

INFLUÊNCIA DOS ESTUDOS GEOTÉCNICOS E GEOLÓGICOS NA DETERMINAÇÃO DOS MODELOS DE BARRAMENTO

Alysson de Freitas Esteves*
José Braz Fernandes Júnior**
Hugo Medeiros de Oliveira ***

RESUMO

As construções de barragens são essenciais para o progresso local e regional, trazendo consigo empregos e melhorando em vários aspectos a qualidade de vida. No entanto, este tipo de empreendimento traz consigo diversos impactos, sejam positivos ou negativos para a economia, sociedade e meio ambiente, por isso, a elaboração de um projeto de barragem necessita de um minucioso e complexo estudo de todos os elementos que o envolve. Em vista dos diversos acidentes que podem ocorrer em obras deste tipo, compreender o tipo de solo onde será implantada é de extrema importância. Com base na problemática apresentada, o presente artigo tem como principal objetivo a realização de uma revisão bibliográfica acerca de diferentes e mais usuais modelos de barragem, abordar as características geológicas e geotécnicas apontando o processo por detrás de sua construção e como estes fatores influenciam na escolha do modelo a ser implantado. Ao se comparar os diferentes tipos de barragens, é permitido ao projetista a adoção de técnicas e metodologias que contribuam para solucionar problemas pontuais causados por particularidades do terreno.

Palavras Chave: Barragens, características geológicas e geotécnicas, modelos de barragens

ABSTRACT

The construction of dams is essential for local and regional progress, bringing jobs and improving the quality of life in many aspects. However, this type of project brings with it several impacts, whether positive or negative for the economy, society and the environment, therefore, the elaboration of a dam project requires a detailed and complex study of all the elements involved. In view of the various accidents that can occur in works of this type, understanding the type of soil where it will be implemented is extremely important. Based on the issues presented, the main objective of this article is to carry out a literature review about different and more usual dam models, address the geological and geotechnical characteristics, pointing out the process behind its construction and how these factors influence in choosing the model to be implemented. By comparing the different types of dams, the designer is allowed to adopt techniques and methodologies that contribute to solving specific problems caused by the particularities of the terrain.

Keywords: Dams, geological and geotechnical characteristics, dam models

* Rede de Ensino Doctum – Unidade Cataguases – alysson.freitas29@hotmail.com – Graduando em Engenharia Civil

** Rede de Ensino Doctum – Unidade Cataguases – ibdjart@gmail.com – Graduando em Engenharia Civil

*** Rede de Ensino Doctum – Unidade Cataguases – prof.hugo.oliveira@doctum.edu.br – Orientador do trabalho

1 INTRODUÇÃO

O aspecto estratigráfico de um determinado terreno é uma das condicionantes fundamentais a ser investigada com rigoroso critério, onde a experiência na construção de barramentos irá ditar as principais análises a serem obtidas para se alcançar com sucesso um bom projeto. De acordo com o local em que se pretende posicionar a construção, a fim de se obter o represamento ou contenção, a geometria da obra se torna a segunda questão a ser elaborada precisamente pela engenharia civil (DUARTE, 2008).

O Brasil possui aproximadamente vinte e quatro mil barragens com diferentes propósitos de instalação. Das setecentas e noventa registradas para contenção de rejeitos de mineração, ficou constatado que duzentas e quatro destas construções tem alto potencial de dano ambiental e/ou patrimonial em caso de acidentes como os ocorridos recentemente no país (ADORNO, 2019).

Em virtude de seus recursos naturais e características geológicas, somos um dos países que mais construiu barragens nas décadas passadas, em especial para geração de energia hidrelétrica, principal fonte de energia da matriz energética brasileira (MENESCAL, *et al.*, 2001).

Segundo o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (2002), uma barragem segura é aquela cujo desempenho satisfaça as exigências de comportamento necessárias para evitar incidentes que se referem a aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais. A segurança da barragem deve ser vistoriada regularmente pelas avaliações de segurança de todas as estruturas e instalações que a compõem (MAYORGA e PROFETA, 2020).

É provável que, em áreas próximas, há a possibilidade de se deparar com uma série de problemas geológicos e geotécnicos diversos a serem vencidos, com intuito de obter um alicerce para implantação de uma obra de grande porte. Partindo não somente da disponibilidade hídrica, neste sentido, não é apenas imperioso analisar a forma mais segura e econômica, é complementar a que trará menor impacto no uso de áreas de empréstimo próximas das construções, extrações que podem afetar a paisagem local além das previstas pelo represamento das águas (antropogeomorfologia), e acima de tudo como estas investigações do solo podem limitar o dimensionamento ou inviabilizar um projeto em posição pré-determinada (FREITAS, *et al.*, 2019).

Levando-se em consideração o estudo geológico-geotécnico e geométrico, pretendeu-se entender como estes são determinantes para a escolha de um dos métodos usuais de construção de barramento. Para tal, a pesquisa tomou dois parâmetros básicos, sendo eles: a compreensão dos sistemas construtivos, vantagens e desvantagens entre os modelos de projeto (segurança, efetividade do projeto, impactos diversos); análise das informações geológicas e geotécnicas com aspectos fundamentais que envolvem os barramentos.

2 METODOLOGIA

2.1 Delimitação da Pesquisa

Compreende-se como são relevantes e até determinantes os estudos relacionados aos aspectos geotécnicos, hidráulicos e hidrológicos, mineralógicos, morfológicos e químicos para a escolha do modelo tipo de barragem.

Antes de iniciar o projeto de barragem, o geólogo e o engenheiro necessitam ter noção das condicionantes que deverão estar de posse e que exercerão influência sobre o empreendimento. Após esta análise de fato é que se poderá escolher o método construtivo mais adequado e se haverá uma segunda hipótese de construção (COSTA, 2012).

Para entendimento dos processos é apropriado a abordagem quantitativa dos estudos relacionados ao assunto uma vez que a base já é conhecida e, portanto, afastar-se dos dados consolidados em pesquisas anteriores e de sucesso, levam ao fracasso e está de fato, estes estudos definidos como diretrizes regidos por leis nacionais tais como a Lei de Segurança em Barragens (LSB) 12.334/2010 e 14.066/2020, e normas técnicas a exemplo da NBR 6122 – Projeto e Execução de Fundações.

2.2 Diferenciação entre os modelos de barragem estudados

O principal fator de diferenciação de uma barragem não está em sua composição, mas sim, em sua função/finalidade. Partindo do elemento “função/finalidade”, pôde-se compreender a objetividade detrás de seus projetos, elementos construtivos (vertedouros, tomadas d`água, comportas, casa de força etc) e técnicas de execução.

Observando-se as barragens de terra, sendo estas, as mais comuns, e, possivelmente, de valor menos elevado, entende-se que as mesmas têm por

finalidade a contenção de água e/ou rejeitos. Tais barragens têm sua estrutura constituída, fundamentalmente, por solo, sendo caracterizadas principalmente por uma base larga, que permite distribuir o peso da estrutura e aumentar sua seção de percolação, ou seja, o material terroso escolhido para estas barragens aumenta ou diminui a permeabilidade do sistema de contenção (SILVEIRA, 2006).

Barragens de enrocamento são constituídas de pedras soltas, tendo a mesma ideia de concepção das barragens de terra, no entanto, o solo é substituído por material rochoso como elemento principal. Estas barragens apresentam maior firmeza estrutural, uma vez que, o próprio peso do material garante estabilidade ao sistema de contenção. Este tipo de barragem tem por finalidade a contenção de água de forma permanente (MENESCAL, 2001).

Barragens construídas em concreto e aço, são pouco utilizadas no Brasil, principalmente pela forma como seu projeto é proposto, necessitando de áreas de vale com encostas rochosas e um comprimento de seção curto. Os vales com encostas rochosas têm por finalidade oferecer maior resistência aos esforços aplicados na estrutura de contenção, transferindo a pressão excedente para as paredes de rocha. São comuns em países com vales profundos e estreitos, tem por função/finalidade a contenção de água, de forma permanente ou por um longo período de tempo (MASSAD, 2010).

2.3 Fatores determinantes do projeto

A pesquisa realizada no pré-projeto deste tipo de obra circunscreve-se às questões que relacionam as investigações dos perfis geológicos em áreas de interesses para a construção de barramentos, seja de contenção ou detenção, afim de se obter as descontinuidades do subsolo, interveniências e inter-relações entre a Mecânica dos Solos e das Rochas, buscando com isto a redução dos graus de incertezas para se chegar ao modelo ideal de construção (MASSAD, 2010).

Deve-se observar os fatores de segurança, problemas geotecnológicos sobre fundações e os interesses econômicos devido aos vultuosos valores envolvidos afim de se garantir uma vida útil sem riscos futuros, sejam ambientais e sociais, ou aqueles relacionados a decisões equivocadas, incluindo os defeitos construtivos durante sua execução. A segurança de uma barragem é um fator de extrema importância em sua elaboração, sendo, juntamente com sua eficiência e seus impactos (sociais,

econômicos e ambientais), um dos pilares observados durante seu projeto e construção (MAYORGA e PROFETA, 2020).

As variáveis de estudo se restringem ao conceito ou definição clássica do que hoje é chamado de Geologia de Barragens. Conjunto de conhecimentos que estão na base de decisões para construção de fundações que permitirão sustentar o maciço resistente de barramento. Freitas *et al.* (2019) enfatiza a revisão dos conceitos relacionados as fases e métodos de investigação geológico-geotécnico em barragens, características ligadas a bacia hidrográfica, fundações e obras complementares de geotecnia, materiais e técnicas de construção mais usuais e os critérios para escolha do tipo a ser construído. Desta forma, observou-se paralelamente os conjuntos de normas técnicas e leis em vigor atualmente, tornando assim, a pesquisa fundamentada na conjuntura dos acontecimentos recentes no país, como os desastres de Brumadinho, Fundão e Mariana, Minas Gerais, respectivamente.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Barragens

Utilizadas há milênios quando se havia a necessidade de armazenar água para diversos fins. Com o passar do tempo a forma de construir barramentos evoluiu com o aprimoramento das tecnologias, embora hoje, pequenos fazendeiros se utilizam da forma mais econômica e arcaica possível (MENESCAL, *et al.*, 2001).

No entendimento moderno, barragens são estruturas projetadas por engenheiros, utilizadas como reservatório para contenção e acumulação de água ou água com resíduos de minérios, o que resulta em uma lama proveniente do processo de beneficiamento destes minerais (ANA, 2012).

Não sendo estruturas com propósitos pontuais e individuais, em muitos casos são necessárias para o desenvolvimento de dada região com aproveitamento para fins de navegação, transportes de bens, turismo, piscicultura; muitas vezes conciliando vários objetivos. Construídas transversalmente ao fluxo do curso d'água formando um reservatório artificial, são constituídas de um acúmulo de terra, homogênea do próprio local ou agregados variando de acordo com as pesquisas pré-projeto (FREITAS, *et al.*, 2019).

3.2 Tipologia de Barragens

Organizam-se em dois grandes grupos: regularização e retenção. A primeira faz jus ao nome e seu objetivo é regularizar o perfil hidrológico de um rio, armazenar água formando lagos e dependendo de outras finalidades, aumentar o volume para elevar o nível natural e a relação entre o déficit e demanda hídrica, notadamente na geração de energia elétrica. No entanto as barragens de contenção têm como objetivo acumular sedimentos, resíduos industriais ou rejeitos de mineração, ou, reter (retenção) inundações à jusante evitando desastres naturais (COSTA, 2014).

De acordo com o material utilizado na construção, pode ter, quanto ao seu tipo, denominações diversas e dentre elas se destacam três: o barramento de enrocamento, barramento de concreto por gravidade (CCV – concreto convencional e CCR – concreto compactado a rolo), barramento de terra (MORANO, 2006).

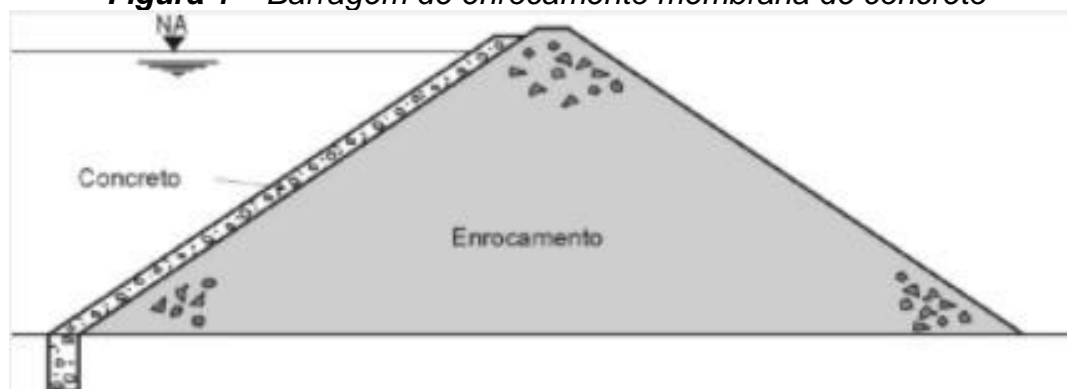
3.2.1 Barramento com Enrocamento

Predomina o material rochoso, rochas e fragmentos de rocha, compactados em camada justapondo diferentes tamanhos de jeito a aumentar a estabilidade e resistência ao empuxo hidrostático. Esta característica deve ser obtida através da redução dos índices de vazios ampliando não somente a área de contato (atrato) entre as partículas (eliminar partículas soltas), mas também a densidade e estanqueidade da estrutura no todo.

As deformações observadas neste tipo de construção são devidas aos deslocamentos, rotação e quebra das partículas quando submetidas a variações das tensões, aumento da força de esmagamento, especialmente em maciços altos. Para evitar este tipo de colapso ou dano se deve garantir maior homogeneidade do material na jazida com emprego de rochas inalteradas resistentes aos intemperismos físicos e químicos e, a redução dos vazios totais como descrito acima.

Sua impermeabilização é feita com membranas na face à montante com placas de concreto interligadas através de juntas estanques e flexíveis, camada asfáltica ou outro elemento vedante. Entre suas vantagens está o emprego de equipamentos convencionais à construção civil pesada e de ter seu cronograma normal em períodos chuvosos. Sua limitação se restringe ao subsolo sob seu eixo e a obtenção de material de qualidade (CRUZ, 1996).

Figura 1 – Barragem de enrocamento membrana de concreto



Fonte: Neolpsum (2020)

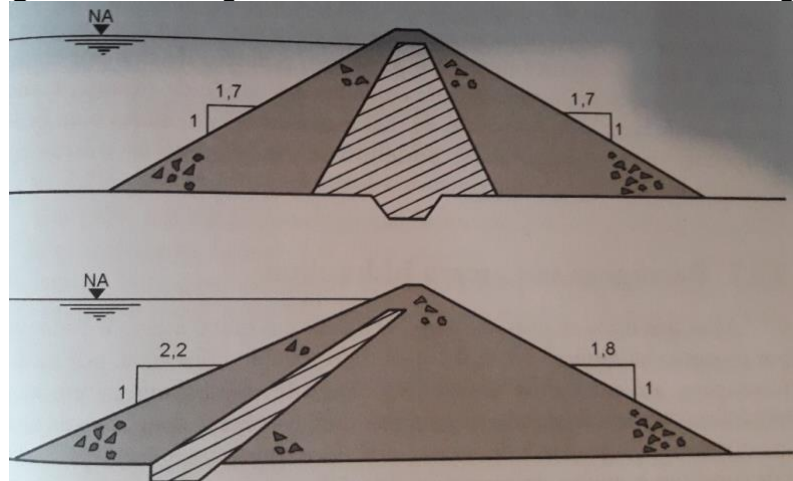
3.2.2 Barramento de Terra-Enrocamento

Esta combinação tem sido a que menos apresenta rupturas entre os modelos de terra compactada, zonada ou enrocamento com face impermeável. Porém, concentra riscos em sua face a jusante e quanto ao controle de compactação de seu núcleo argiloso (inclinado à montante ou centralizado). É necessário que o material argiloso possua compressibilidade igual ou levemente superior ao corpo rochoso permitindo a estabilidade dentro do núcleo da barragem que pode ou não dispor de elemento filtrante auxiliar ao núcleo e, como à jusante, as rochas permitem rápida passagem da água por percolação, deverá ser executado camadas de transição gradual que impeçam a dispersão dos grãos finos argiloso provocando a ruptura hidráulica ou *piping*.

As condições de escoamento e fluxos subterrâneos diretamente sob a barragem devem ser bem conhecidas, tanto se apoiada em rocha sã ou com resistência compatível ao peso do maciço. Solos coesivos não saturados ou com graus de saturação que permitam passagem de ar/água, conseqüentemente a percolação sob a barragem, ou rochas de transição ou com alto grau de fraturamento que podem levar a erosão interna, devem ser removidas para modificar as condições do fluxo subterrâneo a barragem.

Cria-se neste ponto, centralizado com a crista da barragem ou à montante da mesma uma cortina de vedação (cut-off) que seguirá por todo o núcleo vertical ou inclinado até o nível de represamento ou NA (nível d'água) (MARANGON, 2004).

Figura 2 – Barragem de enrocamento com núcleo de argila



Fonte: Massad (2003)

Figura 3 – Barragem de enrocamento



Fonte: Ofitexto (2013)

3.2.3 Barramento de Concreto por gravidade

Para Lopes (2020) as barragens desse tipo são definidas como estruturas maciças, com pouca armação cuja característica física é suportar os esforços por meio da sua seção geométrica, conforme ilustrado pela Figura 4. Onde a seção é definida como triangular com o vértice oposto ao menor cateto na altura do nível de água máximo, acrescido de uma crista retangular.

A construção convencional deste tipo de barramento foi utilizada em grandes empreendimentos no passado, por ser considerada mais segura que os outros modelos, é o tipo de barragem mais resistente e de menor custo de manutenção, mas a sua altura é limitada pela resistência das fundações. No Brasil é pouco utilizada devido à necessidade de características específicas para seu bom funcionamento (CRUZ, 1996).

Figura 4 – Barragem de concreto em forma de arco



Fonte: MaxiEduca (2018)

O concreto compactado a rolo ou concreto rolado (CCR) é um processo construtivo convencional de barramento. Sua aplicabilidade se faz espalhando a mistura dos agregados com cimento quase seco (baixo fator A/C – água-cimento) com um trator de esteira e compactado com rolos compressores lisos e aspersão de água camada por camada. A face à montante é revestida com concreto de alta resistência visando diminuir sua permeabilidade e efeitos do intemperismo. Sua relação e uso de cimento varia de acordo com as exigências de resistência a tração e flexão do maciço, outra vantagem é não empregar armadura (LOPES, 2020).

Figura 5 – Barragem de concreto compactado a rolo



Fonte: Obra24horas (2009)

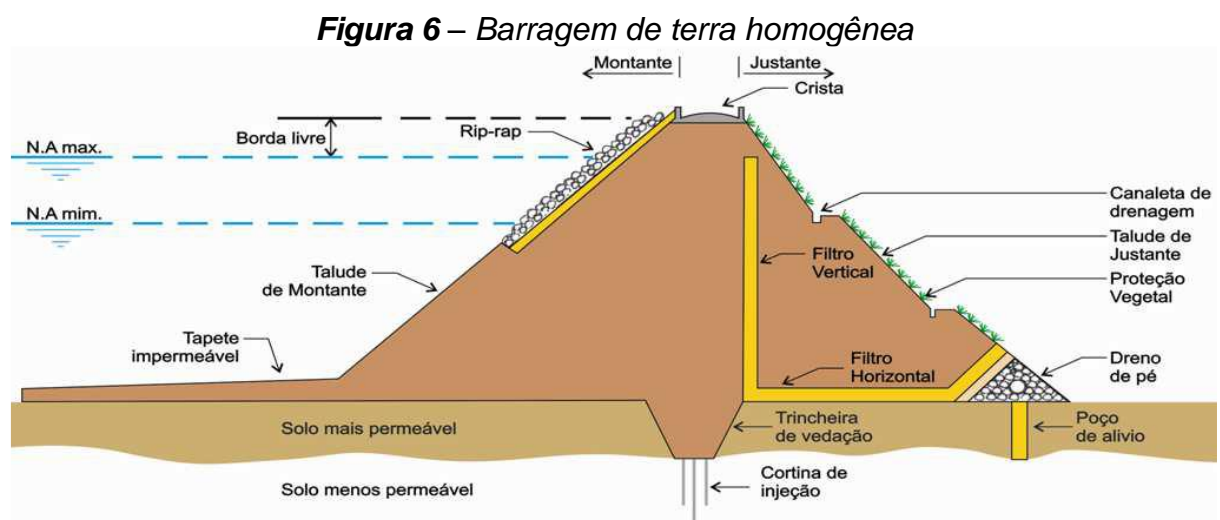
Embora versáteis, barragens de concreto são caras e exigem fundações sobre rochas para melhorar a capacidade de suporte e os efeitos negativos das subpressões

para que a obra não fique flutuando e se torne instável, excepcionalmente quando não se dispõe de encostas rochosas em suas ombreiras. Para reduzir o consumo de concreto final podem ser construídas com concreto ciclópico, em contrafortes ou galerias internas, mas é necessário emprego de formas e maior consumo de aço (SAYÃO, 2009).

3.2.4 Barragem de Terra

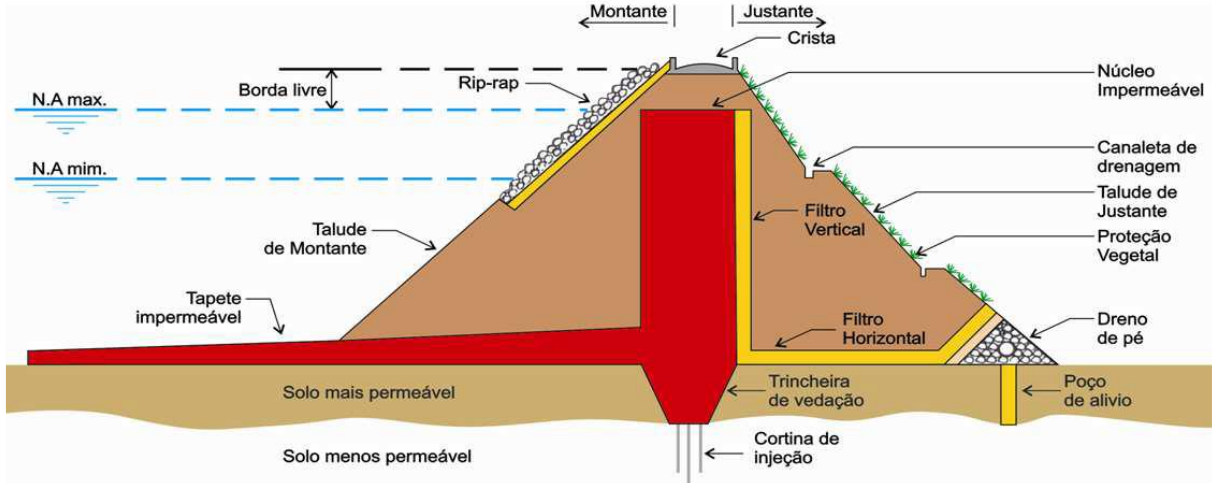
Considerada até os dias atuais a mais comum e cujo material utilizado é o natural, reduzindo assim o seu processamento. Algumas bibliografias relatam vários casos de ruptura no passado; com o avanço tecnológico dos equipamentos e estudos envolvendo a mecânica dos solos, algumas medidas foram tomadas para o avanço dos projetos futuros. Novos procedimentos foram necessários como as investigações detalhadas para caracterização das fundações e das áreas de empréstimo de materiais naturais de construção; aplicação de técnicas de engenharia no projeto; planejamento detalhado e controle dos métodos de construção (PEREIRA, 2015).

As barragens de terra são fundamentalmente constituídas por solo e se dividem em homogêneas e zonadas. As barragens homogêneas são construídas utilizando um único solo específico, podendo ou não variar a umidade natural. Nas barragens zonadas, realizam-se zoneamentos de único ou variados materiais com diferentes características ideais de umidade e permeabilidade visando maior plasticidade ou resistência, fundamentadas no subsolo da fundação e condições climáticas locais. Neste modelo, o núcleo é impermeável e revestido por camadas de materiais terrosos, rochas fragmentadas, cascalhos e/ou areia (COSTA, 2014).



Fonte: FEAGRI – Faculdade de Engenharia Agrícola Unicamp (2011)

Figura 7 – Barragem de terra zonada



Fonte: FEAGRI – Faculdade de Engenharia Agrícola Unicamp (2011)

Uma barragem de terra deve possuir uma base larga que distribua o peso acumulado em seu interior e elevar a seção de percolação, além de ser projetada com taludes de declividade suave, compatíveis com a resistência ao cisalhamento do material no período pós-compactação. O local onde a barragem é construída deve ser aberto, possuindo espaço amplo, com solos preferencialmente argilosos ou areno-argilosos. A amplitude da área se faz necessária principalmente para a construção do extravasor, responsável pelo escoamento da água excedente no reservatório em períodos de cheia (ADORNO, 2019).

A maior preocupação dos projetistas se deve ao efeito da erosão regressiva tubular, ou seja, o carreamento das partículas de solo desprendidas pela água no sentido de jusante à montante formando cavidades, canais de erosão, provocando a liquefação ou erosão da barragem.

Para aumentar a segurança quanto a percolação tanto no corpo como na base da estrutura, faz-se necessário o uso de tapetes e núcleos impermeáveis (solos de compactação rijos), filtros de areia, trincheiras de vedação sob o eixo da base e até mesmo cortinas de injeção com calda de cimento ou paredes diafragma. O emprego de um ou mais elementos de segurança serão definidos pelos ensaios tais como os de redes de fluxo pela fundação e corpo da barragem (SOUZA PINTO, 2013).

4 FASES E MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO

4.1 Topografia

A topografia através de suas divisões, sejam elas a planimetria e a altimetria, é capaz de representar todas as medidas de grandezas tanto do plano horizontal (planta) como das elevações (cortes, perfis e vistas) e curvas de nível; serão estes estudos prévios que representarão as elevações e depressões da bacia hidrográfica de interesse hidro energético. Conhecido, portanto, o nível da água (cota de alagamento), permite-se também determinar áreas de desapropriação e evacuação além das estimativas de indenizações referentes ao investimento previsto (BORGES, 1977).

A topografia em obras de barragens se relaciona não somente às fases de estudos preliminares e de execução, mas às de monitoramento de estruturas com relação as suas estabilidades e registro regular das atividades da infraestrutura como um todo. Abalos sísmicos, períodos de cheias com carga excessiva, infiltrações, ações dinâmicas de qualquer natureza e eventos geológicos e hidrológicos decorrentes ao tempo podem silenciosamente provocar sinistros com perdas materiais e de vida.

Com as novas tecnologias disponíveis se torna capaz realizar o monitoramento automatizado ou por leituras periódicas, produzindo e cruzando dados, prevendo problemas em potencial e seus agentes causadores, por consequência permitindo antever e planejar as intervenções oportunas (SANTIAGO E CINTRA, 2017).

4.2 Geologia e Geotecnia Conceitos gerais

Um ponto elementar na construção de uma barragem é o estudo geológico dos solos. A concepção de qualquer projeto de fundação passa por este processo inicial. A geologia estuda a origem, a formação, a história física, a evolução, a composição mineralógica e a estrutura da terra (QUEIROZ, 2016).

O conhecimento da estrutura que compõe o solo é importante pela sua complexidade, é o que os pesquisadores chamam de estrutura da terra. Em geral, os solos são formados pela erosão das rochas. As propriedades físicas do solo são determinadas primeiro pelos minerais que constituem suas partículas e, portanto, pela rocha a partir da qual esse solo é derivado (BRAJA, 2007).

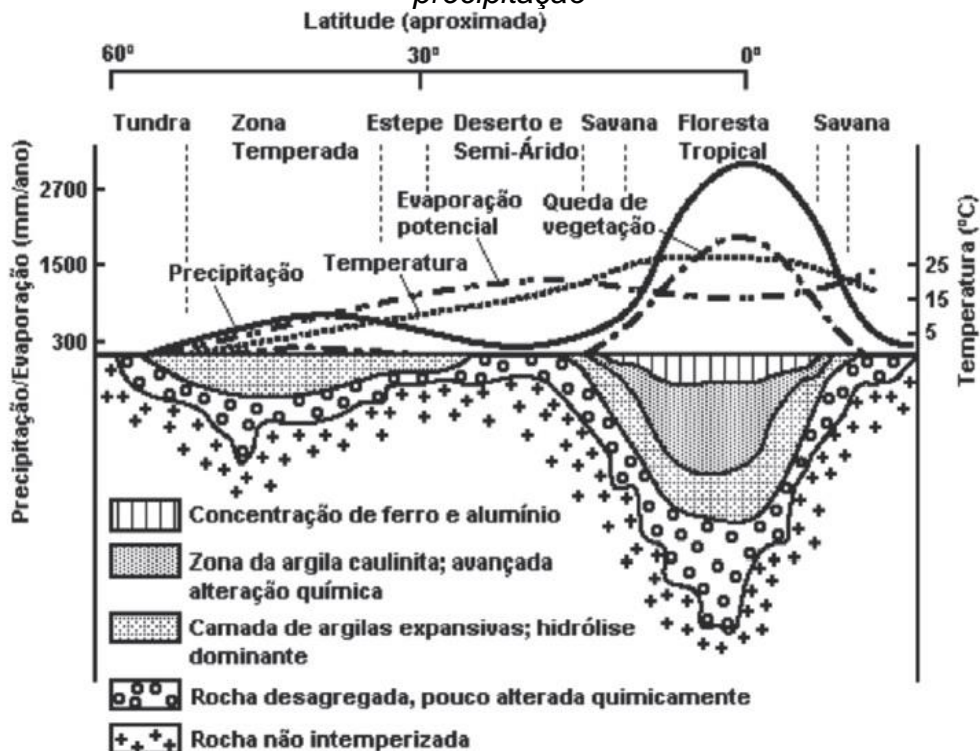
O comportamento do solo onde se projeta a construção de um barramento deve ser considerado no seu mais amplo aspecto, uma vez que sua diversidade e

peculiaridades variam em função da região e dos esforços solicitantes tanto pelas tensões aplicadas como pelo alívio de cargas nos casos de escavações em áreas de empréstimos e esgotamento de barragens; é neste ponto que a geotecnia vem oferecer soluções. (MASSAD, 2010).

4.3 Estrutura geológico-geotécnico do solo

A crosta terrestre é uma camada sólida que compõe a Terra e pode atingir alguns quilômetros de profundidade. Composta basicamente de rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares (rochas constituídas por diversos minerais, materiais de transição, rochas sedimentares e solos residuais formados através da acumulação de sedimentos), é na superfície que se encontram todas as obras de engenharia civil. O conhecimento dos minerais e suas características permitem ao engenheiro civil caracterizar os comportamentos químico-mecânicos de determinada rocha que será utilizada como material de construção civil (QUEIROZ, 2016).

Figura 8 – Características de formação do solo em relação ao clima/ latitude/ precipitação



Fonte: Geografalando (2013)

4.4 Perfil do solo – ensaios de campo

As investigações geológicas permitem, quando bem orientadas, obter o perfil do subsolo, caracterizar e detectar suas imperfeições (descontinuidades) capazes de comprometer a estrutura do projeto devendo estas interveniências serem identificadas e sanadas. Estes fatos de estudos preliminares são extraídos por áreas de conhecimentos entre os profissionais de geologia e de engenharia civil, cruzando dados da mecânica dos solos e das rochas.

O perfil obtido por estas ciências, induzirão os cálculos e decisões a serem tomadas a partir da redução dos graus de incertezas e correções a serem efetivadas *in loco*. Investigações complementares servirão para determinar as jazidas de materiais a serem empregados na construção bem como garantir a qualidade e tipos de materiais empregados. Importante priorizar nestes estudos as áreas delimitadas pelo reservatório afim de reduzir os impactos ambientais do empreendimento (MELLO, 1977).

Tendo-se que os materiais de construção são os mesmos onde se assenta a obra, solos e rochas (maior parte dos casos de empréstimos), o propósito é obter o melhor de suas propriedades, uma vez que sua formação é natural e constitui trabalho da engenharia conhecer as limitações e características em que é possível atuar com segurança.

Os instrumentos utilizados para estudo e análise dos perfis como fotointerpretação, sondagens diretas e indiretas, ainda que praticamente os mesmos de décadas passadas, o maior número de estudos efetuados em aterros de mineração, acidentes naturais e de construção, somados aos ensaios de pressões efetivas e totais, vem contribuindo para a criação de modelos estruturais e mentais relativos ao comportamento dos solos *in situ* ou projetado (CRUZ, 1996).

Figura 9 – Estrutura estratigráfica, perfil de um solo residual



Fonte: Manual de pavimentação DNIT (2006)

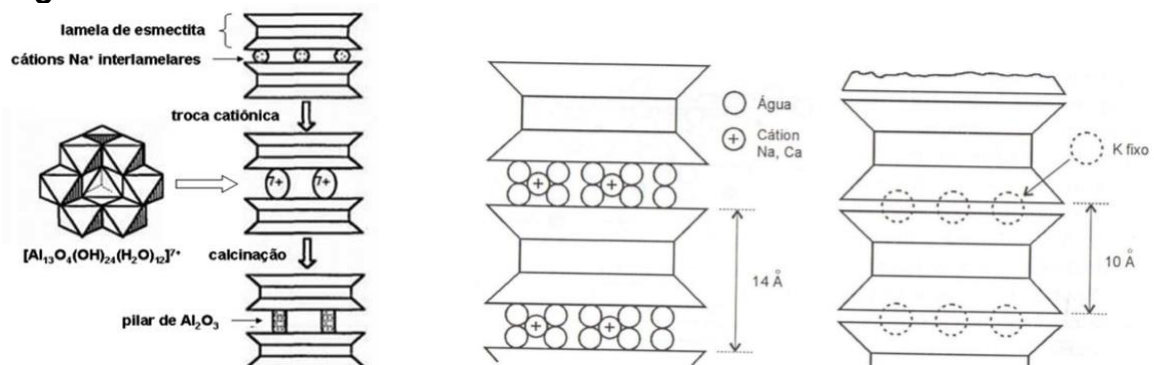
4.5 Mecânica dos Solos e ensaios de laboratório

Solos são um conjunto de partículas naturalmente livres entre si, capazes de se deslocarem, dependendo de seu grau de cimentação, ou seja, dos mecanismos de solidez que envolvem fatores desde sua formação, constituição (presença maior de água e de ar) e das solicitações a que se vêm submetidos. Por se tratar de um material heterogêneo, variação entre seus índices físicos e suas três fases, podendo apresentar de pequenas a grandes deformabilidades, seu estudo e comportamento não é algo simples se comparado a outros materiais típicos da engenharia.

Este fato é mais complexo no tratamento dos solos moles, com considerável presença de água, onde a elasticidade e resistência ficam comprometidas devido as tensões e ao escoamento, sujeitos a maior evolução de recalques, cisalhamento ou adensamentos. Imprescindível para as soluções nesta área foram as observações e experiências muitas vezes com prejuízos para a humanidade (SOUZA PINTO, 2013).

O comportamento das argilas, nestas condições de solo, é a que apresenta maior dinamismo devido ao estado coloidal (disperso) no qual se encontram e pela grande presença de águas límpidas, salobras ou salinas, variando sua estrutura físico química ao longo do perfil. Estes fatores contribuem para a chamada Sensitividade das Argilas, onde sua consistência está relacionada com a forma e arranjo dos grãos e do índice de vazios; isto se dá durante o processo de sedimentação e evolui ao longo do tempo, naturalmente, estas estruturas perdem ainda mais sua resistência quando solicitadas, uma vez que, sua organização se deve às cargas impostas ao seu redor e do tipo de mineral presente na argila (silício ou alumínio), cuja absorção de água provoca maior ou menor expansão das partículas (LEPSCH, 2011).

Figura 10 – Estrutura simbólica de minerais com camadas e solos sedimentares



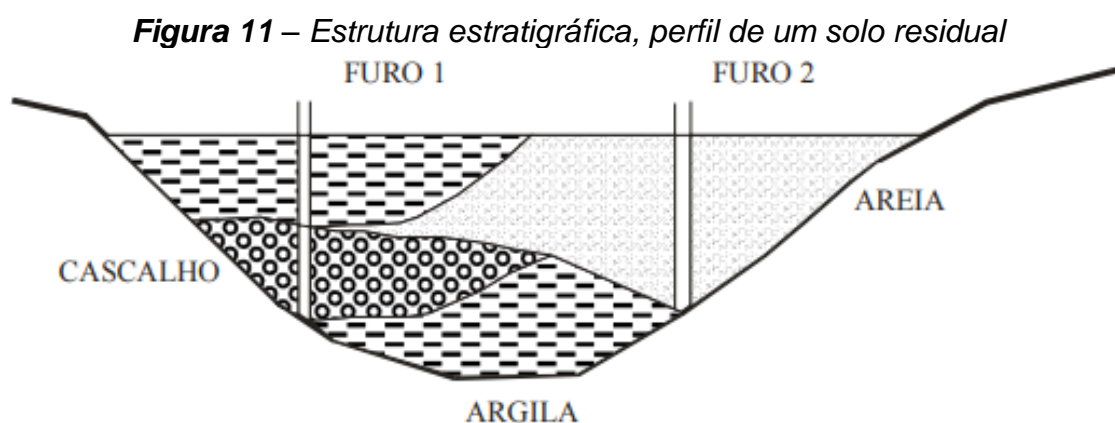
Fonte: Curso Básico de Mecânica dos Solos, SOUZA PINTO (2013)

Os índices de consistência, adaptados e padronizados por Casagrande (Década 1930), chamados Limites de Atterberg, permitem a identificação, se obter a plasticidade/compacidade e indicam a influência das partículas finas (teor de argilas) no comportamento dos solos. A atividade das argilas exibe influência na compressibilidade dos solos. Argilas muito ativas, mesmo em pequenas frações, resultarão em maior índice de consistência. Terzaghi (1943) observou, porém, que quanto maior o Limite de Liquidez (LL) mais sujeitos a recalques ficam o solo. Seu estado (aspecto) varia com o teor de umidade, portanto, sua plasticidade é um índice (IP) limítrofe entre o estado líquido e o quebradiço, definidos como Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP) respectivamente (PINTO e HACHICH, 1998).

A estrutura do solo é definida como o arranjo geométrico de suas partículas uma em relação as outras e que fatores que afetam sua estrutura estão ligados quanto sua forma, tamanho e composição mineralógica, sua natureza e a composição da água presente no mesmo (LEPSCH, 2011).

4.6 Investigações e Características Geotécnicas

A exploração e colheita de amostras, bem como as observações prévias em campo são orientadas de modo a estruturar as interveniências e interrelações da geologia do campo de interesse. A sequência dos estudos necessários, hoje são definidos no âmbito das diretrizes de organização e controle das atividades de construção de barragens, documentos como Guias para Elaboração de Projetos de Barragens e Guia para Construção de Barragens em conformidade com o Art. 15 da Lei No. 12.334/2010 (ANA, 2012).



Fonte: Manual de pavimentação DNIT (2006)

Estes estudos contribuirão para se obter os valores estimados do comportamento do solo em três pontos distintos de análise, sendo estes situados acima da pressão de pré-adensamento, no trecho de pré-adensamento com contribuições das compressões e pressões neutras positivas em relação ao cisalhamento e, nos trechos de alto adensamento onde ocorrem tensões neutras de tração do solo.

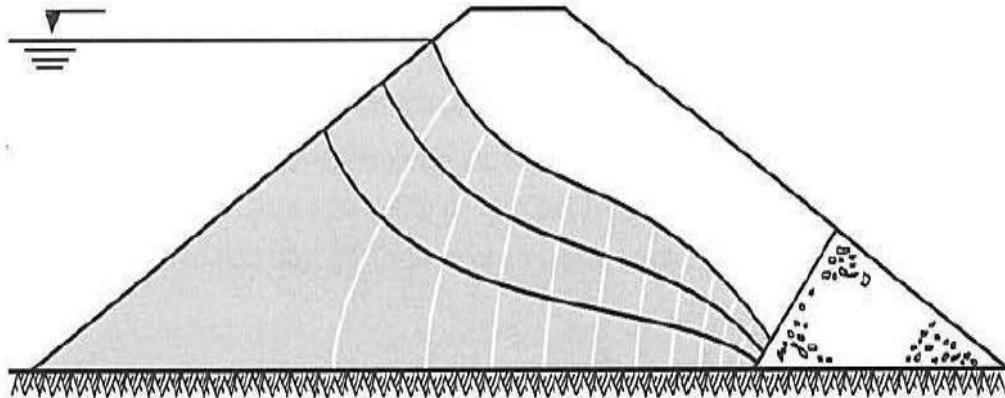
Determinados estes valores de ruptura, serão distinguidas as deformações típicas do conjunto e na prática, se estima não somente o seu comportamento previsível, mas, em relação à segurança, o que também não é plausível de acontecer. Estratificações com blocos e granulometrias diferenciados como o da figura 11 apresentam maiores deformabilidades e menor estanqueidade o que comprometeria negativamente para a estabilidade de uma barragem; fato diverso se dá em sobre um maciço rochoso (MELLO, 1977).

De posse das sondagens, amostras deformadas e indeformadas (solos e rochas), o perfil estratigráfico deverá se estender para além do ponto de interesse, o estudo do subsolo sob a crista de uma barragem deverá abranger pontos além do eixo traçando uma linha de homogeneização do terreno tanto pela sua descontinuidade natural tanto quanto pelos esforços a que se verá submetido pelo conjunto da construção ao final do empreendimento ao longo de sua vida útil. Estes processos são, portanto, a caracterização, classificação, compartimentação e por fim, a modelagem do sítio de obras que correspondem a toda área relacionada com o barramento (COSTA, 2018).

4.7 Permeabilidade, análise de fluxo e percolação

O comportamento da água no solo completa o número de problemas práticos que intervêm para os estudos de engenharia de barragem e são decisivos nas análises de recalques, estanqueidade e percolação que resultam na estabilidade do conjunto das obras, substancialmente a infraestrutura (solo mais fundação). O Princípio das Tensões Efetivas é o elemento decisório para o comportamento dos solos à elevação do nível das águas e da resistência do maciço compactado, uma vez que a tensão efetiva depende da pressão neutra que depende das tensões devidas à percolação no solo (SOUZA PINTO 2013).

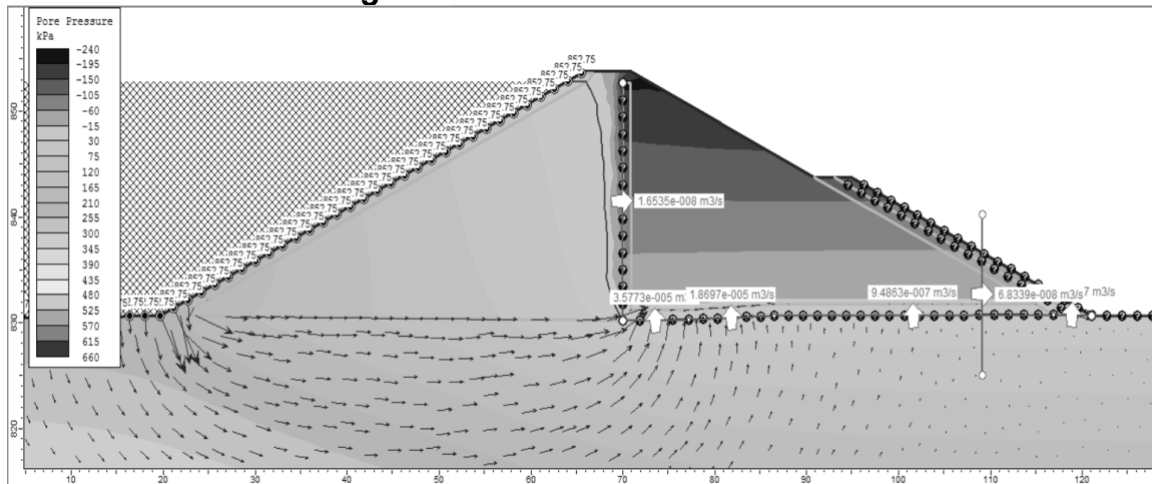
Figura 12 – Rede de fluxo interior de uma barragem de terra



Fonte: Curso Básico de Mecânica dos Solos, SOUZA PINTO (2013)

O modelo hidrogeotécnico dos maciços é a base para a elaboração da análise de percolação. Definir os gradientes, pressões neutras e vazões obtidas pelo traçado das redes de fluxo, as análises de percolação, ajudam a fornecer subsídios para o dimensionamento de filtros verticais e horizontais, impermeabilizações e dispositivos de drenagem nas fundações garantindo sobretudo a estabilidade do talude a jusante. Definidos os métodos de proteção e regulação (drenagem) das águas passantes, tem-se por consequência a obra em si (SOUZA PINTO 2013).

Figura 13 – Rede de fluxo e vazão



Fonte: GODOI (2017)

5 CONCLUSÃO

Dentre os estudos utilizados, buscou-se observar os fatores preponderantes para a construção de uma estrutura de barragem, estes, por sua vez, contribuem para a implantação da mesma de forma segura e efetiva, obedecendo a diversos

parâmetros preestabelecidos por normas, leis e padrões de empresa, além de respeitar os dados obtidos no período pré-projeto, onde busca-se adaptar o projeto as particularidades do local da obra.

A função da barragem e sua efetividade diante da demanda de serviço a ser atendida também é um fator de grande importância no diagnóstico final do projeto. Este parâmetro pode ser considerado conclusivo para o estudo de viabilidade do empreendimento, tendo como fatores limitantes a segurança da mesma e os impactos socioambientais e econômicos causados pela obra.

A compreensão dos sistemas construtivos dá ao pesquisador um panorama de possibilidades e um acervo de artifícios construtivos para elaboração de um projeto eficiente. Muitos projetos apresentam vantagens e desvantagens frente as particularidades do terreno e do tipo de material a ser retido pela barragem, desta forma, a compreensão das características estruturais de diferentes modelos contribui para melhorar a efetividade do sistema e garantir a segurança no processo de implantação e funcionamento.

As informações geológicas e geotécnicas da área são, em última análise, os fatores decisivos da viabilidade técnica de um projeto de barragem, sendo responsáveis pelo sucesso ou fracasso do empreendimento, além de estarem diretamente associados a segurança da obra e de todo o sistema. Estes aspectos demandam análises e estudos complexos e tempo de trabalho dos pesquisadores e projetistas.

A realização de comparativos entre os diferentes tipos de barragens, além de estar diretamente associado a todas as vantagens citadas na compreensão de sistemas construtivos, permite ao projetista a adoção de técnicas e metodologias que contribuam para solucionar problemas pontuais causados por particularidades do terreno. Este parâmetro está diretamente associado ao conhecimento aprofundado do tema, que tem por princípio compreender o objetivo final da obra, a implantação de uma estrutura eficiente e segura para atender a demanda de serviço solicitada.

O estudo acerca deste tema faz-se de extrema importância na realização deste tipo de projeto, uma vez que, a teoria e a prática dentro deste campo complementam-se, evitando imprevistos e incidentes desde a elaboração do projeto, análises pré-projeto e execução da obra.

Recomenda-se para estudos futuros a análise comparativa entre duas barragens específicas executadas utilizando-se diferentes técnicas, observando

desde seu projeto ao resultado final da mesma, passando por suas análises geotécnicas e geológicas ao estudo de viabilidade do empreendimento, adquirindo assim, dados suficientes para um estudo completo acerca do tema, mesclando teoria e prática em uma mesma pesquisa.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT – **Projeto e Execução de Fundações, NBR 6122** – Rio de Janeiro, 2019.

ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS. **Predição da vazão máxima em pequenas bacias na região do Semiárido mineiro.** 2009. Disponível em: <http://www.atlasdasaguas.ufv.br/exemplos_aplicativos/predicao_de_vazao_em_pequenas_bacias_hidrograficas_nas_regioes_norte_e_nordeste_do_estado_de_minas_gerais.html>. Acesso em: 14 out. 2021.

BORGES, A. C. – **Topografia, 2º edição** – São Paulo/SP. Blucher, 1977.

BRAJA, M. Das. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** California State University, Sacramento, EUA. Tradução da 6ª ed norte-americana de All Tasks. Revisão técnica: Pércio Leister de Almeida Barros. São Paulo, 2007.

BRASIL. Planalto (2010). Lei nº 12.334/2010. Seção 1 do D.O.U de 21 de setembro de 2010.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subsecretaria de Assuntos Jurídicos. Lei 14.066, de 30 de setembro de 2020. Diário Oficial da União, 1 out. 2020.

CARVALHO, D. de. - **Barragens, uma introdução para graduandos. Caderno de Notas.** FEAGRI – Faculdade de Engenharia Agrícola UNICAMP. Campinas/SP, 2011.
COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS – **A Legislação de Segurança de Barragens: Um Breve Histórico e Desafios.** Disponível em: <<http://cbdb.org.br/>>. Acesso em: 20 de out. 2020.

COSTA, C. B.; RIBEIRO, C. H. B.; ANDRADE, L.; BARROSO, R. F. **Artigo – Topografia para Monitoramento de Estruturas**. Orientador: Prof. ZANETTE, F. C. Disponível em: <<https://mundogeo.com/2016/11/09/artigo-topografia-aplicada-ao-monitoramento-de-estruturas-estudo-de-caso-sobre-muro-de-contencao/>>. Acesso em: 24 de out. 2020.

COSTA, Walter D. – **Geologia de Barragens**. São Paulo/SP, Oficina dos Textos, 2012.

CRUZ, Paulo T. da. – **100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto**. São Paulo/SP, Oficina dos Textos, 1996.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, DNIT. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. - Manual de Pavimentação, 3º ed. Rio de Janeiro/RJ, 2006
DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no Estado de Minas gerais em relação ao potencial de risco** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008. 130 p. (Dissertação de Mestrado).

ENGWHERE. **Barragem de aterro e Barragem de enrocamento**. 2018. Disponível em: < <https://www.engwhere.com.br/barragem-de-aterro-e-barragem-de-enrocamento/>>. Acesso em: 14 out. 2021.

FREITAS, Carlos Machado de. **Desastres em barragens de mineração: lições do passado para reduzir riscos atuais e futuros**. Epidemiol. Serv. Saúde, Brasília, v. 28, n. 1, e20180120, mar. 2019.

GEOGRAFALANDO. **Estudo dirigido I**. 2013. Disponível em: < <https://geografalando.blogspot.com/2013/05/estudo-dirigido-i-exercicio-de-aula.html>>. Acesso em: 14 out. 2021.

GODOI, C.S. – **Análise de percolação e estabilidade, Barragem CGH Três Marias.** Vacarias/RS, 2017.

GRIBBIN, John E. – **Introdução a Hidráulica, Hidrologia e Gestão de Águas Pluviais.** São Paulo/SP, Cengage Learning, 2017.

HACHICH, W.; FALCONI F.; SAES J.; FROTA R.; CARVALHO C.; NIYAMA S. **Fundações - Teoria e Prática.** ABMS/ABEF, Editora PINI, 1996.

IGEOLOGICO. **Você sabe quais são os tipos de barragens?** 2020. Disponível em: <<https://igeologico.com.br/voce-sabe-quais-sao-os-tipos-de-barragens/>>. Acesso em: 03 nov. 2021.

LEPSCH, F. I. – **Dezenove Lições de Pedologia.** Oficina de Textos, São Paulo, 2011.

LOPES, Marieli Biondo. **Tratamento de Fundação para Barragens.** Editora Appris Ltda. Curitiba/PR, 2020.

MARANGON, M. - **Barragens de Terra e Enrocamento.** Minas Gerais: 2004. Disponível em: <https://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/togot_unid05.pdf> Acesso em 25 de out. 2020.

MASSAD, Façal. – **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia.** 2º edição. São Paulo/SP, Oficina dos Textos, 2010.

MAYORGA, Claudia; PROFETA, Zélia. Apresentação: Mais uma barragem se rompe: qual o papel da ciência? **Cienc. Cult.**, São Paulo, v. 72, n. 2, p. 16-17, abr. 2020.

MAXIEDUCA. **Dúvidas sobre barragens.** 2018. Disponível em: <<https://blog.maxieduca.com.br/barragens-construcoes-aguas/>>. Acesso em: 14 out. 2021.

MELLO, Victor F. B. **Investigações Geológico-Geotécnicas para Barragens.** **Revista Latino Americana de Geotecnia, volume IV.** Caracas/Venezuela, 1977. Disponível em: <<http://victorfbdemello.com.br/arquivos/Publicacoes/062%20->

%20IVESTIGACOES%20GEOLOGICA-
GEOTECNICAS%20PARA%20BARRAGENS.pdf>. Acesso em 10 de set. 2020.

MENESCAL, R. A., CRUZ, P. T., CARVALHO, R. V., FONTENELLE, A. S., OLIVEIRA, S. K. F. Uma metodologia para avaliação do potencial de risco em barragens do semiárido. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2001.

MORANO, J.R. **Pequenas Barragens de Terra**. São Paulo: 2006.

NEOIPSUM. **Sete principais tipos de barragens e suas aplicações**. 2020. Disponível em: < <https://neoipsum.com.br/tipos-de-barragens/>>. Acesso em: 08 nov. 2021.

OBRAS24HORAS, **Portal. Mistura quase seca**. 2009. Disponível em: <<https://www.obra24horas.com.br/materias/produtos-e-servicos/mistura-quase-seca>> Acesso em: 08 nov. 2021.

OFITEXTO. **Conheça todos os tipos de barragens**. 2013. Disponível em: <<https://www.ofitexto.com.br/comunitexto/conheca-todos-os-tipos-de-barragem/>>. Acesso em: 03 nov. 2021.

PEREIRA, Geraldo Magela. **Projeto de Usinas Hidrelétricas Passo a Passo**. São Paulo: 2015.

PINTO, Carlos de Souza – **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. Oficina de Textos, São Paulo, 2013.

SANTIAGO & CINTRA, Geotecnologias – **Como Funciona o Monitoramento de Estruturas**. Disponível em: <<https://www.santiagoecintra.com.br/blog/geotecnologias/como-funciona-o-monitoramento-de-estruturasy>>. Acesso em: 27 de out. 2020.

SAYÃO, A. **Notas de aula da disciplina: Barragens de Terra e Enrocamento**. Curso

de mestrado da PUC-RJ, Rio de Janeiro: 2009.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento**. São Paulo: 2006.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS, SNISB – **Relatórios Diversos**. Disponível em: <<http://www.snisb.gov.br/portal/snisb>>. Acesso em 19 de out. 2020.

TEIXEIRA, Wilson, TOLEDO, Maria Cristina M. de, FAIRCHILD, Thomas Rich. – **Decifrando a Terra**. São Paulo/SP, Oficina de Textos, 2000.

VALE, Estatal Companhia. **Entenda as Barragens da Vale**. Minas Gerais. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/Documents/PT/entenda-as-barragens-da-vale-p>. Acesso em: 01 nov. 2021.