\partial h_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k(\theta) \frac{\partial h_y}{\partial x} \right) = 0 \quad (2.23)$$

2.3.3. Curva característica

A curva característica de um solo representa a relação entre a sucção e o teor de umidade volumétrica. Este pode ser a relação entre a massa de água e a massa de solo seco ou a relação entre o volume de água e o volume total de solo.

Segundo Hillel (1971), a sucção total do solo é influenciada pela variação da umidade, quando a umidade é incrementada, há uma diminuição da sucção total.

Com a curva característica, é possível definir a umidade volumétrica de saturação (θ_s), a umidade residual (θ_r) e a pressão de entrada de ar, como é mostrado na Figura 2.9.

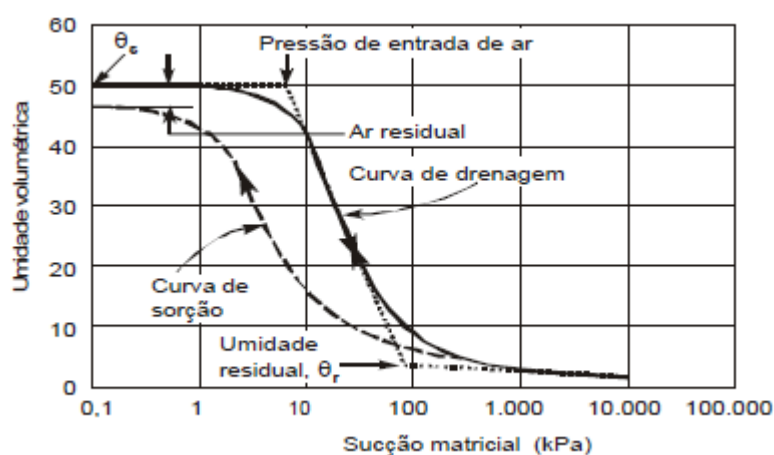


Figura 2.9 – Elementos de uma curva característica (adaptado de Fredlund e Xing, 1994).

A pressão de entrada de ar ocorre no processo de drenagem do solo, quando são aplicados valores progressivos de sucção no solo saturado, ou seja, um solo cujos vazios estão totalmente preenchidos por água.

Normalmente, o valor da sucção matricial crítica é maior para solos finos do que para solos granulares. Nestes há uma maior possibilidade de uniformização granulométrica e porosimétrica, assim, a pressão de entrada de ar é melhor caracterizada nos solos granulares que nos solos finos (Hillel, 1971).

A umidade residual (θ_r) é a umidade que corresponde à sucção, na qual qualquer acréscimo de pressão não extrai mais água do solo.

A textura, composição mineralógica e estrutura do solo influenciam na sucção e, conseqüentemente, a forma da curva característica.

Ao observar as curvas características de diferentes solos, conforme a Figura 2.10, percebe-se que os solos argilosos têm maior capacidade para reter água para uma mesma sucção. E pequenas variações de sucção influenciam em praticamente toda a variação de umidade nos solos granulares, entretanto, os solos finos necessitam de grandes variações de sucção para apresentar modificações sensíveis de umidade (Fredlund e Xing, 1994).

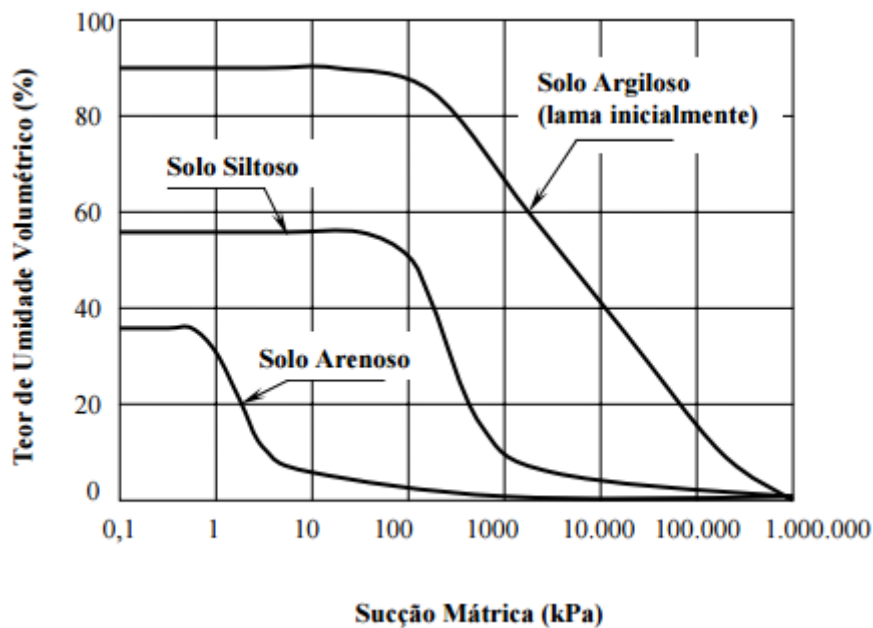


Figura 2.10 – Diferentes formatos das curvas características de sucção dos solos em função da granulometria (adaptado de Fredlund e Xing, 1994).

Observando as curvas características de um mesmo solo natural e compactado, nota-se que a compactação diminui as dimensões dos grandes poros, contudo, os microporos não se alteram, isto ocorre devido à influência da estrutura do solo na curva característica (Hilel, 1997).

Isto é demonstrado no estudo de Vanapalli et al. (1999), que apresentam a influência da estrutura do solo e do histórico de tensões na curva característica de um silte argiloso compactado. O solo com estrutura mais agregada, ou seja, solo de amostras que foram compactadas no tramo seco da curva de compactação, apresenta curva característica mais próxima de solos granulares do que os compactados com

outras umidades. Este estudo também demonstra que a curva característica não é muito influenciada pelo histórico de pressões, pois as amostras compactadas nas mesmas condições, porém com diferentes pressões apresentaram comportamento similar.

2.3.4. Função Permeabilidade

A condutividade hidráulica ou permeabilidade de um solo é a propriedade de permitir o escoamento de um fluido pelos seus vazios, sendo influenciada pela dimensão e forma dos vazios dele.

O solo não saturado tem uma parte de seus vazios preenchidos por ar, gerando uma perda da capacidade de transmitir água, portanto, quanto maior a sucção menor será a permeabilidade do solo. Esta relação entre a sucção e a permeabilidade do solo é denominada função permeabilidade.

Dentre os fatores que influenciam a permeabilidade do solo, pode destacar a área total disponível para o fluxo de água, que decresce com a diminuição do número de poros saturados por água, porque o ar passa a impedir a passagem da água.

Além disso, os poros maiores esvaziam mais rapidamente que os menores, pois se sabe que o fluxo de água é diretamente proporcional ao quadrado do raio do tubo capilar.

O fluxo de água também é dificultado pelo enchimento dos poros de ar, pois com isso a água fica isolada e descontínua em diversos poros do solo.

A sucção matricial influencia a permeabilidade, pois para sucções matriciais altas, há o aumento da tortuosidade e diminuição da quantidade e das dimensões dos poros. Ademais, há a mudança na viscosidade da água, que começa a se aproximar da camada adsorvida pelas partículas sólidas (Miller & Low, 1963).

Para este trabalho, parâmetro de adensamento m_v , a curva de variação da umidade volumétrica em relação à sucção mátrica e a curva de variação da permeabilidade em relação à sucção mátrica são os parâmetros necessários para utilizar a plataforma SEEP/W do *software* GeoStudio 2007.

2.4. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

A análise de estabilidade de taludes é feita utilizando o *software* GeoStudio 2007, plataforma SLOPE/W. Com o auxílio do *software*, é possível utilizar diversos métodos para analisar a estabilidade de taludes. O escolhido para este projeto é o método Morgenstern-Price (1965). Além de ele ser citado no manual da Eletrobrás (2003), este é o método mais geral de equilíbrio limite para qualquer superfície.

Considerando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, os parâmetros coesão não drenada, ângulo de atrito não drenado e peso específico saturado são necessários para o estudo de estabilidade de taludes. Esses e outros parâmetros são obtidos por meio de ensaios, que serão explicados a seguir.

2.5. OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS PARA MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica utilizando o *software* GeoStudio 2007 para a análise de estabilidade de taludes durante o rebaixamento rápido necessita de alguns parâmetros, tais parâmetros são obtidos por meio de ensaios de adensamento unidimensional, permeabilidade, compressão triaxial consolidado não drenado e obtenção da curva característica do solo em estudo.

2.5.1. Adensamento unidimensional

Adensamento é o fenômeno no qual ocorrem recalques devidos à expulsão da água nos vazios do solo. A Teoria de Adensamento de Terzaghi considera que o solo está saturado e é homogêneo, a compressão e o fluxo d'água são unidimensionais, o estudo do solo pode ser feito como elementos infinitesimais e o fluxo segue a Lei de Darcy (Pinto, 2006).

A NBR 12007/90 prescreve o método para determinar as propriedades de adensamento do solo. Neste ensaio, o solo é confinado lateralmente, carregado axialmente e drenado.

O ensaio de adensamento unidimensional fornece o coeficiente de variação volumétrica (m_v), que é utilizado na modelagem numérica. Este parâmetro é diretamente proporcional à variação de volume unitário do solo para certo acréscimo de tensão efetiva. Apesar de ser variável, esse coeficiente pode ser considerado constante em uma faixa de variação, e representado pela expressão 2.24:

$$m_v = \frac{a_v}{1+e_0} \quad (2.24)$$

Em que:

a_v = coeficiente de compressibilidade;

e_0 = índice de vazios inicial.

O coeficiente de compressibilidade (a_v) é a relação independente do tempo entre a variação do volume, ou seja, a deformação e a tensão efetiva. Nos solos, esta deformação pode ser estabelecida por meio de variações volumétricas ou no índice de vazios. O coeficiente a_v é expresso pela Equação 2.25:

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'_v} \quad (2.25)$$

Em que:

Δe = variação do índice de vazios;

$\Delta \sigma'_v$ = variação das tensões verticais.

A variação de tensões verticais pode ser obtida a partir do peso de solo que corresponde à distância entre a crista da barragem e o nível de água do reservatório após o rebaixamento subtraído do peso de solo correspondente à distância entre a crista e o nível normal de água do reservatório. A expressão da tensão vertical é:

$$\sigma'_v = \gamma \cdot h \quad (2.26)$$

Em que:

γ = peso específico do solo;

h = profundidade a partir da crista da barragem.

2.5.2. Permeabilidade

A permeabilidade é uma medida da maior ou menor dificuldade que a água encontra para fluir através do solo. É um parâmetro bastante variável em solos compactados. Assim, o conhecimento do seu valor exato é muito complexo pela

dificuldade de representar as condições reais do solo, mas sua ordem de grandeza é importante para as análises.

O valor numérico do grau de permeabilidade do solo é expresso pelo coeficiente de permeabilidade (k). Este coeficiente pode ser obtido por meio de ensaios de laboratório ou de campo, estes são utilizados para validar os resultados.

A norma NBR 13292/95 prescreve os métodos para determinar o coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante e percolação de água através do meio poroso em regime de escoamento laminar. Já para solos argilosos, devem-se realizar os ensaios de acordo com a NBR 14545, nesse caso, com a carga variável.

2.5.3. Compressão Triaxial Consolidado Não Drenado (CU)

O ensaio de compressão triaxial é utilizado para determinar as características de resistência do solo. Neste ensaio, é aplicado um estado hidrostático de tensões e de um carregamento axial sobre um corpo de prova cilíndrico do solo. Em diferentes intervalos de tempo, o acréscimo de tensão axial e a deformação vertical do corpo de prova são medidos. Com esses dados, é possível expressar as tensões desviadoras, que são as tensões devidas ao carregamento axial, e estas permitem o traçado dos círculos de Mohr correspondentes. Já envoltória de resistência é obtida pelos círculos de Mohr de ensaios feitos em outros corpos de prova (Pinto, 2006).

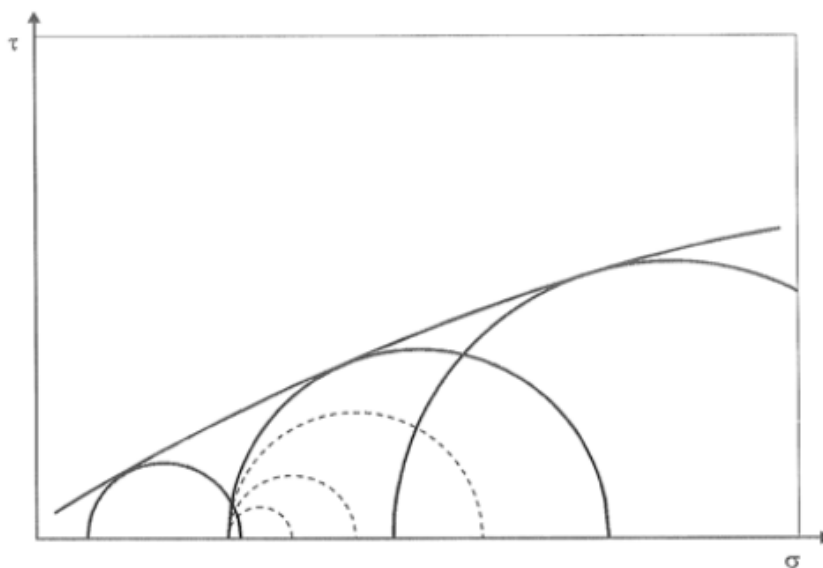


Figura 2.11 – Envoltória de resistência (Pinto, 2006).

Para o estudo de rebaixamento rápido, deve ser realizado o ensaio de compressão triaxial consolidado não drenado (CU), por ele simular as condições nas quais o solo é totalmente consolidado e submetido a esforços sem a saída de água. Estas condições representam de forma bastante significativa solos com baixa permeabilidade.

No ensaio CU, a pressão confinante é aplicada e a pressão neutra correspondente é dissipada. Assim, o corpo de prova será adensado sob pressão confinante. E o carregamento axial é aplicado sem drenagem. A importância deste ensaio deve-se ao fato de ele fornecer os parâmetros de coesão, ângulo de atrito e o módulo de elasticidade, essenciais para a modelagem numérica.

2.5.4. Curva característica

Utiliza-se a curva característica de um solo para reproduzir o comportamento do solo não saturado por meio da condutividade hidráulica, variação volumétrica e resistência ao cisalhamento. Assim, é possível representar de uma forma mais próxima da realidade o comportamento da barragem durante o rebaixamento rápido.

A determinação deste parâmetro pode ser feita por meio de ensaios com o uso de filtro de papel por secagem, quando a amostra inicialmente saturada é exposta a potenciais matriciais crescentes, ou seja, diminuindo a umidade do solo; ou por umedecimento, quando a amostra seca tem o potencial matricial reduzido gradualmente, aumentando a umidade.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CARACTERÍSTICAS DAS BARRAGENS

Como o objetivo deste trabalho é a comparação entre as análises de estabilidades de taludes de barragens durante rebaixamento rápido, considerando um rebaixamento instantâneo e gradual, foram analisadas três seções de barragens. Todas as barragens têm 80 metros de altura, largura da crista de 10 metros e taludes de montante e jusante com inclinação de 1V:3H.

A primeira barragem em estudo é homogênea composta por solo argiloso. Já a segunda, trata-se de uma barragem de enrocamento com núcleo argiloso, sendo seu comprimento a metade da altura da barragem. Finalmente, é analisada uma barragem também de enrocamento, porém com o núcleo argiloso com um terço da altura da barragem. Os três barramentos possuem filtros vertical e horizontal de areia. Entretanto, como o trabalho visa apresentar parâmetros para rebaixamento rápido, as características dos filtros e da fundação não são relevantes. O filtro e o núcleo foram traçados até a crista para evitar que a água passe por cima destes na modelagem numérica. As Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam a geometria das barragens supracitadas:

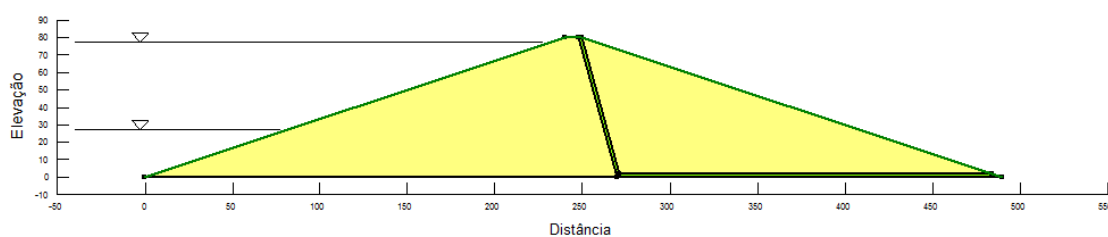


Figura 3.1 – Barragem homogênea de solo argiloso com filtro de areia.

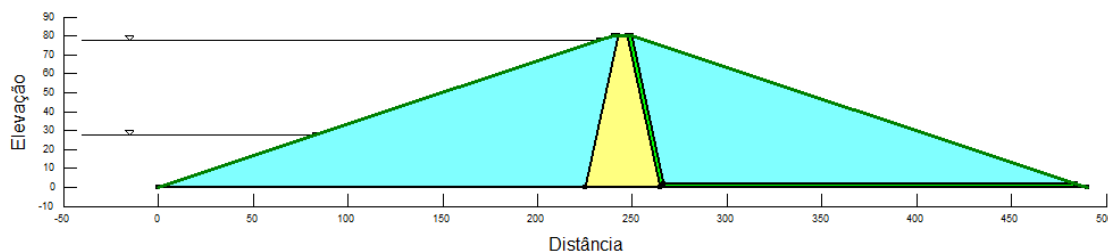


Figura 3.2 – Barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 40 metros de comprimento e filtro de areia.

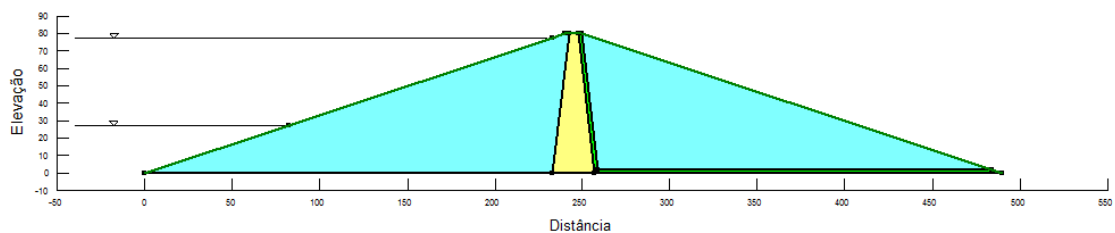


Figura 3.3 – Barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 24 metros de comprimento e filtro de areia.

Os parâmetros característicos dos materiais em estudo foram estimados tendo a atenção para que estes fossem coerentes com o problema em análise. E estes são apresentados na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Parâmetros dos materiais em estudo.

	Argila	Areia	Enrocamento
Peso específico γ (kN/m ³)	20	18	23
Coesão C' (kPa)	50	5	200
Ângulo de atrito ϕ (°)	27	35	40
Coefficiente de permeabilidade k (m/s)	10^{-8}	10^{-3}	10^{-6}
Módulo de elasticidade E (kPa)	2×10^4	5×10^4	10^5
Poisson ν	0,3	0,25	0,2

3.2. UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE GEOSTUDIO

Com as seções típicas e os materiais definidos, a estrutura foi modelada no programa de elementos finitos *GeoStudio*. As análises de fluxo foram feitas utilizando a plataforma SEEP/W, e as análises de estabilidade de taludes foram realizadas na plataforma SLOPE/W.

3.2.1. Análise de fluxo – SEEP/W

SEEP/W é uma plataforma do programa de elementos finitos *GeoStudio* utilizada para modelar o movimento e a distribuição de pressão de água dentro de materiais porosos, como solo e rocha, e pode ser modelado tanto o fluxo saturado quanto o fluxo não saturado. A determinação do fluxo em meios porosos em regime permanente e transiente é feita resolvendo a equação de Richards.

A malha foi definida por elementos finitos com aproximadamente 5 metros. Primeiramente, foram inseridos os parâmetros dos materiais. O solo argiloso, que está presente nos espaldares da barragem homogênea e nos núcleos das barragens de enrocamento, foi definido com o modelo saturado e não saturado. Por outro lado, a rocha e a areia do filtro foram definidos com o modelo saturado. Já os parâmetros hidráulicos da argila foram inseridos com as funções de variação da umidade volumétrica e a variação da permeabilidade.

Para se obter a função de variação da umidade volumétrica, foi necessário defini-la como função de pontos, ou seja, *Data Point Function*, utilizando uma função definida no próprio *GeoStudio*. Por se tratar de um solo argiloso, utilizou-se a função *Silty Clay*. Além disso, foi preciso determinar a condição inicial de volume de água no solo saturado, nesta análise, foi definida como $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Outro parâmetro importante para o estudo é o m_v , este foi estimado na ordem de grandeza de $10^{-5} / \text{kPa}$. Contudo, num caso real, estes parâmetros devem ser definidos por meio de ensaios. A Figura 3.4 apresenta a curva característica da argila, obtida no *GeoStudio*.

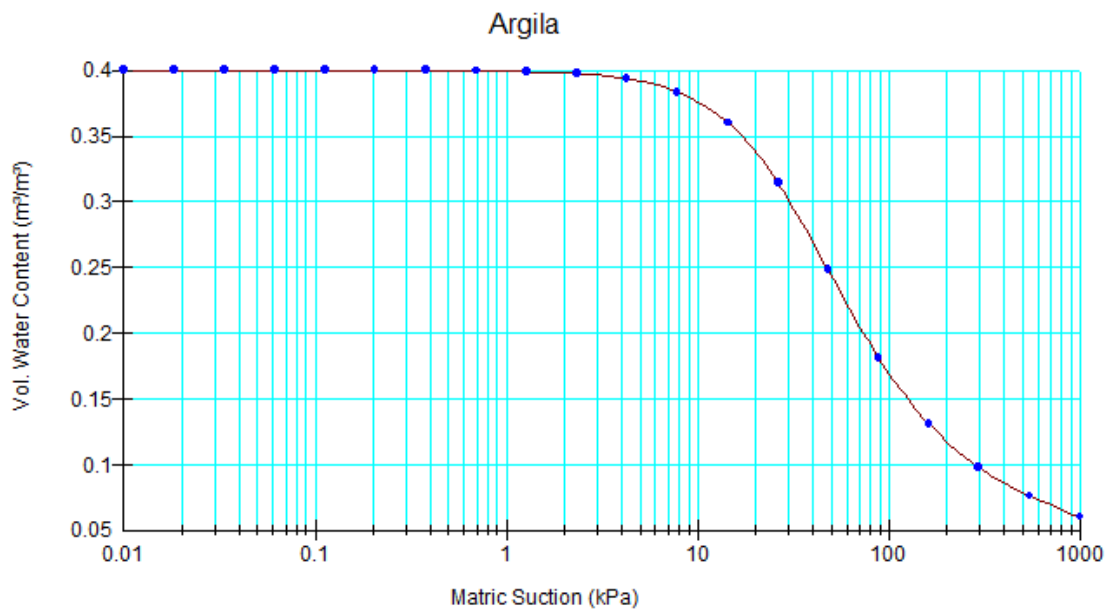


Figura 3.4 – Curva característica da argila obtida no *GeoStudio*.

A função de permeabilidade também é do tipo *Data Point Function*, estimada pelo método de Van Genuchten. Por fim, foram definidos o parâmetro de permeabilidade saturada como 0,000864 m/dia, que equivale a 10^{-8} m/s, e a quantidade de água residual como 0,05 m³/m³. A curva da função de permeabilidade obtida no *software* é mostrada na Figura 3.5:

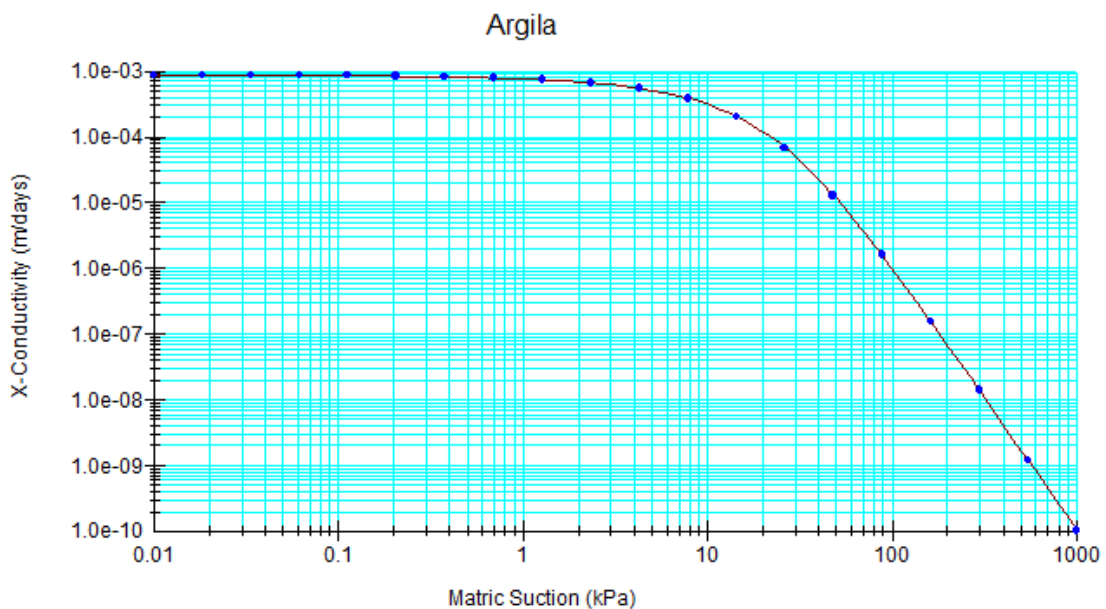


Figura 3.5 – Curva da função de permeabilidade da argila obtida no *GeoStudio*.

Após a inserção dos parâmetros, realizou-se a análise em fluxo permanente. Para isto, foi necessário definir as condições de contorno, denominada *Head* (H), constante de 77 m no talude de montante (roxo) e de 0 m no filtro à jusante (azul), conforme a Figura 3.4:

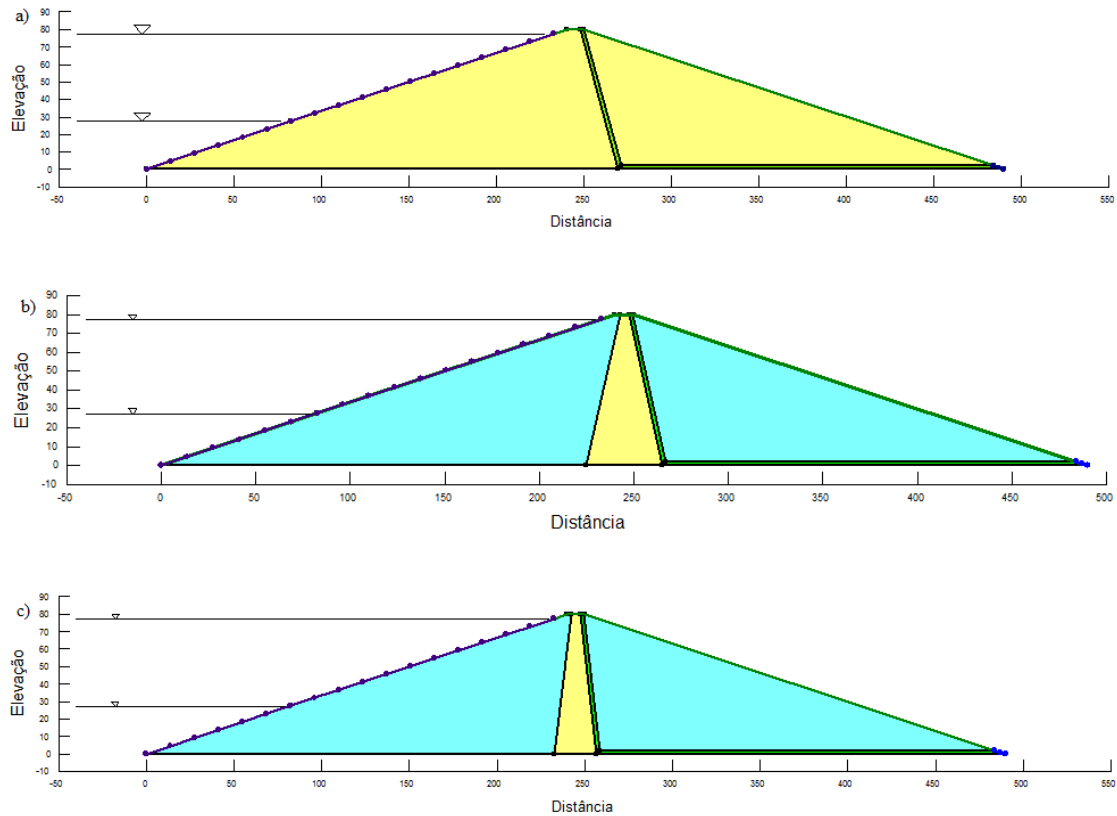


Figura 3.6 – Condições de contorno para análise de fluxo permanente: a) barragem homogênea, b) barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 40 metros e c) barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 24 metros.

Como a análise de percolação durante o rebaixamento rápido depende do tempo, o fluxo é transiente. A análise de fluxo transiente deriva-se do estudo de fluxo permanente. Desta forma, a configuração é feita em *KeyIn Analyses*, definindo o tipo *Transient*. No caso do fluxo transiente, é preciso estabelecer o tempo em que será feito o estudo. No estudo em questão, optou-se por analisar durante 100 dias. As condições de poropressão iniciais são obtidas da análise de fluxo permanente. Assim, deve-se optar pela opção *Parent Analysis*.

As condições de contorno são bastante importantes neste trabalho, pois elas que determinam se a análise é feita considerando o rebaixamento instantâneo ou gradual. No

caso do rebaixamento instantâneo, a condição de contorno à jusante foi mantida como *Head (H)* com valor constante igual a 0 m. Entretanto, à montante, há duas condições de contorno. Uma no nível do reservatório – 77 metros – até o nível do reservatório rebaixado – 27 metros – do tipo *Total Flux (Q)* constante e igual a 0 m³/dia com potencial de infiltração na face. A outra condição de contorno à montante foi inserida a partir do nível que o reservatório foi rebaixado até o nível zero e do tipo *Head (H)* constante com valor de 27 m. Este nível do reservatório rebaixado foi estimado. Mas em um caso real, ele é definido pelo limite inferior da tomada d'água. A Figura 3.5 mostra as condições de contorno para a análise de fluxo transiente durante rebaixamento instantâneo do reservatório da cota 77 m à cota 27 m.

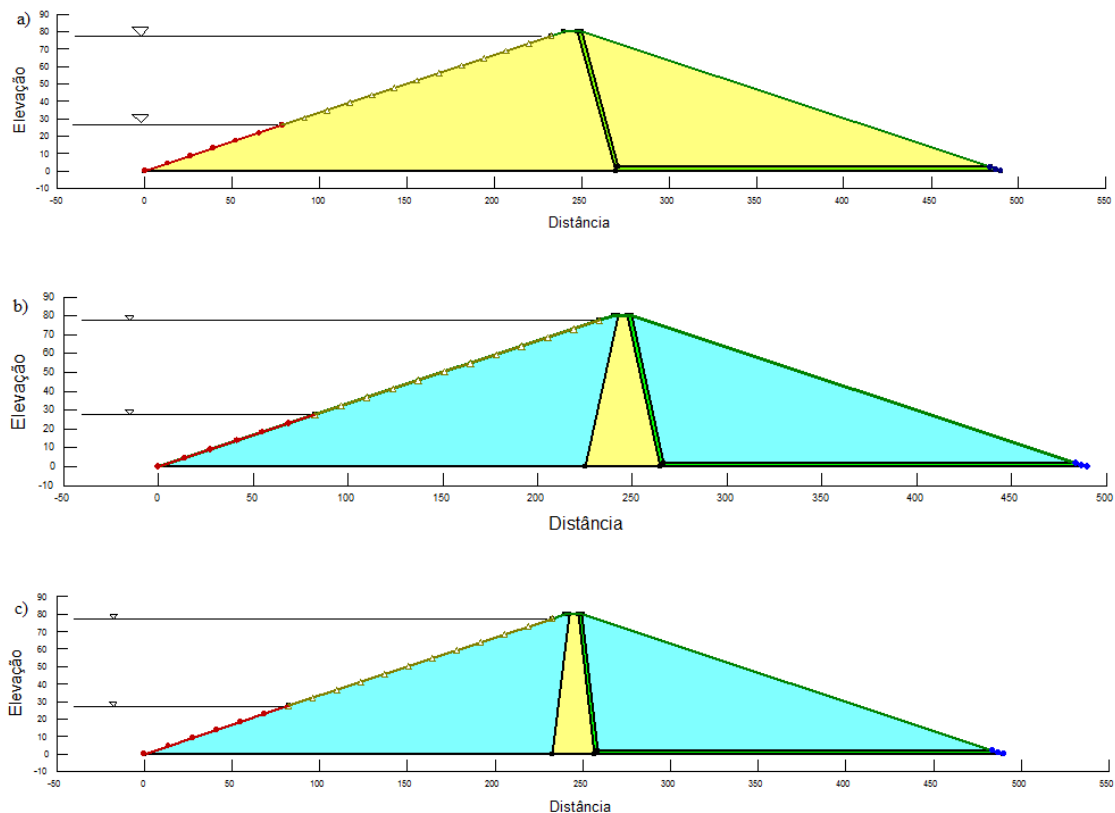


Figura 3.7 - Condições de contorno para análise de fluxo transiente durante rebaixamento instantâneo: a) barragem homogênea, b) barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 40 metros e c) barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 24 metros.

Considerando o rebaixamento do reservatório gradual, as condições de contorno à montante para a análise de fluxo transiente são do tipo *Head (H)*, porém não constante, mas sim em função da curva de rebaixamento inserida no *software*. Esta

curva segue a condição de que o reservatório está no nível 77 m no início da análise e no nível 27 m após 30 dias. A duração do rebaixamento foi estimada, pois este tempo é específico para cada barragem e depende de inúmeros fatores, tais como volume do reservatório, a área ocupada por este, as dimensões do vertedor e da tomada d'água. A curva de rebaixamento é apresentada na Figura 3.6:

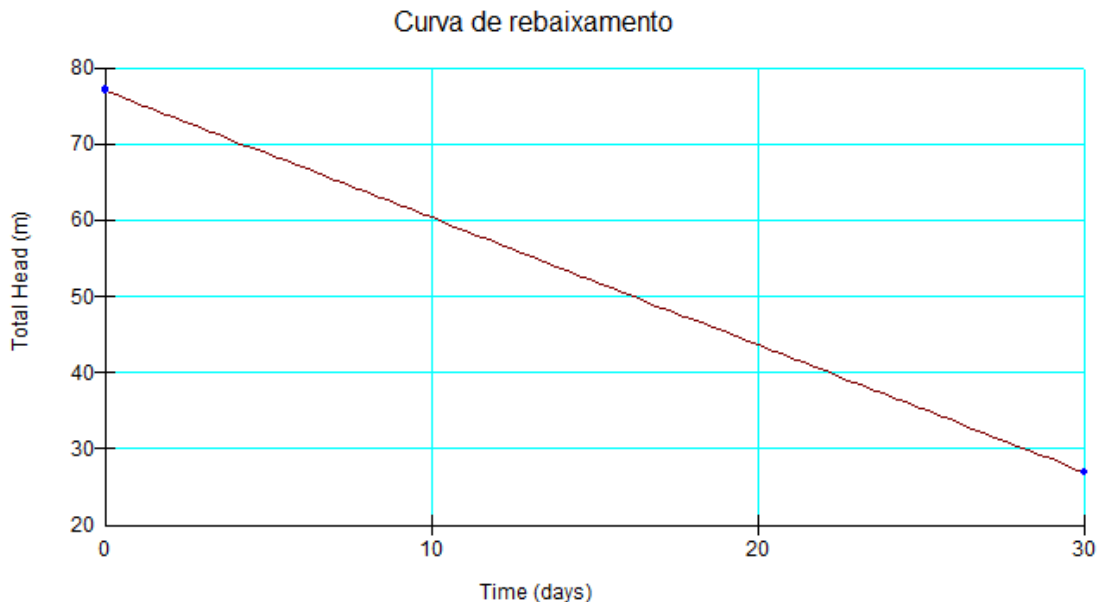


Figura 3.8 – Curva de rebaixamento do reservatório em estudo.

3.2.2. Análise de estabilidade de taludes – SLOPE/W

A análise de estabilidade de taludes é feita utilizando a plataforma SLOPE/W, esta calcula o Fator de Segurança e determina o círculo de ruptura dos taludes. O uso deste *software* possibilita a modelagem com diferentes tipos de solo, geometrias complexas de superfície de escorregamento e condições de pressão neutra variáveis utilizando diversos modelos de solos.

O estudo no SLOPE/W utiliza parâmetros obtidos da análise de fluxo transiente. Assim, as condições de poropressão vêm da *Parent Analysis*. Além disso, foi definido o método de Morgenstern-Price (1965), pois é o método mais geral de equilíbrio limite para qualquer superfície.

As condições de contorno para a análise de estabilidade de taludes foram definidas por uma malha de 20x20 centros e 20 raios ao longo do aterro com a opção

Grid and Radius, e a direção do movimento é da direita para esquerda, conforme as Figuras 3.7, 3.8 e 3.9.

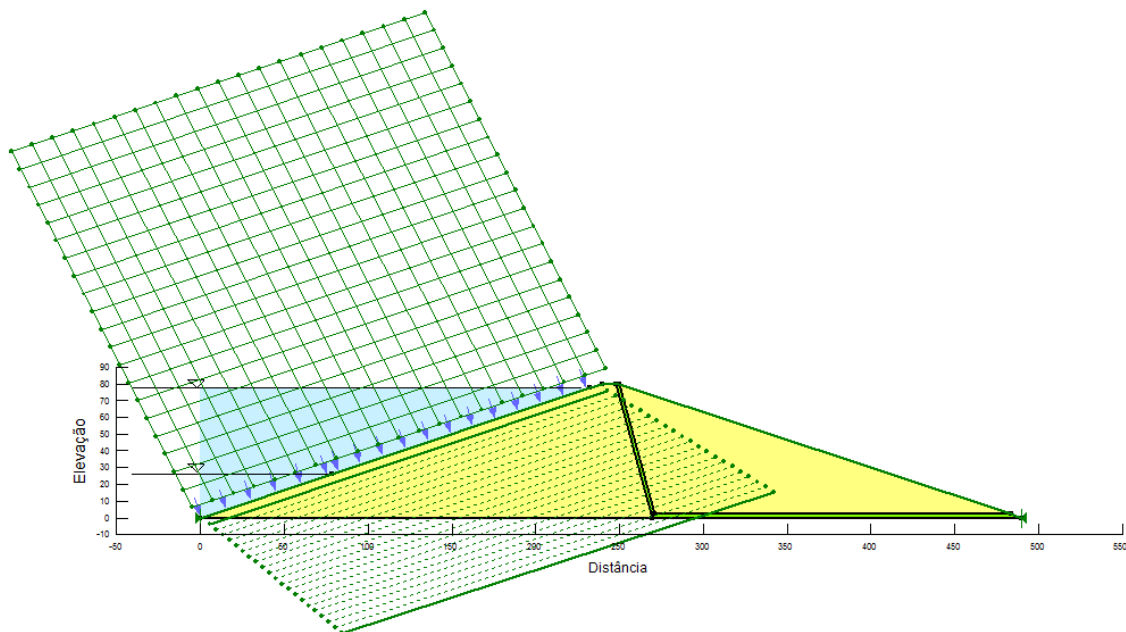


Figura 3.9 – Malha de centros e raios para análise de estabilidade de taludes da barragem homogênea de solo argiloso.

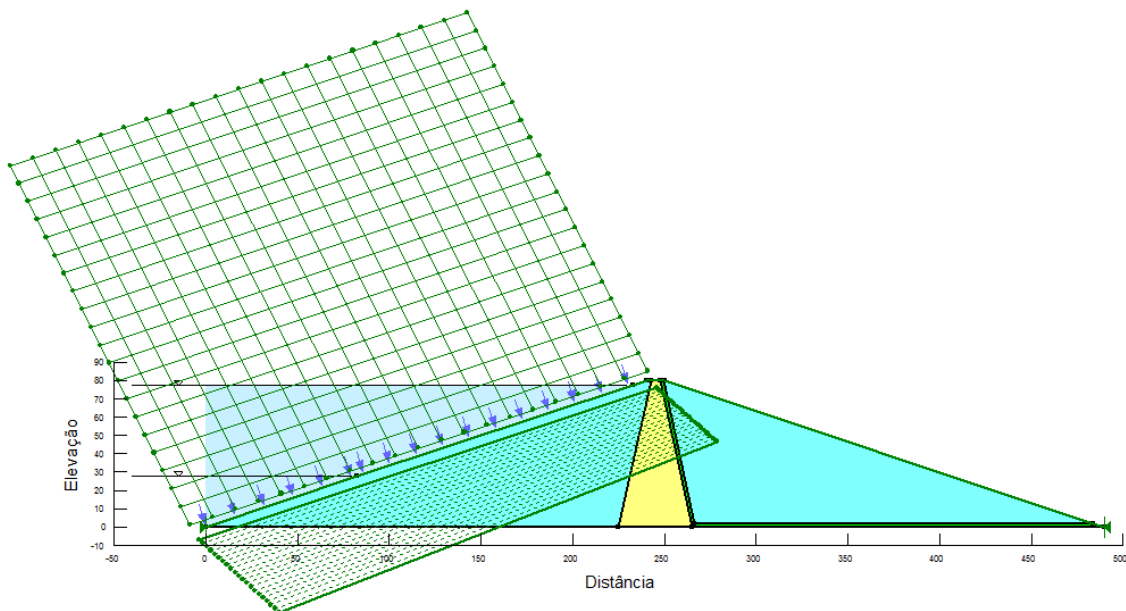


Figura 3.10 – Malha de centros e raios para análise de estabilidade de taludes da barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 40 m de comprimento.

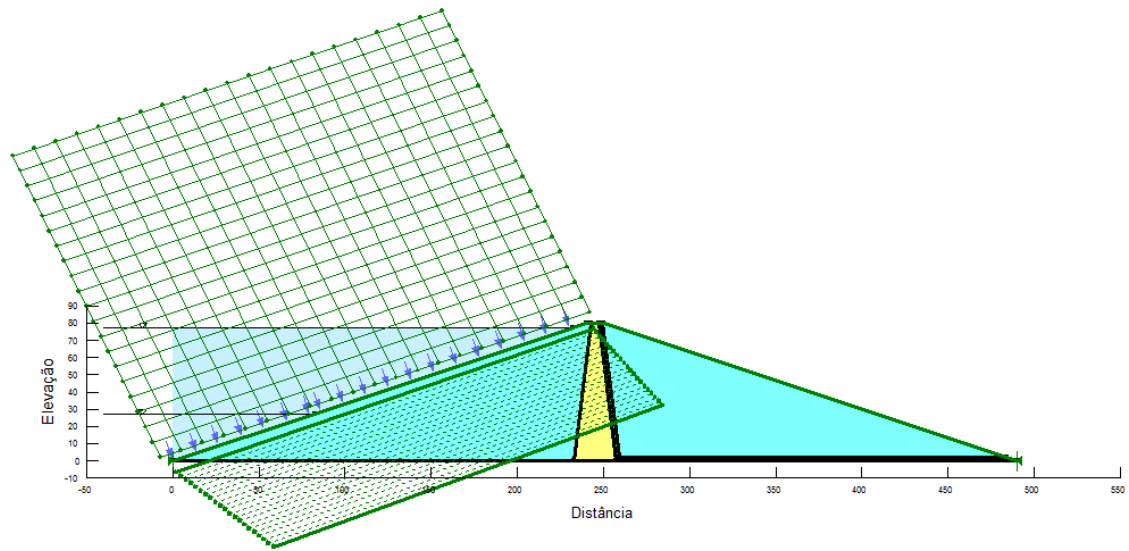


Figura 3.11 – Malha de centros e raios para análise de estabilidade de taludes da barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 24 m de comprimento.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Como a condição inicial de poropressão é obtida das análises de fluxo permanente e transiente, o estudo seguiu a seguinte ordem, conforme a Figura 4.1:

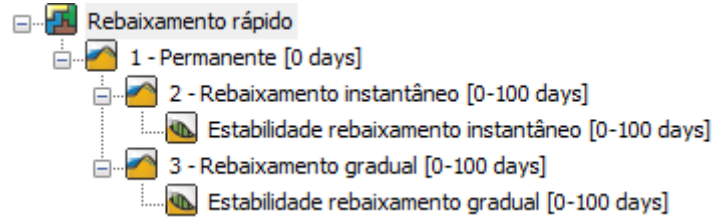


Figura 4.1 – Etapas para a análise de estabilidade de taludes durante rebaixamento instantâneo e gradual do reservatório.

Primeiramente, obteve-se o resultado do estudo de fluxo permanente. A Figura 4.2 apresenta as isolinhas de poropressão.

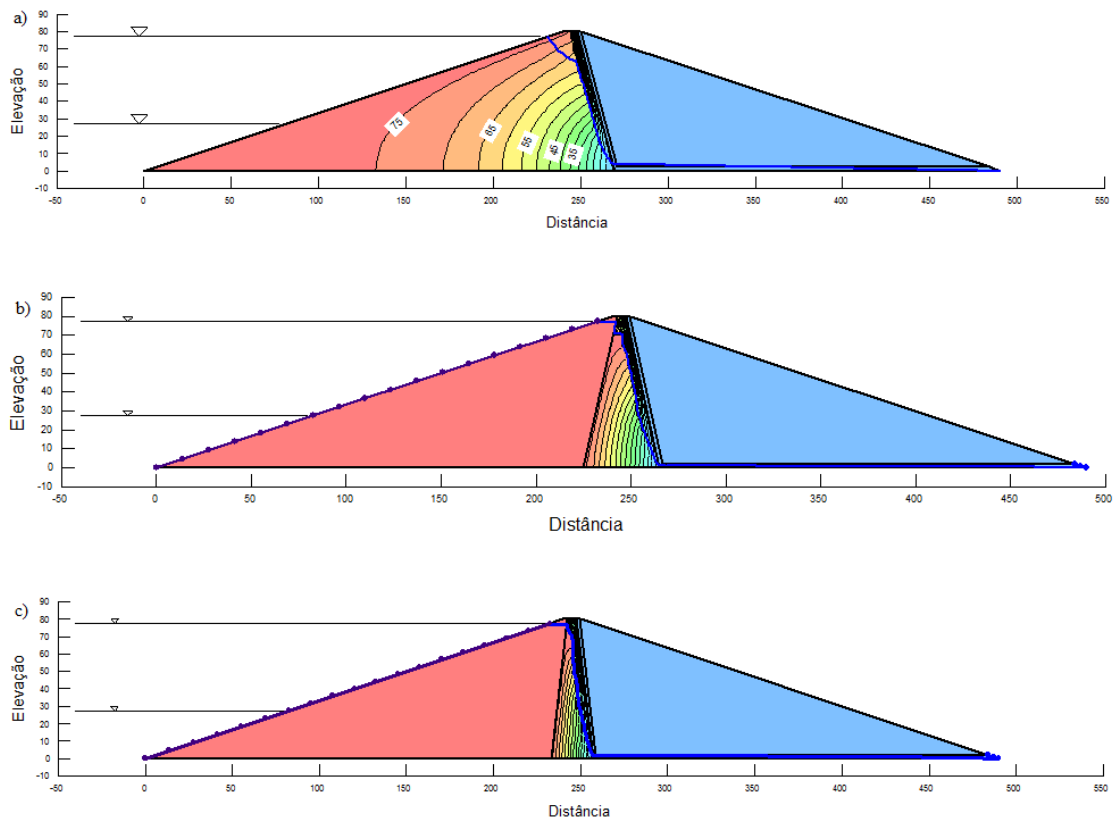


Figura 4.2 – Isolinhas de poropressão do fluxo permanente: a) barragem homogênea, b) barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 40 metros e c) barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 24 metros.

Percebe-se que o filtro cumpre com o seu objetivo, pois o talude de jusante está seco. As isolinhas de poropressão demonstram que as pressões neutras decrescem à medida que se afastam do talude de montante.

Como as condições de fluxo variam com o tempo durante o rebaixamento rápido, deve-se realizar um estudo considerando o fluxo transiente. Para demonstrar a variação da poropressão ao longo do tempo após o rebaixamento instantâneo e gradual, são apresentadas as Figuras 4.3 a 4.8.

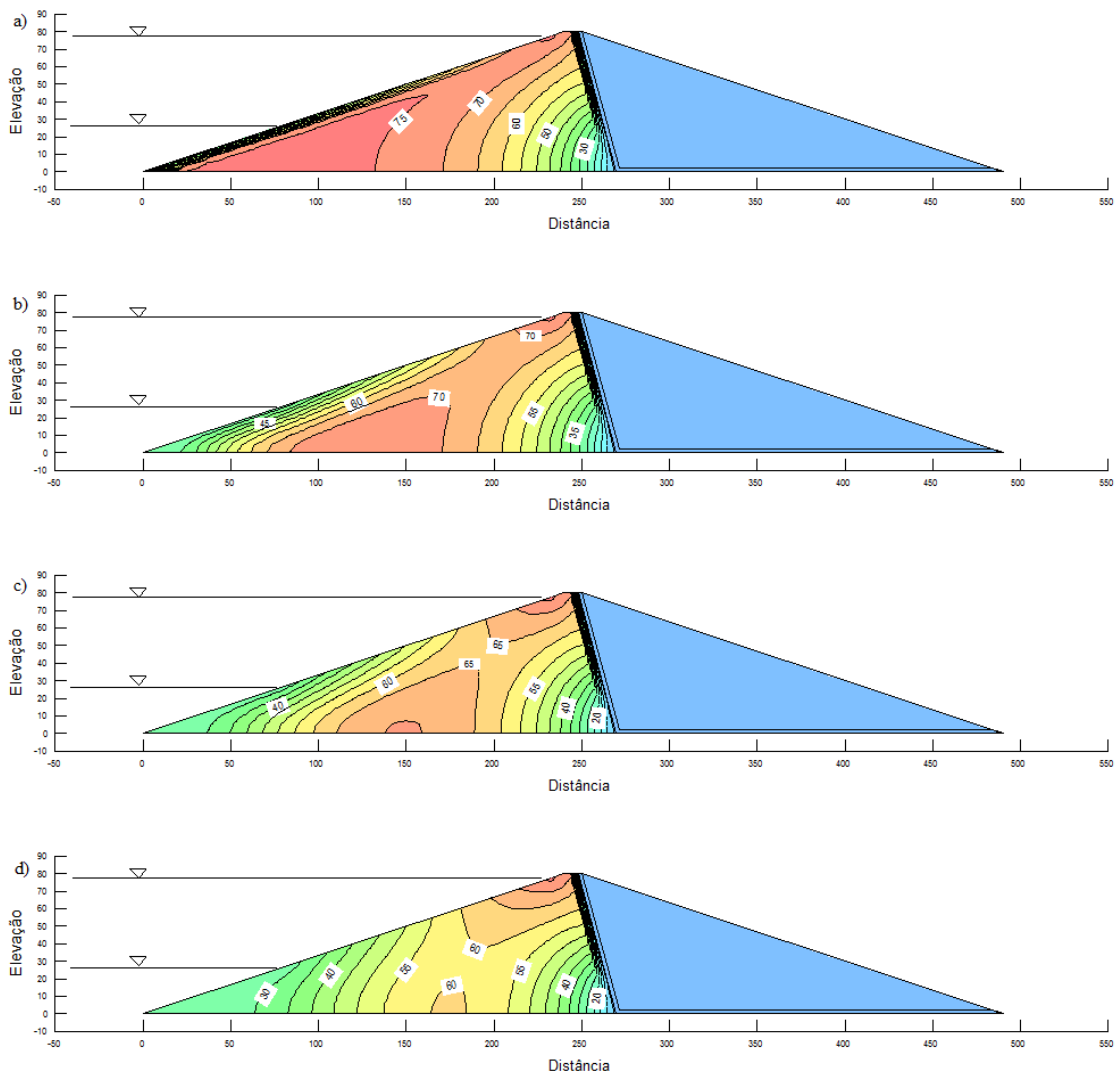


Figura 4.3 – Variação da poropressão ao longo do tempo na barragem homogênea durante rebaixamento instantâneo. a) 6 horas, b) 10 dias, c) 30 dias e d) 100 dias.

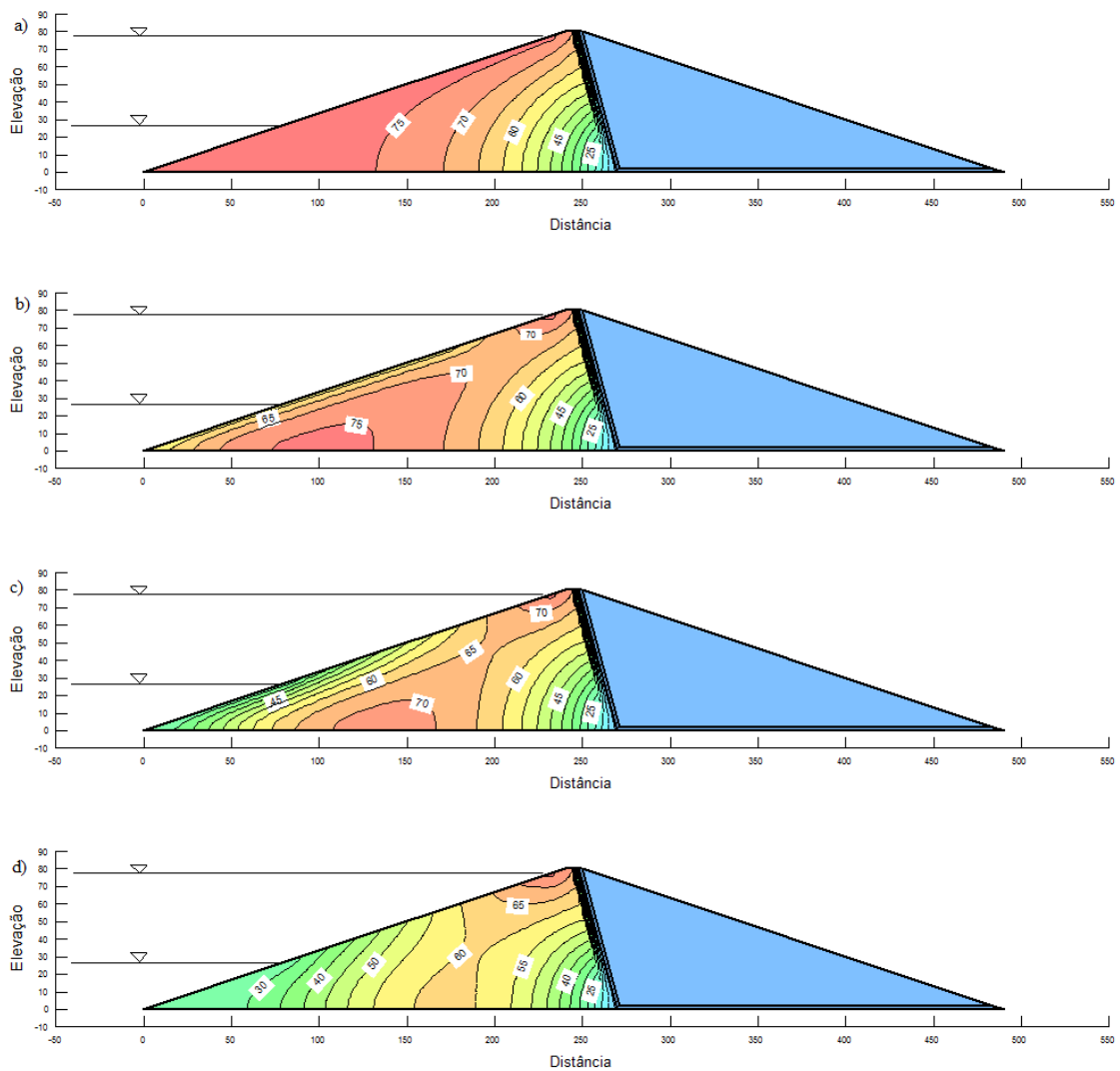


Figura 4.4 – Variação da poropressão ao longo do tempo na barragem homogênea durante rebaixamento gradual. a) 6 horas, b) 10 dias, c) 30 dias e d) 100 dias.

Ao considerar que o abaixamento do reservatório ocorreu de forma imediata, as poropressões começam a dissipar ao longo do talude de montante mais rápido que durante o rebaixamento progressivo. Mas com o intuito de simplificar, muitas vezes, esta dissipação não é considerada nos cálculos de estabilidade de taludes, tornando o fator de segurança mais baixo.

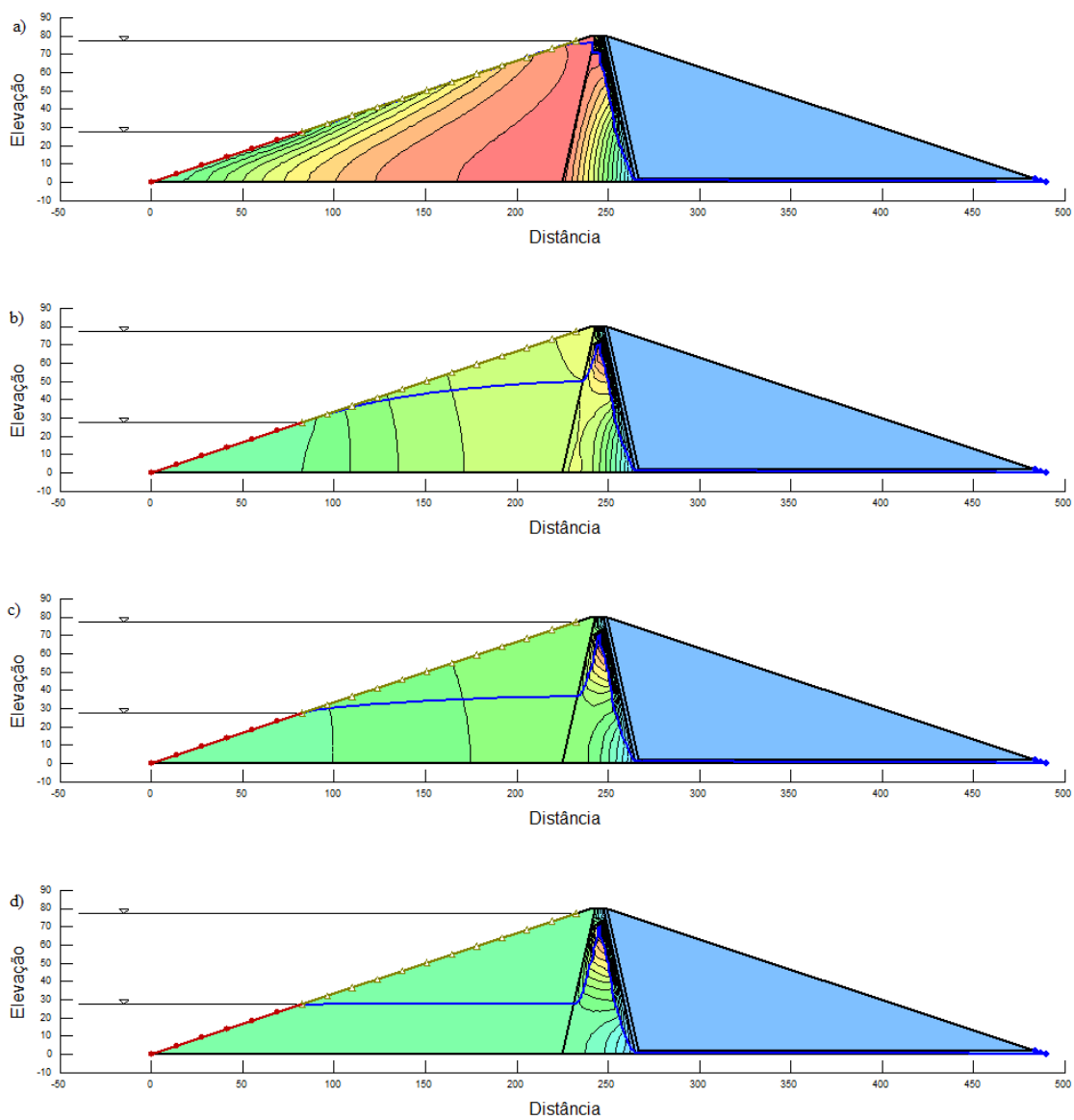


Figura 4.5 – Variação da poropressão ao longo do tempo na barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 40 m durante rebaixamento instantâneo. a) 6 horas, b) 10 dias, c) 30 dias e d) 100 dias.

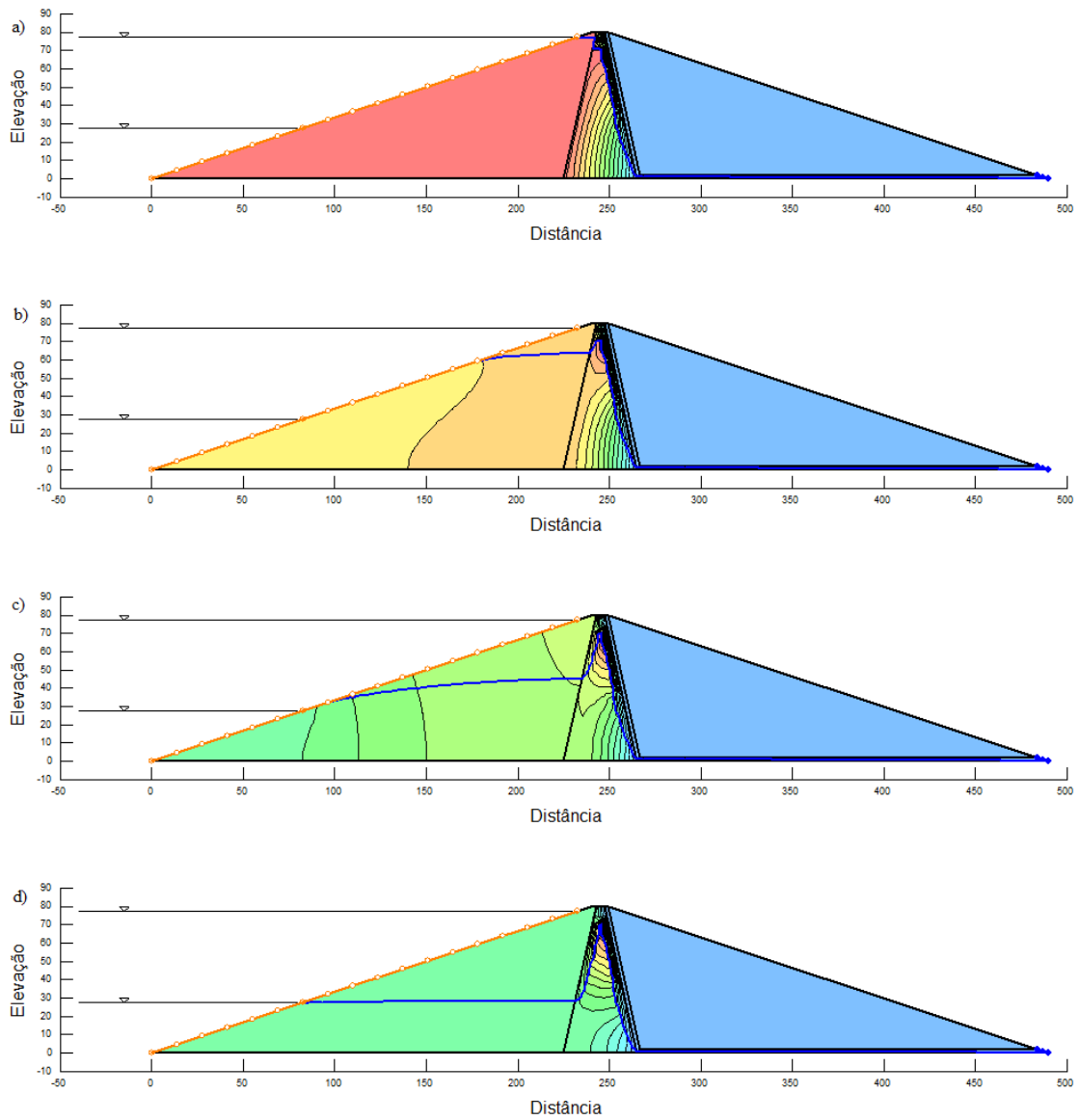


Figura 4.6 – Variação da poropressão ao longo do tempo na barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 40 m durante rebaixamento gradual. a) 6 horas, b) 10 dias, c) 30 dias e d) 100 dias.

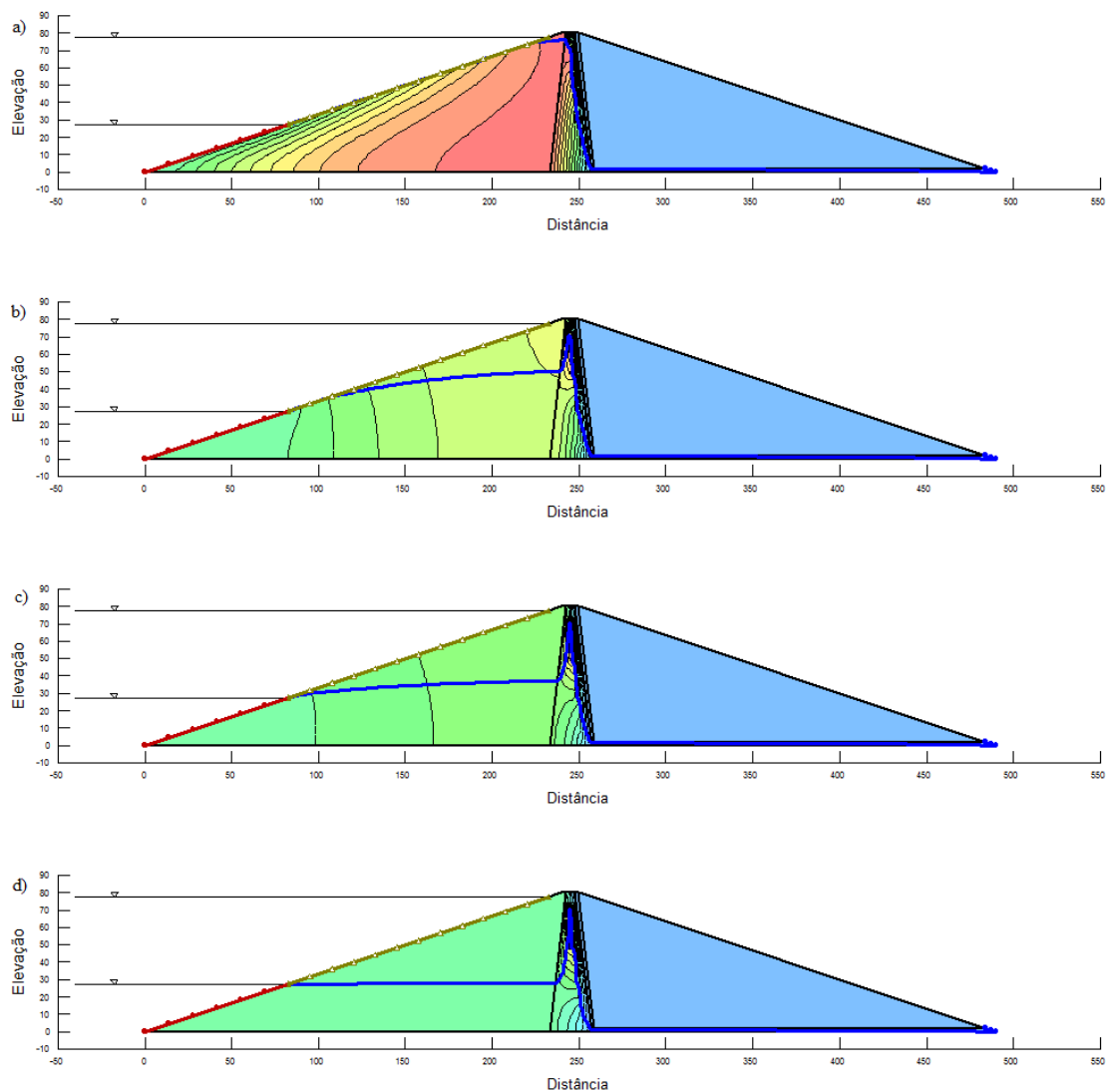


Figura 4.7 – Variação da poropressão ao longo do tempo na barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 24 m durante rebaixamento instantâneo. a) 6 horas, b) 10 dias, c) 30 dias e d) 100 dias.

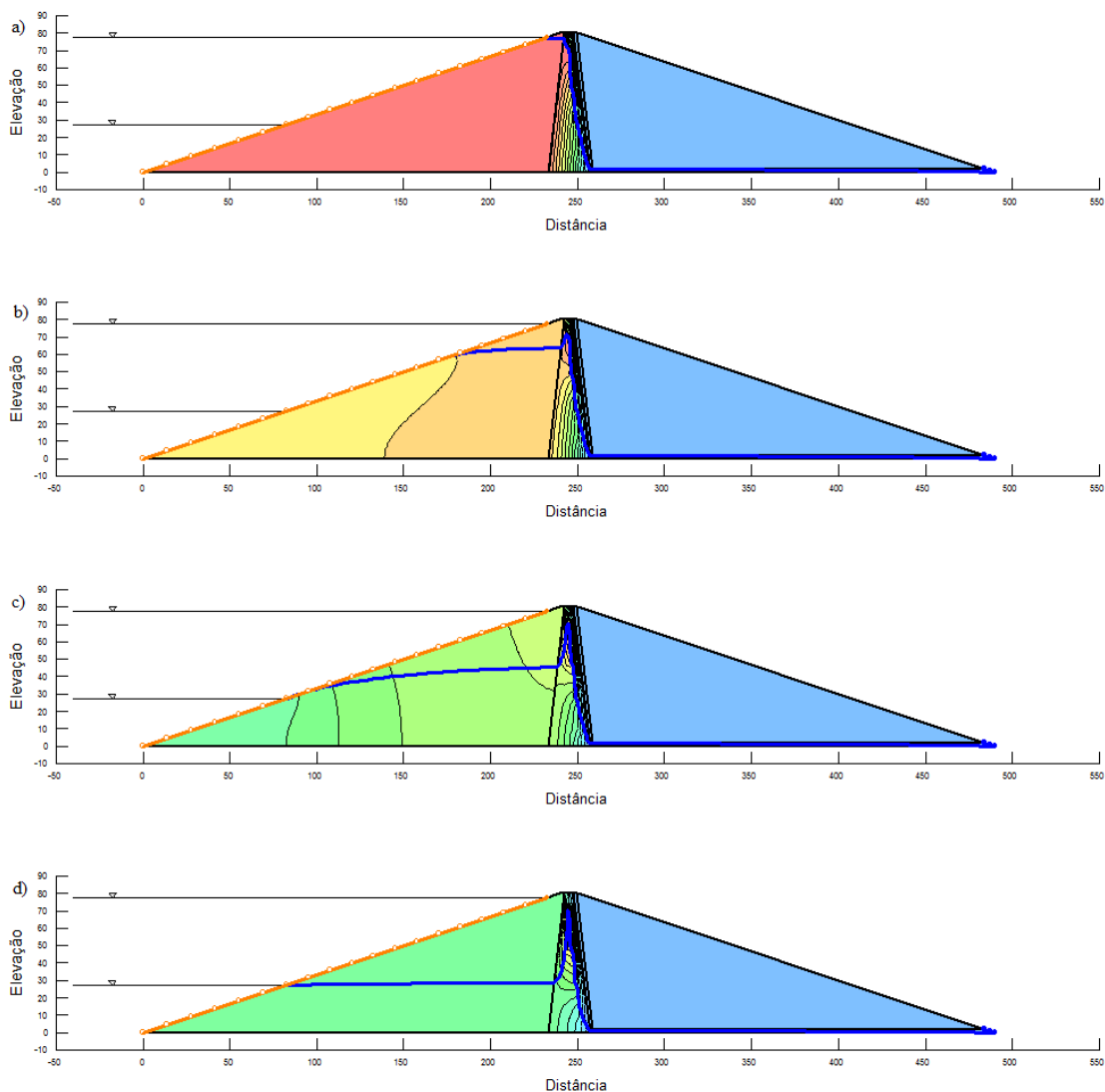


Figura 4.8 – Variação da poropressão ao longo do tempo na barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 24 m durante rebaixamento gradual. a) 6 horas, b) 10 dias, c) 30 dias e d) 100 dias.

Assim como na barragem homogênea, a dissipação se inicia antes no rebaixamento instantâneo nas barragens de enrocamento. Entretanto, a variação da pressão neutra é maior no barramento com núcleo argiloso, por este ter uma menor seção de material menos permeável.

Após as análises de percolação, obtiveram-se os fatores de segurança dos taludes de montante das barragens estudadas. A Figura 4.9 apresenta o fator de segurança e o círculo de ruptura da barragem homogênea durante o rebaixamento do reservatório,

considerando-o instantâneo, e a Figura 4.10, levando em consideração um rebaixamento gradual ao longo de 30 dias.

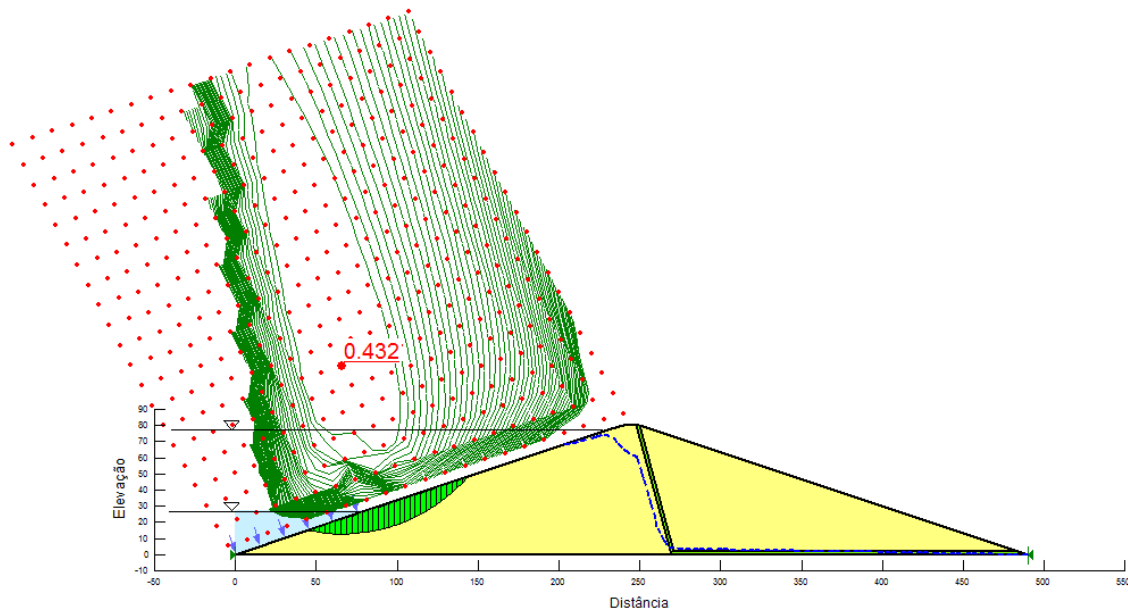


Figura 4.9 – Fator de segurança e círculo de ruptura da barragem homogênea para a condição de rebaixamento instantâneo.

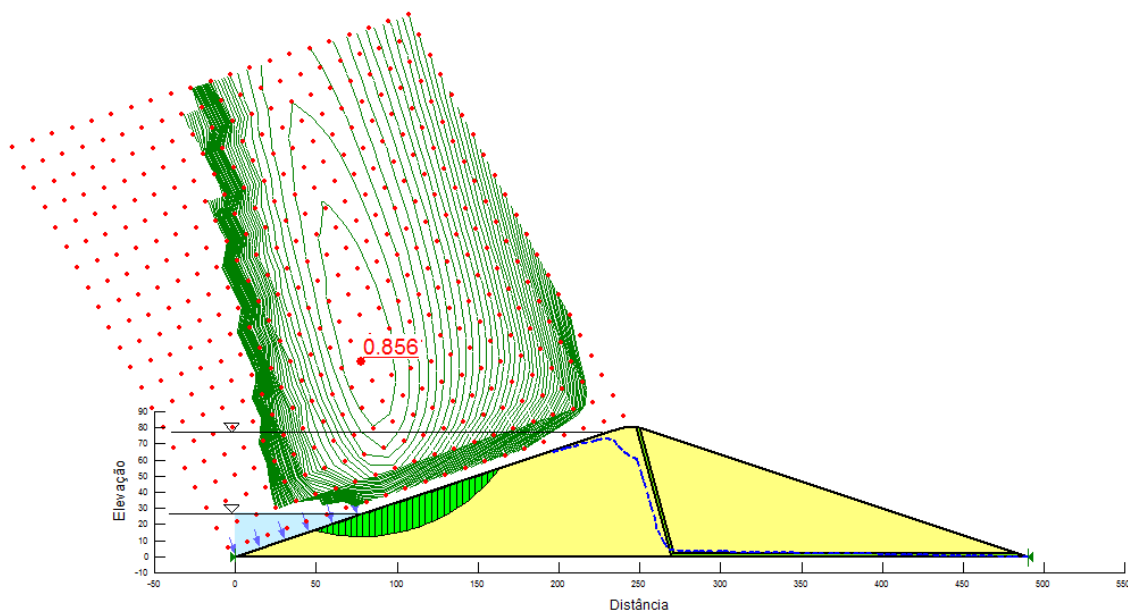


Figura 4.10 - Fator de segurança e círculo de ruptura da barragem homogênea para a condição de rebaixamento gradual.

Os valores do fator de segurança são menores que o mínimo admissível, igual a 1,1, entretanto, o intuito deste trabalho é compará-los. A diferença entre estes valores,

0,432 e 0,856, deve-se ao fato de que, levando em consideração que o rebaixamento ocorreu instantaneamente, houve a perda instantânea da ação estabilizadora do reservatório e não ocorreu a dissipação da poropressão. Enquanto que no rebaixamento gradual, a perda da força estabilizadora ocorre paulatinamente e as pressões neutras dissipam progressivamente. Contudo, sabe-se que, na realidade, o rebaixamento ocorre gradualmente.

As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam as curvas obtidas pelo *GeoStudio* que relacionam os fatores de segurança com o tempo em análise. O primeiro gráfico representa o rebaixamento instantâneo do reservatório e o segundo, o rebaixamento gradual da cota de 77 m à cota de 27 m ao longo de 30 dias.

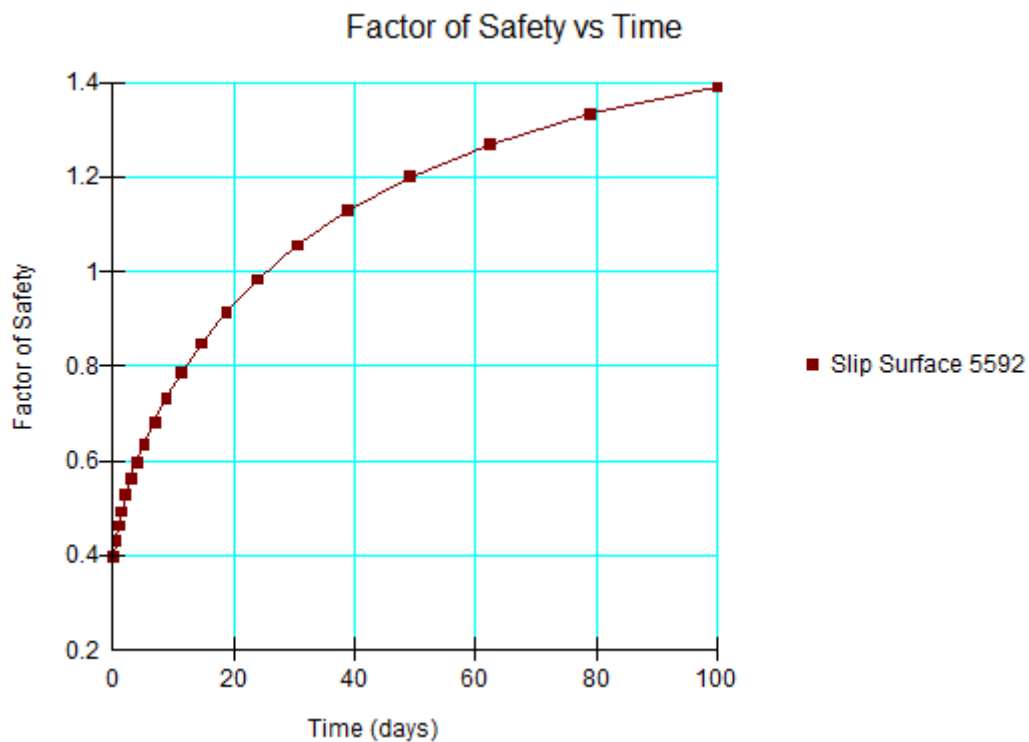


Figura 4.11 – Relação entre os fatores de segurança e o tempo de análise de estabilidade do talude de montante da barragem homogênea durante o rebaixamento instantâneo.

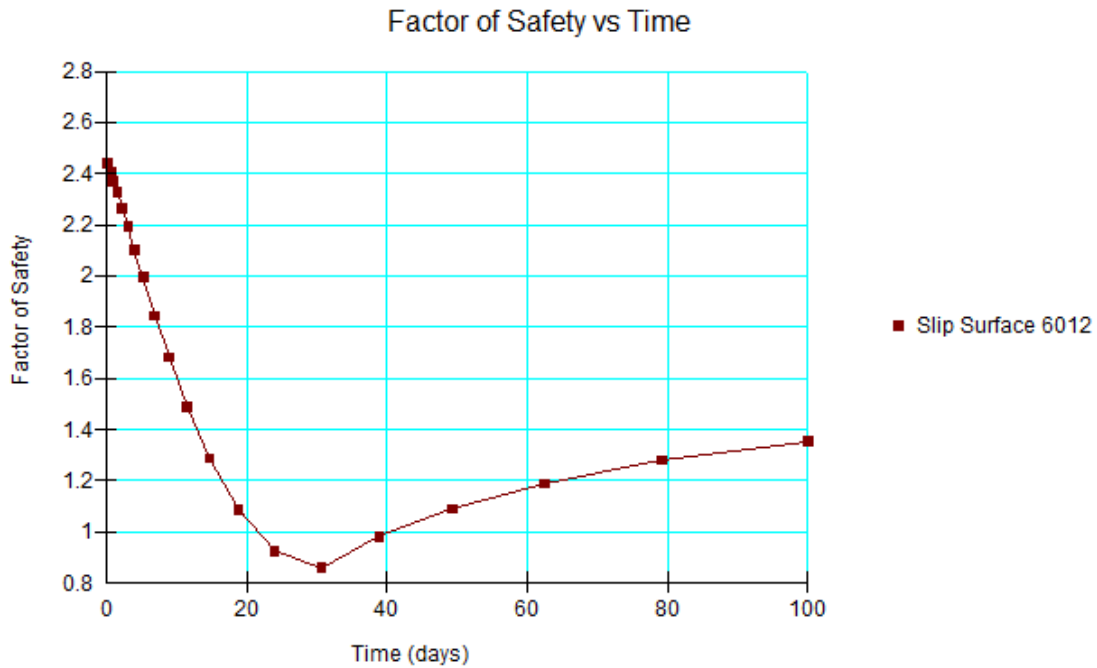


Figura 4.12 – Relação entre os fatores de segurança e o tempo de análise de estabilidade do talude de montante da barragem homogênea durante o rebaixamento progressivo.

Apesar de o rebaixamento gradual ocorrer durante 30 dias, o estudo foi feito em 100 dias para verificar que as duas análises resultam em fatores de segurança próximos muito tempo depois de ter ocorrido o abaixamento do reservatório. Neste caso, isto ocorreu por volta dos 100 dias quando o valor do fator de segurança é aproximadamente igual a 1,4.

Analisando as curvas, percebe-se que, no rebaixamento instantâneo, os fatores de segurança iniciam com valores bastante pequenos, pois não houve tempo para as poropressões dissiparem. Porém, estes valores crescem ao longo do tempo, justificado pelo fato de as pressões neutras começarem a diminuir.

Em contrapartida, no rebaixamento gradual, inicialmente o fator de segurança é alto, pois ainda há a ação estabilizadora do reservatório no nível máximo. Durante os 30 dias de rebaixamento, o valor do fator de segurança decresce pelo fato de o reservatório abaixar progressivamente, e desta forma a força que este exerce contra o talude montante é diminuída. Após esses 30 dias, o fator de segurança cresce, pois não há mais a diminuição do nível do reservatório e as poropressões continuam dissipando.

Normalmente, em barragens de enrocamento, os fatores de segurança são altos, pois a rocha é um material bastante resistente. Assim, o objetivo deste trabalho é também verificar a influência do tamanho do núcleo argiloso em uma barragem cujos espaldares são construídos com rocha.

As Figuras 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16 apresentam os fatores de segurança e os círculos de ruptura das barragens de enrocamento com núcleos argilosos de 40 m e 24 m de comprimento para a condição de rebaixamento instantâneo e gradual.

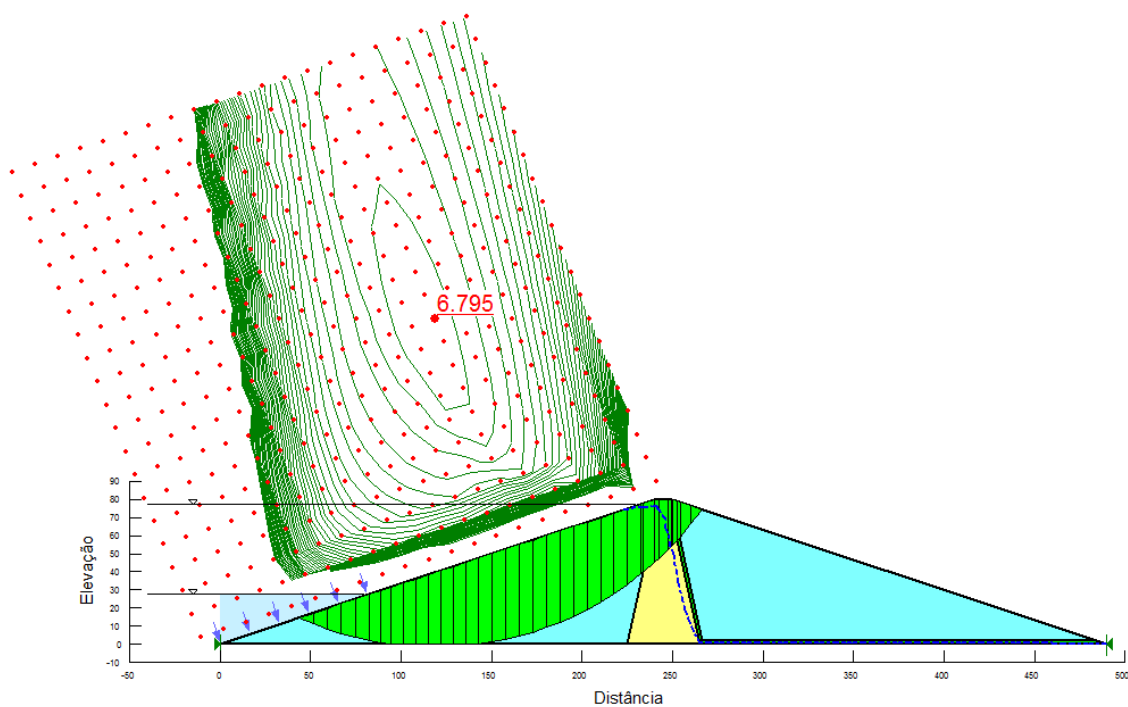


Figura 4.13 – Fator de segurança e círculo de ruptura da barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 40 m de comprimento para a condição de rebaixamento instantâneo.

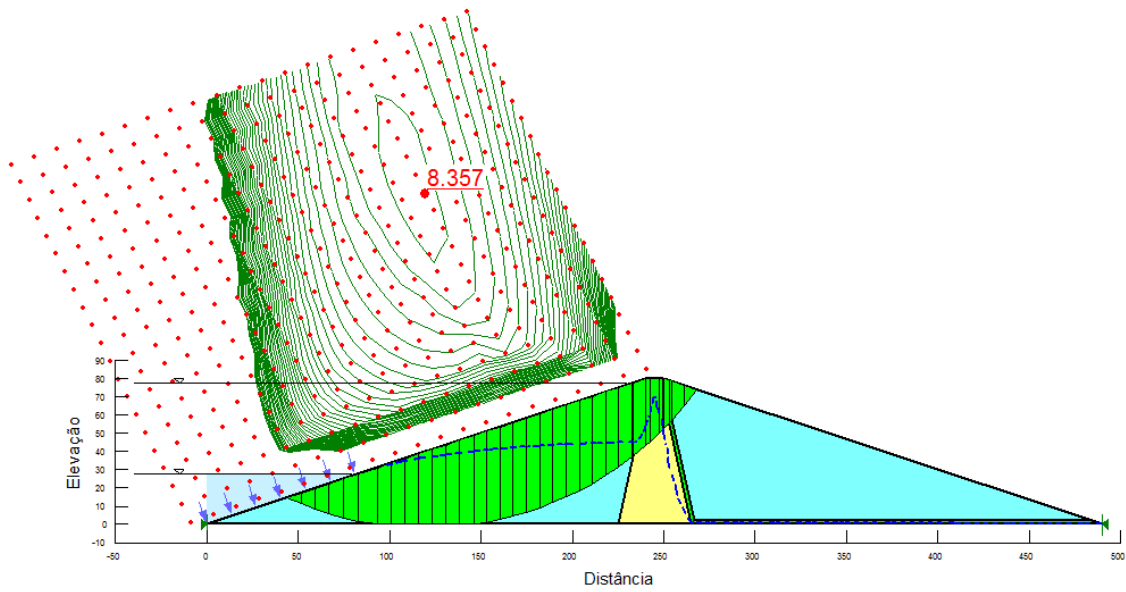


Figura 4.14 – Fator de segurança e círculo de ruptura da barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 40 m de comprimento para a condição de rebaixamento gradual.

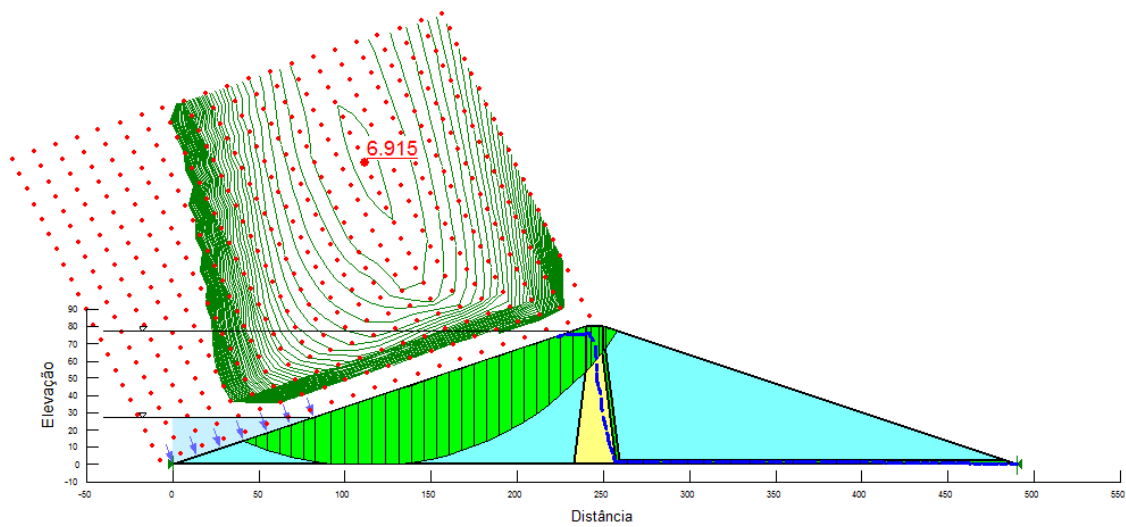


Figura 4.15 – Fator de segurança e círculo de ruptura da barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 24 m de comprimento para a condição de rebaixamento instantâneo.

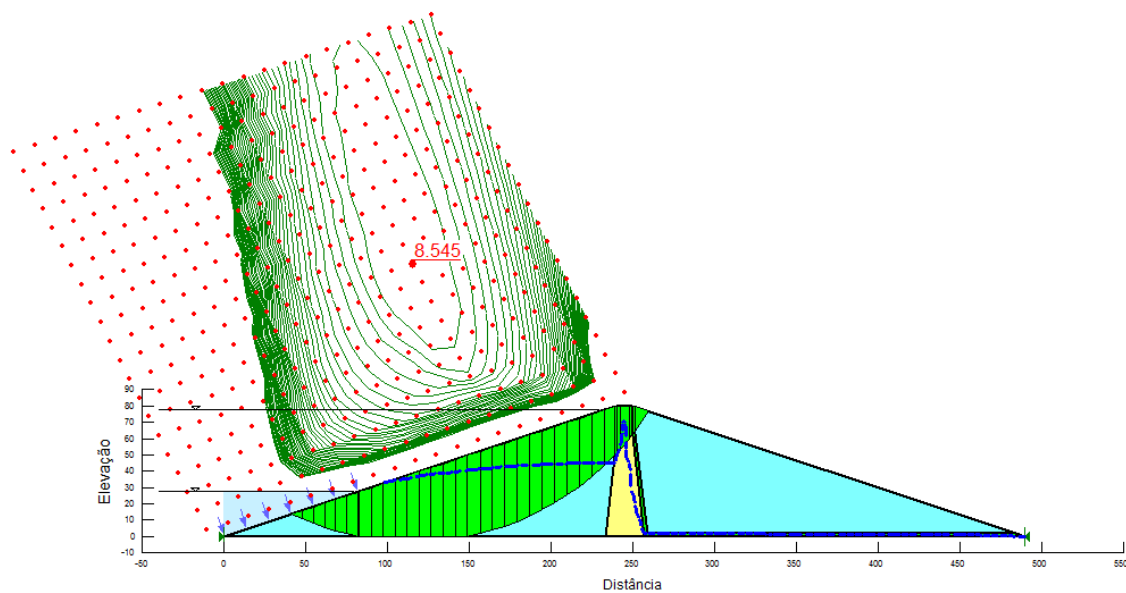


Figura 4.16 – Fator de segurança e círculo de ruptura da barragem de enrocamento com núcleo argiloso de 24 m de comprimento para a condição de rebaixamento gradual.

Diferentemente da barragem homogênea, os fatores de segurança das barragens de enrocamento foram muito elevados, bem acima do mínimo admissível, como esperado. Em relação à diferença entre as análises durante rebaixamento instantâneo e gradual, segue o mesmo padrão da barragem homogênea. Os fatores de segurança considerando que o abaixamento do nível do reservatório ocorreu instantaneamente são menores que os fatores de segurança durante o rebaixamento progressivo. Sobre a diferença entre as dimensões dos núcleos de argila, depreende-se que quanto maior é o tamanho do núcleo, menor será o fator de segurança. Isto porque a argila possui baixa permeabilidade, dificultando a dissipação das poropressões. Assim, se há mais argila na barragem, a dissipação da pressão neutra é menor.

Para uma melhor visualização destas comparações, são apresentadas as curvas que relacionam os fatores de segurança com o tempo em análise, tanto da barragem com núcleo de 40 m de comprimento como da barragem com núcleo de 24 m. Conforme as Figuras 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20.

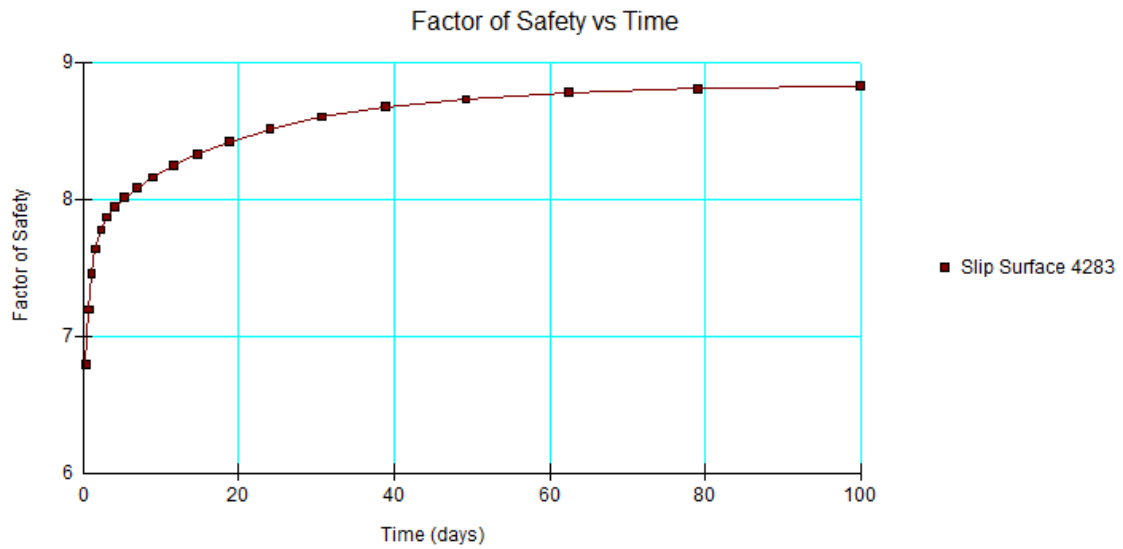


Figura 4.17 – Relação entre os fatores de segurança e o tempo de análise de estabilidade do talude de montante da barragem de enrocamento com núcleo de 40 m durante o rebaixamento instantâneo.

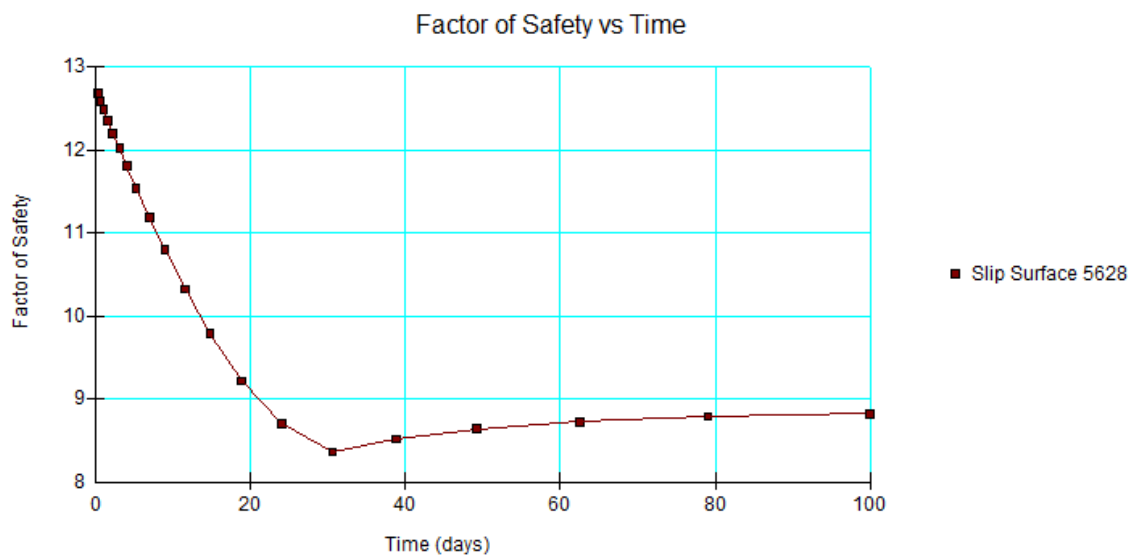


Figura 4.18 – Relação entre os fatores de segurança e o tempo de análise de estabilidade do talude de montante da barragem de enrocamento com núcleo de 40 m durante o rebaixamento gradual.

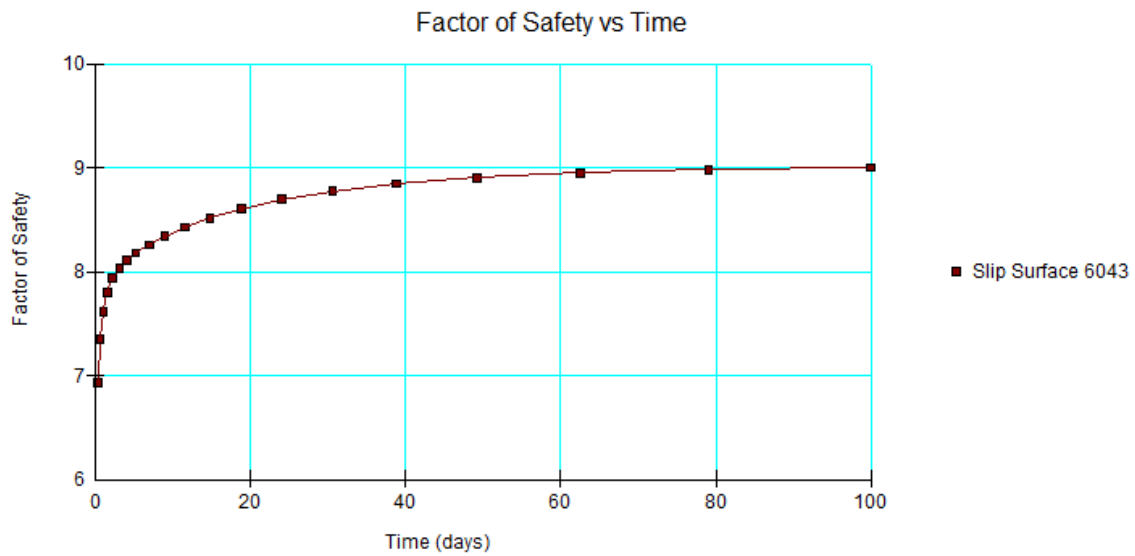


Figura 4.19 – Relação entre os fatores de segurança e o tempo de análise de estabilidade do talude de montante da barragem de enrocamento com núcleo de 24 m durante o rebaixamento instantâneo.

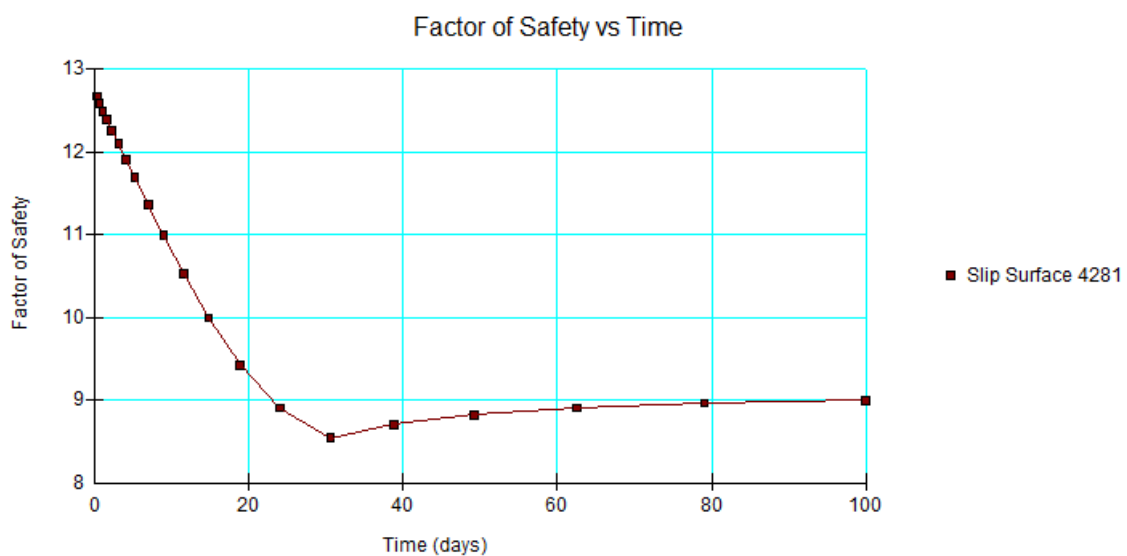


Figura 4.20 – Relação entre os fatores de segurança e o tempo de análise de estabilidade do talude de montante da barragem de enrocamento com núcleo de 24 m durante o rebaixamento gradual.

Assim como na barragem homogênea, as curvas dos fatores de segurança ao longo do tempo no rebaixamento instantâneo são crescentes e diminuem a inclinação com o passar dos dias, por causa da dissipação da poropressão.

Por outro lado, quando o nível d'água diminui progressivamente, os fatores de segurança também diminuem até o momento no qual o rebaixamento é cessado. Os valores nas duas maneiras de análise também coincidem muito tempo depois do rebaixamento.

Assim, constata-se que os resultados da análise simplificada, ou seja, considerando o rebaixamento imediato não são condizentes com a análise mais realista, com o abaixamento gradual. E este estudo deve ser acompanhado de ensaios que forneçam os parâmetros necessários e que represente bem a situação real na qual a estrutura se encontra.

5. CONCLUSÃO

Neste Projeto Final, pretendeu-se estudar a estabilidade de taludes de montante de barragens quando o nível do reservatório é abaixado. Para isso foi estudado o fenômeno rebaixamento rápido. Compreendeu-se que a possível instabilidade do talude deve-se além da água que permanece no maciço após o rebaixamento, a perda do efeito estabilizador que a água do reservatório exerce com forças contrárias ao deslizamento do talude também torna o maciço mais instável.

Além disso, ficou entendido que parâmetros como a permeabilidade do material que compõe o barramento, a inclinação do talude de montante e a velocidade do rebaixamento têm grande influência na maior ou menor estabilidade do talude.

Quanto maior for o coeficiente de permeabilidade, maior será a estabilidade da barragem. Pois um solo mais permeável permite que a dissipação das pressões neutras acompanhe o abaixamento do nível do reservatório. E em relação à inclinação do talude de montante, percebeu-se que um talude menos inclinado é mais estável. Sobre a velocidade do rebaixamento, concluiu-se que, quando este ocorre lentamente, há também a possibilidade de a poropressão dissipar enquanto o nível d'água é abaixado, bem como em um solo permeável.

Com o conhecimento destes fatores e a utilização de *software* de elementos finitos, é possível elaborar um estudo mais realista para a condição em questão. Diferentemente de como muitas vezes são feitos os estudos. Pois devido à complexidade das condicionantes de carregamento e à dificuldade para determinar os parâmetros, as análises de estabilidade de taludes eram e ainda são feitas considerando que o rebaixamento do reservatório ocorre instantaneamente, situação que não condiz com a realidade.

No caso deste trabalho, foi utilizado o *software GeoStudio* cujas plataformas SEEP/W e SLOPE/W são utilizadas para as análises de percolação e de estabilidade de taludes, respectivamente. Além da correta utilização do programa, também é preciso determinar corretamente os parâmetros. Aqui, eles foram estimados, mas recomenda-se que, em uma situação real, sejam realizados ensaios.

Após comparar as análises feitas considerando o rebaixamento instantâneo e gradual, conclui-se que, quando o abaixamento do nível d'água é considerado imediato, o fator de segurança é baixo, pois não leva em conta a dissipação da poropressão e calcula-se como se não houvesse mais a ação do reservatório contrária ao movimento de deslizamento do talude.

De maneira mais realista, no início do rebaixamento gradual, o fator de segurança é maior e decresce progressivamente até o momento no qual o reservatório chega ao seu nível mínimo, normalmente, definido pela tomada d'água. Isto porque a dissipação da pressão neutra e a perda da força estabilizadora da água no reservatório ocorrem gradativamente.

Por fim, nota-se que atualmente, há métodos que se aproximam cada vez mais da realidade, possibilitando a realização de projetos mais eficientes. Além disso, enfatiza-se a importância de ensaios para a determinação de parâmetros que representem da forma mais realista possível as condições de projeto. Evidentemente, que bons projetos devem ser seguidos por uma boa execução e manutenção para que sejam atendidas as condições técnicas, econômicas e de segurança, bastante importantes para obras de infraestrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 12007. Solo – Ensaio de adensamento unidimensional, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio Janeiro. 1990.

ABNT NBR 13292. Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio Janeiro. 1995.

ABNT NBR 14545. Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio Janeiro. 2000.

ALONSO, E., PINYOL, N. *Slope stability under rapid drawdown conditions*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha. 2009.

ARRAES, F.D.D. Modelagem bidimensional do movimento da água em condições de solo não saturado. 87p. Tese (doutorado) – Universidade de São Paulo. 2014;

ASSIS, A.P. *et al.* Apostila do curso de Barragens. Universidade de Brasília, DF. 2003. 170p.

COMISSÃO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. 80 anos: Barragens para o desenvolvimento humano sustentável. 2008. 22p.

CRUZ, P.T. 100 Barragens Brasileiras: Casos históricos, materiais de construção, projeto. Oficina de textos. São Paulo, SP. 1996. 647p.

ELETROBRÁS. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas, Comitê Brasileiro de Barragens. 2003.

FREDLUND, D.G., RAHARDJO, H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. J. Wiley and Sons, Inc., New York. 1993.

HILLEL, D. *Soil Water-Physical principles and processes*, New York, Academic Press. 1971.

IGNACIUS, S.G.; TOGNON, A.A.; SAAD, A.M. & CARVALHO. C.S., Ensaios Geotécnicos em Solos Não Saturados no Intuito de Pesquisas Tecnológicas – IPT, SP, Anais do Simpósio Sobre Solos Não Saturados, 50-70, UnB, Brasília, 1991.

LEE, I. K., WHITE, W., INGLES, O. G. *Geotechnical engineering*. Melbourne: Pitman. 1983.

LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. São Paulo: EDUSP. 2005. 335p.

LOWE, J., KARAFIATH, L. *Stability of earth dams upon drawdown, Proceedings of the First PanAmerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City*. 1959.

MILLER, R. J. & LOW, P. F. *Threshold gradient for water flow in clay system*. 1963.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Manual de Segurança de Barragens. 2002.

PEREIRA, Publio Reis. Modelagem numérica do comportamento tensão-deformação de barragens de terra: estudo de caso da UHE de São Simão. 2014. 135p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

RAPOSO, R.S.P.; DOMINGUES, V.R.; CORDÃO, M.P.; Análise dos Parâmetros para Utilização em Projeto de Rebaixamento Rápido de Barragem, Utilizando a Ferramenta GeoStudio 2007. 2015. Universidade de Brasília, Brasil.

SANDRONI. Apostila para o Curso Básico sobre Projeto de Barragens de Terra e Enrocamento – Mestrado em Geotecnia. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 2006.

SHERARD *et al.* *Earth and Earth Rock-Dams*. J. Wiley. 1963.

PINTO, C.S. Curso Básico de Mecânica dos Solos. 2. Ed. Oficina de textos, São Paulo, SP. 2000. 355p.

VANAPALLI, S. K., FREDLUND, D. G. & PUF AHL, D. E. *The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. Géotechnique*. 1999.

VIRATJANDR, C.; MICHALOWSKI, R. L. *Limit analysis of submerged slopes subjected to water drawdown. Canadian Geotechnical Journal*. 2006.