

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MARCOS VINICIUS SANTOS CARDOSO

**MÉTODO CONSTRUTIVO E SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITO
INDUSTRIAL: ESTUDO DE CASO NO CONSÓRCIO DE ALUMÍNIO DO
MARANHÃO**

SÃO LUÍS
2019

MARCOS VINICIUS SANTOS CARDOSO

**MÉTODO CONSTRUTIVO E SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITO
INDUSTRIAL: ESTUDO DE CASO NO CONSÓRCIO DE ALUMÍNIO DO
MARANHÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Orientadora: Prof^a. Me. Karina Suzana F. Pinheiro

SÃO LUÍS
2019

Cardoso, Marcos Vinicius Santos.

Método Construtivo e Segurança de Barragens de Rejeito Industrial: Estudo de caso no Consorcio de Alumínio do Maranhão / Marcos Vinicius Santos Cardoso. – São Luís, 2019.

112.f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

Orientador: Profa. Me. Karina Suzana Feitosa Pinheiro.

1.Barragem. 2.Resíduos. 3.Risco. I.Título

CDU: 616-083-053.2

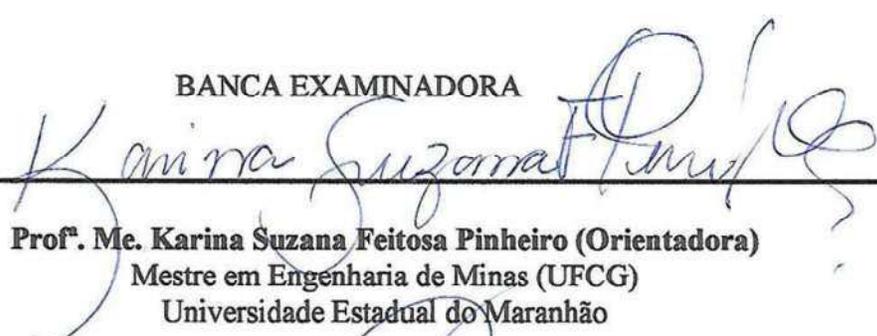
**MÉTODO CONSTRUTIVO E SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITO
INDUSTRIAL: ESTUDO DE CASO NO CONSÓRCIO DE ALUMÍNIO DO
MARANHÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

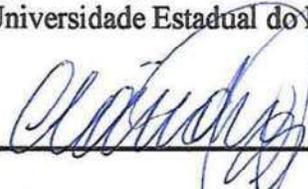
Orientadora: Prof.^a. Me. Karina Suzana Feitosa Pinheiro.

Aprovada em: ___/___/___

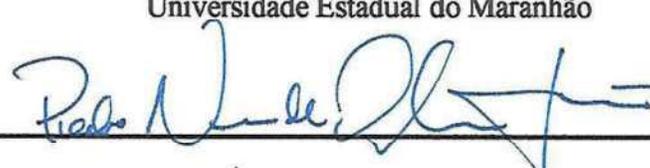
BANCA EXAMINADORA



Prof.^a. Me. Karina Suzana Feitosa Pinheiro (Orientadora)
Mestre em Engenharia de Minas (UFCG)
Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Me. Cláudio José da Silva de Sousa
Mestre em Sensoriamento Remoto (INPE)
Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Me. Pedro Nunes de Oliveira Júnior
Mestre em Arquitetura e Urbanismo (USP)
Universidade Estadual do Maranhão

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a *Deus* pela realização deste sonho, pois sem ele não conseguiria concluir com êxito este trabalho acadêmico.

A minha Família, especialmente aos meus pais, *Aurea Cardoso e Raimundo Cardoso* e ao meu irmão *Márcio Cardoso*, por estarem presentes em todos os momentos de minha vida inclusive acadêmica e sempre estarem comigo, me incentivando durante toda minha caminhada. Amor incondicional a vocês.

À minha orientadora *Prof^a. Me Karina Suzana Feitosa Pinheiro* pela sugestão do tema proposto, que de uma grandeza imensurável, solidária, prestativa e com muita paciência tornou o andamento desta pesquisa realidade, apesar das dificuldades encontradas no caminho, e em nenhum momento deixou de estar ao meu lado, sempre acreditando em meu potencial, prestando todo o suporte necessário.

A *Alumar* pela compreensão da importância deste estudo em nosso estado, disponibilizando dados e informações para a viabilidade deste estudo.

Aos amigos pelo companheirismo em toda essa trajetória acadêmica, em especial aos amigos, *Nayanderson, Wellysson Frazão, Carlos, Ícaro, Bruno, Lucas Abreu, Lucas Gabriel, Lucas Cutrim, Renan, Vinicius, Judah, Yago, Wanderson, Rafael, Paulo Lucca, Lucas Rezende, Junior, Ronald.*

RESUMO

O presente trabalho trata-se de um estudo de caso nas barragens de rejeitos do beneficiamento do mineral bauxita do Consórcio de Alumínio do Maranhão denominadas de Áreas de Resíduos de Bauxita, que são lagos projetados, construídos especialmente para esta finalidade. Atualmente a empresa dispõe de sete extensos lagos localizados na região do distrito industrial de São Luís, em que são destacados no estudo as técnicas construtivas empregadas, aspectos operacionais, instrumentação e monitoramento. O estudo promove a importância de realizar estudos significativos em obras de engenharia desta magnitude, apresentando como destaque metodologias para avaliação dos riscos inerentes a estas construções. Este trabalho teve como objetivo geral avaliar a segurança das barragens de rejeito industrial do Consórcio de Alumínio do Maranhão. Especificamente, objetivou-se, conhecer a metodologia construtiva das barragens de rejeito industrial e avaliar a segurança segundo a metodologia inicialmente proposta por Menescal (2001) e modificada por Duarte (2008) para atender barragens de rejeito industrial. A partir dos resultados obtidos, observou-se que os lagos são bem estruturados, possuem alto controle de operação, manutenção e monitoramento. Apesar dos resíduos presentes nas lagoas, a Alumar tem investido em tecnologias construtivas de referência mundial, monitoramento, execução e mão-de-obra qualificada, assim como estudos de reabilitação por meio de inserção de cobertura vegetal e reaproveitamento dos resíduos em conjunto com outras entidades.

Palavras-chaves: Barragem. Resíduos. Risco

ABSTRACT

The present work is a case study in the bauxite tailings dams of the Maranhão Aluminum Consortium called Bauxite Waste Areas, which are designed lakes, built especially for this purpose. Currently the company has seven extensive lakes located in the region of the industrial district of Sao Luis, which highlight in the study the construction techniques employed, operational aspects, instrumentation and monitoring. The study promotes the importance of conducting significant studies in engineering works of this magnitude, highlighting methodologies for risk assessment inherent to these constructions. This work aimed to evaluate the safety of the industrial tailings dams of the Maranhão Aluminum Consortium. Specifically, the objective was to know the construction methodology of industrial tailings dams and to evaluate safety according to the methodology originally proposed by Menescal (2001) and modified by Duarte (2008) to meet industrial tailings dams. From the results obtained, it was observed that the lakes are well structured, have high control of operation, maintenance and monitoring. Despite the residues present in the lagoons, Alumar has invested in world-class construction technologies, monitoring, execution and qualified labor, as well as rehabilitation studies through the insertion of vegetation cover and reuse of waste in conjunction with other entities.

Keywords: Dam. Waste. Risk

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Rompimento da barragem de fundão no subdistrito de Bento Rodrigues em Mariana (MG)	16
Figura 2 – Contraste antes o rompimento em Brumadinho (MG).....	17
Figura 3- Contraste após o rompimento em Brumadinho (MG)	17
Figura 4-Barragem de Terra	22
Figura 5-Barragens Homogêneas	23
Figura 6-Barragens Zonadas	23
Figura 7-Barragem de Enrocamento	24
Figura 8-Enrocamento com núcleo impermeável.....	25
Figura 9-Enrocamento com face impermeável.....	25
Figura 10-Barragem de Concreto	26
Figura 11-Barragem de Contraforte.....	27
Figura 12-Barragem de Abóbada.....	27
Figura 13-Barragem de Gabião	28
Figura 14-Barragem de Madeira.....	29
Figura 15-Barragem de Alvenaria de Pedra.....	29
Figura 16-Barragem de Rejeito	30
Figura 17-Estrutura inicial do método a jusante.....	31
Figura 18-Alteamento posterior do método a jusante.....	31
Figura 19-Estrutura inicial do barramento a montante	32
Figura 20-Alteamentos do barramento a montante	32
Figura 21-Estrutura do barramento pelo método da linha de centro	32
Figura 22-Característica de uma barragem que a insere a PNSB.....	37
Figura 23-Gerenciamento de riscos em projetos	41
Figura 24-Pilares básicos da segurança de barragens.....	42
Figura 25-Etapas do processo de gestão de riscos em barragens	43
Figura 26-Elementos para gestão de riscos em barragens segundo a Lei 12.334/2010.....	44
Figura 27-Modelo proposto inicialmente (MENESCAL et al., 2001)	47
Figura 28- Fluxograma da Aquisição dos dados	60

Figura 29-Consórcio de Alumínio do Maranhão - Alumar.....	61
Figura 30-Minério Bauxita.....	62
Figura 31- Processo Bayer e suas etapas para o beneficiamento da bauxita	63
Figura 32- Lago de distribuição de resíduos de bauxita	64
Figura 33-Resultado do processo Bayer para obtenção da alumina	64
Figura 34- Localização das ARB'S – Barragens da Alumar em São Luís - MA.....	65
Figura 35- Comportamento da Precipitação e Temperatura de São Luís considerando-se a normal climatológica da série histórica de 1997 – 2017.....	66
Figura 36- Barragem ARB1	69
Figura 37- Barragem ARB2	70
Figura 38- Barragem ARB3	71
Figura 39- Barragem ARB4	72
Figura 40- Barragem ARB5	73
Figura 41- Barragem ARB6	73
Figura 42- Barragem ARB7	74
Figura 43- Método de Construção das ARB's	75
Figura 44- Resultado das análises de estabilidade de taludes para ARB6.....	76
Figura 45- Impermeabilização das ARB's.....	76
Figura 46- Controle de Qualidade das Geomembranas	77
Figura 47- Benchmark instalado em terreno indeslocável, com base de concreto.....	83
Figura 48- Pinos e Placas comumente utilizados para levantamentos topográficos	84
Figura 49- Barco de Controle Autônomo.....	86
Figura 50- Piezômetro elétrico de corda vibrante	92
Figura 51- Sondas para Vane Test.....	94
Figura 52- Perfil de Piezômetro Casagrande e equipamento de Leitura de NA	95
Figura 53- Janela de inspeção.....	96
Figura 54- Válvula Mangote instalada na ARB 5	97
Figura 55- Aeronave devidamente identificada	98
Figura 56- Situação comparativa das ARB's da Alumar	103

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-Principais métodos construtivos de barragens de rejeito.....	33
Quadro 2-Critérios para classificação de barragens segundo a Lei No. 12.334/2010.....	46
Quadro 3-Periculosidade Proposta por Menescal, 2001	49
Quadro 4-Parâmetros relacionados a Vulnerabilidade	50
Quadro 5-Importância estratégica proposta por Menescal (2001)	51
Quadro 6-Potencial de Risco (PR).....	52
Quadro 7-Frequência de Inspeções.....	52
Quadro 8-Periculosidade modificada.....	54
Quadro 9-Vulnerabilidade modificada.....	55
Quadro 10-Importância Estratégica modificada.....	56
Quadro 11-Classes de potencial de Risco	57
Quadro 12-Informações Gerais das ARB's da Alumar	68
Quadro 13-Periculosidade das Barragens – ARB'S da Alumar.....	99
Quadro 14-Vulnerabilidade das Barragens – ARB'S da Alumar.....	100
Quadro 15-Importância estratégica - ARB's da Alumar	101
Quadro 16-Potencial de Riscos das Barragens – ARB'S da Alumar	102
Quadro 17-Inspeções para ARB's da Alumar - 1,2,3,4,6 e 7.....	104
Quadro 18-Inspeções para ARB 5	104

LISTA DE ABREVIATURAS

- ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental
- ANA – Agência Nacional de Águas
- ANM - Agência Nacional de Mineração
- CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens
- CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear
- CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos
- COGERH - Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
- DPA – Dano Potencial Associado
- EIA – Estudo de Impacto Ambiental
- GPR – *Ground Penetrating Radar* (Radar de Penetração no Solo)
- INBS – Instituto Brasileiro de sustentabilidade
- ISE - Inspeção de Segurança Especial
- ISR - Inspeção de Segurança Regular
- ITV - Instituto Tecnológico Vale
- NBR - Denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)
- NPA - Nível de Perigo da Anomalia
- NPGB - Nível de Perigo Global da Barragem
- NSPT – Resistência a penetração do ensaio SPT
- PAE – Plano de Ação de Emergência
- PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens
- RIMA – Relatório de Impacto Ambiental
- RPSB - Revisão Periódica de Segurança de Barragem – RPSB
- SEMA - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais
- SIG – Sistema de Informação Geográfica
- SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
- SPT - *Standard Penetration Test* (Sondagem à Percussão)
- SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission* (Missão Topográfica Radar Shuttle)

VANT – Veículo Aéreo não Tripulado

ZAS - Zona de Autossalvamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1 Conceito e Tipos de Barragem	17
2.1.1 Barragens convencionais	18
2.1.2 Barragens não-convencionais	24
2.1.3 Barragens de Rejeitos industriais.....	26
2.2 Legislação Brasileira Aplicada a Segurança de Barragens.....	31
2.3 Gestão de Risco e Segurança de Barragem.....	36
3 METODOLOGIA.....	55
3.1 Revisão da Literatura.....	55
3.2 Aquisição dos Dados	56
3.3 Análise dos Procedimentos de Monitoramento e Gestão de Risco desenvolvidos pela Alumar	57
3.4 Análise do Potencial de Risco das Barragens da ALUMAR.....	58
4 CONSÓRCIO DE ALUMÍNIO DO MARANHÃO - ALUMAR.....	58
4.1 Processo Bayer de Beneficiamento da Bauxita.....	59
4.2 Áreas de Resíduos de Bauxita da Alumar – ARB’s.....	63
4.3 Método Construtivo das ARB’s	72
4.4 Monitoramento das Barragens	75
5 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RISCO	97
5.1 Periculosidade	98
5.2 Vulnerabilidade	99
5.3 Importância Estratégica	100
5.4 Classificação das barragens de acordo com o modelo de potencial de risco modificado	101
6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	105
7 REFERÊNCIAS.....	107

1 INTRODUÇÃO

As barragens têm sido construídas há milhares de anos; sendo inicialmente as estruturas delineadas para fins de abastecimento humano. Atualmente, são executadas com as mais diversas finalidades, sendo inúmeros os benefícios.

Segundo Neves (2018), os benefícios vão desde a produção de energia elétrica, passando pelo abastecimento de água para uso humano e/ou uso industrial, a irrigação, navegação, lazer e turismo, a disposição de rejeitos e/ou sedimentos em uma mineração e/ou de resíduos industriais, além de influenciar na regularização de vazões atenuando os efeitos das enchentes e das secas nos locais onde ela se instala e tem influência.

No entanto, para o setor mineral no Brasil e no mundo, o que se configura, a princípio, como um benefício, transforma-se em um grande desafio, ou seja, a disposição de rejeitos e/ou resíduos minerais e suas implicações para o meio ambiente. Normalmente, estes materiais são dispostos em pilhas armazenadas em pátios e/ou barragem de rejeitos e/ou resíduos.

Uma barragem de rejeito é uma estrutura de terra construída para armazenar resíduos de mineração, os quais são definidos como a fração estéril produzida pelo beneficiamento de minérios, em um processo mecânico e/ou químico que divide o mineral bruto em concentrado e rejeito.

Os rejeitos são resíduos resultantes de processos de beneficiamento, a que são submetidos os minérios visando extrair os elementos de interesse econômico, ou seja, são a fração do minério que, após passar por processos de beneficiamento, apresenta baixos teores do mineral de interesse econômico (foco da extração mineral).

Segundo a NR N^o. 25/2011, os resíduos industriais são aqueles provenientes dos processos industriais, na forma sólida, líquida ou gasosa ou combinação dessas, e que por suas características físicas, químicas ou microbiológicas não se assemelham aos resíduos domésticos, como cinzas, lodos, óleos, materiais alcalinos ou ácidos, escórias, poeiras, borras, substâncias lixiviadas e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como demais efluentes líquidos e emissões gasosas contaminantes atmosféricos.

Entende-se, portanto, que na mineração, resíduo pode ser classificado como rejeito quando estes possuem baixo valor econômico, devido aos seus teores minerais não serem significativos para a comercialização, não sendo mais utilizados. No entanto, nem todo resíduo é um rejeito, sendo que, os resíduos, advindo de um processo industrial podem vir a ser reutilizado. Diferentemente do rejeito, “que é um tipo de resíduo, em que se esgotaram as possibilidades de aproveitamento ou reciclagem (PNRS, 2014).”

De acordo com Araújo (2006), a constituição dos resíduos da mineração é de uma fração líquida e sólida, com concentração de 30% a 50% em peso. Estes materiais apresentam propriedades que são características do minério bruto e do processo industrial utilizado no beneficiamento.

Segundo Espósito (2000), o beneficiamento configura-se como uma etapa do processo de mineração com a finalidade de regularização dos tamanhos dos fragmentos, remoção de minerais associados sem valor econômicos e melhora da qualidade.

Conforme a Agência Nacional de Águas - ANA, que tem a responsabilidade de consolidar o Relatório de Segurança de Barragens - RSB, o Brasil tem pelo menos 24.092 barragens, com diferentes usos. Elas podem ser usadas para a produção de energia elétrica, contenção de rejeitos de mineração, disposição de resíduos industriais ou usos múltiplos da água (BBC Brasil, 2019). Os barramentos existentes são classificados de acordo com a probabilidade de um possível rompimento vir a acontecer e o impacto que acarretaria as comunidades vizinhas, mananciais, etc. O que é denominado de dano potencial (BBC Brasil, 2019).

Dentre estas, existem 790 barragens de resíduos da mineração, com classificação de risco a rompimento que podem acarretar danos severos ao meio ambiente. Entre o número citado, cerca de 320 não estariam em acordo com a Política Nacional de Segurança de Barragens de 2010 (ANM, 2019).

No contexto das barragens de rejeito e/ou resíduos, considerando os últimos acidentes relacionados ao rompimento de barragens no Brasil, destaca-se aqui, ocorrido no município de Mariana, em 2015, no estado de Minas Gerais, e mais recentemente, no início do ano de 2019, o rompimento da barragem da mina Córrego do Feijão, em Brumadinho, também no estado de Minas Gerais.

A barragem de rejeitos de Mariana de propriedade da Samarco – mineradora brasileira, administrada por meio de um empreendimento em conjunto entre a Vale S. A. e a BHP Billiton – e seu rompimento resultou no volume de 43,7 milhões de metros cúbicos de rejeitos despejados e um total de 19 mortes (POLITIZE, 2019).

O rompimento da barragem em Mariana foi considerado um desastre em larga proporção, onde diversas vidas foram perdidas, milhares de pessoas, ficaram sem água, luz e moradia. Esse rompimento foi considerado o maior desastre ambiental da história do país em proporção humanitária. A lama percorreu um total de 663 quilômetros até chegar no mar, no estado do Espírito Santo. Além disso, a lama atingiu o Rio Doce (Figura 1), que abrange 230 municípios que têm seu leito como meio de subsistência. Segundo ambientalistas, os efeitos dos rejeitos no mar serão sentidos por, no mínimo, 100 anos (POLITIZE, 2019).

Figura 1 – Rompimento da barragem de fundão no subdistrito de Bento Rodrigues em Mariana (MG)



Fonte: < www.politize.com.br > acesso em 02 de novembro de 2019

Com relação ao rompimento da barragem em Brumadinho, pode-se afirmar sem dúvida, que este foi um dos maiores desastres em termos ambientais, sociais, econômicos já registrado em nosso país. O que provocou danos que levarão anos para serem recuperados, além das vidas que foram perdidas nessa tragédia. Após o rompimento, a cidade nunca mais foi a mesma, modificando a modo de vida local que sofre com interrupção de energia e água pós a tragédia, conforme relatos registrados pela BBC Brasil:

Brumadinho, Minas Gerais. Sexta feira, 25 de janeiro de 2019, 12h 28min 25s rompe a barragem de rejeitos (B1) da mina Córrego do Feijão, da mineradora Vale S.A. Imediatamente após, o presidente da empresa, Fabio Schvartsman, declarava “o dano ambiental será muito menor que o de Mariana, mas a tragédia humana deverá ser maior”. No primeiro dia já se sabia que 13 milhões de m³ de rejeitos da mineração haviam sido lançados no meio ambiente. Após um mês de buscas, o

número de óbitos ultrapassa 300, com 179 corpos localizados e 131 pessoas desaparecidas (BBC Brasil, 2019).

A lama possuía como elementos constituintes ferro, sílica e água que foi em direção a rio Paraopeba e culminou no corte do fornecimento de água além de afetar os padrões de qualidade da água, levando a um estado de calamidade. As Figuras 2 e 3 demonstram o antes e depois do rompimento da barragem.

Figura 2 – Contraste antes do rompimento em Brumadinho (MG)



Fonte:< <https://www.bbc.com> , 2019> > acesso em 02 de novembro de 2019

Figura 3 – Contraste após o rompimento em Brumadinho (MG)



Fonte: <<https://www.bbc.com> > > acesso em 02 de novembro de 2019

No Maranhão há 81 barragens duas são de rejeito e estão localizadas em Godofredo Viana (Mineração Aurizona SA), e outra em São Luís (Consórcio de Alumínio do Maranhão SA – Alumar). As demais são barragem de vazão para contenção e regularização de água, entre as principais, destaca a da capital, São Luís, que dispõe de uma no Rio Itaqui-Bacanga. Outras três são a hidrelétrica de Estreito, a de Pericumã em Pinheiro e barragem de Flores no município de Joselândia. A de Flores e do Bacanga são consideradas de alto risco, mas, não necessariamente de algum risco de rompimento, e sim, ligado diretamente a sua classificação devido ao volume de água que as duas barragens recebem.

Em São Luís, na área Consórcio de Alumínio do Maranhão – Alumar, existem barragens, em forma de lagoas de disposição de resíduos próximo, à BR-135, localizada na área industrial de São Luís. Tratam-se de áreas de resíduos de bauxita (ARB), de produção de alumínio, localizada na capital. A lama vermelha, resíduo da indústria de beneficiamento do alumínio, é gerada a partir do refino da bauxita para produção de alumina através do processo Bayer (O IMPARCIAL, 2019).

As ARB'S são áreas especialmente construídas para a atividade de disposição de resíduo alcalino oriundo do processo de refinamento da bauxita, minério de cor avermelhada, para obtenção de Alumina, e são dimensionadas com base na produção da refinaria, na geração de resíduo e no balanço hídrico da planta. Atualmente, a produção de Alumina é de 3,7 milhões de toneladas por ano.

As áreas de resíduo de bauxita têm sua configuração de construção constituídas por:

- Sistema de contenção;
- Impermeabilização;
- Drenagem de fundo.

Este método construtivo não utiliza o próprio resíduo como material de construção e sim o solo local, conforme investigação geotécnica realizada para a implantação de cada área. Tais diques possuem altura máxima em média de 25 m. A Alumar possui sete áreas de Disposição de Resíduos de Bauxita, e destas, três já foram fechadas e reabilitadas por meio de inserção de cobertura vegetal como forma de compensação ambiental (ALUMAR, 2019).

O conhecimento sobre as implicações do armazenamento de milhões de toneladas de rejeitos em barragens, principalmente a longo prazo, ainda não é pleno. A construção de grandes barragens de rejeitos tem sido feita há mais de um século e essas estruturas requerem a manutenção da sua integridade em perpetuidade. Porém, apenas um período relativamente curto de sua existência e desempenho têm sido estudada (FERNANDES,2017).

Consoante dos riscos ao rompimento de barragens, principalmente a de disposição de rejeito e resíduo industrial e, das consequências sociais, ambientais e econômicas associadas, diversas instituições e órgãos públicos, bem como, organizações não governamentais, dentre outros segmentos de pesquisa e monitoramento de desastres surgem para avaliar a segurança das barragens, seus riscos, sua magnitude e danos ao ambiente.

Conhecer os processos construtivos e de manutenção de barragens no contexto atual torna-se de grande relevância para o meio em que se insere, assegurando a preservação de vidas, de serviços associados, de fatores socioeconômicos e ambiental, ao mesmo tempo em que, contribui para o aprimoramento geotécnico para o desenvolvimento de novas técnicas e demonstrar maior confiabilidade neste tipo de obra de engenharia.

Diante do exposto, este estudo tem por objetivo avaliar a segurança das barragens de rejeito industrial do Consórcio de Alumínio do Maranhão – Alumar, São Luís, MA. Especificamente os objetivos foram:

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre os tipos de barragem, gestão de risco, segurança de barragem e legislação aplicada a barragens no Brasil;
- Conhecer a metodologia construtiva das barragens de rejeito industrial da Alumar;
- Conhecer os procedimentos de monitoramento e gestão de risco de barragem desenvolvido pela Alumar;
- Avaliar o potencial de risco das barragens a partir do modelo modificado de Menescal *et. al* (2001) por Duarte (2008).

Para discutir as questões apresentadas, este trabalho monográfico encontra-se organizado em sete capítulos:

- No Capítulo 2 contextualiza-se sobre o tema em estudo quanto aspectos gerais das tipologias de barragens existentes, métodos construtivos, normas regulamentadoras e gestão de riscos.
- Destaca-se no capítulo 3 sobre a metodologia utilizada para alcançar os objetivos do trabalho, a tipologia do estudo, levantamento bibliográfico, aquisição dos dados e avaliação da segurança das barragens.
- O capítulo 4 descreve-se sobre o Consórcio de Alumínio do Maranhão – Alumar; sobre o beneficiamento da bauxita e disposição dos resíduos nas ARB's, com informações técnicas por barragem.
- No quinto capítulo apresenta-se a caracterização geoambiental da área de estudo.
- Durante o capítulo 6 são expostos os resultados e discussão sobre a análise do potencial de risco por barragem.
- Por último no capítulo 7 são apresentadas as considerações finais, bem como, indicações de temas para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo, serão apresentados os fundamentos teóricos necessários para o desenvolvimento e compreensão do trabalho. Apresenta-se uma breve discussão sobre os conceitos e tipos de barragem, suas aplicações, métodos construtivos, legislações pertinentes assim como, questões relacionadas a gestão de risco e segurança de barragens.

2.1 Conceito e Tipos de Barragem

A Lei Nº 12.334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, em seu Art. 2º, define que: “as barragens são estruturas destinadas à contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos”.

Diante do conceito estabelecido pela lei supracitada, compreende-se que, as barragens são elementos estruturais construídos para diversas finalidades que vão desde o turismo a atividades industriais, sendo as principais funções de regularização da vazão para abastecimento e controle das enchentes até a dispositivos de contenção de rejeitos industriais.

Segundo o livro Design of Small Dams do U.S. Bureau of Reclamation (1960, 1973, 1977, 1987), Costa (2012) e Chiossi (2013), as barragens podem ser classificadas de acordo com:

a) Sua utilização

- Barragens de armazenamento ou regularização das vazões;
- Barragens de derivação para desviar o fluxo para canais;
- Barragens para controle das cheias;
- Barragens para disposição de rejeitos industriais.

b) De acordo com o projeto hidráulico

- Barragens vertedoras ou de soleira livre.
- Barragens não vertedoras.

c) De acordo com o comportamento estrutural

- Barragens tipo gravidade
- Barragens estruturadas

d) De acordo com os materiais de construção:

- Barragens de concreto
- Barragens de aterro (terra ou enrocamento).
- Barragem de alvenaria (em pedra), madeira e gabião, que são tipos de barragens não convencionais.

Neste estudo, descrevem-se sobre as barragens convencionais e não convencionais, sendo estas as mais usualmente adotadas no Brasil e, de disposição de rejeito industrial, sendo este objeto do referido estudo.

2.1.1 Barragens convencionais

São estruturas mais utilizadas e consideradas por sua vez de grande porte devido sua elevada capacidade de reter sólidos-líquidos ou regularizar vazões. São classificadas como barragens convencionais as barragens de terra, enrocamento e concreto.

- **Barragem de Terra:** estrutura cujo elemento e material constituinte é o próprio solo local ou de empréstimo de outra região cujo solo utilizado possa atender os parâmetros projetuais, permeabilidade, percolação e características físicas do solo (Figura 4).

Figura 4 – Barragem de Terra

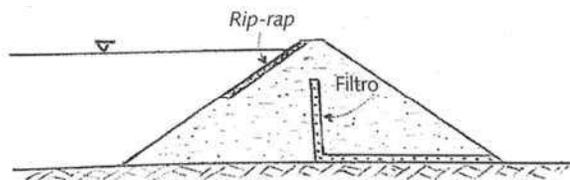


Fonte: JACOB, (2015)

Conforme Costa (2012, p.24), as barragens de terra se dividem em dois tipos: homogêneas e zonadas.

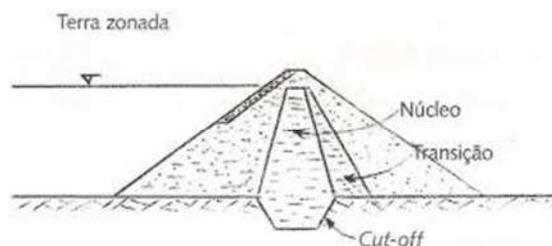
- Homogêneas:** quando há predominância de um único material, embora possam ocorrer elementos diversificados, como filtros, rip-rap etc., (Figura 5).
- Zonadas:** existência de zoneamento de materiais terrosos em função de suas características de materiais e/ou permeabilidade (Figura 6).

Figura 5 – Barragens Homogêneas



Fonte: COSTA, 2012

Figura 6 – Barragens Zonadas



Fonte: COSTA, 2012

- **Barragem de Enrocamento:** estrutura constituída de material rochoso e terra, normalmente material originário de áreas de empréstimo, onde são compactados e estabilizados com a função de conter e armazenar água (Figura 7). A estrutura em si deve possuir obrigatoriamente um elevado grau de estanqueidade (sem vazamento), ou seja sem a presença de comportamento poroso ou com formação de trincas em seu corpo.

Figura 7 – Barragem de Enrocamento



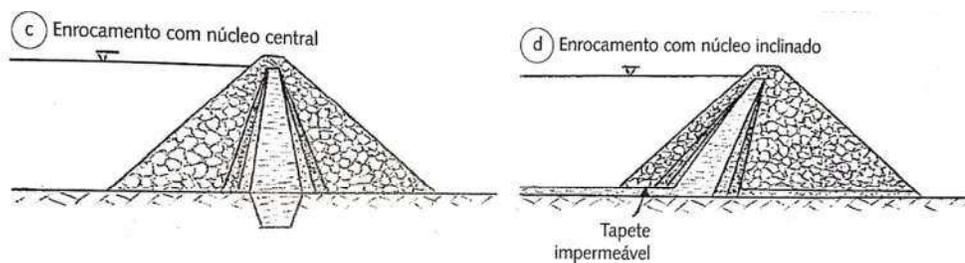
Fonte: < <https://pt.advisor.travel> > acesso em 02 de novembro de 2019

Segundo Costa (2012, p.24 e 25), as barragens de enrocamento se apresentam em dois tipos: com núcleo impermeável e com face impermeável.

a) **Com núcleo impermeável:** nesse tipo de barragem, o material rochoso é predominante e a vedação da água, nesse caso, é feita por meio de um núcleo argiloso, separado do enrocamento por zonas de transição, para evitar o carregamento de material fino para o interior da estrutura. O núcleo pode ser centralizado ou inclinado (Figura 8).

b) **Com face impermeável:** nesse tipo de barragem, a vedação da água é garantida pela impermeabilização da face de montante da barragem, seja por uma camada de asfalto, seja por uma placa de concreto, ou ainda, por uma chapa de aço (Figura 9).

Figura 8 – Enrocamento com núcleo impermeável



Fonte: COSTA, 2012

Figura 9 - Enrocamento com face impermeável



Fonte: PIASENTIN, 2013

- **Barragem de concreto:** barragens de concreto são as constituídas basicamente de materiais granulares, produzidos artificialmente, aos quais se acrescentam cimento e aditivos químicos (MARANGON, 2004).

Diferente das demais, são estruturas constituídas por materiais artificiais industrializados, como armadura, cimento, argamassas e produtos químicos e a presença de material rochoso/granular típico da estrutura (Figura 10).

Figura 10 – Barragem de Concreto



Fonte: <<https://www.engwhere.com.br>> acesso em 02 de novembro de 2019

- **Barragem de concreto por gravidade:** Barragem de natureza maciça e com a presença de pouca armação, onde as forças atuantes predominantes são de compressão. É o tipo de barragem mais resistente e de menor custo de manutenção. Este tipo pode ser adaptado para todos os locais, mas a sua altura é limitada pela resistência das fundações. Quando são constituídas de material de aluvião incoerente, a altura dessas barragens tem sido limitada a 20m (MARANGON,2004). Em relação ao seu traçado, ele pode ser retilíneo (crista) ou em curva. (COSTA, 2012).
- **Gravidade Aliviada:** é alternativa à barragem de gravidade maciça. Nesta última, o concreto está mal aproveitado porque as solicitações são muito menores que a resistência do concreto. Na comparação, constata-se que a barragem de gravidade aliviada traz economia no volume e diminuição das áreas sobre as quais pode agir a subpressão e a pressão intersticial (GOUVEIA, 2016)
- **Barragens de contrafortes:** caracterizam-se por serem constituídas por uma sucessão de contrafortes de perfil triangular (Figura 11) e sobre os quais apoia-se uma cortina de retenção formada por placas, simples apoiadas ou contínuas (BENEVOLO,1973)

Figura 11 – Barragem de Contraforte



Fonte: <www.engwhere.com.br> acesso em 03 de novembro de 2019

- **Barragens abóbadas:** de acordo com Benevolo (1973), essas barragens se caracterizam-se pelo fato de a pressão hidrostática ser transmitida às encostas de vales se comportando como efeito arqueado no qual se manifesta diretamente na rocha de fundação, devendo resistir às forças e momentos fletores (Figura 12).

Figura 12 – Barragem de Abóbada



Fonte: Rocha, 1993

- **Barragens Mistas:** A barragem pode ser considerada mista em sua seção ou em seu traçado. A barragem de seção mista é aquela constituída por diferentes materiais ao longo de uma seção transversal, terra/concreto e enrocamento/concreto (COSTA,2012).

2.1.2 Barragens não-convencionais

São barragens pouco utilizadas, de dimensões menores e costumam ser de pequeno porte e são construídas em diversos materiais. Destacam-se as de gabião, madeira e alvenaria de pedra argamassada.

Segundo Costa (2012), Barragem de gabião é uma obra de pequeno porte (geralmente inferior a 10 m de altura) projetada para ser parcial ou totalmente vertedora. O barramento é composto por uma parede de gabião em direção a jusante criando uma dissipação de energia e aterrada em direção a montante sendo utilizado material argiloso (Figura 13).

Figura 13 – Barragem de Gabião



Fonte: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Gabião>> acesso em 03 de novembro de 2019

Barragens de madeira são estruturas pouco utilizadas, mas que necessitam da utilização de madeira de lei revestida com chapas laminadas e elementos de estabilização como material granular, afim de evitar movimentação da estrutura devidos aos esforços solicitantes ocasionados pela força hidrostática que atua na estrutura (Figura 14).

Figura 14 – Barragem de Madeira



Fonte: <<https://www.engwhere.com.br/barragem-de-madeira/>> acesso em 03 de novembro de 2019

As de alvenaria de pedra argamassada são as de tipo de gravidade e constituem de um muro, cuja seção transversal se aproxima a de um triângulo retângulo (Figura 15) e que resiste através do seu peso próprio à pressão da água do reservatório e à subpressão das águas que se infiltram pelas fundações. Este tipo de barragem possui um trecho central de barragem (HRADILEK, et.al, p.25, 2002).

Figura 15 - Barragem de Alvenaria de Pedra



Fonte: <<https://www.ofitexto.com.br/comunitexto/conheca-todos-os-tipos-de-barragem/>> acesso em 03 de novembro de 2019

2.1.3 Barragens de Rejeitos industriais

A apresentação do manual de segurança e inspeção de barragens (2002) valida e define barragem de rejeitos como sendo estrutura para contenção e retenção de resíduos de rejeitos industriais ou materiais estéreis de mineração e de outros processos indústrias. Segundo Machado (p. 36, 20007):

As barragens de contenção são estruturas construídas pelas mineradoras com o objetivo de reunir e armazenar os rejeitos produzidos em grande escala no alto do beneficiamento do minério. A legislação ambiental brasileira impõe normas rígidas de controle e estocagem deste rejeito em barragens.

As barragens de rejeitos que possuem radionuclídeos (rejeitos radioativos de elevado ou não grau), devem seguir rigorosamente as diretrizes da (CNEN) aplicando aos projetos, construção e operação.

Segundo Machado (p.36,2007) o conjunto de operações para o aproveitamento do material da jazida é denominado de lavra. A mina vem a ser a jazida mineral em lavra, podendo ser classificada como: céu aberto (Figura 16), subterrânea ou mista.

Figura 16 – Barragem de Rejeito



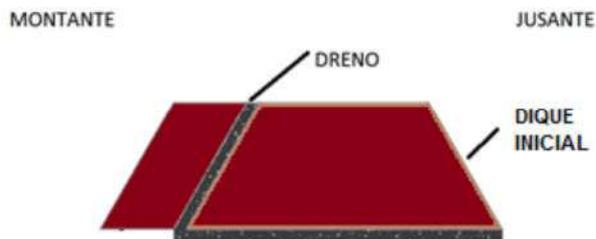
Fonte: <https://lifelink.com.br/monitoramento-de-barragens/>

Importante ressaltar que alguns fatores diferenciam as barragens para atividade mineradora das consideradas civis. As barragens convencionais não são construídas e nem projetadas para contenção de resíduos oriundos do beneficiamento do minério. Segundo Cardozo, *et. al.* (p.79,2016) outro ponto que diferencia as barragens de rejeito é a sua construção em etapas, as quais, acompanham o ritmo de lavra. Desta forma, à medida que são gerados rejeitos, os alteamentos são executados.

Existem três métodos construtivos para barragem de rejeitos industriais jusante, montante e da linha de centro.

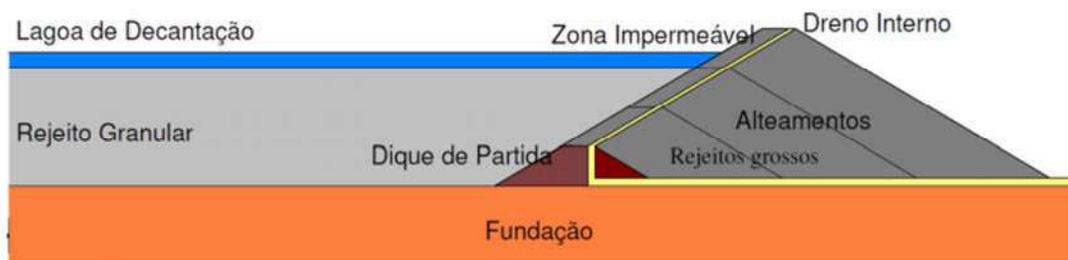
- **Método a jusante:** consiste em alteamentos subsequentes de acordo com uma cota projetual estabelecida. O alteamento pode ser utilizado com o mesmo material do dique de partida conforme as Figuras 17 e 18. É construído a partir desse dique de partida em direção ao fluxo de água, até atingir a cota do projeto estabelecida, sendo que cada alteamento é independente e promove uma segurança maior além da estabilidade.

Figura 17 – Estrutura inicial do método a jusante



Fonte: CARDOZO, et al (2016)

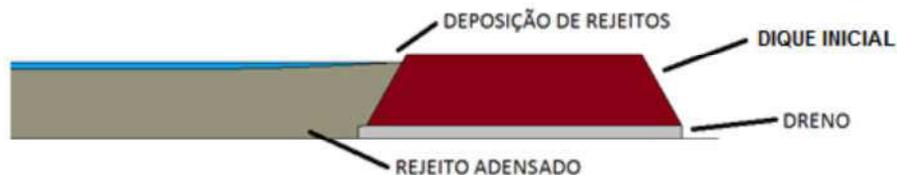
Figura 18 – Alçamento posterior do método a jusante



Fonte: VICK (1990)

- **Método a montante:** segundo ITV (2016), os rejeitos são depositados na crista do dique de partida (Figura 19), formando uma espécie de praia de rejeito. Com o tempo, esse material se adensa e serve de fundação para futuros diques de alçamento (Figura 20), que são feitos com o próprio material proveniente do rejeito. O método é repetido até atingir a cota de projeto estabelecida.

Figura 19 – Estrutura inicial do barramento a montante



Fonte: CARDOZO, et al (2016)

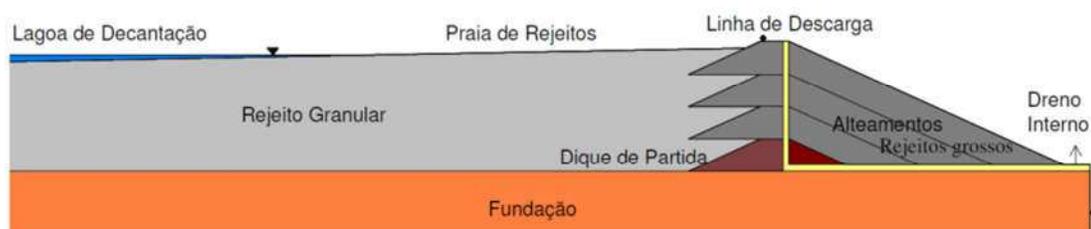
Figura 20 – Alçamentos do barramento a montante



Fonte: VICK (1990)

- **Método da linha de centro:** segundo ITV (2016) o método de operação e disposição é semelhante ao do montante. Os rejeitos são lançados a partir da crista do dique com alteamentos subsequentes, mas diferente do anterior conserva-se o eixo simétrico constante durante o crescimento (Figura 21). O método é considerado mais caro, entretanto mais seguro, pois os alteamentos criam uma rigidez na estrutura.

Figura 21 – Estrutura do barramento pelo método da linha de centro



Fonte: VICK (1990)

O Quadro 1 apresenta um resumo comparativo dos principais métodos construtivos de barragens de rejeito.

Quadro 1 - Principais métodos construtivos de barragens de rejeito

	Montante	Jusante	Linha de centro
Tipo de rejeito	Baixa densidade para que ocorra segregação	Qualquer tipo	Areias de lamas de baixa plasticidade
Descarga de rejeitos	Periférica	Independente	Periférica
Armazenamento de água	Não recomendável para grandes volumes	Bom	Aceitável
Resistência a abalos sísmicos	Baixa	Boa	Aceitável
Alteamentos	Ideal menos 10 m/ano	Nenhuma restrição	Pouca restrição
Vantagens	Menor custo, utilizado onde há restrição de área	Maior segurança	Flexibilidade construtiva
Desvantagens	Baixa segurança suscetibilidade a liquefação e piping	Grande quantidade de material requerido proteção do talude a jusante apenas na configuração final	Necessidade de eficiente sistema de drenagem

Fonte: CARDOZO et al. (2016)

Segundo Duarte (p.15, 2008) as principais diferenças entre estas barragens são discutidas por Szymanski (1999) e descritas a seguir como:

- **Barragens de contenção de rejeitos:** são tipicamente construídas em estágios, enquanto as barragens convencionais são geralmente construídas em estágio único, em um curto período de tempo. Como resultado, as condições das barragens de contenção de rejeitos estão sempre mudando com o aumento progressivo da carga dos rejeitos na fundação do reservatório com o tempo, e por isso sua segurança deve ser continuamente reavaliada. Uma condição estável não é alcançada até que cesse a operação da mina. Em muitos países, as barragens de contenção de rejeitos são projetadas, construídas e operadas sobre as mesmas legislações e revisões das barragens convencionais;
- **Barragens convencionais:** são vistas como um recurso ou finalidade de abastecimento de água, geração de energia elétrica, dentre outros. Assim, sua construção, operação e manutenção recebem um alto padrão de cuidado e atenção pelos proprietários, que geralmente possuem sua própria equipe de engenheiros experientes.

As Barragens de contenção de rejeitos geralmente retêm materiais sólidos e água que podem ser considerados contaminantes, se liberados para o meio ambiente.

A composição destes materiais depende do processo industrial e do tipo de mineral explorado. A contaminação do meio ambiente pode acontecer através de drenagem ácida, infiltração para a superfície freática, contaminação do solo e água superficial a jusante, podendo até mesmo afetar a fauna local que utiliza a água da barragem para consumo.

Diante dos métodos construtivos utilizados para barragens de rejeito apresentado é importante destacar que as barragens da Alumar são construídas através de um sistema de barramento denominado de aterro hidráulico em solo compactado, solo esse local. O método consiste em dispor os resíduos em lagos de decantação e disposição, estruturas as quais são construídas especialmente para esta finalidade. A compactação do aterro hidráulico é definida pela vazão, concentração, altura de queda e o espaçamento de lançamento da lama (MEIRELLES, 2019).

A técnica de aterro hidráulico fundamenta-se, em regra geral, na construção de um dique capaz de represar os resíduos do beneficiamento da bauxita principal componente explorado pela empresa para produção de alumina.

É importante ressaltar que as mineradoras costumam trabalhar com um dique inicial, ou aterro, com capacidade de suportar em período curto de produção. (ZARDARI, 2010). Após esse período, se houver necessidade pode se incrementar uma técnica conhecida como alteamento, com a intenção de aumentar a capacidade e prolongar a vida útil da lagoa.

2.2 Legislação Brasileira Aplicada a Segurança de Barragens

No Brasil existe um arsenal de leis, resoluções e portarias para o trato das questões de disposição de resíduos, barragens e sua segurança, sendo neste estudo, evidenciado as principais:

- ✓ **Lei Federal Nº12.334/2010** - Política Nacional de Segurança de Barragens;
- ✓ **Lei Federal Nº12.305/2010** - Política Nacional de Resíduos Sólidos [*apresenta o rejeito da mineração como uma categoria de resíduo (art.13, inciso I, “k”*)]
- ✓ **Resolução CNRH Nº143/2012** - Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco e dano potencial associado;
- ✓ **Resolução CNRH Nº144/2012** - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens;
- ✓ **Portaria DNPM Nº 70.389/2017**: fusão Portarias nº **416/2012 e 526/2013**
 - Cadastro Nacional de Barragens de Mineração;
 - Plano de Segurança da Barragem, Inspeções de Segurança Regular e Especial, Revisão Periódica de Segurança de Barragem;
 - Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração.

Registra-se neste estudo aspectos relevantes das principais resoluções, portarias e leis inerentes ao trabalho desenvolvido, sendo:

- ✓ **Resolução nº 236 de 30 de janeiro de 2017**

A ANA tem papel fundamental de fiscalizar a segurança de barragens para as quais ela devidamente outorgou o direito de uso e orientar e promover medidas preventivas e corretivas a serem tomadas. Conforme estabelecido na Resolução Nº 236 de 30 de janeiro de 2017:

Estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e

Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB.

Compete à ANA fiscalizar as barragens submetidas à disposição da Lei nº 12.334/2010, atualizar os dados a que se refere a (PNSB) e do Plano de Ação de Emergência (PAE).

De acordo com o Art. 3º da Resolução No. 236/17 da ANA consideram-se:

Anomalia: qualquer deficiência, irregularidade, anormalidade ou deformação que possa afetar a segurança da barragem;

Área afetada: área a jusante ou a montante, potencialmente comprometida por eventual ruptura da barragem;

Barragem: qualquer obstrução em um curso permanente ou temporário de água para fins de retenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas;

Categoria de Risco: classificação da barragem de acordo com os aspectos que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente, levando-se em conta as características técnicas, o estado de conservação e o Plano de Segurança da Barragem;

Dano Potencial Associado: dano que pode ocorrer devido ao rompimento ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, a ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas, impactos sociais, econômicos e ambientais;

Nível de Perigo da Anomalia (NPA): gradação dada a cada anomalia em função do perigo causado à segurança da barragem;

Nível de Perigo Global da Barragem (NPGB): gradação dada à barragem em função do comprometimento de sua segurança decorrente do efeito conjugado das anomalias;

Nível de Resposta: gradação dada no âmbito do Plano de Ação de Emergência - PAE às situações de emergência em potencial da barragem, que possam comprometer a sua segurança e a ocupação na área afetada;

Plano de Ação de Emergência - PAE: documento formal elaborado pelo empreendedor, no qual estão identificadas as situações de emergência em potencial da barragem, estabelecidas as ações a serem executadas nesses casos e definidos os agentes a serem notificados, com o objetivo de minimizar danos e perdas de vida;

Plano de Segurança da Barragem- PSB: instrumento da Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB utilizado para a gestão da segurança de barragem, cujo conteúdo mínimo está detalhado no Anexo II desta Resolução;

Revisão Periódica de Segurança de Barragem - RPSB: estudo cujo objetivo é diagnosticar o estado geral de segurança da barragem, considerando o atual estado da arte para os critérios de projeto, a atualização de dados hidrológicos, as alterações das condições a montante e a jusante do empreendimento, e indicar as ações a serem adotadas pelo empreendedor para a manutenção da segurança;

Sistema de Alerta: conjunto de equipamentos ou recursos tecnológicos para informar a população potencialmente afetada na Zona de Autossalvamento - ZAS sobre a ocorrência de perigo iminente;

Situação de emergência em potencial da barragem: situação que possa causar dano à integridade estrutural e operacional da barragem, à preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente;

Zona de Autossalvamento - ZAS: região do vale a jusante da barragem em que se considera que os avisos de alerta à população são da responsabilidade do empreendedor, por não haver tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em situações de emergência, devendo-se adotar, no mínimo, a menor das seguintes distâncias para a sua delimitação: a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos ou 10 km.

✓ **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**

Segundo Neves (p.7, 2018) a presente lei estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinada à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.

Para Neves (p.7, 2018) a citada Política tem como objetivos garantir a observância de padrões de segurança, regulamentar, promover o monitoramento e acompanhar as ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens, de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências, em especial, junto à população potencialmente afetada.

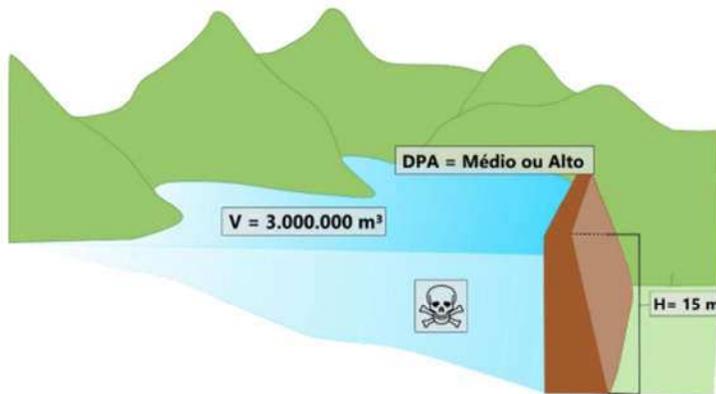
Segundo Art. 1º esta Lei estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).

Parágrafo único. Esta Lei aplica-se a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características:

- I - Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);
- II - Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos);
- III - reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- IV - Categoria de dano potencial associado (DPA), médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 6º.

Essas características segundo a PNSB são evidenciadas na Figura 22.

Figura 22 – Característica de uma barragem que a insere a PNSB



Fonte: NEVES (2018)

Segundo o Art. 2º Para os efeitos desta Lei, são estabelecidas as seguintes definições:

- **Barragem:** qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas;
- **Reservatório:** acumulação não natural de água, de substâncias líquidas ou de mistura de líquidos e sólidos;
- **Segurança de barragem:** condição que vise a manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente;
- **Gestão de risco:** ações de caráter normativo, bem como aplicação de medidas para prevenção, controle e mitigação de riscos;
- **Dano potencial associado à barragem:** dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem.

✓ *Resolução CNRH nº 143 e 144, de 10 de julho de 2012*

Conforme esclarece Neves (p.26, 2018) com o intuito de regulamentar os artigos 7º e 20º da Lei 12.334/2010, foi-se instituído Grupo de Trabalho Interministerial capitaneado pela Câmara Técnica de Assuntos Legais e Institucionais do CNRH (CTIL) para definição dos parâmetros e definições sobre:

a) Critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume (artigo 7º da Lei 12.334/2010) (Resolução CNRH No 143, de 10 de julho de 2012)

b) Diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (artigo 20 da Lei 12.334/2010) (Resolução CNRH No 144, de 10 de julho de 2012).

De acordo com o art. 5º da Resolução CNRH nº 143/2012, os critérios gerais a serem utilizados para classificação quanto ao dano potencial associado (DPA) na área afetada são:

- I. Existência de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas;
- II. Existência de unidades habitacionais ou equipamentos urbanos ou comunitários;
- III. Existência de infraestrutura ou serviços;
- IV. Existência de equipamentos de serviços públicos essenciais;
- V. Existência de áreas protegidas definidas em legislação;
- VI. Natureza dos rejeitos ou resíduos armazenados;
- VII. Volume.

✓ ***Portaria ANM N° 70.389, de 17 de maio de 2017***

A Agência Nacional de Mineração (ANM) publicou a Portaria ANM nº 70.389 com a finalidade de criação do cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispôs sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração e o Plano de Ações de Emergência para Barragens de Mineração - PAEBM (NEVES, p.46, 2018).

Conforme o Art. 2º para efeito desta Portaria consideram-se:

Barragens de Mineração: barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos de mineração ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de contenção de resíduos industriais.

2.3 Gestão de Risco e Segurança de Barragem

Segundo Mônica Zuffo (2005), maneiras distintas de como as barragens podem falhar são conhecidas. Barragens de concreto de gravidade têm como característica inerente a estabilidade. Até mesmo as construídas sobre fundações duvidosas resistiram, enquanto blocos adjacentes foram varridos. As barragens de arco são conhecidas por entrarem em colapso rapidamente quando suas fundações falham, muito embora os arcos são estruturas reconhecidamente fortes.

Barragens de contrafortes podem se desintegrar tão logo os arcos ou vigas falhem, como numa sucessão de fileiras de dominós. Barragens de material solto tendem a falhar mais vagarosamente, porém obviamente são mais susceptíveis a erosões que àquelas construídas em alvenaria.

Ainda, segundo a autora supracitada, exames de barragens existentes devem focar a detecção de qualquer condição que possa ameaçar a integridade vital da estrutura. Essas situações podem ser atribuídas à inadequação de materiais construtivos, defeitos na fundação, condições adversas no entorno, deficiências de projeto ou operação e manutenção impróprias. A fim de se assegurar que estas condições sejam percebidas em seus estágios iniciais, a seguinte lista de itens a serem investigados, delineada pelo *Bureau of Reclamation* (1987), foi estabelecida:

1. Materiais de Construção: concreto, rochas, solo, cimento, metais, madeira, revestimentos, borrachas e seladores de juntas.

2. Condições gerais que evidenciam perigo: cavitação, infiltração, vazamentos, drenagem, ação do gelo, instabilidade e tensão / deslizamento.

3. Deficiências de operação e manutenção: equipamentos elétricos e mecânicos, acessibilidade e visibilidade, crescimento de plantas e animais que fazem tocas, tensão / deslizamento, instabilidade, infiltração e descontinuidade de juntas e fundação.

4. Evidências de deficiências em barragens de material solto: tensão / deslizamento, instabilidade, vazamentos, erosão, fundação e riscos de ruptura nos equipamentos e estruturas associadas.

5. Evidência de deficiências em vertedores: estrutura hidráulica de controle, canal de aproximação, comportas, pontes, conduto de descarga, estruturas terminais, canais de restituição, plataformas operacionais e guindastes, poços, condutos e túneis.

6. Evidências de deficiências nas saídas d'água: canais de aproximação, estruturas de tomada d'água, câmaras das comportas, comportas, válvulas, guindastes, controles, equipamentos elétricos e dutos de ar, estruturas terminais, canais de restituição e plataformas de resíduos.

7. Condições adversas no entorno do reservatório: reservatório, taludes do reservatório, proximidade a jusante, curso d'água e entorno regional.

Conforme Fusaro (2005), importante salientar que, falhas em barragens podem ocorrer e conduzir a sua ruptura, ou seja, o risco de ruptura de uma barragem, constitui uma realidade potencial para tais empreendimentos. De acordo com o Boletim 99 do ICOLD (1995), a percentagem de ruptura de grandes barragens é de 2,2% para as barragens construídas antes de 1950 e de cerca de 0,5% para as construídas após esta data. A maior parte das rupturas, cerca de 70%, ocorreu com barragens nos seus primeiros 10 anos de operação e, mais especialmente, no primeiro ano após o comissionamento.

Sabendo-se então da existência de uma probabilidade, ainda que baixa, de ruptura de uma barragem e do alto impacto que este evento teria a jusante, a questão é como este risco pode ser reduzido

Conforme Melo e Fusaro (2015), de forma geral, a segurança das barragens no mundo tem sido controlada por uma abordagem tradicional de engenharia baseada em normas de segurança, constituindo um meio efetivo de “gestão de risco”, comprovado pelo histórico de projetos e empreendimentos com bons registros de desempenho.

Segundo Fusaro (ANA, 2001), falar de “risco” é falar, simultaneamente, de oportunidade e de incerteza. Esta grandeza possui múltiplos significados na linguagem corrente e na terminologia técnico-científica, é um indicador de segurança e um operador de decisão. Em linguagem matemática:

Risco = Probabilidade x Consequência

Ou ainda:

Risco = P (evento) x P (reação adversa para dado evento) x Consequência do evento

Onde:

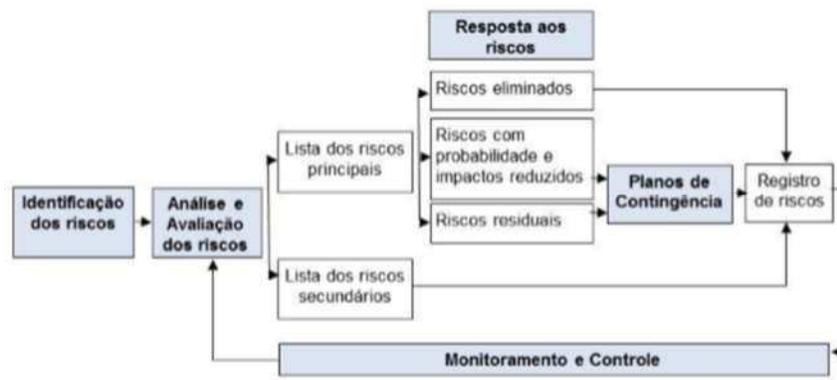
P (evento), corresponde a probabilidade de ocorrer um evento;

P (reação adversa para dado evento), corresponde a probabilidade de ocorrer reação adversa para dado evento

Num primeiro momento, a definição acima pode parecer uma novidade. Entretanto, de forma intuitiva, realiza-se “análises de risco” a todo o momento, associando mentalmente eventos, sua probabilidade e consequências. Quando se fala de barragens, estamos tratando de um risco tecnológico, usualmente definido como as consequências esperadas associadas à ocorrência de um evento adverso (ANA, 2001).

Por análise de risco entende-se, portanto, como um conjunto de procedimentos referentes à identificação dos acontecimentos indesejáveis que conduzem à materialização dos riscos, à análise dos mecanismos que desencadeiam esses acontecimentos e à determinação das respostas das estruturas e das respectivas consequências (estimativa da extensão, da amplitude e da probabilidade da ocorrência de perdas). Estes são elementos fundamentais na análise de risco (MELO E FUSARO, 2015). Conforme Mulcahy (2010), estes elementos são as bases do Gerenciamento de Riscos em Projetos, conforme apresentado na (Figura 23) e descrição das etapas a seguir.

Figura 23 – Gerenciamento de riscos em projetos



Fonte: MULCAHY (2010).

Identificação de riscos: Processo de determinação do que pode dar errado, porque, como e quais as consequências.

Análise dos riscos: Processo de quantificação da probabilidade de ocorrência e gravidade das consequências.

Avaliação dos riscos: Processo de exame e julgamento do significado dos riscos.

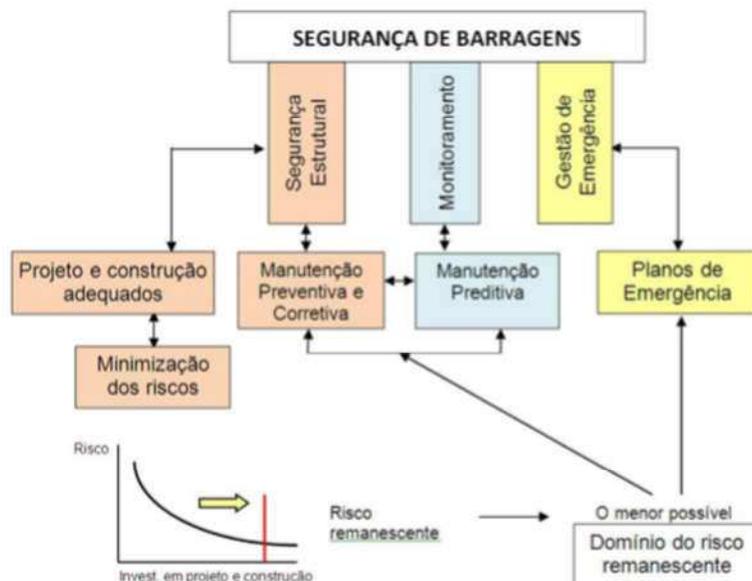
Resposta aos riscos: Processo decisório de como tratar os riscos identificados, sendo que as respostas às ameaças podem ser (Mulcahy, 2010): - Evitar: eliminar a ameaça eliminando a causa; - Mitigar ou controlar: reduzir o valor monetário esperado do risco, reduzindo o impacto ou a probabilidade de ocorrência; - Transferir: transferir o risco para outros através de subcontratação ou seguro; - Aceitar passivamente (se acontecer, aconteceu) ou ativamente (criação de um plano de contingência).

Planos de Contingência: Estabelecimento de plano de ação para tratar os riscos não eliminados.

Monitoramento e Controle: Processo periódico de reavaliação dos riscos e do plano geral de gerenciamento. Usualmente utiliza controles para garantir que os objetivos do projeto sejam atingidos e que eventos indesejáveis sejam prevenidos ou detectados e corrigidos.

Neste sentido, Biedermann (1997) considera que a segurança de barragens pode ser obtida apoiando-se em três pilares básicos: segurança estrutural (projeto, construção e manutenção adequados), monitoramento e gestão de emergência, como apresentado na Figura 24 a seguir.

Figura 24 - Pilares básicos da segurança de barragens

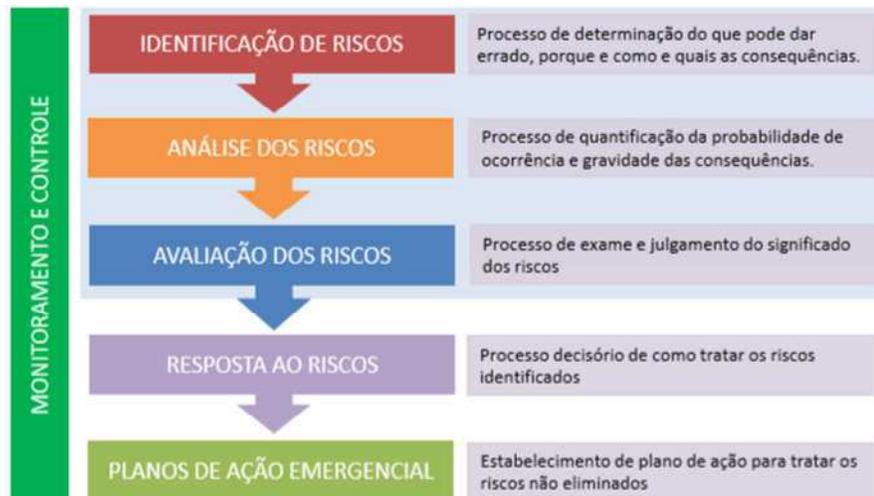


Fonte: BIEDERMANN (1997, adaptado)

Desta forma, pode-se considerar que a gestão da segurança de barragens é uma questão de controle de riscos e tomada de decisões sob condições de incertezas. Estas incertezas são intrínsecas aos processos de engenharia e não as reconhecer explicitamente reflete na confiabilidade dos resultados obtidos.

Entende-se que, a gestão de risco consiste na aplicação sistemática, coordenada e integrada de políticas de gestão, procedimentos e práticas para as tarefas de identificação, análise, avaliação, mitigação e controle do risco (MELO e FUSARO, 2015), conforme (Figura 25).

Figura 25 - Etapas do processo de gestão de riscos em barragens



Fonte: FUSARO (ANA, 2001)

Diante do exposto, importante destacar, a classificação dos riscos segundo Fusaro (2005), sendo:

- **Riscos ambientais**

Classificam-se neste grupo os riscos associados a fenômenos naturais e que estariam, de certa forma, fora do controle direto, sendo: risco hidrológico; sismicidade; escorregamento de massa em reservatórios; ações agressivas.

- **Riscos associados a fatores dependentes da barragem**

São riscos internos ao sistema barragem e impostos pela construção da estrutura do barramento, presentes nas fases de projeto, construção e operação.

- **Riscos Ligados a Fatores Sócio-Econômicos**

São riscos externos ao sistema barragem e associados às consequências humanas e econômicas no caso de ruptura. Salienta-se que, dentro o conceito de Risco ($R = \text{Probabilidade} \times \text{Consequência}$), estes fatores são usualmente analisados como consequências da ruptura hipotética de uma barragem.

Nos estudos de riscos associados a barragens, geralmente são considerados os seguintes três grandes grupos de consequências:

- Consequências para a Segurança Pública: Mortes, lesões e doenças;

- Consequências para o Meio Ambiente: Perda de espécies e perda de habitat
- Consequências Econômicas, em que ocorre:
 - a) Perda da barragem (custo de reconstrução e perda de geração);
 - b) Danos à propriedade (edificações, indústria, comércio e agricultura);
 - c) Danos à infraestrutura (transporte terrestre, navegação, suprimento de energia, água e esgoto).

Neste aspecto, ressalta-se que, na Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei No. 12.334/2010), os itens necessários para uma gestão adequada dos riscos estão contemplados, em especial na fase de operação. Apesar de não citados explicitamente, o projeto, construção e manutenção adequados estão incluídos nas Revisões de Segurança, tornando completo o conjunto de elementos necessários, conforme apresenta-se na Figura 26.

Figura 26 - Elementos para gestão de riscos em barragens segundo a Lei 12.334/2010.



Fonte: FUSARO (ANA, 2001)

Segundo a Lei N^o. 12.334/2010 a classificação das barragens com relação a categoria de risco encontra-se descrita no artigo 7^o, a seguir:

Seção I – Da Classificação

Art. 7^o As barragens serão classificadas pelos agentes fiscalizadores, por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos.

§ 1^o A classificação por categoria de risco em alto, médio ou baixo será feita em função das características técnicas, do estado de conservação do empreendimento e do atendimento do plano de segurança de barragem.

§ 2º A classificação por categoria de dano potencial associado à barragem em alto, médio ou baixo será feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem.

Pode-se observar que o texto da Lei, de certa forma, conduz à utilização do método de análise de risco por índices ou matrizes de classificação, que consideram critérios para enquadramento do potencial do risco, conforme Quadro 2.

Quadro 2 – Critérios para classificação de barragens segundo a Lei No. 12.334/2010

Índices principais		Índices
Categoria de risco	CT	Características Técnicas
	EC	Estado de Conservação
	PS	Atendimento ao Plano de Segurança
Categoria de dano potencial associado	DPA	Potencial de perdas de vidas humanas
		Impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura
Volume do reservatório		Volume do reservatório

Fonte: Fusaro (ANA, 2001)

Estes critérios foram regulamentados pelo CNRH por meio da Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012, que “Estabelece os critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume em atendimento ao art. 7º da Lei 12.334, de 20 de setembro de 2010”. Esta regulamentação confere operacionalidade a determinados dispositivos da Lei de Segurança de Barragens, tornando efetiva a classificação das barragens de acordo com os três critérios definidos.

Segundo Mendonça (p.9, 2013), de forma geral, “as metodologias de análise e avaliação de riscos devem ser eficientes e suficientemente detalhadas para possibilitar uma adequada hierarquização dos riscos e consequente controle”.

De acordo com Melo, *et. al.* (2015), essas metodologias proporcionam um conhecimento do risco inerente e conhecer a barragem assim como seu desempenho através de aspectos técnicos e locais. A análise de risco aplicada em barramentos é avaliada em quase sua totalidade através de métodos formais já utilizados em outras áreas, apenas sofrendo pequenas adaptações para que possa chegar ao objetivo e em conformidade com o pressuposto na Lei Nº. 12.334.

Neste sentido Silveira (1999) classifica a análise de risco em três níveis:

a) avaliação subjetiva de risco: o responsável pela barragem só considera o que lhe parece mais importante. Este tipo de avaliação pode ser suficiente e resultar em uma boa decisão, apesar de não ser computada de modo sistemático, mas dificilmente resultará em uma solução otimizada;

b) avaliação de risco baseada em índices: estimativa sistemática dos fatores que afetam a segurança estabelecendo uma classificação para um conjunto de barragens. Não permite comparações numéricas de probabilidades nem considera condições específicas de campo;

c) análise formal do risco: estima-se as frequências da ocorrência dos eventos adversos, as probabilidades dos níveis de resposta aos eventos adversos e dos danos consequentes dos eventos adversos.

Já segundo Melo *et. al.* (p.5, 2015), as análises de risco são desenvolvidas conforme os seguintes métodos:

a) Métodos de análise qualitativos de riscos: se utilizam de uma forma descritiva ou escalas de ordenação numérica para apresentar a magnitude de consequências potenciais e sua probabilidade da ocorrência. Dentre os métodos qualitativos destacam-se:

- Índice Global de Risco - (ICOLD, 1982);
- Metodologia de Classificação de Barragens Sabesp – (Kuperman et al, 1992);
- Potencial de Risco - (Menescal et al, 2001);
- Metodologia de Classificação Ceming – (Fusaro, 2003);
- Índice de Lafitte - (1996 apud Pimenta, 2009);
- Matrizes de Classificação da CNRH em consonância com a Lei 12.334/2010.

b) Métodos de análise quantitativa de riscos: São métodos mais elaborados e consistentes, apoiados em informações objetivas. De forma geral, tendem a tratar sistematicamente os perigos (eventos iniciadores), modos de falha, respostas do sistema, resultados, fatores de exposição e consequências associadas. Dentre os métodos qualitativos destacam-se:

- Árvore de Eventos - ETA – *Event Tree Analysis* (1970);

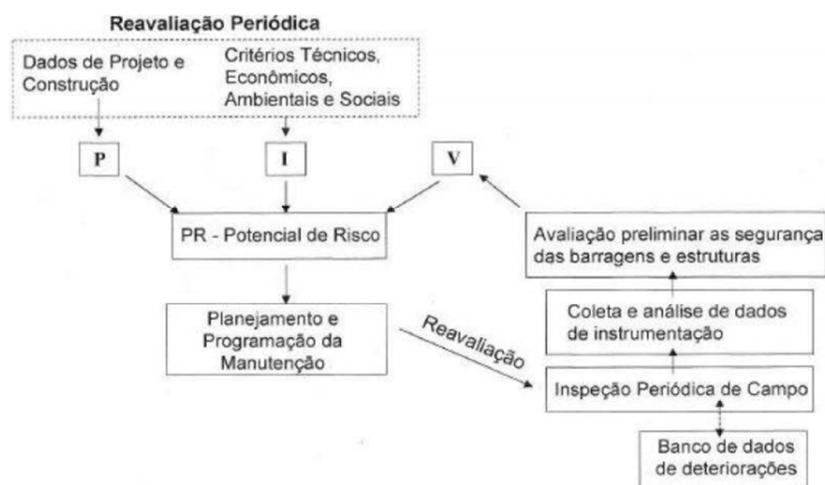
- Árvore de Falhas - FTA – *Fault Tree Analysis* (Watson, 1961).

Entre os métodos discutidos anteriormente para avaliar a segurança de barragens, através da classificação em relação ao potencial de risco, no presente estudo de caso será empregado o desenvolvido por Menescal et al (2001) e Duarte (2008).

Menescal et al. (2001) desenvolveram um modelo de análise potencial de risco com o objetivo de classificação para atender a Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) no ano de 2001, essencialmente quanto à sua segurança estrutural, hierarquizando-as, de forma a proporcionar à direção da empresa um meio eficaz de planejar e programar a alocação dos recursos necessários à sua manutenção dentro dos padrões de segurança exigidos pela legislação oficial e pelas Normas Técnicas Brasileiras.

Esta metodologia utiliza três parâmetros para calcular o Potencial de Risco (PR), sendo: Periculosidade (P), Vulnerabilidade (V) e a Importância Estratégica (I) representada no fluxograma (Figura 27), que resume esta metodologia.

Figura 27 – Modelo proposto inicialmente (MENESCAL et al., 2001)



Fonte: DUARTE (2008).

Os parâmetros relacionados a periculosidade são contabilizados pela Equação 1:

$$P = \sum p_i$$

Onde:

Equação 1

P = periculosidade

pi = somatório dos parâmetros relacionados a periculosidade

Em que P representa a Periculosidade e p representa o peso de cada parâmetro, conforme o Quadro 3 (Periculosidade Modificada). Se P for maior que 30, a Periculosidade é considerada “Elevada”. Se o valor de P estiver entre 20 a 30, a Periculosidade é dita “Significativa”, e se o valor de P estiver entre 10 a 20, a Periculosidade é considerada “Baixa a Moderada”.

Quadro 3 – Periculosidade Proposta por Menescal, 2001

Dimensão da Barragem	Volume Total do Reservatório	Tipo de Barragem	Tipo de Fundação	Vazão de Projeto
Altura <10 m Comprimento < 200 m (1)	Pequeno < 20 hm ³ (3)	Concreto (4)	Rocha (1)	Decamilenar (1)
Altura 10 a 20 m Comprimento < 2000 m (3)	Médio até 200 hm ³ (5)	Alvenaria de Pedra/ Concreto rolado (6)	Rocha alterada/ saprolito (4)	Milenar (2)
Altura 20 a 50 m Comprimento 200 m a 3000 m (6)	Regular 200 a 800 hm ³ (7)	Terra/ Enrocamento (8)	Solo residual/ Aluvião até 4m (5)	500 anos (4)
Altura >50 m Comprimento > 500 m (10)	Muito grande > 800 hm ³ (10)	Terra (10)	Aluvião arenoso espesso/ Solo orgânico (10)	Inferior a 500 anos ou Desconhecida (10)

Fonte: DUARTE (2008).

A pontuação para Vulnerabilidade (V) é alcançada através do somatório da pontuação de cada parâmetro, de acordo com a Equação 2.

$$V = \sum v_i$$

Equação 2

Onde:

V = vulnerabilidade

vi = parâmetros relacionados à vulnerabilidade

A vulnerabilidade enquadra-se como:

Se $V > 35$ – Vulnerabilidade Elevada

Se V entre 20 a 35 – Vulnerabilidade Moderada a Elevada

Se V entre 5 a 20 – Vulnerabilidade Baixa a Moderada

Se $V < 5$ – Vulnerabilidade Muito Baixa

O Quadro 4 apresenta a relação dos parâmetros relacionados a vulnerabilidade segundo Menescal, 2001.

Quadro 4 – Parâmetros relacionados a Vulnerabilidade

Confiabilidade das estruturas Vertedoras	Tomada de Água	Percolação	Deformações, Afundamentos e Assentamentos	Deterioração dos Taludes/ Paramentos
Muito satisfatória (2)	Satisfatória Controle a montante (1)	Totalmente Controlada pelo sistema de drenagem (1)	Inexistente (0)	Inexistente (1)
Satisfatória (3)	Satisfatória Controle a Jusante (2)	Sinais de umedecimento nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras (4)	Pequenos abatimentos da crista/ Crescimento de vegetação (4)	Falhas no rip-rap e na proteção de Jusante (3)
Suficiente (6)	Aceitável (3)	Zonas úmidas em taludes de jusante, ombreiras, área alagada a jusante devida ao fluxo (6)	Ondulações pronunciadas Fissuras (6)	Falhas nas proteções; drenagens insuficiente e sulcos nos taludes (7)
Não satisfatório (10)	Deficiente (5)	Surgência de água em taludes, ombreiras e área de jusante (10)	Depressão na crista - Afundamento nos taludes ou na fundação/Trincas (10)	Depressão no rip-rap Escorregamentos sulcos profundos de Erosão, Vegetação (10)

Fonte: DUARTE (2008).

A importância estratégica é calculada pela equação 3.

$$I = (A + B + C) / 3$$

Equação 3

Onde:

I = Importância estratégica

A = representa o Volume Útil;

B = representa a existência de população a jusante e;

C = representa o Custo da Barragem.

O Quadro 5 apresenta a pontuação dos parâmetros A, B e C segundo Menescal et. al. (2001).

Quadro 5 - Importância estratégica proposta por Menescal et. al (2001)

Volume Útil (hm³) (A)	População a Jusante (B)	Custo da Barragem (C)
Grande > 800 (2)	Grande (2,5)	Elevado (1,5)
Médio 200 a 800 (1,5)	Média (2,0)	Médio (1,2)
Baixo < 200 (1)	Pequena (1,0)	Pequeno (1,0)

Fonte: DUARTE (2008)

Por fim, o potencial de risco (PR) é obtido por pela Equação 4:

$$PR = [(P+V)/2] * I \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

P = periculosidade (equação 1)

V = vulnerabilidade (equação 2)

I = importância estratégica (equação 3)

Após a contabilização considerando a Periculosidade, Vulnerabilidade e Importância estratégica, o Potencial de Risco é classificado de acordo com a Quadro 6.

Quadro 6 – Potencial de Risco (PR)

Classe	Potencial de Risco - PR
A	> 65 ($V_i = 10$) – alto
B	40 a 65 – médio
C	25 a 40 – normal
D	15 a 25 – baixo
E	< 15 – muito baixo

Fonte: Menescal *et. al.* (2001).

Após o enquadramento do Potencial de Risco, é indicado a periodicidade das inspeções conforme Quadro 7.

Quadro 7 – Frequência de Inspeções

Tipo de Inspeção	Classificação da Barragem				
	A	B	C	D	E
Rotina		mensal	trimestral	semestral	Anual
Periódica		Anual (relatório completo)	Anual (relatório simplificado); relatório completo a cada dois anos	Relatório simplificado a cada dois anos	Relatório simplificado a cada quatro anos
Formal		A cada cinco anos	A cada dez anos	A cada quinze anos	A cada quinze anos
Especial	Definir intervenção e reclassificação	Em oportunidades tais como cheias excepcionais, rebaixamento rápido do reservatório, sismos, etc.			

Fonte: Menescal *et. al.*, 2001

Segundo Duarte (2008), as inspeções são do tipo: Rotina, Periódica, Formal e Especial. Caso a barragem seja classificada na classe A (Alto Potencial de Risco) deve haver intervenção na barragem e reclassificação.

As *inspeções rotineiras* são aquelas executadas pelas equipes locais de operação e manutenção, como parte regular de suas atividades. A frequência dessas inspeções deve ser semanal, mensal ou semestral, de acordo com a classe da barragem. Estas inspeções geralmente não geram relatórios específicos, apenas comunicações de eventuais anomalias detectadas.

Inspeção periódica é a inspeção efetuada pela equipe de segurança da barragem, incluindo um estudo sucinto dos documentos de projeto, registros existentes e histórico das intervenções, seguido de inspeção de campo e elaboração de relatório.

Inspeção formal geralmente é efetuada por equipe multidisciplinar de especialistas, em função da categoria da barragem, incluindo um estudo detalhado dos documentos de projeto, registros existentes e histórico das intervenções, seguido de inspeção de campo e elaboração de relatório contendo uma análise das condições de estabilidade e desempenho da mesma.

As *inspeções especiais* são aquelas executadas por especialistas da área relativa a algum problema detectado em uma inspeção rotineira ou formal. Sua realização requer o estudo prévio do projeto e de toda documentação disponível. Não existe uma frequência para sua realização e ocorrem sempre que um problema exija a participação de um especialista para seu diagnóstico e solução. Delas deve resultar um relatório específico capaz de orientar de forma conclusiva o encaminhamento da solução.

A metodologia desenvolvida por Menescal *et al* (2001) foi desenvolvida para barragens convencionais. Duarte (2008) modificou alguns parâmetros, adaptando-a para barragens de rejeito e resíduos industriais. Os barramentos de contenção de rejeitos são diferentes das convencionais. Isso é nítido, quando se avalia os métodos construtivos.

Nesta sequência, Duarte (2008) modificou a metodologia de Menescal *et. al* (2001) apresentando os aspectos de Periculosidade, Vulnerabilidade e Importância Estratégica alterados para aplicação dos dados no modelo, sendo:

Periculosidade: a característica que o barramento possui, onde o complexo de dados e parâmetros técnicos irá evidenciar se a barragem pode vir a oferecer durante a análise algum risco iminente, com enquadramento segundo Quadro 8.

Quadro 8 – Periculosidade modificada

Dimensão da Barragem	Volume Total	Tipo de Barragem	Tipo de Fundação	Vazão de Projeto
Altura < 10 m (1)	Pequeno < 0,5 hm ³ (3)	Concreto (4)	Rocha (1)	Decamilenar (1)
Altura 10 a 20 m (3)	Médio até 5 hm ³ (5)	Alvenaria de Pedra/ Concreto rolado (6)	Rocha alterada/ saprolito (4)	Milenar (2)
Altura 20 a 50 m (6)	Regular 5 a 20 hm ³ (7)	Terra/ Enrocamento (8)	Solo residual/ Aluvião até 4m (5)	500 anos (4)
Altura > 50 m (10)	Muito grande > 20 hm ³ (10)	Terra / Rejeito (10)	Aluvião arenoso espesso/ Solo orgânico (10)	Inferior a 500 anos ou Desconhecida (10)

Fonte: DUARTE, 2008.

O cálculo da periculosidade é determinado por meio da Equação 4.

$$P = \sum p_i \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

P = periculosidade

p_i = somatório dos parâmetros relacionados a periculosidade

Em que P representa a Periculosidade e p representa o peso de cada parâmetro, conforme a Tabela 1 (Periculosidade Modificada). Se P for maior que 30, a Periculosidade é considerada “Elevada”. Se o valor de P estiver entre 20 a 30, a Periculosidade é dita

“Significativa”, e se o valor de P estiver entre 10 a 20, a Periculosidade é considerada “Baixa a Moderada”.

Vulnerabilidade: consiste em envolver aspectos relacionados com o estado atual da barragem, com a sua história e com a operacionalidade e/ou facilidade de manutenção de suas estruturas hidráulicas Quadro 9.

Quadro 9 – Vulnerabilidade modificada

Tempo de Operação	Projeto (As Built)	Confiabilidade das estruturas Vertedoras	Alteamento	Percolação	Deformações, Afundamentos e Assentamentos	Deterioração dos Taludes/ Paramentos	Instrumentação e Monitoramento
> 30 anos (0)	Existem projetos "as built" e avaliação do desempenho (1)	Muito satisfatória (2)	sem alteamento até a data da avaliação (0)	Totalmente Controlada pelo sistema de drenagem (1)	Inexistente (0)	Inexistente (1)	Com algum tipo de instrumentação (incluindo piezômetros) e com um programa de monitoramento (0)
10 a 30 anos (1)	Existem Projetos "as built" (3)	Satisfatória (3)	Método de Jusante (1)	Sinais de umedecimento nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras (4)	Pequenos abatimentos da crista/ Crescimento de vegetação (2)	Falhas no rip-rap e na proteção de Jusante (3)	Com algum tipo de instrumentação (mas sem piezômetros) e com um programa de monitoramento (3)
5 a 10 anos (2)	Só projeto Básico (5)	Suficiente (6)	Método de Linha do Centro (3)	Zonas úmidas em taludes de jusante, ombreiras, área alagada a jusante devida ao fluxo (6)	Ondulações pronunciadas Fissuras (6)	Falhas nas proteções; drenagens insuficiente e sulcos nos taludes (7)	Com algum tipo de instrumentação (mas sem piezômetros) e sem programa de monitoramento (6)
< 5 anos (3)	Não existe Projeto (7)	Não satisfatório (10)	Método de Montante (6)	Surgência de água em taludes, ombreiras e área de jusante (10)	Depressão na crista - Afundamento nos taludes ou na fundação/Trincas (10)	Depressão no rip-rap Escorregamentos sulcos profundos de Erosão, Vegetação (10)	Sem nenhuma instrumentação e sem programa de monitoramento (10)

Fonte: DUARTE, 2008.

A pontuação para Vulnerabilidade (V) é alcançada através do somatório da pontuação de cada parâmetro, de acordo com a Equação 5.

$$V = \sum v_i$$

Equação 5

Onde:

V = vulnerabilidade

v_i = parâmetros relacionados à vulnerabilidade

A vulnerabilidade enquadra-se como:

Se $V > 35$ – Vulnerabilidade Elevada

Se V entre 20 a 35 – Vulnerabilidade Moderada a Elevada

Se V entre 5 a 20 – Vulnerabilidade Baixa a Moderada

Se $V < 5$ – Vulnerabilidade Muito Baixa

Importância Estratégica: reúne parâmetros que, por seu vulto ou magnitude, conferem o valor estratégico associável à barragem no caso de eventual ruptura. Os aspectos considerados relevantes para a Importância (I) foram o volume do reservatório, a população a jusante sujeita a risco em casos de falhas operacionais e o custo atualizado da barragem e estruturas anexas (Quadro 10).

Quadro 10 – Importância Estratégica modificada

Volume Atual (hm³) (A)	População a Jusante (B)	Interesse Econômico e Ambiental (C)
Grande > 20 (2,0)	Grande (2,5)	Elevado (1,5)
Médio 5 a 20 (1,5)	Média (2,0)	Médio (1,2)
Baixo < 5 (1,0)	Pequena (1,0)	Pequeno (1,0)

Fonte: Duarte, 2008.

A pontuação para o aspecto Importância Estratégica (I) é resultante da média aritmética da pontuação dos três parâmetros envolvidos: Volume Útil (A), População a Jusante (B) e Custo da Barragem (C), conforme Equação 6.

$$I = (A + B + C) / 3$$

Equação 6

Onde:

I = Importância estratégica

A = representa o Volume Útil;

B = representa a existência de população a jusante e;

C = representa o Custo da Barragem.

Aplicando os valores dos três aspectos (P, V e I) na Equação 7, tem-se o Potencial de Risco (PR) para cada barragem.

$$PR = (P+V) / 2 * I \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

P = periculosidade (equação 1)

V = vulnerabilidade (equação 2)

I = importância estratégica (equação 3)

Como se pode observar o Potencial de Risco obtido é qualitativo, apesar da representação numérica, pois não foi calculado utilizando procedimentos estatísticos. Esta etapa do cálculo de risco propriamente dito pode ser desenvolvida dentro da fase de planejamento, seguindo os procedimentos de *Portfolio Risk Analysis (PRA)* descritos em Parsons *et. al.* (1999), caso seja necessária uma priorização mais pormenorizada das atividades a serem desenvolvidas.

O enquadramento das barragens em classes de potencial de risco (Quadro 11) permite definir a frequência de inspeções para cada barragem e antecipar ações, de modo a evitar falhas e rupturas. A indicação das inspeções permanece as mesmas do modelo de Menescal *et. al.* (2011).

Quadro 11 - Classes de potencial de Risco

Classe	Potencial de Risco - PR	Estágio
A	> 70	A barragem se encontra em estado ALTO de emergência.
B	40 a 70	A barragem encontra-se em estado MÉDIO de risco.
C	28 a 45	A barragem encontra-se em estado NORMAL de risco
D	16 a 27	A barragem encontra-se em estado BAIXO de risco
E	< 15	A barragem encontra-se em estado MUITO BAIXO de risco

Fonte: DUARTE, 2008

3 METODOLOGIA

Este item descreve a metodologia utilizada para avaliar a segurança das barragens da Alumar. Neste sentido, para o alcance dos objetivos propostos, esta caracteriza-se quanto a natureza, como uma pesquisa qualitativa, que, segundo Lakatos e Marconi (1991), busca explicar o porquê das coisas, privilegiando os dados qualitativos das informações disponíveis, assim como quantitativa, quando caracteriza-se pelo uso da quantificação, tanto na coleta quanto no tratamento das informações, sendo nesta pesquisa, quantificado o potencial de risco das barragens através da metodologia de Duarte (2008).

Quanto os objetivos, a pesquisa enquadra-se como descritiva que tem como objetivo principal a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou, então, o estabelecimento de relações entre variáveis. Especificamente, relaciona-se variáveis técnicas, intrínseca a construção das barragens, correlacionando-as (GONÇALVES, 2003).

Os procedimentos de coleta, a pesquisa, classifica-se como “estudo de caso”, que, conforme Lakatos (2011), esta define-se como uma técnica de pesquisa que consiste em analisar de forma profunda uma unidade concreta como: uma instituição, um sistema, um programa, uma pessoa etc., com vistas em conhecer essa unidade, a partir de uma base teórica consistente. No estudo de caso, o pesquisador não tem uma proposta de intervenção como procedimento de pesquisa. Utiliza procedimentos variados para analisar a unidade em estudo. Especificamente, procurou-se conhecer a Alumar, e o processo de construção e monitoramento das barragens de resíduos de bauxita, objeto de estudo desta monografia.

Diante do exposto, a pesquisa desenvolveu-se em etapas, sendo nestas descritas os procedimentos metodológicos adotados, conforme itens a seguir.

3.1 Revisão da Literatura

A revisão bibliográfica é constituída por uma série de procedimento para localização e busca metódica de documentos que possam interessar ao tema em discussão. O referencial teórico, por sua vez, constitui o universo de princípios, categorias e conceitos que formam sistematicamente um conjunto coerente, dentro do qual o trabalho de pesquisa se fundamenta e se desenvolve (SEVERINO, 2006).

Nesse sentido, a revisão da literatura foi composta por meio de publicações de órgãos e autores renomados na área, na qual foram realizadas pesquisas na biblioteca central da Universidade Estadual do Maranhão- UEMA, na biblioteca central da Universidade Federal do Maranhão – UFMA, buscando obter monografias, dissertações, teses de âmbito nacional, regional e local, boletins, relatórios de pesquisas, etc., assim como pesquisa sites para obtenção de artigos relacionada à temática.

Na fundamentação sobre barragens procurou-se enquadrar o tipo de barragem da Alumar quanto sua utilização e método de construção.

Na legislação é ressaltado as principais normas regulamentadoras a que se refere a segurança, monitoramento e fiscalização de barragens de rejeitos industriais, assim como os órgãos competentes a que concerne as leis aplicadas no Brasil assim como os devidos enquadramentos.

Sobre riscos e gestão identificou-se os processos que regem a segurança de barragens segundo três pilares: a segurança estrutural, monitoramento e gestão de emergência. Afim de correlacionar os riscos iminentes e associados, além de tomar conhecimento das ações utilizadas pela Alumar quanto a gestão de riscos da implantação e operação das ARB's.

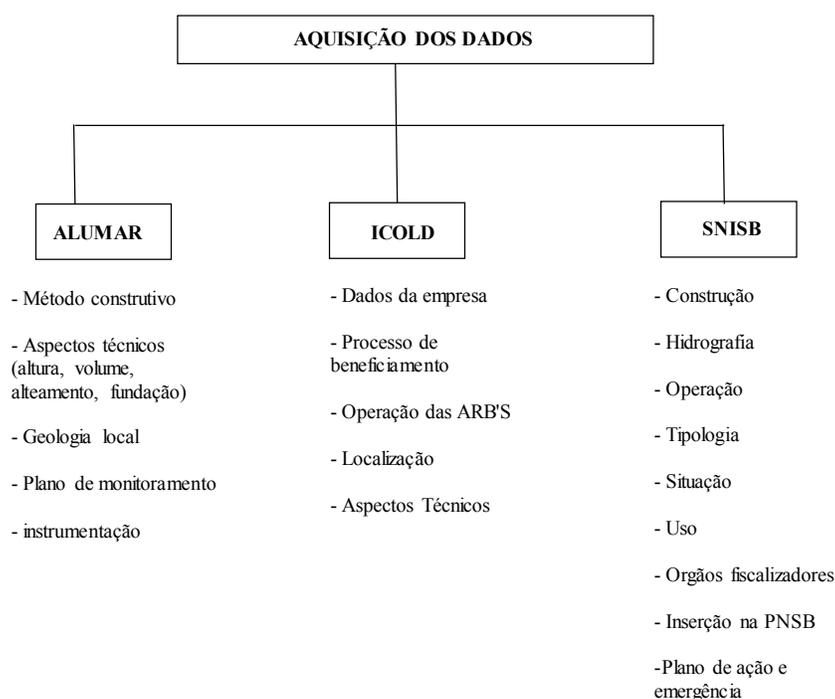
Métodos de análise de risco buscou-se verificar a existência dos métodos avaliativos utilizados para avaliar a segurança de barragens, com ênfase principal a de rejeito industrial, os métodos utilizados em trabalhos anteriores com o mesmo objetivo.

3.2 Aquisição dos Dados

A base de informações utilizada para avaliar a segurança das barragens da Alumar foram de documentos cedidos pela própria empresa, sendo estes, informações sobre método de construção das barragens, dados técnicos inerente a cada barragem como: altura, volume dos reservatórios, dentre outros. Estes dados foram fundamentados para a aplicação da metodologia de Menescal et al (2001) adaptada por Duarte (2008)

Considerou-se, ainda, as informações disponibilizadas no livro Barragens de Rejeitos no Brasil (ICOLD, 2011), que retrata informações do Consórcio de Alumínio do Maranhão, com informações sobre suas barragens de resíduos; bem como, das informações disponibilizadas pelo Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) da Agencia Nacional de Águas (ANA, 2017).

Figura 28 - Fluxograma da Aquisição dos dados



Fonte: O autor, 2019

3.3 Análise dos Procedimentos de Monitoramento e Gestão de Risco desenvolvidos pela Alumar

A partir do Plano de Monitoramento de Lagos - PML da Alumar procurou-se conhecer as ações, procedimentos, instrumentação e análises do desempenho realizado para a manutenção e operação das estruturas vigentes. Por meio da análise dos procedimentos de monitoramento e gestão

dos riscos desenvolvidos pela Alumar, retratou-se as condições de segurança das barragens em estudo, ao mesmo tempo, em que se contribui-se para o estudo de barragens no Estado do Maranhão e Brasil.

3.4 Análise do Potencial de Risco das Barragens da ALUMAR

Através da metodologia de Menescal et. al (2001) modificada por Duarte (2008), descrita neste estudo, analisou-se o potencial de risco das barragens. Esta análise foi realizada para o esclarecimento, conhecimento e enquadramento das barragens da Alumar em classes potenciais de risco, afim de atestar a segurança e estabilidade das estruturas, definindo-se ações, intervenções e procedimentos com ênfase na prevenção de falhas.

4 CONSÓRCIO DE ALUMÍNIO DO MARANHÃO - ALUMAR

O Consórcio de Alumínio do Maranhão - Alumar - localizado no município de São Luís, inaugurado em 1984, é atualmente um dos maiores complexos de produção de alumina e alumínio primário do mundo, sendo formado por um sistema integrado formado pelas áreas de Aquisição e Logística/Porto, Refinaria e Redução, constituindo o processo de produção de alumina e alumínio, e sendo responsável pela geração de resíduo industrial da bauxita (Figura 29). O Consórcio da refinaria da Alumar é formado pelas empresas Alcoa, BHP-Billiton e Rio Tinto Alcan.

Figura 29 - Consórcio de Alumínio do Maranhão – Alumar



Fonte: Alumar (2019)

Em 2007, a Alumar alcançou a marca das 450.000 toneladas de alumínio produzidas, com a fábrica produzindo aproximadamente 1.500.000 toneladas de alumina, sendo que, com a conclusão das obras de expansão, a produção de alumina chega a 3.500.000 toneladas

A Alumar mantém em seu parque industrial sete barragens de resíduos lagos de resíduos de bauxita, principal minério para obtenção do oxido de alumínio, cuja a fiscalização é de responsabilidade da Secretaria de Meio Ambiente (SEMA) que são áreas destinadas e construídas para o armazenamento do resíduo proveniente do beneficiamento do mineral para a extração da Alumina (Al_2O_3), decorrente de uma atividade químico-industrial denominado de processo Bayer.

4.1 Processo Bayer de Beneficiamento da Bauxita

A rocha bauxita compõe-se de uma mistura impura de minerais de alumínio e os mais importantes são gibbsita $Al(OH)_3$, diásporo $AlO(OH)$ e boehmita $AlO(OH)$. Esses minerais são conhecidos como oxi-hidróxidos de alumínio e suas proporções na rocha, variam muito entre os depósitos, bem como o tipo e a quantidade das impurezas do minério, tais como: óxidos de ferro, argila, sílica, dióxido de titânio, entre outras. A maioria das bauxitas, economicamente aproveitáveis, possuem um conteúdo de alumina (Al_2O_3) entre 50 e 55% e

o teor mínimo para que ela seja aproveitável é da ordem de 30% (ANJOS e SILVA, 1983; PAGIN et al., 1983).

Quanto sua textura geralmente é opaca a terrosa, se assemelhando por sua vez a argila (Figura 30).

Figura 30 – Minério Bauxita

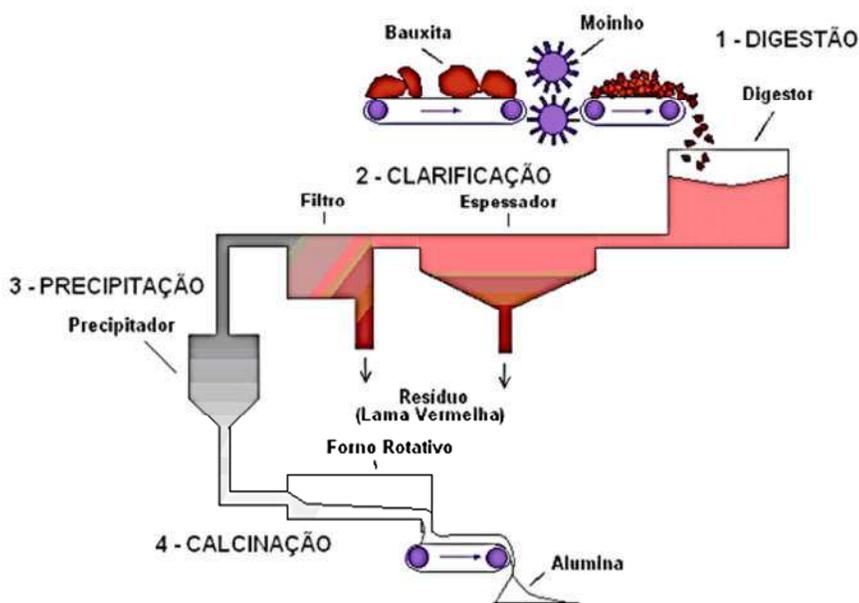


Fonte: Norsk Hydro ASA

A bauxita é o principal minério para obtenção do alumínio metálico e de muitos compostos de alumínio, onde seu principal componente é a alumina (Al_2O_3). Para o refino da bauxita, obtenção da alumina e, conseqüentemente do alumínio metálico, é utilizado o Processo Bayer (DOMINGUINI, p.2, 2012).

Neste processo (Figura 31) é exigida uma alta demanda de energia elétrica. O mineral é purificado devido as impurezas para extrair a alumina das demais substâncias, como o óxido de ferro, sendo submetido a diversas etapas.

Figura 31 - Processo Bayer e suas etapas para o beneficiamento da bauxita



Fonte: MOTTA et al, 2007, adaptado de WAO, 2003

A etapa um (1) consiste na digestão. Envolve num primeiro momento, a moagem da bauxita, seguida pela digestão propriamente dita com uma solução cáustica de hidróxido de sódio (NaOH) sob temperatura e pressão que variam entre 200 e 240 °C. As condições em que se processa a digestão variam de acordo com as propriedades da bauxita (MOTTA et al, 2007, p.323)

No processo dois (2), ocorre a separação entre fases sólida (insolúvel) e líquida (licor) seguido da técnica de espessamento que é a decantação do resíduo oriundo da digestão seguido de filtração. Nessa fase é normalmente utilizado a adição de polímeros para promover a floculação das partículas.

O resíduo gerado durante o processo 2 é chamado genericamente pela indústria de refino de lama vermelha. Ele é disposto em lagoas construídas e projetadas para esta finalidade (Figura 32).

Figura 32 – Lago de disposição de resíduos de bauxita



Fonte: <<http://www.scielo.br/revistas/rmat/v12n2/v12n2a10.html>> acesso em 18 de novembro de 2019

Em seguida, na etapa três (3) ocorre o processo de precipitação, que se dá pelo esfriamento do licor onde é adicionado cristais de alumina para estimular a precipitação em uma espécie de reversão a digestão. Segundo Motta e al (2007) a alumina cristalizada é encaminhada para a calcinação e o licor residual contendo NaOH é revertido novamente para a etapa de digestão.

No processo final, a alumina é lavada para remoção de resíduos de licor e posteriormente submetida a secagem. Em seguida, é calcinada a uma temperatura de 1000° C para desidratação dos cristais, gerando a alumina cristalizada, pura, com textura arenosa e coloração branca (Figura 33).

Figura 33 – Resultado do processo Bayer para obtenção da alumina



Fonte: <www.hydro.com> acesso em 18 de novembro de 2019

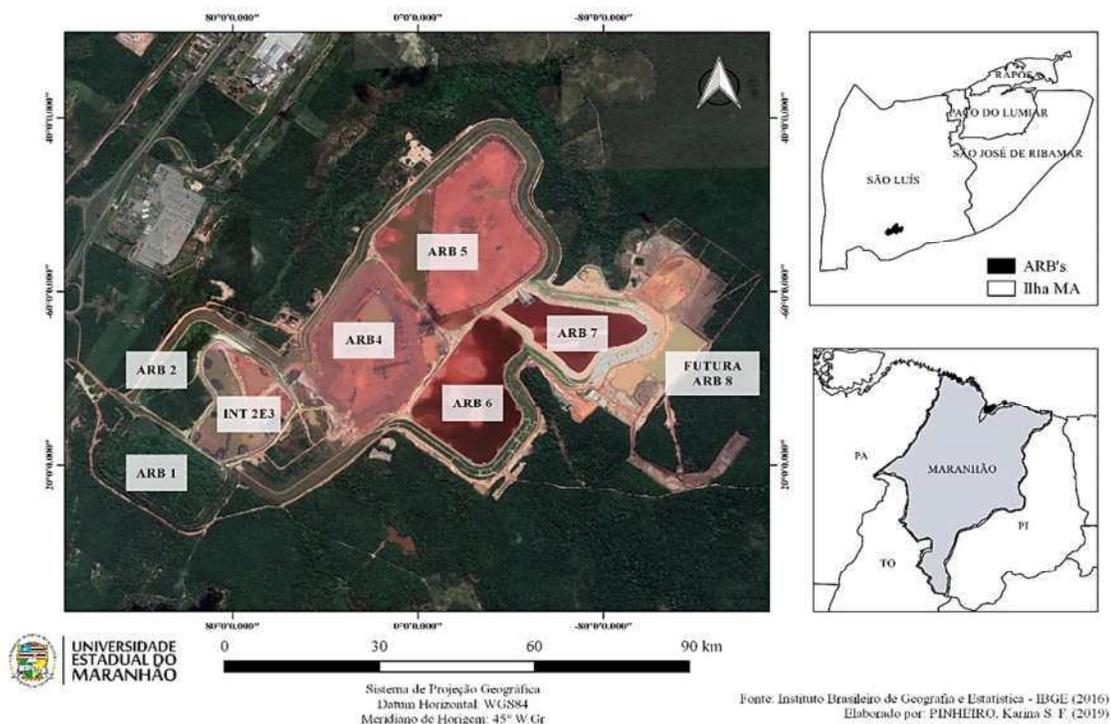
A lama vermelha produzida através do processo Bayer é transportada através de tubulações para locais onde são armazenados, no caso em barragens, denominadas Áreas de

Resíduo de Bauxita – ARB por uma distância de até 6 km da fábrica, tendo o resíduo uma concentração de sólidos de 15 a 25% (CBDB, p.48, 2012).

4.2 Áreas de Resíduos de Bauxita da Alumar – ARB's

As barragens - ARB's da Alumar, localizam-se na porção sudoeste da Ilha do Maranhão, no município de São Luís (capital do Estado do Maranhão), no setor industrial, a cerca de 23 km da zona urbana deste município (Figura 34).

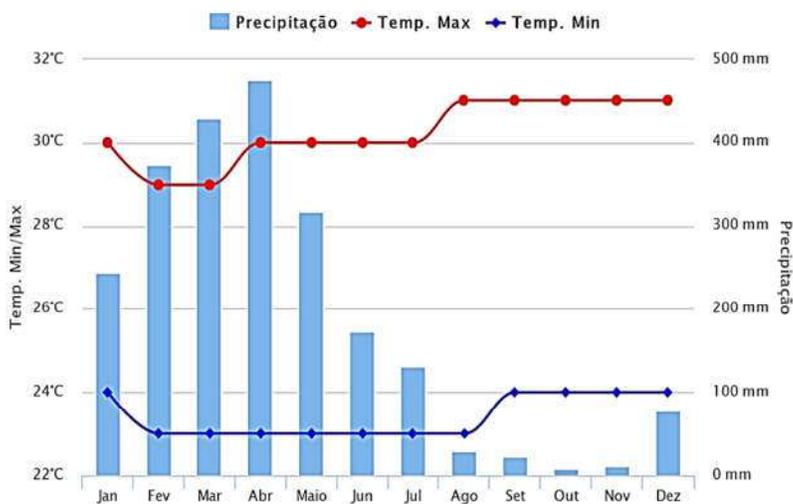
Figura 34 – Localização das ARB'S – Barragens da Alumar em São Luís - MA



Fonte: PINHEIRO, 2019

Na área as condições climáticas são características da região e, segundo Koppen, é do tipo AW, Tropical chuvoso, com predominância de chuvas nos meses de janeiro a maio e estiagem de junho a dezembro. A temperatura média chega aproximadamente 28°C no ano (Figura 35).

Figura 35 - Comportamento da Precipitação e Temperatura de São Luís considerando-se a normal climatológica da série histórica de 1997 – 2017.



Fonte: Climatempo (2018)

No que tange a geologia, de acordo com CPRM (2012), a Ilha é constituída por camada sedimentos areno-argiloso que se depositaram na região cratônica da Bacia Costeira de São Luís nos períodos Cretáceo e Quaternário, sendo as formações geológicas Itapecuru e Barreiras as principais.

A geologia local da área de implantação das ARB's segundo Vieira (2001) é composta por um material de característica areno-siltoso mediamente compactado originado da alteração de arenitos da formação Barreiras, sobre a presença de componentes lateríticos e areno-argiloso. E sobre esses materiais encontram-se uma camada compacta de silte areno-argiloso.

Segundo estudos realizados pela LPS Consultoria e Engenharia Ltda (ALUMAR, 2014), no momento de construção da ARB6, identificou-se que a área é composta predominantemente por areia fina a média, de siltosa a pouco siltosa, de cor variando entre amarelo claro e vermelha. Subordinadamente ocorrem camadas de silte argiloso, arenoso a pouco arenoso e em alguns trechos ocorrem camadas de laterita, de cor variando entre vermelha e amarela clara. Estes materiais avermelhados e amarelados são denominados, quando empregados em construção de aterros, de “solo local”. Lentes de areia com granulometria variando de fina a média, pouco siltosa, de cor amarela ou vermelha ocorrem secundariamente. Em regiões topograficamente menos elevadas, após substratos já descritos,

em torno da cota 20m, ocorrem camadas de silte argiloso apresentando aumento de compacidade de média a dura ao longo da profundidade. A textura areno-siltosa dos sedimentos flúvio-marinhos predominantes na fundação.

Ainda, segundo a LPS Consultoria e Engenharia Ltda (ALUMAR, 2014), a área de implantação da ARB 6 apresenta-se, em sua totalidade, em condições naturais, constituindo-se de morrotes recobertos de mata de terra firme e regiões planas recobertas de vegetação de cerrado e mata de terra firme.

O perfil geotécnico desta região apresenta uma camada superficial de solo vegetal com espessura média de 0,40m e com camadas subsequentes constituídas predominantemente por solo areno-siltoso, de cor variando entre amarelo claro e vermelho e consistência inicial fofa, em alguns pontos, a medianamente compacta, refletidas nos valores de medidas de penetração NSPT da ordem de 5 a 8. Em partes da fundação em que a camada superficial de colúvio apresenta-se menos resistente ($NSPT < 2$) está prevista sua remoção e substituição por aterro compactado.

Em regiões topograficamente menos elevadas, após substratos já descritos, em torno da cota 20m, ocorrem camadas de silte argiloso apresentando aumento de consistência média ($NSPT > 6$) a dura ($NSPT > 40/10$), com esse aumento de resistência ocorrendo ao longo de 5,0m de profundidade.

A compacidade do terreno é, de um modo geral, crescente com a profundidade, de fofo a pouco compacto nos primeiros 5,0m ($NSPT$ entre 2 a 8), de medianamente compacto a compacto de 5,00 a 10,00m de profundidade ($NSPT$ de 9 a 40) e muito compacto após 10m de profundidade até a paralisação das sondagens, que ocorreram entre 15 e 20m.

Lentes de areia de cor amarela, com granulometria média, ocorrem em alguns pontos, próximo ao nível d'água, na cota média de 20m, o que pode acarretar resistências inferiores as das camadas que a confinam, refletidas em resultados de NSPT da ordem de 5 a 7 golpes, classificados como pouco compacto.

O nível d'água freático, na época da execução das sondagens, Janeiro – Março/2014, em pleno período chuvoso, fato este que pode falsear medidas pontuais, situou-se entre 0,00, em pontos alagados, a 15,40m de profundidade, equivalentes às elevações: 20,60m a 22,60m. Cabe mencionar que o projeto preliminar prevê o fundo escavado para a implantação da ARB 6 entre as elevações: 27,85m e 29,90m, o que garante um afastamento mínimo entre o NA e o fundo do reservatório maior que 3,00m, de acordo com as diretrizes de proteção ao meio ambiente.

A seguir apresenta-se de forma resumida os principais aspectos técnicos das barragens segundo informações cedidas pela Alumar, quanto a sua operacionalidade, construção, altura dos diques e a capacidade de disposição dos lagos.

Quadro 12 – Informações Gerais das ARB's da Alumar

ARB	Localização	Situação Atual	Ano de Construção	Método Construtivo	Altura Máx (m)	Capacidade de Estocagem (m3)
ALUMAR - RSA 1	2° 43.828'S, 44° 19.021'W	Closed	1984	Single raise	28,00	2.400.000
ALUMAR - RSA 2	2° 43.568'S, 44° 18.918'W	Closed	1997	Wet	31,35	4.000.000
ALUMAR - RSA 3	2° 43.718'S, 44° 18.668'W	Closed	2000	Wet	26,5	4.800.000
ALUMAR - RSA 4	2° 43.431'S, 44° 18.424'W	Inactive	2005	Wet	26,5	5.400.000
ALUMAR - RSA 5	2° 43.100'S, 44° 18.162'W	Active- Upstream Stand by	2011	Wet	22,000	10.400.000
ALUMAR - RSA 6	2° 43.606'S, 44° 18.138'W	Active	2017	Single raise	23,50	5.054.000
ALUMAR - RSA 7	2°43.189.'S 44° 18.002"W	Active - Water	2019	Single raise	22,50	3.464.000
ALUMAR - INTERFACE 2&3	2° 43.354'S 44° 18'473"W	Under Closure	2016	Single raise	8,50	1.000.000

Fonte: Alumar (2019).

Conforme apresentado no quadro acima, as barragens possuem capacidades diferentes, assim como o método de construção. A seguir apresenta-se a descrição técnica de forma condensada sobre as ARB's da Alumar.

ARB 1:

- A primeira realizada 1983 com crista de 56m e volume do reservatório com capacidade de aproximadamente de 1.600.000 m³ com área de aproximadamente 220.000 m², Figura 37.
- E a segunda etapa ocorreu em 1987, com o um alteamento dos diques passando para altura da crista de 56 m para 60 m, gerando um acréscimo significativo no volume de 800.000 m³ passando a operar com uma nova capacidade de 2.400.000 m³.

Figura 36 – Barragem ARB1



Fonte: Alumar, 2019.

A ARB 1 é constituída por uma geomembrana de PVC e dispositivos com drenagem de fundo, que é composto por um colchão drenante de areia de 50 cm e um conjunto de tubos perfurados de drenagem em “espinha de peixe” que compreende todo o fundo do reservatório (CBDB, 2012).

A operação da lagoa ocorreu no período que compreendeu 1984 a 1990, iniciando-se posteriormente em 1996 um processo de reabilitação da área com a presença de vegetação. Atualmente se encontra reabilitada e monitorada com inspeções de campo trimestrais e semanal da drenagem.

Sua cobertura vegetal é implantada de acordo a NBR 10157 que recomenda a utilização de uma drenagem superficial para um evento chuvoso para um tempo de retorno de 25 anos. E como se trata de um modelo de reservatório “off-stream” não há riscos de enchentes e ruptura.

ARB 2:

A construção do reservatório se deu em etapa única com uma área de aproximadamente de 325.000 m², correspondendo a um volume de 5.200.000 m³ e sua operação em dois processos de disposição:

- De maneira convencional entre 1990 a 1997 com capacidade inicial de 4.000.000 m³

- E com uma disposição submetida a técnica de “*upstream stacking*” em meados de 2000 a 2004 com acréscimo de 1.138.000 m³ prolongando a vida útil do reservatório.

Figura 37 – Barragem ARB2



Fonte: Alumar, 2019

O reservatório se encontra fora de operação e reabilitada com envelopamento do resíduo com uma geomembrana impermeável, solo local e cinza das caldeiras. Seu sistema de drenagem segue os mesmos padrões da ARB1 com drenagem de fundo. E assim como a ARB 1 a ARB 2 segue o modelo “*off-stream*” não havendo riscos de enchentes e ruptura.

A ARB 2 foi construída e projetada com intuito de fazer um reaproveitamento do hidróxido de Sódio (NaOH) também conhecida como soda cáustica presente no resíduo, por um sistema de infiltração implantado em um nível inferior da impermeabilização que permite recuperar a soda pelo dreno de fundo.

ARB 3:

O reservatório foi construído em duas etapas a primeira em 1997 e a segunda em 2000 e sua operação também se deu três processos de disposição dos resíduos:

- Disposição convencional com crista de 47,5 m e volume de operação de 4.000.000 m³.
- Disposição convencional seguido pela elevação da cota por alteamento da crista para 51,5 m acrescentando 800.000 m³, recebendo resíduos até o ano de 2005.

- Em 2007 foi implementado um novo modelo denominado de “upstream stacking” prolongando seu tempo de operação até 2010 quando iniciou seu processo de reabilitação e atualmente se encontra em estágio final de reabilitação seguindo os mesmos padrões de fechamentos das ARB’s anteriores.

Figura 38 – Barragem ARB3



Fonte: Alumar, 2019

Existe um sistema extravasor que é composto por um conjunto vertedouro de concreto armado com dimensões de aproximadamente (2,10 x 1,75 m), sistema que deságua na ARB 4 e que funcionará até a reabilitação da área quatro. O extravasor foi dimensionado a um tempo de retorno de 100 anos.

Seu sistema de monitoramento é realizado por medições semanais do dreno de fundo e medições dos recalques além de inspeções visuais, embora esteja em processo de reabilitação existe a necessidade de fazer contínuos monitoramentos, mesmo fora de operação.

ARB 4:

Foi construída em etapa única em 2004, mas só entrou em operação no ano de 2005, pelo método de disposição convencional dos resíduos. A altura da crista é de 51,5 m com capacidade de 5.400.000 m³, operando no modo convencional até próximo de 2010. Em 2011 o reservatório passa a operar em um novo módulo seguindo assim como as ARB’s anteriores por “upstream stacking” prolongando seu tempo de operação. Atualmente ainda se encontra em operação.

Figura 39 – Barragem ARB4



Fonte: Alumar, 2019

O reservatório é constituído por diques de solo compactados, revestido por um sistema de impermeabilização com geomembrana de PVC com espessura de aproximadamente de 0,8 mm e uma camada de argila de 0,5 m compactada ao longo de seus taludes e da base que compõem a área. No fundo do reservatório possui um dreno de fundo composto por um colchão drenante de 50 cm associado a um conjunto de tubos perfurados em formato de “espinha de peixe” sobre a geomembrana.

Seu sistema de monitoramento é baseado por medições semanais das vazões do dreno de fundo, batimetrias trimestrais da seção do lago, inspeções em taludes, vistoria das galerias e acompanhamento de marcos de medição de recalques.

ARB 5:

A ARB 5 entrou em construção em 2008 a 2009 apresentando capacidade de armazenamento de aproximadamente 10.600.000 m³ ou 10.4 hm³. Operando e com modelos de disposição de forma similar as demais ARB's apresentando um sistema de drenagem de fundo impermeabilizada em geomembrana e atualmente se assim como a ARB 4 se encontra em operação.

Figura 40 – Barragem ARB5



Fonte: Alumar, 2019

ARB 6:

A ARB 6 entrou em construção em 2017 e em operação em 2018, apresentando capacidade de armazenamento de aproximadamente 5.060.000 m³. Operando e com modelos de disposição de forma similar as demais ARB's apresenta um sistema de drenagem de fundo impermeabilizada em geomembrana e atualmente assim como a ARB 4 se encontra em operação.

Figura 41 – Barragem ARB6



Fonte: Alumar, 201

ARB 7:

A ARB 7 entrou em construção em 2018 e em operação em 2019, apresentando capacidade de armazenamento de aproximadamente 3.590.000 m³. Operando e com modelos de disposição de forma similar as demais ARB's apresenta um sistema de drenagem de fundo impermeabilizada em geomembrana e atualmente assim como a ARB 4 se encontra em operação.

Figura 42 – Barragem ARB7

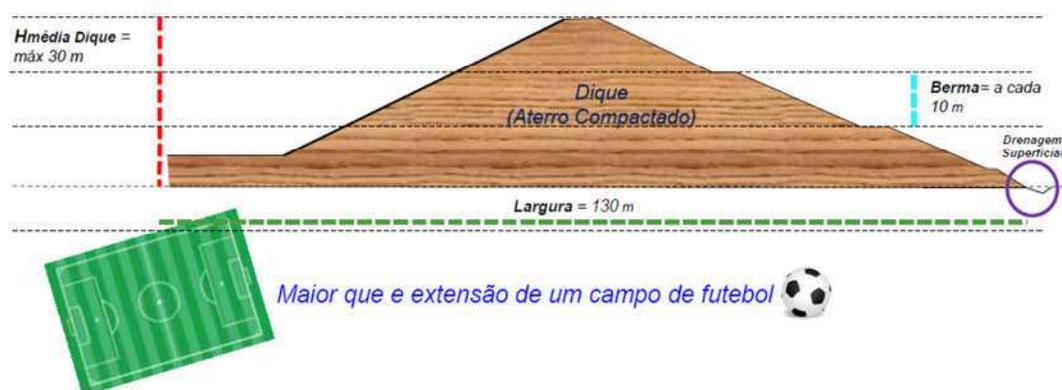


Fonte: Alumar, 2019

4.3 Método Construtivo das ARB's

As ARB's foram implantadas em etapa única ou em duas etapas assim como suas operações. O processo construtivo foi realizado por Sistema de Contenção, com a implantação de diques, para construção do aterro de solo local compactado (Figura 43).

Figura 43 – Método de Construção das ARB's

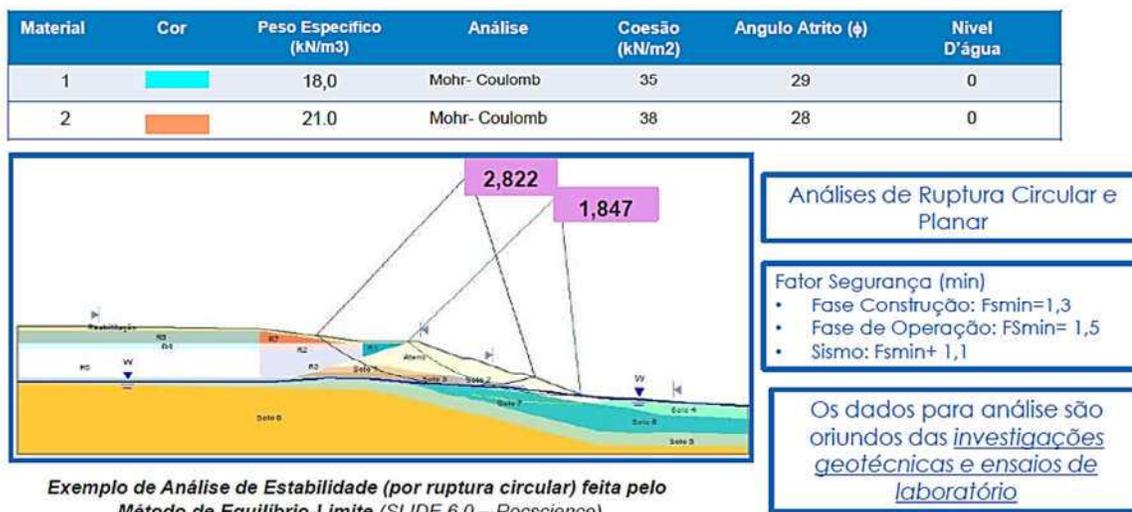


Fonte: Alumar (2019).

Ressalta-se que, na etapa de construção, foram realizados estudos geotécnicos de caracterização do solo e análise da estabilidade dos taludes das ARB's. Segundo Alumar (2014), as análises de estabilidade de taludes foram desenvolvidas considerando o aterro de solo compactado, as camadas de fundação e o resíduo. Foram analisadas condições estáticas de solicitação, bem como condição de solicitação com abalo sísmico, para taludes internos e externos do reservatório.

Os resultados das investigações de campo e os ensaios de laboratório foram utilizados para definir os perfis de subsolo e parâmetros geotécnicos empregados nas análises, conforme apresenta-se de forma resumida na Figura 44. Foram consideradas as seguintes condições de solicitação, como apresenta-se para a ARB 6: Final de Construção – Fator de segurança mínimo = 1,3; Operação Normal – Fator de segurança mínimo = 1,5; com condição sísmica – Fator de segurança mínimo = 1,0

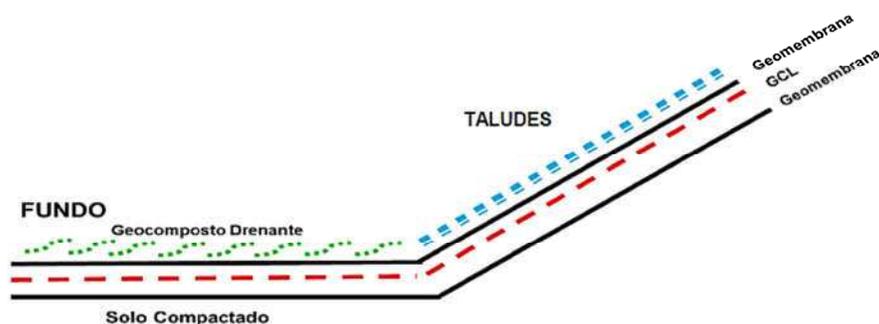
Figura 44 – Resultado das análises de estabilidade de taludes para ARB6



Fonte: Alumar (2019)

Após análise de estabilidade dos taludes. O fundo do reservatório e os taludes passam por um processo de impermeabilização com a inserção de geomembranas e geocompostos drenantes, que tem por finalidade reduzir a carga hidráulica sobre a geomembrana de fundo. O Sistema é formado por sistema de tubos drenantes montados em formato de “espinha de peixe”, que são tubos de PEAD instalados neste formato (Figura 45).

Figura 45 – Impermeabilização das ARB's



Fonte: Alumar (2019)

O fundo é impermeabilizado com argila e geomembrana PVC, e os taludes com argila e geocomposto. Após a impermeabilização é realizado um controle de qualidade verificando possíveis danos, imperceptíveis a olho nu (Figura 46).

Figura 46 – Controle de Qualidade das Geomembranas



Fonte: Alumar, 2014

4.4 Monitoramento das Barragens

O monitoramento de Lagos e ARBs da Alumar, dá-se através de um Plano Específico (PML- Plano de Monitoramento de Lagos) onde estão descritas todas as atividades necessárias, bem como as frequências e a forma como os dados devem ser reportados ao engenheiro responsável.

Neste estudo, lista-se as ações realizadas no monitoramento. Para cada ação tem-se as especificações técnicas e os procedimentos a serem realizados, bem como a periodicidade, sendo está realizadas semanalmente, com os dados sendo inseridos em planilhas de vistorias. As ações realizadas no monitoramento são:

- Vistoria nos taludes
- Vistoria em galerias;

- Instalação de placas de recalque;
- Medição de deslocamentos verticais em placas de recalque;
- Instalação de marcos superficiais;
- Medição de deslocamentos verticais e horizontais de marcos superficiais;
- Instalação de bench-mark;
- Instalação de pinos e placas em galerias;
- Medição de deslocamento de pinos e placas em galeria;
- Levantamento topográfico e batimétrico;
- Determinação do peso específico e teor de umidade do resíduo;
- Determinação das poro-pressões no resíduo;
- Determinação de pH, sólidos em suspensão, teor cáustico e teor alcalino;
- Medição de vazão de drenagem de fundo e camada de detecção;
- Medição de vazão em overflow;
- Instalação de piezômetros na drenagem de fundo;
- Medição de poropressão na drenagem de fundo;
- Vistorias de estruturas metálicas;
- Vistorias de estruturas de adução e descarte;
- Inspeção e medição de vazão de drenos horizontais e verticais;
- Ensaio de granulometria;
- Ensaio de palheta;
- Sondagem a percussão com medida de SPT;
- Medição de pressões em piezômetros casagrande;
- Vistoria em Geomembrana de Pead em área reabilitada;
- Vistoria em válvulas mangote (pinch valves);
- Vistoria aérea com aeronave não tripulada (DRONE);
- Vistoria especial após eventos de chuva.

O presente estudo estabelece, de forma sucinta, um recorte dos processos de monitoramento desenvolvidos pela Alumar, destacando-se a metodologia utilizada pela empresa nas ações presentes no PML.

✓ Vistorias nos Talude

A vistoria de taludes é realizada por equipe experiente em serviços de campo e com conhecimento de Geotecnia. São verificadas as seguintes ocorrências:

- Estufamentos e/ou abatimentos dos taludes;
- Surgências;
- Áreas molhadas;
- Sinais de erosão em qualquer dos seus estados de evolução nos taludes externos e crista dos diques;
- Falha de vegetação nos taludes externos;
- Indícios de presença de licor cáustico nos taludes externos (durante fase de operação das áreas de resíduos);
- Assoreamento da drenagem superficial;
- Quebras ou desalinhamentos da drenagem superficial;
- Quebras ou desalinhamentos dos tubos de queda;

A vistoria de taludes é efetuada ao longo do pé, das bermas e da crista dos mesmos em todos os diques das ARBs, de forma abrangente e sistemática. Inspeções mais detalhadas no próprio talude deverão ser realizadas sempre que a inspeção visual indique a presença de alguma ocorrência anormal.

✓ Vistoria em galerias

A vistoria em galerias deverá ser realizada por equipe experiente em serviços de campo e compreenderá a verificação da ocorrência de:

- Trincas ou fissuras nas paredes, piso e teto;
- Manchas de umidade nas paredes;
- Infiltrações ao longo da galeria;

- Presença de solo no piso;
- Presença de soda cáustica no piso;
- Aberturas de juntas;
- Exposição de armaduras nas galerias de concreto armado;
- Mau estado de conservação das galerias;
- Desalinhamento total do corpo da galeria;
- Estado de conservação das tubulações quanto a indícios de corrosão, desalinhamentos, incrustações, estados das soldas, entre outros;
- Corrosão ou deterioração de suportes de tubulações;
- Deficiências no sistema de iluminação;
- Deficiências no sistema de ventilação forçada.

A vistoria deverá ser efetuada ao longo de toda a galeria, de forma abrangente e sistemática. Inspeções mais detalhadas na própria e com técnico especializados, deverão ser realizadas sempre que a inspeção visual indicar a presença de alguma ocorrência anormal.

✓ Instalação de placas de recalque;

As placas são instaladas diretamente sobre a superfície do solo ou do resíduo. No caso de instalação sobre resíduos, as placas são instaladas preferencialmente um pouco antes do início do primeiro lançamento por *Upstream Stacking*. No caso de Reabilitação, são instaladas sobre a manta de cobertura do resíduo (com proteção de geotêxtil afim de não afetar a integridade da manta), antes da disposição das camadas de plantio da vegetação.

A superfície do solo ou resíduo deverá ser cuidadosamente acertada e nivelada por meio da base de concreto e a placa instalada de tal forma a garantir sua horizontalidade e um perfeito contato em toda a sua área.

Após o assentamento da placa, é instalado o tubo de proteção e o espaço entre a haste e o tubo preenchido com graxa. O conjunto formado pelo tampão de ferro / tubo de aço / placa e régua de policarbonato será então fixado ao topo da haste. A fixação por rosqueamento é feita de forma a garantir que a placa esteja na mesma posição em relação à haste. A posição

final da régua deverá considerar a localização da base a ser utilizada para posicionamento do aparelho de leitura.

Logo após a instalação, é realizada uma leitura para definição da cota e coordenadas de implantação da placa. As leituras de cota servem como leitura inicial (primitiva) para o monitoramento de recalques. A Especificação Técnica 004 apresenta a metodologia para medição de cotas das placas de recalque.

À medida em que o dique ou o aterro for sendo alteado, as hastes de 1” e os segmentos de tubo de proteção de 2” são também alteados, ambos com 0,50 ou 1,0 m de comprimento, de forma a acompanhar os recalques durante o alteamento.

✓ Medição de deslocamentos verticais em placas de recalque;

As leituras de cotas das placas de recalque deverão ser realizadas com equipamento Estação Total, com precisão de 1mm. Os equipamentos deverão ser posicionados sobre bases fixas distribuídas estrategicamente sobre a crista dos diques na área a ser monitorada.

Para referência de leitura de cota das placas deverão ser utilizados marcos fixos previamente instalados em locais próximos. Os marcos fixos deverão ainda ter sua cota verificada em relação a pontos considerados indeslocáveis (“bench – marks”) existentes na área.

Esta leitura deverá, então, ser comparada à leitura primitiva para verificar a variação existente entre um período e outro e assim encontrar o deslocamento vertical do período, caso tenha havido.

✓ Instalação de marcos superficiais;

Os marcos superficiais deverão ser instalados na crista dos diques, de preferência, imediatamente após a construção dos mesmos. Após a execução dos diques, deverá ser feita uma cava na crista com dimensões 30x 30x 60 cm. O mourão deverá então ser colocado na cava e o espaço entre eles preenchido com argamassa de cimento, areia e brita 0. Na extremidade superior do mourão deverá ser instalada a haste ou tubo de aço carbono de $\varnothing = 1$ ”, chumbado com argamassa a um comprimento mínimo de 25 cm. Preferencialmente, a haste deverá ser chumbada no mourão durante sua concretagem.

Após o tempo de cura do concreto, deverá ser rosqueado no tubo de $\varnothing = 1$ ” o conjunto já previamente soldado do tampão de ferro / tubo de aço carbono de $\varnothing = 1$ ” / placa de aço de

leitura. A fixação por rosqueamento deverá ser feita de forma a garantir que a placa de leitura esteja sempre na mesma posição em relação à haste. A posição final das placas deverá considerar a localização da base a ser utilizada para posicionamento do aparelho de leitura.

Logo após a instalação, deverá ser feito um levantamento topográfico para definição da cota e coordenadas de implantação dos marcos superficiais. A locação deverá ser referida ao sistema de coordenadas usual na região. As leituras de cotas e coordenadas de implantação servirão como leituras iniciais para o monitoramento de deslocamentos horizontais e verticais. A Especificação Técnica 006 apresenta a metodologia para medição de cotas e coordenadas dos marcos superficiais.

- ✓ Medição de deslocamentos verticais e horizontais de marcos superficiais;

As leituras de cotas e coordenadas dos marcos superficiais deverão ser realizadas com equipamento com estação total, com precisão de 1mm. Os equipamentos deverão ser posicionados sobre bases fixas e planas distribuídas estrategicamente sobre a crista dos diques na área a ser monitorada.

Como referência de leitura deverão ser utilizados marcos fixos previamente instalados em locais próximos. Os marcos fixos deverão ainda ter sua cota verificada em relação a pontos considerados indeslocáveis (“Bench – Marks”) existentes na área.

- ✓ Instalação de bench-mark;

Para instalação de "bench-mark" deverá ser executada uma sondagem com diâmetro do furo $\varnothing = 2''$, com lavagem direta e avanço por circulação de água. O furo de sondagem deve ser revestido com o tubo de aço carbono de $\varnothing = 2''$.

A sondagem deverá alcançar a camada de solo impenetrável ao trépano ou a profundidade exigida em projeto, sendo que o tubo de aço de $\varnothing = 2''$ deverá permanecer cerca de 0,50 m acima do fundo do furo. Neste trecho do furo sem revestimento deverá ser executada uma base com calda de cimento, onde deverá ser fixada a extremidade inferior da haste de aço carbono de $\varnothing = 1''$.

Na extremidade superior da haste de $\varnothing = 1''$, deverá ser rosqueado um parafuso de cabeça abaulada, a cerca de 0,50 m abaixo da superfície do terreno. Este conjunto deverá ser protegido por uma caixa de concreto (0,20 x 0,20 x 0,50 m) com tampa removível junto à superfície do terreno.

Logo após a instalação, deverá ser feito um levantamento topográfico para definição da cota e coordenadas de implantação do "bench-mark" (Figura 47). A locação e cota deverão ser referidas ao sistema de coordenadas gerais da fábrica. As leituras de cotas e coordenadas de implantação servirão como referência para o monitoramento de deslocamentos horizontais e verticais em placas de recalque e marcos superficiais.

Figura 47 - Benchmark instalado em terreno indeslocável, com base de concreto



Fonte: Alumar, 2019

✓ Instalação de pinos e placas em galerias;

Os pinos e placas deverão ser instalados nas galerias, formando seções de monitoramento espaçadas de 10 m entre si. Cada seção será definida por quatro pinos instalados no teto, no piso e nas paredes direita e esquerda. As seções serão identificadas por letras e os pinos e placas deverão ser identificados pela letra da seção correspondente e o número do pino (1 a 4).

O tubo ou haste de aço carbono de $\text{Ø} = 1''$, deverá ser chumbado com argamassa nas paredes da galeria a um comprimento mínimo de 15 cm.

Após o tempo de cura do concreto, deverá ser rosqueado no tubo de $\text{Ø} = 1''$ o conjunto já previamente soldado do tampão de ferro / tubo de aço carbono de $\text{Ø} = 1''$ / placa de aço de leitura. A fixação por rosqueamento deverá ser feita de forma a garantir que a placa de leitura

esteja sempre na mesma posição em relação à haste. A posição final das placas deverá considerar a localização da base a ser utilizada para posicionamento do aparelho de leitura, que deverá ser instalada na entrada das galerias.

Logo após a instalação, deverá ser feito um levantamento topográfico para definição da cota e das coordenadas de implantação dos pinos e placas. A locação deverá ser referida ao sistema de coordenadas gerais da fábrica.

✓ **Medição de deslocamento de pinos e placas em galeria;**

As leituras de cotas e de coordenadas das placas da galeria deverão ser realizadas com equipamento com estação total, com precisão de $\pm 0,1$ mm. As medidas deverão ser realizadas nas seções das galerias definidas por quatro pinos instalados nas paredes esquerda e direita, teto e piso. As seções deverão estar distanciadas de 10 m entre si. Os equipamentos de leitura deverão ser posicionados sobre bases fixas instaladas nas entradas das galerias (Figura 48).

Para referência de leitura das placas deverão ser utilizados marcos fixos previamente instalados em locais próximos indicados em projeto. Os marcos fixos deverão ainda ter sua cota e coordenadas verificadas em relação a pontos considerados indeslocáveis (“bench – marks”) existentes na área.

Figura 48 – Pinos e Placas comumente utilizados para levantamentos topográficos



Fonte: Alumar, 2019

✓ **Levantamento topográfico e batimétrico;**

a) Levantamento topográfico

Deverá ser efetuado por empresa especializada sob a supervisão de um técnico competente. Apresentam-se a seguir os procedimentos a serem seguidos:

1) Levantamentos Planialtimétricos de seções transversais deverão ser realizado a cada 20,00 m ao longo das linhas base dos diques;

2) Coordenadas de Referência deverão ser referidas ao sistema de coordenadas locais da Alumar, e as elevações referidas ao sistema DHN. A FISCALIZAÇÃO indicará no campo os marcos de referência que deverão ser utilizados para transporte de coordenadas e elevações;

3) O equipamento a ser utilizado deverá ser do tipo Estação Total, com leitura direta de ângulos com precisão igual ou inferior a 5 segundos, devendo estar equipado com prismas que permitam a determinação de distâncias até 700 metros ou superior.

Em casos excepcionais, onde seja comprovado que a utilização de Estação Total torne o serviço mais lento ou impraticável, será permitida a execução de nivelamentos geométricos e/ou estadimétricos, utilizando-se para tal equipamentos convencionais tipo níveis óticos, teodolitos convencionais, miras e trenas de aço ou fibra. Por ocasião dos nivelamentos geométricos, será necessário o contra-nivelamento para efeito de fechamento.

A utilização de equipamentos do tipo Global Position System (GPC) é permitida para levantamentos mais simples, tais como marcação de poligonais de pequenas dimensões e marcação de pontos de referência, desde que possuam precisão milimétrica. Sua utilização visa facilitar os trabalhos de campo de menor monta, aumentando a produtividade nesses casos.

A utilização de equipamentos alternativos visa contornar os imprevistos que possam vir a ocorrer durante a execução dos trabalhos de campo.

b) Batimetria

A Batimetria deverá ser realizada com Smartboat Tech GEO, barco de controle remoto e autônomo, portátil, capaz de realizar percursos pré-definidos pelo operador (Figura49).

- O Software de programação e o controle remoto devem ser capazes de:
- Se conectar com o computador do barco via link de rádio, e/ou via USB,
- Alterar os parâmetros de navegação, do tipo velocidade e potência, durante a operação.
- Ser compatível com Windows 10.
- Ser compatível com imagens Google Earth.
- Ser capaz de programar a navegação com linhas compostas de até 20.000 pontos ou mais.
- Monitorar a navegação do barco em tempo real, utilizando imagem de satélite google.

- Monitorar o nível das baterias, capacidade restante da bateria, fornecendo alarme visual vermelho indicando bateria baixa e quanto de bateria extra;
- Alarme sonoro sinalizador de problemas, tais como falta de calado, encalhamento e outros;
- Fornecer status do GPS.
- Navegação e reiniciar do último ponto que foi interrompida e também permite que continue de um ponto que seja determinado pelo operador.
- Mudar a rota de navegação durante a navegação programada
- Voltar ao ponto de origem ao fim da navegação e/ou possuir o comando para voltar ao ponto de origem a qualquer momento;
- Ajustar todos os parâmetros de programação e configuração do computador do barco;
- Computador notebook Celeron com HD SSD de 64Mb.

Figura 49 – Barco de Controle Autônomo



Fonte: Alumar, 2019

✓ **Determinação do peso específico e teor de umidade do resíduo;**

Determinar o peso específico

A amostragem de resíduo depositado deve ser realizada a partir de furos de sondagem revestidos. Em materiais muito moles poderá ser introduzido o amostrador sem pré-furo e em materiais já consolidados o revestimento poderá ser dispensado.

O amostrador de alta densidade consiste em um amostrador tipo Shelby com pistão estacionário. O equipamento deverá ser introduzido no resíduo até a cota de amostragem com o pistão posicionado na boca do amostrador. Em seguida, a haste do pistão deverá ser mantida estacionária enquanto se procede a descida do amostrador, até que o pistão atinja o fundo do mesmo. O equipamento deverá, então, ser alçado à superfície. Deve-se marcar nas hastes de descida do amostrador as cotas relativas de amostragem, que deverão ser as mesmas utilizadas nas medições de poropressão estabilizada.

Imediatamente após a retirada do equipamento, deve-se limpar cuidadosamente a parte externa do amostrador. Este deverá ser colocado de boca para cima e o pistão acionado lentamente, no sentido ascendente. A amostra que sai do topo do amostrador deverá ser protegida com saco plástico e ter sua altura medida com auxílio de régua milimetrada (medida interna). Deve-se medir também o deslocamento do pistão (medida externa). resultante deverá ser medida e, em seguida, dividida em duas sub-amostras aproximadamente iguais, colocadas em cápsulas ou sacos plásticos cuidadosamente selados.

Caso se constate que a densidade da lama seja baixa, com pouca recuperação de material, devese substituir o pistão estacionário pelo amostrador de baixa densidade. Este tipo de amostrador consiste em um caneco que deverá ser introduzido tampado até a cota de amostragem. Nesta cota, a tampa deverá ser levantada, permitindo que a lama encha o caneco. Após o enchimento do caneco com o resíduo, a tampa deverá ser reposicionada e o conjunto alçado à superfície.

Imediatamente após a retirada do equipamento, deve-se limpar cuidadosamente a parte externa do amostrador. A amostra deverá ser transferida para um saco plástico ou cápsula por meio de uma concha.

As amostras coletadas por amostrador tipo Shelby ou por amostrador de baixa densidade deverão ser acondicionadas e estocadas sob alguns cuidados descritos a seguir:

- Cápsulas de alumínio não são adequadas, devendo ser substituídas por plástico, teflon, vidro ou outro material resistente à soda cáustica;
- As amostras acondicionadas em sacos plásticos ou cápsulas deverão ser envolvidas em dois sacos plásticos adicionais;

- As amostras deverão ser identificadas corretamente por meio de etiquetas envoltas em sacos plásticos, a fim de não serem danificadas nem tornarem-se ilegíveis até o momento dos ensaios;

- As amostras deverão ser apropriadamente acondicionadas e estocadas, não ficando expostas às intempéries (sol, em particular) nem a grandes variações de temperaturas, devendo ser transportadas para o laboratório no menor prazo de tempo possível, de modo a não haver alterações nas suas características;

- As amostras deverão ser pesadas ao final de cada dia de amostragem no laboratório da Alumar ou em laboratório de campo, determinando-se seu peso total, levando-se em conta o peso das cápsulas ou sacos plásticos e etiquetas de cada uma;

✓ **Determinação das poro-pressões no resíduo;**

A sonda poderá ser cravada manual ou mecanicamente em intervalos de 1 m dentro do resíduo, não sendo necessário o controle da velocidade de cravação. Caso necessário, o equipamento de cravação deveria ter capacidade de 200KN. Em cada metro, a cravação deverá ser paralisada e as leituras de poro-pressão realizadas.

A primeira leitura, correspondente à poro-pressão de penetração, deverá ser realizada imediatamente após a introdução da sonda até a profundidade de ensaio. Durante a dissipação, as leituras deverão continuar até atingir a poro-pressão estabilizada, que correspondente ao mesmo valor obtido após 3 leituras consecutivas, em intervalos de 15 min no mínimo. Este valor será admitido como o existente no resíduo antes da cravação da sonda.

Durante a dissipação, as leituras de poro-pressão deverão ser efetuadas a intervalos que permitam a definição da curva para determinação de coeficientes de adensamento.

✓ **Determinação de pH, sólidos em suspensão, teor cáustico e teor alcalino;**

1) Coleta de Amostras

A coleta de amostras de efluentes deverá ser realizada por equipe sob a supervisão de um técnico especializado, conforme a norma NBR 10007- Amostragem de Resíduos. Deverá ser utilizado uma adaptação do amostrador de lagoas, consistindo em um balde (capacidade de 1 L) suportado por uma braçadeira presa à corda. Antes de cada coleta de amostra deverá ser verificada a limpeza do amostrador, que deverá estar livre de contaminação por licor cáustico.

As amostras de efluentes da drenagem de fundo e da camada de detecção de vazamentos deverão ser coletadas na saída das respectivas tubulações por meio de registro colocado logo antes de suas entradas nos poços de bombeamento. As amostras de efluentes das ARBs 2 e 3 deverão ser coletadas na calha localizada ao Norte e a Leste, respectivamente.

As amostras de efluentes do overflow do lago de runoff da ARB 1 deverão ser coletadas no próprio lago próximo à tubulação de entrada do vertedor.

Deverão ser coletadas amostras com um volume aproximado de 1 litro. Após a coleta, as amostras deverão ser acondicionadas em frascos de polietileno para análise química posterior.

2) Determinações de pH, Sólidos em Suspensão, Teor Cáustico e Teor Alcalino

As determinações de pH deverão ser realizadas no campo, imediatamente após a coleta de amostra.

As determinações de sólidos em suspensão, teor cáustico e teor alcalino deverão ser realizadas em triplicata segundo as normas/procedimentos adotadas pela ALUMAR e pela Aluminum Company of America citadas a seguir:

- Norma/Procedimento Alumar - Código 384 1920 AG 06, Norma/Revisão 021/00, Título: Determinação de pH em águas;
- Norma/Procedimento Alumar - Código 384 1920 AG 06, Norma/Revisão 023/00, Título: Sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos em águas;
- Aluminum Company of America, Analysis of Sodium Aluminate Liquor, - 151.8 (6-66) Determination of Hydroxide, Carbonate, and Alumina (Gluconate-Fluoride Procedure);

Após as três determinações, deverá ser calculada a média dos valores obtidos, excluindo-se algum valor que se apresentar muito diferente dos demais.

✓ **Medição de vazão de drenagem de fundo e camada de detecção;**

A medição de vazão das soluções efluentes da drenagem de fundo e da camada de detecção de vazamentos deverão ser executadas nos poços de bombeamento, através do monitoramento do tempo de desligamento da bomba. O acionamento e o desligamento automático das bombas correspondem a uma altura máxima e mínima de líquido dentro dos poços, respectivamente.

Para medição de vazão, deve-se utilizar instrumento do tipo Medidor de Vazão (Flowmeters), com medição permanente do fluxo. Na falta deste, como no sistema de drenagem de fundo da ARB 1, por exemplo, pode-se determinar o volume de líquido bombeado (pela altura e seção transversal do poço) e o tempo de desligamento da bomba. Este procedimento deverá ser executado por técnico dispondo de cronômetro ou relógio com acurácia de 5 segundos.

Caso, ainda assim, não seja possível a presença de técnico habilitado para realizar a medição, a alternativa que poderá ser adotada para determinação vazão é através do tempo medido de funcionamento obtido do horímetro da bomba e pela vazão nominal da mesma. Independente do procedimento adotado para medição de vazão, deverão ser realizadas três medidas consecutivas para determinação do valor médio. A medição de vazão de sistemas de drenagem de fundo e /ou de camada de detecção e indispensável para o monitoramento do desempenho destes sistemas no interior dos Lagos e ARBs, não podendo, de maneira alguma, deixar de ser realizada.

Em um mesmo poço de bombeamento para onde convergem diversas tubulações, deverá ser seguido o seguinte procedimento:

- a) Utilizando os registros existentes nas tubulações junto à chegada no poço, fechar todas as tubulações com exceção de uma;
- b) Os fechamentos deverão ser efetuados de forma contínua e gradual, evitando-se fechamentos instantâneos ou muito rápidos que possam gerar sobre-pressões nas tubulações;
- c) O número de voltas no registro para seu fechamento deverá ser anotado para posterior reabertura na mesma posição;
- d) Com uma tubulação aberta, efetuar as medições de tempo (vazão), entre desligamento e religamento da bomba, para reenchimento do poço. Pelo menos 3 medições de reenchimento devem ser efetuadas;
- e) Abrir sucessivamente cada registro de tubulação que se encontrava fechado, repetindo-se o item d). A abertura deverá ser feita até atingir a sua posição inicial, sendo esta operação realizada durante o período de operação da bomba;
- f) Calcular as vazões acumuladas e, por diferenças sucessivas, as vazões de cada tubulação;

Todas as operações de fechamento, abertura e registro de vazões deverão ser efetuadas em um único dia útil.

No caso de haver instrumentação, basta efetuar a leitura em períodos pré-determinados e regulares para que se mantenham dados de acompanhamento e *monitoramento*.

✓ **Medição de vazão em overflow;**

A medição de vazão de água efluente em overflow deverá ser realizada em Calhas Parshall, em canais e vertedores.

Para leituras em canais, em um trecho do canal com largura conhecida deverá ser instalada uma régua graduada para determinação da altura do nível d'água.

Para medição de vazão, deve-se medir a altura do nível d'água (h) no canal e determinar o valor através da fórmula de Francis para determinação de vazão em canais de seção retangular:

$$Q = 1,84 \times b \times h^{3/2}$$

Q = vazão d'água no canal do overflow, em m³/s;

b = largura do canal na seção monitorada, em m;

h = altura do nível d'água no canal, em m;

Caso seja utilizada calha Parshall, a vazão será calculada pela expressão:

$$Q = K \times h^u$$

Q = vazão d'água no canal do overflow, em m³/s;

h = altura do nível d'água no canal, em m;

K e u = constantes que dependem da geometria da calha;

Independentemente do método utilizado, em cada medição de vazão, este procedimento deverá ser realizado três vezes para determinação do valor médio.

✓ **Instalação de piezômetros na drenagem de fundo**

Os sensores deverão ser instalados na camada drenante dentro de uma caixa (30x30x20cm) ou balde (Ø 30cm) preenchido com água ou licor caustico. Até o início de funcionamento do lago, as caixas ou baldes deverão ser mantidos com água ou licor para evitar a perda da saturação da pedra porosa.

O cabo de leitura deverá ser instalado bem folgado sendo estendido pela camada drenante até alcançar os taludes do dique de contenção. Por sobre os taludes e até a crista dos

diques, os cabos deverão ser protegidos por um tubo de Polietileno ou PVC Ø 2". Os cabos não podem sofrer emendas durante a instalação.

Na crista dos diques, os cabos deverão ser posicionados em caixa de leitura com tampa (60x60x50cm) assentada sobre uma base de concreto magro de 15 cm de espessura. Por ocasião das medições de poropressão, o equipamento de leitura deverá ser conectado a esta extremidade do cabo dentro da caixa de leitura.

Logo após a instalação dos piezômetros deverão ser efetuadas leituras iniciais para verificação de seu comportamento. Deve-se prosseguir a calibração. As equipes de operação envolvidas deverão ser devidamente treinadas quanto ao manuseio e realização de leituras (Figura 50).

Foto 50 - Piezômetro elétrico de corda vibrante



Fonte: Alumar, 2019

- ✓ Medição de poropressão na drenagem de fundo;

As leituras dos piezômetros deverão ser executadas por técnico especializada, o qual passara os dados de leitura a equipe de engenharia geotécnica da planta.

Para as medições de poropressão em piezômetro de corda vibrante, a extremidade livre do cabo deverá ser conectada ao equipamento de leitura dentro da caixa localizada na crista do dique. Em seguida, deverão ser efetuados os registros das poro-pressões e temperatura.

Para as medições de poropressão em piezômetros pneumáticos deverá ser seguida a metodologia do IPT apresentada no anexo.

✓ **Vistorias de estruturas metálicas.**

A vistoria em estruturas metálicas deverá ser realizada por equipe com conhecimentos de estruturas metálicas, com capacidade de identificar a ocorrência de:

- Corrosão no piso, gradis, escadas, apoios; parafusos e porcas
- Trincas/ fissuras nos pisos;
- Desalinhamentos de peças estruturais como vigas e pilares

A vistoria deverá ser efetuada ao longo de toda a estrutura de forma abrangente e sistemática. Inspeções mais detalhadas na própria estrutura deverão ser realizadas sempre que a inspeção visual indicar a presença de alguma ocorrência anormal. Em casos considerados mais graves, realizar inspeção detalhada com engenheiro especialista.

✓ **Vistorias de estruturas de adução e descarte;**

A vistoria em estruturas de adução e descarte de águas deverá ser realizada por equipe com experiência para verificar a ocorrência de:

- Assoreamento da drenagem superficial
- Recalque da drenagem superficial e bases de tubulações;
- Fissuras e ou trincas
- Exposição de armaduras nas galerias ou canais de concreto armado
- Mau estado de conservação de galerias e canais de concreto
- Corrosão ou deterioração de suportes de tubulações;
- Estado de conservação das tubulações quanto à ocorrência de corrosão, desalinhamentos, incrustações, estados de solda, entre outros;

A vistoria deverá ser efetuada ao longo de a estrutura de adução ou descarte das águas forma abrangente e sistemática. Inspeções mais detalhadas na própria estrutura deverão ser realizadas sempre que a inspeção visual indicar a presença de alguma ocorrência anormal. Em casos considerados mais graves, realizar inspeção detalhada com engenheiro especialista.

✓ **Inspeção e medição de vazão de drenos horizontais e verticais;**

- a) Inspeção

A inspeção em drenos horizontais e verticais deverá ser realizada por equipe capacitada e compreenderá a verificação da ocorrência de:

- Obstruções da boca dos tubos por vegetação e ou detritos
- Incrustações de ferro
- Integridade dos tubos

A vistoria deverá ser efetuada em todos os drenos de forma abrangente e sistemática. Inspeções mais detalhadas deverão ser realizadas sempre que a inspeção visual indicar a presença de alguma ocorrência anormal.

b) Medição de vazão

A medição de vazão deverá ser realizada com equipe experiente de campo que medirá o tempo necessário para encher um recipiente com volume conhecido ou graduado, de cada dreno horizontal e vertical.

A medição deverá ser realizada em todos os drenos. Medições mais precisas deverão ser realizadas sempre que a algum dreno apresentar falta ou excesso de fluxo.

✓ **Ensaio de granulometria;**

O ensaio de granulometria deverá ser realizado de acordo com os procedimentos preconizados na norma ABNT 7181 da ABNT.

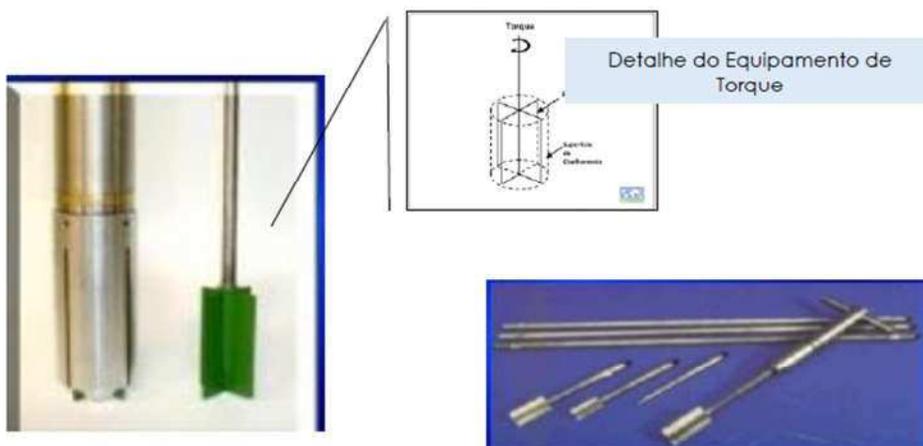
A ensaio de granulometria deverá ser realizado em amostras de resíduos coletadas conforme ET-012 deste documento. Todos os equipamentos e instrumentos deverão ser apropriados para trabalhos em ambientes cáusticos.

✓ **Ensaio de palheta;**

O ensaio de palheta deverá ser realizado de acordo com os procedimentos preconizados na norma NBR 10905 da ABNT. A ensaio de Palheta deverá ser realizado no

resíduo. Todos os equipamentos e instrumentos deverão ser apropriados para trabalhos em ambientes cáusticos (Figura 51).

Figura 51 - Sondas para Vane Test



Fonte: Alumar, 2019

✓ **Sondagem a percussão com medida de SPT;**

A Sondagem a Percussão com Medida de SPT deverá ser realizado de acordo com os procedimentos preconizados pelo Boletim da ABGE no 003 - 4ª edição.

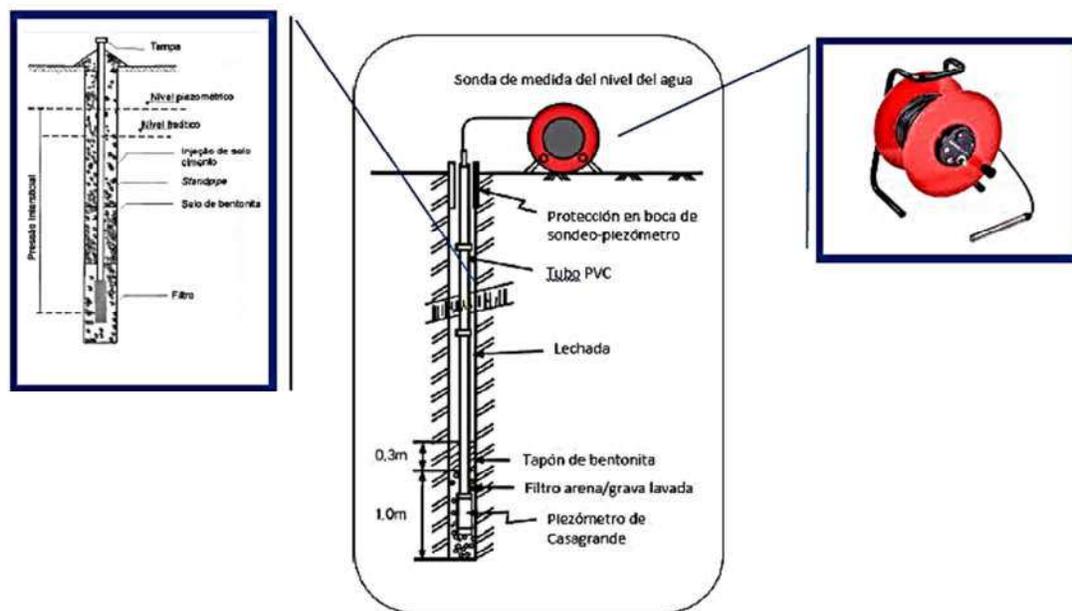
A Sondagem a Percussão com Medida de SPT deverá ser realizado no resíduo. Todos os equipamentos e instrumentos deverão ser apropriados para trabalhos em ambientes cáusticos.

✓ **Medição de pressões em piezômetros casagrande;**

O piezômetro tipo Casagrande consta de um tubo vertical ligado a uma ponta porosa por onde a água pode livremente entrar ou sair. Mede-se a poro pressão através da coluna d'água no tubo (Figura 52).

A leitura é realizada com instrumento indicador de nível d'água que consiste em um torpedo contendo uma chave elétrica, um fio graduado e um carretel. Quando o torpedo atinge a água do tubo, fecha-se um circuito elétrico que toca um apito no carretel. Com isso determina-se a profundidade do nível d'água no tubo.

Figura 52 - Perfil de Piezômetro Casagrande e equipamento de Leitura de NA, mais comumente conhecido como “Piu”, devido ao som que emite quando encontra a água no interior do Piezômetros.

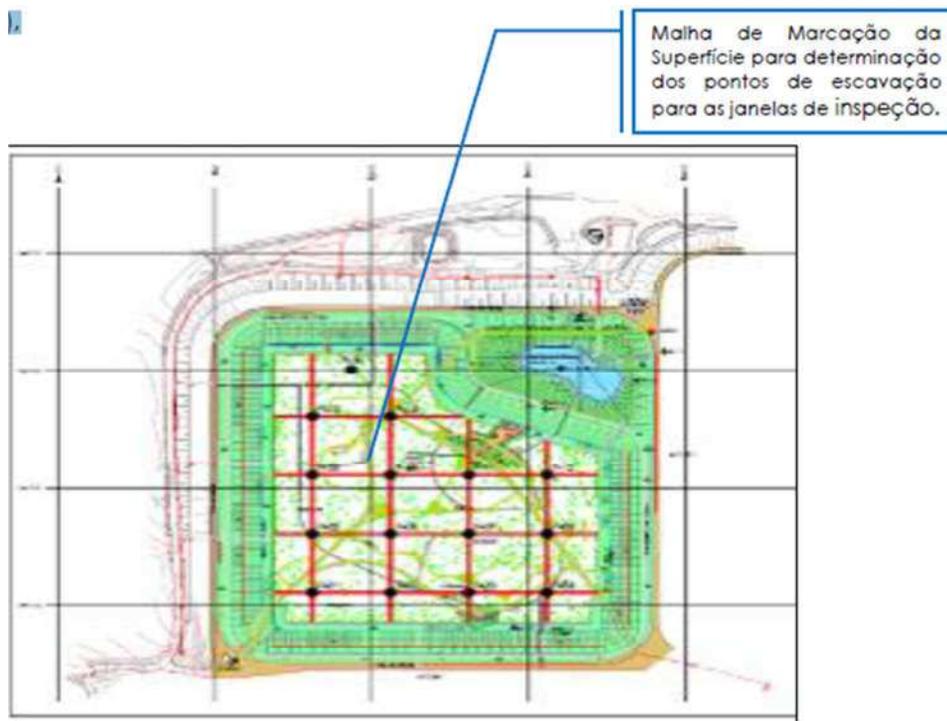


Fonte: Alumar, 2019

✓ **Vistoria em Geomembrana de Pead em área reabilitada;**

A inspeção deve ser realizada por meio de abertura de “janelas de inspeção” (Figura 53) com dimensões de 1,0m x 1,0m x 1,5m de profundidade (ou até alcançar a geomembrana).

Figura 53 – Janela de inspeção



Fonte: Alumar, 2019

✓ **Vistoria em válvulas mangote (pinch valves);**

A inspeção deve ser realizada visualmente e visa buscar imperfeições no mangote e no corpo da válvula. Dentre os principais problemas que podem ser encontrados, pode-se citar fissuras e deformações nos mangotes de borracha, deformações no corpo de aço da válvula, indícios de vazamentos, inspecionar os colarinhos (transição entre a conexão de aço carbono e o tubo de PEAD) (Figura 54).

Figura 54 - Válvula Mangote instalada na ARB 5



Fonte: Alumar, 2019

✓ **Vistoria aérea com aeronave não tripulada (DRONE);**

A inspeção deve ser feita de forma a realizar o sobrevoo geral nas áreas, verificar todos os itens específicos solicitados pelo departamento técnico.

A aeronave deverá conter características que permitam às autoridades identificá-las durante uma fiscalização. Essas características podem ser marcas produzidas pelo próprio dono do Drone, o número de série do equipamento ou qualquer outro sinal que atue como diferenciador daquela aeronave em relação a equipamentos semelhantes.

Além disso, a ANAC recomenda que não sejam utilizadas fotografias padrão de aeronaves de forma a evitar que o Drone seja facilmente clonado (Figura 55).

Figura 55 – Aeronave devidamente identificada



Fonte: Alumar, 2019

✓ **Vistoria especial após eventos de chuva.**

A inspeção deve ser feita de forma a realizar o sobrevoo geral nas áreas, verificar todos os itens específicos solicitados pelo departamento técnico.

A aeronave deverá conter características que permitam às autoridades identificá-las durante uma fiscalização. Essas características podem ser marcas produzidas pelo próprio dono do *Drone*, o número de série do equipamento ou qualquer outro sinal que atue como diferenciador daquela aeronave em relação a equipamentos semelhantes.

Além disso, a ANAC recomenda que não sejam utilizadas fotografias padrão de aeronaves de forma a evitar que o Drone seja facilmente clonado.

5 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RISCO

Após a obtenção dos dados por barragem aplicou-se o Modelo de Potencial de Risco Modificado segundo Duarte (2008), sendo os resultados discutidos a seguir.

5.1 Periculosidade

Conforme análise fundamentada na metodologia de Duarte (2008) acerca da periculosidade que evidencia por meio de aspectos técnicos de cada ARB apresenta-se no Quadro 1 a classificação da periculosidade associada a cada barramento.

Foi levado em consideração nessa avaliação as relações dos pesos inerentes a cada parâmetro, sendo estes: dimensões dos barramentos, volume, tipologia e assim como sua fundação.

Quadro 13 – Periculosidade das Barragens – ARB’S da Alumar

ARB	Dimensão		Volume Total		Tipo de Barragem		Tipo de Fundação		Somados pesos	Periculosidade
	Altura	Peso	Volume (hm3)	Peso	Tipo	Peso	Tipo	Peso		
1	28	6	2,4	5	Terra /Rejeito	10	solo arenoso	10	31	Elevada
2	31,35	6	1,138	5	Terra /Rejeito	10	solo arenoso	10	31	Elevada
3	26,5	6	4	5	Terra /Rejeito	10	solo arenoso	10	31	Elevada
4	26,5	6	5,4	7	Terra /Rejeito	10	solo arenoso	10	33	Elevada
5	22	6	10,6	10	Terra /Rejeito	10	solo arenoso	10	36	Elevada
6	23,5	6	5,06	7	Terra /Rejeito	10	solo arenoso	10	33	Elevada
7	22,5	6	3,59	5	Terra /Rejeito	10	solo arenoso	10	31	Elevada

Fonte: O autor. Adaptado de Duarte (2008)

Com base na somatória dos pesos e enquadramento da periculosidade ficou evidenciado como “grau elevado” em todas as ARB’s. Esse resultado expressa de forma significativa que a periculosidade elevada se deve principalmente ao tipo de material utilizado na construção, que se constitui como solo arenoso, predominantemente. Neste sentido, importante destacar que o solo utilizado para a construção dos aterros, bem como o da fundação, são da região, e caracterizam-se como areno-siltoso, que costuma apresentar teor de

areia superior a 70% e, possuindo argila e demais componentes em menor porcentagem, e com isso, este material apresenta resistência em dadas camadas a compactação.

É notório a partir dos resultados de NSPT apresentados no presente trabalho, extraído de um perfil geotécnico por meio sondagens na área, que há um crescente aumento da compacidade a partir de 5m de profundidade, ou seja, o solo apresenta-se compacto a muito compacto entre 15 e 20 m, e neste caso, caracteriza-se em boas condições de estabilização para a fundação. No entanto, segundo metodologia para barragens de concreto, com fundação em rocha, atribui-se um peso menor, em comparação às barragens de terra com fundação em solo arenoso. Entende-se, que o material arenoso é mais susceptível a percolação e conseqüentemente a erosão, do que o concreto. Portanto, para barragens construídas em terra atribui-se um peso maior e, conseqüentemente, maior grau de periculosidade.

5.2 Vulnerabilidade

Esta etapa se buscou verificar o estado e estágio atual de cada ARB de forma individual acerca de projeto, operacionalidade, funcionalidade e instrumentação dos lagos da Alumar como se apresenta no Quadro 14.

Quadro 14 – Vulnerabilidade das Barragens – ARB’S da Alumar

ARB	Tempo de operação		Projeto (As Built)		Alteamento		Percolação		Deformação, Afundamento		Deterioração		Instrumentação		Vulnerabilidade	
	Tempo	Peso	Projeto	Peso	Alteamento	Peso	Percolação	Peso	Deformação	Peso	Deterioração	Peso	Inst.	Peso	Calculo	Situação
1	5 a 10 anos	2	Existe	1	Inexistente	0	Controlada	1	Inexistente	0	Inexistente	0	Possui	0	4	Muito baixa
2	5 a 10 anos	2	Existe	1	Inexistente	0	Controlada	1	Inexistente	0	Inexistente	0	Possui	0	4	Muito baixa
3	5 a 10 anos	2	Existe	1	Inexistente	0	Controlada	1	Inexistente	0	Inexistente	0	Possui	0	4	Muito baixa
4	5 a 10 anos	2	Existe	1	Inexistente	0	Controlada	1	Inexistente	0	Inexistente	0	Possui	0	4	Muito baixa
5	5 a 10 anos	2	Existe	1	Inexistente	0	Controlada	1	Inexistente	0	Inexistente	0	Possui	0	4	Muito baixa
6	< 5 anos	3	Existe	1	Inexistente	0	Controlada	1	Inexistente	0	Inexistente	0	Possui	0	5	Baixa a moderada
7	5 a 10 anos	2	Existe	1	Inexistente	0	Controlada	1	Inexistente	0	Inexistente	0	Possui	0	4	Muito baixa

Fonte: O autor. Adptado de Duarte (2008)

Estes resultados expressam a capacidade que as estruturas vigentes possuem de suportar os efeitos patológicos e/ou ambiente hostil ou fenômenos naturais. A janela de vulnerabilidade compreende o período ou a situação no qual as medidas defensivas são reduzidas, ausentes ou comprometidas.

Conforme os resultados, apresentados as ARB's se apresentaram predominantemente com vulnerabilidade considerada muito baixa, com exceção da ARB 6 que se apresentou sob índice baixo a moderada. Sua operação se deu em tempo curto maior que 5 anos e que se encontra em processo de finalização de suas operações.

O que ficou evidenciado com base nos resultados obtido, é a capacidade da segurança dessas áreas se apresentando em condições excelentes em sua estrutura e controle de fenômenos oriundos dessa tipologia de construção. O tipo de solo pode contribuir para a ruptura hidráulica por introdução de forças de percolação que alteram a distribuição das forças de massa, assim como as tensões efetivas no solo comprometendo a estabilidade geotécnica dos taludes a montante a jusante, por exemplo. Isso implica diretamente na deterioração dos mesmos, o que não se constata nos resultados obtidos.

Isso se explica devido ao constante monitoramento, revisões projetuais dos lagos, independentemente da situação de funcionamento atual. Além dos altos investimentos que Alumar aplica em desenvolvimento e implementação de novas tecnologias para garantir a segurança de seus lagos.

5.3 Importância Estratégica

Esta etapa consistiu em avaliar os parâmetros necessários em relação a sua magnitude, suscetibilidade associada em caso de uma eventual ruptura das ARB's, segundo a metodologia de Duarte (2008), em termos populacionais e ambientais, sobre aspectos econômicos, conforme disposto no Quadro 15 e seus respectivos pesos.

Quadro 15 – Importância estratégica - ARB's da Alumar

ARB	Volume atual		População a jusante		Interesse economico		Importância estratégica
	Volume atual	Peso	População	Peso	Interesse	Peso	
1	28	2	Pequeno	1	Médio	1,2	1,4
2	31,35	2	Pequeno	1	Médio	1,2	1,4
3	26,5	2	Pequeno	1	Médio	1,2	1,4
4	26,5	2	Pequeno	1	Médio	1,2	1,4
5	22	2	Pequeno	1	Médio	1,2	1,4
6	23,5	2	Pequeno	1	Médio	1,2	1,4
7	22,5	2	Pequeno	1	Médio	1,2	1,4

De acordo com os resultados obtidos, a importância estratégica é um parâmetro numérico, resultante da média aritmética extraída do volume atual, população a jusante (posterior ao talude) e o custo envolvido. A partir desse valor numérico é possível determinar o modelo de potencial de risco apresentado por Duarte (2008) modificado de Menescal (2001) para avaliar e classificar o risco de barragens de rejeito industrial.

5.4 Classificação das barragens de acordo com o modelo de potencial de risco modificado

O potencial de risco é um modelo que se apresenta de forma qualitativa, que define o potencial de risco que as Áreas de Resíduos de Bauxita – ARB da Alumar tem oferecido ao ambiente no qual estão inseridas, e assim poder antecipar medidas mitigadoras e propor ações e/ou intervenções com ênfase na prevenção de falhas ou futuras falhas com medidas preventivas, corretivas e preditivas.

Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 16 extraídos individualmente de cada ARB, utilizando parâmetros anteriores como a periculosidade, vulnerabilidade e sua importância estratégica para definir o potencial de risco modificado apresentado por Duarte (2008).

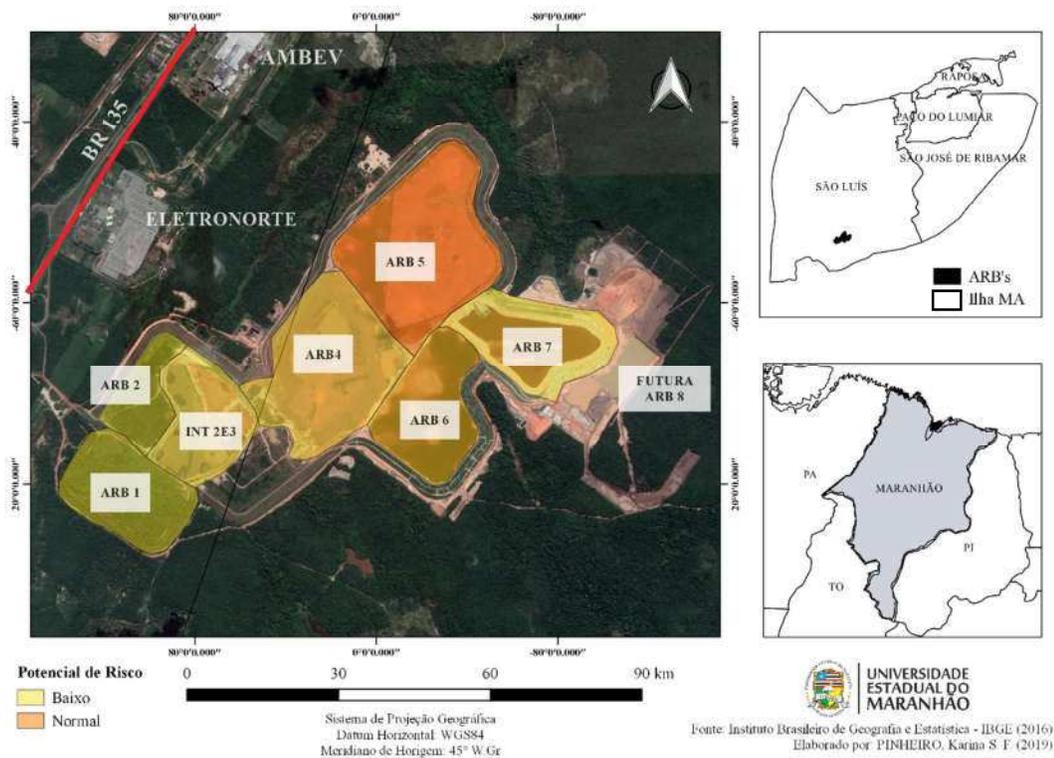
Quadro 16 - Potencial de Riscos das Barragens – ARB'S da Alumar

ARB	Periculosidade	Vulnerabilidade	Importância Estratégica	Potencial de Risco		
				Soma	Enquadramento	Classe
1	31	4	1,4	24,5	Baixo	D
2	31	4	1,4	24,5	Baixo	D
3	31	4	1,4	24,5	Baixo	D
4	33	4	1,4	25,9	Baixo	D
5	36	4	1,4	28	Normal	C
6	33	5	1,4	26,6	Baixo	D
7	31	4	1,4	24,5	Baixo	D

Fonte: O autor. Adptado de Duarte (2008)

O mapa da Figura 45 apresenta espacialmente os resultados do potencial de risco, conforme Quadro 16 acima.

Figura 56 – Situação comparativa das ARB's da Alumar



Fonte: Pinheiro, 2019

De acordo com os dados apresentados, as ABR's se apresentam predominantemente em estágio de baixo potencial de risco com exceção da ARB 5, que se enquadra em potencial considerado normal, muito devido a seu grau de periculosidade ser maior que as demais. Com base nesses resultados, foi possível definir a frequência de inspeção acerca de cada barragem segundo apresentado nos Quadro 17 e 18.

Quadro 17 - Inspeções para ARB's da Alumar - 1,2,3,4,6 e 7

Tipo de Inspeção	Classificação da Barragem				
	A	B	C	D	E
Rotina		Mensal	Trimestral	Semestral	Anual
Periódica		Anual (relatório completo)	Anual (relatório simplificado); relatório completo a cada dois anos	Relatório simplificado a cada dois anos	Relatório simplificado a cada quatro anos
Formal		A cada cinco anos	A cada dez anos	A cada quinze anos	A cada quinze anos
Especial	Definir intervenção e reclassificação	Em oportunidades tais como cheias excepcionais, rebaixamento rápido do reservatório, sismos, etc.			

Fonte: Duarte, 2008

Quadro 18 - Inspeções para ARB 5

Tipo de Inspeção	Classificação da Barragem				
	A	B	C	D	E
Rotina		Mensal	Trimestral	Semestral	Anual
Periódica		Anual (relatório completo)	Anual (relatório simplificado); relatório completo a cada dois anos	Relatório simplificado a cada dois anos	Relatório simplificado a cada quatro anos
Formal		A cada cinco anos	A cada dez anos	A cada quinze anos	A cada quinze anos
Especial	Definir intervenção e reclassificação	Em oportunidades tais como cheias excepcionais, rebaixamento rápido do reservatório, sismos, etc.			

Fonte: Duarte, 2008

Como se pode observar o potencial de risco se trata de método numérico e qualitativo. O enquadramento das barragens em classes potenciais de risco permite definir a frequência de intervenção ou inspeções para cada barramento e antecipar ações, de modo a prevenir, antecipar falhas e rupturas.

Visto que as Áreas de Resíduos de Bauxita são extensas estruturas e que necessitam ser inspecionadas, devido ao material contido ser de oriundo de processos químicos para a obtenção da alumina, elevada capacidade de retenção desses resíduos, o solo local se

apresentar silte-arenoso e modo construtivo utilizando aterro compactado deixam claro a necessidade de se possui um elevado controle das operações e manutenção dessas áreas.

De acordo com a classificação, podem ser aplicadas práticas para o gerenciamento de risco e frequência de inspeção em ênfase em prevenção de falhas.

As ARB's 1,2,3,4,6 e 7 se apresentaram potencial de risco baixo e classificação (D) devem passar por inspeção periódica a cada dois anos, e relatórios podendo ser simplificado a cada dois anos. A inspeção formal deve acontecer a cada quinze anos.

Já para ARB 5 foi classificada com potencial de risco normal sob classificação (C), devem passar por inspeção periódica com emissão de relatório completo a cada dois anos, porém a inspeção formal deve ser feita a cada dez anos.

Embora se tenha evidenciado um potencial de risco considerado predominantemente baixo de ruptura, chama-se atenção para o tipo de barramento, sendo de resíduo industrial do beneficiamento de bauxita, pois a responsabilidade pelas ações, monitoramento e correções é da empresa, assim como dos responsáveis pelas estruturas. Os órgãos competentes devem fiscalizar e atuar rotineiramente na verificação do cumprimento das leis, padrões e obrigações que a empresa possui.

Os últimos acidentes registrados em nosso país ficou evidenciado a importância de se fiscalizar e inspecionar, assim como exigir conformidades destas estruturas geotécnicas, além de capacitar profissionais com formação específica. Embora existam muitas leis ambientais e restrições, infelizmente ainda é um entrave em nosso país.

6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve foco na identificação dos métodos construtivos e o que rege a segurança de barragens de rejeito industrial no Brasil, mas precisamente na Ilha do Maranhão. Os rompimentos em barragens dessa natureza têm ocorrido com frequência em nosso país. A ineficiência dos sistemas construtivos, dispositivos de segurança e falhas de monitoramento são apontados como principais fatores para os casos registrados atualmente segundo investigações.

É evidente que barragens de rejeitos tem possuído nos últimos anos altos índices de acidentes, e apesar dos esforços por parte das mineradoras para melhorar a segurança das barragens, esses acidentes continuam ocorrendo, como aconteceu, recentemente em Mariana e Brumadinho.

Das etapas realizadas no presente estudo, a metodologia apresentada para avaliação das barragens do parque industrial da Alumar ressalta a importância de realizar estudos significativos sobre esses empreendimentos como os riscos associados. Conhecer os processos construtivos e de manutenção das barragens no cenário atual é de grande relevância para preservar vidas e questões socioambientais, visto que um rompimento eventual poderia ocasionar danos irreversíveis ao modo de vida local e a saúde pública.

Diante do exposto chega-se à conclusão que as atividades industriais, considerando apenas as explorações, beneficiamento dos minerais, já provocam inúmeros impactos ambientais, sobre o solo, atmosfera, a fauna e a flora, assim como águas subterrâneas e superficiais.

A metodologia modificada por Duarte (2008) aplicada no estudo foi considerada satisfatória, assim como os resultados obtidos e cumpriu com os objetivos do trabalho. Os dados coletados na ICOLD, SNISB e da própria Alumar analisando todos aspectos técnicos, projetuais, funcionais, instrumentação e de monitoramento é justificável o potencial de risco considerado baixo com exceção da ARB5 com potencial normal. O que não isenta o perigo que as ARB's oferecem em termos socioambientais e humanitários. Isso está relacionado a: altitude que se encontra os lagos, o material contido de origem química, a possibilidade de

contaminação de grandes corpos hídricos proporcionado um desequilíbrio acentuado no meio ambiente.

Durante a finalização da operação de cada ARB, essas estruturas passam por um processo de reabilitação com inserção de cobertura vegetal. Esse processo pode não significar o uso produtivo da área após sua operação, como a implantação de uma atividade que renderia lucro, ou atividades menos tangíveis em termos monetários, visando, por exemplo, a recreação ou a valorização estético-ecológica. É interessante a Alumar estudar possibilidades para o reaproveitamento destas áreas, visando um cunho principalmente social. E implementar estudos para o reaproveitamento dos resíduos na produção de possíveis subprodutos que podem retornar a sociedade ou para a própria empresa com outra finalidade.

A Alumar possui um plano específico de monitoramento dos lagos o que caracteriza e gerencia todas as análises e informações necessárias para que as equipes consigam realizar o monitoramento adequado, minimizando os riscos que naturalmente os lagos oferecem pelo resíduo contido que é submetido a processos químicos chamado de processo Bayer.

Recomenda-se que empresa continue adotando e implementando novas tecnologias, assim como em treinamento de seu corpo operacional. De acordo com os dados coletados, acerca de informações cedidas pela Alumar e dados apresentados pelo ICOLD e CBDB sobre as Áreas de Resíduos de Bauxita que a empresa tem gerenciado muito bem a estrutura dos lagos, implementando diversas tecnologias para o projeto, execução, operação e monitoramento dessas áreas em conjunto com outras empresas, o que tem se tornado referência em segurança de barragens no mundo. Assim como os planos e etapas de reabilitação das ARB's pós operação.

A partir da experiência da coleta de dados, revisão bibliográfica e análise dos resultados contidos neste trabalho foram satisfatórias, alcançando dos objetivos, com base no desenvolvimento, houve a possibilidade de o autor sugerir outras pesquisas, como continuidade para a colaboração do estudo de barragens no estado do Maranhão e do Brasil, tendo como foco:

- Estudos de implementação de novas técnicas para reabilitação das Áreas de Resíduos de Bauxita;
- Estudo da viabilidade para o reaproveitamento dos resíduos do beneficiamento da bauxita como ênfase na redução dos impactos ambientais;

- Contribuição ao estudo de projeto da instrumentação e monitoramento dos deslocamentos verticais e horizontais em estruturas geotécnicas;
- A importância da instrumentação do controle piezométrico em barragens de mineração.

7 REFERÊNCIAS

A avaliação de impactos ambientais e as barragens de rejeitos. Disponível em < <https://www2.unesp.br/portal#!/noticia/34275/a-avaliacao-de-impactos-ambientais-e-as-barragens-de-rejeitos> >. Acessado em 02 de junho de 2019.

A importância da investigação de acidentes de barragens. Disponível em < <https://institutominere.com.br/blog/a-importancia-da-investigacao-de-acidentes-de-barragens> >. Acesso em: 02 de julho de 2019.

Alumar se posiciona sobre Barragem de Rejeitos em São Luís. Disponível em: < <https://oimparcial.com.br/cidades/2019/01/alumar-se-posiciona-sobre-barragem-de-rejeitos-em-sao-luis/> >. Acessado em:06 de junho de 2019.

ANJOS, F. V. e SILVA, J. B. (1983). **As usinas de produção de alumínio da ALCAN no Brasil – processo Bayer para produção de alumina e os processos eletrolíticos para a produção de alumínio.** In CROSSLEY P. (2001). Bauxite. Industrial Minerals, p.27-41.

BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento. **Geodiversidade do estado do Maranhão** / Organização Iris Celeste Nascimento. – Teresina : CPRM, 2013. 294 p.

BARROS, A. J. da S.; LEHFELD, N. A. de S. **Fundamentos de metodologia científica: um guia para a iniciação científica.** 2. ed. São Paulo: Makron Books, 2000.

BERNARDO, S; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação.** 8. Ed. Atual. e Ampl. Viçosa: UFV, 2006. 625p.

BRANQUINHO, Luiz Otávio Simões. **Análise de estabilidade de rejeitos em planta industrial de Poços de Caldas – MG** (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas – MG, 2014.

CAIXETA, Ana Paula Camilo. **Estudos da viabilidade da utilização de estéreis de mina em obras de alteamento a jusante** - estudo de caso: barragem de rejeitos de mirim (dissertação de mestrado). programa de pós-graduação em eng. geotécnica da ufop, abril de 2018.

COMISSÃO Brasileira de Grandes Barragens (CBGB). **Cadastro brasileiro de deterioração de barragens e reservatórios**. Governo do Estado de São Paulo, Cesp, Secretaria de Energia. Sem data, sem editora, São Paulo, 198p.

COMITÊ Brasileiro de Grandes Barragens (CBGB). **Diretrizes para a inspeção e avaliação de segurança de barragens em operação**. Rio de Janeiro, 1983. 26 p.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de Barragens**. Ed, São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CRUZ, P. T. 100 **Barragens brasileiras**: casos históricos, materiais de construção e projeto. São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 647p.

CRUZ, P.T., 2014*. **100 Barragens Brasileiras**: casos históricos, materiais de construção, projetos. São Paulo. Oficina de Textos, 1996. 647 p. (* 2º reimpressão) .

DUARTE, Anderson P. **Classificação das Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração e de Resíduos Industriais no Estado de Minas Gerais em Relação ao Potencial de Risco**. (Dissertação). Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2008.

ESPOSITO, T. de J. (2000). **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeitos construídas por aterro hidráulico**. 363 pf. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Brasília, Brasília.

FRITSCHER, Ester Cristina. **Análise de Estabilidade de Talude: estudo de caso no município de Teutônia/Rs**. Monografia (Curso de Engenharia Civil). Centro Universitário UNIVATES, Lajeado – MG, 2016.

FUSARO, T.C. **Metodologia de classificação de barragens baseada no risco**. Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig), 12 p. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS (SNGB), 25., out. 2003, Salvador, BA. XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens – Anais.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Método da Pesquisa**. Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GONÇALVES, E. P. **Iniciação à pesquisa científica**. São Paulo: Alínea, 2003.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 1991.

_____. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000.

Manual de Segurança e Inspeção de Barragens – Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002. 148p

MENESCAL, R. A.; FONTENELLE, A. S.; OLIVEIRA, S. K. F.; VIEIRA, V. P. P. B. **Ações de Segurança de Barragens no Estado do Ceará**. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Anais, Fortaleza - CE. 2001.

MENESCAL, R. de A.; CRUZ, P.T.; CARVALHO, R.V.de; FONTENELLE, A de S.; OLIVEIRA, S.K.F. de. **Uma metodologia para a avaliação do potencial de risco em barragens do semi-árido**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS (SNGB), 24., 2001, Fortaleza, CE. A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos no Brasil. Brasília: Ministério da Integração Nacional, jan. 2005, 2. ed., p. 137-153.

MENESCAL, R. de A.; VIEIRA, V. de P.P.B.; OLIVEIRA, S.K.F. de. **Terminologia para a análise de risco e segurança de barragens**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS (SNGB), 24., 2001, Fortaleza, CE. A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos no Brasil. Brasília: Ministério da Integração Nacional, jan. 2005, 2. ed., p. 31-53.

NEVES, Luiz Paniago. **Segurança de Barragens: Legislação federal brasileira em segurança de barragens comentada**. Disponível em: < <http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/e-book-livre-legislacao-federal-brasileira-em-seguranca-de-barragens-autor-luiz-paniago-neves> >. Acesso em 03 de novembro de 2019.

PAGIN, S.; CERA, D. e ÉRRICO, J. C. D. (1983). **Alumínio do minério ao lingote**. In HUGLEN, R.; LILLEBUEN, B. e MELLERUD, T. (1996). Principles of electrochemistry and current efficiency.

PALOMINO, Carla Tinoco. **Caracterização geomecânica de um rejeito de mineração de bauxita**. 147pf. Dissertação (Mestrado)- Universidade de São Paulo, São Paulo.

PANCHUKI, ELÓI. **Infiltração de Água no Solo e Erosão Hídrica, sob Chuva Simulada, em Sistema de Integração Agricultura-Pecuária**. Dourados – MS, UFMS, 2003. 67p. Dissertação de Mestrado.

_____. Portaria Nº 70.389, em 17 de maio de 2017 do Diretor-Geral do DNPM

_____. Resolução no 236, de 30 de janeiro de 2017. Estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB.

_____. Resolução No. 143, de 10 de julho de 2012. Publicada no Diário Oficial da União, No. 172 de 04 de setembro de 2012, Brasília – DF.

_____. Resolução No. 144. Publicada no Diário Oficial da União, No. 172 de 04 de setembro de 2012, Brasília – DF.

SILVA, João Paulo de Sousa. **Avaliação da influência do regime de fluxo no comportamento geotécnico de uma barragem de rejeito alterada pelo método de montante**. 159 pf. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ZUFFO, Monica Soares Resio. **Metodologia para avaliação da segurança de barragens / Monica Soares Resio Zuffo.**--Campinas, SP: [s.n.], 2005.

