

Análise de Tensão e Deformação em Barragens de Enrocamento Visando a Utilização da Geomembrana como Elemento de Impermeabilização

Guilherme Henrique de Oliveira
Universidade Positivo, Curitiba-PR, Brasil, guilherme.ho@hotmail.com

Kleber Ribeiro Rodrigues
Universidade Positivo, Curitiba-PR, Brasil, kr-engenharia@hotmail.com

Gui Romero Pancote
Universidade Positivo, Curitiba-PR, Brasil, gui.pancote@gmail.com

Pablo Fernando Sanchez
Universidade Positivo, Curitiba-PR, Brasil, pablosanchez@up.edu.br

RESUMO: Barragens de enrocamento de grandes alturas no Brasil na maioria das vezes são construídas com sua face impermeabilizante feita em concreto. As diferentes características de deformabilidade dos materiais envolvidos geram problemas relacionados às deformações diferenciais após o enchimento do reservatório, podendo ocasionar o aparecimento de trincas e fissuras na laje de concreto. Uma alternativa a este problema é o uso de geomembrana como meio impermeabilizante, devido à flexibilidade que o material apresenta. No intuito de verificar se as tensões e as deformações entre a geomembrana e o maciço de enrocamento são compatíveis entre si, este estudo analisou um modelo hipotético de barragem de grande altura. Foram analisados diferentes módulos de deformabilidade do enrocamento e da fundação, considerando etapas de carregamento conforme as etapas de execução e operação. Utilizou-se um software que aplica o método dos elementos finitos para estruturas bidimensionais, considerando o regime elasto-plástico para a geomembrana e plástico para os maciços de enrocamento e de fundação. Foi possível observar a necessidade de aprimoramento na determinação dos parâmetros de deformabilidade do enrocamento e da fundação, pois existem variações significativas com o aumento das tensões confinantes, o que ocorre durante o período construtivo e enchimento do reservatório. Esta consideração resultaria em deformações ainda inferiores as encontradas, que até certo ponto consideraram variações nestes parâmetros. Mesmo assim, pode-se considerar que os resultados são satisfatórios, uma vez que a geomembrana suportou as deformações impostas pelos maciços da barragem e fundação, trabalhando sempre em regime elástico. Portanto, considera-se benéfico o uso da geomembrana para a finalidade analisada, pois além de garantir a impermeabilização da estrutura, tende também a minimizar os custos devido à maior facilidade executiva.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de Enrocamento, Geomembrana, Impermeabilização, Análise de Tensão-Deformação e Métodos dos Elementos Finitos.

1 INTRODUÇÃO

A construção de barragens é tão antiga quanto à história do homem e há registro de barragens

em praticamente todas as culturas (CRUZ, 1996).

As barragens são obstáculos artificiais com a capacidade de reter água, rejeitos, detritos ou

qualquer outro líquido, para fins de armazenamento ou controle. Elas podem variar desde pequenos maciços de terra, usados frequentemente em fazendas, a enormes estruturas de concreto ou de aterro, geralmente usadas para armazenamento de água, controle de cheias e irrigação. Os principais tipos de materiais empregados na construção de barragens são: terra, enrocamento, concreto ou uma combinação destes materiais (CMB, 2000).

No Brasil, as barragens de enrocamento são usualmente adotadas com a face de montante em concreto armado moldado in loco. Sua função é a impermeabilização do maciço e tem como principal desvantagem a elevada rigidez da face de concreto comparada à do maciço de enrocamento da barragem, podendo ocasionar o aparecimento de fissuras e trincas, oriundas das deformações do maciço após o enchimento do reservatório. Alguns acidentes já foram constatados devido à face rígida (CRUZ, 1996).

Uma alternativa para a vedação da face de montante de barragens de enrocamento é o uso da geomembrana, que garante a impermeabilização da estrutura e é flexível. As geomembranas mais usuais para impermeabilização da face de montante das barragens são compostas por polímeros. As de PVC e PEAD são adotadas em várias partes do mundo (REBELO, 2009).

O objetivo deste estudo foi analisar o comportamento de tensão e deformação em uma barragem hipotética de enrocamento de grande altura (150 m), verificando as deformações ocorridas na face de montante e utilizando a geomembrana como elemento de impermeabilização.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Comportamento Tensão-Deformação em Barragens de Enrocamento

O enrocamento e a fundação de uma barragem se deformam, modificando o seu volume e forma inicial. A magnitude das deformações depende de suas propriedades elásticas e plásticas e do carregamento a eles impostos. As tensões são distribuídas pela área de contato das partículas que transmitem forças normais e

tangenciais às outras, como essa área é muito pequena em relação à área total do enrocamento, despreza-se a informação e assume-se que todos os pontos do maciço, incluindo os pontos onde têm vazios, devem assumir a característica dos materiais envolvidos no enrocamento (PINTO, 2011).

Tabela 1- Principais características de três barragens de enrocamento com face de concreto construídas no Brasil. (FERNANDES, 2007 e WATZKO, 2007)

Barragem / Características	Foz do Areia	Segredo	Machadinho
Altura (m)	160	145	125
Ano de conc.	1980	1993	2001
Litologia	Basalto	Basalto	Basalto
Talude de mont.	1:1,4	1:1,3	1:1,3
Talude de jus.	1:1,4	1:1,4	1:1,3
Peso espec. real da rocha (kN/m³)	28,1	28,9	27,6
Peso espec. aparente do enrocamento (KN/m³)	21,2	21,0	21,0
Índice de vazios	0,33	0,37	0,31
Módulo de deformabilidade. Enrocamento (MPa)	47	60	20 a 45

A análise da fundação das barragens de enrocamento também é de fundamental importância para determinar as deformações que podem ocorrer no enrocamento e na face impermeabilizante, pois elas podem recalcar e acentuar as deformações do maciço. A resistência das fundações depende do tipo do material encontrado no local. Rochas, como Basalto, por exemplo, podem chegar a valores de 250 MPa para o módulo de deformabilidade, enquanto fundações em aluvião atingem valores bastante inferiores, próximos a 30 MPa. Já o coeficiente de Poisson para ambos os materiais pode ser considerado próximo de 0,25 (TEIXEIRA, 2000).

Em relação ao módulo de deformabilidade dos enrocamentos das barragens, estes podem sofrer alterações significativas durante a fase de enchimento do reservatório, ocasionado pelo confinamento. Basso (2007) apresenta referências que mostram que o módulo de deformabilidade das rochas basálticas pode aumentar em média 3 vezes o seu valor nessa situação.

2.2 Características da geomembrana

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, através da NBR 10318/2003, regulamenta a geomembrana como sendo um material de baixíssima permeabilidade, composto predominantemente por asfalto, elastômeros ou plastômeros.

Na escolha da geomembrana deve-se avaliar o seu comportamento em relação a propriedades como flexibilidade, permeabilidade, rigidez, atrito, resistência à tração, ao puncionamento, ao estouro, ao rasgo e a agentes químicos. O PEAD é a alternativa tecnológica mais avançada atualmente, levando em consideração trabalhabilidade, resistência e capacidade de implantar aditivos para cada uso específico (LODI, 2003; COLMANETTI, 2006).

A função da geomembrana em barragens é a de impermeabilização e não é esperado que ela contribua ou influencie no comportamento mecânico da estrutura. (COLMANETTI, 2006).

Com a aplicação de carregamentos sobre a geomembrana, esta sofre deformações que geram esforços de tração até encontrar a tensão de escoamento ou de ruptura, ou até se adaptar completamente à face da barragem e ao subleito adjacente (REBELO, 2009).

Lodi (2003) avaliou o comportamento das propriedades físicas e mecânicas das geomembranas de PEAD, abordando ensaios conforme normas da ASTM e chegou aos resultados apresentados na Tabela 1 para a geomembrana de PEAD com 2,5 mm de espessura, que foi a máxima espessura ensaiada.

Tabela 1 – Propriedades de amostras PEAD. (COLMANETTI, 2006).

Geomembrana	Espessura (mm)	Gramatura (g/m²)	Densidade (g/cm³)				
PEAD 2,50mm	2,48	2562	0,95				
Propriedades							
Escoamento			Ruptura				
E (mm)	F (N)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	σ (MPa)	ε (%)
2,5	270	19	15	406	436	29	1277
e (mm)		Punção F (N)			δ (cm)	Rasgo F (N)	
2,5		911			1,3	338	

onde:

e = espessura; F = força aplicada; σ = tensão aplicada;
 ε = deformação específica; E = módulo de elasticidade;
F = força máxima; δ = deslocamento.

2.3 Análise de tensão *versus* deformação via método dos elementos finitos

O dimensionamento de barragens é uma área específica dentro da engenharia estrutural, onde o método dos elementos finitos é, neste contexto, um método de solução aproximada de equações, muito útil em análise de estruturas. A visualização computacional também tem seguido a implementação dos cálculos por este método, permitindo uma análise visual das situações (DELGADO, 1985).

No âmbito da engenharia de estruturas, o método dos elementos finitos tem como objetivo a determinação do estado de tensão e deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeita a ações exteriores. Este método auxilia no cálculo de estruturas de barragens (AZEVEDO, 2003).

A ideia principal do método consiste em dividir a estrutura em análise em sub-regiões de geometria simples. As sub-regiões apresentam dimensões finitas e são chamadas de "elementos finitos" onde são analisados individualmente e em conjunto, para isso são definidas a geometria dos elementos, o número de pontos, as condições de contorno, as variáveis primárias, secundárias, as funções de interpolação e o sistema global de equações (KIM, 2011).

3 METODOLOGIA

Este estudo analisou o comportamento tensão versus deformação em um modelo de barragem hipotético de enrocamento de grande altura (150m), via método dos elementos finitos, visando a utilização da geomembrana como elemento de vedação. A análise foi feita em um estado plano de deformações, através de uma análise bidimensional, com meio contínuo, isotrópico e de geometria linear.

Foi considerado o modelo elasto-plástico e o critério de ruptura de Mohr-Coulomb para os materiais. Os parâmetros do maciço de

enrocamento foram obtidos através de bibliografia, considerando os parâmetros de resistência e deformabilidade médios em barragens do Brasil, conforme apresentado na revisão bibliográfica.

O tipo de rocha para o enrocamento e a fundação utilizado na análise foi o basalto, presente em diversas barragens de enrocamento brasileiras.

3.1 Características do enrocamento e fundação

Para determinação das características do enrocamento, foram tomados como referência estudos das principais barragens de enrocamento com executadas no Brasil, conforme foi apresentado na Tabela 1. Na Tabela 3 são apresentadas as características geométricas da barragem adotadas na análise:

Tabela 3 - Características da barragem de enrocamento em análise.

Altura (m)	150
Talude montante	1:1,6
Talude jusante	1:1,6
Peso específico do enrocamento (kN/m ³)	27
Tipo de rocha	Basalto
Módulo de deformabilidade (MPa)	60

A altura adotada da barragem foi de 150 m, altura média das barragens de grande altura construídas no Brasil.

A inclinação do talude a montante adotada foi de 1:6, pois de acordo com LODI (2003), para a instalação da geomembrana é recomendada uma inclinação menor que 35°. A inclinação da face da barragem em análise neste estudo ficou com 32°. À jusante foi adotada a mesma inclinação dos taludes, mas podem ser adotadas inclinações maiores para tentar minimizar o volume total do enrocamento.

3.2 Análise de tensão e deformação

Definidas as características do maciço, foi verificado o seu comportamento através de simulações com uma versão educacional temporária do programa Phase2 da Rockscience que é um software de análise de tensão versus

deformação que utiliza o método dos elementos finitos em estruturas bidimensionais. O software permite a modelagem em etapas, levando em consideração as propriedades dos materiais, sua resistência, deformabilidade e permite a análise da geomembrana, trabalhando em regime elasto-plástico, em conjunto com o maciço.

3.3 Modelo de análise

A análise da resistência da geomembrana se dará junto à do maciço, uma vez que a deformação da geomembrana dependerá da deformação do maciço de enrocamento.

A rocha adotada para análise do enrocamento foi o basalto, com seu módulo de deformabilidade de 60 MPa, conforme apresentado na Tabela 3.

A fundação foi analisada com módulo de deformabilidade médio de 250 MPa, considerando a situação da barragem apoiada em uma rocha basáltica maciça.

Foi utilizada a geomembrana de 2,5 mm na análise, pois se trata de uma barragem de grande altura, sendo essa a espessura máxima que se tem dados dos ensaios na literatura, conforme apresentado na Tabela 1.

Para o material da interface, entre o enrocamento e a geomembrana, considerou-se o módulo de deformabilidade, o coeficiente de Poisson e o ângulo de atrito de uma areia média compactada.

A hipótese adotada foi processada com os parâmetros descritos apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de cálculo da Hipótese

Maciços e Interface	
Peso específico (kN/m ³)	27
Coef. de Poisson	0,25
Ângulo de atrito	40
Coesão (kPa)	0
Módulo de deformabilidade Interface (MPa)	40
Módulo de deformabilidade Enrocamento (MPa)	60
Módulo de deformabilidade Fundação (MPa)	250
Geomembrana	
Módulo de elasticidade a tração (MPa)	400
Tensão de pico (MPa)	29
Tensão Residual (MPa)	19

Em seguida foi definida a malha a ser

utilizada, neste caso foi adotada uma malha triangular, pelo fato de os parâmetros serem médios, retirados da bibliografia, não é necessária uma malha com refinamento maior, sendo o número de nós suficiente para a análise. Foram determinados os apoios, ou seja, as condições de contorno da análise, as etapas de execução e considerado o carregamento da água, conforme ilustra a Figura 1.

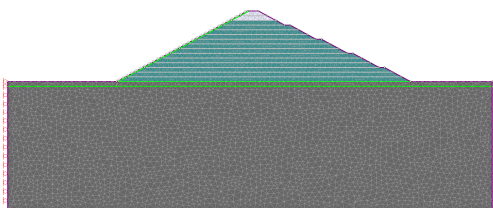


Figura 1 – Modelo da barragem utilizada no software.

A fundação teve sua profundidade estabelecida como sendo 1,5 vezes a altura da barragem, para não impedir deformações em pequenas profundidades, conforme ilustra a Figura 1.

A execução do enrocamento realizada em etapas, onde cada etapa foi considerada com 10 metros de altura e a cada duas etapas (20 m) foi considerada a alteração do módulo de deformabilidade do maciço, ou seja, foi levado em consideração o aumento do módulo em 3 (três) vezes. Esse aumento é devido ao confinamento, conforme constatado na literatura e apresentado na revisão bibliográfica. Após cada etapa executada do enrocamento, foi considerada a execução de uma interface em material mais fino e homogêneo, no caso foi utilizada a areia média compactada para apoio da geomembrana, com espessura de 3 m e a mesma altura das etapas do enrocamento. Essas análises são representadas na Figura 2.

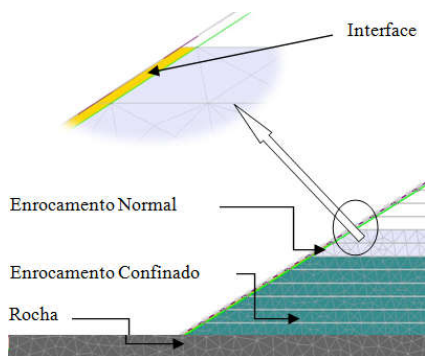


Figura 2 – Etapas construtivas do maciço

A geomembrana foi analisada em conjunto com o maciço, após a execução do enrocamento e da interface de areia. Ela foi representada como uma camada geossintética, suas propriedades são apresentadas na Figura 3.

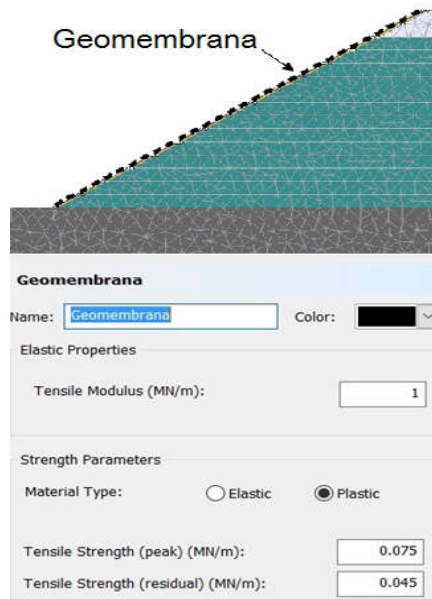


Figura 3 – Parâmetros da geomembrana

Para que os valores do módulo de elasticidade a tração, tensão de escoamento e ruptura que anteriormente encontravam-se em MPa (MN/m^2), fossem inseridos corretamente no software, que os solicita em MN/m , foi necessário multiplicar pela espessura, 0,0025m, resultando assim em valores de módulo de elasticidade igual a 1MN/m , tensão de ruptura igual a $0,075\text{MN/m}$ e escoamento igual a $0,0475\text{MN/m}$. Conforme é possível visualizar na Figura 3.

Após o assentamento da geomembrana, foi considerado o enchimento gradativo do reservatório até a cota de 148 m, em etapas iguais às da fase construtiva, a cada 10 m. A Figura 4 ilustra a etapa inicial, intermediária e final do enchimento do reservatório. Para cálculo das tensões provenientes do enchimento do reservatório o software leva em relação o peso específico da água ($0,009810\text{ MN/m}^3$) e altura da coluna da água nos pontos analisados em metros.

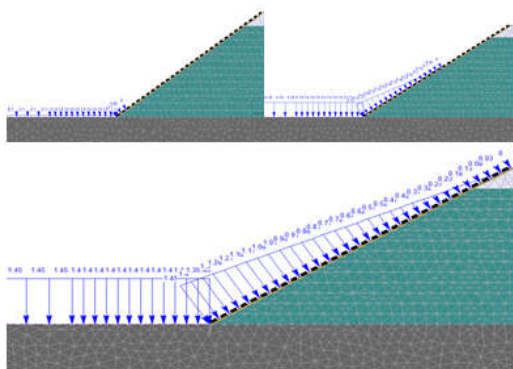


Figura 4 – Etapas de enchimento do reservatório

Definidas a geometria, a malha, as condições de contorno, as etapas e os carregamentos, foi rodada a hipótese de acordo com os parâmetros apresentados.

4 RESULTADOS

Com fim de se chegar o mais próximo dos deslocamentos obtidos na realidade, as hipóteses foram consideradas deformáveis após a execução do enrocamento, considerando-se que os deslocamentos ocorridos nas etapas construtivas foram corrigidos e foram considerados os deslocamentos durante o enchimento, a Figura 5 apresenta a distribuição da tensão principal maior (σ_1) na barragem e as forças de tração máxima e mínima atuantes na geomembrana.

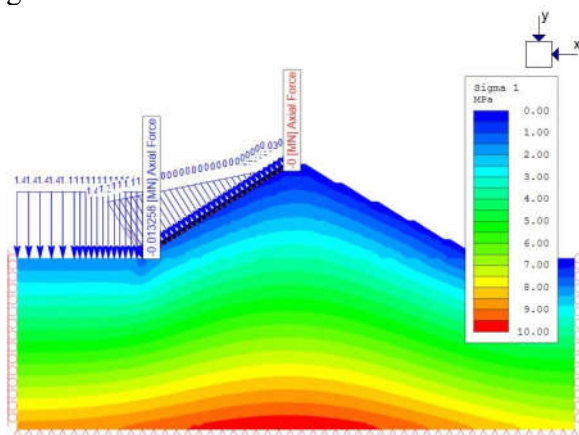


Figura 5 - Tensão principal maior na barragem e a força de tração máxima e mínima atuante na geomembrana.

A Figura 6 apresenta os deslocamentos totais da barragem e o máximo deslocamento da face durante o enchimento.

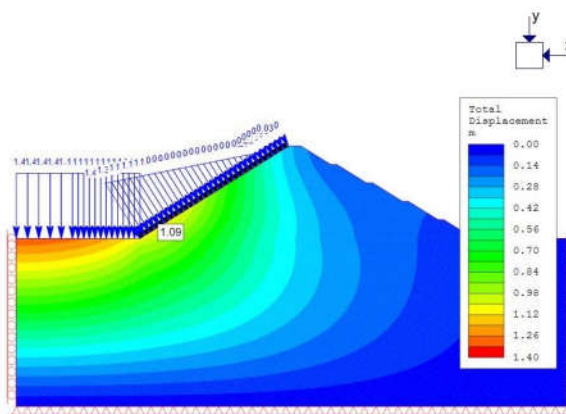


Figura 6 - Deslocamentos totais após o enchimento do reservatório.

A Figura 7 apresenta o sentido dos deslocamentos ocorridos na barragem para hipótese 1.

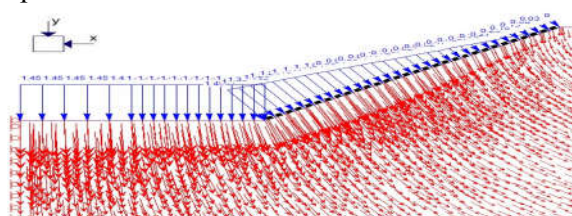


Figura 7 - Sentido dos deslocamentos na face.

Analisando os resultados, é possível verificar que considerando zerados os deslocamentos do período construtivo e analisando os deslocamentos durante o enchimento, a geomembrana sofre um esforço de tração máximo de 0,0133 MN.

Após o processamento e análise dos resultados foi possível verificar que apesar da geomembrana resistir aos esforços de tração solicitados, os deslocamentos obtidos para a barragem e a fundação estavam um pouco maiores se comparados do que os obtidos em casos reais de barragens de enrocamento com face em concreto, observados nos estudos de Basso (2007). Isso pode ter ocorrido pelo fato de terem sido adotados valores médios dos módulos de deformabilidade, entretanto esses módulos aumentam de acordo com o confinamento, chegando-se a um momento em que não se deformam mais. Não foram encontradas referências a esse aumento na literatura, a não ser a relação do aumento de 3 vezes que foi empregada com base no estudos citados por Basso (2007). Porém esse aumento é devido somente ao enchimento do reservatório,

sendo que existe um aumento ainda maior devido ao peso das próprias camadas de enrocamento, que geram tensões ainda maiores.

Além disso, a consideração da espessa camada de fundação também gerou deformações excessivas, sendo necessário considerar um limite para a sua deformação. Entretanto, mesmo com as limitações do estudo apresentado, a geomembrana garantiu a impermeabilização, trabalhando sempre no regime elástico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados e análises apresentados, verifica-se que a aplicação da geomembrana de PEAD de 2,5mm como elemento impermeabilizante na face de barragens de enrocamento de grandes alturas mostra-se satisfatório dentro das limitações das análises realizadas, sendo necessário um estudo específico de caso para sua execução.

Foi possível verificar que o esforço de tração atuante na geomembrana, devido aos deslocamentos gerados pelo enchimento do reservatório, não atinge valores de escoamento para o regime plástico. Assim, a geomembrana trabalha em regime elástico, assegurando a impermeabilização da barragem.

Entretanto, como barragens demandam uma grande quantidade de material e este deve ser obtido o mais próximo possível do local de instalação, faz-se necessária uma avaliação criteriosa de cada situação para que se possa prever o comportamento individual de cada barragem e escolher a melhor solução. Para isso é necessário um estudo detalhado do solo ou rocha de fundação, planejar os tipos de materiais presentes na barragem, podendo separá-los em zonas e verificar o aumento das tensões de confinamento no enrocamento, na interface e na fundação através de ensaios específicos de laboratório.

Apesar de o estudo ter trabalhado com valores médios de deformabilidade e os deslocamentos terem sido maiores do que os que encontrados na realidade, é possível concluir que há viabilidade nesta alternativa para obras de engenharia. Além de garantir a

impermeabilização da estrutura, a geomembrana tende a minimizar os custos de impermeabilização da face de barragens de enrocamento, uma vez que sua aplicação é mais simples, pois dispensa a execução da laje em concreto de montante, com várias articulações e juntas e podendo apresentar fissuras. Além disso, a geomembrana não é tão dependente das condições climáticas para sua execução, o que torna sua execução mais rápida do que a alternativa de facear a barragem com concreto, que é atualmente a mais difundida no Brasil. Porém é necessário analisar especificamente cada caso para se optar pela sua execução.

O estudo sobre a impermeabilização da face de barragens de enrocamento envolve pontos isolados que necessitam de análises mais aprofundadas. Alguns pontos importantes a serem considerados em trabalhos futuros podem ser:

- Consideração do confinamento do enrocamento durante o período construtivo;
- Consideração do confinamento de diferentes materiais na fundação (rocha, aluvião);
- Consideração do confinamento na camada de interface;
- Consideração de outras espessuras de geomembrana;
- Limitação da deformação da fundação;
- Análise em 3 dimensões, considerando o confinamento lateral do maciço;

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 10318 (2003) *Geossintéticos – Terminologia*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- AZEVEDO, A. F. M. (2003) - *Método dos Elementos Finitos*.
- BASSO, Rafael Vinícius (2007) *Estudo tensão-deformação de um enrocamento visando barragens de enrocamento com face de concreto*. USP tese de doutorado. Universidade de São Paulo.
- CMB. ASMAL, K. (2000) *Dams and development - a new framework for decision-making*". London, England: Earthscan Publications Ltd.
- COLMANETTI, J. P. (2006) *Estudo sobre a aplicação de geomembranas na impermeabilização da face de montante de barragens de enrocamento*.
- CRUZ, P. T. 100 (1996) *Barragens Brasileiras*. São Paulo: Editora Oficina de Textos.

- DELGADO, R. M. O (1985) *método dos elementos finitos na análise dinâmica de barragens incluindo a interação sólido líquido*.
- FERNANDES, A. R. D. Relato (2007) - *Tema 100 - Construções de Barragens*. XXVII seminário nacional de grandes barragens.
- KIM, N.H - *Introdução à análise e ao projeto em elementos finitos*. Editora LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda (2011).
- LODI, P. C. - *Aspectos de degradação de geomembranas poliméricas de polietileno de alta densidade (PEAD) e de policloreto de vinila (PVC)*. São Paulo (2003).
- PINTO, Carlos Souza (2011) *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas*. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 3ª Edição.
- REBELO, K. M. W. (2009) *Avaliação de camadas de proteção para geomembranas de PVC e PEAD*.
- TEIXEIRA, W. (2000) *Decifrando a Terra*. São Paulo: Editora Oficina de Textos.
- WATZKO, A. (2007) *Barragens de enrocamento com face em concreto no Brasil*