

ESTUDO DAS TENSÕES EM BARRAGENS DEVIDO AO PESO PRÓPRIO DA ESTRUTURA E A FORÇA HIDROSTÁTICA

José Jobson Silva de LIMA¹

Luiz Florival CIPRIANO ²

Giuseppe Cavalcanti VASCONCELOS ³

¹Bacharelado em Engenharia Civil pelo Instituto de Educação Superior da Paraíba,
limajobson@gmail.com

¹Docente de Engenharia Civil do Instituto de Educação Superior da Paraíba,
ciprianoprofessor10@gmail.com

¹Docente de Engenharia Civil do Instituto de Educação Superior da Paraíba,
giuseppecv@gmail.com

RESUMO: O presente estudo reúne aspectos da mecânica das estruturas aplicados às barragens utilizando para isso referências de trabalhos que utilizaram o Método dos Elementos Finitos. São estudados os esforços aplicados nos equipamentos que compõem os maciços de terra e de concreto, assim, como os de terra enrocada, colocando em pauta como calcular as cargas atuantes geradas pelo peso e movimento dos fluidos ali represados, assim como as forças do próprio maciço sobre sua infraestrutura (fundações). Ao final, são apontados cuidados e técnicas para prevenir sinistros que possam vir a ocasionar relevantes perdas humanas, culturais, ambientais, econômicas e sociais.

PALAVRAS-CHAVE: Mecânica dos Fluidos; Empuxo de terra; Engenharia Geotécnica.

ABSTRACT: The present study brings together aspects of the mechanics of the structures applied to the dams. The efforts applied in the equipments that make up the masses of earth and concrete are studied, as well as the ones of crushed earth, putting in question how to calculate the active loads generated by the weight and movement of the dammed fluids, as well as the forces of the massif itself infrastructure (foundations). At the end, care and techniques are pointed out to prevent accidents that could cause significant human, cultural, environmental, economic and social losses.

KEYWORDS: Fluid Mechanics; Buoyancy; Geotechnical Engineering.

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural finito indispensável para a sobrevivência humana visto que é utilizada de diversas formas, seja por meio de irrigação de produtos que são consumidos diariamente, consumo de animais, higienização pessoal e entre outros. Além disso, é um recurso importante para o desenvolvimento econômico do país e fundamental à preservação do meio ambiente.

Durante a evolução humana, foram desenvolvidos meios de barramentos físico da água, ou seja, barragens, com o propósito de armazenar e controlar este patrimônio. Com isso, quando houver necessidade, por exemplo, durante períodos de baixos índices pluviométricos a sociedade não fica sem abastecimento de água, que é um dos principais benefícios de uma barragem.

De acordo com o Comitê Internacional de Grandes Barragens-CIGB (2017), as barragens são estruturas que cortam córregos, rios ou canais com a finalidade de barrar a água e controlar o seu fluxo. A construção de uma barragem promove benefícios como abastecimento de água em determinada região, irrigação, contenção de rejeitos, regularização das vazões, geração de energia elétrica, paisagismo e urbanismo e entre outros (CBDB, 2017).

Portanto, barragens, sejam elas de terra ou de concreto, ou mistas, são consideradas estruturas que apesar de fornecerem água para o desenvolvimento da sociedade, oferecem também, em contraponto, riscos às populações adjacentes. Para tanto, é necessário realizar cálculos de Engenharia baseados nas leis da mecânica dos sólidos e dos fluidos, para que esta venha atingir seu potencial sem riscos.

O presente trabalho mostra as equações e sua funcionalidade para garantir a estabilidade de estruturas barráveis.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Conceituação de Barragem

A água, recurso natural considerado como um dos bens mais preciosos para a sobrevivência humana teve ao longo da história um papel fundamental para o desenvolvimento tecnológico, econômico e social da humanidade.

Segundo o Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (CBGB, 2008) a água é o recurso vital para sustentar todas as formas de vida na Terra, é essencial ao bem-estar da sociedade e é o elemento imprescindível ao crescimento e desenvolvimento do meio ambiente do planeta. Por ser um elemento indispensável, o homem sempre tentou gerir os recursos hídricos nas mais variadas atividades e necessidades.

Com as irregularidades e imprevisões pluviométricas, o escoamento dos rios e de outros recursos, que favoreciam as grandes inundações em um ano e as grandes secas em anos subsequentes, determinaram a obrigação da construção de barreiras físicas para proteção e contenção de consideráveis volumes de água.

De acordo com o CIGB (2011), as barragens são barreiras ou estruturas que cruzam córregos, rios ou canais para barrar e assim controlar o fluxo de água. As barragens são classificadas por diferentes critérios, tais como, material utilizado, dimensão, forma estrutural, capacidade de armazenamento, finalidade e entre outros.

Melo (2014) ressalta que as barragens são estruturas construídas historicamente pelo homem com o propósito de armazenar e controlar a água, e que são estruturas primordiais para o desenvolvimento e gestão dos recursos hídricos de bacias fluviais.

As mesmas possuem desempenham um papel importante na infraestrutura e no desenvolvimento do país pelas vastas finalidades, tais como, irrigação, abastecimento de água, geração de energia elétrica, paisagismo e turismo e entre outros (CBDB, 2017).

Para uma barragem ser considerada de grande porte e ser registrada, o (CIGB, 2008) afirma que a mesma deve possuir altura variando entre 10m a 15m e armazenar em seu reservatório um volume superior a 03 milhões de metros cúbicos.

2.2. Breve Análise histórica das Barragens

O homem, ao longo da sua existência sempre desenvolveu a sua prática para administrar os recursos hídricos existentes. Contudo, o conhecimento de controlar tais recursos a serem aproveitados logo em seguida não é uma ideia que surgiu nos tempos Modernos.

Segundo Souza (2013), “As Barragens mais antigas que se tem notícia, foram construídas de terra pelos primitivos habitantes da Índia, Ceilão, Mesopotâmia ou China, e as dos Egípcios, Gregos, Romanos e Astecas, ou das civilizações Maias e Incas”.

A Barragem mais antiga registrada do mundo é a de *Jawa*, localizada na Jordânia, constituída de um aterro de solo e muros de alvenaria, com 5 metros de altura e 80 metros de comprimento, datado em torno de 3.000 AC (FAHLBUSH, 2009, *apud* MELO, 2014).

Outra estrutura bem conhecida e que remete a mesma época é a barragem de *Sadd El Kafara*, que em hebraico significa “barragem dos pagãos”, localizava-se no sul do Cairo, no *Wadi Garawi*. Era uma barragem do tipo gravidade, apresentava duas paredes de alvenaria de 28 e 33 metros de largura e uma camada central de 37 metros de terra e brita, tinha 14 metros de altura e aproximadamente 108 metros de comprimento (JESUS, 2011, p. 3).

Várias foram às civilizações e povos que se têm registros na história que construíram e obtiveram a tecnologia da construção de barragens, mas dentre estes, o que se destaca são os povos Romanos, com o seu empenho e tecnologia mais evoluída à época, investiram em novos conhecimentos e se capacitaram de forma organizada e planejada promovendo grandes obras de barragens. A barragem com maior altura construída pelo povo romano que ainda se encontra em funcionamento é a barragem de Cornalvo que se situa em Mérida, Espanha. Esta obra foi construída no primeiro século, tinha 28m de altura, 26 m de espessura e 194 m de comprimento na crista (JESUS, 2011).

O autor supracitado ressalta que a engenharia do Império Romano, com sua alta capacidade de inovação, aprimorou na construção de barragens a aplicação de uma argamassa. Antes desse novo modo de execução, a estabilidade das barragens era assegurada apenas pelo seu próprio peso. Sem falar do pioneirismo dos Romanos na construção de barragens em Arco e Contraforte, que até os dias atuais são utilizadas.

2.3. Tipos de Barragens

Com o passar dos anos, as construções de barragens foram evoluindo e com isso novas tecnologias foram surgindo. Segundo Costa (2012), foram criados dois grupos distintos de barragens, o grupo convencional que constituem as barragens mais utilizadas e o grupo não convencional.

São encontrados pela literatura diversos tipos de barragens, tais como, barragem em terra (homogênea, zoneada, enrocamento), barragem em concreto do tipo gravidade, arco, contraforte, concreto compactado com rolo (CCR) e entre outros.

As barragens de terra são as mais utilizadas no Brasil por se ter vales muito largos e ombreiras suaves, necessitando de grandes extensões de crista, ao mesmo tempo em que se dispõe abundantemente de solo. Por não ser uma estrutura rígida estas barragens permitem ser firmes em fundações mais deformáveis, transmitindo esforços baixos para as fundações se comparadas com as barragens de concreto. Elas são indicadas para fundação de qualquer tipo de solo ou rocha (MENDONÇA, 2012 apud SOUZA, 2013). Sua estrutura é basicamente constituída por Solo que, geralmente, são extraídos da área de implantação da barragem.

Segundo Massad (2010), a barragem de terra homogênea é a mais utilizada no Brasil, pelas condições topográficas, com vales abertos e a disponibilidade de material terroso. A barragem de terra zoneada é representada por um núcleo central impermeável, envolvido por zonas de materiais consideravelmente mais permeáveis, zonas essas que suportam e protegem o núcleo. As zonas permeáveis consistem de areia, cascalho ou fragmentos de rocha, ou uma mistura desses materiais (MARANGON, 2004).

As barragens de enrocamento constituem-se em um maciço formado por sucessivas camadas de rocha de espessura variável em que posteriormente são compactados, para que o peso próprio crie estabilidade do corpo submetido ao impulso hidrostático. A barragem de enrocamento pode ter dois tipos de núcleo: Argila ou Concreto, e dois tipos de face: Concreto ou Asfalto.

Podem ter o núcleo impermeável, feito com predominância de material rochoso e núcleo argiloso que veda a passagem de água, ou ter face impermeável, cuja vedação

da água é garantida pela impermeabilização da face montante da barragem com uma camada de asfalto, chapa de aço ou outro material (COSTA,2012).

O material do enrocamento (pedras) apresenta elevado ângulo de atrito, garantido a estabilidade dos taludes de montante e jusante, mesmo quando são íngremes. O núcleo argiloso reproduz segurança e estanqueidade à barragem, permitindo o represamento das águas (MASSAD, 2010).

A execução de barragens de concreto é utilizada a cerca de 100 anos, garantindo uma boa segurança, tomando por si grande parte das barragens construídas, um bom desempenho para este tipo de obra. Segundo Jesus (2011), as barragens de concreto caracterizam-se pela sua resistência. Mesmo para grandes alturas, pela sua esbelteza, mas também pela sua vulnerabilidade em vales muito extensos.

A barragem de gravidade depende do seu próprio peso para assegurar o equilíbrio estático da construção, sob as forças transferidas pela água do reservatório, o que dar-se o nome de Impulso hidrostático. Geralmente, é uma estrutura maciça, sua seção transversal apresenta um formato triangular, calculada para que o seu próprio peso mobilize uma grande parte da resistência necessária a conter as forças atuantes sob o barramento, e as transfira para a fundação (JESUS,2011).

As barragens em arco são compostas por estruturas em curva a montante em que os carregamentos são transferidos por efeito arco ao perímetro, diferentemente da barragem de gravidade, que seu carregamento é transferido, principalmente, na vertical, além de consumir menos concreto na sua execução. Segundo o CBDB (2008), à medida que a água empurra a barragem, o arco transfere a força para as paredes do vale. Este tipo de barragem requer uma fundação de rocha sã para que suporte o seu peso.

As barragens de contraforte são mais leves que a barragem de gravidade, pois limita apenas a pequenas áreas da fundação as forças da água sob o maciço. Dependem, para sua sustentação, de uma série de suportes verticais chamados contrafortes, o qual se estendem ao longo da face a jusante, e servem para transferir, junto às faces inclinadas, a força da água para baixo, em direção às fundações das barragens (CIGB, 2008).

3. METODOLOGIA

O estudo se caracteriza por uma revisão bibliográfica com caráter descritivo de estudo na área de recursos hídricos e geotecnia, utilizando uma revisão do método dos elementos finitos aplicado às barragens e visando reunir aspectos geotécnico-estruturais, assim como relacioná-los em sua forma equacionada, utilizando-se bases de equações advindas de livros e documentos técnicos concernentes à estática das estruturas, barragens, mecânica dos solos e concreto armado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados em tópicos, no qual foram avaliados e discutidos: 1) as equações da estática e quais são usadas para o cálculo dos esforços nos equipamentos que compõem a superestrutura de uma barragem; 2) os esforços causados pelo peso do maciço barrado e o dimensionamento da infraestrutura barrada (fundação).

4.1. Equações da Estática aplicada às barragens

Para se fazer a análise de tensões toma-se uma seção horizontal (junta) de largura T , e calcula-se todas as forças atuantes acima desta seção, obtendo-se as resultantes dos esforços tangenciais (ΣV), normais (ΣW) e momentos fletores (ΣM).

A grande quantidade de água armazenada em uma barragem torna catastrófico o cenário de uma eventual ruptura. Projeto, cálculo e execução rigorosos são necessários para a concepção deste tipo de estrutura. Com a preocupação de evitar qualquer tipo de falha, os métodos de avaliação de segurança dessas estruturas evoluem de cálculos intuitivos de tensões até sofisticados métodos numéricos (RIBEIRO, 2007).

Uma análise sistemática e simplificada pode ser feita utilizando o chamado Método da Gravidade, proposto pelo United States Bureau of Reclamation (1976). A formulação desse método proporciona um meio direto para o cálculo de tensões em

qualquer ponto de uma seção transversal de uma barragem de concreto gravidade, aspecto confirmado pela rededução das equações propostas nesta formulação [1].

Este método tem se mostrado uma eficiente ferramenta de cálculo e os resultados obtidos através do mesmo apresentam um excelente acordo quando comparados com método mais refinados de cálculo, como por exemplo, o Método dos Elementos Finitos, desde que as seções de análise sejam adequadamente escolhidas (longe de pontos singulares com concentrações de tensões).

ANÁLISE DE TENSÕES

Para facilitar a análise de estruturas complexas, como o caso de barragens, é comum buscar algum modelo estrutural de compreensão mais simples que possa representar adequadamente o seu comportamento estrutural. No caso de barragens que têm o seu peso como fator estabilizante e em geral apresentam comprimento como dimensão predominante, é justificada a análise do corpo da barragem através de uma ou mais seções transversais representativas. Assim, a complexidade do tratamento da estrutura é reduzida de um problema 3D para uma problema de estado plano de deformações (Figura 1) [2].

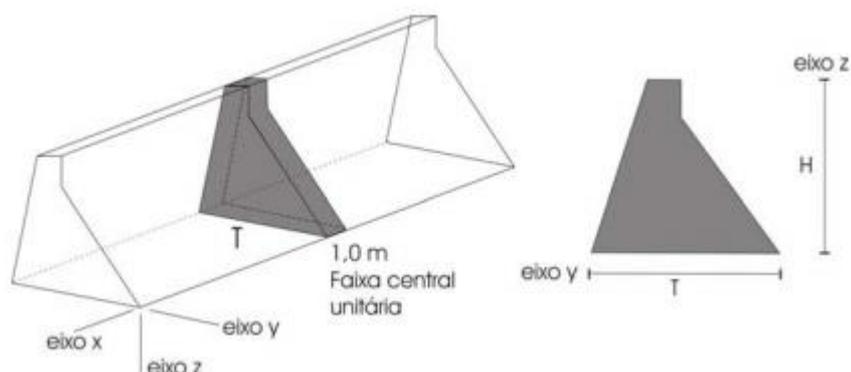


Figura 01 – Seção Transversal em 2D

O modelo estrutural que mais se assemelha ao problema em questão é o de uma viga engastada-livre. O Método da Gravidade (MG) considera a barragem como uma viga perfeitamente engastada na fundação. Essa aproximação é a favor da segurança, mas pode gerar imprecisões na análise de regiões próximas à fundação por não representar adequadamente o comportamento correto da interação barragem-fundação.

A Resistência dos Materiais mostra que a análise de tensões em vigas esbeltas (vigas em que a relação entre a altura e o comprimento da viga é menor que 20%) não é suficiente para a compreensão do comportamento das tensões no corpo de vigas profundas, modelo mais próximo de uma barragem, pois as seções transversais não permanecem planas na flexão e as deformações cisalhantes não podem ser desprezadas.

Por conseguinte, deve-se recorrer a um modelo de viga (Vigas de Timoshenko) que leve em conta os efeitos adicionais que não ocorrem em vigas esbeltas. Para se fazer a análise de tensões toma-se uma seção horizontal (junta) de largura T , e calcula-se todas as forças atuantes acima desta seção, obtendo-se as resultantes dos esforços tangenciais (ΣV), normais (ΣW) e momentos fletores (ΣM) (Figura 2).

Operando-se com o mesmo procedimento nas diversas seções horizontais da barragem é possível se obter o campo de tensões ao longo da mesma.

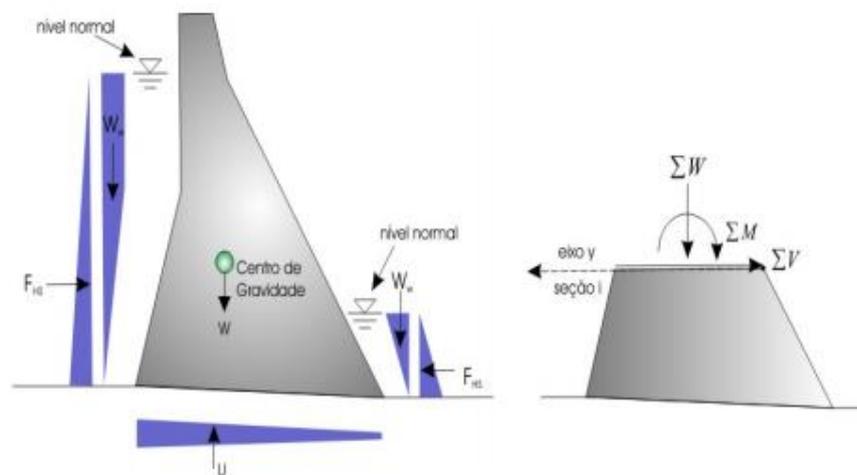
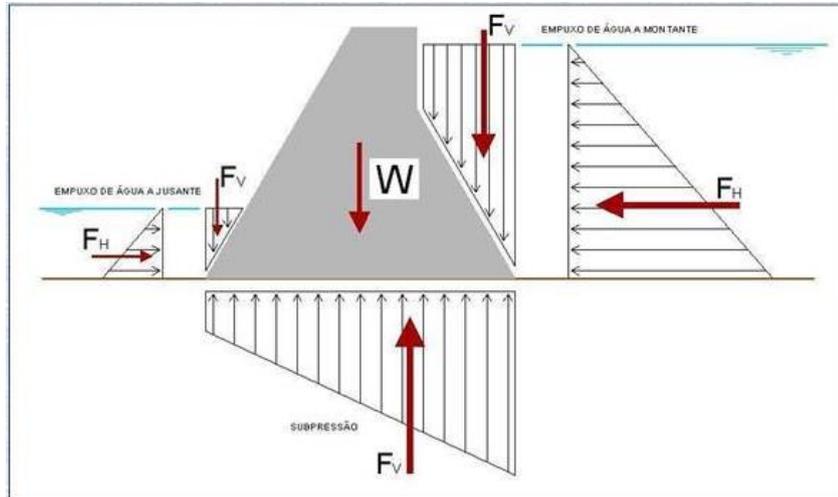


FIGURA 2: (a) Perfil de barragem com cargas usuais; (b) Resultantes dos esforços normais, cisalhantes e fletores na seção em estudo.

Fonte: RIBEIRO, 2007.

4.2. Estabilidade de Barragens e a Mecânica das Estruturas

A figura a seguir mostrar as cargas atuantes numa barragem em função da força da água incidente sobre a estrutura, assim como do peso próprio do maciço sobre o solo de fundação.



Métodos de análise de estabilidade Colocados os objetivos das análises, tem-se a necessidade de quantificar o risco de uma possível ruptura. Essa quantificação é determinada a partir de um fator de segurança, com as seguintes condições:

$FS > 1,0 \Rightarrow$ teoricamente estável $FS = 1,0 \Rightarrow$ equilíbrio instável, podendo ocorrer ruptura por escorregamento a qualquer momento.

$FS < 1,0 \Rightarrow$ não tem significado físico Segundo Gerscovich (2008),

FS é o fator pelo qual os parâmetros de resistência podem ser reduzidos de tal forma a tornar o talude em estado de equilíbrio limite ao longo de uma superfície.

Este fator de segurança pode ser obtido através de diferentes definições, ilustradas a seguir por Dyminski (1996):

a) Fator que minora os parâmetros de resistência ao cisalhamento (em termos de tensões efetivas):

$$\tau = \frac{c'}{FS1} + \sigma'_N \cdot \frac{tg\phi'}{FS2}$$

Eq. 1

Com $FS1=FS2$.

b) Fator que minora a resistência ao cisalhamento (em termos de tensões totais):

$$\tau = \frac{c}{FS3} + \sigma_N \cdot \frac{tg\phi}{FS4}$$

Eq. 2

Com FS3=FS4.

c) Relação entre momentos resistente (MR) e atuante (MA), para superfície de ruptura circular:

$$FS = \frac{F_R}{F_A}$$

Eq. 3

d) Relação entre forças resistentes (FR) e atuantes (FA), utilizada em fundações:

$$FS = \frac{F_R}{F_A}$$

Eq. 4

e) Relação entre resistência ao cisalhamento do solo e tensões cisalhantes atuantes no maciço:

$$FS = \left(\frac{\text{Resistência ao cisalhamento}}{\text{Tensões atuantes}} \right)$$

Eq. 5

Segundo Dyminski (1996), cada definição ilustrada acima pode implicar em valores diferentes para FS. Em análises de estabilidade de taludes, adotam-se as definições dos itens a) e b), considerando um valor único para FS de todos os parâmetros, efetivos ou totais.

O FSadm de um projeto corresponde a um valor mínimo a ser atingido e varia em função do tipo de obra e vida útil. A definição do valor admissível para o fator de segurança (FSadm) vai depender, entre outros fatores, das consequências de uma eventual ruptura, em termos de perdas humanas e/ou econômicas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo apresentado, referenciou as leis da mecânica dos sólidos presentes de forma normativa em barragens, e como estas são estruturalmente solicitadas, assim como apresentou metodologias que quantificam tais solicitações a fim de oferecer segurança ao projeto de uma barragem.

Portanto, é necessário e primordial, entender o comportamento resistente de uma barragem para executar seu dimensionamento, dado que isso depende providencialmente da mecânica das estruturas presente nas forças que atuam, tanto quanto nas que resistem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

RIBEIRO, Paulo Marcelo Vieira (Doutorando – Universidade de Brasília), 2007. COMISSÃO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, XXVII SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. **Análise De Tensões Em Barragens De Concreto Gravidade Devido À Ação Do Peso Próprio E Da Força Hidrostática**. Disponível em: <http://www.cbdb.org.br/seminario/belem/T100/A27.PDF>

RIBEIRO, P.M.V. e PEDROSO, L.J. (2006) - "**Redução das Equações Gerais para o Cálculo de Esforços e Tensões em um Perfil de Barragem Gravidade de Concreto (efeitos estáticos e sísmicos)**." 140p. Brasília: UnB-FT / ENC / GDFE, (Rel. Téc. de Pesquisa; RTP-PMVR2-03/2006).

COMISSÃO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. **As barragens e a água do mundo**. Paraná, 2008. Disponível em: http://www.cbdb.org.br/publicacoes/DAMS_AND_THE_WORLDS_WATER_traducao.pdf. Acesso em: 2 mar. 2017.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de barragens**. Oficina de textos, 2012. Disponível em <http://www.comunitexto.com.br/conheca-todos-os-tipos-de-barragem/#.WNlnIWcFPZ>. Acesso em: 20 mar. 2017

JESUS, Rafael Diegues. **Optimização da forma estrutural de uma barragem**. 2011. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. Porto, Portugal. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10216/61502>. Acesso em: 2 mar. 2017.

MARAGON, M. **Barragens de terra e enrocamento**. 2004. Notas de aula. Disponível em: http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/togot_unid05.pdf. Acesso em: 24 mar. 2017.

MASSAD, Façal. **Obras de terra – Curso básico de Geotecnia**. 2. ed. Oficina de textos, 2010. Disponível em > Acesso em: 14 mar. 2017.

MELO, Alexandre Vaz De. **Análise de risco aplicadas a Barragem de Terra e Enrocamento: Estudo de caso de Barragens da Cemig GT**, 2014. Disponível em: <https://www.ufmg.br/pos/geotrans/images/stories/diss039.pdf>. Acesso em: 06 mar.2017.

SOUZA, Mariana Miranda De. **Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC**. 2013. 129f. (Projeto de Graduação) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10006346.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2017.