



**Maria de Oliveira Cruz Mariano**

**Usinas Hidrelétricas Reversíveis: considerações  
sobre rebaixamento rápido na estabilidade de ta-  
ludes**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão

Rio de Janeiro  
Maio de 2017



**Maria de Oliveira Cruz Mariano**

**Usinas hidrelétricas reversíveis: considerações  
sobre rebaixamento rápido na estabilidade de ta-  
ludes**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Pedricto Rocha Filho**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Flávio Miguez de Mello**

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**John Denys Cadman**

Universidade da Califórnia, Berkeley

**Prof. Willy de Alvarenga Lacerda**

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Coordenador Setorial do  
Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 de maio de 2017

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da autora, do orientador e da universidade.

### **Maria de Oliveira Cruz Mariano**

Graduou-se em Engenharia Civil em 2008 na UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Iniciou sua atuação na área da engenharia de barragens ainda durante a graduação, quando estagiou na equipe de manutenção e segurança de barragens da Light Energia SA, e como engenheira participou da elaboração de estudos de viabilidade de hidrelétricas e estudos de inventário do potencial hidrelétrico como analista na Empresa de Pesquisa Energética, quando teve contato com o tema das usinas hidrelétricas reversíveis. Atualmente atua como engenheira civil em consultora especializada em estudos e projetos para o setor elétrico.

#### Ficha Catalográfica

Mariano, Maria de Oliveira Cruz

Usinas hidrelétricas reversíveis : considerações sobre rebaixamento rápido na estabilidade de taludes / Maria de Oliveira Cruz Mariano ; orientador: Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão. – 2017.

97 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Estabilidade de taludes. 3. Rebaixamento rápido. 4. Hidrelétricas reversíveis. I. Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

*Para minha mãe e meu pai,  
com todo meu amor.*

## Agradecimentos

Eu não imaginava o quanto seria difícil todo este período do Mestrado quando decidi por me engajar nesta jornada. Sobretudo, não imaginava o quanto seria árdua a elaboração desta dissertação. Sinto que devo dizer obrigada a muitos pelo suporte e carinho ao longo de todo este processo, e vão aqui as minhas palavras a todos.

Agradeço à EPE – Empresa de Pesquisa Energética, sobretudo à pessoa do meu ex diretor José Carlos de Farias Miranda, pelo apoio institucional para cursar o Mestrado. Da EPE, agradeço ainda aos colegas, todos da equipe da Superintendência de Projetos da Geração (SEG), pelo incentivo e compreensão nos momentos em que estive ausente.

Em especial, quero dizer ao amigo Thiago Vasconcellos Barral Ferreira obrigada por toda a atenção que dispendeu para me apoiar na busca por um tema que fosse de meu interesse. Obrigada por sua forma gentil e carinhosa de criticar e orientar.

Não me esquecerei que tive a oportunidade de estudar numa das melhores universidades privadas deste país sem qualquer ônus. À PUC, e a todo seu time de excelentes profissionais, meu enorme “obrigada”.

Ao professor Alberto Sayão, muito obrigada por sua receptividade ao tema que escolhi, pela atenção e carinho ao longo de toda a elaboração deste trabalho. E por ter convidado o professor Flávio Miguez para participar deste processo.

Ao professor Flávio Miguez, agradeço sua orientação, todas as sugestões e importantes contribuições para meu trabalho. Mesmo que não seja possível estar ao meu lado como co-orientador, jamais esquecerei de sua boa vontade e interesse.

A Light e ao meu amigo Raphael Silva, que gentilmente me forneceram documentos que embasaram meu trabalho.

Agradeço, claro, à minha família, pela compreensão diante do furto do tempo, que deveria ter sido nosso e acabou sendo só meu. Especialmente, a minha mãe, Cristina Mariano, que carinhosamente revisou meu trabalho. Não tenho palavras para agradecer todo empenho, interesse e dedicação dela nesta revisão, e suas contribuições muito importantes para a versão final do texto. E ao Gabriel, meu amor, obrigada por todo carinho e cuidado, sempre zelando pelo meu bem-estar, me levando e me trazendo, a qualquer dia e hora para que eu pudesse estudar. Amo muito vocês.

Agradeço aos amigos Fernanda Chinelli e Flávio Gordon por tantas vezes me abrirem em sua casa para facilitar minhas idas e vindas à PUC.

Devo agradecer a duas pessoas que ao meu lado foram protagonistas desta deliciosa saga, e que sem as quais, tenho absoluta certeza, eu não teria terminado: Bianca Hacon e Christiane Fernandes, minhas amigas de livros, fosse a hora que fosse, com chuva ou sol, na alegria e na tristeza. Muito obrigada, meninas!

Por fim, agradeço a Deus, por ter colocado todas estas pessoas na minha vida, tão queridas e necessárias.

## Resumo

Mariano, Maria de Oliveira Cruz; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim. **Usinas hidrelétricas reversíveis: considerações sobre rebaixamento rápido na estabilidade de taludes.** Rio de Janeiro, 2017. 97p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A preocupação com a preservação ambiental e a sustentabilidade, cada vez mais presente em todos os aspectos da vida do mundo atual, conduz, mais e mais, à busca por fontes de energia limpa, renovável e minimamente agressivas ao meio ambiente. Dentro desse quadro, as usinas hidrelétricas reversíveis – UHRs - retornam mais uma vez como alternativa para matrizes de energia ao produzir energia incomparavelmente mais limpa e racional do que fontes tais como termoelétricas, muito utilizadas na regulação dos picos de consumo de energia. Entretanto, por sua operação peculiar, com ciclos curtos e frequentes de enchimento e rebaixamento do nível de água de seus lagos, o projeto para reservatórios das UHRs não está perfeitamente contemplado nos procedimentos normativos brasileiros usuais para o projeto de usinas hidrelétricas, carecendo de orientações adequadas para o tratamento das margens desses lagos, cuja instabilidade pode levar a problemas econômicos e ambientais bastante inconvenientes. Atento a este problema, este trabalho apresenta um resumo das principais metodologias de análise de estabilidade de taludes sujeitos a rebaixamento rápido e identifica as potencialidades e limitações dos métodos de equilíbrio limite e numéricos usualmente utilizados, especialmente para o caso das UHRs. Foram apresentadas soluções de tratamento de taludes das margens de reservatórios para usinas reversíveis. O caso das rupturas às margens do reservatório da usina hidrelétrica de Santa Branca é apresentado para ilustrar a gravidade do problema e contribuiu para identificar as limitações para que os referidos métodos sejam efetivamente aplicados. A conclusão do trabalho é que estudos de viabilidade e de projeto de usinas hidrelétricas devem ser aprimorados para incluir as metodologias de estudo de estabilidade na condição de rebaixamento rápido mais atuais, especialmente para taludes marginais, cuja estabilidade condiciona a operação das UHRs, antevendo a possível introdução desta solução na matriz energética brasileira. Por fim, o presente trabalho apresenta recomendações para o aprimoramento dos estudos de viabilidade para a implantação de usinas hidrelétricas reversíveis, considerando o conteúdo dos manuais brasileiros.

## **Palavras-chave**

Estabilidade de taludes; rebaixamento rápido; usinas hidrelétricas reversíveis.



## Abstract

Mariano, Maria de Oliveira Cruz; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim (Advisor). **Pumped storage power plants: considerations on slope stability under rapid drawdown**. Rio de Janeiro, 2017. 97p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Concern about environmental preservation and sustainability, which is increasingly present in all aspects of life currently, leads to the growth of a search for sources of energy that are clean, renewable and minimally aggressive for the environment. Within this framework, pumped storage power plants – PSPP - return once again as an alternative to energy matrices by producing incomparably cleaner and more rational energy than sources such as thermoelectric, widely used in the regulation of energy consumption peaks. However, due to its peculiar operation, with short and frequent cycles of filling and lowering of the water level of its lakes, the designs of PSPP reservoirs are not entirely covered by the usual Brazilian guidelines for design of hydroelectric plants, lacking appropriate guidance for the treatment of the margins from such reservoirs, whose destabilization can lead to very inconvenient economic and environmental issues. Regardful of this problem, this study presents a summary of the main methods of analysis of stability of slopes subjected to rapid drawdown and identifies the potentialities and limitations of the limit equilibrium methods and numerical methods usually used, especially for the case of PSPP. Slope stabilizations solutions for reservoir banks subjected to rapid drawdowns were presented. The case of the ruptures along the Santa Branca hydroelectric power plant reservoir is presented to illustrate the severity of the problem and has helped to identify the limitations for the effective application of these methods. The conclusion of this study is that feasibility studies and hydropower plant design should be improved in order to include more up-to-date methods of analysis of slope stability under rapid drawdown condition, especially for marginal slopes, which stability conditions the operation of PSPPs, foreseeing the possible introduction of this solution in the Brazilian energy matrix. Finally, this work presents recommendations for the improvement of feasibility studies for the implementation of PSPPs, considering the content of Brazilian guidelines.

## Keywords

Slope stability; rapid drawdown; pumped storage power plants

## Sumário

<b>1. Introdução .....</b>	<b>14</b>
1.1. <i>Estudos geológico-geotécnicos na viabilidade de Usinas Hidrelétricas .....</i>	19
1.2. <i>Objetivos .....</i>	24
1.3. <i>Estrutura da Dissertação.....</i>	24
<b>2. Usinas Hidrelétricas Reversíveis .....</b>	<b>26</b>
2.1. <i>Conceituação e aspectos gerais .....</i>	26
2.2. <i>UHR no Brasil e no exterior .....</i>	34
2.3. <i>Condicionantes Geológicos e Geotécnicos .....</i>	38
2.3.1. <i>Distância em planta entre os dois reservatórios .....</i>	38
2.3.2. <i>Escavações subterrâneas .....</i>	39
2.3.3. <i>Estabilidade de taludes sob rebaixamento rápido .....</i>	42
2.3.4. <i>Estabilidade de taludes durante ciclos de esvaziamento e reenchimento .....</i>	45
<b>3. Estabilidade de taludes sob rebaixamento rápido .....</b>	<b>47</b>
3.1. <i>Métodos de Equilíbrio – Limite.....</i>	52
3.1.1. <i>Ábacos de Morgenstern.....</i>	58
3.1.2. <i>USACE (1970).....</i>	59
3.1.3. <i>Duncan et al (1990) .....</i>	61
3.2. <i>Métodos Numéricos .....</i>	65
3.2.1. <i>Determinação do Fator de Segurança por MEF .....</i>	66
3.2.2. <i>Caracterização dos solos .....</i>	67
3.3. <i>Considerações Finais .....</i>	70
<b>4. Caso prático: encostas do reservatório da UHE Santa Branca .....</b>	<b>75</b>
4.1. <i>Descrição do problema .....</i>	76
4.1.1. <i>Determinação da taxa de rebaixamento segura .....</i>	81
4.2. <i>Análise de estabilidade sob rebaixamento rápido .....</i>	83
<b>5. Conclusões e Recomendações .....</b>	<b>85</b>
5.1. <i>Recomendações para Estudos de Viabilidade Técnica e Econômica de Usinas Hidrelétricas Reversíveis.....</i>	88
5.2. <i>Recomendações de estudos futuros.....</i>	89
<b>6. Referências bibliográficas .....</b>	<b>91</b>

## Lista de figuras

FIGURA 1: EVOLUÇÃO DA MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA DE 2015 A 2024 (EPE, 2016).....	14
FIGURA 2: ESQUEMA DE UMA USINA HIDRELÉTRICA REVERSÍVEL (MODIFICADO DE FERC, 2016) .....	26
FIGURA 3: UHR DE CICLO ABERTO GOLDSTHAL – ALEMANHA (ESQUERDA) (VOITH, 2014);UHR DE CICLO FECHADO TURLOUGH HILL – IRLANDA (DIREITA) (ESB, 2016) .....	27
FIGURA 4: USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS EM ESTUDO NOS ESTADOS UNIDOS (FERC, 2016) .....	28
FIGURA 5: USINA HIDRELÉTRICA REVERSÍVEL DE OKINAWA A) VISTA AÉREA; B) PLANTA; C) SEÇÃO LONGITUDINAL DO CIRCUITO HIDRÁULICO (SEM ESCALA) (FUJIHARA ET AL, 1998) .....	29
FIGURA 6: PROJETO DA USINA HIDRELÉTRICA REVERSÍVEL DE ESPEJO DE TERAPACA, CHILE (RUNYON, 2016).....	30
FIGURA 7: PERFIL DE CARGA EM MATRIZ COM GRANDE PENETRAÇÃO DE RENOVÁVEIS INTERMITENTES: ACIMA SEM UHR E ABAIXO COM UHR (MODIFICADO DE VOITH, 2014) .....	32
FIGURA 8: AHE SALTO PILÃO - CIRCUITO HIDRÁULICO – PLANTA (PIMENTA E MAURO, 2005) .....	42
FIGURA 9: AHE SALTO PILÃO - CIRCUITO HIDRÁULICO – SEÇÃO (PIMENTA E MAURO, 2005) .....	42
FIGURA 10: EVOLUÇÃO DAS POROPRESSÕES NO MACIÇO DE UM TALUDE GENÉRICO DURANTE UMA SITUAÇÃO DE ESVAZIAMENTO RÁPIDO (ALMEIDA, 2013).....	48
FIGURA 11: EVOLUÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA DURANTE REBAIXAMENTO RÁPIDO - BARRAGEM HOMOGENEA DE ALCOBERTAS (ALMEIDA, 2013) .....	50
FIGURA 12: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS FORÇAS ATUANTES NUM BLOCO DE SOLO HIPOTÉTICO, ADAPTADO DE FIORI E CARMIGNANI (2011) .....	53
FIGURA 13: FORÇAS ATUANDO NA FATIA (MODIFICADO DE GERSCOVICH, 2012 E MODIFICADO DE CHENG E LAU, 2008).....	54
FIGURA 14: FATORES DE SEGURANÇA PARA TALUDES DE BARRAGENS PARA $c'\gamma H = 0,0125$ .....	59
FIGURA 15: ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE APÓS ESVAZIAMENTO RÁPIDO (MODIFICADO DE USACE, 2003).....	60
FIGURA 16: ENVOLTÓRIA R ELABORADA A PARTIR DE ENSAIOS TRIAXIAIS (USACE, 2003) .....	61
FIGURA 17: ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE APÓS ESVAZIAMENTO RÁPIDO (MODIFICADO DE DUNCAN ET AL, 1990).....	62

FIGURA 18: EXEMPLOS DE MALHA DE ELEMENTOS FINITOS NA SEÇÃO DE BARRAGEM NÃO HOMOGÊNEA (PLAXIS, 2016) E EM UM TALUDE HOMOGÊNEO (MODIFICADO DE CHENG E LAU, 2008) .....	66
FIGURA 19: SEÇÃO DE GALERIA DE DRENAGEM ADJACENTE A PAREDE IMPERMEÁVEL DE TALUDES (CIGB, 1999) .....	71
FIGURA 20: USINAS HIDRELÉTRICA REVERSÍVEL DE LUDINGTON (NEWKIRK ELECTRIC, 2017) .....	72
FIGURA 21: RESERVATÓRIO SUPERIOR UHR LUDINGTON: ACIMA, SEÇÃO TÍPICA E ABAIXO DETALHES DA DRENAGEM ADJACENTE AO REVESTIMENTO EM CONCRETO ASFÁLTICO (CEDERGREN, 1977) .....	73
FIGURA 22: RESERVATÓRIO SUPERIOR DA UHR NANTE DE DRANCE, SUÍÇA (MELLO, 2017) .....	73
FIGURA 23: EXECUÇÃO DE IMPERMEABILIZAÇÃO COM MANTA ASFÁLTICA NO RESERVATÓRIO INTERMEDIÁRIO DO ESQUEMA KÖLNBREIN NA ÁUSRIA, EM 1997 (MELLO, 2017) .....	74
FIGURA 24: DESLIZAMENTO NAS MARGENS DO RESERVATÓRIO DE SANTA BRANCA – 1º ESTÁGIO (GEOTÉCNICA, 1983) .....	79
FIGURA 25: DESLIZAMENTO NAS MARGENS DO RESERVATÓRIO DE SANTA BRANCA - 2º ESTÁGIO (GEOTÉCNICA, 1983) .....	79
FIGURA 26: DESLIZAMENTO NAS MARGENS DO RESERVATÓRIO DE SANTA BRANCA – 3º ESTÁGIO (GEOTÉCNICA, 1983) .....	80
FIGURA 27: DESLIZAMENTO NAS MARGENS DO RESERVATÓRIO DE SANTA BRANCA – 4º ESTÁGIO (GEOTÉCNICA, 1983) .....	80
FIGURA 28: TALUDES ROMPIDOS NO RESERVATÓRIO DE SANTA BRANCA (GEOPROJETOS, 2015) .....	81

## Lista de tabelas

TABELA 1: DIRETRIZES GERAIS PARA ANÁLISES DE ESTABILIDADE DE TALUDES (MODIFICADO DE ELETROBRÁS/CBDB, 2003) .....	23
TABELA 2 - USINAS HIDRELÉTRICAS REVERSÍVEIS NO BRASIL (CANALES ET AL, 2015) .....	36
TABELA 3: PREMISSAS DOS INVENTÁRIOS DE UHR REALIZADOS NO BRASIL .....	37
TABELA 4: HIPÓTESES DAS FORÇAS ENTRE FATIAS - MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE .....	55
TABELA 5: PARÂMETROS PARA O MODELO MECÂNICO USADOS PARA A ANÁLISE DA BARRAGEM DE GLEN SHIRA (MODIFICADO DE ALONSO, ET AL 2008) .....	68
TABELA 6: PARÂMETROS HIDRÁULICOS USADOS NA ANÁLISE DA BARRAGEM DE GLEN SHIRA (MODIFICADO DE ALONSO, ET AL 2008).....	69
TABELA 7. EVOLUÇÃO DOS ESCORREGAMENTOS (RELATÓRIO PR 12.0051/83, LIGHT) .....	77
TABELA 8: RESUMO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADE (GEOTÉCNICA, 1983) .....	83

# 1. Introdução

Assim como muitos países na Europa e na Ásia, também no Brasil, a geração de energia elétrica a partir das fontes renováveis eólica e solar fotovoltaica veio para ficar. Nos próximos 10 anos é previsto um aumento significativo de sua participação na matriz, saltando de cerca de 9% para 15% (MME/EPE, 2015) (Figura 1).

Por sua vez, a participação das usinas hidrelétricas<sup>1</sup>, atualmente a principal fonte renovável do país, se reduzirá em quase 11%, e as novas ofertas de energia proveniente desta fonte se darão majoritariamente com usinas à fio d'água, sem capacidade de regularização, refletindo-se na perda da capacidade de armazenamento de energia (Figura 1).

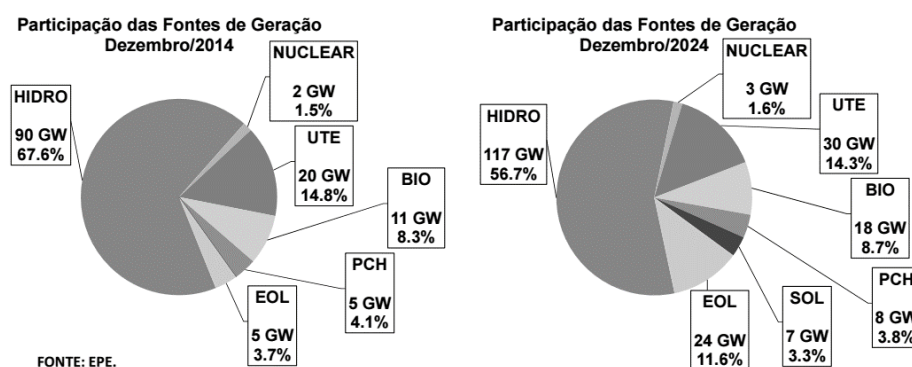


Figura 1: Evolução da matriz de energia elétrica brasileira de 2015 a 2024 (EPE, 2016)

Em virtude da flutuação da geração, a qual ocorre independente da demanda, sendo esta uma característica destas novas fontes renováveis – eólica, solar e hidrelétricas a fio d'água - este cenário é um grande desafio para operação dos sistemas elétricos,

<sup>1</sup> Incluindo as Pequenas Centrais Hidrelétricas, definidas conforme REN ANEEL n° 673, 04/08/2015

sobretudo no caso do Sistema Interligado Nacional do Brasil (SIN) que é complexo e centralizado, com intenso intercâmbio de energia entre as diversas regiões do país. É neste contexto que ressurge o interesse<sup>2</sup> pelas usinas hidrelétricas reversíveis – UHRs, como uma estratégia para lidar com os desequilíbrios de oferta e demanda de energia esperados para o SIN na próxima década: as UHRs representam a possibilidade de recuperação de parte da capacidade de armazenamento de energia, bem como a manutenção da matriz predominantemente renovável, a partir de fonte hídrica ao invés de fontes térmica ou químicas (baterias).

As usinas hidrelétricas reversíveis têm seu funcionamento baseado em ciclos de turbinagem e bombeamento de água, e operam tanto gerando quanto consumindo energia elétrica. O arranjo típico destas usinas conta com dois reservatórios, em cotas diferentes. A geração de energia é ativada quando há picos de demanda, e nesta ocasião a água flui do reservatório superior para o inferior, sendo turbinada para a geração de energia. Quando a demanda por energia elétrica na rede é menor, a água é bombeada para o reservatório superior, preparando o próximo ciclo de geração de energia, e neste momento a UHR torna-se consumidora de energia – e não, geradora. Portanto, o regime de funcionamento destas usinas se dá por ciclos, normalmente diários ou semanais.

As usinas reversíveis são amplamente empregadas em vários países, sobretudo na Europa, onde representam 99% do armazenamento da energia elétrica conectada à rede (CAVAZZINI e IGNACIO, 2014), sendo insuperável em termos de potência instalada.

Contudo, existem UHRs dedicadas a outros propósitos, como por exemplo, ao aumento da capacidade de potência, ou propiciando benefícios adicionais capazes de melhorar a confiabilidade das redes elétricas. Para cada propósito, a operação será definida pelos objetivos da usina reversível bem como pelas restrições operativas de natureza técnica, econômica, financeira e socioambiental, as quais devem ser

---

<sup>2</sup> Em novembro de 2014 a Eletronorte promoveu um seminário técnico voltado para discutir as possibilidades das usinas hidrelétricas reversíveis no Setor Elétrico Brasileiro - SEB. O assunto foi retomado no Simpósio Usinas Hidrelétricas Reversíveis - Estado da Arte e Perspectivas no Setor Elétrico Brasileiro, em abril de 2016. Em 2017 o tema fará parte de uma sessão no Seminário Nacional de Grandes Barragens, em maio em Belo Horizonte.

avaliadas durante as fases de estudo e projeto da usina, sobretudo nos Estudos de Viabilidade Técnica e Econômica, onde as regras operativas são, de antemão, definidas.

Ressalte-se que, embora as UHRs tenham sido objeto de estudo no Brasil nas décadas de 1970 e 1980, o país não conta com experiência em estudos, projetos e construção deste tipo de usinas. Desta forma, diversas são as questões que necessitam de aprofundamento para o efetivo desenvolvimento desta opção no cenário brasileiro tais como as possibilidades locacionais, a viabilidade econômica, as questões socioambientais, legais e regulatórias. Em outras palavras, não existem atualmente no Brasil metodologias consolidadas para estudos e projetos de usinas hidrelétricas reversíveis.

Por outro lado, o país possui uma larga experiência em usinas hidrelétricas convencionais, dispondo de instrumentos metodológicos robustos que pautam seu projeto e construção. É perfeitamente aceitável, portanto, que estes instrumentos sejam a base para o desenvolvimento de metodologias de estudos e projetos específicos de UHRs, ainda que estas apresentem critérios de dimensionamento energético muito diferentes dos aproveitamentos hidrelétricos clássicos, conforme destacado por MELLO (2017).

Neste contexto, a questão da estabilidade das margens dos lagos, que não é objeto de atenção especial nas usinas hidrelétricas convencionais, mas que é questão fundamental para as usinas reversíveis, devido ao seu regime de funcionamento em ciclos, com enchimentos e rebaixamentos rápidos sucessivos, passa a ter peso diferenciado. Torna-se necessário, portanto, acrescentar esta consideração nos estudos de viabilidade e nos projetos, quando se estiver tratando deste tipo de hidrelétricas.

No Brasil, especificamente no âmbito dos EVTE (Estudos de Viabilidade Técnica e Econômica), as principais referências são os documentos “Instruções para Estudos de Viabilidade de Usinas Hidrelétricas” (ELETROBRÁS, 1997), e “Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas” (ELETROBRÁS e CBDB, 2003).



O primeiro documento apresenta o escopo dos estudos e atividades necessários para a comprovação da viabilidade técnica, econômica e ambiental de aproveitamentos hidrelétricos. O segundo documento tem por objetivo orientar a elaboração para projetos com condições adequadas de qualidade técnica, segurança e custo, definindo critérios para os projetos de viabilidade, básico e executivo de usinas hidrelétricas. Ambos procuram padronizar a elaboração de estudos e projetos, permitindo a comparação de soluções para um aproveitamento ótimo.

A concepção global do aproveitamento hidrelétrico é definida na etapa dos estudos de viabilidade. Esta concepção é definida dentre as alternativas oriundas do inventário do potencial hidrelétrico, etapa do desenvolvimento do empreendimento que antecede o EVTE. Os objetivos da EVTE definem-se, portanto, como:

- ✓ Concluir sobre a exequibilidade ou não do aproveitamento através de avaliações, análises e definições fundamentadas nos custos e nos benefícios múltiplos que podem ser obtidos, de acordo com as diretrizes estabelecidas nas Instruções;
- ✓ Subsidiar a tomada de decisões quanto à época de início de construção do aproveitamento hidrelétrico;
- ✓ Subsidiar a elaboração dos documentos necessários para licenciamento ambiental;
- ✓ Subsidiar as ações junto a órgãos públicos e privados, visando otimizar a utilização dos recursos naturais existentes na área do futuro aproveitamento, e promover sua inserção na região.

Destacadamente, o primeiro objetivo listado esbarra num dos grandes desafios para a inserção das UHR na matriz elétrica brasileira, que vem a ser a quantificação dos benefícios obtidos com estas usinas, considerando o modelo regulatório brasileiro

vigente, baseado apenas em garantia física<sup>3</sup>. Sobre este aspecto, o projeto de pesquisa e desenvolvimento da CESP, PD-0061-0026/2011 aponta três dificuldades (ZUCULIN *et al*, 2014):

- (i) A falta de um mercado de potência ou de serviços ancilares<sup>4</sup>, que poderia sinalizar uma referência;
- (ii) A pequena variação dos preços de liquidação de diferenças (PLD) entre as cargas pesadas, média ou leve;
- (iii) A inexistência de empresas verticalizadas, onde haveria compensação financeira para investimentos em UHR, diante dos benefícios que estas proporcionam para a geração, transmissão e na distribuição.

Do ponto de vista comercial e regulatório, é essencial definir as bases para a correta remuneração dos benefícios fornecidos por usinas reversíveis, uma condição ainda incipiente e sujeita a discussão no meio técnico. Somente após essa definição, as diretrizes do documento ELETROBRÁS (1997) deverão ser revistas ou adaptadas para a inclusão das particularidades das usinas reversíveis.

Os custos da construção das hidrelétricas são obtidos com base no dimensionamento dos equipamentos eletromecânicos, obras civis e programas socioambientais, estimados a partir das metodologias previstas nas Instruções de Viabilidade para os diversos estudos que compõe o escopo do EVTE.

---

<sup>3</sup> A Lei nº 10.848/04, regulamentada pelo art. 2º do Decreto nº 5.163/04, estabelece as bases do Novo Modelo do Setor Elétrico Brasileiro, calcado no conceito de “Garantia Física” que é a quantidade máxima de energia elétrica associada a um empreendimento, incluindo importação, que poderá ser utilizada para comprovação de atendimento de carga ou comercialização por meio de contratos.

<sup>4</sup> Serviços auxiliares aos serviços principais de geração, transmissão, distribuição e comercialização. Segundo a Resolução Normativa da ANEEL nº 697/2015, enquadram-se nestes serviços, o autorestabelecimento, o controle de frequência e o suporte de reativos.

Os estudos geológico-geotécnicos se inserem no escopo de estudos desenvolvidos na fase da viabilidade e buscam identificar as características das fundações, a adequabilidade das fundações às estruturas, a disponibilidade de materiais naturais de construção e a localização e volumes das áreas de empréstimos de solo, areia e rochas.

Ao final, os resultados e conclusões dos estudos geológico-geotécnicos devem subsidiar, juntamente com o resultado dos demais estudos do EVTE (topobatimétricos, hidrometeorológicos, socioambientais e energéticos), a escolha do eixo e arranjo ótimo do aproveitamento, bem como o detalhamento da alternativa selecionada, permitindo o dimensionamento das obras civis, as quais incluem barragens, estruturas de concreto (tomada d'água, casa de força, vertedouro e, em vários projetos, adução, estruturas de transposição de embarcações e de peixes), acessos e obras provisórias, como as obras de desvio (ensecadeiras, canais, túneis) e canteiros.

A seguir é apresentado um breve resumo das metodologias e orientações das Instruções da Eletrobrás que compõe os estudos geológico-geotécnicos requeridos na etapa da Viabilidade de uma usina hidrelétrica.

### **1.1. Estudos geológico-geotécnicos na viabilidade de Usinas Hidrelétricas**

Os estudos geológico-geotécnicos são desenvolvidos em várias etapas durante a viabilidade, partindo-se da coleta e análise de dados secundários, os quais irão subsidiar a programação dos trabalhos e levantamentos de campo. São previstos levantamentos de campo na área do sítio para escolha de eixo e arranjo do aproveitamento, e para identificação e quantificação dos volumes das áreas de materiais naturais de construção. Os levantamentos de campo incluem o mapeamento geológico-geotécnico do sítio do empreendimento e a realização de investigações geológico-geotécnicas em cada eixo a ser estudado.

O mapeamento geológico-geotécnico tem por objetivo a elaboração do Mapa Geológico Local do Aproveitamento e o Mapa Geológico-geotécnico do Local do Aproveitamento. Além desses, é prevista a elaboração do Mapa Geológico Regional, que se apoia apenas em dados secundários.

De acordo com a estruturação dos trabalhos proposta nas Instruções da Eletrobrás, este último mapa se insere no âmbito dos estudos socioambientais da viabilidade, fazendo parte do diagnóstico socioambiental, o qual caracteriza o meio ambiente antes da implantação do empreendimento, com o propósito de permitir uma comparação da situação pregressa com o panorama estabelecido após a implantação da obra, e assim avaliar a extensão dos impactos oriundos do empreendimento.

O Mapa Geológico Regional é uma carta em escala de 1:100.000 a 1:250.000 da região de interesse dos estudos, incluindo todo o perímetro do reservatório, gerada com base no material bibliográfico coletado preliminarmente, e na interpretação de imagens de satélites, de radar e de fotografias aéreas, com o propósito de caracterizar geologicamente as áreas de influência do reservatório, fornecendo subsídios aos estudos de sismicidade, estanqueidade, suscetibilidade a erosão e assoreamento do reservatório.

Os outros dois mapas se inserem no âmbito dos estudos de engenharia geológico-geotécnicos, e objetivam subsidiar as decisões relativas à escolha do eixo e do arranjo, restringindo-se à área do sítio delimitada em cerca de 2 a 10 km de raio em torno do local do aproveitamento identificado no Inventário. Por isso, são cartas com escalas de detalhe, sendo que o Mapa Geológico Local, em escala entre 1:5000 e 1:25000, elaborado com base em fotografias aéreas e no mapeamento de afloramentos rochosos e classificação dos solos, se constitui na base para a elaboração do Mapa Geológico-geotécnico Local.

No Mapa Geológico-geotécnico Local são conjugadas as informações do Mapa Geológico Local e das investigações geotécnicas realizadas na área do sítio e ensaios geotécnicos de laboratório. Com escala entre 1:500 e 1:5000, nele deverão ser representadas as unidades e feições geológico-geotécnicas de importância ao projeto

das fundações das estruturas de concreto e de terra e/ou enrocamento, bem como a delimitação das áreas potenciais para obtenção dos materiais naturais de construção.

As investigações geotécnicas que suportam a elaboração do Mapa Geológico-geotécnico Local, são realizadas apenas na área do sítio e de acordo com a orientação das Instruções de Viabilidade, e incluem:

- ✓ Sondagens manuais e mecânicas (percussão com ensaio SPT, mistas e rotativas, poços de inspeção) para caracterização das ombreiras e fundação;
- ✓ Investigações geofísicas para subsidiar a identificação de topo rochoso e nível d'água ao longo dos eixos em análise;
- ✓ Coleta de amostras indeformadas para ensaios de laboratório visando a caracterização do material de fundação;
- ✓ Sondagens manuais (trados, sondina e varejão) para caracterização do material das áreas de empréstimo de solo e areia;
- ✓ Coleta de amostras deformadas para ensaios de laboratório visando a caracterização dos solos para materiais naturais de construção;
- ✓ Sondagens rotativas e coleta de amostras visando a realização de ensaios de laboratório para a caracterização de rochas das pedreiras;
- ✓ Ensaios de permeabilidade e umidade natural *in situ*.

Do Mapa Geológico-geotécnico Local são extraídas as seções geológico-geotécnicas de interesse, longitudinais e transversais aos eixos em estudo, que subsidiarão a concepção da barragem e estruturas de concreto (tomada d'água, casa de força, vertedouro e, em vários projetos, adução, estruturas de transposição de embarcações e de peixes). Em seguida, são pré-dimensionadas e orçadas as obras civis de cada eixo, permitindo o confronto técnico e econômico de onde se definirá um e somente um eixo para detalhamento. Neste caso, são previstas investigações complementares para detalhamento dos diferentes arranjos propostos para o eixo selecionado.

Na fase final dos estudos, é concluída a concepção do aproveitamento, que do ponto de vista de engenharia civil trata-se da determinação do tipo e da disposição da barragem e das estruturas, acessos e obras provisórias, e define-se o dimensionamento e custo das obras civis que comporão o custo final do aproveitamento.

Tanto o pré-dimensionamento quanto o dimensionamento das obras civis são, prioritariamente, realizados com base nas orientações e premissas apresentados nos Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás/CBDB.

Neste documento são elencados os critérios a serem adotados no dimensionamento hidráulico de vertedores, condutos forçados, canais e túneis de desvio e das drenagens superficiais, o dimensionamento estrutural de barragens e estruturas de concreto e o projeto geotécnico das obras de terra e escavações subterrâneas e a céu aberto. Adicionalmente são apresentados os critérios para o dimensionamento dos tratamentos das paredes escavadas e de fundações, bem como instrumentação das estruturas.

Outros critérios podem ser adotados em complementação ao conteúdo deste documento, porém é imprescindível a adoção de critérios básicos comuns a todas as alternativas de eixo e arranjo, possibilitando que os estudos sejam realizados de maneira uniforme e homogênea, para uma escolha assertiva e para que os dimensionamentos sejam pautados pela boa qualidade técnica.

O projeto geotécnico das barragens de terra e terra/enrocamento agrega as análises de percolação para dimensionamento dos filtros e drenos e as verificações de estabilidade de taludes do maciço compactado. Para as últimas, os critérios propostos pela Eletrobrás/CBDB consideram as seguintes condições de carregamento e respectivos fatores de segurança.

**Tabela 1: Diretrizes gerais para análises de estabilidade de taludes (modificado de ELETROBRÁS/CBDB, 2003)**

CASO	FS	PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	TALUDES
Final de construção	1,3 (a)	UU ou CD (b)	Montante e Jusante Mínimo para solos dilatantes
Rebaixamento rápido	1,1 a 1,3 (c)	CU ou CD	Máximo para solos contraem no cisalhamento
Percolação estável	1,5	CU ou CD	Jusante
Carregamento sísmica	1,0	CU ou CD	Montante e Jusante

a) Para barragens acima de 15m de altura assentadas em fundações fracas, adotar FS=1,4

b) Em zonas que não são antecipadas pressões neutras, usar resistência de ensaio S

c) Nos casos em que rebaixamento ocorre com frequência, considerar o FS = 1,3

As condições de final de construção, percolação estável/operação e sob carregamento sísmico são aplicáveis a todas as barragens de terra e terra/enrocamento. A condição de rebaixamento rápido, por sua vez, aplica-se somente ao projeto de hidrelétricas que contam com reservatórios de regularização, demandando o deplecionamento de seus níveis d'água quando em operação.

O manual da Eletróbrás/CBDB indica para a verificação de estabilidade de taludes em qualquer condição o emprego de métodos de equilíbrio limite.

A verificação da estabilidade na situação de rebaixamento rápido envolve uma complexa combinação de carregamento nos taludes, em que se associa redução das tensões principais com aumento da diferença entre elas, isto é, aumento da tensão desviatória, rotação da direção das tensões principais e o estabelecimento de condições transientes de fluxo gravitacional de água.

A literatura técnica está repleta de casos de rupturas de taludes de barragens que ocorreram sob estas condições e já na década de 60, MORGERSTERN (1963), afirmou que a estabilidade de um talude que experimenta rebaixamento rápido é crítica, dado um número suficiente de rupturas ocorridas nestas condições.

Uma vez que as UHR funcionam em regime de rebaixamentos rápidos e intermitentes de NA, afetando tanto as barragens quanto as margens dos reservatórios, entende-se que a retomada dos estudos e projetos no Brasil de usinas hidrelétricas que operam com deplecionamento, representadas agora pelas usinas reversíveis, deve ser acompanhada da avaliação e eventualmente revisão dos critérios propostos ora vigentes, à luz das técnicas e metodologias mais atuais de análises de estabilidade

na condição de rebaixamento rápido, desenvolvidas nas últimas duas décadas, a partir do aprimoramento de recursos computacionais.

A motivação para este trabalho emerge, portanto, do interesse de se pensar e definir metodologias de estudo e projeto adequadas às usinas hidrelétricas reversíveis. Particularmente, o interesse maior é contribuir para aprimorar o escopo dos estudos geológico-geotécnicos apresentados nas Instruções de Viabilidade da Eletrobrás e nos Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas, adequando-os às especificidades das usinas reversíveis e espera-se que ao longo deste trabalho isto seja alcançado.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho é apresentar e discutir as metodologias de análise de estabilidade de taludes na condição de rebaixamento rápido, como forma de subsidiar a definição de metodologias e critérios de projeto aplicáveis às usinas hidrelétricas reversíveis – UHR, a partir do aprimoramento das metodologias ora vigente para hidrelétricas convencionais.

Os objetivos secundários são a identificação de todas as particularidades geológica-geotécnicas de UHR, e a aplicação das metodologias de análise de estabilidade sob rebaixamento rápido apresentadas ao longo do trabalho.

## **1.3. Estrutura da Dissertação**

Este trabalho disserta sobre estabilidade de taludes sob rebaixamento rápido, que é um dos diversos aspectos de natureza geotécnica relacionado ao projeto de usinas hidrelétricas reversíveis. Os capítulos são assim organizados:

O capítulo 2 busca contextualizar o tema discutido no âmbito das usinas hidrelétricas reversíveis, apresentando inicialmente um breve panorama destas usinas e seu papel na geração de energia elétrica. A partir daí, são discutidos os aspectos de



projetos civis peculiares às usinas reversíveis, donde se introduz o tema central da tese, que é aprofundado nos capítulos subsequentes.

O capítulo 3 apresenta o embasamento teórico da dissertação. São apresentadas as metodologias empregadas no estudo da estabilidade de talude sob rebaixamento rápido e discutidas suas vantagens e limitações.

O capítulo 4 apresenta um caso prático de um estudo de estabilidade de margens de reservatório realizado no Brasil.

O capítulo 5 fecha a dissertação, apresentando as conclusões do trabalho e considerações finais. Neste capítulo são apresentadas ainda as recomendações de estudos futuros para avançar na discussão e consolidação do tema

## 2. Usinas Hidrelétricas Reversíveis

### 2.1. Conceituação e aspectos gerais

Usinas Hidrelétricas Reversíveis ou UHR são, numa definição simples proposta por ZUCULIN *et al* (2014), instalações que operam turbinando ou bombeando água, e conseqüentemente, gerando ou consumindo energia, podendo ser encaradas como uma hidrelétrica combinada a uma estação de bombeamento. Esquemáticamente, contam com dois reservatórios em cotas diferentes, isto é, um reservatório inferior interligado a um reservatório superior por meio de condutos forçados, como ilustrado na Figura 2 a seguir.

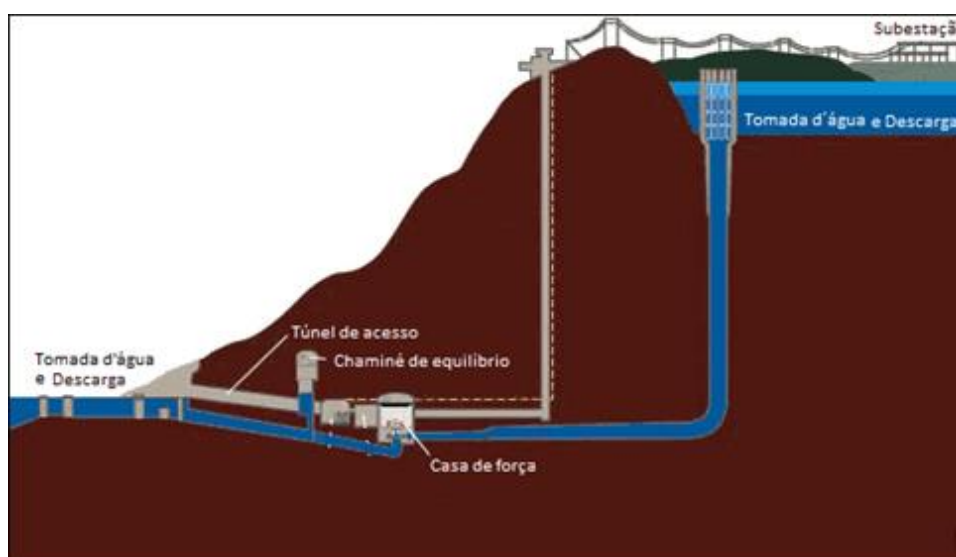


Figura 2: Esquema de uma Usina Hidrelétrica Reversível (modificado de FERC, 2016)

Quanto aos arranjos, as UHRs convencionais podem ser de dois tipos: ciclo fechado ou ciclo aberto. As usinas de ciclo aberto (*open-loop*) são aquelas que contam com ao menos um reservatório construído em corpo d'água natural enquanto as de ciclo

fechado (*closed-loop*) contam apenas com reservatórios sem afluência natural de água. Tipicamente, as usinas de ciclo aberto apresentam reservatório superior desconectado e inferior conectado a um corpo d'água natural de água doce, como um rio, um lago ou mesmo um reservatório de uma hidrelétrica existente. Exemplos destes dois tipos de arranjo são apresentados na Figura 3 a seguir.



**Figura 3: UHR de ciclo aberto Goldsthal – Alemanha (esquerda) (VOITH, 2014); UHR de ciclo fechado Turlough Hill – Irlanda (direita) (ESB, 2016)**

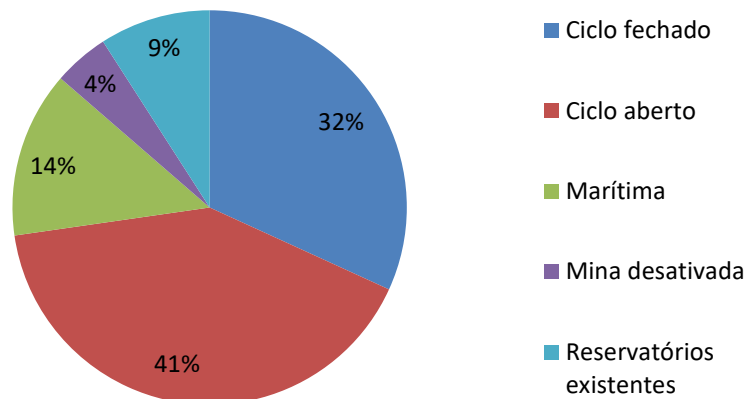
As usinas de ciclo aberto são maioria dentre as usinas existentes (DOE, 2016).

Contudo, um estudo realizado por YANG e JACKSON (2011), sinaliza que, nos Estados Unidos, a participação das usinas de ciclo fechado tende a aumentar, porque evitam impactos em rios existentes e seus ecossistemas aquáticos, que não raro se configuram em sérios entraves ao desenvolvimento do empreendimento.

Na ocasião do estudo, 29 de 36 permissões preliminares para UHR emitidas pela *Federal Energy Regulatory Commission, US – FERC* - se tratavam de usinas do tipo *closed loop*, sendo que cerca de um quarto do total da potência prevista nestes estudos se concentrava em projetos que faziam uso de cavernas subterrâneas como reservatórios inferiores. Parte das usinas propostas contava inclusive com o emprego de minas a céu aberto abandonadas como reservatórios superiores. Atualmente, 32% de um total de 22 usinas com permissão preliminar de estudo nos Estados Unidos são de ciclo fechado, como pode ser visto na Figura 4 (FERC, 2016).

As dificuldades locais envolvendo os critérios topográficos, geológico-geotécnicos, hidrológicos e conexão elétrica, bem como os entraves socioambientais motivam a busca por esquemas alternativos de usinas reversíveis, dentro os quais

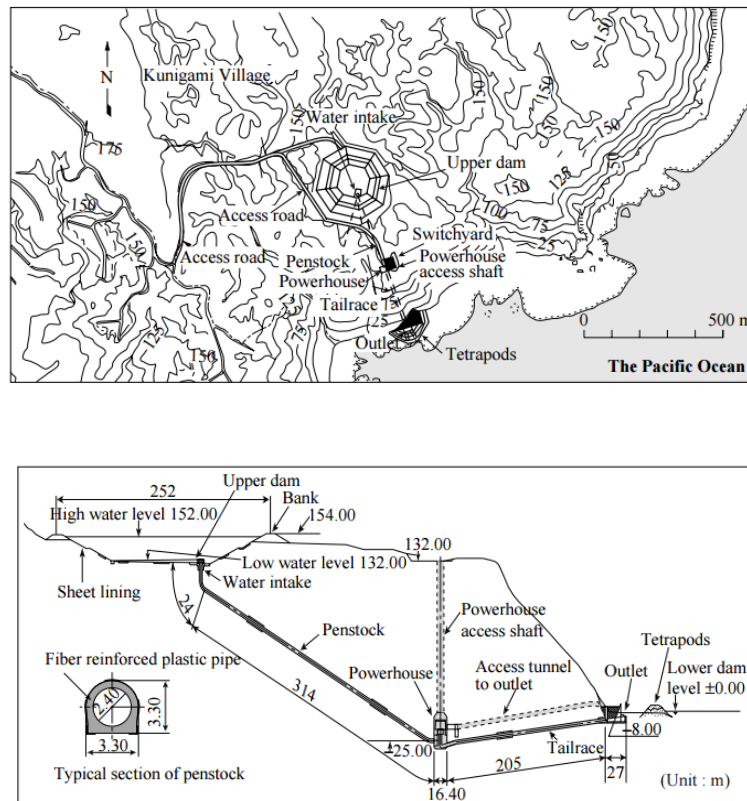
merecem destaque as usinas hidrelétricas marítimas e as usinas subterrâneas em minas abandonadas.



**Figura 4: Usinas Hidrelétricas Reversíveis em estudo nos Estados Unidos (FERC, 2016)**

No primeiro caso, o Japão foi pioneiro ao construir uma usina reversível marítima piloto, localizada em Okinawa, em operação desde 1999 (Figura 5). A usina conta com reservatório superior artificial e faz uso do mar aberto como reservatório inferior, contando apenas com um anel de enrocamento para proteção da casa de força contra ondas (FUJIHARA *et al*, 1998). Este arranjo apresenta como vantagens a redução dos custos com barragens e a grande disponibilidade de água, porém, por outro lado, exige equipamentos e demais estruturas especiais para condições de água salina.



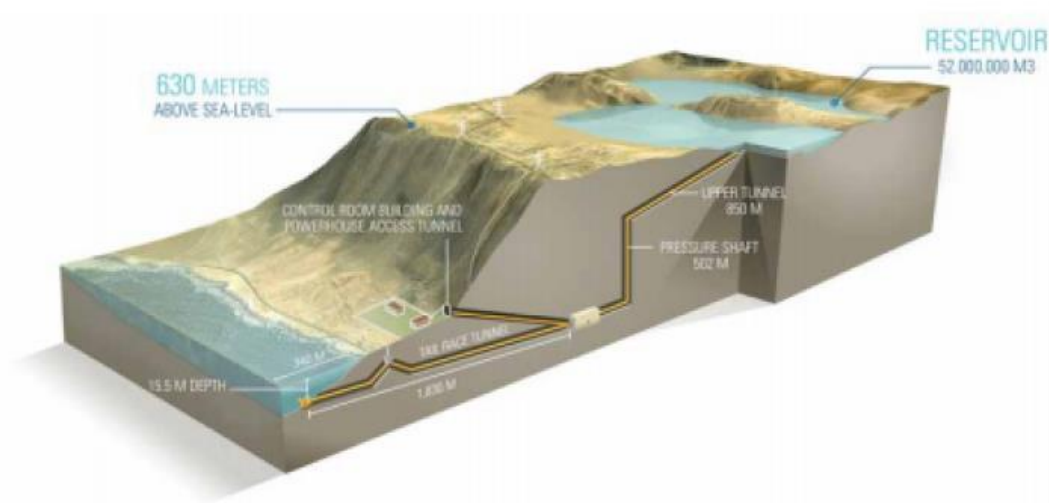


**Figura 5: Usina Hidrelétrica Reversível de Okinawa a) vista aérea; b) planta; c) seção longitudinal do circuito hidráulico (sem escala) (Fujihara *et al*, 1998)**

Outros estudos de viabilidade de usinas reversíveis marítimas vêm sendo desenvolvidos, como consequência dos resultados positivos observados nesta planta piloto japonesa (PÉREZ-DÍAZ *et al*, 2014).

No Chile, um projeto inovador de uma usina reversível marítima combinada a uma usina solar está em estudo. A usina híbrida de Espejo de Terapaca, de 900MW de potência total, localizada em Valhalla, aproveita concavidades naturais de uma formação geológica costeira como reservatórios superiores e o oceano como reservatório inferior, sendo desnecessária a construção de barragens (Figura 6). Esta vantagem reduzirá o custo de obras civis e associada a usina solar para operar na base, os empreendedores acreditam que esta deva ser a usina reversível de menor custo de implantação em todo mundo (RUNYON, 2016)

Na bibliografia consultada, o estudo desenvolvido para a usina de Espejo de Terapaca não se aprofundou sobre os aspectos geológico-geotécnicos da alternativa estudada. Contudo, possivelmente deverá ser considerada uma solução para impermeabilizar as cavidades naturais para que sejam aproveitadas como reservatório superior, visto que a inexistência de lagos neste relevo é um indício de que a geologia local não favorece a acumulação natural de água, podendo apresentar porosidade ou fraturamentos por onde a água se esvai.



**Figura 6: Projeto da Usina Hidrelétrica Reversível de Espejo de Terapaca, Chile (RUNYON, 2016)**

Quanto às usinas em minas abandonadas, a alternativa apresenta como grande vantagem uma possível maior aceitabilidade social, pois dão finalidade a um enorme passivo ambiental. Contudo, existem desafios técnicos consideráveis, que podem implicar em custos elevados que inviabilizem estes empreendimentos.

Um estudo no sentido de compreender quais são estes desafios técnicos e suas implicações na viabilidade técnica-econômica foi apresentado por MADLENER e SPECHT (2013), a partir de um projeto em mina de carvão abandonada na área de Ruhr, Alemanha. A mina conta com galerias subterrâneas para transporte de mate-

rial minerado, equipamentos e pessoal. Sem contar com cavidades de grandes dimensões para alocar o reservatório inferior, foram avaliadas as possibilidades de escavar a cavidade necessária ou fazer uso da rede de túneis, escavando novos ou ampliando os existentes.

O estudo concluiu que a geologia local é favorável à escavação de grandes cavidades, contudo esta opção seria muito custosa. Por isso, a alternativa de escavar uma nova rede de galerias de seção circular interconectadas servindo como reservatório, se mostrou a opção mais econômica. Assim, do ponto de vista técnico, concluiu-se pela possibilidade de construir a usina.

Do ponto de vista econômico, a conclusão foi a de que a viabilidade está relacionada à queda bruta possível. Para as quedas menores, o custo relativo do reservatório inferior é dominante, e reduz conforme a queda aumenta, e ressalta-se que comparativamente às UHRs convencionais, os custos de investimento são ligeiramente superiores. No entanto, fica evidente que o reservatório inferior neste caso, inevitavelmente apresenta peso maior nos custos de construção e manutenção da planta, comparativamente ao reservatório superior, em função de sua complexidade.

Um aspecto extremamente relevante das Usinas Hidrelétricas Reversíveis é que o balanço energético entre geração e bombeamento é sempre negativo, isto é, o consumo de energia é maior do que a geração. Para compensar este desequilíbrio, em geral, o bombeamento ocorre quando a energia é menos valiosa, nos horários de menor demanda, e a água armazenada no reservatório superior é liberada para o reservatório inferior durante as horas de pico de consumo, gerando energia quando esta é mais valiosa (KORITAROV *et al*, 2014).

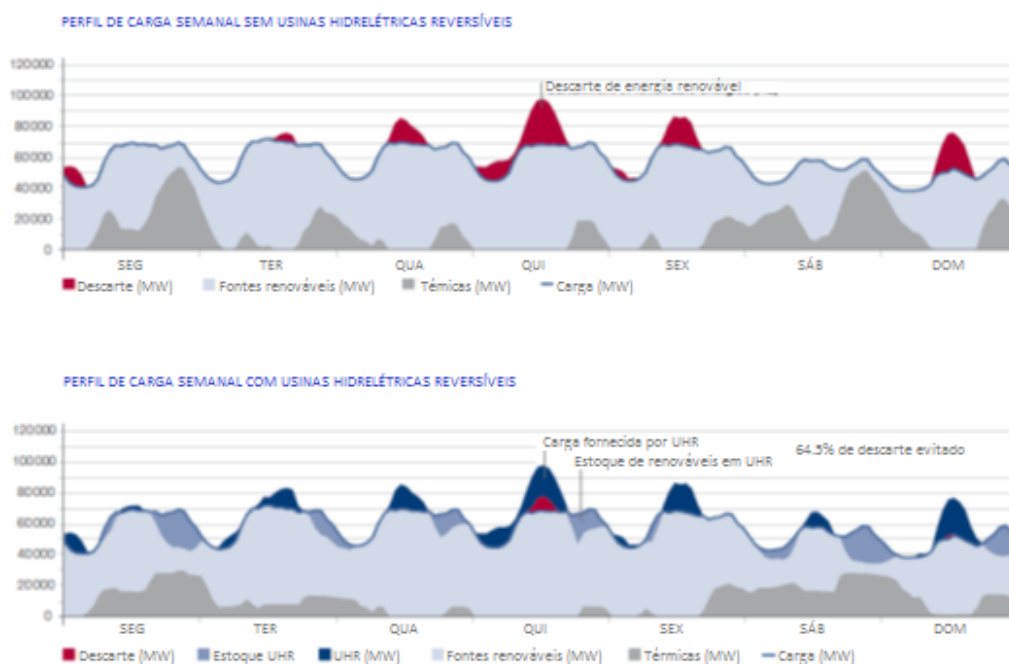
Um exemplo de como o armazenamento pode proporcionar o equilíbrio entre oferta e demanda de energia ao sistema elétrico foi apresentado pela VOITH (2014), numa simulação que avalia o impacto das UHRs numa matriz hipotética com 80% de usinas renováveis solares e eólicas, prevista para a Alemanha em 2050 (Figura 7).

No primeiro caso, sem UHRs, verifica-se que a geração excedente das renováveis não é aproveitada, sendo descartada. No segundo caso, parte da energia gerada por estas fontes é armazenada nos reservatórios das UHR, reduzindo-se com isso as



perdas. Adicionalmente, energia gerada pelas reversíveis é aproveitada para cobrir parte o déficit energético quando a geração das renováveis não atende toda a carga, reduzindo a necessidade de fornecimento através de plantas térmicas.

Os ciclos operativos podem ser diários, com enchimento e reenchimento dentro de 24 horas e semanais, que ocorre ao longo de sete dias. Menos comuns são os ciclos mensais ou de maior período, empregados em usinas reversíveis sazonais, que acompanham os ciclos hidrológicos anuais. Neste caso, água que seria vertida durante períodos de maiores vazões são armazenadas e posteriormente são usadas na geração em períodos de baixas vazões. Esta estratégia, contudo, não é adequada ao sistema elétrico brasileiro, predominantemente hidrotérmico, em que evitar os vertimentos é uma prerrogativa do planejamento da geração.



**Figura 7: Perfil de carga em matriz com grande penetração de renováveis intermitentes: acima sem UHR e abaixo com UHR (modificado de VOITH, 2014)**

Há que se destacar que o armazenamento não se presta apenas ao fornecimento de energia, mas proporciona diversos benefícios sistêmicos dentre os quais se destaca como dos mais relevantes atualmente o suporte à expansão das fontes renováveis intermitentes, bem como das hidrelétricas à fio d'água no caso brasileiro e a redução



da dependência do despacho termelétrico por razões elétricas (ZUCULIN *et al*, 2014).

Além disso, podem fornecer serviços ancilares, e proporcionam estabilização e redução de perdas na transmissão, contribuindo para a melhor operação e aumentando a segurança de suprimento do sistema interligado. Como consequência, aumentam a qualidade da energia entregue, especialmente relevante quando há grande penetração de fontes intermitentes. Soma-se a isto a rápida resposta à necessidade de carga, e o resultado é o aumento da confiabilidade e flexibilidade do sistema.

Embora guarde semelhanças com hidrelétricas convencionais, conceitualmente, as Usinas Hidrelétricas Reversíveis são muito diferentes, distinguindo-se principalmente pelo recurso utilizado na geração de energia elétrica: enquanto as hidrelétricas utilizam de um recurso natural, a energia potencial da água afluente ao reservatório, as unidades reversíveis utilizam de energia elétrica do restante do sistema, bombeando água para o reservatório superior, cuja energia potencial é utilizada posteriormente, devolvendo, à menos de perdas, a energia absorvida do sistema (SOUZA, 1980). A eficiência de todo o ciclo depende de uma variedade de fatores, e atualmente é superior a 80%, comparativamente muito favorável em relação a outras tecnologias de armazenamento, como térmica ou através de baterias (MANWARING *et al*, 2012).

Em função deste e de todos os aspectos favoráveis abordados neste tópico, as usinas hidrelétricas reversíveis são a tecnologia mais amplamente empregada para armazenamento de energia elétrica. Além disso, se apresentam como a solução mais madura técnica e comercialmente dentre as opções de armazenagem (YANG, 2016), 2016), tendo se desenvolvido ao longo de mais de um século, conforme será apresentado a seguir.

## 2.2. UHR no Brasil e no exterior

Embora o primeiro emprego da tecnologia de usinas reversíveis que se tem notícia tenha ocorrido em Zurique em 1882, a primeira UHR no mundo foi a usina de Schlaffhausen, também na Suíça (CHALISGAONKAR e MOHAN, 2015), que iniciou sua operação em 1909. Com capacidade de 1500 kW, operava com motobombas e turbogeradores em separado. A partir daí diversas pequenas UHR como essa, com operação em separado, foram construídas na Europa, nas primeiras décadas do século 20. Nos Estados Unidos, a primeira usina desse tipo foi Rockey River, construída em 1929, em Connecticut.

A tecnologia das turbobombas reversíveis surgiu nos anos 1930, quando foi construída em Baldeney, na Alemanha, em 1933, uma usina que fez uso de uma pequena unidade deste tipo<sup>5</sup>. Entretanto, apenas em 1956 uma máquina reversível de grande porte foi empregada, na usina de Hiwassee, EUA, com capacidade de 56MW e queda de 60 metros (DAVIDSON *et al*, 1980) Chalisgaonkar e Mohan (2015) ressaltam que, embora tenha resultado em perda de eficiência, esta tecnologia trouxe enormes economias e simplificações significativas ao sistema.

Assim, entre 1960 e início dos anos 1980, a tecnologia das turbobombas reversíveis experimentou seu maior desenvolvimento, resultando em equipamentos com melhor eficiência, redução dos tempos de partida e aumento cada vez maior das unidades (ROBERTS, 2009). Este período é entendido como a primeira fase do desenvolvimento das UHR, que ocorreu paralelamente à expansão das usinas nucleares, para compensar à inércia destas plantas com a flexibilidade das UHR (CAVAZZINI e IGNACIO, 2014).

Outro marco na história das usinas hidrelétricas reversíveis é o emprego de máquinas com velocidade variável, desenvolvidas no Japão na década de 1990. Neste caso, a turbobomba conta com dispositivo que permite ajustar a velocidade de rotação, possibilitando a variação da rotação do eixo também. Dessa forma, a unidade pode ser despachada com eficiência ótima numa grande faixa de potência.

---

<sup>5</sup> Outras fontes bibliográficas se reportam à Usina Hidrelétrica de Pedreira, construída em 1939 no Estado de São Paulo como a primeira usina que fez uso de turbobombas no mundo.

Atualmente, as usinas hidrelétricas reversíveis experimentam uma terceira fase de desenvolvimento relacionada à inserção das fontes renováveis de energia não controláveis – eólica e solar - nas matrizes energéticas de diversos países da Europa, Américas e Ásia.

Segundo o Global Energy Storage Database (2016), existem 346 usinas reversíveis no mundo todo, que juntas, possuem potência instalada de cerca de 178 GW. Considerando apenas as usinas em operação, são 292 UHR, com capacidade de 142 GW. Até 2020, é prevista a entrada em operação de 49 novas UHR em diversos países, que serão responsáveis por fornecer cerca de 35 GW de potência em todo mundo - um aumento de 25% na capacidade instalada de usinas deste tipo. Grande parte deste potencial se concentra nos Estados Unidos, China e Japão.

Em contrapartida, o Brasil possui poucos exemplares de usinas reversíveis, sendo duas no Sistema Billings em São Paulo e uma no Sistema Gerador da Light, que conta com a elevatória de Vigário, no estado do Rio de Janeiro. Na represa Billings, a usina de Pedreira foi inaugurada em 1939 com a entrada em operação de uma unidade reversível e hoje conta com sete unidades, para bombear as águas do Canal Pinheiros até o Reservatório Billings, 25 metros acima (EMAE, 2016).

O complexo gerador do Sistema Billings conta ainda com a usina reversível de Traição, com quatro unidades reversíveis, inaugurada em 1940, que reverte o curso das águas dos rios Tietê e Pinheiros para serem encaminhadas à Usina de Pedreira e depois ao Reservatório Billings. Do ponto de vista energético, a reversão do rio tem como propósito manter volumes d' água nos reservatórios do Rio das Pedras e Billings suficientes para garantir a geração na Usina Henry Borden. Hoje, a operação do sistema de reversão do Rio Pinheiros, tanto em Pedreira quanto em Traição, só é acionada para o controle das enchentes (EMAE, 2016). Uma quarta usina reversível encontra-se atualmente desativada, a Usina de Edgard de Souza, cuja unidade reversível foi transferida para Pedreira em 1984.

Tabela 2 - Usinas Hidrelétricas Reversíveis no Brasil (CANALES et al, 2015)

UHR	ANO	UNIDADES	MÁQUINA	POTÊNCIA TURBINAS (MW)	POTÊNCIA BOMBAS (MW)	QUEDA BRUTA (m)
Pedreira	1939	6	Francis	78,5	42,6	25
Traição	1940	4	Kaplan	7,3	9,4	4
Vigário	1952	4	Francis	90,8	72,0	36
Edgard de Souza	1955	1	Francis	14,8	13,3	24

Entre 1970 e 1980 diversos estudos foram elaborados no sentido de prospectar possíveis locais para usinas hidrelétricas reversíveis. O primeiro destes estudos foi desenvolvido pela CESP juntamente com o IPT, iniciado em 1979 e concluído em 1982, e tratou de inventariar o potencial apenas no Estado de São Paulo, abrangendo as serras do Mar, Mantiqueira e Serra Geral. O levantamento contou apenas com trabalho de escritório, baseado em cartas topográficas em escala 1:50.000 a 1:100.000 e mapas geológicos e geomorfológicos regionais (1:500.000). Foram identificadas 341 alternativas locais neste estudo, totalizando uma potência estimada em 735 MW (IPT-CESP, 1979).

Posteriormente, a Eletrobrás elaborou entre 1987 e 1988, levantamentos do potencial das Regiões Sul, Sudeste e Nordeste. Estes Inventários foram desenvolvidos apenas com trabalho de escritório, apoiados basicamente, em dados de cartografia secundários de mapas em escalas de 1:50.000 a 1:100.000. Nestes estudos, não foram considerados os aspectos geológicos locais, hidrológicos e impactos ambientais. Foram identificados 129 sítios possíveis na região Nordeste e 331 MW (ELETROBRÁS, 1988a), 147 sítios na região Sul e 332 MW (ELETROBRÁS, 1988b) e 385 no Sudeste, com potência total de 670 MW - exceto em São Paulo, coberto pelo estudo da CESP (ELETROBRÁS, 1987).

Tabela 3: Premissas dos Inventários de UHR realizados no Brasil

INVENTÁRIO	ESCALA	DESNÍ-VEIS	RELAÇÃO L/H	DISTÂNCIA DE CAPITALS	POTÊNCIA	VARIAÇÃO DO NA	CICLOS DE GERAÇÃO	GEOLOGIA LOCAL
ESTADO DE SP (1982)	1:50.000	>30 0m	<10	Não considerada	>1000 MW	<15% da queda bruta	14 horas	Não considerada
SUDESTE RJ, MG, ES (1987)	1:50.000 a 1:100.000	>30 0m	<10	200 km	Não limitada	<15% da queda bruta	14 horas	Não considerada
NORDESTE (1988)	1:100.000 1:50.000 a	>100m	<20	300 km	Não limitada	<15% da queda bruta	14 horas	Não considerada
SUL (1988)	1:100.000	>250m	<15	250 km	Não limitada	<15% da queda bruta	14 horas	Não considerada

Além destes estudos em caráter de Inventário, nesta época a Eletrobrás desenvolveu outros estudos em nível de pré-viabilidade de alguns aproveitamentos identificados principalmente na região Sudeste. Embora contassem com maior detalhamento, inclusive com desenhos de planta e seção dos aproveitamentos em escalas usuais de viabilidade (1:2000 e 1:1000), os trabalhos realizados não contaram com a aquisição de dados primários para os estudos hidrometeorológicos nem tampouco geológico-geotécnicos.

Tanto os inventários quanto os estudos de pré-Viabilidade de UHRs desenvolvidos naquela época, foram estudos desenvolvidos em caráter preliminar, em que os critérios de pré-dimensionamentos foram adotados sem qualquer estudo de otimização. As premissas empregadas encontram-se desatualizadas e diversos dos aproveitamentos identificados tem interferência com áreas de proteção ambiental.

Recentemente, outros estudos em caráter preliminar de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil, foram apresentados por BELUCO, 2012 e MELLO, 2017 e a discussão em torno das potencialidades desta alternativa se faz presente nos meios técnico e científico.

Em face da retomada do interesse nas usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil, revela-se a necessidade de aprofundamento dos estudos que vierem a ser desenvolvidos, a partir de metodologias apropriadas e premissas representativa da realidade atual.

Os estudos geológico-geotécnicos adequados para este tipo de empreendimento se inserem neste contexto e o reconhecimento das particularidades geológica-geotécnicas associadas às usinas reversíveis é o primeiro passo para validar metodologias e critérios de projeto aplicáveis aos seus estudos de viabilidade.

### **2.3. Condicionantes Geológicos e Geotécnicos**

Os aspectos geológico-geotécnicos exercem um papel fundamental no sucesso de empreendimentos hidrelétricos: as condicionantes geomorfológicas definem as possibilidades locais e as características das rochas e solo de ombreiras e fundações são determinantes das soluções técnicas adotadas – influenciando diretamente o custo e conseqüentemente a viabilidade da usina.

As usinas hidrelétricas reversíveis, por sua vez, requerem condições de sítio muito específicas para serem viáveis técnica e economicamente, dentre as quais se destacam as grandes diferenças de elevação entre reservatórios e disponibilidade de água (PÉREZ-DÍAZ *et al.*, 2014), bem como topografia compatível com construção de reservatórios.

Adicionalmente, os solos e rochas das margens dos reservatórios condicionam a flutuação do nível d'água e conseqüentemente os ciclos operativos, que impactam diretamente a potência da usina.

Estes aspectos particulares e seus impactos nos projetos são abordados nos itens a seguir, com o propósito de identificar as lacunas metodológicas nos estudos geológicos-geotécnicos praticados em hidrelétricas convencionais, as quais devem ser preenchidas para o correto desenvolvimento dos estudos de viabilidade de UHRs.

#### **2.3.1. Distância em planta entre os dois reservatórios**

A viabilidade técnica e econômica de usinas hidrelétricas reversíveis é, em primeira análise, diretamente determinada pelo relevo. Na busca por sítios possíveis, há que

se definir, de partida, a posição dos dois reservatórios de tal forma que haja a convergência entre a maior distância vertical possível – ou queda – entre os mesmos associada ao menor comprimento em planta possível do circuito hidráulico.

Assim, a viabilidade de um projeto se avalia inicialmente a partir da relação  $L/H$ , onde  $H$  é a queda bruta, determinada pela diferença de elevação entre os dois reservatórios, e  $L$  o comprimento do circuito hidráulico em planta, medido de tomada d'água a tomada d'água.

Esta relação oferece um indicador do peso do custo dos túneis de adução, restituição e condutos forçados que, em geral, constituem um dos principais custos das obras civis dos projetos de usinas reversíveis. Quanto mais elevado o valor deste parâmetro, maior a incidência do custo dos túneis na composição do custo do projeto. A experiência atesta que para valores desta relação maiores que 10, resultam em custo muito elevado para os túneis e tornam muito remota a competitividade econômica do projeto, mesmo quando os custos das barragens são relativamente pequenos. Por outro lado, raramente se encontram locais em que essa relação apresenta valor inferior a 3 (ELETROBRÁS, 1988).

As condições topográficas locais tem ainda enorme influência sobre o arranjo da obra, determinando as características físicas das estruturas, inclusive comprimento e alturas de barragens e diques, alinhamento e dimensões dos circuitos hidráulicos e localização da casa de força.

### **2.3.2. Escavações subterrâneas**

Em usinas reversíveis predominam os arranjos que adotam estruturas subterrâneas em função das características topográficas requeridas para o projeto. Desta forma, as escavações subterrâneas têm grande peso nas obras civis.

Além do circuito hidráulico, que, comumente, conta com os túneis de adução, restituição e condutos forçados escavados em rocha, não raro é feita opção pela casa de força em caverna. Além de ser uma vantagem construtiva, a opção por fazer uso dos espaços subterrâneos é uma tendência em diversas partes do mundo, por ser

uma solução que causa menos impacto socioeconômico do que as escavações superficiais.

Pode-se dizer que a complexidade das obras subterrâneas reside no fato de que lidam com grandes incertezas e riscos. A geologia ao longo do eixo de um túnel escavado em rocha tem papel dominante na maioria das decisões relacionadas ao planejamento, projeto e obras do mesmo, e determina a viabilidade, o comportamento e o custo do túnel (PARKER, 2004). De forma semelhante, a geologia governa as obras em cavernas, como em casa de força subterrâneas.

Em condições de geologia desfavorável, os tratamentos requeridos para a segurança das obras podem apresentar custos tão altos que inviabilizem economicamente o empreendimento.

PARKER (2004) discute os desafios associados às obras subterrâneas e o escopo das investigações geotécnicas requeridas para túneis, as quais têm um alto grau de iteratividade com o projeto, sendo essencial realizar uma campanha de investigações robusta desde os primeiros estágios de projeto, que possibilite antecipar o posicionamento correto das obras, o que resulta na redução de custos.

Estes conceitos devem nortear também as obras de túneis forçados escavados em rocha de usinas hidrelétricas. Os arranjos convencionais deste tipo de adução contam com uma tomada d'água, túneis em baixa pressão, túnel em alta pressão, chaminés de equilíbrio ligando os túneis em baixa pressão com o conduto forçado, turbinas e descarga, como no exemplo do AHE Salto Pilão, localizada no rio Itajaí-Açu em Santa Catarina (PIMENTA; MAURO, 2005).

No Brasil, diversas usinas hidrelétricas construídas no passado contam com condutos forçados escavados em rocha e/ou casas de força em caverna<sup>6</sup>. Porém, não se dispõe até o momento de manuais de projeto atualizados que tenham acompanhado

---

<sup>6</sup> Henry Borden, Nilo Peçanha, Paulo Afonso I, II, III, IV, Capivarí Cahoeira, Areal, Salto Pilão, Rio Casca I, Paraibuna, Euclides da Cunha, Jaguari, Emborcação, Boa Esperança, Simplicio, Barra Grande, Campos Novos, Castro Alves, Serra da Messa, Foz do Areia, Pedra do Cavalo, Monte claro, Quatorze de Julho, Itá, Machadinho, Nova Ponte, Mosquitão, Passo Fundo, Macabu, Santa Rosa II (MELLO, 2017).



a evolução de métodos ocorrida ao longo dos anos. Contudo, a aplicação dessas estruturas como parte do sistema de adução hidrelétrica vem crescendo bastante no Brasil, principalmente para as Pequenas Centrais Hidrelétricas (MOTA, 2009).

Como consequência, o tema ganhou notoriedade nos últimos 15 anos no Brasil, acompanhando uma tendência mundial. Esforços no sentido de abordar e discutir aprimoramentos para critérios de projeto e técnicas construtivas são apresentados por MOTA (2009), (CASTRO, 2013) e (CARDOSO, 2008).

Os avanços técnicos do projeto de túneis sob pressão em usinas hidrelétricas convencionais são o ponto de partida para o desenvolvimento de critérios de projeto e processos construtivos de circuitos hidráulicos subterrâneos de usinas reversíveis. Contudo, na maioria das vezes, estes últimos têm como particularidade, serem circuitos para fluxos bi-direcionais, que torna seu projeto ao menos uma vez mais complexo.

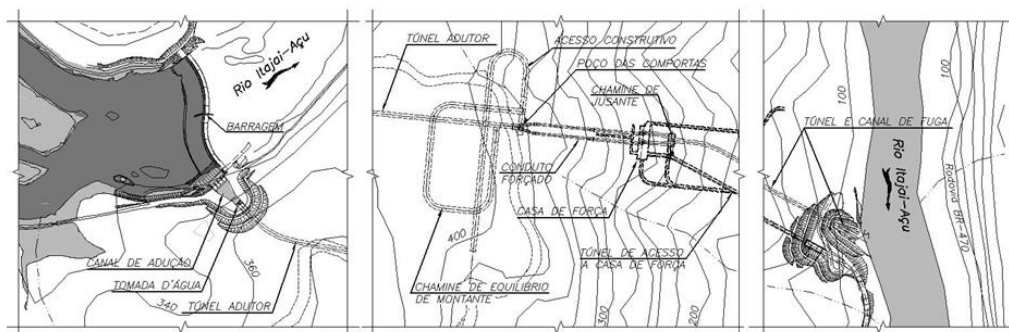


Figura 8: AHE Salto Pilão - circuito hidráulico – planta (PIMENTA e MAURO, 2005)

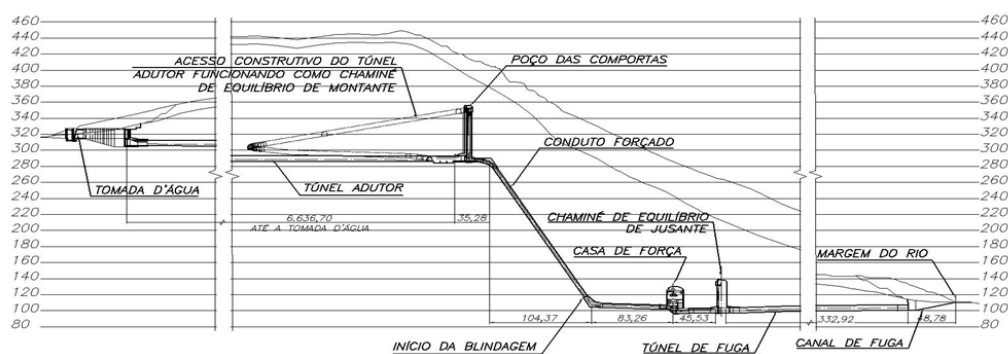


Figura 9: AHE Salto Pilão - circuito hidráulico – seção (PIMENTA e MAURO, 2005)

Esta análise e avaliação não é escopo do presente trabalho, porém entende-se que os critérios de projeto de túneis forçados merecem uma avaliação criteriosa que leve em conta esta condição particular dos circuitos hidráulicos de usinas hidrelétricas reversíveis, com a respectiva normatização.

Por outro lado, os conceitos direcionados às obras subterrâneas como túneis comuns (não pressurizados) são perfeitamente aplicáveis às casas de força em caverna e entende-se que devem ser observadas as mesmas metodologias de estudo e projeto, bem como os critérios de projeto mais atuais.

### 2.3.3. Estabilidade de taludes sob rebaixamento rápido

O rebaixamento rápido é uma condição crítica a que taludes artificiais e naturais são submetidos, que ocorre quando taludes total ou parcialmente submersos expe-

rimentam uma redução do nível d'água subjacente em velocidade maior que a velocidade de percolação das águas através do terreno, deixando-o em estado saturado.

Rupturas de barragens de terra associadas a esta condição são amplamente reportadas na literatura técnica por Morgerstern (1963), Sherard et al (1963), Lane (1967), ICOLD (1980), conforme destacado por ALONSO et al (2008).

Por isso, em usinas hidrelétricas convencionais com reservatórios de regularização, a avaliação da estabilidade do talude de montante das barragens de terra sob rebaixamento rápido integra as verificações de projeto desde os estudos de viabilidade técnica e econômica, tendo por objetivo definir uma taxa segura para o deplecionamento do nível d'água, o que condiciona a operação dos reservatórios.

No caso particular de usinas reversíveis, este fator é de tal forma determinante que a taxa de rebaixamento seguro para as estruturas de terra pode simplesmente não permitir que se opere o reservatório em ciclos curtos, como diários ou semanais – inviabilizando técnica e economicamente a usina. Porém, via de regra, as barragens destas usinas são construídas em concreto ou em enrocamento com núcleo impermeável, aproveitando-se da rocha proveniente das escavações obrigatórias subterâneas, limitando a necessidade desta verificação para as estruturas da barragem.

Entretanto, de forma diversa às hidrelétricas convencionais, a estabilidade das encostas do reservatório é um fator preponderante em projetos das usinas reversíveis, devendo ser apropriadamente investigada. Sobretudo no Brasil, onde é muito relevante a ocorrência de taludes marginais com formação em colúvios e tálus, que naturalmente apresentam condições de estabilidade precárias (MELLO, 2017).

Os impactos de rupturas em margens de reservatórios de hidrelétrica são discutidos por ALONSO e PINYOL (2010). Do ponto de vista técnico-econômico, rupturas nas margens do reservatório podem assoreá-lo e provocar a redução do seu volume útil e, conseqüentemente, da potência da usina. Este é um aspecto de especial interesse para as usinas reversíveis, pois a possibilidade de deslizamentos sucessivos em função de rebaixamentos rápidos será determinante para os ciclos de geração e bombeamento.

Deslizamentos em margens de reservatório podem representar ainda uma ameaça à segurança das estruturas, pois podem levar a um aumento não controlado do nível de montante e a geração de ondas de magnitude não prevista, tendo como consequência o possível galgamento e ruptura da barragem.

Além disso, impactam tanto o ecossistema quanto a população ribeirinha, trazendo consequências socioambientais negativas. Em última instância, podem acarretar pesadas multas ao empreendedor.

Casos de deslizamentos ocorridos em margens de reservatórios de hidrelétricas foram reportados e analisados por JONES et al (1961), Nakamura (1990 apud JIA et al, 2009) e (GEOTÉCNICA, 1983). Estes estudos constataram a enorme influência dos episódios de esvaziamento rápido no desencadeamento de deslizamentos: no estudo apresentado por Jones et al, 30% das ocorrências no reservatório da represa Roosevelt, EUA, foram associados a esta condição crítica enquanto que, no estudo de Nakamura, 60% de todos os casos ocorridos em represas no Japão.

Já o caso estudado pela Geotécnica em 1983, um estudo comparativo entre histórico de deslizamentos às margens do Reservatório da UHE Santa Branca, localizada em Jacareí, SP, demonstrou-se a relação entre as taxas de rebaixamento e a ocorrência de rupturas. Confrontando-se a evolução do número de escorregamentos ocorridos com as curvas de variação do nível d'água elaboradas a partir dos dados de operação do reservatório, no período de 1964 a 1982, o estudo concluiu que, além dos condicionantes topográficos e geotécnicos, a velocidade do rebaixamento do nível d'água constituía um aspecto de grande importância na análise das causas e histórico dos escorregamentos. Maiores informações sobre este caso é apresentado no capítulo 4 adiante, que demonstra como foi avaliada a estabilidade na condição de rebaixamento rápido nos taludes de Santa Branca.

Outro estudo relevante desenvolvido no Brasil, foi o caso do monólito do córrego dos Cabritos no reservatório de Furnas. A queda do grande monólito foi ensaiada em modelo hidráulico reduzido, tendo sido estimada a formação de uma onda de 30m de altura passando por sobre a barragem de enrocamento, a tomada d'água e o vertedouro. Já haviam ocorrido colapsos parciais com consequências no reservatório. O monólito foi arrasado a tempo sendo, assim, evitado um acidente sem precedentes no país. Um eventual colapso da barragem de Furnas, se atingida pela onda

de 30 metros, acarretaria com elevada probabilidade o colapso de Estreito, Jaguará, Igarapava, Volta Grande, Porto Colômbia, Marimbondo, Água Vermelha, Ilha Solteira, Jupia e Itaipu (MELLO, 1985).

Em nosso país, tendo por base os manuais e critérios de projeto de hidrelétricas rotineira e amplamente adotados<sup>7</sup>, os estudos para avaliação das margens se inserem no âmbito dos estudos socioambientais para a elaboração dos Relatórios de Impacto Ambiental, pois os reservatórios se inserem dentro Área de Influência Direta do empreendimento. Neste contexto são requeridos diagnósticos da geologia regional que incluem o mapeamento de suscetibilidade à erosão das margens, baseados em dados secundários (mapas e fotografias/imagens aéreas).

Considerando a criticidade que deslizamentos em margens representam para as usinas reversíveis, entende-se que tais diagnósticos são insuficientes e a eles devem ser incorporadas verificações de estabilidade de taludes e de erodibilidade baseadas em mapeamento geológico, investigações geotécnicas dos materiais das margens e metodologias adequadas, desde a fase de concepção do empreendimento (estudos de viabilidade técnica e econômica).

O tema da estabilidade dos taludes em margens de reservatórios de hidrelétricas tem assim, um campo vasto para novas abordagens.

#### **2.3.4. Estabilidade de taludes durante ciclos de esvaziamento e reenchimento**

A operação em ciclos curtos - dias ou semanas - é uma especificidade das usinas hidrelétricas reversíveis. Esta condição especial leva a que taludes adjacentes ao reservatório sejam submetidos não apenas a rebaixamentos rápidos como também

---

<sup>7</sup> Reporta-se aos manuais adotados pelas empresas públicas do setor elétrico brasileiro: Instruções para Estudos de Viabilidade de Usinas Hidrelétricas (Eletrobrás, 1997) e os Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétrica (Eletrobrás, 2003), previamente apresentados no capítulo 1 e ainda as Diretrizes para Elaboração de Projeto Básico de Usinas Hidrelétricas (Eletrobrás, 1999);

elevações rápidas do nível d'água. Estas elevações podem igualmente funcionar como gatilhos para rupturas.

O enchimento inicial do Canal do Panamá é um exemplo de ocorrências deste tipo. (JIA *et al*, 2009).

A avaliação do comportamento de taludes marginais de reservatórios em decorrência de flutuações de nível d'água não fazem parte da praxe. Mesmo em países com expertise no tema das usinas reversíveis, não é prevista na fase de projeto<sup>8</sup> a verificação da estabilidade e/ou do impacto de sucessivos esvaziamentos e reenchimentos do reservatório nos taludes marginais ou das barragens de terra em um curto espaço de tempo.

Por outro lado, estudos avaliando comportamento de taludes de barragens de terra em consequência de esvaziamento rápido do reservatório tem sido extensivamente desenvolvidos nas duas últimas décadas e fornecem importantes *insights* quanto ao comportamento e mecanismos de ruptura de taludes sujeitos à flutuação de níveis d'água (JIA *et al*, 2009).

Por todas as consequências apresentadas e exemplificadas neste item, os estudos de estabilidade de taludes para usinas hidrelétricas reversíveis devem evoluir para necessariamente incorporar mais esta componente: as consequências de variações cíclicas de níveis d'água para os taludes marginais dos reservatórios.

---

<sup>8</sup> Com base nos manuais Engineer Manual – Slope Stability (USACE, 2003); Engineer Manual - General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams (USACE, 2004); Pumped Storage Planning and Evaluation Guide – (EPRI, 1990)

### 3. Estabilidade de taludes sob rebaixamento rápido

Quando um talude total ou parcialmente submerso, sofre uma redução do nível d'água, o estado de tensões no maciço se altera como resultado da retirada da carga externa imposta pela massa de água vizinha e pela subsequente instalação de fluxo transiente no talude.

Em geral, essa condição é associada aos taludes de montante de barragens que sofrem deplecionamento, seja por imposições operativas ou por situações de emergência. Porém, ocorre também em taludes naturais, por exemplo, às margens de rios após cheias ou quando ocorre a recessão de marés.

Seja numa condição controlada como em maciços compactados de barragens ou em taludes naturais, a resistência ao cisalhamento de um solo é função do seu estado de tensões efetivas  $\sigma'$ , o qual depende da poropressão  $u$ . Quanto maior a poropressão positiva, menor a tensão efetiva.

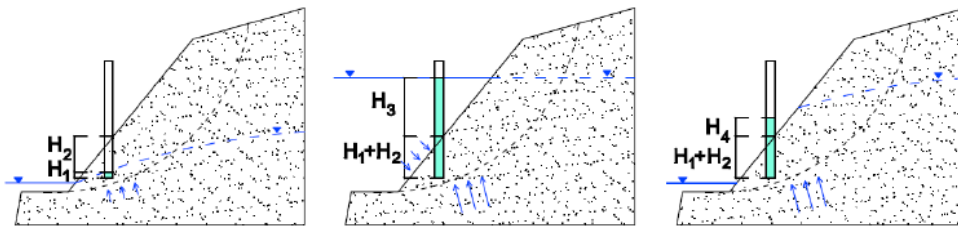
$$\sigma' = \sigma - u$$

Se o rebaixamento do nível d'água ocorre em uma taxa maior do que a velocidade de percolação da água no solo, cria-se um fluxo transiente, com sua respectiva rede de fluxo, surgindo, então, um novo estado de poropressões no terreno, diferente da condição anterior, de equilíbrio. Com este novo estado interno de poropressões, a resistência ao cisalhamento será reduzida e o talude pode ser levado a uma condição instável. Assim, diz-se que um rebaixamento é rápido não pela velocidade com que ocorre, mas quando se estabelece esta desproporção, que é associada a solos de baixa permeabilidade.

Além do excesso de poropressões, quando a água no talude não acompanha a descida do nível d'água adjacente, contribui para a instabilidade também a perda das

forças hidrostáticas estabilizadoras em associação com a presença de água no talude com conseqüente aumento do peso do material devido à saturação.

A Figura 10 ilustra a alteração das condições de pressões internas sob estas condições: à esquerda representa a situação antes do enchimento de um reservatório, com uma situação de equilíbrio estável, com percolação em fluxo permanente e nível piezométrico  $H_1$ . A figura do meio demonstra quando o reservatório está cheio, e se estabeleceu uma nova condição de equilíbrio com  $H_1+H_2+H_3$ .



**Figura 10: Evolução das poropressões no maciço de um talude genérico durante uma situação de esvaziamento rápido (Almeida, 2013)**

Neste caso, as forças instabilizadoras decorrentes do peso do maciço e das poropressões no talude, são contrabalanceadas com as forças hidrostáticas externas ao talude. Por fim, na figura à direita, é representada a situação imediatamente após o reservatório ser esvaziado. Nesta condição, com  $H_1+H_2+H_4$ , existe um excesso de poropressões no maciço e não há mais as forças hidrostáticas estabilizadoras, levando a uma condição instável, de equilíbrio precário.

Do ponto de vista de projeto, o esvaziamento rápido é um problema complexo que envolve diversos fatores que se inter-relacionam, dentre os quais podem se destacar os relacionados a seguir:

- Propriedades do material, especialmente a permeabilidade
- Velocidade e desnível do rebaixamento
- Geometria, destacadamente a inclinação e altura dos taludes

ALMEIDA (2013) investigou o grau de influência de cada uma destas condicionantes no paramento de montante de uma barragem de terra homogênea – barragem de Alcobertas - a partir de modelagem numérica pelo Método Elementos Finitos e



verificou que a estabilidade do maciço será maior tanto maior for a permeabilidade, pois em solos mais permeáveis, mais rápida será a dissipação de poropressões no maciço, que poderá acompanhar o deplecionamento, mantendo a estrutura estável.

Para fins práticos, pode-se considerar que para valores de permeabilidade maiores que  $10^{-4}$  cm/s, o material é permeável, enquanto que valores menores que  $10^{-7}$  cm/s, normalmente o material é impermeável (USACE, 2003).

Quanto às velocidades de rebaixamento, taxas mais lentas permitem que a dissipação das poropressões acompanhe a descida do nível de água no talude, contribuindo para a estabilidade. Destaque-se, contudo, que em solos muito permeáveis, a taxa de rebaixamento pode não exercer qualquer influência.

Sobre a geometria do maciço, por sua vez, o estudo indicou que quanto mais inclinado este for, mais instável será o talude enquanto BERILGEN (2007) constatou que a altura do talude também segue esta proporcionalidade: quanto mais alto, menos estável o talude estará numa condição de rebaixamento rápido.

Para além destas condicionantes, ALMEIDA (2013) estudou os fatores de segurança da barragem ao longo do período de esvaziamento do reservatório e concluiu que o momento de maior instabilidade numa situação de rebaixamento rápido pode não se verificar quando o reservatório está vazio, mas sim quando ainda apresenta um nível de água considerável. A cota do nível de água em que acontece o momento de maior instabilidade está relacionada com a velocidade em que se processa o esvaziamento.

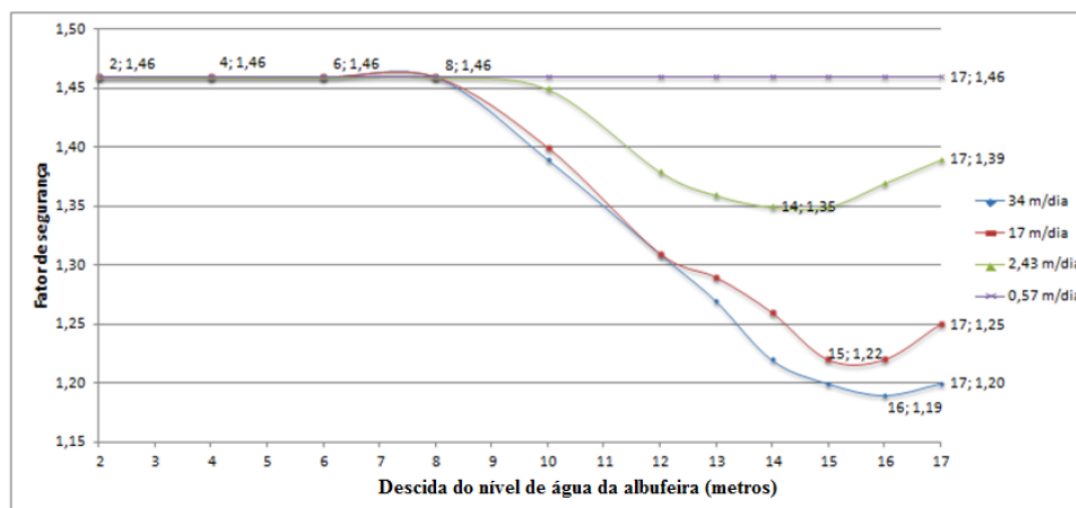


Figura 11: Evolução do fator de segurança durante rebaixamento rápido - barragem homogênea de Alcobertas (ALMEIDA, 2013)

O mesmo foi observado por Sherard *et al* (1963) que verificaram a partir de levantamento de colapsos de barragens de terra devido ao esvaziamento rápido, que a ruptura acontecia antes de se atingir o nível máximo de rebaixamento (ALONSO *et al*, 2008)

Os resultados destas verificações são consoantes com os conceitos da mecânica dos solos, e a resposta do solo está dentro do esperado. Contudo, as simulações realizadas adotam hipóteses simplificadoras que afastam o problema de situações reais. Portanto, é imprescindível realizar análises de estabilidade procurando representar as condições reais de campo.

O estudo da estabilidade de taludes sob rebaixamento rápido pode ser realizado a partir de duas abordagens principais: equilíbrio-limite - geralmente através do método das fatias - ou soluções numéricas.

Para materiais com permeáveis, tipicamente granulares, em geral são empregados os métodos de equilíbrio limite, e são realizadas análises em termos efetivos. Neste caso, a propensão é determinada por análises de fluxo em regime permanente nos níveis d'água inicial e final e com estes parâmetros são efetuadas as análises de estabilidade (USACE, 2003). O estudo da estabilidade neste caso não difere em nada do estudo efetuado para a situação de barragem em operação, por exemplo.

Apenas, devem ser efetuadas tantas análises quantos forem os níveis d'água que se quer avaliar.

Para análise dos taludes de montante de barragens, constituídos por solos de baixa permeabilidade, como as argilas, são empregadas em geral, análises por equilíbrio limite não drenadas, com parâmetros de solos 100% saturados, admitindo-se que o rebaixamento ocorre de forma instantânea e o excesso de poropressão é induzido apenas pelo rebaixamento, isto é, as poropressões geradas pelo fluxo d'água transiente que se instala no talude não são considerados (ALONSO *et al*, 2008), o que é uma hipótese bastante simplificada não correspondendo

Dentre os métodos deste tipo, os históricos ábacos de MORGERSTERN (1963) representam uma solução bastante simplificada, sendo um dos primeiros métodos para o cálculo deste problema, desenvolvido em época em que os recursos disponíveis para a solução de problemas deste tipo eram bastante limitados. É um método proposto para barragens de terra homogêneas, pois as simplificações adotadas limitam seu uso a poucas situações. Por este motivo, para a maioria dos problemas, é preferível fazer uso de metodologias que contemplem maior detalhamento e que possam conduzir a respostas mais confiáveis.

Segundo STEPHENSON (1978), a hipótese do rebaixamento instantâneo leva a resultados conservadores e por isso, reconhecer a taxa de rebaixamento da linha freática no talude em relação ao reservatório é desejável.

Esta é uma grande limitação da análise através de métodos de equilíbrio limite, e além desta, ALMEIDA (2013) destaca outras limitações tais como dificuldade na determinação da resistência ao cisalhamento não drenada do solo e a não mudança da localização da superfície de ruptura durante o esvaziamento.

Adicionalmente, na aplicação dos métodos de equilíbrio limite assume-se solos com características extremas, isto é, totalmente permeáveis, ou totalmente impermeáveis. De fato, dificilmente estas condições são encontradas em campo, sobretudo em taludes naturais como nas margens de reservatório, visto que os materiais reais apresentam constituição heterogênea, com diferentes permeabilidade e compressibilidade, arrançadas em geometrias complexas (ALONSO, 2008), além de que o rebaixamento, normalmente e em condições normais, não é imediato.

Métodos numéricos, por sua vez, permitem que se execute análises de fluxo transiente ao mesmo tempo que análises tensão-deformação, e levam em consideração a permeabilidade do material. Assim, esta abordagem vem ganhando força no tratamento da estabilidade de taludes sob esvaziamento rápido, pois oferecem uma análise mais representativa das condições reais de campo. Dentre as soluções numéricas destaca-se o Método dos Elementos Finitos como um dos mais comuns.

O *United States Army Corps of Engineers - USACE* (2003) apresenta duas metodologias de cálculo para a avaliação da estabilidade de taludes de barragens sujeitos a rebaixamento rápido, sendo a primeira um procedimento proposto pelo próprio órgão em 1970 e o outro um procedimento desenvolvido por Lowe e Karafiath (1960) e posteriormente modificado por Wright e Duncan (1987), e por Duncan, Wright e Wong (1990). São metodologias que buscam aproximar as hipóteses de cálculo com a situação real de campo. Ambos os procedimentos se baseiam em aplicar métodos clássicos de equilíbrio-limite em duas ou mais fases de cálculo, para cada superfície de deslizamento em estudo.

Nos tópicos seguintes serão apresentados os principais conceitos referentes aos métodos de equilíbrio limite e métodos numéricos e serão expostas algumas metodologias de cálculo aplicáveis às análises de estabilidade na condição de esvaziamento rápido.

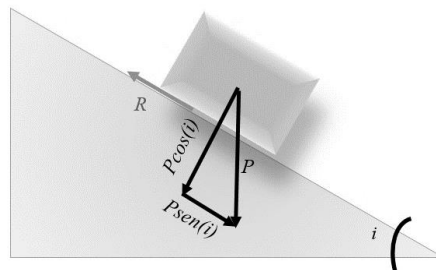
### **3.1. Métodos de Equilíbrio – Limite**

Os métodos baseados em equilíbrio-limite buscam obter o fator de segurança  $F$  ao deslizamento ao longo de uma dada superfície como resultado da razão entre as tensões cisalhantes mobilizantes  $\tau_{mob}$  e as tensões cisalhantes resistentes  $\tau_r$  que atuam na massa de solo ou rocha limitada pela superfície, as quais são determinadas a partir das equações da estática – equilíbrio de forças e de momentos. Na condição de equilíbrio-limite, estas tensões se igualam em módulo e  $F = 1$ .

As forças que desencadeiam o movimento são basicamente decorrentes do peso da massa de solo e água presente no talude, eventualmente complementadas por cargas de estruturas ou cargas dinâmicas sísmicas e as forças resistentes são função da

resistência ao cisalhamento e coesão do solo que se desenvolvem ao longo da superfície de ruptura (BROMHEAD, 2005).

O caso geral do problema é ilustrado por FIORI e CARMIGNANI (2011) a partir de um bloco genérico que pode ser considerado como uma massa única de solo sobre um plano inclinado. Na analogia, o plano inclinado é a superfície hipotética de ruptura de um talude e o bloco é solicitado por seu peso próprio  $P$  e sua componente tangencial  $P = sen(i)$  tende a causar o escorregamento. A força resistente que se contrapõe a esta componente é dada por  $R = \tau A$ , onde  $\tau$  é a resistência ao cisalhamento do contato bloco-plano inclinado e  $A$  é a área de contato do bloco e a superfície (Figura 12).



**Figura 12: Representação esquemática das forças atuantes num bloco de solo hipotético, adaptado de Fiori e Carmignani (2011)**

Adota-se geralmente, o critério de ruptura de Mohr-Coulomb:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

Onde:  $c$  = intercepto coesivo;  $\sigma$  = tensão normal aplicada ao solo;  $\varphi$  = ângulo de atrito do solo.

De volta para o exemplo genérico, o valor de  $\sigma$  é definido por  $\sigma = \frac{P \cos(i)}{A}$ , em  $P \cos(i)$  é a componente normal do peso do bloco. Substituindo-se na equação de Mohr-Coulomb temos que:

$$\tau = c + \frac{P \cos(i)}{A} \tan \varphi$$

Donde se chega a seguinte igualdade:

$$R = c + P \cos(i) \tan \varphi$$

Se temos um solo hipotético com  $c = 0$ , chegamos à conclusão que na condição de equilíbrio-limite, chegamos à  $\tan i = \tan \varphi$ , concluindo que o ângulo de inclinação do plano do movimento é igual ao ângulo de atrito interno do solo.

Para trazer o exemplo apresentado para os casos reais, é necessário considerar uma superfície de ruptura e para cada superfície haverá um fator de segurança, considerado constante em toda ela. Na prática, os métodos consideram superfícies simples que podem ser matematicamente descritas, como circulares, planares ou de qualquer formato, mas que podem ser simplificada em trechos retilíneos ou curvilíneos.

Equações x Incógnitas	
<b>Equações</b>	
2n	Equilíbrio de forças
n	Equilíbrio de momentos
n	Envoltória de resistência ( $T = f(N)$ )
4n	TOTAL DE EQUAÇÕES
<b>Incógnitas</b>	
1	Fator de segurança
n	Força tangencial na base da fatia (s)
n	Força normal na base da fatia (N')
n	Localização de N' na base da fatia
n-1(*)	Força tangencial entre fatias (T)
n-1(*)	Força normal entre fatias (E)
n-1(*)	Ponto de aplicação da força entre fatias (E e T)
6n-2	TOTAL DE INCÓGNITAS

(\*) Não existe força na extremidade

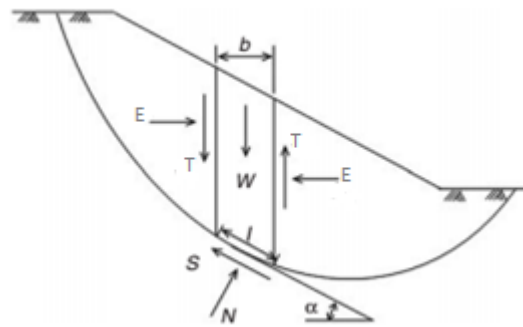


Figura 13: Forças atuando na fatia (modificado de GERSCOVICH, 2012 e modificado de CHENG e LAU, 2008)

DUNCAN e WRIGHT (2005) subdividem os métodos de equilíbrio limite entre aqueles que consideram a massa de solo como um corpo livre único e aqueles que adotam uma massa segmentada em várias partes, possibilitando a análise da interação entre partes subjacentes.

Dentre os métodos do primeiro tipo, destacam-se o Método do Talude Infinito para superfícies planares e o Método  $\varphi = 0$  para superfícies circulares. Quanto aos do segundo tipo, os mais comuns são aqueles que subdividem a massa de solo mobilizado em várias fatias verticais, agrupados sob a denominação genérica de Método das Fatias (USACE, 2003).

GERSCOVICH (2012) atribui à versatilidade destes últimos o motivo pelo qual são tão comuns, já que não apresentam restrição quanto a homogeneidade do solo, geometria do talude e tipos de análise (tensões totais ou efetivas) e destaca os Métodos de Fellenius, Bishop e Spencer para superfícies circulares, dentre os mais utilizados na prática. Para superfícies quaisquer, os métodos mais utilizados são Janbu, Morgenstern-Price e Sarma. A Figura 13 apresenta esquematicamente o caso genérico dos métodos que usam fatias, representando as forças atuantes.

É possível verificar que no problema de estabilidade de taludes existem mais variáveis (forças, posição das forças, fator de segurança, etc) que o número de equações de equilíbrio, sendo, portanto, estaticamente indeterminado e para solucioná-lo é preciso adotar hipóteses que proporcionem o balanço de equações e variáveis.

Os métodos que utilizam fatias diferem entre si a partir da direção em que é feito o equilíbrio de forças (vertical e horizontal, ou normal e tangente à base da fatia) e pelas hipóteses que assumem quanto as forças entre fatias.

A tabela a seguir apresenta as hipóteses de alguns dos métodos corriqueiramente empregados.

**Tabela 4: Hipóteses das forças entre fatias - Métodos de Equilíbrio Limite  
(GERSCOVICH, 2012)**

Fellenius (1936)	Resultante é paralela à inclinação média da fatia
Bishop simplificado (1955)	Resultante é horizontal
Janbu simplificado (1968)	Resultante é horizontal e um fator de correção é usado para considerar a força entre fatias
Janbu generalizado (1957)	A localização da força normal entre fatias é assumida como uma linha de empuxo
Spencer (1967, 1968)	A resultante possui uma inclinação constante ao longo de toda a massa
Morgenstern e Price (1965)	A direção da resultante é definida por uma função

A depender de quais são estas hipóteses, são obtidos diferentes fatores de segurança (DUNCAN e WRIGHT, 2005). A escolha por um ou outro método depende, não apenas da geometria da ruptura, mas principalmente do grau de conhecimento das

condicionantes do problema e das diferentes bases teóricas e limitações de cada método.

Estudos no intuito de reconhecer estas diferenças foram desenvolvidos por Fredlund et Al (1981) e Duncan and Wright (1980). Em geral, atesta-se que as diferenças nos fatores de segurança obtidos pelos vários métodos não são significativas, com exceção do Método Ordinário que pode diferir em até 60%.

Os métodos de equilíbrio limite podem ser aplicados utilizando as tensões totais  $\sigma$  ou as tensões efetivas  $\sigma'$  atuantes no maciço. A escolha de cada um desses enfoques dependerá do problema que se deseja estudar e do tipo de material existente no local. As tensões efetivas, definidas conforme o princípio das tensões efetivas de Terzaghi, são as tensões existentes no contato entre grãos, conferindo resistência ao solo.

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

Existem situações, em que se deseja conhecer a resistência do solo (a tensão cisalhante de ruptura) no estado em que o solo se encontra, submetido a uma sollicitação quase instantânea. É o caso, por exemplo, da análise da estabilidade de um aterro construído sobre uma argila mole, quando se deseja verificar se a resistência do solo ao longo de uma superfície hipotética de ruptura é suficiente para resistir à tendência de escorregamento provocada pelo peso do aterro. Uma eventual ruptura ocorreria antes de ocorrer qualquer drenagem.

Portanto, a resistência que interessa é aquela que existe em cada ponto do aterro, da maneira como ele se encontra - é a resistência não drenada e não adensada do solo, obtida no ensaio triaxial UU, em que não é permitida a drenagem. Logo, o índice de vazios da amostra é sempre o mesmo e conseqüentemente, não ocorrem variações de tensões efetivas; como as tensões efetivas é que mobilizam a resistência ao cisalhamento, concluímos que esta será sempre a mesma.

Em geral, as condições de campo de taludes naturais ou construídos são diferentes do caso exemplificado, pois o solo encontra-se num estado de tensões adensado antes de ser sollicitado. Assim, empregam-se os ensaios do tipo CU (adensado e não



drenado) ou CD (adensado e drenado), que permitem a reprodução das condições de campo e carregamento neste caso.

Quando a carga for aplicada sem a possibilidade de drenagem, utiliza-se para o cálculo, os parâmetros obtidos dos ensaios triaxiais CU, onde a amostra é adensada segundo a tensão confinante local, previamente à aplicação da carga. Neste caso, a análise é numa condição não drenada e emprega-se os parâmetros não drenados do material. É a análise por tensões totais.

Do contrário, quando há possibilidade de drenagem na fase de carregamento, os parâmetros são obtidos dos ensaios triaxiais CD e a análise é realizada com os parâmetros efetivos do material. Alternativamente, pode-se obter os parâmetros efetivos do material pelo ensaio CU efetuando medições das poropressões.

A resistência ao cisalhamento é em geral definida conforme o princípio de Mohr Coulomb, a partir da expressão:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi'$$

Ressalta-se que, o princípio das tensões efetivas e as análises por tensões totais ou tensões efetivas conforme descrito se aplicam a solos saturados.

Quando os solos não estão saturados, são possíveis outras abordagens propostas por diversos autores. A hipótese proposta por Bishop, com grande aceitação prática, reformula o princípio das tensões efetivas proposto por Terzaghi com a inclusão de um parâmetro que represente a influência da sucção na tensão efetiva dos solos:

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

Onde:  $u_a$  = pressão do ar

$u_w$  = pressão na água

$\chi$  = parâmetro que depende do grau de saturação, sendo  $\chi=1$  para solos saturados e  $\chi=0$  para solos secos

$$(u_a - u_w) = \text{sucção}$$

Os métodos de equilíbrio limite são a base das metodologias de avaliação da estabilidade de taludes na condição de rebaixamento rápido apresentados a seguir.

### 3.1.1. Ábacos de Morgerstern

Os ábacos de Morgerstern (1963) foram uma das primeiras alternativas para tratar do problema de estabilidade em condições de rebaixamento rápido fazendo uso de métodos de equilíbrio-limite. Foram elaborados para casos de taludes de barragens constituídas de solos homogêneos de um único material com parâmetros de resistência efetivos  $\phi'$  e  $c'$ , assentados em materiais rígidos e impermeáveis. Assume-se talude totalmente submerso e que não ocorre nenhuma dissipação de poropressões durante o esvaziamento do reservatório. A análise é tomada em termos efetivos e é considerada superfície de ruptura circular.

Os ábacos relacionam o fator de segurança ao rebaixamento para diferentes níveis de esvaziamento e diferentes inclinações de taludes, e com os ângulos de atrito interno e coesão do material, conforme os exemplos a seguir.

Os ábacos contemplam materiais com ângulos de atrito de  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  ou  $40^\circ$  e consideram a coesão através do índice adimensional  $\frac{c'}{\gamma H}$ , de 0,0125, 0,025 e 0,5. Para parâmetros diferentes deve-se realizar a interpolação.

É possível obter o fator de segurança mínimo diretamente pelos ábacos apenas para o caso de um rebaixamento total do reservatório, pois a superfície de ruptura crítica necessariamente será tangente à base da barragem. Para esvaziamentos parciais deve-se proceder a verificação através de um procedimento de cálculo que faz uso de interpolação linear do fator de segurança.

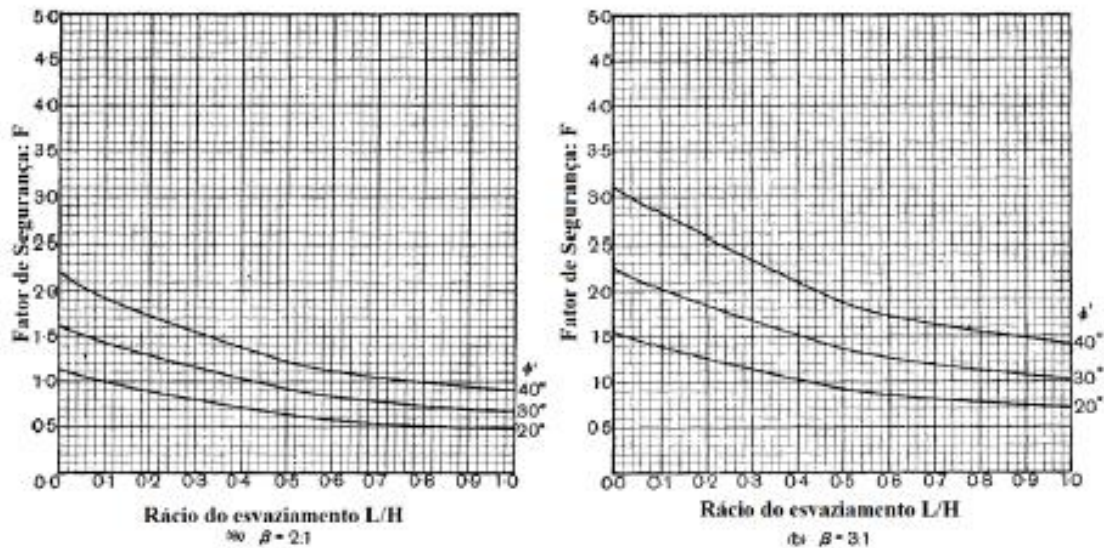


Figura 14: Fatores de segurança para taludes de barragens para  $\frac{c'}{\gamma H} = 0,0125$

Apesar de fornecer uma avaliação rápida da estabilidade, o método é bastante limitado, dadas as simplificações empregadas. Além disso, a velocidade de esvaziamento não é levada em consideração, uma condicionante importante nestes casos.

Esta abordagem se insere num dos grupos de análise ao esvaziamento rápido que analisa primeiro as pressões intersticiais e que interpreta a resistência do solo independente do esvaziamento rápido, ignorando o efeito da consolidação na resistência ao cisalhamento do solo ao contrário de outras metodologias mais modernas, apresentadas a seguir, que também utilizam métodos de equilíbrio limite na análise do esvaziamento rápido (VIRATJANDR e MICHALOWSKI, 2006).

### 3.1.2. USACE (1970)

O procedimento proposto pelo *United States Army Corp of Engineers* – USACE - para a verificação da estabilidade de um talude sujeito a rebaixamento rápido envolve duas fases de cálculo.

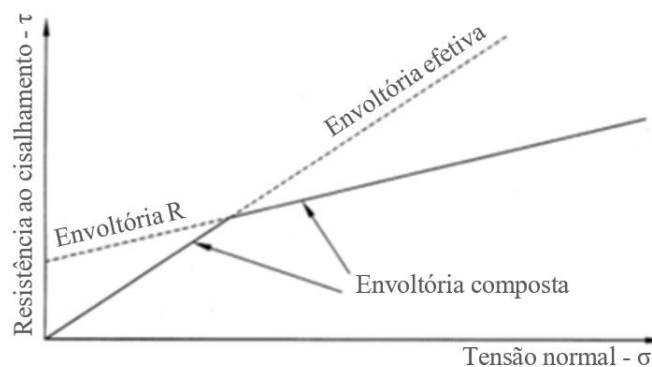
Na primeira fase, o objetivo é obter as tensões efetivas do solo antes do rebaixamento rápido, para cada superfície de ruptura que se quer estudar

Para isso, realiza-se inicialmente uma análise de estabilidade com algum método de equilíbrio-limite. São adotados parâmetros de resistência efetivos obtidos de ensaio triaxial adensado e não drenado com medidas de poropressão (CU) ou adensado e drenado (CD), realizados com tensões de ensaio representativas das condições de campo antes do rebaixamento, caracterizadas pelo equilíbrio estático e regime de escoamento permanente no interior do talude, condizente com o momento de reservatório cheio.

As tensões efetivas são obtidas dividindo-se as forças normais totais na base de cada fatia das superfícies de ruptura em estudo pelo seu comprimento e subtraindo-se a poropressão, que é determinada a partir de uma análise de fluxo apropriada para o regime permanente.

$$\sigma' = \frac{N}{\Delta l} - u$$

Os valores de tensão efetiva calculados são relacionados com a resistência ao cisalhamento do solo pela envoltória de ruptura bilinear, que combina a envoltória de resistência efetiva do solo e a envoltória empírica R, ambas obtidas de ensaios triaxiais, apresentada na figura a seguir



**Figura 15: Envoltória de resistência para análise de estabilidade após esvaziamento rápido (modificado de USACE, 2003)**

A envoltória R, determinada com base na tensão efetiva de consolidação e na tensão desviadora na ruptura do ensaio de cisalhamento, se baseia no diagrama de Mohr-

Coulomb, contudo não é consistente com os princípios fundamentais da mecânica dos solos e por isso tem caráter empírico, sendo empregada apenas com o propósito desta análise.

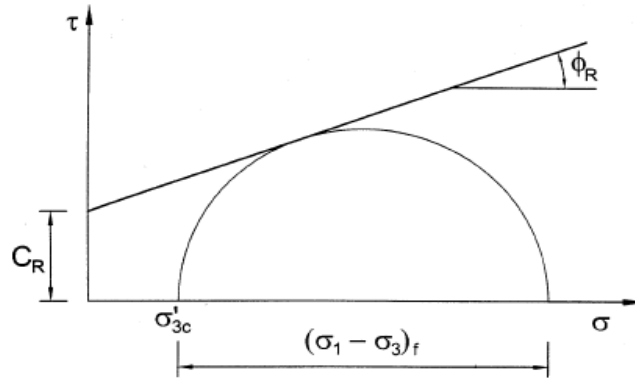


Figura 16: Envoltória R elaborada a partir de ensaios triaxiais (USACE, 2003)

Na segunda fase é realizada análise de estabilidade imediatamente após o rebaixamento. Quando o valor de  $\sigma'$  associa-se a envoltória R, a resistência ao cisalhamento é dada pelo valor de  $\tau$ , e adota-se  $\phi$  igual a zero. Já quando  $\sigma'$  associa-se a envoltória efetiva, adota-se os valores de  $c'$  e  $\phi'$ , obtidos da envoltória e valores apropriados de poropressão são aplicados considerando um novo regime de escoamento permanente, com o nível d'água na posição após rebaixamento.

O fator de segurança obtido nesta segunda análise é o que fornece a condição de estabilidade imediatamente após o rebaixamento rápido.

A USACE (2003) considera esta metodologia muito conservadora para o caso de materiais que dilatam durante o cisalhamento levando a projetos não econômicos. Além disso, não contempla as situações em que a resistência drenada do solo pode ser menor do que a resistência não drenada. Por esses motivos, o órgão recomenda o emprego do procedimento proposto por Duncan *et al* (1990), descrito a seguir.

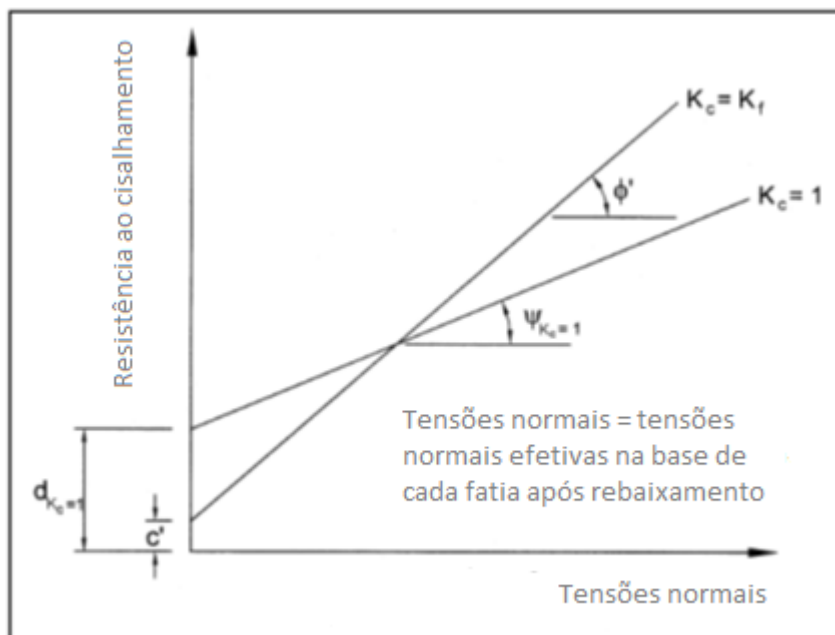
### 3.1.3. Duncan *et al* (1990)

A metodologia pode envolver duas ou três fases de cálculo. Essencialmente, o que a diferencia do procedimento apresentado anteriormente é o emprego da terceira

fase, caso se verifique após a segunda fase, que em alguma fatia da superfície de ruptura em estudo a resistência ao cisalhamento drenada é menor do que a resistência não drenada.

Na primeira fase o procedimento é o mesmo do USACE (1970) e tem por objetivo obter tanto as tensões normais efetivas  $\sigma_c'$  e quanto as tensões cisalhantes  $\tau_c$  na base das fatias da superfície de ruptura em estudo.

Para a segunda fase de cálculo são empregadas duas envoltórias que relacionam a resistência ao cisalhamento não drenada do material na ruptura com os valores das tensões normais efetivas calculadas na primeira fase. Uma delas é a envoltória efetiva obtida a partir dos valores dos ensaios CU, realizados com adensamento isotrópico e a outra, envoltória de tensões totais, obtida a partir de ensaio CD, com adensamento anisotrópico sob razão  $K_c = \sigma_1' / \sigma_3'$  máxima.



**Figura 17: Envoltórias de resistência para análise de estabilidade após esvaziamento rápido (modificado de Duncan et al, 1990)**

Neste segundo caso, embora a envoltória defina parâmetros efetivos, pode também ser adotada em solos que são adensados em tensões que levam a ruptura antes de que qualquer solicitação não drenada seja aplicada, e portanto, as tensões de ruptura são as mesmas da consolidação.

Os valores de resistência não drenadas  $\tau_{ff}$  empregados na segunda fase de cálculos de estabilidade são obtidos interpolando-se os valores obtidos destas duas curvas, a partir da equação a seguir, onde  $K_f$  é o valor de  $K_c$  próprio dos ensaios triaxiais realizados para o estudo.

$$\tau_{ff} = \frac{(K_f - K_c)\tau_{ff-K_c=1} + (K_c - 1)\tau_{ff-K_c=K_f}}{K_f - 1}$$

No segundo estágio a estabilidade é calculada para a situação imediatamente após o rebaixamento, assumindo que todos os materiais com baixa permeabilidade se comportam como impermeáveis e adota-se a resistência não drenada do material  $\tau_{ff}$ , obtida da equação acima, com o valor de  $\phi$  e poropressão iguais a zero.

Para os materiais permeáveis, adota-se os parâmetros de resistência efetiva do material, com valores de poropressão obtidos a partir de análises de fluxo apropriadas realizadas para a condição de regime estacionário estabelecido após o rebaixamento e emprega-se a resistência efetiva  $\tau'$ .

Terminada a segunda fase de cálculos, as resistências ao cisalhamento efetivas são novamente calculadas, e nomeadas  $S_d$  para diferenciá-las do valor de  $\tau'$ , a partir da expressão a seguir, onde  $\sigma'_d$  é o valor das tensões normais efetivas na base de cada fatia após a análise de estabilidade.

$$S_d = c' + \sigma'_d \tan(\phi')$$

O valor de  $S_d$  calculado para cada fatia é comparado com a resistência não drenada obtida conforme a equação  $\tau_{ff}$ . Então, uma nova análise de estabilidade é realizada, de tal forma que sempre sejam empregados os menos valores de resistência ao cisalhamento calculados, representativa da condição mais desfavorável.

O USACE avalia que este método é mais racional que o primeiro e por isso o recomenda. Contudo, há que se ter em conta que foi desenvolvido numa época em que os recursos computacionais não eram tão acessíveis e por isso, apresenta algumas limitações destacadas por Fredlund *et al* (2011):

- O tempo de esvaziamento não é considerado na análise
- Assume um único valor de resistência não drenada ao longo toda a superfície de ruptura, o que não é apropriado
- A difícil determinação de um valor representativo de resistência não drenada para ser adotado nas análises
- A localização da superfície de ruptura não se altera durante o rebaixamento rápido.

Além disso, este procedimento permite ter ideia de um valor para o fator de segurança, porém não fornece qualquer tipo de informação sobre as deformações que ocorrem no maciço durante o esvaziamento do reservatório, informação importante e necessária no caso de ciclos de esvaziamento e rebaixamento.

A dependência do tempo é a característica mais peculiar neste tipo de problema, pois ao longo do rebaixamento as condições de contorno do talude variam continuamente, e conforme mencionado, conta-se que a condição crítica de estabilidade pode não ocorrer ao final do rebaixamento.

As metodologias baseadas em equilíbrio-limite por sua vez, partem da premissa que o menor fator de segurança ocorrerá quando finalizado o rebaixamento, porque não há como simular a estabilidade no decorrer do tempo.

BAKER *et al* (1993) discutem a aplicabilidade dos métodos de equilíbrio limite para análises de estabilidade sob rebaixamento rápido e demonstram que os métodos apresentados nesta seção exigem simplificações que afastam os modelos de cálculo das situações reais encontradas nos problemas de engenharia.



Por todos estes fatores, os métodos numéricos têm gradualmente se firmado como a metodologia mais adequada para estudos com esta característica. No tópico a seguir, serão apresentados as principais características, potencialidades e limitações destes métodos.

### 3.2. Métodos Numéricos

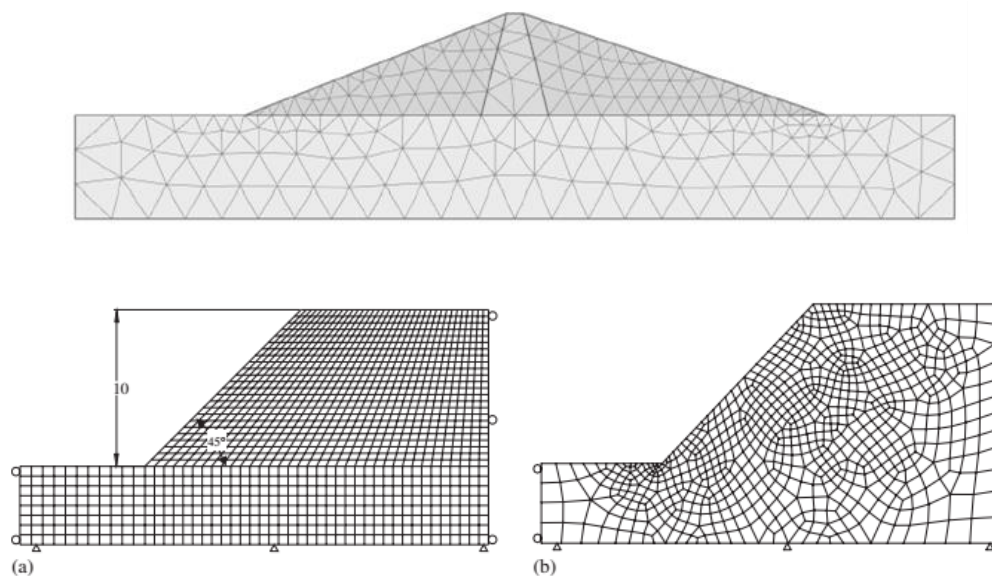
Os métodos numéricos baseados na análise do comportamento tensão versus deformação do solo representam atualmente a alternativa mais versátil e completa para estudos de estabilidade de taludes, pois permitem incorporar às análises fatores como a não linearidade das curvas tensão x deformação, anisotropia e não homogeneidade do material, a influência do estado de tensões iniciais e as etapas construtivas, conferindo um maior realismo à concepção do problema. Podem ainda, ser aplicados a problemas bi ou tridimensionais.

Na prática corrente da engenharia geotécnica, os métodos numéricos comumente empregados são dos Elementos Finitos (MEF) e das Diferenças Finitas (MDF). Ambos têm como princípio discretizar o maciço de solo a ser analisado em uma malha de elementos menores (**Figura 18**) e resolver equações diferenciais que descrevem as relações tensão-deformação do solo.

No presente trabalho, apenas o Método dos Elementos Finitos será abordado, porque constata-se na literatura técnica seu predomínio nos problemas envolvendo estabilidade de taludes, sobretudo em condições de rebaixamento rápido.

Desde os primeiros estudos apresentados na década de 1970, muitos métodos para proceder a análises de estabilidade usando elementos finitos foram propostos nas últimas décadas. É possível obter um fator de segurança assim como com equilíbrio limite aplicando-se MEF. Contudo, uma das maiores potencialidades de sua aplicação se revela na determinação de deformações mesmo em situações que não ocorre a ruptura global, e a verificação do comportamento do talude ao longo do tempo.

Neste sentido, trata-se de uma ferramenta singular para avaliar o impacto do esvaziamento rápido de um reservatório nos taludes adjacentes, sobretudo considerando ciclos de esvaziamento e reenchimento típicos de usinas hidrelétricas reversíveis.



**Figura 18: Exemplos de malha de elementos finitos na seção de barragem não homogênea (PLAXIS, 2016) e em um talude homogêneo (modificado de CHENG e LAU, 2008)**

Nos tópicos a seguir serão apresentados exemplos das potencialidades de limitações deste método no estudo da estabilidade de taludes na condição de rebaixamento rápido.

### 3.2.1. Determinação do Fator de Segurança por MEF

A análise de estabilidade com elementos finitos adota uma definição de ruptura similar aos métodos de equilíbrio limite, porém sem necessidade das suas hipóteses simplificadoras (ALBATAINEH, 2006). Os dois principais procedimentos para determinação do fator de segurança são a técnica de redução da resistência e a técnica do aumento da gravidade.

No primeiro caso, a técnica proposta inicialmente por Zienkiewicz *et al* (1975) tem como propósito reduzir a resistência ao cisalhamento até que haja a ruptura. Isto é feito aplicando-se aos parâmetros  $c'$  e  $\phi'$  um fator de redução  $F_t$ , aumentando gradualmente até que o colapso ocorra. O fator de redução  $F_t$  obtido no momento do colapso reflete no fator de segurança global à ruptura com mesmo significado que o fator de segurança definido pelos métodos de equilíbrio limite (HUANG e JIA, 2009).

Já com a técnica de aumento da gravidade (Swan e Seo, 1999) são procedidos aumentos graduais das forças gravitacionais (peso) até que o talude se rompa, e o fator de segurança é definido como sendo a razão entre a aceleração da gravidade na ruptura e o valor da aceleração da gravidade real. A técnica da redução da resistência é a mais comumente empregada para estudos de estabilidade de taludes existentes, enquanto a outra oferece maior confiabilidade para o estudo de aterros durante a construção (ALBATAINEH, 2006).

Diferente dos métodos de equilíbrio limite, não é necessário adotar previamente uma superfície de ruptura e é possível verificar a ruptura progressiva desde pontos localizados de deformações excessivas até a completa ruptura. Na prática, as rupturas de talude neste caso são definidas a partir de uma mudança repentina dos deslocamentos, a partir da não convergência de um valor de  $F$  após ocorridas todas as iterações ou quando há uma zona contínua de deformações excessivas (CHENG e LAU, 2008).

### 3.2.2. Caracterização dos solos

Enquanto nos métodos de equilíbrio limite os solos são caracterizados com apenas três parâmetros ( $c$ ,  $\phi$  e  $\gamma$ ) e o valor da poropressão  $u$ , a modelagem por MEF requer uma gama variada de dados de entrada, que dependem dos modelos constitutivos adotados.

A seleção dos modelos constitutivos dos solos é um requisito da formulação dos problemas de estabilidade pelos métodos de elementos finitos. Diversos modelos podem ser considerados nas análises e devem ser representativos do comportamento mecânico esperado dos solos sob as solicitações do problema.

DUNCAN (1996) discutiu a aplicabilidade de quatro deles (linear-elástico, multilinear, elastoplástico e hiperbólico) e verificou que cada um tem suas vantagens e limitações, sendo adequados a problemas diferentes. Dentre estes, os modelos elastoplásticos demonstram ser mais realistas para modelar o comportamento dos solos próximos de romper, durante e após a ruptura.

As tabelas a seguir mostram um exemplo dos parâmetros da análise de estabilidade efetuada para a barragem do reservatório inferior de Glen Shira, uma usina hidrelétrica reversível localizada na Escócia, a partir de um modelo elastoplástico proposto por Alonso (1990) conhecido como *Barcelona Basic Model* (BBM), que leva em conta a condição não saturada do solo no talude ao longo do rebaixamento.

**Tabela 5: Parâmetros para o modelo mecânico usados para a análise da Barragem de Glen Shira (modificado de ALONSO, et al 2008)**

Símbolo	Unidade	Tipo de solo	
		Solo Compactado	Enrocamento
<i>I Comportamento Elástico</i>			
$E$	MPa	100	100
$\nu$	-	0.3	0.3
<i>II Comportamento Plástico</i>			
$\lambda(0) - \kappa$	-	0.020	0.020
$r$	-	0.8	0.8
$\beta$	MPa <sup>-1</sup>	6.5	6.5
$p^c$	MPa	0.01	0.01
$M$	-	1.4 ( $\phi' = 35^\circ$ )	1.85 ( $\phi' = 45^\circ$ )
$k_s$	-	0	0
$\alpha$	-	1	1
<i>III Estado de tensões inicial para o modelo</i>			
$s_0$	MPa	0.01	0.01
$p_o^*$	MPa	0.01	0.01

Para o comportamento plástico, foram considerados os parâmetros do módulo de Young  $E$  e o módulo de Poisson  $\nu$ .

Os parâmetros que definem o comportamento plástico são descritos a seguir:

$\lambda(0) - \kappa$ : compressibilidade plástica para condição saturada

$r$ : estabelece o valor mínimo para o coeficiente de compressibilidade para altos valores de sucção (BBM)

$\beta$ : parâmetro que controla a taxa de aumento da rigidez com a sucção

$p^c$ : tensão de referência (BBM)

$M$ : inclinação da envoltória de ruptura (BBM)

$k_s$ : parâmetro que controla o aumento da coesão com a sucção (BBM)

$\alpha$ : parâmetro que define o não-associativismo do potencial plástico

Os parâmetros do estado inicial de tensões são a sucção inicial  $s_0$  e o valor médio da tensão de escoamento  $p_0^*$ .

Além destes, são definidos os parâmetros relativos à condição hidráulica no talude, apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6: Parâmetros hidráulicos usados na análise da barragem de Glen Shira (modificado de ALONSO, et al 2008)**

Símbolo	Unidade	Tipo de Solo	
		Solo Compactado	Enrocamento
<i>I Permeabilidade</i>			
$k_{sat}$	m/s	$1.6 \cdot 10^{-8}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$
$k_{rel}$	-	$S_w^3$	$S_w^3$
<i>II Retenção</i>			
$p_0$	MPa	0.05	0.01
$\lambda$	-	0.2	0.4

Para a determinação dos parâmetros do modelo BBM são necessários ensaios edométricos e de compressão triaxial, ambos com controle de sucção. Os resultados desses ensaios em conjunto permitem a obtenção dos parâmetros (FAGUNDES, 2014).

Existem outros inúmeros modelos constitutivos possíveis e muitos autores desenvolveram estudos em elementos finitos baseados em diferentes modelos constitutivos e técnicas para compreender o fenômeno do rebaixamento rápido e o comportamento de taludes sob esta condição.

De maneira geral, a conclusão destes estudos comprova que os métodos numéricos permitem modelar problemas com um maior grau de representatividade das condições reais e por isto são ferramentas poderosas para análises de estabilidade sob rebaixamento rápido, que possui uma complexa conjugação de mecanismos codependentes, e variáveis com o tempo. Porém, isto somente é possível se estiverem disponíveis os dados de ensaios triaxiais de boa qualidade nos diferentes estratos geológicos do perfil de um talude.

Portanto, a obtenção de dados confiáveis é um limitador da aplicação dos métodos numéricos na análise de estabilidade de taludes, sobretudo no caso de taludes naturais como os de encosta de reservatório, em que a caracterização de diversos estratos é mandatória para a correta avaliação da segurança.

### 3.3. Considerações Finais

O estudo da estabilidade de taludes na condição de rebaixamento rápido pode e deve considerar soluções para reduzir o risco de ruptura. A estabilização pode ser conseguida através de controle de fluxo ou como alternativa, adotando-se soluções de impermeabilização.

No primeiro caso, procura-se mitigar o risco de uma ruptura em decorrência do excesso de poropressões no maciço durante o rebaixamento proporcionando melhores condições de drenagem. O emprego de enrocamento é uma solução neste sentido, quando se trata de taludes de barragem, e em usinas reversíveis, trata-se de uma solução corriqueiramente empregada em vista da utilização dos materiais rochosos provenientes de escavações obrigatórias do circuito hidráulico de geração e bombeamento.

Quando por outro lado, lidamos com os taludes marginais, com materiais naturais e, portanto, não determinados pelo projetista, este controle pode ser realizado com drenos sub-horizontais, sistemas de túneis ou poços, e alternativamente, a partir de muros-gabião.

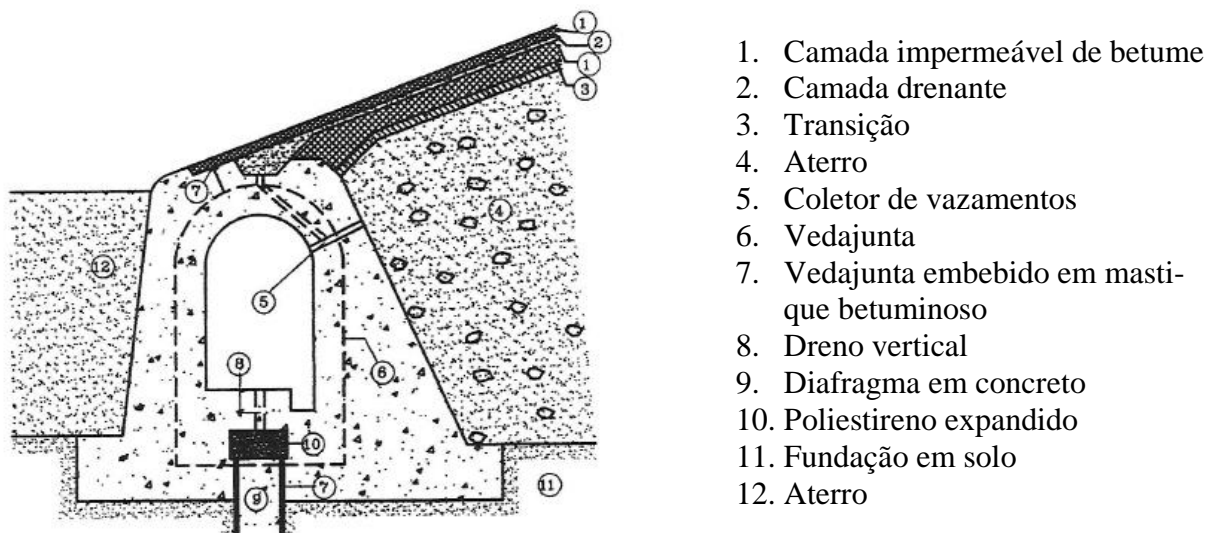
No segundo caso, busca-se evitar a ruptura proporcionando a manutenção das condições de contorno no talude, independente da alteração de nível d'água do reservatório.

CEDERGREN (1977) destaca as diversas tecnologias de revestimento disponíveis: selo de solo impermeável, revestimentos asfálticos - concreto-asfalto, placas asfálticas, asfalto projetado - e revestimentos poliméricos. O tipo de revestimento mais adequado dependerá dos requisitos de operação de cada reservatório.

Em usinas hidrelétricas reversíveis, cujos taludes devem suportar, conforme discutido neste trabalho, grandes alterações no estado de tensões em curtos períodos em função dos ciclos de esvaziamento e reenchimento do reservatório, revestimentos asfálticos foram largamente adotados até os dias de hoje.

Além da proteção dos taludes, a impermeabilização com este tipo de revestimento reduz a perda de água e proporciona a manutenção da qualidade da água (CEDERGREN, 1977), requisitos importantes para a boa operação destes tipos de usinas, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico.

O emprego desta solução exige que se adote drenagem interna ao talude para evitar o excesso de poropressões em decorrências de águas pluviais retidas pela parede e conter vazamentos através de fissuras no revestimento. A figura 21 a seguir demonstra um exemplo de galerias de drenagem comumente empregadas para este fim, em barragens com face de concreto asfáltico.



**Figura 19: Seção de galeria de drenagem adjacente a parede impermeável de taludes (CIGB, 1999).**

A usina reversível de Ludington, em Michigan, EUA foi a primeira que empregou esta solução. O reservatório foi construído por um dique de material arenoso.



**Figura 20: Usinas Hidrelétrica Reversível de Ludington (Newkirk Electric, 2017)**

Os taludes do reservatório superior são revestidos com concreto-asfáltico. A mistura foi especialmente desenvolvida para conferir impermeabilidade, deformabilidade, resistência a erosão por congelamento e degelo e resistência a trincas e fissuras provocadas por aumento de temperatura e envelhecimento do material (CEDERGREN, 1977).

O sistema de drenagem do espaldar de montante do dique conta com um dreno em areia adjacente ao revestimento impermeável, um dreno chaminé e um dreno longitudinal, ambos se estendendo ao longo de todo contorno do dique. Pequenas bombas submersas integram o sistema, instaladas no pé dos drenos adjacentes à parede de concreto-asfalto, para retornar as águas drenadas ao dreno chaminé, conforme apresentado na Figura 21 a seguir.



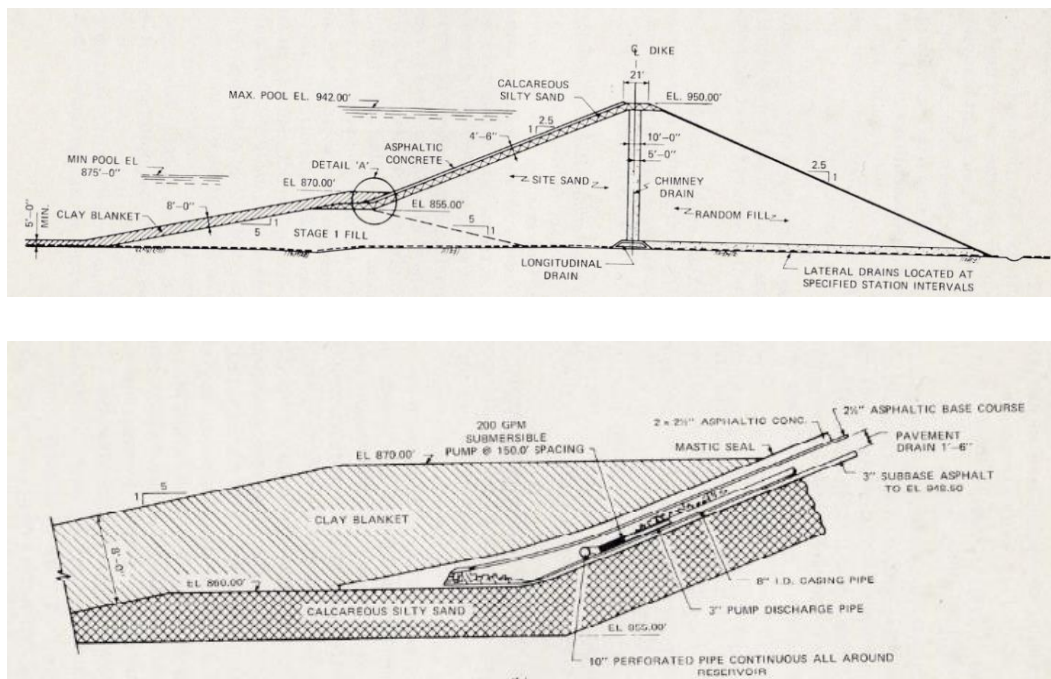


Figura 21: Reservatório superior UHR Ludington: acima, seção típica e abaixo detalhes da drenagem adjacente ao revestimento em concreto asfáltico (CEDERGEN, 1977)

As imagens a seguir apresentam outros exemplos de reservatórios superiores de usinas reversíveis em que esta solução foi adotada.



Figura 22: Reservatório superior da UHR Nante de Drance, Suíça (MELLO, 2017)



**Figura 23: Execução de impermeabilização com manta asfáltica no reservatório intermediário do esquema Kölnbrein na Áustria, em 1997 (MELLO, 2017)**

## 4. Caso prático: encostas do reservatório da UHE Santa Branca

Neste capítulo é apresentado um caso que ilustra o problema de estabilidade de taludes relacionados à condição de rebaixamento rápido de reservatórios de usinas hidrelétricas. O caso, embora não tenha ocorrido em uma usina hidrelétrica reversível, é representativo desta condição crítica, relevante nas UHR, e fornece indicações das limitações e dificuldades na avaliação da estabilidade nesta situação.

Trata-se da ocorrência das rupturas nas margens do reservatório da UHE Santa Branca, que integra o complexo gerador da Light Energia S.A., que após investigação verificou-se que estavam associadas a uma taxa de rebaixamento inadequada para o tipo de solo das encostas. Este problema exige um acompanhamento contínuo exige por parte da Light, pois, embora não represente prejuízos ao volume útil do reservatório, impacta as populações do entorno. Por esta razão, desde a década de 1980 diversos estudos foram realizados.

A partir dos dados ensaios realizados em diferentes épocas, são realizadas análises de estabilidade com base no método de Duncan et al, apresentado no capítulo 3.

Optou-se pela escolha desta metodologia que se baseia em equilíbrio limite porque dispõe-se apenas de parâmetros de resistência obtidos de ensaios de cisalhamento direto, sendo inviável a aplicação dos métodos numéricos.

#### 4.1. Descrição do problema

O Reservatório de Santa Branca faz parte do complexo da Usina Hidrelétrica de Santa Branca, cuja concessão é da Light Energia S.A. Situado no município de Santa Branca, na região leste do Estado de São Paulo e a cerca de 100 km da capital, teve sua construção finalizada na década de 1950, em decorrência do barramento do rio Paraíba do Sul, com a finalidade de regularizar as vazões desse rio. No entanto, em 1999 iniciou-se o seu aproveitamento hidrelétrico com a implantação da Usina Hidrelétrica de Santa Branca, que incorporou ao parque gerador em concessão 57MW de potência.

Abrangendo uma área de 850 km<sup>2</sup>, o reservatório possui volume útil de 426 milhões de m<sup>3</sup> e seu nível máximo operacional está na elevação 622,00m e o mínimo na elevação 576,00m.

O reservatório de Santa Branca está inserido na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul, que nasce na Serra da Bocaina, no Estado de São Paulo, a 1.800 m de altitude, e deságua no norte fluminense, no município de São João da Barra, percorrendo uma extensão aproximada de 1.150 km. Sua bacia tem forma alongada, na direção Oeste-Leste, drenando uma área de cerca de 57 mil km<sup>2</sup>.

A existência de rupturas nas margens deste reservatório vem sendo observada desde seu enchimento em 1964. No entanto, somente em 1983 um estudo detalhado do problema foi elaborado, pela Geotécnica Ltda., contratada pela Light na época.

Apresentado no relatório “Estudo de Diagnóstico, Causas e Análise de Soluções para os Deslizamentos às Margens do Reservatório de Santa Branca – PR 12.0051/83”, este estudo procurou identificar a principal causa da ocorrência de deslizamentos através da elaboração de um modelo geomecânico representativo das condições locais e a execução de diversas análises de estabilidade de alguns dos taludes em que foram realizados levantamentos topográficos.

O estudo contou com o cadastramento dos 262 escorregamentos identificados na época, realizado através de trabalhos de campo que abrangeram toda a área do reservatório até a ponte do Rio Capivari. Os trabalhos incluíram ainda o mapeamento geológico de 177 incisões e levantamento topográfico de 9 locais selecionados de

onde foram extraídas amostras indeformadas de solo para realização de ensaios de laboratório, além de avaliação das idades dos escorregamentos com base em foto-interpretção e análise dos dados de operação do reservatório. Cabe ressaltar que no estudo, foram considerados escorregamentos todos os processos de instabilização em que se verificou a queda ou deslizamento de material das encostas na direção do reservatório.

Confrontando-se a evolução do número de escorregamentos ocorridos com as curvas de variação do nível d'água elaboradas a partir dos dados de operação do reservatório, no período de 1964 a 1982, o estudo da Geotécnica Ltda. concluiu que, além dos condicionantes topográficos e geotécnicos, a velocidade do rebaixamento do nível d'água constituía um aspecto de grande importância na análise das causas e histórico dos escorregamentos.

Tal conclusão derivou da observação de que a grande maioria dos escorregamentos ocorreu durante os 10 primeiros anos de operação do reservatório e que houve uma redução da taxa de evolução dos mesmos a partir de 1974, conforme tabela apresentada abaixo.

**Tabela 7. Evolução dos Escorregamentos (Relatório PR 12.0051/83, Light)**

10	Vôo realizado por	Escala	Cota do NA do reservatório (m)	Número de incisões registradas	Porcentagem do total até 1983	Taxa de escorregamentos por ano
67	IGC-SP	1:60.000	616 a 621	149	56%	-
1973	IBC	1:25.000	616 a 621	206	77%	9,0
1977	Terrafoto	1:45.000	615	230	88%	6,0
1983	-	-	618	262	100%	5,3

Neste ano foi concluído o enchimento dos reservatórios das barragens de Paraibuina e Paraitinga, à montante do reservatório de Santa Branca. Em função disso, a Light alterou o regime de operação do reservatório de Santa Branca, fazendo com que a taxa média de rebaixamento antes de 35cm/dia caísse para 12,2cm/dia. Esta mudança explicou a redução na evolução dos escorregamentos ao longo dos anos.

O estudo da Geotécnica apresentou dois modelos geomecânicos principais de ocorrência de geologia.

- Modelo representativo de quase a totalidade da área do reservatório, associado aos migmatitos, em que se identificam uma camada de cobertura coluvionar argilo-arenosa, localmente constituída por fragmentos de quartzo, seixos rolados, matacões e fragmentos de rocha, e com vegetação e até três horizontes de alteração de rocha, que podem estar ou não presentes: solo residual silto-arenoso ou areno-siltoso micáceo, solo saprolítico de mesma natureza cuja estrutura da rocha matriz encontra-se preservada e rocha alterada.
- Modelo de ocorrência mais restrita, associado aos xistos, no qual quase não ocorrem solos de alteração e o colúvio é pouco espesso. Este modelo apresenta uma capa de colúvio ou solo residual geralmente decimétrica, que passa à rocha alterada ou sã, raramente com desenvolvimento de material saprolítico. Os escorregamentos desenvolvidos sobre os xistos são rasos, apresentando-se como decapeamentos, que expõe a rocha e provocam um entulhamento da face do talude.

O primeiro modelo evidencia a seqüência litológica de maior importância na região do reservatório, caracterizada por gnaiss migmatítico recoberto por solos saprolíticos, residuais e coluvionares, com espessuras variadas. Nessa seqüência litológica, a evolução dos escorregamentos obedece a um modelo geomecânico que se divide em quatro etapas principais, descritas a seguir:

1° estágio:

Os rebaixamentos rápidos do nível d'água do reservatório associados à baixa permeabilidade dos solos superficiais, promoveram a retenção das águas subterrâneas nos taludes em diversos locais, resultando numa rede de percolação que deu origem a pressões neutras elevadas no maciço, e que condicionaram os deslizamentos dos taludes. Supõe-se que a maioria destes escorregamentos tenha sido iniciada entre as cotas 610,0 e 580,0 m.



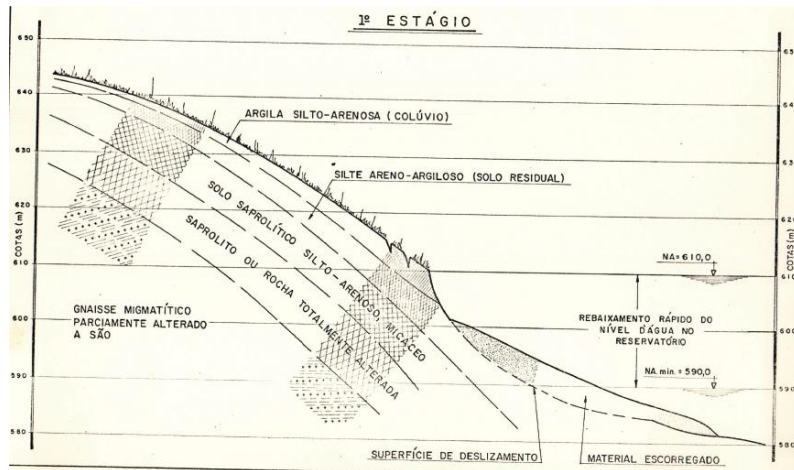


Figura 24: Deslizamento nas margens do reservatório de Santa Branca – 1º estágio (GEOTÉCNICA, 1983)

2º estágio:

No segundo estágio, as instabilizações se desenvolveram em níveis superiores nos taludes, atingindo os solos residuais e mesmos saprolíticos, num processo de escorregamentos sucessivos.

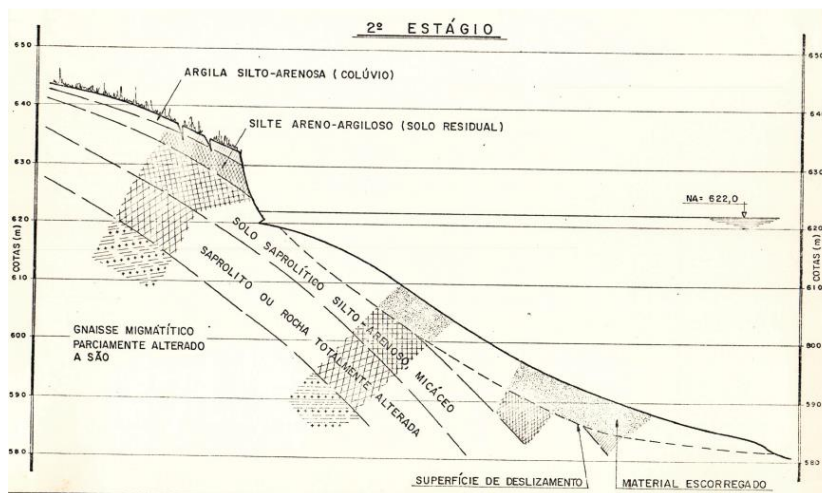


Figura 25: Deslizamento nas margens do reservatório de Santa Branca - 2º estágio (GEOTÉCNICA, 1983)

3º estágio:

O terceiro estágio caracteriza-se quando a ação de ondas na face dos taludes passa a ser o principal agente causador da evolução dos escorregamentos, e o embate das águas na superfície já atingiu a rocha alterada.

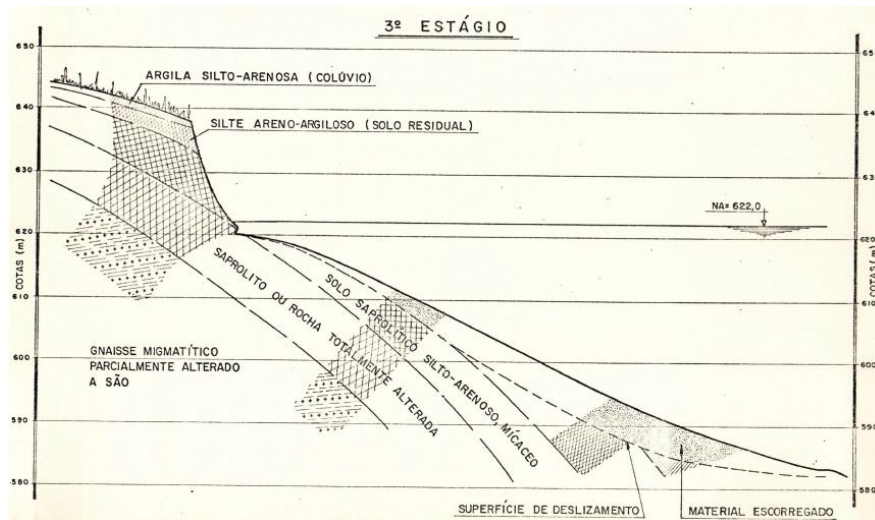


Figura 26: Deslizamento nas margens do reservatório de Santa Branca – 3º estágio (GEOTÉCNICA, 1983)

4º estágio:

Por fim, o quarto e último estágio caracteriza-se pelo grande porte atingido pelo processo evolutivo, após sucessivos anos em que a ação de ondas e de processos erosivos levaram os escorregamentos a atingir acima da cota 622,0m, alturas até 40m e volumes da ordem de 49000m<sup>3</sup>.

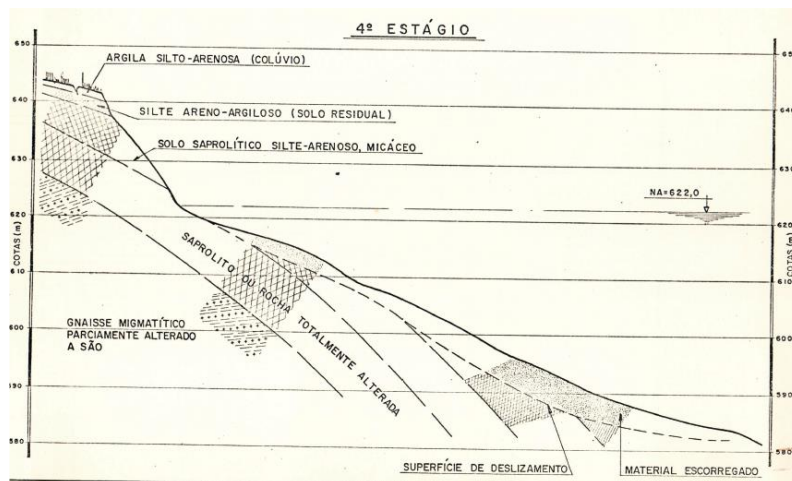
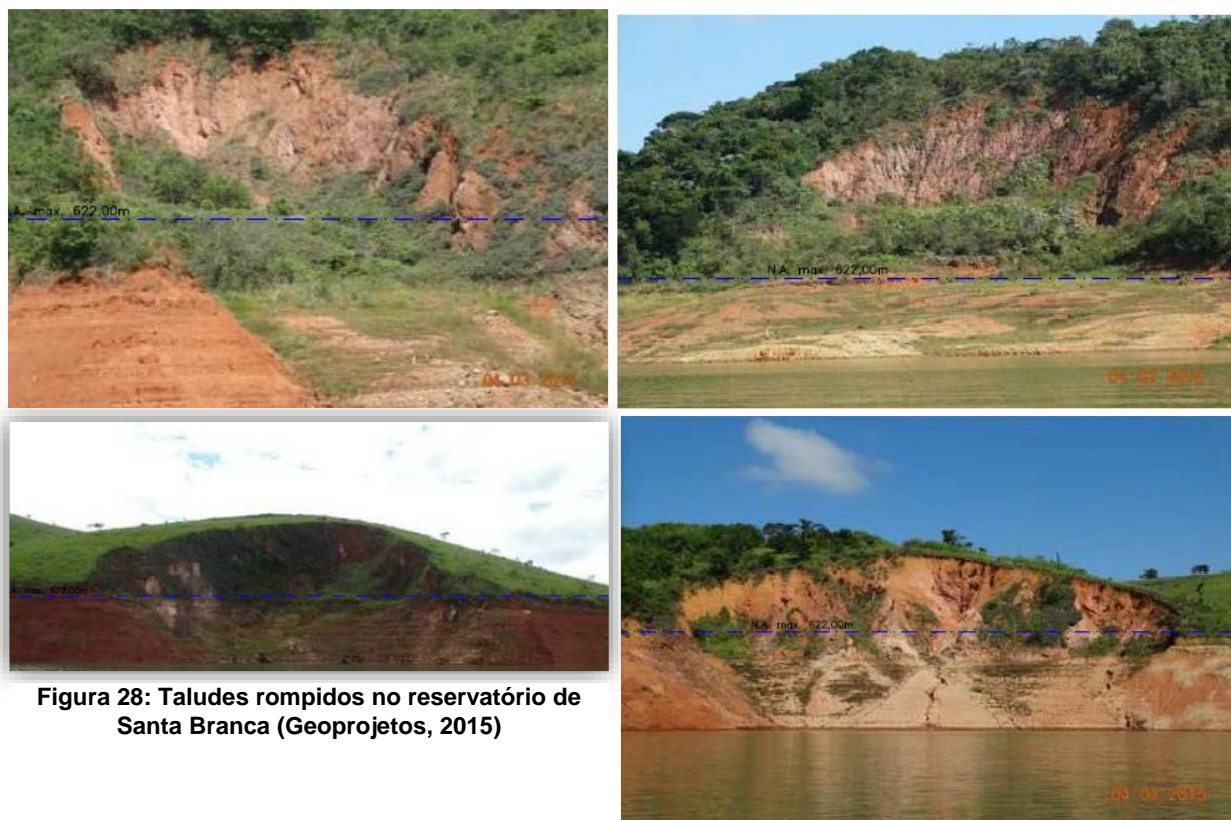


Figura 27: Deslizamento nas margens do reservatório de Santa Branca – 4º estágio (GEOTÉCNICA, 1983)

A este modelo se associam as rupturas maiores e mais profundas, ilustradas pelas fotografias a seguir.





**Figura 28: Taludes rompidos no reservatório de Santa Branca (Geoprojetos, 2015)**

Com base neste modelo, seguiu-se o estudo da estabilidade dos taludes marginais, com o objetivo de dar início à avaliação dos valores das taxas de rebaixamento do reservatório.

#### **4.1.1. Determinação da taxa de rebaixamento segura**

A determinação da taxa de rebaixamento segura foi realizada a partir do desenvolvimento de uma relação entre coeficientes de permeabilidade do terreno das encostas e os valores das velocidades de rebaixamento, para os quais os níveis d'água nos taludes acompanhariam o nível d'água do reservatório durante o período de esvaziamento.

O resultado desta avaliação indicou que a taxa de rebaixamento deveria se situar numa faixa entre 10 e 15 cm/dia, correspondente aos valores médios obtidos nos 12 últimos anos anteriores ao estudo. Desde então a Light Energia S.A. adotou essa faixa como parâmetro para a operação do reservatório de Santa Branca.

Adicionalmente, foram realizadas retro análises em escorregamentos típicos dos dois modelos geomecânicos das encostas do reservatório para verificar a confiabilidade dos mesmos adotados e avaliar a influência de fatores tais como inclinação dos taludes e espessura do manto de solo, bem como analisar as condições de nível d'água que deram origem às instabilidades, desta forma avaliando melhor as taxas de rebaixamento seguras.

Nestas análises foram adotados parâmetros de resistência efetivos médios obtidos de ensaios de cisalhamento direto realizados com amostras indeformadas coletadas na área dos escorregamentos típicos. A poropressão foi calculada das linhas de fluxo traçadas para cada hipótese de nível d'água freático.

A metodologia de análise empregada foi realizar duas análises de estabilidade em 4 situações:

Caso 1: Talude seco.

Caso 2.: NA do reservatório na cota 590,00m e nível freático na cota 622,00m, simulando o rebaixamento instantâneo, isto é, ocorre a taxas muito superiores às taxas de percolação no talude.

Caso 3 : NA do reservatório na cota 590,00m e nível freático na cota 606,00m, simulando o rebaixamento instantânea, simulando a condição em que a taxa de rebaixamento é equivalente ao dobro da taxa necessária para que a percolação acompanhe a descida do reservatório.

Caso 4 : NA do reservatório na cota 590,00m e nível freático na cota 590,00, simulando a situação em que o lençol d'água no talude acompanha a taxa de rebaixamento do reservatório.

Para os escorregamentos representativos do modelo geomecânico predominante no reservatório, foram adotadas as hipóteses de ruptura circular e talude saturado. Foi utilizado o método de análise Bishop Simplificado. Para cada caso, foram analisadas duas superfícies de ruptura, passando através de solos coluvionares e residuais, uma com cotas acima de 590,00m até 630,00, de inclinação mais suave e outra com cotas inferiores a 590,00m até o topo na 611,00, mais íngreme.

Para o modelo geomecânico de ocorrência mais restrita, foi considerada a ruptura planar e talude saturado, e, neste caso, foi empregado o método do Talude Infinito.

Os fatores de segurança médios resultantes das análises são apresentados na tabela a seguir.

**Tabela 8: Resumo dos resultados das análises de estabilidade (Geotécnica, 1983)**

SUPERFÍCIE DE DESLIZAMENTO	SUPERFÍCIE DE RUPTURA	COTA DO TOPO (m)	FATORES DE SEGURANÇA			
			CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
Circular	Tipo 1	630	1,27	0,78	0,88	1,23
	Tipo 2	611	1,52	0,88	0,88	1,4
Planar	-	-	-	0,63	1,01	2,7

O resultado é indicativo da existência da correlação da instabilidade dos taludes com a situação de rebaixamento rápido, porém, há que se destacar que no caso de encostas mais altas, a situação da estabilidade se revelou precária mesmo em condições de talude seco, com fator de segurança inferior ao requerido para a situação de operação normal do reservatório, tomando como base a Tabela 1.

#### 4.2. Análise de estabilidade sob rebaixamento rápido

O estudo da estabilidade dos taludes marginais de Santa Branca realizado pela Geotécnica é conceitualmente semelhante ao proposto por MORGERSTERN (1963), pois da mesma forma que nos ábacos, os fatores de segurança são obtidos por análises de estabilidade a partir de equilíbrio limite, em análises não drenadas, porém adotando-se parâmetros de resistência efetivos. O talude, embora geotecnicamente estratificado, foi simplificado para um material homogêneo a partir do emprego de valores médios para  $c'$  e  $\phi'$ .

Inicialmente intencionava-se realizar a verificação da estabilidade a partir dos métodos apresentados neste trabalho, porém isto não foi possível porque os dados disponíveis são insuficientes para qualquer das metodologias consideradas. Mesmo os ábacos de MORGERSTERN (1963), a mais simples das metodologias, não pode

ser aplicada porque não contempla entre seus gráficos os taludes existentes nas margens do reservatório 1:1,5.

O caso dos taludes de Santa Branca foi apresentado neste trabalho porque exemplifica o problema e as consequências, sobretudo ambientais, que a ocorrência de sucessivas rupturas em função de rebaixamento rápido pode ocasionar.

É um caso bastante representativo de situações que se pode vivenciar em usinas hidrelétricas reversíveis caso a estabilidade das margens não seja corretamente avaliada.

Adicionalmente, apresenta uma abordagem alternativa para o estudo da estabilidade de taludes naturais sujeitos a esta condição de projeto, que demonstra que a obtenção de dados suficientes e confiáveis para permitir aplicação de métodos mais atuais é essencial para um projeto adequado de usinas reversíveis.

## 5. Conclusões e Recomendações

O presente documento abordou a estabilidade de taludes quando ocorre um esvaziamento rápido de um reservatório de hidrelétrica para contribuir com a definição dos estudos geológico-geotécnicos e projetos de usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil.

Inicialmente foram levantados os principais condicionantes geotécnicos em usinas reversíveis e foi identificado o rebaixamento rápido é uma condição crítica a que taludes de barragens e marginais possivelmente estarão sujeitos em usinas reversíveis, em virtude dos ciclos operativos curtos, diários ou semanais, envolvendo esvaziamentos e reenchimentos sucessivos em dois reservatórios, sendo um superior e outro inferior.

Foram discutidas as consequências da ocorrência de rupturas sucessivas em margens de reservatório de hidrelétricas reversíveis, demonstrando-se que podem haver impactos econômicos e socioambientais relacionados a estas ocorrências. Resumidamente, rupturas sucessivas em margens afetar a geração de energia elétrica em decorrência de assoreamento, bem como colocar em risco a segurança de demais estruturas como barragens e vertedores em virtude ondas geradas no reservatório. Além disso, podem ter reflexo nas condições ambientais e sociais de populações ribeirinhas.

Então, o fenômeno do rebaixamento rápido e suas consequências para a estabilidade de taludes foi descrito. Foi compreendido que a instabilidade de um talude em função do rebaixamento rápido se dá pela conjugação dos seguintes efeitos: aumento das poropressões internas do talude, aumento do peso do talude e perda das forças

hidrostáticas estabilizadoras após o rebaixamento rápido. Foi esclarecido que o fenômeno está associado a solos de baixa permeabilidade, que não drenam a água do talude na mesma taxa que o rebaixamento, o que leva ao excesso de poropressões.

Foram identificados os principais fatores que influem na instabilidade sob estas condições, destacando-se a permeabilidade do material e a dependência do tempo.

As principais metodologias de análise disponíveis atualmente foram apresentadas. Foi identificado que as metodologias baseadas em equilíbrio limite exigem menos parâmetros de análise, porém no caso de geometrias complexas envolvendo heterogeneidade e anisotropia dos materiais, fornecem resultados menos representativos das condições reais em campo e mais conservadores. Sobretudo, não contemplam a variável tempo, sendo impossível verificar os fatores de segurança ao longo do esvaziamento. Esta abordagem de análise deve ser precedida da definição das condições de fluxo e assume-se solos perfeitamente drenantes ou completamente impermeáveis, situações extremas dificilmente encontradas em campo.

Já os métodos numéricos, como o Método de Elementos Finitos, conseguem representar de forma mais fidedigna as condições reais em campo, sendo possível simular condições de fluxo ao longo do tempo. Além disso, os materiais nas análises são caracterizados a partir inclusive da permeabilidade, não sendo necessário considerar uma condição extrema de fluxo. É possível ainda considerar as condições de saturação do solo ao longo do rebaixamento, a partir de parâmetros de sucção e retenção, que em geral contribuem para a estabilidade.

Por isso, nas duas últimas décadas, esta tem sido a abordagem mais empregada no sentido de compreender o fenômeno do rebaixamento rápido.

Em contrapartida verifica-se que o emprego de métodos numéricos exige a obtenção de muitos parâmetros e a realização de ensaios especiais, sendo este um grande limitador da ampliação de seu uso na prática corriqueira da engenharia.

O estudo da estabilidade das margens do Reservatório de Santa Branca, concessão da Light Energia SA foi apresentado como um exemplo significativo desta condição crítica: conta com quase trezentas rupturas que ocorreram quando a taxa de rebaixamento do reservatório era muito superior à taxa de percolação dos solos residuais de migmatito das margens. Foram apresentadas as etapas do estudo e verificou-se

que o estudo de estabilidade efetuado não empregou nenhuma das metodologias discutidas neste trabalho, porém, conceitualmente é similar ao proposto por Morgenstern (1963).

Desta forma, intencionava-se desenvolver o estudo com base nas demais metodologias apresentadas no capítulo 3, buscando uma abordagem comparativa para ilustrar as possibilidades de análises de estabilidade na condição de rebaixamento rápido. Porém, não haviam dados suficientes, visto que apenas se dispõe de parâmetros de resistência obtidos de cisalhamento direto.

Diante disto, procurou-se buscar outros casos para ilustrar os estudos de estabilidade de taludes naturais na condição de rebaixamento rápido, porém esta busca não foi bem-sucedida, por haverem pouquíssimos casos na literatura acadêmica que abordam situações como esta. Sobretudo, quando se trata de casos nacionais, a busca é ainda mais frustrante, pois não foram encontrados sequer estudos comparativo de estabilidade focados na condição crítica de rebaixamento rápido.

Esta busca frustrada de casos de estudo no Brasil, ao menos acessíveis à comunidade científica, corrobora com o entendimento apresentado na introdução deste trabalho de que há necessidade de evoluir na prática da aplicação das metodologias de estudo de estabilidade na condição de rebaixamento rápido. Em especial, quando se trata de taludes naturais, condicionados por geometrias e estratigrafias complexas.

Mesmo a bibliografia internacional, não apresenta muitos estudos em taludes marginais. A maioria dos trabalhos foca em taludes de montante de barragens, em hidrelétricas convencionais. Poucos abordam os ciclos de enchimento e reenchimento, cruciais para usinas reversíveis.

Porém, algumas conclusões destes estudos são sem dúvida, importantes e úteis para esta situação particular, destacadamente o fato de que os menores fatores de segurança podem ocorrer ao longo do rebaixamento e não somente ao final, e que nem sempre o emprego de métodos numéricos, um recurso que fornece resultados muito mais precisos do que métodos de equilíbrio-limite, será vantajoso.

Em geral, verificam-se resultados próximos, em termos de fator de segurança, quando lidamos com geometrias simples e materiais homogêneos, como em taludes

de montante de barragens. Assim, embora seja uma ferramenta poderosa, é preciso avaliar sua utilização com cuidado, visto que em geral exige maiores esforços na obtenção de dados confiáveis.

Por fim, com base no exposto, algumas recomendações para aprimoramento do escopo dos estudos geológico-geotécnicos do estudos de viabilidade técnica e econômica de usinas hidrelétricas reversíveis são apresentadas a seguir.

### **5.1. Recomendações para Estudos de Viabilidade Técnica e Econômica de Usinas Hidrelétricas Reversíveis**

- Incluir o mapeamento geológico do entorno dos reservatórios dentre as atividades dos estudos geológico-geotécnicos.

Desta forma, deve ser procedido caminhamento ao longo de todo perímetro dos lagos, para que seja possível identificar litologias e feições suscetíveis a deslizamentos na condição crítica de interesse.

O mapeamento deverá indicar as áreas de interesse para elaboração de investigações geológica-geotécnica nas margens, bem como quais tipos devem ser considerados.

- Realizar investigações de campo e de laboratório nas margens a fim de caracterizar geotecnicamente os materiais existentes nas encostas do reservatório.

Para a viabilidade devem ser consideradas as mesmas investigações de campo e ensaios de laboratório apontados no capítulo 1, acrescidas de ensaios que permitam a elaboração de modelos matemáticos mais precisos, caso o mapeamento aponte condições geológica-geotécnicas muito variadas e complexas.

Neste caso, devem ser previstos ensaios para determinação das curvas características de sucção.



- Incluir dentre as verificações de projeto a condição de ciclos de esvaziamento e reenchimento. Os critérios de projeto devem ser atualizados para as metodologias propostas pela USACE (2003) e por métodos numéricos.
- Incluir dentre os critérios de projeto, os critérios de projeto requeridos para as principais soluções de estabilização de taludes pensadas para a condição de rebaixamento rápido e para ciclos de enchimento e reenchimento.

## 5.2. Recomendações de estudos futuros

Entende-se que os estudos de talude na condição de rebaixamento rápido devem ser aprofundados no sentido de conhecer as potencialidades e limitações das metodologias disponíveis sobretudo aplicados aos taludes naturais brasileiros. Nesse sentido, são apresentadas as sugestões a seguir:

- Revisão de estudos de estabilidade de hidrelétricas convencionais com deplecionamento a partir das metodologias apresentadas e discutidas neste trabalho;
- Estudos comparativos de metodologias para análise de estabilidade na condição de rebaixamento rápido aplicados a solos típicos brasileiros, com dados obtidos de ensaios realizados em solos reais – neste contexto, o caso do Reservatório de Santa Branca pode ser um ponto de partida, por seu histórico completo e bem detalhado;
- Estudos que avaliem o grau de conservadorismo aceitável no emprego de metodologias de equilíbrio limite em detrimento de métodos numéricos, que não comprometa a viabilidade econômica de usinas hidrelétricas reversíveis;
- Desenvolvimento de metodologia de equilíbrio limite em múltiplos estágios para análises de estabilidade na condição ciclos de esvaziamento e reenchimento de reservatórios;

- Levantamento das soluções de projeto de controle de fluxo e impermeabilização de margens adotada em UHR em outros países;
- Análise de estabilidade comparativas considerando diferentes soluções de controle de fluxo e impermeabilização;
- Revisão de critérios de projeto com base nos estudos propostos acima.

## 6. Referências bibliográficas

ALBATAINEH, N. **Slope stability analysis using 2D and 3D methods**. Dissertação de mestrado (Engenharia Civil), Akron: Universidade de Akron, 2006.

ALMEIDA, P. F. DE. **Análise de estabilidade de barragens de aterro em fase de esvaziamento**. Dissertação de mestrado (Engenharia Civil), Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2013.

ALONSO, E. E.; PINYOL, N. M. **Landslides in reservoir and dam operation**<sup>2º International Conccress on Dam Maintance and Rehabilitation</sup>Zaragoza, Spain, 2010. Disponível em: <<https://books.google.com/books?hl=pt-BR&lr=&id=Cn7MBQAAQBAJ&pgis=1>>. Acesso em: 11 fev. 2017

ALONSO, E. E.; PINYOL, N. M.; OLIVELLA, S. Rapid drawdown in slopes and embankments. **Water Resourcers Research**, v. 44, p. 1–22, 2008.

ANEEL. **Resolução normativa 697/2015**, 2015.

BAKER, R.; FRYDMAN, S.; TALESNICK, M. Slope stability analysis for undrained loading conditions. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 17, n. 1, p. 15–43, 1993.

BELUCO, A. Três locais para implantação de usina hidrelétrica reversível ao sul dos aparados da serra, no litoral norte do RS. **Hidro e Hydro PCH Notícias e SHP News**, n. 52, p. 32–37, 2012.

BERILGEN, M. M. Investigation of stability of slopes under drawdown conditions. **Computers and Geotechnics**, n. 34, p. 81–91, 2007.

BROMHEAD, E. N. **The stability of slopes**. 2a. ed. E-book: Spon Press, 2005.

CANALES, F. A.; BELUCO, A.; MENDES, C. A. B. Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental - Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM**, v. 19, n. 2, p. 1230–1249, 2015.

CARDOSO, D. F. R. **Estudo de uma galeria de adução escavada em rocha funcionando sob pressão: a decisão do seu revestimento**. Dissertação de mestrado (Engenharia Civil) Porto: Universidade do Porto, 2008.

CASTRO, A. O. **Métodos para seleção de tuneladores e análise numérica de diferentes alinhamentos de túneis sujeitos a altas pressões hidráulicas**. Brasília: Universidade de Brasília, 2013.

CEDERGREN, H. R. **Seepage, Drainage and Flow Nets**. 2nd. ed. Hoboken: John Wiley and Sons, 1977.

CHALISGAONKAR, R.; MOHAN, M. **Prospects of developing pumped storage projects utilising the reservoir of exisisting hydropower**. International Conference on Hydropower for Sustainable Development. **Anais...Dehradun**: 2015

CHENG, Y. M.; LAU, C. K. **Slope Stability Analysis and Stabilization: New Methods and Insight**. Nova Iorque: Routledge, 2008.

CIGB. Barrages en Remblai Avec Masque en Béton Betumineux. **Bulletin 114, ICOLD**, p. 13–91, 1999.

DAVIDSON, B. J. ET AL. Large-scale electrical energy storage. **IEE Proceedings**

**A - Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews**, v. 127, n. 6, p. 345–385, 1980.

**DOE Global Energy Storage Database**. Disponível em: <<https://www.energystorageexchange.org/>>. Acesso em: 29 maio. 2016.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G. **Mechanics of Limit Equilibrium Procedures**. In: **Soil Strength and Slope Stability**. Hoboken: John Wiley and Sons, 2005. p. 55–102.

DUNCAN, M. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 122, n. 7, p. 577–596, 1996.

DUNCAN, James M.; WRIGHT, S. G.; WONG, Kai S. Slope stability during rapid drawdown. In: **Proceedings of the H. Bolton seed memorial symposium**. 1990. p. 253-72.

ELETROBRÁS. **Eletrobrás - Levantamento de potencial de UHR - Região Sudeste**, 1987.

ELETROBRÁS. **Eletrobrás - Levantamento de potencial de UHR - Região Nordeste**, 1988a.

ELETROBRÁS. **Eletrobrás - Levantamento de potencial de UHR - Região Sul**, 1988b.

ELETROBRÁS. **Instruções para Estudos de Viabilidade de Usinas Hidrelétricas**, 1997.

ELETROBRÁS/CBDB. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**, 2003.

**EMAE - Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A.** Disponível em: <<http://emae.com.br/conteudo.asp?id=Elevatórias>>. Acesso em: 23 abr. 2016.

**EPRI. Pumped Storage Planning and Evaluation Guide**, 1990.

**ESB - Electricity Supply Board.** Disponível em: <<https://esbarchives.ie/portfolio/turlough-hill/>>. Acesso em: 27 fev. 2017.

**FAGUNDES, L. S. Avaliação Da Resistência Ao Cisalhamento de um Solo Tropical.** Dissertação de mestrado (Engenharia Civil e Ambiental), Bauru: UNESP, 2014.

**FERC: Hydropower - Pumped Storage Projects.** Disponível em: <<https://www.ferc.gov/industries/hydropower/gen-info/licensing/pump-storage.asp>>. Acesso em: 23 abr. 2016.

**FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas – Aplicações na estabilidade de taludes.** Curitiba: Editora UFPR, 2011.

**FUJIHARA, T.; IMANO, H.; OSHIMA, K.** Development of Pump-Turbine for Seawater Pumped Storage Power Plant. **Hitachi Review**, v. 101, n. 5, p. 199–202, 1998.

**GEOTÉCNICA. Estudo de diagnóstico, causas e análise de soluções para os deslizamentos às margens do Reservatório de Santa Branca - PR-12.0051/83 - Volume 1**, 1983.

**GERSCOVICH, D. Estabilidade de Taludes.** E-book: Oficina de Textos, 2012.

**HUANG, M.; JIA, C. Q.** Strength reduction FEM in stability analysis of soil slopes subjected to transient unsaturated seepage. **Computers and Geotechnics**, v. 36, n. 1–2, p. 93–101, 2009.

IPT-CESP. **Relatório nº 17/316**, 1979.

JIA, G. W. et al. Performance of a large-scale slope model subjected to rising and lowering water levels. **Engineering Geology**, v. 106, n. 1–2, p. 92–103, 2009.

JONES, F. O.; EMBODY, D. R.; PETERSON, W. L. **Landslides Along the Columbia River Valley, Northeastern Washington - U.S. Geological Survey professional paper 367**. Washigton: U.S. Government Print, 1961. Disponível em: <<https://books.google.com/books?hl=pt-BR&lr=&id=gouEMRYtnUkC&pgis=1>>. Acesso em: 12 fev. 2017.

KORITAROV, V. et al. Advanced PSH Final Report. **Argonne National Laboratory**, v. 1, 2014.

MADLENER, R.; SPECHT, J. M. **An Exploratory Economic Analysis of Underground Pumped-Storage Hydro Power Plants in Abandoned Coal Mines Reinhard Madlener and Jan Martin Specht February 2013 Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior ( FCN )**. [s.l: s.n.].

MANWARING, M.; MURSCH, D.; TILFORD, K. **Challenges and Opportunities for New Pumped Storage Development: A White Paper developed by NHA's Pumped Storage Development Council**, 2012.

MELLO, F. M. DE. **Recuperação de Barragens e de Reservatórios - Relato do Tema**. XVI Seminário Nacional de Grandes Barragens - CBDB. **Anais...**Belo Horizonte: 1985

MELLO, F. M. DE. **Contribuição pessoal do autor**, 2017.

MME/EPE. Plano Decenal de Energia 2024. **Empresa de Pesquisa Energética**, p. 467, 2015.

MORGERSTERN, N. Stability charts for earth slopes during rapid drawdown. **Geotechnique**, v. 13, n. 2, p. 121–131, 1963.

MOTA, I. M. **Análise ds critérios de projeto e comportamento dos túneis sob pressão**. Dissertação de mestrado (Engenharia Civil), Brasília: Universidade de Brasília, 2009.

**Newkirk Electric**. Disponível em: <<http://www.newkirk-electric.com/>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

PARKER, H. Planning and site investigation in tunneling. **1º Congresso Brasileiro de Túneis e Estructuras Subterrâneas - Seminário Internacional South American Tunneling**, p. 1–6, 2004.

PÉREZ-DÍAZ, J. I. et al. **Technological Developments for Pumped-Hydro Energy Storage** EERA Report, 2014.

PIMENTA, J. F.; MAURO, V. **Verificação do circuito hidráulico de geração do AHE Salto Pilão na ocorrência de transitórios**. XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens - CBDB. **Anais...**2005

PINYOL, N. M.; ALONSO, E. E.; OLIVELLA, S. Rapid drawdown in slopes and embankments. **Water Resources Research**, v. 44, p. 0–3, 2008.

ROBERTS, B. Capturing Grid Power 32. **Power and Energy Magazine - IEEE** , v. 7, n. 4, n. august, p. 32–41, 2009.

RUNYON, J. Location, location, location: massive pumped storage+PV project closer to reality. **Hydro Review, Hydro Review World Wide e Renewable Energy World Special Report**, p. 7–10, 2016.

SOUZA, A. S. DE. **Operação econômica de usinas reversíveis**. Dissertação de



mestrado (Engenharia Elétrica), Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1980.

STEPHENSON, D. Drawdown in embankments. **Géotechnique**, v. 28, n. 3, p. 273–280, 1978.

USACE. **Engineering Manual - Slope Stability**, 2003.

VIRATJANDR, C.; MICHALOWSKI, R. L. Limit analysis of submerged slopes subjected to water drawdown. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 43, n. 8, p. 802–814, 2006.

VOITH. **Multifunctional Power Plant Pumped storage - A successful energy transition with pumped storage hydropower plants**, 2014.

YANG, C. J. Pumped Hydroelectric Storage. In: LETCHER, T. M. (Ed.). . **Storing Energy: With Special Reference to Renewable Energy Sources**. [s.l.] Elsevier Ltda, 2016. p. 25–38.

YANG, C. J.; JACKSON, R. B. Opportunities and barriers to pumped-hydro energy storage in the United States. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 839–844, 2011.

ZUCULIN, S.; PINTO, M. A. R. R. C.; BARBOSA, P. S. F. A retomada do conceito de usinas hidrelétricas reversíveis no setor elétrico brasileiro. **Seminário Eletronorte**, 2014.