



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ENGENHARIAS 2020

O EFEITO DAS VIBRAÇÕES NO DESLOCAMENTO DE REJEITOS EM BARRAGENS.

Daniele Da Silva Lima
Milena Natur Ferreira
Prof. Me. Rafael Augusto Valentim Da Cruz Magdalena
Universidade São Francisco
daniastro2015@outlook.com.br

Daniele Da Silva Lima; Milena Natur Ferreira; Alunas do Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista.
Professor Orientador Me. Rafael Augusto Valentim Da Cruz Magdalena, Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista.

Resumo

O presente trabalho leva à pesquisa, cujo tema é de grande importância para mostrar e solucionar ou eventualmente amenizar esse problema, que é o efeito das vibrações no deslocamento de rejeitos, e a possibilidade de reduzir o deslocamento do rejeito causado por vibração, com o objetivo de evitar os contínuos desastres ambientais-sociais-econômicos que estão ocorrendo nas áreas de mineração. Partindo do pressuposto que se as barragens estiverem distantes do local de extração haverá menor deslocamento. As barragens de rejeito são reservatórios que armazenam os resíduos sólidos e água oriundos da extração de minério, a fim de evitar danos ambientais. Essas barragens vêm chamando atenção, devido ao aumento de ruptura que ocorreram no Brasil, que afetam muito o país em vários aspectos. O rompimento de uma barragem pode ocorrer por diversos motivos que devem ser analisados e considerados em projetos futuros, ou com constante manutenção. A vibração pode causar a liquefação no rejeito, com aumento de peso sobre as paredes da barragem ou a infiltração da água nas paredes, devido ao seu método de construção, e resultando em seu rompimento. Há poucas informações relacionadas aos efeitos das vibrações em rejeitos, suas influências em rupturas, com isso foi feito um levantamento bibliográfico, relacionados: às barragens e os rejeitos de mineração, tipos de vibrações próximas às barragens, legislações relacionadas à segurança e normas para execução de ensaios, para obter mais informações quanto aos comportamentos dos rejeitos, suas propriedades e executar adequadamente os ensaios de vibração com rejeitos seco e úmido, e observar seu comportamento.

Palavras-chave: Análises, Características, Minério, Segurança.

Introdução

As barragens são construções de contenção com diversas finalidades como de contenção de água para abastecimento da população, para evitar inundações através do controle de vazões, irrigação agrícola, geração de energia hidrelétrica, e também para o armazenamento de rejeitos de minério.

Há milênios as barragens são construídas para contenção de água para abastecimento, controle de vazões, etc. Com o avanço da mineração, as barragens se tornaram uma solução para a disposição de rejeitos no processo de lavra, que são as operações para a extração de jazidas. Após o século XV, teve um grande avanço na tecnologia para mineração e com isso um aumento significativo na produção de rejeitos. O que antes eram encaminhadas para rios e cursos d'água, agora era necessário à contenção destes rejeitos em um local apropriado para a não contaminação da água. Com isso, a evolução na técnica de construção de barragens se desenvolveu desde o método empírico, até a aplicação de técnicas de engenharia de barragens.

Com o aumento da economia através da exploração de minerais as construções de barragens de rejeito continuam aumentando cada vez mais, exigindo alguns métodos construtivos mais eficientes. As construções dessas barragens são um tanto diferenciadas pelo fato da sua construção ocorreu por etapas, conforme são produzidos os rejeitos os alteamentos são realizados. Alguns problemas causados pelo enorme volume de rejeito jogado no meio ambiente resultaram em um impacto ambiental considerável.

No Brasil, as primeiras leis sobre o controle de rejeitos foram criadas após os conflitos de agricultores e mineradores, por conta da contaminação de água e fechamento de poços de irrigação. A ANM - Agência Nacional de Mineração (autarquia) foi criada como uma medida provisória em junho de 2017, e virou Lei em dezembro do mesmo ano. É vinculada ao Ministério de Minas e Energia, que é responsável pela gestão de mineração e recursos minerais brasileiros (Exceto hidrocarbonetos e substâncias nucleares), e estabelece a política nacional para atividades de mineração.

Segundo a ANA - Agência Nacional de Águas, no Brasil há 24 mil barragens registradas, com diferentes propósitos, e destes, 790 são de contenção de rejeitos de mineração. Só em Minas Gerais, pelo menos 50 barragens são consideradas de alto risco pela ANM - Agência Nacional de Mineração, devido seu método de construção.

Essencialmente existe três métodos construtivos para barragens de rejeito, método a montante, método a jusante e método da linha de centro.

O Método a Montante, em que o alteamento sempre será a montante, é o mais econômico, porém é considerado o mais perigoso devido às tensões produzidas no fenômeno liquefação, que atrapalha na solidificação do material aplicado como fundação.

O Método a Jusante em que o alteamento será a jusante do dique até a cota final, é construído um dique de partida, solo compactado. Há uma maior força a carregamentos dinâmicos, com materiais mais rústicos, ajudando para uma drenagem mais livre, pelo seu próprio peso, escora o aterro as fundações, auxiliando para não haver deslizamento e movimentos. A drenagem obtém baixa susceptibilidade de liquefação e simplicidade na operação, não atrapalhando a segurança. Este método

Por último o **Método de Linha do Centro**, que sua construção acompanha o centro da linha vertical, este consiste nos dois métodos citados anteriormente. Onde o núcleo central de materiais com maior teor de impermeabilidade, no qual, uma trincheira de vedação inferior do nível da superfície auxilia a barragem para não haja infiltrações. A aplicação de drenagem é possível em todas as etapas deste método, auxiliando no monitoramento da saturação e proporciona dissipação de poropressão, havendo assim o mais recomendado para área com grandes sismicidade. Também há as barragens de aterro homogêneo que ocorrem quando há o movimento subterrâneo da água através do solo, devido grande quantidade de pressão nos poros no aterro, causando problemas para barragem com fundações impermeáveis. As

barragens Zonadas são compostas por três categorias na terraplanagem, primeiro é permeável para face jusante, semi-impermeável para seção montante e impermeável para o núcleo. Tornando assim, o custo mais alto que a barragem homogênea, mas em contrapartida ela é a melhor alternativa quando construída barragem em grande porte, pois permite a utilização de maquinaria. Barragens nesse modelo de instalação eram usadas materiais impermeáveis, como película de plástico grosso, que se tornou um grande sucesso como alternativa a núcleo de argila. Entretanto trouxeram grandes problemas relacionados à isoptera, portanto, antes das escavações e tratamento esses fatores devem ser analisados para que não haja perda na eficiência da estrutura. Uma trincheira de vedação diminui os movimentos subterrâneos da água através do solo (percolação), com isso diversas barragens, como homogêneas e zonadas podem ser ajudadas com este método de construção, assim auxiliando sua estabilidade.

Projeto de uma Barragem

O processo de nascimento de uma barragem envolve três etapas distintas. O projeto, a construção e a operação. O projeto consiste no conjunto de investigação, estudo e análise para definir qual o tipo de obra mais adequado, e o método de construção. A construção abrange todas as obras auxiliares para a utilização da barragem. A construção só é concluída após o enchimento desta barragem. A operação é o funcionamento da estrutura, até que seja concluída. Os objetivos são basicamente para Regularização e Contenção onde a de regularização regulariza o regime hidrológico de um rio, armazenando em períodos de grande demanda afluente para utilizar em períodos de pouca afluência, para manter o volume e os níveis de vazão, para abastecimento e irrigação. O de Contenção retém água para evitar enchentes, e liberada aos poucos para evitar danos; ou reter sólidos e materiais tóxicos que podem causar danos para o meio ambiente.

Os tipos de barragens também devem ser considerados em projetos. As barragens convencionais englobam barragens de terra; de enrocamento (com partes permeáveis e não permeáveis, de material rochoso e argiloso); de concreto; e mistas (com diferentes materiais ao longo de sua seção transversal); Já as não convencionais são as barragens de gabião (de pequeno porte); de madeira revestida com aço; e ainda barragens de alvenaria e pedra.

Segundo a NBR 13028:2017 (item 5.4), o projeto da barragem pode ser desenvolvido em: nível conceitual onde estão contidos os estudos de alternativas locais e tecnológicas, critérios de projeto, restrições, tipo da barragem selecionada, base topográfica, planta de situação, etc. É importante ressaltar que os impactos de uma barragem começam desde seu nascimento até sua desativação, como a interferência em recursos hídricos superficiais e subterrâneos; perda da cobertura vegetal; impactos visuais; impactos sobre a fauna; alterações na qualidade do ar; desconforto ambiental; impactos sobre as atividades econômicas e equipamentos sociais; interferências em infraestruturas e serviços públicos; impactos em infraestruturas viárias e no tráfego; etc.

Os riscos pela ruptura podem ocorrer por combinação de diversos fatores, como fatores meteorológicos, falhas na fundação, infiltrações, e falta de manutenção adequada. Os principais motivos são devido à Liquefação podendo ser estática (carregamento estático, sobrecarga) ou dinâmica (associada a vibrações); Galgamento, quando há excessiva passagem de água na crista causando ruptura parcial ou total; E “*Piping*” que é a erosão interna das paredes da barragem no sentido de jusante para montante. Esses tipos de rupturas causam instabilidade nos taludes, e as vibrações também influenciar, para o colapso da estrutura.

O Rejeito

Rejeito é todo o material descartado durante o processo de beneficiamento de minérios de modo geral, são os resíduos resultantes do processo de extração mineral oriundos de pilhas de minério pobres, estéreis, rochas, solos, sedimentos, decantação de efluentes, aparas e lamas de serrarias de mármore e granito, mineração artesanal de pedras preciosas e semipreciosas, e finos e ultrafinos não aproveitáveis. O rejeito como proveito do minério de ferro é um subproduto decorrente do procedimento de lavra. Por meio da escavação esse procedimento retira o solo para desmonte da rocha, gerando o rejeito estéril formado do solo supracitado e agregado do interior da rocha.

Após, é concretizado outra etapa por preparação granulométrica, concentração ou purificação do minério por procedimentos físicos ou químicos, resultando a concentração de ferro podendo chegar a 70% nos rejeitos gerados. Visando o ganho das substâncias úteis no processo de mineração, este procedimento baseia-se em um conjunto de passos, encontradas em seu estado natural, para que sejam processadas e adequadas a sua destinação final.

As etapas da mineração são a prospecção, a pesquisa, a lavra e o descomissionamento. A prospecção e a pesquisa são conjunto de conhecimentos, técnicas e ferramentas utilizadas para a descoberta e estudo de depósitos minerais. Ao longo destes dois processos planejam determinar a existência e certo local, com quantidade e qualidade necessárias para extração. Quando há uma viabilidade econômica da exploração no resultado da pesquisa, o depósito mineral é considerado jazida. A definição de jazidas são massas individualizadas de substâncias minerais ou fósseis, encontradas na superfície ou no interior da terra, que apresentem valor econômico, constituindo riqueza mineral do País. A mina é a jazida em processo produtivo, origem de dois subprodutos. Um é o agregado natural sendo extraído de minerais sólidos, utilizado para adquirir lucros financeiros através de sua venda, assim denominado de minério. O outro é material sem valor econômico, onde é retirado para proporcionar a lavra, denominado esse subproduto de estéril. Através de processo físico-químico na usina, a fragmentação separa os minerais dos agregados. Após este procedimento pode-se distinguir o concentrado, que consiste no fluxo para o qual se moveram preferencialmente as partículas do minério que se pretende vender. Por fim deste procedimento de concentração, o rejeito se localizam em polpa, método espesso e segregável, onde na destilação final pode-se diminuir a porcentagem de água. Devem ser obedecidos os critérios técnicos e econômicos na escolha sobre a concentração de sólidos com o qual haverá o descarte do rejeito. Com a reaplicação de água neste processo de concentração, obtém-se o benefício de diminuir a umidade do rejeito, resultando na redução da demanda de recursos hídricos.

Um dos grandes problemas envolvido com acidentes nas estruturas de contenção de rejeitos é a liquefação, com os rejeitos menos úmidos esse potencial de risco diminui, pois nesse caso a pasta seca em menor tempo e se transforma em um material mais endurecido, apresentando o comportamento mais semelhante como solo argiloso do que como fluido. Porém, por sua vez este rejeito com maior concentração de sólido tem seu custo maior, por conta da instalação e manutenção de sistemas de desagüamento.

Rejeitos têm múltiplos aspectos geotécnicos, mineralógicas e físico-químicas, que estão relacionados ao método que o minério foi tratado e processado. Quando de granulometria grossa, superior a 0,074mm, são considerados rejeitos granulares, já quando granulometria fina, são considerados lama. Os descartes forma de polpa são transportados por tubulações com sistemas de bombeamento ou gravidade, já os em forma a granel são levados por meio de caminhões. Os rejeitos podem ser dispostos em minas subterrâneas, em cavas exauridas de minas, em pilhas, por empilhamento a seco (método “*dry stacking*”), por disposição em pasta, e em barragens de contenção de rejeitos.

A escolha de um método para a disposição dos rejeitos depende da natureza do processo de mineração, das condições geológicas e topográficas da região, das propriedades mecânicas dos materiais, do poder de impacto ambiental de contaminantes dos rejeitos, e das condições climáticas da região. Através de análises granulométricas, químicas, mineralógicas e separação magnética, é possível verificar as características dos rejeitos finos em barragens de minério de ferro e classificadas de acordo com a porcentagem do tipo de mineral, para obter a concentração aplicada na indústria metalúrgica. De forma geral os rejeitos são classificados como Lama e Arenoso. A Lama, em que a parte sólida é muito fina; é composto por argilas e siltes. Aponta baixa permeabilidade, alta plasticidade e compressibilidade, apontando também dificuldade de adensamento e sedimentação. Tornando assim, elementos impróprios para a estrutura das barragens. São semelhantes às barragens de contenção de água, porém sua estrutura é construída com solo argiloso. Já o Arenoso, em que a parte sólida tem maior granulometria, geralmente constituída por quartzo, por areias finas e médias não plásticas, em que pode causar segregação mais facilmente, tem alta permeabilidade, baixa compressibilidade, resistência ao cisalhamento elevada e depósitos com boa capacidade de suporte.

Em virtude do menor custo econômico, o próprio rejeito é utilizado para a construção de barragens. Nesse método de construção, as barragens reagem como aterros hidráulicos, sendo estruturas por deposição de solo em meio aquoso. Geralmente os rejeitos utilizados são em forma aquosa pela fácil e rápida operação e transporte que são feitas através de tubulações e canais, com descarga única, ou seja, pontual, descarga múltipla, com diversas saídas, e hidrociclones, em que há separação por granulometria. São duas categorias diferentes de materiais decorrente do depósito, uma são areias lançada por mecanismo hidráulico e a outra, lamas depositadas por sedimentação. Os fundamentais aspectos geotécnicos dos rejeitos são: densidade in situ, limites de *Atterberg*, índice de vazios inicial, consolidação ou adensamento, compressibilidade, permeabilidade e resistência ao cisalhamento. Um dos fenômenos contribuinte para a modificação das propriedades dos rejeitos é a liquefação, ela é a responsável por algumas rupturas de barragens, sendo uma subdisciplina de mecânica dos sólidos. A liquefação dinâmica ocorre, geralmente, em áreas sísmicas ou sujeitas a altas vibrações. Muitas barragens de rejeitos já romperam devido à liquefação dinâmica, em países onde é suscetível a ocorrência de terremotos. Os seguintes gatilhos potenciais para a liquefação estática em barragens de rejeitos como o aumento das poropressões induzido por uma subida da superfície freática; as tensões cisalhantes estáticas atuantes ultrapassando a superfície de colapso, levando a uma liquefação espontânea; o movimento da fundação rápido o suficiente para criar um carregamento não drenado em rejeitos suscetíveis ao colapso espontâneo; o aumento das poropressões induzido por uma taxa de carregamento excessiva, como por exemplo, devido a um rápido alteamento da barragem; e a remoção da camada de suporte posicionada no pé da estrutura, promovida por galgamento da barragem ou por qualquer outra situação, aumentando as tensões cisalhantes atuantes.

Uma das situações que pode ser a peça chave para que a liquefação corra, é que ao longo do aumento da superfície freática no inferior da barragem de rejeito, a tensão de cisalhante (q) é mantida constante, enquanto a tensão efetiva (p') é reduzida, ocorrendo assim sua ruptura, caso essa nova tensão esteja acima da superfície de colapso. Em contrapartida, a liquefação pode ser influenciada caso não haja uma drenagem no carregamento, após um aumento rápido da linha freática. Outro fator que pode acarretar na subida rápida dos níveis de tensões é a construção de dique e aterros sobre a fundação de rejeitos granulares saturados e fofos em circunstância onde não há a drenagem. Contudo, há um aumento da quantidade de rejeito saturado na estrutura, decorrente do aterro hidráulico pelo método de deposição a montante, onde consiste no lançamento de rejeitos desses diques. Quando os diques e taludes estão mais altos e inclinados, respectivamente, maior a chance de desmoronar repentinamente devido a liquefação.

O rompimento de barragens de contenção de rejeitos é de grande preocupação e interesse, por conta dos altos impactos sociais, ambientais e econômicos que pode acarretar com esse evento. Uma catástrofe desse porte tem consequências ambientais e humanas irreparáveis, e marca profundamente a forma que a sociedade brasileira deve lidar com a segurança desses sistemas de produção. Após o rompimento de uma barragem, além de trazer danos imediatos nas áreas próximas à mineração, podem também alterar drasticamente a condição de vida da população, acarretar danos no ecossistema, aumentando a condição de transmissão de doenças infecciosas, contudo, colocando a vida de mais pessoas em risco.

O Brasil, mais especificamente no estado de Minas Gerais ao longo dos anos passou por diversos desastres envolvidos com barragens de rejeito, dos quais trouxeram danos imensuráveis. Apontam-se problemas e acontecimentos do passado para justificar os acontecimentos presentes, ao invés de aprender com eles, perdemos a chance de melhorar ou criar novos métodos de prevenção, e evitar que as catástrofes se repitam.

As vibrações

As vibrações ou oscilações são os movimentos que se repetem em um determinado intervalo de tempo. A teoria da vibração é o estudo dos movimentos oscilatórios de corpos e forças associadas a eles. Recentemente, muitas investigações também foram motivadas pelas aplicações na área da engenharia, como projeto de máquinas, estruturas, motores e turbinas, etc. em razão do desbalanceamento e o desequilíbrio que podem levar a falhas em projetos.

Como o Brasil reside em uma área de baixas vibrações naturais, como terremotos, esse tipo de vibração não atinge significativamente as estruturas, como barragens de rejeitos. Já as vibrações mecânicas, podem ser geradas para alimentadores, compactadores, britadores, vibradores para concreto, ensaios de fadiga, decorrente também de máquinas utilizadas no processo de mineração é um dos fatores que afeta diretamente as barragens, por conta da atividade sísmica que este processo gera nas áreas próximas a mineração. As vibrações existem devido aos efeitos dinâmicos, uma pequena vibração pode ocasionar frequências de ressonâncias em partes estruturais próximas ou em contato direto, e ser amplificada para um nível maior de vibração, que geralmente só será percebido nas estruturas afetadas, e não em sua fonte. O entendimento do problema é preciso para encontrar uma solução eficiente.

Em geral os parâmetros de medição para monitoramento de vibração são relacionados à velocidade, aceleração, e deslocamento. Entre os três parâmetros considerados, a forma e o período da vibração são semelhantes, a diferença principal são as fases entre os três. O deslocamento realça componente de baixa frequência, a velocidade é pouco influenciada por ruídos de baixa ou alta frequência, a aceleração representa melhor componentes de alta frequência. Normalmente as vibrações são classificadas quanto: **À excitação:** sendo livres (quando, depois de iniciado o ciclo de vibrações, continua a vibrar por conta própria.) ou forçadas (quando um sistema estiver sujeito a uma força externa). **Ao amortecimento:** podendo ser amortecidas (quando se perde ou se dissipa energia por atrito ou outra resistência durante a oscilação) ou não amortecidas (quando não se dissipa a energia durante a oscilação). **Às equações envolvidas:** o sistema pode ser linear, quando os componentes básicos do sistema vibratório comportar-se linearmente, a vibração (potência 0 ou 1 e não existe produto entre estas e suas derivadas) ou não-linear, quando os componentes do sistema não se comportam linearmente (quando não é válido o princípio da superposição). **Determinísticas:** quando conhecido o valor da força ou do movimento que está agindo sobre o sistema vibratório em dado instante; e **Aleatórias,** quando o valor em dado instante não pode ser previsto.

Já as vibrações transmitidas uma atividade varia de acordo com sua duração de operação, sendo longa (contínua), média (transiente) ou de curta duração (intermitente), relacionada à sua magnitude. A vibração intermitente: é caracterizada pela sucessão de

vibrações de curta duração, no caso de atividades de cravação de estacas por impacto, atividade de compactação dinâmica por batimento, e uso de explosivos. A vibração transiente: Quando os níveis de vibrações tem um impacto repentino seguido de um tempo de repouso prolongado. É decorrente de atividades como tráfego de veículos, em áreas de transporte ferroviários, além de cargas e descargas de materiais. A vibração contínua: caracterizada pelo nível de vibração constante é mantido por um período significativo. As vibrações contínuas tendem a serem mais prejudiciais às estruturas do que as mais rápidas, devido ao período prolongado de exposição que a estrutura está sujeitas. Por isso os limites de segurança são mais restritos.

As ondas podem ser classificadas como Primárias (P) ou Secundárias (S), e ondas de superfície. As **ondas primárias (P)** são as primeiras ondas a chegar, com uma velocidade de propagação maior, é longitudinal que fazem a rocha vibrar paralelamente à direção da onda. Causando alterações no volume, devido a compressões alternadas, porém sem alterações na forma. No ar essas ondas se propagam na velocidade do som. Sua velocidade de propagação variam de acordo com o meio em que se propaga com valores gerais de 330m/s no ar, 1450m/s na água, e 5000m/s no granito. A **onda secundária (S)** são as segundas ondas a chegar, são ondas transversais (cisalhantes), em que o solo é deslocado perpendicularmente à direção da onda de propagação. Por ser polarizado horizontalmente, o solo se move alternadamente, sem alterar seu volume. Estas se propagam apenas em sólidos, e sua velocidade de propagação é mais lenta, entre 2000 e 5000m/s. As **ondas de superfície** se propagam abaixo da superfície da Terra e desloca mais lentamente, com baixa frequência, longa duração e grande amplitude podendo ser mais destrutivas.

Existem dois tipos de onda de superfície, as ondas *Rayleigh* (provocam vibrações no sentido contrário a propagação da onda) e as ondas *Love* (produzem cisalhamento horizontal do solo, são mais rápidas que as ondas *Rayleigh*). A *Superposição de Ondas* (Interferência) ocorre quando duas ondas se superpõem num dado meio, obedece a dois princípios básicos:

Em primeiro, no ponto onde a superposição o efeito resultante é a soma dos efeitos que seriam produzidos pelas ondas que se superpõem, caso atingissem isoladamente aquele ponto. Segundo, após a superposição, cada onda recupera suas características iniciais, continuando sua propagação no meio, como nada aconteceu. Considerando duas ondas não periódicas propagando-se numa mesma corda tensa, mas em sentido opostos. Há duas possibilidades, de as ondas se deslocarem do mesmo lado da corda ou em lados contrários. No ponto de superposição, as ondas se reforçam, (interferência construtiva) ou se enfraquecem, (interferência destrutiva). Após a superposição as ondas continuam sua propagação independente ao longo da corda, sem alterarem suas características iniciais. Os principais motivos das rupturas, entre outros, são devido às vibrações oriundas das atividades de mineração podem influenciar no aumento da poropressão e liquefação podendo ser estática (sobrecarga) ou dinâmica (associada a vibrações). Causando instabilidade nos taludes, e colapso da estrutura. Os problemas das vibrações em estruturas podem ser agrupados de duas maneiras, os que podem afetar a estrutura e os níveis de conforto àqueles que a utiliza. O Estado de Limite Último de resistência das estruturas está relacionado à Engenharia Sísmica, as ações exteriores adversas, podem induzir danos estruturais significativos, ou ainda colapsar a estrutura. Por ser a área que mais preocupa a comunidade científica, pelo impacto social e econômico causados pelos efeitos catastróficos dos sismos, é que se tem visto ao maior número de aplicações de técnicas para melhorar o processo de dissipação de energia ou de criar um sistema de isolamento sísmico. À grande possibilidade da ocorrência de vibrações em estruturas solicitadas por cargas móveis, no caso de estradas e rodovias próximas em a estrutura, sujeitas a cargas dinâmicas associadas ao tráfego de veículos. No caso de rodovias, por exemplo, a rugosidade do pavimento é a principal fonte de indução de vibração na estrutura.

Os problemas relacionados com a formação de potenciais focos de liquefação, causada por vibrações no terreno é muitas vezes decorrente ao desmonte com explosivos próximo as barragens. A detonação com explosivos no desmonte de rochas emite grandes quantidades de energias nas formas de ondas de choque e gases, a pressão e as temperaturas elevadas se espalham em todos os sentidos.

A energia oriunda da ação exotérmica de detonação de explosivos é passada à rocha sobre grandes pressões realizada pelos gases nas paredes dos furos. Podendo causar vibrações na região sísmica de até 50 metros quando o pulso dinâmico atravessa a rocha.

As fraturas realizadas pelas ondas de choque auxiliam a introdução dos gases que efetuam uma tração maior em suas paredes, finalizando o desmonte da rocha, um fator contribuinte para a fragmentação da rocha é a ação dos gases no desmonte da mesma, causando fraturar perpendiculares a seu sentido de expansão.

Os principais impactos causados por detonação do desmonte de rochas são: **Vibrações:** manifestação física da propagação das ondas sísmicas no meio material; **Ultrapassagem:** lançamento inadequado da rocha devido à detonação; **Sobrepressão:** superposição de pulsos de pressão do ar, positivos e negativos, devido a explosões no terreno; **Gases e poeiras:** oriundo dos explosivos e da pulverização das rochas.

Quando não há o controle adequado, estes impactos podem causar graves problemas materiais e sociais. A propagação da onda de choque pela rocha provoca a vibração, apresentando amplitudes maiores ou menores, de acordo com a intensidade do explosivo, e frequência variada dependendo do tipo de rocha em que foi gerada e/ou captada. Normalmente rochas mais duras têm altas frequências, acima de 100 Hz, enquanto as demais, baixa frequência, abaixo de 20 Hz. A amplitude do movimento é correlacionada com a carga detonada e com a distância do ponto onde se é feita as medições. Ou seja, é diretamente proporcional à carga e inversamente proporcional a distancia. Até o ano de 2010, não existia um instrumento legal que tratasse da segurança nas barragens de rejeitos em nível nacional no Brasil. Em 2010 foi promulgada a Lei nº 12.334/2010, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB.

A PNSB aplica-se às barragens de água, de rejeitos e a resíduos industriais, sendo que para poder ser enquadrada nesta lei, a barragem deve apresentar pelo menos uma das características apresentadas por ela. Anteriormente a esta lei, somente a Portaria DNPM nº 237/2000, por meio das Normas Reguladoras da Mineração-NRM, especificamente da NRM-19, que estabelecia critérios gerais para a disposição de estéril, rejeitos e produtos provenientes do beneficiamento de minérios, de forma mais superficial. De acordo com a Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH nº 143/2012, toda e qualquer barragem, deve ter uma classificação, baseada em: **Categoria de risco:** Os aspectos da barragem que podem influenciar na ocorrência de acidente, levando-se em conta aspectos como características técnicas; estado de conservação; e plano de segurança da barragem. A cada item deste, é atribuído um valor em sua somatória, resulta em uma pontuação para a categoria de risco, quanto menor for o valor, melhor será para a barragem. **O dano potencial associado** pode ocorrer devido ao: rompimento; vazamento; infiltrações; mau funcionamento; etc. Podendo ser graduado de acordo com o volume de rejeito armazenado, existência de população a jusante, impactos ambientais e impactos socioeconômicos.

A segurança em barragens é de suma importância, Devido aos acidentes de uma barragem de rejeitos, e seus grandes impactos, é necessário o monitoramento constante, utilizando de tecnologia disponível, a fim de evitá-las. Por isso, deve-se fazer a revisão do projeto e do método construtivo; inspeções em campo; análises da instrumentação; e análise de comportamento da barragem durante as fases de operação.

Métodos

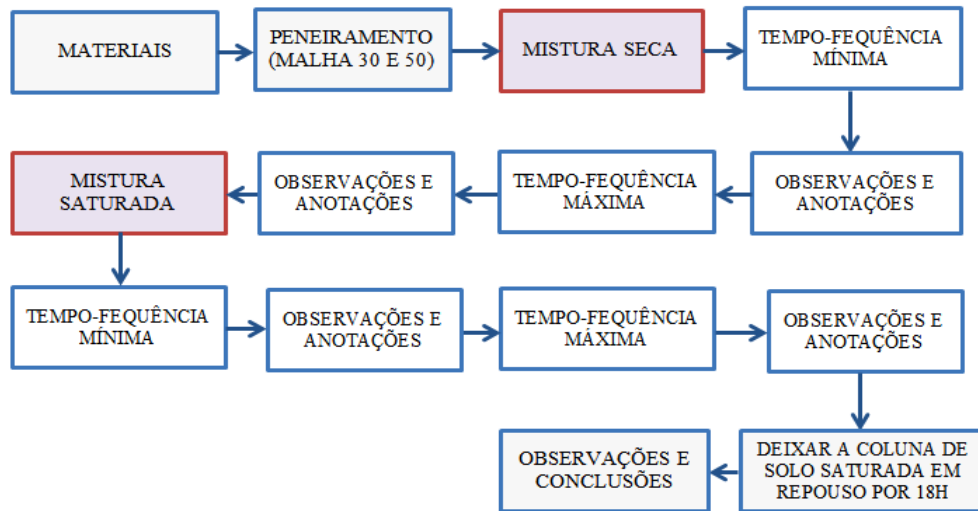
Na produção de minério, diversas operações emitem vibrações, como atividades de desmonte de rochas com uso de explosivos, operação de máquinas no processo de beneficiamento de minério, atividades ligadas ao nivelamento de pilhas de estéril ou de rejeito por meio de tratores, atividades de carga e descarga de materiais (produtos, estéril, rejeito, etc.), tráfego em vias internas de acesso, etc.

A ABNT NBR 9653 publicada em 08 de maio de 2018 (versão Corrigida, 25 de maio de 2018) – “Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas”, estabelece limites para controle de vibração relacionando a velocidade da partícula de pico com frequência associando a onda de choque, delimitando níveis aceitáveis. Somente se aplica às emissões de ruídos impulsivos, ultra lançamentos devido ao desmonte de rocha, e vibrações pelo terreno. É facultativa em minerações localizadas em áreas não urbanas, exceto nos casos em que há um risco semelhante. Para controle dos efeitos negativos causados pelo processo de desmonte de rocha com explosivos, é necessário obter previsões de seus efeitos e a adoção de medidas efetivas, para minimizá-las, conforme especificado no primeiro capítulo da ABNT NBR 9653/2018. Porém no corpo da norma não apresenta metodologias específicas ou a indicação de tecnologia adequada para o controle efetivo dos efeitos mencionados. Além disso, no escopo da norma informa que é facultativa a sua aplicação em áreas não urbanas, contudo, não é especificado o conceito adotado de “área urbana”. Mesmo com várias outras NBR’s para ensaios com solo, não há uma NBR específica associando as vibrações com o solo. Com isso foi adotado método de ensaio, com base em materiais disponíveis. Utilizando como base os ensaios de 2011 feitos por Marcos Antônio Gomes (Engenheiro de Minas); Carlos Alberto Pereira (Departamento de Engenharia de Minas - DEMIN / UFOP); e Antônio Eduardo Clark Peres (Dr. Professor, Engenharia Metalúrgica da UFMG), cujo artigo denominado “Mineração - Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro”.

A pesquisa proposta foi apresentada as características dos rejeitos finos do tratamento de minério, estocados em barragens, com análise granulométrica por peneiramento a úmido, análises químicas por espectrometria de plasma, e análises mineralógicas por difração de raios-X. Verificou-se que, nas análises granulométricas em rejeito, feitas através de peneiramento a úmido, onde as partículas se encontram entre 0,15mm (8,21%) e 0,045mm, outros 51,81% estão abaixo de 0,045mm. Nas análises químicas foram encontrados: 48,08% Ferro (Fe), 20,58% Sílica (SiO₂) e 3,16% Óxido de Alumínio (Al₂O₃), totalizando 71,82%.

Os outros 28,18% são de não metais, solo, e componentes que não se pode ser identificados pela baixa concentração. Composto por fragmentos ultrafinos, possuindo ferro, alumina, fósforo e sílica, os rejeitos de minério de ferro são divididas conforme sua granulometria. Os rejeitos são divididos como categoria granular ou grossa, maiores que 50µm e rejeitos finos ou de lamas, com diâmetros menores que 50µm. Com isso as composições e concentrações encontradas foram utilizadas como base para simular o rejeito.

Figura 1 - Sequência de Atividades realizadas no laboratório.



O Ensaio

No dia 26 de Outubro de 2020, a dupla e o Prof. Orientador, compareceram ao Laboratório - Centro Tecnológico, na área de Mecânica dos Solos, nas dependências da Universidade São Francisco, para a realização dos experimentos. Para ensaio de granulometria foi utilizando recipientes adequados, béquer de vidro, com capacidade de 100 ml e 250 ml; proveta graduada, com capacidade de 500 ml; e peneiras de malha de 50 (0,3mm) e de malha 30 (0,6mm). Para o ensaio com as vibrações foi utilizada o Agitador de Peneiras para representação das vibrações com tempo e frequência geral mínimo de 1 min – frequência: 6 Hz, e máximo 3 min – frequência: 7 Hz.



Figura 2 – Materiais utilizados: béquer's de vidro; proveta graduada; peneiras de malhas 30 e 50; e os materiais (Solo, Quartzo e Ferro respectivamente).



Figura 3 – Agitador de peneiras.

Para a produção de simulação de rejeito de minério de ferro foi misturada pó de ferro e solo vermelho (típicos em áreas de barragens) com a porcentagem proporcional aos componentes encontrados em rejeitos de barragens reais.

Na adaptação do ensaio os diâmetros do ferro e o quartzo foram menores e/ou iguais a 0,3mm (na peneira de malha 50), e o solo foi menor e/ou igual solo a 0,6mm (na peneira de malha 30), para abranger mais materiais, representando tanto a categoria granular como finos. A princípio a proporção foi calculada para 400 ml de material, ou seja, 200 ml de Ferro (50%), 120 ml de Solo (30%), e 80 ml de quartzo (20%). Na simulação seca, os materiais foram misturados manualmente até ficar homogênea, e colocados na proveta graduada.

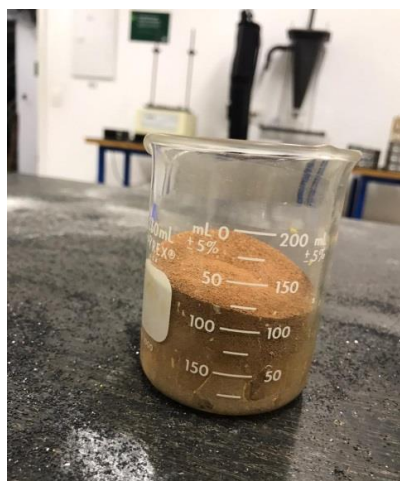


Figura 4 – Solo: 120 ml

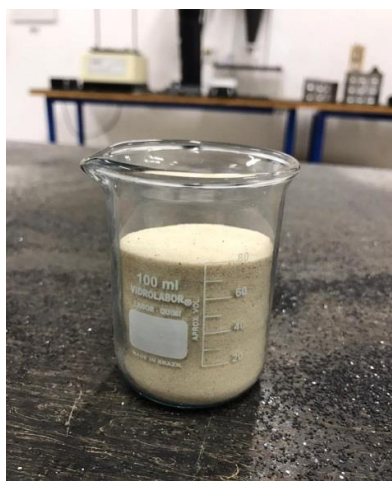


Figura 5 – Quartzo: 80 ml



Figura 6 – Ferro: 200 ml



Figura 7 - mistura dos materiais.

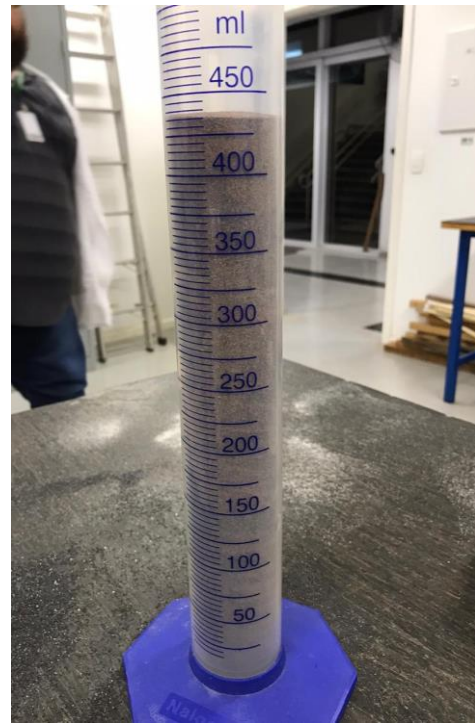


Figura 8 - mistura dos materiais na Proveta Graduada.

Porém ao serem misturados a seco foram misturados em suas respectivas proporções, na proveta graduada, indicou-se 435 ml devido ao índice de vazios. Foram fixados no Agitador de Peneiras, e exposto uma vez ao tempo e frequência geral mínimo (1 min – frequência: 6 Hz) e uma vez ao máximo (3 min – frequência: 7 Hz).

Em seguida, na simulação saturada, foi acrescentado água na mistura até apresentar aspecto pastoso, assemelhando-se a lama. Foram acrescentados 400 ml de água, resultando num total de 370 ml, devido à água ter preenchido os vazios e as partículas terem sido rearranjadas. Foi novamente fixado ao Agitador de Peneiras, e exposto aos mesmos tempos e frequências anteriores. Ao final o material foi deixado no laboratório, em observação por mais 18hs, para verificar seu comportamento em função do tempo em repouso.



Figura 9 – Mistura dos Materiais com acréscimo da água.

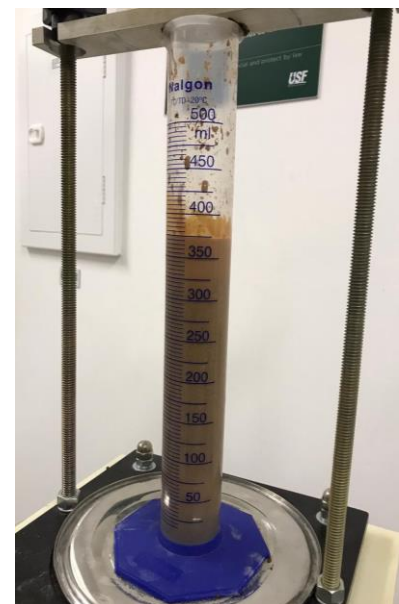


Figura 10 – Proveta graduada após ser exposta as vibrações máximas.

Resultados e Discussão

A princípio, quando a coluna de solo + rejeito seco foi exposta as vibrações ao mínimo de **tempo de 1 min e frequência de 6 Hz**, observou-se que na superfície do recipiente o ferro e o solo se separam e o solo tende a ficar mais a superfície que o ferro, devido a variação do peso específico das partículas, porém ao fundo do recipiente não houve alterações visíveis. Da mesma maneira, na segunda tentativa, ao ser exposto ao máximo **tempo de 3 min e frequência de 7 Hz**, quase não houve alterações visíveis, como apresentado a seguir na *Tabela 1* e na *Figura 10*.

Tabela 1 – Altura do material (seco) em função das vibrações.

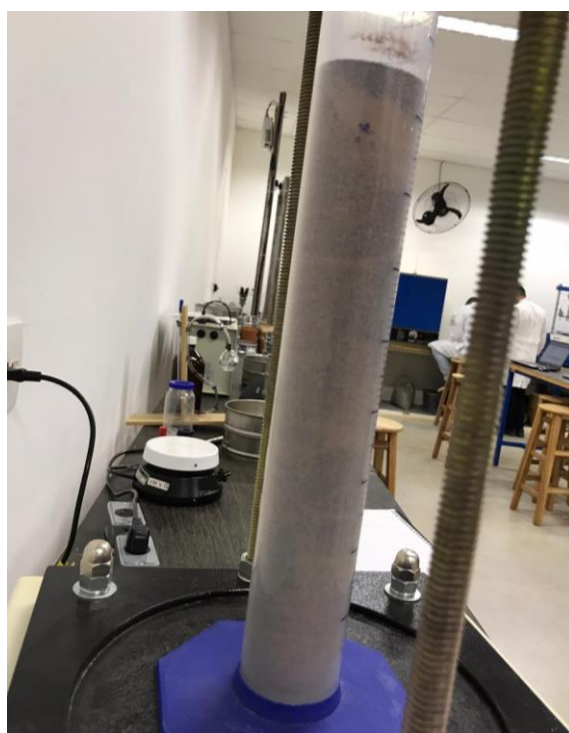
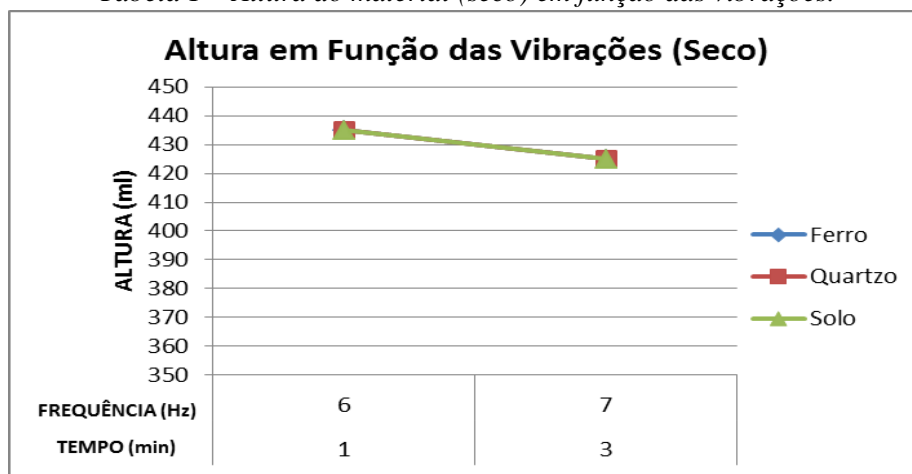


Figura 11 – Proveta graduada após ser exposta ao tempo e frequência máxima.

Em seguida, quando acrescentado água na mistura (400 ml), assemelhando-se à lama. Resultando em 375 ml, devido à água ter preenchido os vazios e as partículas terem sido rearranjadas. Antes mesmo de o recipiente ser fixado ao Agitador de peneiras, verificou-se

que as partículas se rearranjam, com pouca segregação dos materiais e parte da água na superfície, porém ainda com poucos resultados concretos.

Ao ser fixado ao Agitador de Peneiras, foi exposto ao mesmo tempo e frequência anterior. No tempo e frequência mínima (**1 min – frequência: 6 Hz**) observou-se que cerca de 25 ml de apenas da água corada do solo se manteve na superfície, e as partículas se rearranjam novamente, o ferro mais ao fundo, o solo mantendo-se mais ao meio e na superfície.



Figura 12 – Após a nova exposição à frequência mínima.

No tempo e frequência máxima (**3 min – frequência: 7 Hz**), verificou-se novamente que cerca de 50 ml de apenas da água corada do solo se manteve na superfície, e as partículas se rearranjam novamente, o ferro mais ao fundo, o solo mantendo-se mais ao meio e na superfície.

Tabela 2 – Altura do material (saturado) em função das vibrações.

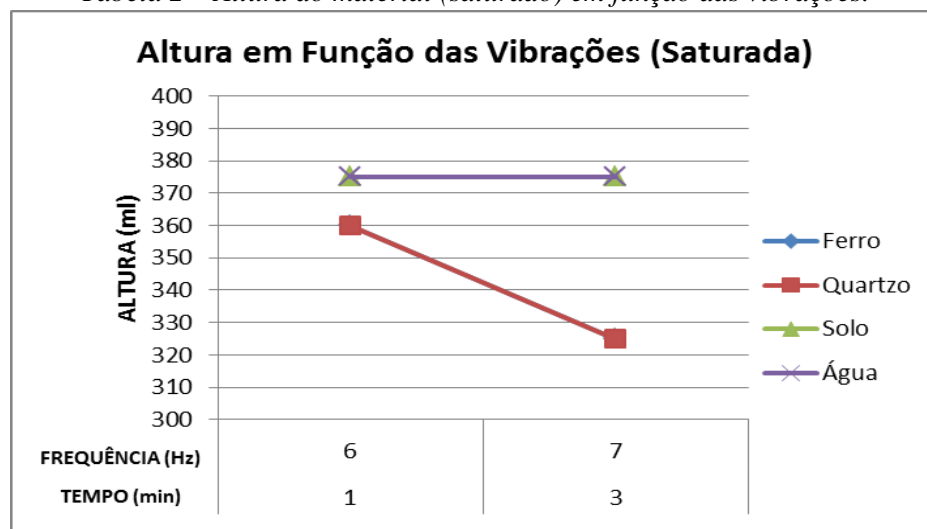




Figura 13 – Após a nova exposição à frequência máxima.

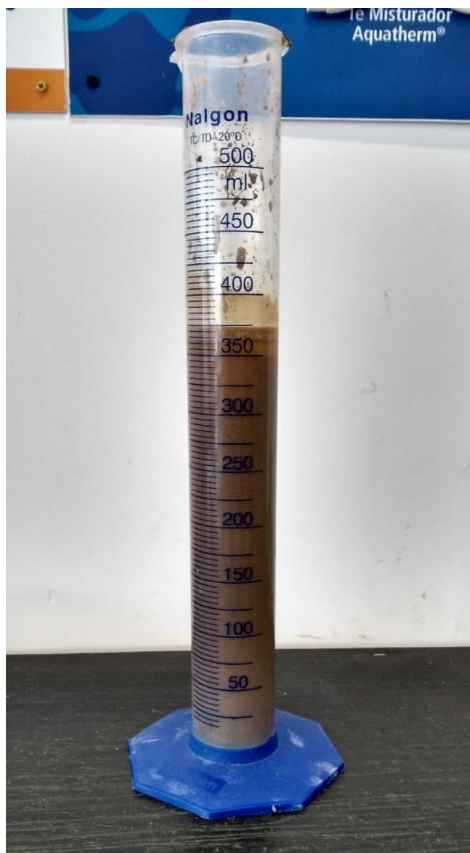


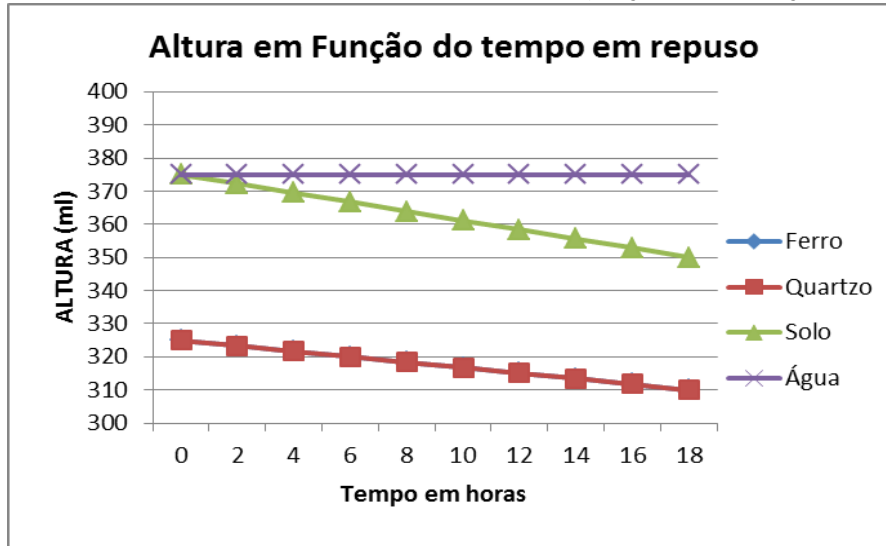
Figura 14 – Proveta graduada em repouso.



Figura 15 – Proveta graduada após 18hs em repouso.

Ao final o material foi deixado no laboratório, em observação por mais 18hs. Verificou-se que o ferro se manteve mais ao fundo, até cerca de 310 ml, o solo ao meio, mais 40 ml (apenas solo), o quartzo, imperceptível, a água, se manteve mais a superfície, entre 10 ml e 15 ml, e ainda uma camada de espuma decorrente das vibrações nos ensaios anteriores, cerca de mais 10 ml.

Tabela 3 – Altura do material (saturado) em função das vibrações.



Conclusões

Em barragens de rejeito de minério de ferro é comum que os descartes sejam em forma de polpa, por para facilitar o transporte por tubulações ou caminhões e o lançamento na barragem.

Ao apresentar o comportamento do rejeito após o lançamento na barragem, obtivemos que quando a coluna de solo + rejeito seco foi exposta as vibrações observou que na superfície do recipiente o quase não houve alterações visíveis. Em seguida, quando acrescentado água na mistura e exposto ao mesmo tempo e frequência anterior, se observou que a água e o solo se mantiveram na superfície e as partículas se rearranjam o ferro mais ao fundo, o solo mantendo-se mais ao meio e na superfície. Ao final, quando deixado em repouso por mais 18hs, verificou-se que o ferro tende a se manter mais ao fundo, o solo ao meio, e o quartzo se manteve imperceptível, a água se manteve mais a superfície, entre 10 ml e 15 ml, e ainda uma camada de espuma decorrente das vibrações nos ensaios anteriores, cerca de mais 10 ml.

Os acidentes nas estruturas de contenção de rejeitos, entre outros motivos, é a liquefação, com os rejeitos menos úmidos esse potencial de risco diminui, pois nesse caso a pasta seca em menor tempo e se transforma em um material mais endurecido, apresentando o comportamento mais semelhante como solo argiloso do que como fluido. Porém, este rejeito com maior concentração de sólido tem seu custo maior, por conta da instalação e manutenção de sistemas de desaguamento.

Com isso os ensaios foram possíveis verificar que as vibrações próximas às barragens podem causar a sedimentação dos materiais pesados e a lama fina se mantém na superfície, e, da mesma maneira, quando as barragens são desativadas, a tendência é que a lama se mantenha na superfície e os materiais pesados, ao fundo, causando peso na estrutura.

Quando o rejeito seco é exposto às vibrações, houve poucas influências, e quase nenhuma visível, ou seja, há influências de vibrações próximas às barragens que podem agregar no seu rompimento, então se deve considera-las desde os estudos preliminares até seu efetivo funcionamento, e sua desativação.

Referências Bibliográficas

ABNT NBR: 13028, de 14 de novembro de 2017. NORMA BRASILEIRA. **Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos**, ABNT/CEE-220 Elaboração de Projetos para Disposição de Rejeitos e Estéreis em Mineração. Rio de Janeiro, Ed. 3, p. 16, 2017. ISBN 978-85-07-07286-7

ABNT NBR: 7181, de 2016 Versão Corrigida 2 de 28 de maio de 2018 NORMA BRASILEIRA. **Solo - Análise granulométrica**, ABNT/CEE-221 Solos. Método para análise granulométrica de solos, realizada por peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento. Rio de Janeiro, Ed. 2, 2018.

ABNT NBR: 9653 de 08 de maio de 2018 Versão Corrigida, 25 de maio de 2018. NORMA BRASILEIRA. **Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas**, ABNT/CB-018. Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas. Rio de Janeiro, 2018.

ANA (Agência Nacional de Águas). **Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce: Rompimento da Barragem em Mariana/MG**. Conjuntura Recursos Hídricos No Brasil dos Informe 2015. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos – SPR. Brasília – DF, 2016. Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/RioDoce/EncarteRioDoce_22_03_2016v2.pdf. Acesso em: 26 de maio de 2020.

ARAÚJO, Cecília Bhering. **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro**. Orientador: Francisco de Rezende Lopes; Leandro Moura Costa Filho. 2006. 136 p. Dissertação de Mestrado (CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, RIO DE JANEIRO - BRASIL, 2006.

BACHMANN, Hugo. Et. Al. **“Vibration Problems in Structures, Practical Guidelines”**, Birkhäuser verlag. 1997. ISBN-13: 978-3764351489

BARCELLOS, Christovam; SILVA, Diego Xavier. **Avaliação dos impactos sobre a saúde do desastre da mineração da Vale (Brumadinho, MG)**. Instituto de Comunicação e Informação Científica e Tecnológica em Saúde Fundação Oswaldo Cruz. 01 fev. 2019.

BITAR, Omar Yazbek. **Barragens de mineração e avaliação de impactos**. IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. COMUNICAÇÃO Nº 176024. UNIFESP - Programa de Pós-Graduação em Análise Ambiental Integrada - "Seminários Integradores Gerais" - Tema "Mineração e Meio Ambiente". Diadema, 12 de abril de 2019.

CARDOZO, Fernando Alves Cantini; PIMENTA, Matheus Montes; ZINGANO, André Cezar. **MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO – UMA REVISÃO**. Holos, [s.l.], v. 8, p.77, 9 maio 2017. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2016.5367>. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/5367>. Acesso em: 12 mar. 2020.

CASTILHO, B. de M. **Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da barragem do Germano**. 2017. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – NUGEO/Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017

COSTA, Walter Duarte. Conceitos Introdutórios: Barragens - Projeto e Construção. In: **GEOLOGIA DE BARRAGENS**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. Cap. 1, p. 27-38. ISBN 978-85-7975-054-0.

DRUMOND, Lucas. **Análise de vibrações e desenvolvimento de poropressão em rejeito de mineração**. 2018. 43 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. Cap. 5; p.23-29.

FERRARO, Nicolau Gilberto. SOARES, Paulo Antônio de Toledo. *ONDAS (In) Física 2º Grau* –. 2º ed. ATUAL EDITORA LTDA. São Paulo: 1983. Cap. 9. p. 316, 322, 324, 327, 330.

GALO, David de Barros. **Análise de Riscos em Barragens de Rejeitos com Uso de Técnicas Semiprobabilísticas de Estabilidade de Taludes: Um Estudo de Caso**. 2006. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador – Ba, 2017.

GESTÃO E MANEJO DE REJEITOS DA MINERAÇÃO. Instituto Brasileiro de Mineração; organizador, Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM, BRASÍLIA, ed. 1, p. 128, 2016. ISBN: 978-85-61993-10-8. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>> Acesso em: 02 abril 2020.

GOMES, Marcos Antônio; PEREIRA, Carlos Alberto; PERES, Antônio Eduardo Clark. **Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro**. REM: R. Esc. Minas, Minas, Ouro Preto, n. 64, p. 233-236, 2011.

LEI nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2010.

LEI Nº 13.575, DE 26 DE DEZEMBRO DE 2017. Cria a Agência Nacional de Mineração (ANM); extingue o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2017. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Lei/L13575.htm Acesso em: 18 de junho de 2020.

LIMA, Francisco de Paula Antunes; DINIZ, Eugênio Hatem; ROCHA, Raoni; CAMPOS, Marcelo. **Barragens, barreiras de prevenção e limites da segurança: para aprender com a catástrofe de Mariana**. Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, São Paulo, 40 (132): 118-120, 2015. ISSN: 0303-7657.

MEIRELLES, Fernando Setembrino Cruz. Notas de Aula: **Módulo I – Barragens: Aspectos Legais, Técnicos E Socioambientais - Unidade 9: Barragens De Terra E Enrocamento**. UNESP: Curso Segurança De Barragens, 2017. Disponível em: <https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/110/20/Unidade_9-modulo1.pdf> Acesso em: 02 mar. 2020.

MOUTINHO, Carlos Manuel Ramos. **CONTROLO DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL**. (Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Agosto de 2007. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11186/2/Texto%20integral.pdf> Acesso em: 9 maio 2020.

OLIVEIRA, JOSÉ BERNARDO VASCONCELOS RODRIGUES. **Manual De Operação De Barragens De Contenção De Rejeitos Como Requisito Essencial Ao Gerenciamento Dos Rejeitos E À Segurança De Barragens**. Orientador: Prof. Dr. Romero César Gomes (UFOP). Dissertação Mestrado Profissional Em Engenharia Geotécnica Da UFOP. Ouro Preto - JUNHO DE 2010. Disponível em: http://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/jose-bernardo-v-r-oliveira.pdf. Acesso em: 27 maio de 2020.

O QUE É UMA BARRAGEM. SAMARCO MINERAÇÃO S.A., 2016. Disponível em: <<https://www.samarco.com/wp-content/uploads/2016/08/o-que-e-uma-barragem.pdf>> Acesso em: 02 abril de 2020.

RAO, Singiresu S. Fundamentos de Vibração. In: **VIBRAÇÃO MECÂNICA**. Ed.4. São Paulo: PEARSON - Prentice Hall, 2009. Cap. 1, p. 1-47. ISBN 978-85-7605-200-5.

RIBEIRO, K. D.; SOUZA, L. K. **Limites De Atterberg E Sua Correlação Com A Granulometria E Matéria Org Nica Dos Solos**. Brazilian Journal of Biosystems

Engineering, UNIFOR - Centro Universitário de Formiga, Formiga, MG, Brasil, v. 12(2), p. 185-196, 2018.

RIBEIRO, J.T.M. **Monitoramento da vibração causada por detonações em mina subterrânea de carvão**. 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo, 2003.

RICHART, Alfredo; FILHO, João Tavares; BRITO, Osmar Rodrigues; LLANILLO, Rafael Fuentes; FERREIRA, Rogério. **Compactação do solo: causas e efeitos**. Semina: Ciências Agrárias, Universidade Estadual de Londrina Londrina, Brasil, v. vol. 26, n. 3, p. 321-343, 2005. ISSN: 1676-546X. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/4457/445744077016.pdf>> Acesso em: 12 Abril 2020.

SOARES, Lindolfo. **Barragem de Rejeitos**. Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia: Coordenação de Processos Mineraiis – COPM. Rio de Janeiro, p. 15 - 21. ago. 2010. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/769/1/CCL00410010.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2020.

SOUZA JÚNIOR, Tension Freire de; MOREIRA, Eclesielter Batista; HEINECK, Karla Salvagni. **BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO NO BRASIL**. Holos, [s.l.], v. 5, p.2-39, 14 nov. 2018. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2018.7423>. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/download/7423/pdf>. Acesso em: 08 mar. 2020.

STEPHENS, Tim. Barragens de terra: Barragens de aterro homogêneo. In: STEPHENS, Tim. **Manual sobre pequenas barragens de terra**. Roma: FAO, 2011. p. 14-15. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-ba0081o.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2020.

THOMÉ, Romeu; PASSINI, Matheus Leonardo. **BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO: CARACTERÍSTICAS DO MÉTODO DE ALTEAMENTO PARA MONTANTE QUE FUNDAMENTARAM A SUSPENSÃO DE SUA UTILIZAÇÃO EM MINAS GERAIS**. *Ciências Sociais Aplicadas em Revista - Unioeste*. Marechal Cândido Rondon – PR, 2018. Disponível em: <http://e-revista.unioeste.br/index.php/csaemrevista/article/view/19480>. Acesso em: 08 mar. 2020.