



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E
AMBIENTAL

YURI MATHEUS CHAVES DE
ALCOBAÇA

AVALIAÇÃO DE PERCOLAÇÃO NA FUNDAÇÃO DE BARRAGEM CONSTRUÍDA
EM REGIÃO DE GEOLOGIA SEDIMENTAR: INFLUÊNCIA DE PAREDE
DIAFRAGMA EXECUTADA POR HIDROFRESA

FORTALEZA-CE

2022

YURI MATHEUS CHAVES DE ALCOBAÇA

AVALIAÇÃO DE PERCOLAÇÃO NA FUNDAÇÃO DE BARRAGEM CONSTRUÍDA EM
REGIÃO DE GEOLOGIA SEDIMENTAR: INFLUÊNCIA DE PAREDE DIAFRAGMA
EXECUTADA POR HIDROFRESA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme

FORTALEZA-CE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A1a Alcobaça, Yuri Matheus Chaves de.
Avaliação de percolação na fundação de barragem construída em região de geologia sedimentar : influência de parede diafragma executada por hidrofresa / Yuri Matheus Chaves de Alcobaça. – 2022.
79 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme.

1. Barragens. 2. Hidrofresa. 3. Percolação. 4. Fundação. 5. Parede Diafragma. I. Título.

CDD 620

YURI MATHEUS CHAVES DE ALCOBAÇA

AVALIAÇÃO DE PERCOLAÇÃO NA FUNDAÇÃO DE BARRAGEM CONSTRUÍDA EM
REGIÃO DE GEOLOGIA SEDIMENTAR: INFLUÊNCIA DE PAREDE DIAFRAGMA
EXECUTADA POR HIDROFRESA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 22/07/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Fabiola Costa de Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Amanda Vieira Hohn
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha mãe e irmã, Maria e Yasmin.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha mãe Maria por todo incentivo e apoio investido em mim, por toda ajuda cedida para realização de todas as coisas boas que já aconteceram na minha vida e por sempre me fazer acreditar que sou capaz.

À minha tia, Edna, por toda paciência e investimentos realizados durante todo a minha vida.

À minha irmã, Yasmin, por todo apoio e companheirismo que uma irmã mais nova poderia ceder.

Ao Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme, pela orientação, por toda sua paciência, dedicação e profissionalismo.

Aos amigos que dividiram comigo essa jornada e fizeram dela mais leve e prazerosa, em especial aqueles que durante mais de cinco anos estiveram comigo, Larissa, Felipe, Everton, Luciana, Tereza, Mateus, Ranielle. Eu sou muito grato por todas as lições compartilhadas nesse período.

Aos participantes da banca examinadora, pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A todos que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional, muito obrigado.

“As palavras têm a leveza do vento e a força da tempestade.”

Victor Hugo

RESUMO

Fundações de Barragens construídas sobre materiais de elevada permeabilidade sempre são pontos de preocupação em obras geotécnicas. Historicamente, foram documentados inúmeros problemas em grandes barragens devido a problemas de anomalias por percolação pela fundação, principalmente em barragens construídas em região de rocha de origem sedimentar. De um levantamento total de 11.192 barragens, as estatísticas apresentadas por Foster *et al.* (1998), mostram que, entre as anomalias, temos o destaque para o do tipo erosões regressivas por percolação sendo a causa de ruptura de cerca de 42%. No Ceará, a barragem Jaburu I, construída em 1983 no município de Tianguá-CE, é um exemplo de uma barragem com a ocorrência de inúmeras anomalias de natureza hidráulica. Segundo Sousa (2013), a barragem foi construída sobre rocha sedimentar arenítica, e devido a sua natureza geológica da fundação, a obra vem apresentando inúmeros problemas, sendo necessário intervenções ao longo dos anos para tentar atenuar as anomalias identificadas, porém, sem dar garantias de solução e estabilidade. Uma solução moderna, que poderia ter sido implementada no caso da barragem Jaburu I, seria uma fundação de uma parede diafragma de grande profundidade, escavada através de um equipamento de hidrofresa. Este equipamento promove a escavação de uma vala a grandes profundidades, sendo mais utilizado para a construção civil (como por exemplo: Paredes diafragma para contenção ou Elementos isolados de fundação), além de ter sido implementada com sucesso em algumas barragens de fundação sedimentar. A exemplo da eficiência em barragens, Godoi *et al.* (2013) relata a boa eficiência da UHE Estreito, barragem que foi construída sobre o maciço rochoso arenítico altamente friável, geologia semelhante ao da barragem Jaburu I supracitada. Diante disso, a presente pesquisa tem por objetivo avaliar numericamente a eficiência hidráulica da barragem Jaburu I com uma solução de uma fundação de uma parede diafragma executada por hidrofresa. Os resultados obtidos indicam bom comportamento hidráulico da estrutura após a inserção do diafragma plástico.

Palavras-chave: Barragens; Hidrofresa; Percolação; Fundação; Parede Diafragma.

ABSTRACT

Dam foundations built on highly permeable materials represents a constant point of concern in geotechnical works. Historically, numerous problems in large dams are caused due to anomalies resulted from percolation through the foundation, especially in those built in a region with sedimentary rock origin. From a total survey of 11,192 dams, the statistics presented by Foster et. al (1998), show that, among the causing anomalies, the regressive erosion type by percolation is cause of rupture of about 42%. In Ceará, the Jaburu I dam, built in 1983 in Tianguá, is an example of a dam that presents numerous hydraulic anomalies. According to Sousa (2013), the dam was built on sandstone sedimentary rock, and due to geological nature of the foundation, numerous problems due to percolation through the foundation of the massif and the spillway are common. What leads to numerous interventions over the years in an attempt to mitigate the identified anomalies, however, without guarantees of solution and stability. The present research aims to numerically evaluate the hydraulic efficiency of the Jaburu I dam with a solution of a foundation of a diaphragm wall executed by hydromill equipment what represents a modern and possible solution. Hydromill equipment promotes the excavation of a trench at great depths, commonly used in civil construction in diaphragm walls for containment or insulated foundation elements as well. In addition, this method features a successful implementation in some sedimentary foundation dams. Estreito HPP is an example reported by Godoi et. al. (2013) of efficiency in dams built on the highly friable sandstone rock massif and followed in this research due to its similar geology to the aforementioned Jaburu I dam. The results obtained indicate good hydraulic behavior of the structure after insertion of the plastic diaphragm.

Keywords: Dams; Hydromill; Percolation; Foundation; Diaphragm Wall.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Barragem de concreto por gravidade.....	23
Figura 2 - Barragem de concreto estrutural com contrafortes.....	24
Figura 3 - Barragem em arco de dupla curvatura.....	25
Figura 4 - Barragens de terra.....	27
Figura 5 - Barragem de enrocamento - (a) com material de menor permeabilidade no núcleo central, e (b) com material de menor permeabilidade inclinado para montante.	28
Figura 6 - Representação da ocorrência de piping na fundação de uma barragem.....	32
Figura 7 - Linhas de fluxo e equipotenciais em seção homogênea.....	34
Figura 8 - Resultados de ensaios de permeabilidade em solos residuais.....	35
Figura 9 - Correlações k_x e k_z para o mesmo solo em estados diferentes.....	35
Figura 10 - Ensaio de permeabilidade: bombeamento.....	37
Figura 11 - Representação esquemática das injeções de concreto na fundação de barragem.....	38
Figura 12 - Esquema de aplicação da trincheira de vedação – Seção da Barragem do Leão.	39
Figura 13 - Execução de poço de alívio no centro da seção de uma barragem.....	40
Figura 14 - Parede Diafragma para controle de percolação na fundação.....	42
Figura 15 - Esquema do método construtivo convencional de uma parede diafragma.....	43
Figura 16 - Esquema do método construtivo com hidrofresa.	44
Figura 17 - Arranjo geral da UHE Estreito.	45
Figura 18 - Perfil final da parede diafragma plástica.....	46
Figura 19 - Detalhe de um piezômetro tipo Casagrande.....	50
Figura 20 - Medidor de Vazão Triangular.	51
Figura 21 - Detalhe de um medidor – Calha parshall.	51
Figura 22 - Caminho de acesso à barragem Jaburu I.	53
Figura 23 - Planta de situação da barragem Jaburu I.	55
Figura 24 - Localização dos medidores de vazão da barragem Jaburu I.....	60
Figura 25 - Seção transversal da barragem Jaburu I.	62
Figura 26 - Prévia do modelo construído.....	64
Figura 27 - Modelo construído.....	68
Figura 28 - Modelo construído com a inserção da parede diafragma.....	71
Figura 29 - Vetores de velocidade – Modelo sem parede diafragma.....	72
Figura 30 - Vetores de velocidade – Modelo com parede diafragma.	72
Figura 31 - Perda de carga – Modelo sem parede diafragma.....	73

Figura 32 - Perda de carga – Modelo com parede diafragma 73

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Causa de rupturas em barragens	31
Gráfico 2 – Vazões médias anuais (2005 – 2012).	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Instrumentação em barragens	45
Quadro 2 - Características da barragem Jaburu I.	51
Quadro 3 - Parâmetros da parede diafragma.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre permeabilidade nas camadas da fundação - Modelo não calibrado	64
Tabela 2 - Parâmetros geotécnicos dos materiais	69
Tabela 3 - Vazões médias nos medidores de vazão.	69
Tabela 4 - Relação entre permeabilidade nas camadas da fundação - Modelo calibrado.	70
Tabela 5 - Vazão medida na fundação - Modelo calibrado.	70
Tabela 6 - Vazão medida na fundação - Modelo com parede diafragma.	71
Tabela 7 – Comparativo - Vazão medida no modelo x Vazão medida in loco.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABGE	Associação Brasileira de Geologia e Engenharia Ambiental
AGIR	Agente de Guarda e Inspeção de Reservatórios
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
FS	Fator de Segurança
GESIN	Gerência de Segurança e Infraestrutura
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
NBR	Norma Brasileira de Referência
POM	Plano de Operação e Manutenção

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Justificativa	19
1.2. Objetivos	20
1.2.1. Objetivo Geral	20
1.2.2. Objetivos Específicos	20
1.3. Organização do estudo	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1. Barragens	21
2.1.1. Barragens de concreto por gravidade	22
2.1.2. Barragens de concreto estrutural com contrafortes	24
2.1.3. Barragens em arco	25
2.1.4. Barragens de terra	26
2.1.5. Barragens de enrocamento	27
2.2. Fundações de barragens	29
2.2.1. Definição	29
2.2.2. Condição do material para fundação	30
2.2.3. Patologias em fundações de barragens	30
2.2.4. Fluxo em fundações de barragens	33
2.2.4.1. Fluxo bidimensional	33
2.2.4.2. Permeabilidade da fundação	34
2.2.4.3. Elementos para controle do fluxo na fundação	37
2.3. Parede diafragma	41
2.3.1 Definição e detalhes de projeto	41
2.3.2. Hidrofresa	43
2.3.2.1. Avaliação do uso de uma hidrofresa para execução de parede diafragma	45
2.4. Instrumentação em barragens	47
2.4.1 Instrumentação de subpressões e pressões neutras	49
2.4.2 Instrumentação de vazões	50
3. MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1. Estudo de caso	52
3.1.1. Apresentação	52
3.1.2. Localização	53
3.1.3. Características da barragem	54
3.1.6. Histórico: Jaburu I	56

3.2. Obtenção de dados de instrumentação da barragem Jaburu I	59
3.3. Modelagem numérica da barragem Jaburu I para a atual fundação	61
3.3.1. Calibração do modelo para análise das vazões	64
3.4. Dimensionamento de parede diafragma	65
3.4.1. Permeabilidade da parede diafragma	65
3.4.2. Altura da parede diafragma	66
3.4.3. Espessura da parede diafragma	66
3.5. Modelagem numérica da barragem Jaburu I com uma fundação com parede diafragma	66
3.6. Comparativo da eficiência hidráulica das alternativas estudadas	67
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1. Modelo Calibrado	68
4.1.1. Cálculo da vazão adotada	69
4.1.2. Retroanálise	70
4.2. Modelo com parede diafragma	71
4.3. Comparativo da eficiência hidráulica das alternativas estudadas	71
5. CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS	76
APÊNDICE	79

1. INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas executadas em regiões de cursos de água para a retenção de grandes quantidades de água com diversos fins. Nesse sentido, são estruturas que podem atingir grandes dimensões dependendo da quantidade de água a ser represada, das características da região, dos materiais selecionados e de seu uso (Matos *et al.*, 2012). Dessa maneira, a construção destas exige amplos estudos e verificações na concepção de seu projeto e na sua execução.

O projeto de uma barragem inicia-se pela escolha do local para construção e, conseqüentemente, do conhecimento do material de fundação. Para garantir adequada sustentação do maciço de terra e seus elementos adjacentes é importante a execução da barragem em um local com disponibilidade de uma fundação adequada para a barragem em questão. A fundação de uma barragem envolve todo o substrato que fica abaixo dela. Tal componente requer certas características para garantir sua segurança estrutural, são as seguintes: baixa deformabilidade, elevada resistência e baixa permeabilidade (Cruz, 1996). No entanto, algumas anomalias podem atingir este elemento podendo ocasionar riscos a estabilidade e segurança da estrutura.

Percolação de água através da fundação é um dos problemas mais preocupantes em barragens, já que, historicamente ocorreram inúmeros problemas em grandes barragens devido a ocorrência desta anomalia. Tal situação tem acometido principalmente em barragens construídas em região de rocha de origem sedimentar. Ou seja, em região de rochas que apresentam fraturas mais evidentes que possibilitam a passagem de água. Um estudo realizado com 11.192 barragens, as estatísticas apresentadas por Foster *et al.* (1998), mostraram que, entre as anomalias causadoras, temos o destaque para o do tipo erosões regressivas por percolação sendo a causa de ruptura de cerca de 42%. No Brasil existem cerca de 40 barragens executadas em região solo sedimentar indicadas em estudo apresentado por Pastore *et al.* (2015).

Tais sistemas requerem monitoramento contínuo e amplo a fim de evitar acidentes e comprometer o abastecimento da região. O acompanhamento costuma ser executado a partir de instrumentação instalada nas estruturas. Podemos citar como exemplos destes equipamentos, piezômetros e medidores de vazão. Os primeiros são utilizados principalmente para medição das subpressões, causada pelo movimento da água que se desloca na fundação da barragem gerando empuxo, e pressões neutras, causada a partir da passagem de água pelo barramento. Os medidores de vazão aferem o volume de água que passou por eles em certo tempo.

No Ceará, a barragem Jaburu I, construída em 1983 no município de Tianguá-CE, é um exemplo de uma barragem executada com fundação em arenito – solo sedimentar. Segundo Sousa (2013), a barragem foi construída sobre rocha sedimentar arenítica, e devido a sua natureza geológica da fundação, a obra vem apresentando inúmeros problemas devido a percolação pela fundação do maciço e do vertedouro, necessitando de inúmeras intervenções ao longo dos anos para tentar atenuar as anomalias identificadas, porém, tais iniciativas não conseguiram dar garantias de solução e estabilidade.

Um elemento que poderia ter sido implementado na barragem Jaburu I para minimizar a situação presente na estrutura seria uma fundação do tipo parede diafragma, escavada até grandes profundidades com o auxílio de uma hidrofresa. Este equipamento promove a escavação de uma vala a grandes profundidades, sendo mais utilizado para a construção civil (como por exemplo: Paredes diafragma para contenção ou Elementos isolados de fundação), além de ter sido implementada com sucesso em algumas barragens de fundação sedimentar. A exemplo da eficiência em barragens, Godoi *et al.* (2013) relata a boa aplicação na UHE Estreito, barragem que foi construída sobre o maciço rochoso arenítico altamente friável, geologia semelhante ao da barragem Jaburu I supracitada.

Diante disso, a presente pesquisa tem por objetivo verificar as implicações da execução de uma parede diafragma construída por hidrofresa na problemática de percolação de água através da fundação de barragem a partir de avaliação numérica da eficiência hidráulica da barragem Jaburu com a solução aplicada.

1.1. Justificativa

Algumas anomalias podem atingir os principais elementos de uma barragem pondo em risco sua estabilidade estrutural e, conseqüentemente, a garantia de controle da água represada. A percolação de água pode atingir um dos principais constituintes da barragem, sua fundação (Cruz, 1996). Tal distúrbio causa pressão nas superfícies de descontinuidade da fundação, chamadas subpressões. Em fundações com material de geologia sedimentar esse processo é intensificado, já que, há maior número de fissuras por onde a água pode passar. Desse modo, diminui a estabilidade da barragem, elevando o risco de rompimento da estrutura, o que provocaria interrupção no fornecimento de água da região, além de danos às estruturas adjacentes.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Verificar as implicações da execução de uma parede diafragma construída por hidrofresa na problemática de percolação de água através da fundação da Barragem Jaburu I, localizada no Estado do Ceará.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Estimar o comportamento hidráulico de barragem construída através de um modelo numérico responsivo, baseado no histórico de observações da instrumentação do maciço; e
- Analisar a influência da alternativa com hidrofresa no fluxo pela fundação de barragem construída, através de um modelo numérico; e
- Avaliar os impactos do uso de hidrofresa na execução de parede diafragma.

1.3. Organização do estudo

O presente trabalho foi separado em 5 capítulos. No Capítulo 1 ilustra-se o tema abordado, demonstrando sua importância. Além disso, são apresentados os objetivos que norteiam a pesquisa. O Capítulo 2 ilustra os principais conceitos e definições relacionadas ao tema a partir de revisão bibliográfica que engloba os estudos já realizados na área a fim de desenvolver conceitos importantes para o desenvolvimento da pesquisa.

Na sequência, o Capítulo 3 detalha o método implementado na realização da pesquisa com intuito de que se tornasse possível atingir os objetivos desejados. Nesse sentido, no Capítulo 4 relatam-se e discutem-se os resultados obtidos com a aplicação do método estabelecido. Finalmente, ao longo do Capítulo 5 são demonstradas as principais conclusões relacionadas aos resultados encontrados e propostas para posteriores trabalhos referentes ao tema.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresentam-se os principais conceitos intrínsecos ao estudo de barragens incluindo sua definição e detalhes para concepção de seu projeto e sua execução. A intenção é descrever os vários tipos de barragens evidenciando suas características e elementos formadores. Além disso, descrever as principais patologias que atingem a fundação dessas estruturas. A partir disso pode-se estabelecer e demonstrar a problemática deste estudo.

2.1. Barragens

Barragens são estruturas utilizadas há séculos pelos seres humanos em suas atividades de subsistência, seja para represar água para o controle de cheias em uma região ou para permitir a irrigação e o abastecimento em tempos de seca como caracteriza Matos et al. (2012). Nesse sentido, são estruturas que podem atingir grandes dimensões dependendo da quantidade de água a ser represada, das características da região, dos materiais selecionados e de seu uso.

Matos *et al.* (2012) ainda aponta que uma barragem é composta principalmente dos seguintes elementos. A concepção destes e seu projeto executivo exige amplos estudos e verificações.

- Barramento: massa física de material que barra o fluxo de água a fim de controlá-lo para os usos já citados;
- Crista: estrutura acima do barramento cuja largura pode ser definida pela quantidade de tráfego que passa por ela, a dimensão deve ter tamanho mínimo de 3 metros para permitir a passagem de equipamentos para manutenção;
- Ombreiras ou encontros: pontos de contato da barragem e o terreno natural. Tais estruturas estão mais suscetíveis a ações erosivas;
- Fundação: elemento que recebe as cargas da barragem e a sustenta - será discutido em mais detalhes ao longo deste estudo;
- Drenagem interna: elementos físicos que permitem o controle da água que atravessa o barramento e sua fundação, devem ser dimensionados utilizando materiais com permeabilidade superior ao do barramento e da fundação que protegem;
- Vertedouro ou extravasor: elemento que controla o fluxo do reservatório e permite a passagem de água quando necessário através das comportas;
- Instrumentação de verificação, como piezômetros e medidores de vazão: utilizados para aferir o comportamento da barragem e de seus elementos durante o uso, essencial para

permitir a manutenção evitando acidentes;

- Instalações para comando, manutenção e comunicação: espaços físicos para armazenamento dos equipamentos e itens utilizados na gestão da barragem.

Os elementos citados anteriormente podem ser aplicados de diferentes maneiras e dimensões ou até mesmo suprimidos dependendo da barragem construída. Dessa maneira, entende-se a existência de diversos tipos de barragem que podem se diferenciar a partir da utilização, do tipo de projeto hidráulico empregado, do comportamento estrutural e dos materiais de construção aplicados como aponta Moliterno (1995). A seguir iremos tratar dos principais tipos de barragens. A descrição desses tipos busca demonstrar a complexidade ligada à concepção de barragens. A classificação adotada leva em conta o tipo de material utilizado na construção e seus elementos básicos demonstrada por Massad (2003). Primeiramente apresenta-se as barragens que são construídas utilizando concreto. A estrutura dos tópicos almeja demonstrar os principais diferenciais ligados a aplicação de cada tipo de barragem, incluindo as patologias que atingem essas estruturas.

2.1.1. Barragens de concreto por gravidade

Este modelo de barragem utiliza seu próprio peso para garantir estabilidade. Dessa maneira, o peso da estrutura costuma ser elevado para evitar seu tombamento como define a *US Army Corps of Engineers* (1995). Tal tipo não pode atingir grandes alturas, já que as solicitações na fundação podem se tornar muito elevadas devido ao peso do barramento de concreto. A partir disso, Caputo (2015) indica que estas devem ser executadas sobre rochas de elevada resistência.

As barragens deste tipo estão sujeitas a sofrer das principais patologias atreladas ao uso do concreto. A fissuração causada pela retração do concreto que pode permitir a passagem de água através do barramento. Além disso, pode ocorrer expansão devido a cristalização do concreto (reação álcali-agregado)¹, lixiviação ou dissolução - lavagem do concreto evidenciada por manchas brancas no concreto. Nesse sentido, a execução deste tipo de barragem requer a implantação de laboratório para testagem do concreto a fim de melhorar o controle dos componentes utilizados na mistura e a qualidade do concreto produzido. Outro problema que afeta

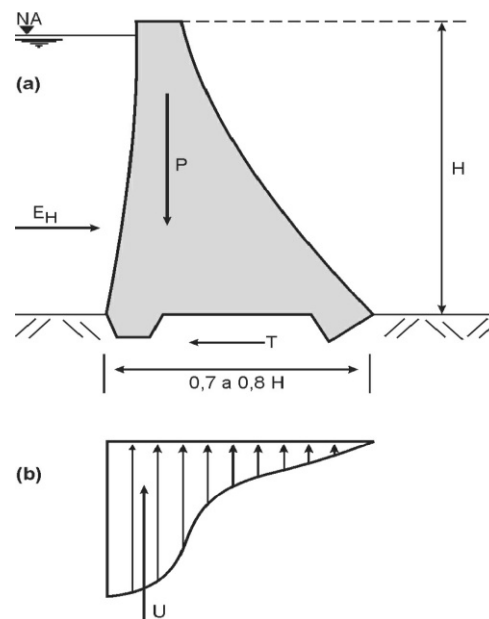
¹ Segundo Kuperman (2005), a reação álcali-agregado (RAA) é a reação química que ocorre na mistura de concreto. Está que se dá entre os álcalis presentes no cimento e os minerais dos agregados incluídos na composição. Quimicamente a reação álcali-agregado, se processa principalmente pelos álcalis de óxido de Sódio (Na₂O) e de Potássio (K₂O).

barragens executadas com concreto é o aumento da temperatura causada pelas reações de hidratação do concreto. O controle da temperatura pode ser realizado a partir das seguintes medidas. Essas ações podem ser implementadas em todas as barragens que utilizam grandes volumes de concreto na sua construção e são recomendadas na NBR 15577-1² de 07/2018:

- Uso de materiais pozolânicos no concreto que diminuem o calor de hidratação;
- Uso de aditivos que diminuem a relação água/ cimento do traço utilizado sem prejuízos para a resistência;
- Resfriamento dos materiais que constituem o concreto;
- Execução da cura do concreto com água.

A execução de barragens em concreto costuma requerer maior tempo, visto que, a execução de cada camada exige maior tempo para finalização quando comparado aos outros tipos de barragem que serão apresentados ao longo desse estudo que não utilizam concreto na execução do seu barramento. Cada camada requer tempo de espera para correta cura do concreto e melhor dissipação do calor de hidratação gerado antes da concretagem das camadas posteriores. A Figura 1 apresenta a seção típica de uma barragem de concreto por gravidade. O peso próprio da estrutura é indicado no esquema demonstrando as forças que permitem o equilíbrio estático da estrutura.

Figura 1 - Barragem de concreto por gravidade.



Fonte: Massad (2003).

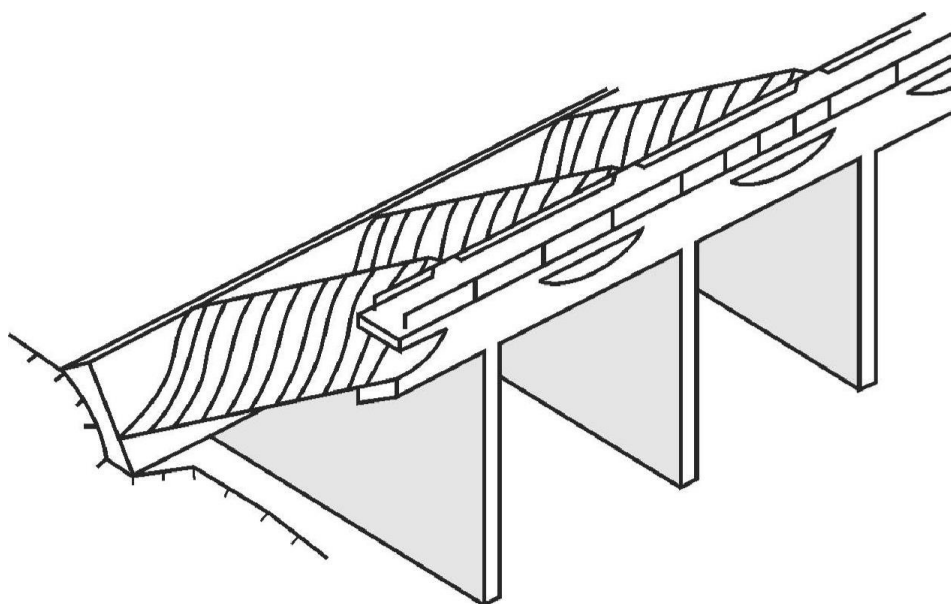
² Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.

Ademais, tais barragens podem ser executadas com espaços vazios em seu núcleo permitindo menor custo para execução, já que o volume de concreto é menor. Tal modelo é denominado barragem em gravidade aliviada como explica Massad (2003). Podem ser aplicadas em regiões onde se verifica que a fundação não suporte a carga de uma barragem em gravidade de concreto.

2.1.2. Barragens de concreto estrutural com contrafortes

Gusmão Filho (2006) explica que este modelo de barragem é executado em concreto armado que utiliza contrafortes para equilíbrio estático através da transmissão de esforços para a fundação. Nesse sentido, o barramento pode ser executado com dimensões menores quando comparada à dimensão da barragem de concreto por gravidade, já que a estabilidade da estrutura é garantida pelos contrafortes cuja função se assemelha à de pilares em um prédio. Tais barragens apresentam método construtivo mais complexo e oneroso quando comparadas com outros tipos de barragens. Este fato deriva da necessidade de utilização de fôrmas e cimbramentos para execução dos contrafortes (Massad, 2003). Sobre as patologias infere-se que tais estruturas sofrem com as mesmas patologias citadas no tópico anterior, já que também são executadas em concreto. A Figura 2 apresenta representação esquemática de uma barragem de concreto estrutural com contrafortes.

Figura 2 - Barragem de concreto estrutural com contrafortes.



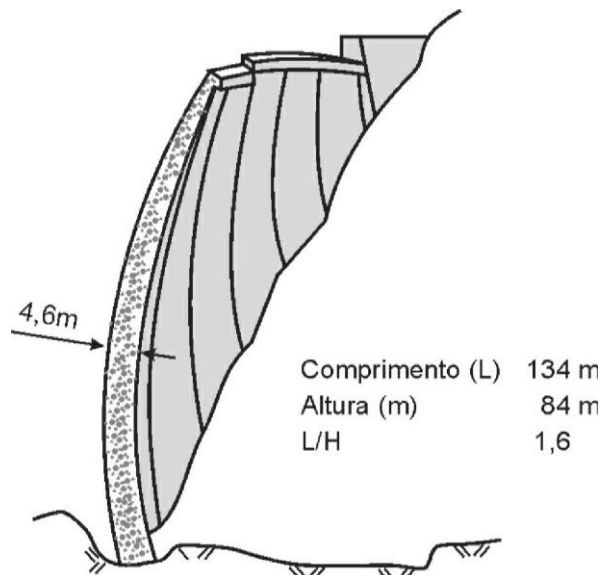
Fonte: Massad (2003).

2.1.3. Barragens em arco

As barragens executadas em arco são construídas em concreto e são mais indicadas para uso em terrenos com vales estreitos que permitem o apoio da estrutura. Moliterno (1995) descreve que a forma geométrica curvada para montante permite a transmissão dos esforços gerados pelo peso próprio do barramento para suas ombreiras, além da fundação. Logo, o material que mais recebe atenção nas verificações para implementação deste modelo de barragem é o existente nas paredes dos vales em que ela fica apoiada.

Delgado e Marquez (2009) definem que o barramento apresenta maior esbeltez quando comparado aos outros tipos de barragens, já que o peso próprio tem papel secundário na garantia do equilíbrio estático da estrutura. Dessa forma, a estrutura consome menor volume de concreto quando comparada a barragem de concreto por gravidade (Costa, 2012). Tal barragem não costuma ser utilizada no Brasil. A Figura 3 evidencia uma das variações do tipo de barragem descrito previamente. Nas barragens em arco de dupla curvatura têm-se arqueamento nos dois eixos (horizontal e vertical) como descreve Massad (2003).

Figura 3 - Barragem em arco de dupla curvatura.



Fonte: Massad (2003).

Além disso, segundo Gusmão Filho (2006), este tipo de barragem pode receber uma variação denominada de arco-gravidade. Nesse modelo o peso próprio se torna mais importante para a estabilidade do barramento eliminando o uso de armadura no concreto. Dessa maneira, a

estrutura se torna mais espessa. Ademais, cabe salientar que outros tipos de variações dos modelos de barragem apresentados podem ser utilizados. A exemplo disso podemos citar a barragem em arco com contrafortes.

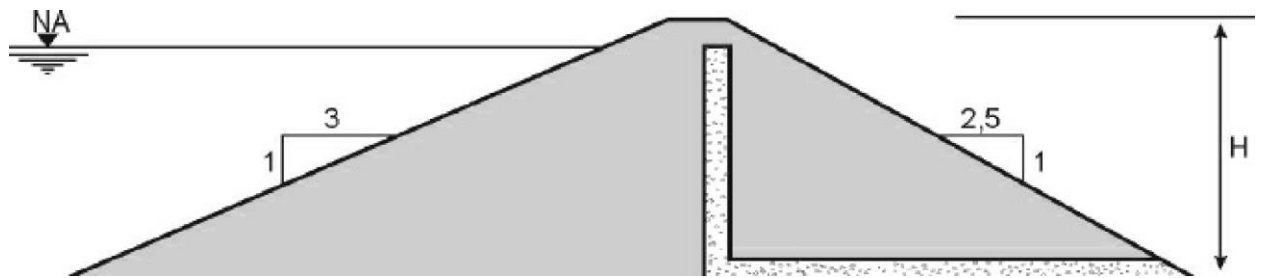
A seguir apresenta-se as barragens construídas principalmente por solo e rochas. Vale salientar que as barragens a seguir costumam utilizar concreto em estruturas adjacentes como para construção de seu vertedouro, logo, algumas patologias citadas previamente podem atingir esses componentes.

2.1.4. Barragens de terra

São estruturas comumente em seções trapezoidais formadas por materiais naturais compactados - argila, areia e silte, como define Marangon (2004). A barragem de terra costuma ser formada por apenas um tipo de material, no entanto, Marangon (2004) ainda explica que tais corpos ainda podem apresentar variações quanto ao tipo de material utilizado no barramento. Por conseguinte, é possível empregar mais de um tipo de material na construção permitindo que a estrutura se adeque melhor ao ambiente em que está sendo executada, esse modelo é intitulado barragem de terra zoneada. Carvalho (2008) aponta que o núcleo do barramento é formado por material impermeável e são empregadas zonas de materiais com maior permeabilidade (areia, cascalho ou fragmentos de rocha) a montante e jusante do núcleo.

Diniz *et al.* (2011) explica que a execução deste tipo de barragem é feita a partir da compactação do solo utilizando rolo compactador em camadas de 10 a 30 cm. O solo deve ser preparado a fim de atingir a umidade ótima que garantir maior grau de aderência das partículas do solo após a compactação. A preparação pode ser realizada com o umedecimento do solo ou secagem ao sol para atingir o grau de umidade quantificado em projeto dependendo do nível de umidade em que os grãos já possuam. A compactação do solo pode ser realizada utilizando rolo compactador liso ou com pé de carneiro, o primeiro é recomendado para uso em solos granulares, nesse sentido, o segundo é utilizado em solos argilosos e siltosos como qualifica Caputo (2011). A Figura 4 apresenta a seção típica de uma barragem de terra.

Figura 4 - Barragens de terra.

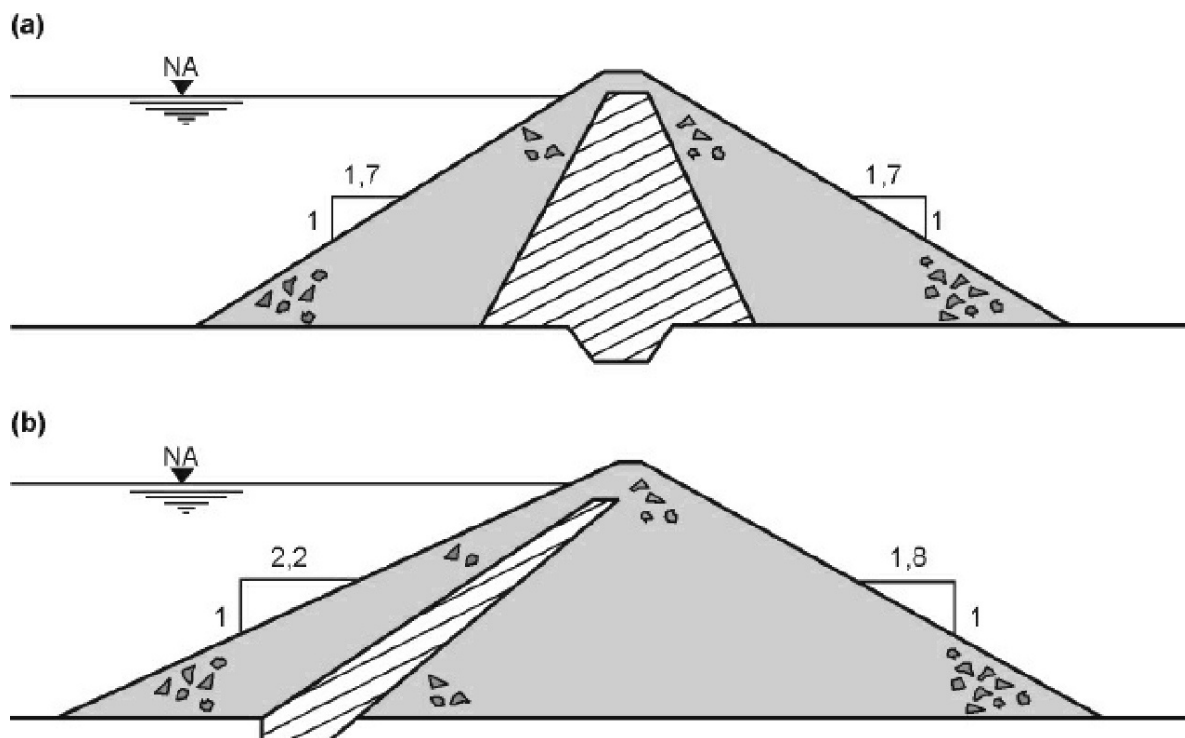


Fonte: Massad (2003).

2.1.5. Barragens de enrocamento

O barramento é executado por pedaços de rochas que são compactados em camadas. Além disso, costuma ser composta por solo que possibilita impermeabilidade em uma das zonas. Neste modelo a estabilidade de estrutura é garantida por seu peso e pelo travamento dos fragmentos de rocha compactados (Mori, 1999). Sua aplicação, segundo USBR (1967), é indicada para locais onde o custo de execução de uma barragem de concreto é muito alto e onde a disponibilidade de solo de boa qualidade, que permitiria a execução de uma barragem de terra, é baixa. Além disso, modelo apresentado pode ser construído com sua face a montante revestida em concreto. A exemplo desta aplicação tem-se a barragem Machadinho que fica localizada na divisa entre os estados Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Sendo assim, a camada fica suscetível a apresentar as anomalias citadas nas seções anteriores que são pertencentes ao concreto. A Figura 5 apresenta esquema da seção de uma barragem executada em enrocamento, na imagem é representada a composição da barragem feita com material de maior permeabilidade no núcleo do barramento ou mais a montante da estrutura.

Figura 5 - Barragem de enrocamento - (a) com material de menor permeabilidade no núcleo central, e (b) com material de menor permeabilidade inclinado para montante.



Fonte: Massad (2003).

Esse tipo de barragem pode ser alterado quando ao material do núcleo permitindo a execução do barramento com núcleo asfáltico. A execução deste tipo de barragem se assemelha ao empregado nas barragens de aterro. No entanto, a espessura das camadas que formam o barramento deve possuir entre 0,5 e 1 m de espessura durante a compactação. Em alguns casos é construído um aterro teste onde podemos verificar empiricamente qual a combinação de equipamento, número de passadas e espessura das camadas que possibilita compactação adequada, como apresenta Massad (2003).

Em barragens de grande porte é comum a utilização de mais de um tipo de barragem na composição da estrutura. No Brasil a barragem da usina hidrelétrica de Itaipú é composta por trechos de barragens do tipo: gravidade maciça, gravidade aliviada, enrocamento com núcleo de argila, contraforte, terra e em arco. Tal ocorrência se justifica a partir do tamanho da estrutura e das condições do solo/rocha que formam sua fundação (ANA, 2022)

2.2. Fundações de barragens

Nesta seção discute-se com mais detalhes a fundação das barragens demonstrando a complexibilidade deste elemento na estrutura. Tal conclusão será evidenciada pelas definições que perpassam seu projeto, sondagem, patologias e tipos de elementos adicionados para minimizar problemas identificados. Na subseção que trata das patologias que ocorrem nas fundações iremos descrever a problemática central deste estudo: a percolação através da fundação.

2.2.1. Definição

A fundação é o elemento que sustenta a barragem e suas partes adjacentes. Dessa maneira, é toda estrutura que envolve a barragem ficando abaixo desta e recebendo as cargas do barramento e das estruturas próximas possibilitando o equilíbrio estático do arranjo, como define Massad (2003).

Após a seleção do local para execução da barragem iniciam-se os estudos para averiguação de sua fundação, afinal, o material disponível irá determinar o tipo de barramento a ser construído. Dessa maneira, é imprescindível a determinação das características da rocha ou solo existentes na região. Tal demanda é necessária para evitar imprevistos que ocasionam em adequações e gastos posteriores ou até mesmo acidentes, já que, a grande parte dos acidentes que ocorrem em barragens deriva de problemas na fundação (Ferreira, 2015).

Os estudos geológicos/geotécnicos a partir de sondagens na região poderão determinar o tipo de rocha/ solo presentes no local e tais análises são feitas utilizando ensaios como: sondagens rotativas com extração de testemunhos, ensaio de perda de água na sondagem, ensaio de permeabilidade de rochas, compressão simples e diametral, como indica Costa (2009). Nesse sentido, Furnas (1993) afirma, que em situações onde se identifique problemas no solo de fundação da barragem é possível avaliar o impacto que ações corretivas terão no aumento de resistência do solo, caso contrário, pode-se avaliar a mudança no tipo de barragem esperado a fim de aliviar a carga na fundação. Essas questões devem ser consideradas ainda na fase de anteprojeto.

2.2.2. Condição do material para fundação

Como dito previamente, a fundação de uma barragem é responsável por receber e dissipar as cargas geradas pela barragem construída. Dessa maneira, o material que irá compor a fundação deve possuir certas características para garantir a segurança estrutural da barragem, baixa deformabilidade, elevada resistência e baixa permeabilidade. Na ausência de tais itens o projetista pode elaborar alternativas para contornar os problemas do material a partir de escavações que removam o material de baixa resistência e até mesmo a execução de tratamentos que ajudam a garantir uma permeabilidade menor para o solo, como aponta Cruz (1996).

Marques e Geraldo (1988) correlacionam o tipo de solo para fundação e o tipo de barragem mais adequado separando-as em cinco categorias. São elas:

- Fundação muito resistente: indicada para qualquer tipo de barragem;
- Fundação resistente: não é indicada para barragens de concreto em arco;
- Fundação pouco resistente: não é indicada para barragens de concreto em arco e estruturas com contrafortes;
- Fundação branda: não é indicada para barragens de concreto em arco e estruturas com contrafortes;
- Fundação muito branda: indicada para estruturas de terra.

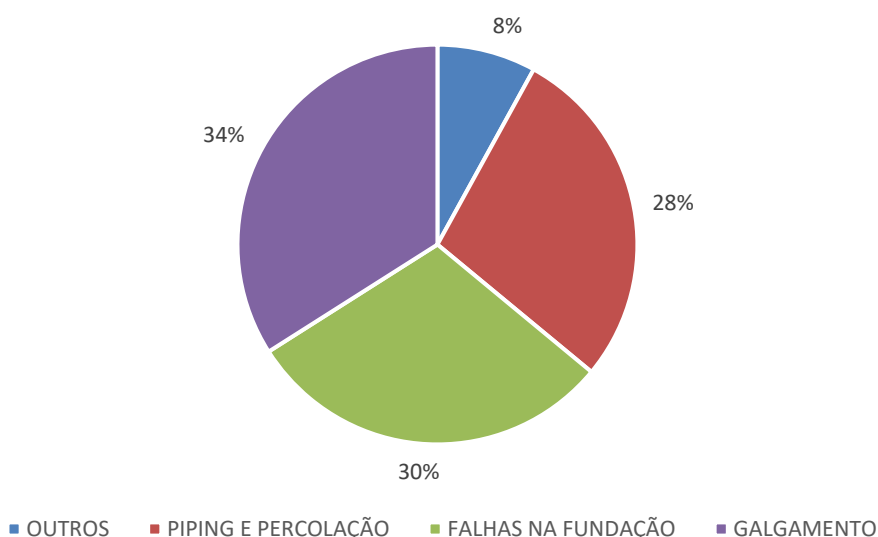
Note que a correlação apresentada é apenas uma discretização simplória da avaliação do solo para a fundação de uma barragem. Outros critérios importantes também devem ser considerados nessa avaliação, como o tamanho da estrutura e a quantidade de água que irá ser barrada no reservatório.

2.2.3. Patologias em fundações de barragens

De maneira geral, acidentes em barragens costumam acontecer em decorrência do desenvolvimento de comportamentos anômalos da estrutura construída. A origem dessas situações pode ser apontada em diversos momentos ao longo da vida de uma barragem, incluindo a fase de projeto. No entanto, o primeiro enchimento do reservatório barrado costuma ser a fase mais problemática da barragem, pois é nesse momento que erros de projeto são evidenciados a partir da utilização da barragem. Dessa maneira, os principais acidentes costumam ocorrer nos primeiros dez anos de vida da barragem (CIGB, 1995). Os problemas existentes podem afetar o barramento da estrutura e seus elementos adjacentes.

A fundação da obra costuma ser afetada por um principal problema: o fluxo de água através do material do maciço. Quando afetada por esta patologia a barragem compromete uma de suas principais funções enquanto estrutura que é de controlar o fluxo de água para uso específico. Massad (2003) aponta que a patologia em questão ainda pode ocasionar uma série de outros problemas que afetam diretamente a segurança e estabilidade do barramento. No entanto, cabe salientar que a percolação de água através da fundação é natural, já que o material não é totalmente impermeável. Dessa maneira, sempre haverá passagem de água. O problema reside quando esse fluxo é elevado e não controlado. Ferreira (2015) informa que a segunda principal causa de rompimento em barragens decorre de problemas ocorridos na fundação como indica o Gráfico 1 que apresenta levantamento realizado com acidentes ocorridos em barragens desde o último século.

Gráfico 1 – Causa de rupturas em barragens

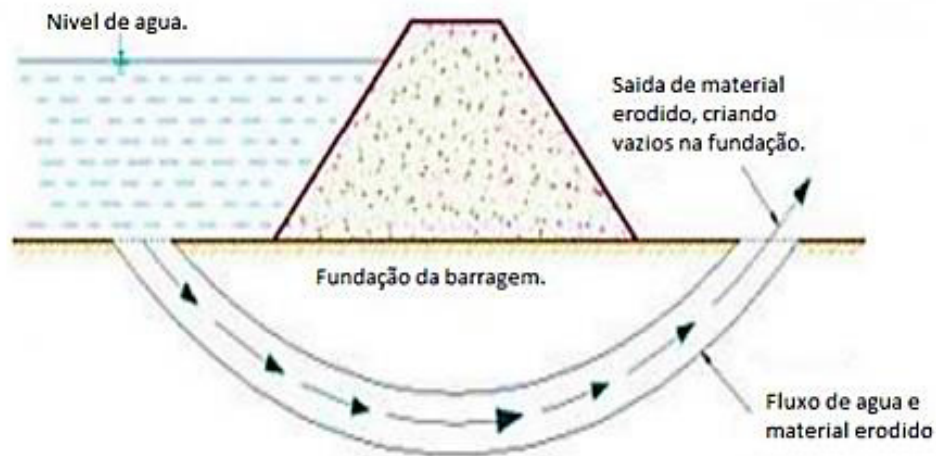


Fonte: Ferreira (2015).

Surgência, erosão e *piping* são os principais problemas acarretados pela passagem de água através da fundação. A surgência se caracteriza pela presença não esperada de água a montante da estrutura. Tal fluxo pode ocorrer pelo corpo da barragem ou através de sua fundação. O material encharcado tem suas propriedades alteradas, logo, a coesão entre as partículas fica comprometida. Ao longo desta seção iremos elencar possíveis causas para tal comportamento. Na sequência, a erosão, que pode ser considerada consequência da surgência. ICOLD (2017) define que essa patologia ocorre justamente devido ao movimento da água que surge em local inesperado e nesse caso trata-se de uma ação física de caráter mecânico. O volume de líquido

carrega as partículas do solo afetando a resistência e forma do local de ocorrência. Vale salientar que tal situação pode ocorrer naturalmente em outro elemento da barragem. Os taludes do barramento podem ter sua estabilidade comprometida devido às chuvas na região. Por fim, Goodarzi (2010) explica que o *piping* ou erosão interna é uma variação da anomalia citada anteriormente. Este problema ocorre quando o fluxo de água através da fundação ou corpo da barragem se eleva formando tubos que carregam material da estrutura podendo ocasionar sua ruptura. A Figura 6 ilustra o problema descrito que pode atingir a fundação e o barramento do reservatório.

Figura 6 - Representação da ocorrência de piping na fundação de uma barragem.



Fonte: Fread (1991), modificado.

As causas para ocorrências de problemas citados são diversas e podem ser originadas por vários fatores. A seguir alguns exemplos de condições que contribuem para o aumento do risco da ocorrência dessas patologias na fundação das barragens apontados por FEMA (2015) e ICOLD (2017):

- Alteração da carga d'água presente na barragem superando quantidades previstas em projeto;
- Falta de manutenção no sistema de drenagem existente que pode acarretar no entupimento desses itens;
- Recalque do barramento causado por comportamento não previsto da fundação que causa abertura de fissuras permitindo a passagem de água;
- Fatores externos como chuvas, terremotos e deslizamentos de terra;
- Erros no dimensionamento da estrutura.

Além disso, Zhang *et al.* (2016) explicam que a passagem elevada e descontrolada de água

através da fundação pode ser causada por condições intrínsecas ao solo em que se constrói a barragem, por intermédio de fissuras e aberturas já existentes. Os estudos geológicos desse material possibilitam a identificação de suas características e avaliação dos riscos inerentes à construção de uma barragem no local estudado (Cruz, 1996). Tal ação possibilita a adequação do projeto a partir da implementação de estruturas e ações para controle do fluxo na região ou até mesmo decidindo por mudanças no local de execução.

2.2.4. Fluxo em fundações de barragens

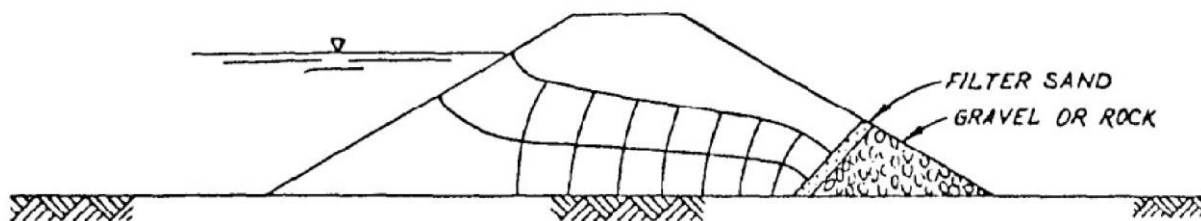
O controle de fluxo de água através da fundação pode ser realizado a partir de duas ações: tratamentos para redução da permeabilidade do solo/ rocha que forma a fundação ou construção de elementos que aumentem o caminho de percolação na fundação (Massad, 2003). A seguir iremos tratar do fluxo de água em fundações de rochas e então discutir essas maneiras que possibilitam o controle do fluxo.

2.2.4.1. Fluxo bidimensional

Ao se analisar barragens de terra, o fluxo observado é considerado como bidimensional. Este se caracteriza pelo movimento das partículas de água seguindo caminhos curvos, mas contidos em planos paralelos, como detalha Massad (2003). A percolação do maciço da barragem e da fundação assume esse comportamento e ocorre em um único plano.

O estudo do fluxo bidimensional pode ser realizado a partir de representações gráficas que apresentam os caminhos que a água percorre, ou seja, representam o fluxo que passa por um meio poroso. Tais representações são denominadas redes de fluxo. A concepção de redes de fluxo se caracteriza por um conjunto de linhas de fluxo e linhas equipotenciais que formam ângulos de 90° em seus cruzamentos. Cruz (1996) esclarece que nos solos isotrópicos - propriedades iguais em todas as direções - e homogêneos, as linhas de fluxo e equipotenciais formam figuras que são basicamente “quadrados”. Como representado na Figura 7, uma linha de fluxo é uma linha pela qual uma partícula de água desloca-se de montante para jusante, através do solo permeável, enquanto uma linha equipotencial basicamente é uma linha que em todos os seus pontos possui o mesmo valor de carga potencial. Ademais, é possível determinar a vazão que percola em um maciço a partir da análise das redes de fluxo deste e do conhecimento das características geotécnicas do solo que compõem a estrutura.

Figura 7 - Linhas de fluxo e equipotenciais em seção homogênea.



Fonte: *U.S. Corps of Engineers* (1993).

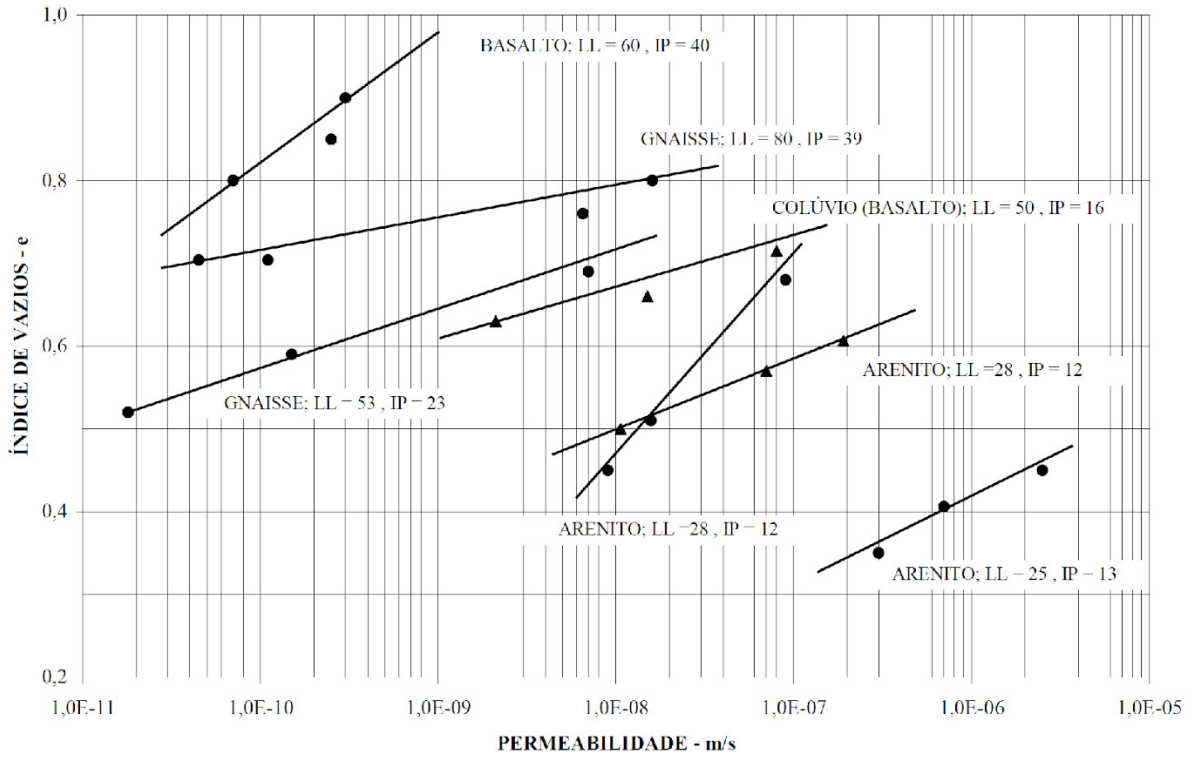
2.2.4.2. Permeabilidade da fundação

A permeabilidade é a propriedade inerente a todos os tipos de solo de permitir a passagem de água através dele (Caputo, 2015). Em obras de barragens o conhecimento deste parâmetro é imprescindível a fim de garantir seu bom funcionamento no controle do fluxo de água. Lambe e Whitman (1969) apontam que este parâmetro é influenciado pelas seguintes características do solo: índice de vazios, temperatura, estrutura do solo, grau de saturação e estratificação do solo. Sobre a última propriedade Massad (2003) diz:

Nem sempre é possível idealizar, isto é, simplificar problemas de engenharia supondo a presença de um único solo homogêneo. Existem muitas situações práticas, em que o solo de fundação se apresenta estratificado, por exemplo, com a ocorrência de camadas de solo de fundação com diferentes permeabilidades.

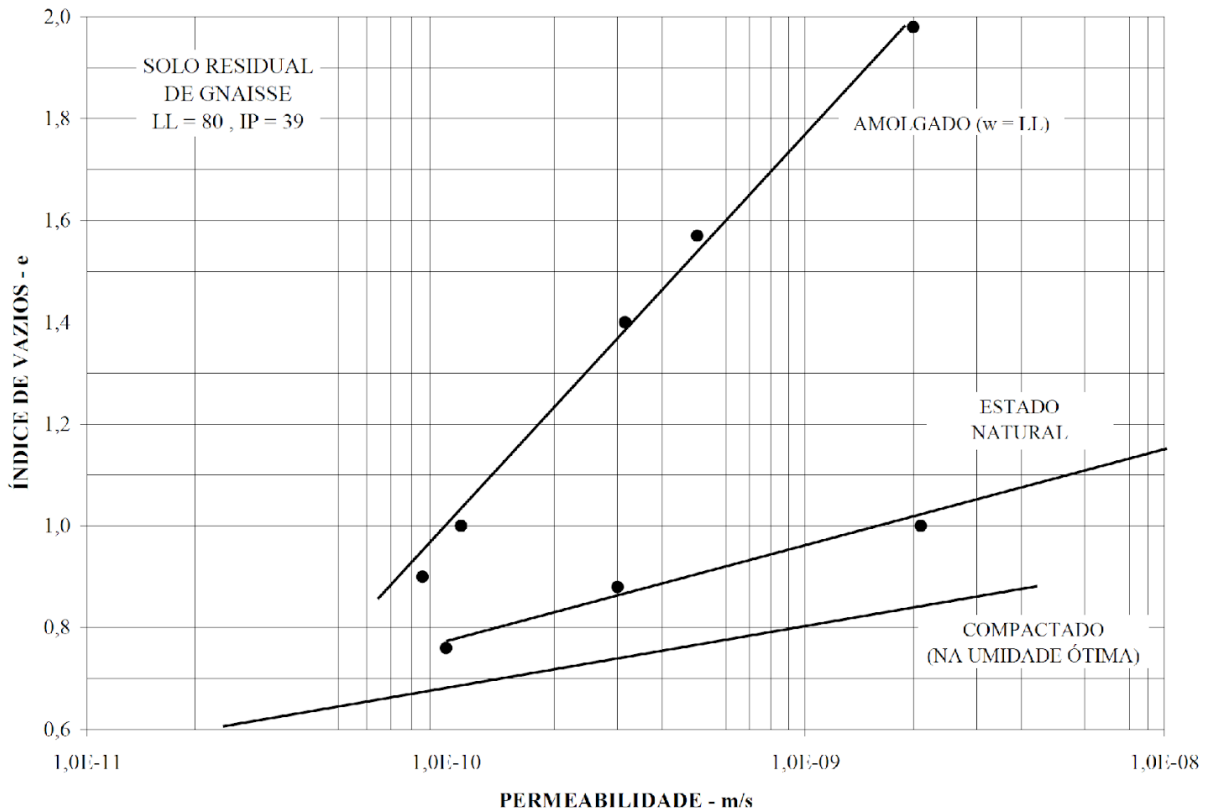
As Figuras 8 e 9 apresentam valores de permeabilidade obtidos em estudos realizados por Vargas (1977). A pesquisa apresentou correlação entre a permeabilidade e o índice de vazios em solos de origem sedimentar, ou seja, em solos formadas pelo acúmulo e posterior diagênese de grãos minerais ou partículas de rocha com mais de 50% de grãos com tamanho entre 2 mm (areia muito grossa) e 0,06 mm (areia muito fina) (ABGE, 1998). Além disso, o estudo demonstrou a variabilidade da permeabilidade em um mesmo tipo de solo a partir da variação do seu estado de compactação.

Figura 8 - Resultados de ensaios de permeabilidade em solos residuais.



Fonte: Vargas (1977).

Figura 9 - Correlações k x e para o mesmo solo em estados diferentes.



Fonte: Vargas (1977).

Gama (2012) aponta que em fundações de rocha o fluxo de água ocorre principalmente através das fraturas existentes. As fraturas formam uma rede de fluxo que possibilita a percolação. A quantidade de água e velocidade de passagem muda em decorrência das seguintes características:

- Número de fissuras;
- Tamanho das descontinuidades;
- Existência e do tipo de material que preenche as fissuras;
- Rugosidade das paredes das fissuras.

Dessa maneira, a avaliação litológica da rocha se torna essencial para avaliar a percolação. A determinação da permeabilidade em solos pode ser realizada a partir de uma série de ensaios. Massad (2003) resume os ensaios na seguinte listagem:

- Ensaios em laboratório que utilizam permeômetros;
- Ensaios *in loco*.

Os ensaios com permeômetro podem ser realizados mantendo o nível constante ou em níveis variáveis. O ensaio com nível constante costuma ser realizado para medir a permeabilidade dos solos granulares, os quais apresentam valores de permeabilidade maiores. Este ensaio conta com dois reservatórios onde os níveis de água são mantidos constantes. Durante certo tempo, a água percolada através desses reservatórios é colhida e o seu volume é medido, como aponta Massad (2003). Quando o coeficiente de permeabilidade é muito baixo, a determinação pelo permeômetro de carga constante é difícil e pouco precisa.

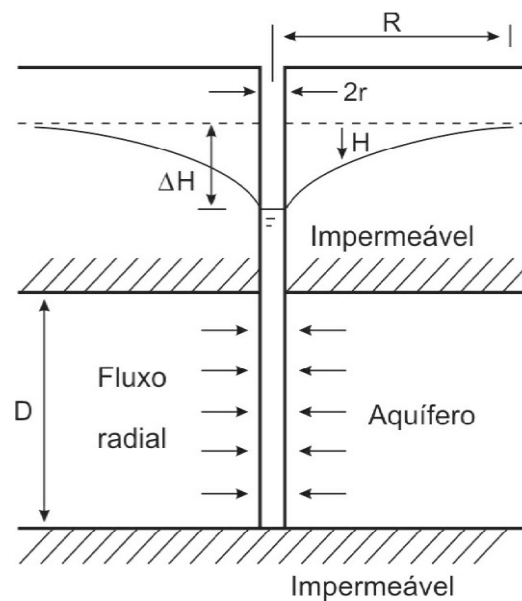
No ensaio em laboratório com a carga variável medem-se os volumes de água que passam em coluna de água acoplada em reservatório que contém o solo em análise obtidos. As medições são realizadas para diversos valores de tempo decorrido desde o início do ensaio. Este tipo de procedimento é recomendado para aferir a permeabilidade de solos finos, nos quais o volume d'água que percola através da amostra é pequeno (Dourado, 2003).

A permeabilidade do material pode ser encontrada através dos seguintes ensaios *in loco*: ensaio de bombeamento ou pelo ensaio de tubo aberto. Massad (2003) explica que o ensaio de tubo aberto se caracteriza pela escavação de um poço e cravação de revestimento, posteriormente, segue-se com enchimento do furo com água até a boca, limite superior do furo. Durante a realização do ensaio, mantém-se este nível de água constante anotando-se a vazão.

O ensaio de bombeamento resume-se em esgotar-se a água de poço aberto no terreno estabelecendo-se um escoamento uniforme. Dessa forma, mede-se a descarga do poço e observa-se a variação do nível d'água em piezômetros colocados no local. O poço para bombeamento deve

penetrar em toda a profundidade da camada ensaiada e com diâmetro suficiente para permitir a inserção de uma bomba com tipo e capacidade necessária à atividade. As hipóteses básicas para realização deste ensaio são: o poço de bombeamento penetra em toda a espessura da camada permeável e existe escoamento uniforme. Kamra e Rao (1985) define que estes ensaios de campo refletem melhor as propriedades *in loco* do que os métodos de laboratório. Dessa maneira, obtêm-se resultados mais precisos e confiáveis do coeficiente de permeabilidade. A Figura 10 mostra o esquema para realização do ensaio de bombeamento.

Figura 10 - Ensaio de permeabilidade: bombeamento.



Fonte: Massad (2003).

2.2.4.3. Elementos para controle do fluxo na fundação

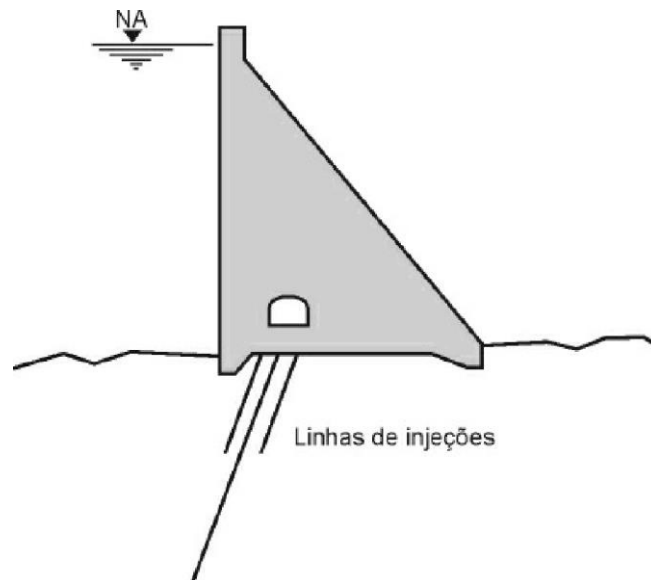
A fundação de uma barragem pode receber tratamento que lhe permite melhorar sua permeabilidade, conferindo-a concordância com parâmetro solicitado no projeto. Silveira *apud* Souza (2013) defende que ações para controle imediato da percolação devem ser realizadas em barragens cuja fundação apresente vazão superior a 0,8 l/s/m. Nesse sentido, Massad (2013) aponta duas estratégias para controle da percolação através da fundação, são elas: reduzir a permeabilidade das fundações ou aumentar o caminho de percolação na fundação. As duas estratégias se ramificam em métodos diferentes que se adequam a diferentes cenários. Sobre a importância de aplicação desses métodos, Massad (2003) explica:

A importância de obter características adequadas da fundação é imensurável, já que aproximadamente 40% das falhas em barragens de terra são atribuídas a falhas na fundação (United States Bureau of Reclamation, 1973). Hoje se disponibiliza de várias formas de tratamento das fundações de barragens, que abrangem desde estabilidade até controle da percolação.

Na redução da permeabilidade do solo têm-se as injeções de cimento. As injeções de calda ou nata de cimento são feitas em furos de sondagem rotativa. Segundo Hernandez e Colmanetti (2003), esse procedimento se caracteriza pelo preenchimento das fissuras presentes no solo ou rochas que formam a fundação, a fim de maximizar a estanqueidade do local diminuindo a permeabilidade, sem que haja substituição do solo. Costa (2012) explica que o método reduz a permeabilidade do solo a partir do preenchimento dos vazios com a calda enrijecida. A ação, no entanto, não apresenta total precisão, já que, o tamanho e quantidade de fissuras presentes na rocha é apenas estimado. Souza (2013) aponta o exemplo de aplicação desta técnica na barragem Jaburu I, localizada no estado do Ceará. A estrutura recebeu injeções de pasta de cimento para preencher os vazios de sua fundação, no entanto, a quantidade de material depositada não foi suficiente para impedir o fluxo de água e posterior carregamento do material injetado.

Sobre o método de aplicação desta solução, a Figura 11 apresenta esquema de execução da injeção formando uma cortina na fundação. Nesse sentido, Cruz (1996) descreve que o procedimento se inicia a partir da realização de furos com posterior aplicação de concreto. A aplicação pode formar uma linha única ou tripla de injeções.

Figura 11 - Representação esquemática das injeções de concreto na fundação de barragem.



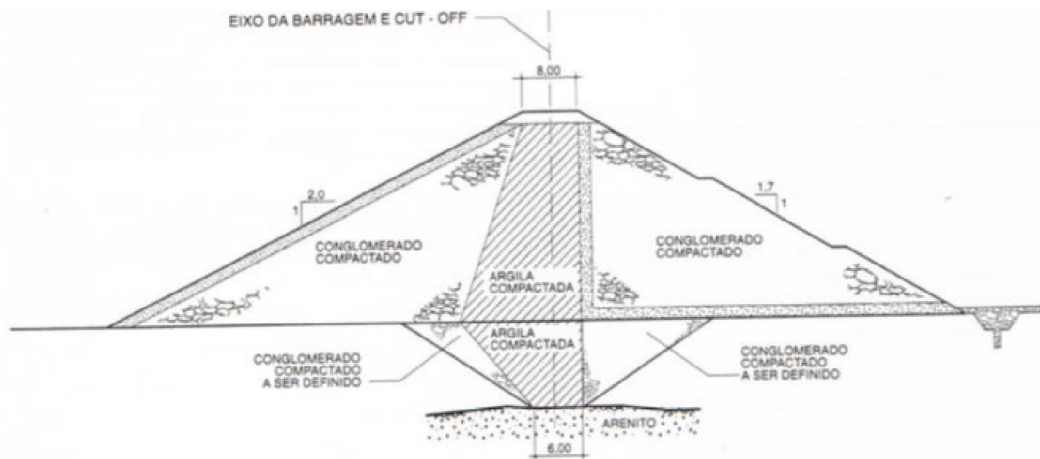
Fonte: Massad (2003).

O controle da percolação também pode ser realizado a partir da execução de barreira única que aumento o caminho de percolação na fundação (Massad, 2003). Dentre os principais elementos utilizados cita-se: trincheira de vedação, poços de alívio, tapete impermeável e parede diafragma. Tais estruturas se diferenciam das técnicas citadas anteriormente pois são barreiras

físicas executadas na barragem.

A execução de trincheiras de vedação ou *cut-off* busca aumentar o caminho de percolação na fundação através de elemento físico construído na camada de solo que ultrapassa a camada com maior permeabilidade até a profundidade do solo mais estanque. Nesse sentido, infere-se que o insucesso da execução destes elementos no controle de vazão na fundação ocorre quando estas não atravessam toda a camada permeável ou quando o material que forma o cut-off não apresenta permeabilidade inferior à da camada de fundação mais superficial. Massad (2003) explica que estes elementos são construídos utilizando material com boa compactação para atingir os níveis de impermeabilização esperados. Além disso, cita que em alguns solos a execução deste elemento para controle de percolação não é recomendada, como em solos de decomposição de gnaiss, já que, nesses solos a permeabilidade da camada cresce em maiores profundidades. Ademais, o uso deste artifício no controle da percolação pode requerer esgotamento ou rebaixamento do lençol freático no local para permitir a escavação e boa compactação da trincheira. A Figura 12 apresenta exemplo da aplicação da trincheira de vedação no projeto da Barragem do Leão, que fica localizado no estado do Paraná.

Figura 12 - Esquema de aplicação da trincheira de vedação – Seção da Barragem do Leão.

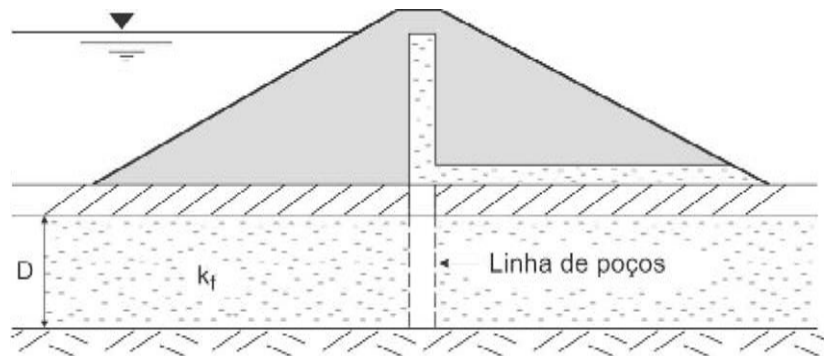


Fonte: Cruz (1996).

Na sequência, os poços de alívio se caracterizam por regiões preenchidas por material com maior permeabilidade que o solo da fundação. Os poços objetivam impedir a passagem de água para jusante retendo o líquido que o atravessa, nesse sentido, o material utilizado na construção dos poços precisa possuir maior permeabilidade que o solo no entorno. Estes elementos costumam ser construídos no meio da seção da barragem ou mais a jusantes, próximo ao pé do

talude da estrutura. Massad (2003) aponta que os poços podem ser executados com diâmetros de 20 a 50 cm e espaçamentos de 2 a 4 m. A Figura 13 apresenta esquema da aplicação de poços de alívio no projeto de barragens.

Figura 13 - Execução de poço de alívio no centro da seção de uma barragem.



Fonte: Massad (2003).

Os tapetes impermeáveis são executados no nível do pé da barragem a montante. Esses elementos realizam o controle da vazão na fundação a partir da construção de barreira física que possibilita a criação de um caminho maior para fluxo da água até que ele atravesse a fundação e chegue à jusante do barramento. O elemento pode ser realizado com seções retangulares ou triangulares e são construídos utilizando material de menor permeabilidade a fim evitar a percolação (Massad, 2003).

Por fim, tem-se a parede diafragma que se caracteriza como um muro vertical de profundidades e espessuras variáveis, constituídos de painéis elementares alternados ou sucessivos que aumentam o caminho de percolação na fundação. Dessa forma, a estrutura evita a percolação na fundação da barragem conforme informações de Assis *et al.* (2003). Estes podem ser construídos utilizando dois equipamentos diferentes, são eles: o *clamshell* e a hidrofresa. Este elemento será melhor discutido nas próximas seções.

Ademais, vale salientar que os métodos descritos previamente não possibilitam a total impermeabilização da fundação, já que todo material apresenta permeabilidade. A aplicação destas técnicas visa reduzir a vazão no local até que esta atinja valores aceitáveis, evitando a ocorrência dos problemas já citados (Cruz, 1996).

2.3. Parede diafragma

Nesta seção pretende-se explicar a definição de parede diafragma partindo da conceituação de muro de contenção. Além disso, apresenta-se o método para dimensionamento e execução destas estruturas, nesse sentido, detalha-se um dos equipamentos utilizados na construção.

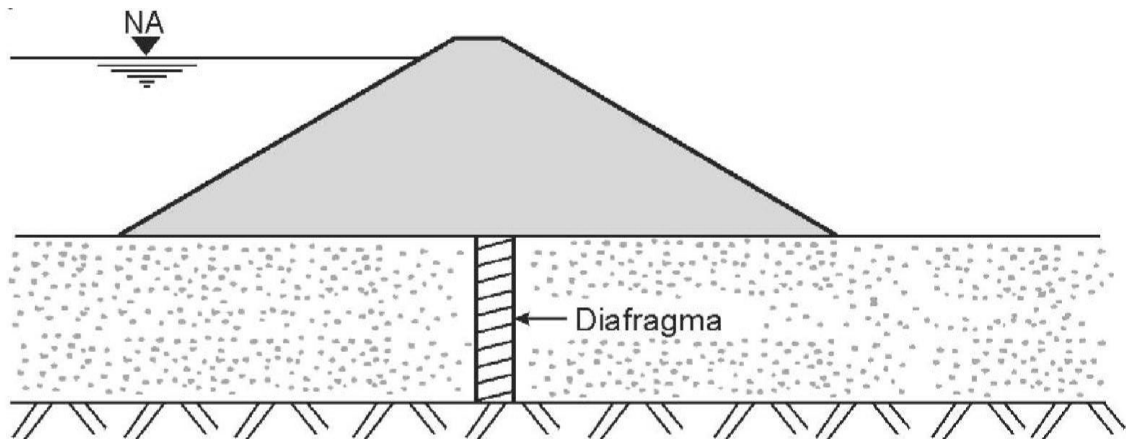
2.3.1 Definição e detalhes de projeto

Em obras subterrâneas a necessidade de contenção da massa de solo demanda a construção de elementos físicos que a estabilizam, dessa maneira, os muros de contenção realizam tal atividade impossibilitando o movimento do solo e promovendo segurança durante a execução da obra. Estes elementos se qualificam como uma estrutura corrida e vertical, ou quase vertical, capaz de impedir o deslizamento ou de ruptura da camada de solo barrada (NIMIR, 1979). Sua execução pode ser realizada em concreto armado, alvenaria, pedras, ou elementos especiais, como explica Hachich (1998). Seu formato varia em função da necessidade de projeto, mas os muros mais comuns são os de perfil trapezoidal, escalonado ou retangular. Nessa perspectiva, nasce o conceito de parede diafragma.

A parede diafragma é constituída de painéis construídos no subsolo por meio de trincheiras escavadas. A união dos elementos forma um muro vertical contínuo que estabiliza a massa de solo. A escavação das trincheiras pode ser realizada a partir do uso de equipamentos como o Clamshell Hidráulico ou Hidrofresa.

Hachich (1998) explica que a contenção pode ser executada com elementos de espessura entre 0,40 m a 1,20 m, entretanto, em casos especiais a parede pode possuir até 2,40 m de espessura. Tal definição advém das necessidades previstas no projeto. Em barragens as paredes diafragma são elementos que eliminam ou reduzem a percolação de água em uma região a valores desprezíveis. Dessa maneira, são de baixa permeabilidades. A parede diafragma, quando inserida no sistema de uma barragem, impõe um percurso da água de montante para jusante mais longo. Logo, provoca a perda da carga hidráulica e, conseqüentemente, um decréscimo do valor das subpressões e vazões aferidas a jusante. A Figura 14 ilustra o esquema de inserção parede diafragma na fundação de barragem.

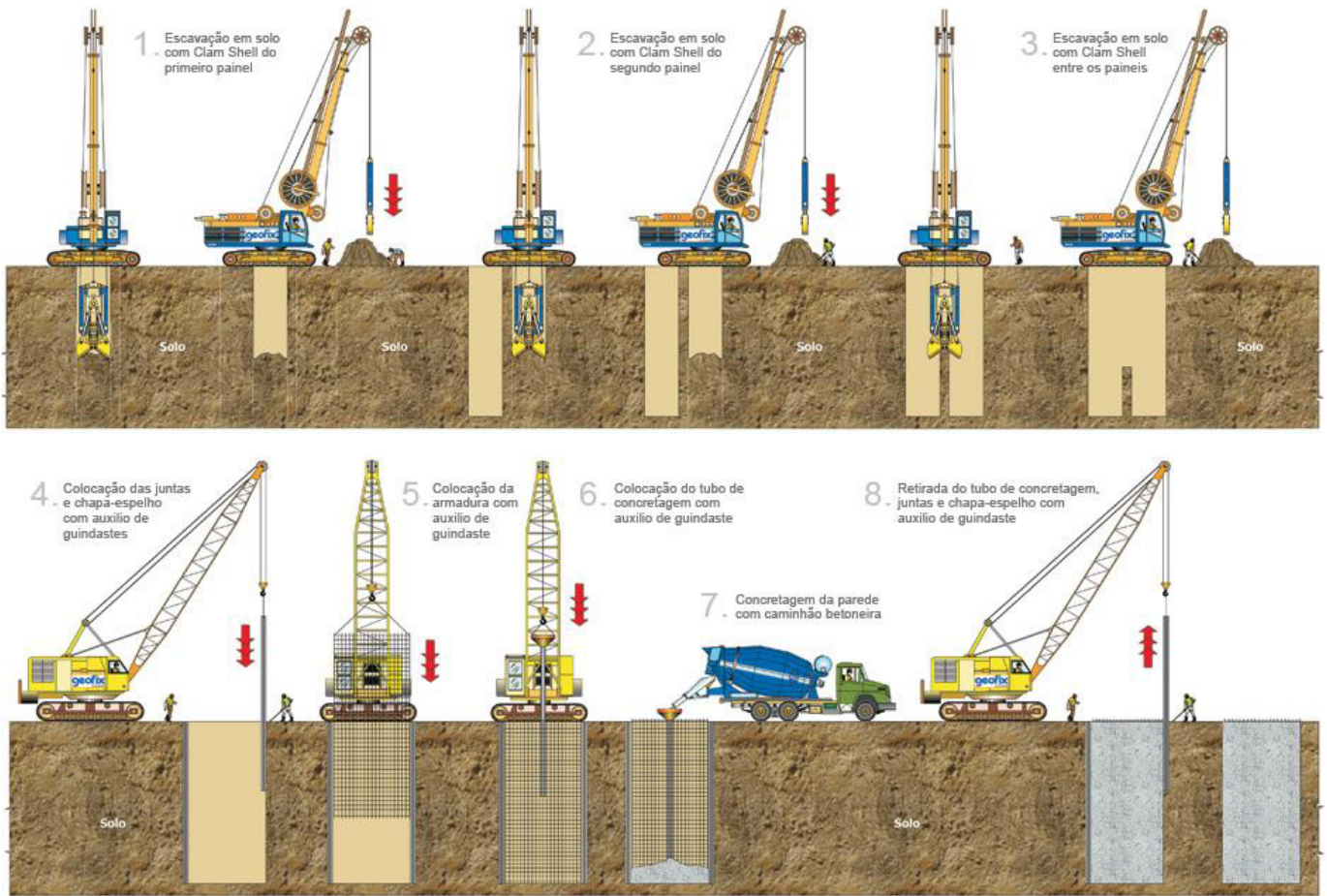
Figura 14 - Parede Diafragma para controle de percolação na fundação.



Fonte: Massad (2013).

A execução desses elementos parte da escavação de uma vala com emprego de equipamentos e ferramentas de escavação apropriados e posterior preenchimento da vala com calda de cimento e bentonita, misturas de solo e cimento ou solo, cimento e bentonita e até mesmo concreto. Durante a escavação, conforme a necessidade do projeto, elementos estruturais de escoramento podem ser introduzidos ao corpo da parede, dependendo da necessidade do projeto. As mais comuns são estroncas, tirantes ou perfis metálicos. A escavação e o preenchimento da vala são feitos por painéis verticais alternados. As verificações de estabilidade de um muro de contenção devem garantir que a parede não sofra deslizamento da base, tombamento e deve ser estável quanto à capacidade de carga do solo. As lamelas podem ser executadas acima ou abaixo do nível da água e em qualquer tipo de solo (Fell *et al*, 2015). A Figura 15 apresenta o esquema para execução da parede diafragma utilizando o *clamshell*.

Figura 15 - Esquema do método construtivo convencional de uma parede diafragma.



Fonte: Geofix (2022).

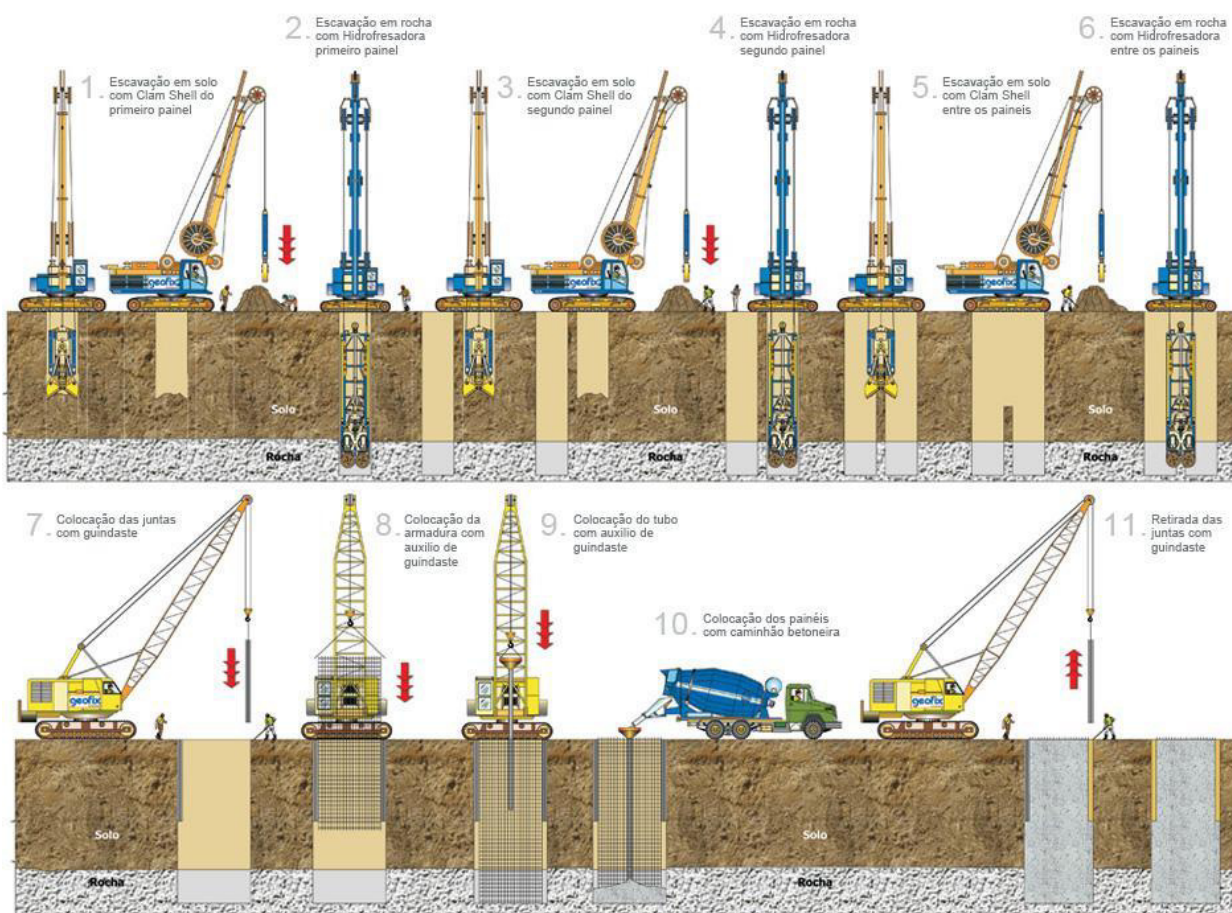
2.3.2. Hidrofresa

Hidrofresa é um equipamento utilizado nas atividades de escavações, principalmente na construção de paredes diafragma. Este é indicado para escavação de solos rígidos e rochas, ou seja, para situações onde um clamshell mecânico ou hidráulico não pode ser utilizado. Sua utilização no Brasil foi iniciada em meados de 2009 (NAKAMURA, 2013). O aparelho é formado por dois motores hidráulicos instalados na parte inferior da estrutura em uma estrutura de aço rígido, que giram alinhadamente no sentido horizontal e em direções opostas e com uma bomba de alta capacidade de sucção. A utilização do equipamento permite escavações de até 120 m de profundidade (BRASFOND, 2022).

Marote (2008) explica que o equipamento de perfuração de hidrofresa está baseado numa

estrutura pesada de aço com duas rodas de corte localizadas num plano vertical na parte inferior. O acionamento hidráulico das rodas, com rotação em sentidos contrários, combinado com o empuxo vertical ligado ao peso da ferramenta, faz o corte do solo que, misturado com a lama de perfuração, é bombeado para a estação de tratamento pela bomba de sucção instalada na hidrofresa. Na estação são separados os detritos e a lama é reciclada e transferida aos tanques de armazenamento para posterior bombeamento para a perfuração. A perfuração com hidrofresa, ao contrário do que acontece com todos os sistemas convencionais de perfuração com equipamentos de caçamba tipo “clam-shell”, é um processo contínuo e perfeitamente estruturado. A Figura 16 apresenta o esquema para execução da parede diafragma utilizando a hidrofresa.

Figura 16 - Esquema do método construtivo com hidrofresa.



Fonte: Geofix (2022).

2.3.2.1. Avaliação do uso de uma hidrofresa para execução de parede diafragma

Aqui verifica-se as implicações geradas a partir do uso da hidrofresa para execução de parede diafragma. Para isso utiliza-se a bibliografia disponível sobre o tema, mais especificamente dados da aplicação desta técnica para execução do elemento citado em barragem de usina hidrelétrica localizada na cidade de Estreito – MA. A estrutura executada em 2010 que foi pioneira no uso da hidrofresa na execução de parede diafragma (Godoi *et al*, 2016), além disso, está passou por intensa análise de dados que detalharam procedimentos adotados e resultados obtidos.

A barragem principal da UHE Estreito, localizada no Rio Tocantins, foi construída em conjunto com parede diafragma executada por hidrofresa. O barramento apresenta uma altura máxima de 42,5 m e um comprimento total de 536,0 m. A crista da barragem apresenta largura de 8,0 m, com inclinação dos taludes de montante e de jusante de 2 H:1 V. A parede foi introduzida na fundação da estrutura devido à natureza da fundação da barragem que apresentava permeabilidades entre 10^{-4} m/s e 10^{-2} m/s (Godoi *et al*, 2016). Além disso, pela não adequabilidade de outras soluções para controle de percolação, como trincheira de vedação e injeções, já que, a camada de solo com baixa permeabilidade era espessa e apresentava nível de fissuração elevado. A Figura 17 apresenta o arranjo geral da estrutura.

Figura 17 - Arranjo geral da UHE Estreito.



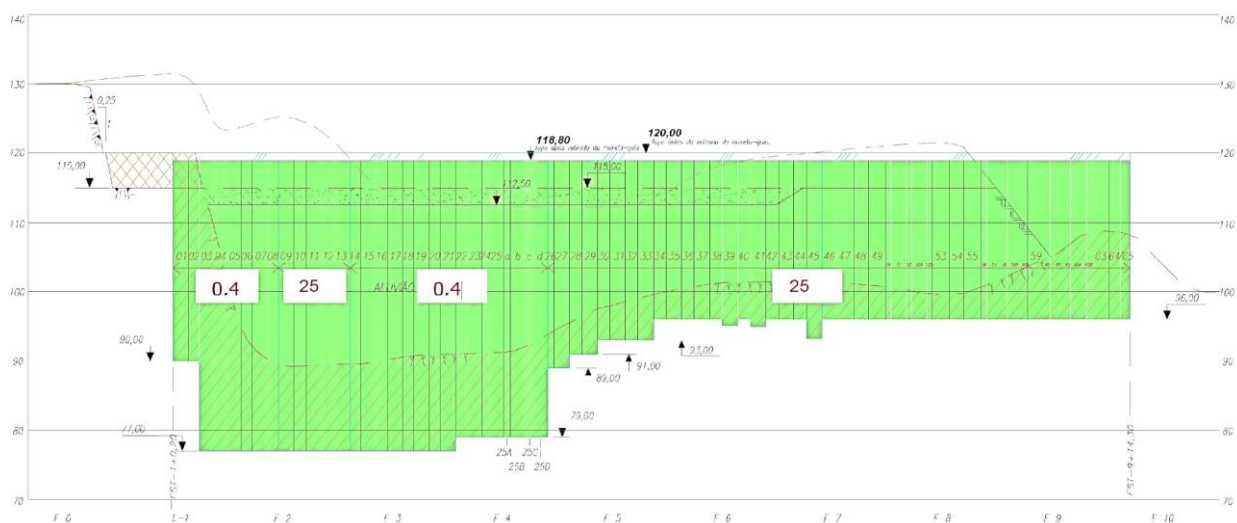
Fonte: Godoi *et al* (2016)

Esta análise seguiu a verificação dos dados disponibilizado por Godoi *et al* (2016) e Azeredo *et al* (2011) sobre a execução da solução delgada na barragem. Azeredo *et al* (2011) explica que a fundação em arenito apresentava permeabilidade variável com a profundidade, além disso, a estratificação do solo não seguia camadas horizontais. Dessa maneira, os elementos que compunham a parede diafragma construída apresentavam alturas variáveis. A Figura 18 demonstra o perfil final da parede diafragma construída na barragem. Nota-se a ocorrência de elementos que ultrapassaram 41 m de altura, além disso, que a estrutura foi executada em um trecho de aproximadamente 174 m. O equipamento ainda pode realizar escavações em até 120 m de profundidade (Brasfond, 2022).

O uso do equipamento hidrofresa na execução proporcionou rapidez na execução da estrutura. Godoi *et al* (2016) especifica que sua construção se iniciou em 04 de junho de 2010 e seu término ocorreu em 28 de julho de 2010, dessa maneira, a execução da obra durou 54 dias. Considerando o tamanho do trecho executado infere-se que a cada um dia de trabalho, 3 metros de extensão da parede diafragma eram executados.

Azeredo *et al* (2011) descreve que o elemento construído atingiu permeabilidade de $1,96 * 10^{-9} \text{m/s}$ demonstrando bom índice de estanqueidade. Vale salientar que não é possível afirmar que esse nível de impermeabilização foi atingido especificamente devido ao uso do equipamento citado. Já que este apenas realiza a escavação *in loco*, dessa forma, não interfere diretamente nos parâmetros do solo.

Figura 18 - Perfil final da parede diafragma plástica.



Fonte: Azeredo *et al* (2011).

2.4. Instrumentação em barragens

Barragens são estruturas onerosas feitas para durar por bastante tempo. Sua vida útil pode ultrapassar 100 anos dependendo das condições de uso e conservação. Para maximizar esse tempo e garantir perfeito funcionamento da estrutura conforme determinado em projeto, o monitoramento contínuo se torna essencial para a identificação de problemas presentes no sistema represador, como aponta Cruz (1996). Essa atividade pode ser realizada com uso de aparato tecnológico e inspeção visual *in loco* que verifica o comportamento da estrutura desde de sua construção até a operação conforme explica Lima e Alarcon (2003). Além disso, tal ação é essencial para evitar eventuais catástrofes por meio da identificação prévia de patologias.

Os dados recolhidos a partir dos instrumentos permitem propor medidas consistentes a serem tomadas para corrigir problemas identificados ou aprimorar o funcionamento da estrutura e até mesmo reavaliar suas condições de segurança. USACE (1995) indica que nessa verificação são recolhidos valores dos deslocamentos da estrutura, deformações e tensões sofridas, temperatura no barramento, níveis piezométricos nas fundações, vazão na barragem e elementos adjacentes. A seleção de equipamentos, ou seja, o tipo de monitoramento e sua frequência dependem diretamente das características da estrutura que será verificada, suas dimensões e material utilizado para construção. Além disso, elas se adequam ao momento em que a barragem se encontra - fase de construção, primeiro enchimento, fase de operação.

Para melhor controle dessas ferramentas é importante o alinhamento de todas as descrições dos instrumentos. Nessa perspectiva, Silveira (2006) destaca que os limites de projeto para os valores que serão aferidos a partir da instrumentação devem ser esclarecidos, assim como, seus dados e requisitos para sua calibração, faixas normais de operação e níveis de alarme, valores para os quais uma revisão detalhada das leituras é necessária. Além disso, as responsabilidades devem ser atribuídas para leituras rotineiras dos instrumentos, mudanças de leituras iniciais, calibração e interpretação dos resultados.

As inspeções de rotina constituem uma ação fundamental na segurança da barragem com visita aos locais e inspeção visual das instalações. Já que, só a instrumentação presente no local não garante total assertividade na identificação de problemas e adoção de medidas ou intervenções em caráter emergencial. Isso pode ser ilustrado com dois exemplos detalhados a seguir. São exemplos de patologias que exigem verificações complementares além da aferição dos instrumentos.

- Situação 1: Em situações onde se identifica fluxo nos elementos de drenagem do barramento associado a aumentos repentinos de vazão. Além disso, há forte coloração na água, com indícios de carreamento de partículas sólidas indicando ocorrência de erosão interna. Tal patologia não seria notada facilmente a partir do instrumento presente no local.
- Situação 2: Em barragens de concreto há possibilidade de ocorrência de reações álcali-agregado. Nesses processos ocorre a fissuração a partir da expansão do concreto causada pela reação entre os constituintes do agregado presente no concreto dissolvido na água que penetra nos poros da estrutura. A inspeção visual pode ajudar na identificação prévia desta patologia antes dos deslocamentos diferenciais causados pelo gel expansivo.

Os instrumentos utilizados nas medições se diferenciam de acordo com a característica aferida. As principais informações avaliadas são: vazões, deslocamentos e tensões (Dunnicliff, 1988). O Quadro 1 apresenta os principais instrumentos utilizados para medição das características citadas com o intuito de ilustrar a disponibilidades de itens. Nos próximos tópicos serão discutidos em mais detalhes os instrumentos para medição das vazões e para medição de subpressões, já que itens estão diretamente ligados ao problema de percolação de água.

Quadro 1 - Instrumentação em barragens

Característica avaliada:	Instrumento utilizado:
Vazão	Medidor Triangular
	Calha Parshall
Deslocamentos	Placas com Tubos Telescópicos
	Marcos Superficiais
	Medidores KM
	Medidores Magnéticos
	Medidores USBR
Tensões	Células Totais
Subpressões e Pressões Neutras	Piezômetro de Tubo Aberto

Fonte: Fell *et al.* (1992)

Como dito anteriormente, as medições e instrumentos utilizados são determinados pelo tipo de barragem construído, como descrito por Mello (1975). Em barragens de concreto seja por gravidade, arco ou contraforte costuma-se verificar as subpressões que ocorrem no contato entre o barramento e a fundação, temperatura do concreto durante a execução e operação da barragem

a fim de evitar a ocorrência de retração e, além disso, mede-se os deslocamentos presentes no barramento e recalques que a fundação sofre. Barragem de terra ou enrocamento demandam verificações diferentes, podemos citar: medição das vazões, medição das subpressões na fundação e aferição dos deslocamentos do barramento. Cabe salientar que tais verificações podem também se diferenciar a partir do porte da obra, dessa maneira, quantidades e tipo de instrumentos devem ser selecionados de forma específica considerando as peculiaridades da barragem analisada.

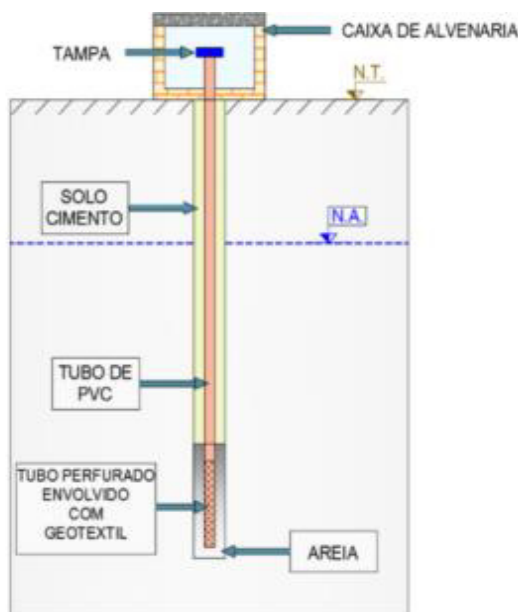
A seguir iremos tratar detalhar alguns dos instrumentos utilizados na chamada manutenção preditiva objetiva que costuma ser efetuada a partir do uso de instrumentos que quantificam o funcionamento da barragem. Esta se diferencia da manutenção preditiva subjetiva que leva em conta os sentidos humanos nas medições.

2.4.1 Instrumentação de subpressões e pressões neutras

Os piezômetros são os equipamentos que permitem a determinação das subpressões presentes em sua fundação e pressões neutras presentes no maciço da barragem (Silveira, 2006). A subpressão é causada pelo movimento da água que se desloca na fundação da barragem gerando empuxo. Este é capaz de fornecer a carga de pressão no ponto onde é instalado em relação ao nível do mar. Existem diversos tipos de piezômetros, tais se diferenciam a partir de seus princípios de funcionamento. Como exemplo de diferentes piezômetros podemos citar: os de tubo aberto (tipo Casagrande), elétricos, de corda vibrante, pneumáticos e hidráulicos (Cruz, 1996).

O piezômetro Casagrande funciona a partir da leitura de uma trena com uma ponteira elétrica que emite sons quando em contato com água, como define Cerqueira (2017). A medida aferida por entre a boca do tubo que forma o piezômetro e o nível d'água indicado pela trena é somada a cota de instalação e dessa forma temos a carga piezométrica em metros no local em que o piezômetro se encontra instalado. A estrutura é mostrada na imagem a seguir que evidencia o isolamento do tubo com solo-cimento.

Figura 19 - Detalhe de um piezômetro tipo Casagrande.



Fonte: Leme (2015).

2.4.2 Instrumentação de vazões

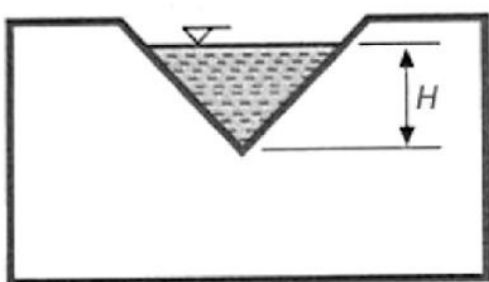
Silveira (2006) define que os medidores de vazão instalados na barragem são equipamento utilizados para aferir a quantidade de água que passa no local em que estão instalados. A análise das variações de vazões da água no barramento e nas estruturas adjacentes - ombreiras e fundação - possibilita a identificação prévia de problemas. As variações bruscas nesses valores podem ser indicativas de: obstrução do sistema de drenagem interno da barragem, erosões internas ou pressões excessivas na estrutura. Dessa forma podemos afirmar que a vazão é indicativa direta do funcionamento da barragem considerando sua principal função - barrar o fluxo de água em um local.

O medidor triangular afere a vazão a partir da leitura direta da altura da lâmina de água acumulada em chapa metálica com abertura triangular. Este instrumento apresenta maior precisão para valores de vazão de até 30 litros por segundo. O segundo instrumento, chamado calha Parshall, utiliza o mesmo princípio do medidor triangular. Os dois instrumentos estão representados nas Figuras 20 e 21. A medição de vazão é realizada a partir da verificação da altura da lâmina de água que se acumula no equipamento e este costuma ser utilizado em canais abertos, conforme explica Azevedo Neto e Alvarez (1977).

Ademais, a verificação das características do fluxo a jusante de uma barragem é

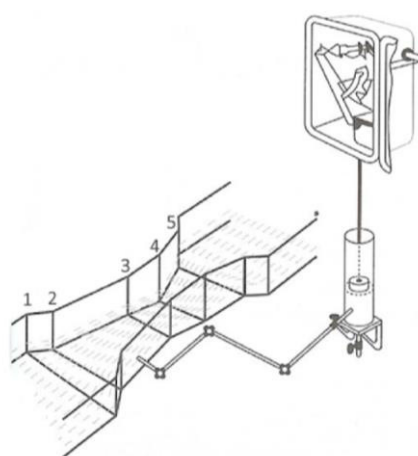
geralmente efetuada em concomitância com o registro de medidas de vazão. Em grandes barragens tais medidas de vazão são geralmente realizadas através da execução de câmaras com vertedores localizadas a jusante da barragem, as quais são instaladas para captação e coleta de águas provenientes de pontos de surgências. Essas câmaras são equipadas com bombas que transportam essa água evitando sua inundação. A água percolada deve ser analisada quanto às suas características físico químicas, pois, tal estudo permite a identificação de algumas patologias como *lixiviação* e *piping*.

Figura 20 - Medidor de Vazão Triangular.



Fonte: Azevedo Netto (2003)

Figura 21 - Detalhe de um medidor – Calha parshall.



Fonte: Azevedo Netto (2003)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresentaremos o método utilizado no desenvolvimento deste projeto. A pesquisa objetiva verificar as implicações da execução de uma parede diafragma construída por hidrofresa na problemática de percolação de água através da fundação de barragem. Esta seção segue a subdivisão nos seguintes processos principais: apresentação de estudo de caso, obtenção e tratamento de dados de instrumentação instalada em barragem, modelagem da estrutura atual, desenvolvimento de projeto de parede diafragma, análise do comportamento hidráulico do sistema e comparação com estado anterior, revisão de desempenho do uso de hidrofresa na UHE Estreito. Vale salientar que essa subdivisão segue as etapas metodológicas para atingir os objetivos específicos apresentados no primeiro capítulo deste estudo.

3.1. Estudo de caso

Para a realização do estudo, estabeleceu-se a barragem Jaburu I como objeto para estudo de caso. Tal escolha deriva da verificação do histórico de ocorrência na estrutura, que ao longo dos anos desde a sua inauguração apresentou comportamento anômalo. Tal método permite o estudo da problemática que é mais ampla a partir da verificação de uma ocorrência específica.

3.1.1. Apresentação

A Serra da Ibiapaba, localizada na porção noroeste do Estado do Ceará, próxima à divisa com o Estado do Piauí, distante 350 km da capital, com altitude de 750 metros, apresenta um potencial natural para as atividades de turismo e irrigação. No entanto, restrições de recursos hídricos que impediam o pleno desenvolvimento destas atividades levaram o Governo do Estado do Ceará, no início da década de 80, a construir a Barragem Jaburu I com uma capacidade de acumulação de 138 milhões de metros cúbicos.

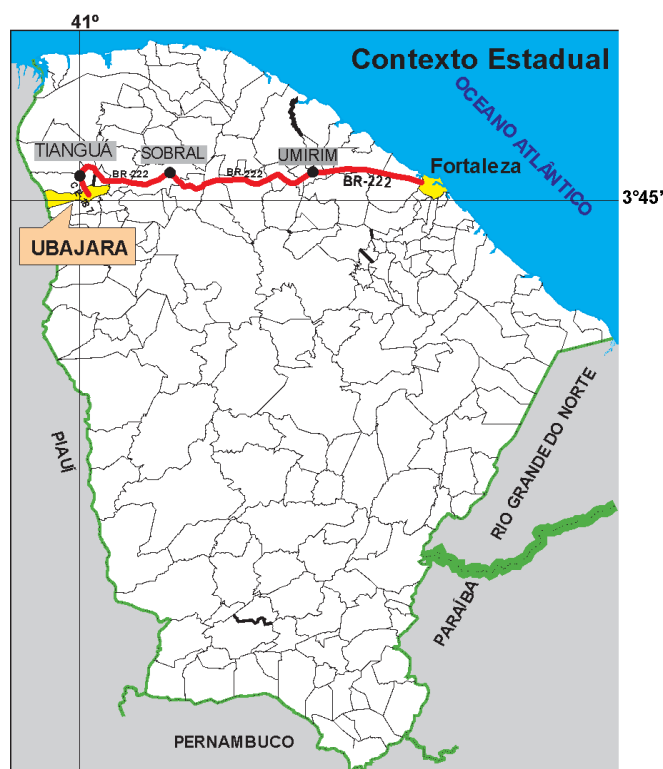
A Barragem Jaburu I foi construída pelo governo estadual entre os anos de 1981 e 1983, no noroeste do Estado do Ceará. A construção desta barragem possibilitou a instalação do Sistema Jaburu I, que incluindo a barragem, estação de tratamento de água, estação elevatória e adutora. Esta desempenha um papel fundamental no abastecimento de água de nove municípios e quinze localidades. Atualmente a estrutura é responsável pelo atendimento de mais de 350.000 habitantes no Ceará, distribuídos em nove municípios e quinze localidades, bem como os projetos de

irrigação e outros municípios no Piauí.

3.1.2. Localização

A barragem de Jaburu I localiza-se no município de Tianguá/Ubajara-CE, próximo ao povoado de Taísa, adjacente à serra Taquari. O acesso à barragem Jaburu I é feito, partindo de Fortaleza, pela rodovia federal BR-222 seguindo no sentido oeste do Estado. Ao passar pelo município de Tianguá, percorre-se cerca de 18 km onde vira-se à esquerda, em estrada de terra, seguindo-se 3 km até chegar à ombreira direita da barragem que está referenciada pelas coordenadas UTM: N 9.572.768 – E 264.915. A Figura 22 demonstra o percurso para acesso à barragem.

Figura 22 - Caminho de acesso à barragem Jaburu I.



Fonte: Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará - IPECE.

3.1.3. Características da barragem

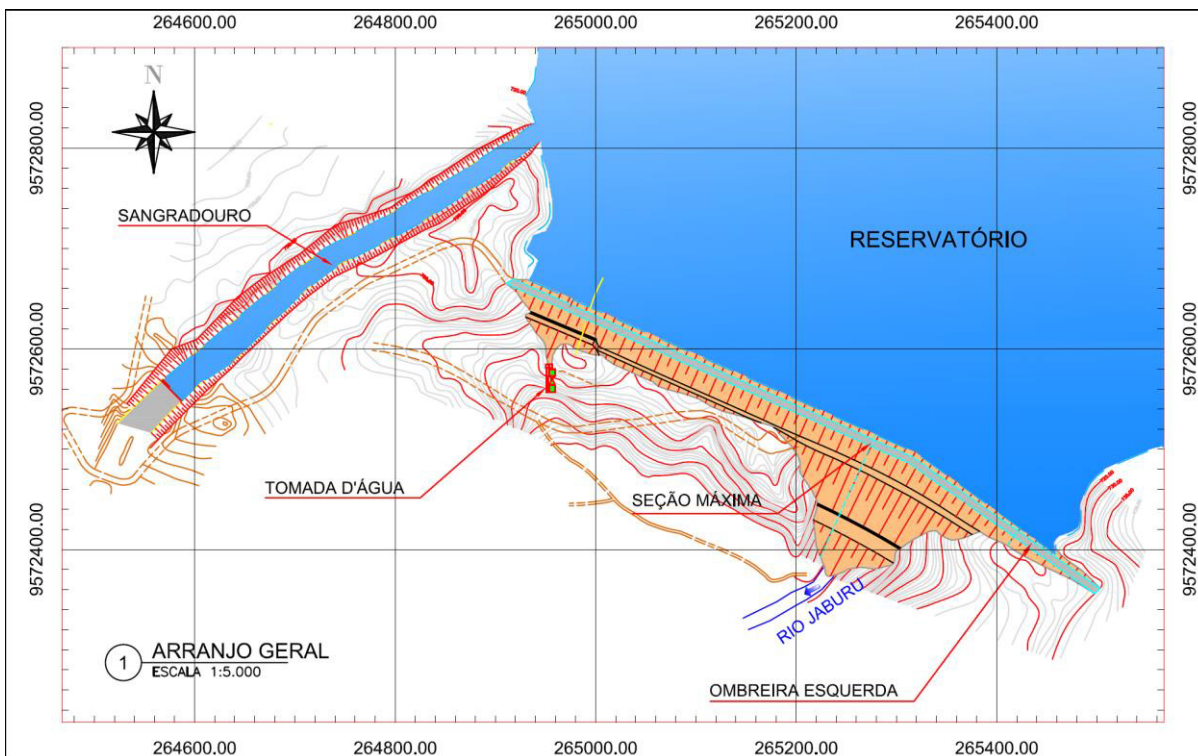
Quadro 2 - Características da barragem Jaburu I.

Identificação
Denominação: Barragem Jaburu I
Estado/ Município: Ceará/Tianguá
Rio Barrado: Rio Jaburu
Bacia Hidrográfica
Área da Bacia Hidrográfica Controlada: 1.450 km ²
Características do Reservatório
Área da Bacia Hidráulica: 316 km ²
Volume de Acumulação: 138 milhões de m ³
Barragem
Tipo: Barragem de terra zoneada
Altura máxima: 48,00 m
Extensão: 770 m
Cota do Coroamento: 720,20 m
Largura do Coroamento: 7,00 m
Talude de montante (v:h): 1:2
Talude de jusante (v:h): 1:2
Sangradouro
Tipo: Canal escavado em rocha com soleira vertente (low-ogee)
Cota operacional: 316,38 m
Largura útil: 25 m
Extensão: 450 m
Vazão máxima de projeto (TR= 1.000 anos): 1170,3 m ³ /s
Lâmina máxima (TR= 1.000 anos): 2,62 m
Tomada D'Água
Tipo: Galeria com controle a jusante

Vazão regularizada: 3m³/s (90% de garantia)

Fonte: Plano de Operação e Manutenção – POM e Projeto Executivo e das Obras para Recuperação da Barragem Jaburu I – 2010.

Figura 23 - Planta de situação da barragem Jaburu I.



Fonte: Plano de Operação e Manutenção – POM e Projeto Executivo e das Obras para Recuperação da Barragem Jaburu I – 2010.

A barragem Jaburu I, cuja conclusão da obra ocorreu em 1983, possibilitou a formação de um reservatório com capacidade de acumulação de 138 hm³, constituindo-se em uma importante fonte de recursos hídricos para atender à necessidade de água da região, e para atendimento também do sistema hidro agrícola da empresa Nutri-Life, para a qual foi construída uma captação flutuante.

A barragem propriamente dita compreende um conjunto de obras constituído, basicamente, por um maciço de terra zoneada, no qual é formado por uma região a montante de um material do tipo “argila arenosa” e por uma zona de um material a jusante do tipo “laterita”, solo abundante na região do barramento. O barramento foi erguido mediante a construção de uma

ensecadeira de material terroso, de modo a permitir o esgotamento da cava de fundação do aterro (diretamente assente sobre o estrato rochoso arenítico).

De acordo com levantamentos topográficos realizados pela COGERH no ano de 2011, a barragem apresenta uma altura máxima de 46,00m (altura relativa ao terreno natural a jusante). O coroamento, com o revestimento asfáltico, tem uma largura de 6,00 m e uma extensão de 770,0 m de comprimento.

Quanto ao talude de montante, apresenta ainda um revestimento do tipo vegetal, com inclinação de 1:2 (v:h). O talude de jusante apresenta ainda a presença de duas bermas e um enrocamento no pé do maciço constituído de rocha arenítica, com altura média de 13,00 m.

O talude de montante é formado, a partir do coroamento, por uma inclinação inicial de 1,00:1,50 (v:h), seguido de uma inclinação de 1:2 (v:h) até o nível da enseadeira que foi incorporada ao maciço durante a execução da obra. Existe ainda a presença de um Rip-rap, de rochas areníticas, para proteção do talude.

O sistema de drenagem interna é constituído por um filtro chaminé inclinado para jusante e um tapete drenante que se estende pela região de jusante, desde o filtro chaminé até o enrocamento de pé (rockfill).

3.1.6. Histórico: Jaburu I

Segundo dados dos últimos relatórios anuais de segurança de barragens emitidos pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos - COGERH, órgão responsável pelo monitoramento e gerenciamento dos recursos hídricos do estado do Ceará, a barragem tem apresentado nos últimos anos, classificações de risco das mais elevadas entre todas as obras vistoriadas pelo órgão. Tal conclusão faz parte da análise de seu histórico, já que esta barragem já apresentou diversas anomalias desde a sua inauguração. No último relatório apresentado em 2020 a barragem foi a única classificada na categoria de risco alto.

As anormalidades identificadas durante a gestão desta obra levaram a uma série de intervenções a fim de tentar corrigir estes problemas e garantir a segurança do empreendimento. No entanto, apesar dos esforços dos órgãos gestores em eliminar os problemas identificados, algumas irregularidades ainda persistem, trazendo insegurança à estrutura.

Classificada como a anomalia mais grave existente na obra em questão, a percolação pela ombreira esquerda e através da fundação são consideradas as mais preocupantes. Em várias ocasiões, este local apresentou fluxos numa quantidade considerada muito elevada para os padrões de normalidade de barragem, e exigindo que os órgãos responsáveis promovessem diversas intervenções, implementando tratamentos de impermeabilização na tentativa de eliminar o problema. Como resultados atingidos, houve sucesso em alguns momentos, contudo, com o passar do tempo, havia recorrência da anomalia.

O histórico de ocorrências a seguir é baseado em informações obtidas do Tomo I - Relatório da Execução dos Serviços de Recuperação da Barragem Jaburu I – 2010 - COGERH e do trabalho de Sousa (2013).

Segundo dados da COGERH, no ano de 1988, as inspeções realizadas pelo órgão identificaram uma fuga d'água na ombreira esquerda da barragem, localizada a aproximadamente 30 metros do pé da barragem. Esta primeira ocorrência provocou o surgimento de uma pequena caverna na ombreira de rocha arenítica, que segundo Sousa (2013), as vazões atingiram o pico de 47 l/s.

No ano seguinte, medidas corretivas foram implementadas na obra através de uma campanha de injeção de impermeabilização da fundação. As injeções aplicadas foram de asfalto quente, injetados em furos de sondagens executados a partir do coroamento e do talude de jusante da barragem. O asfalto foi escolhido devido ao insucesso das aplicações de calda de cimento no local. Durante as tentativas o material se dissolvia no local de fluxo da água. Já o asfalto quente quando em contato com a água se solidificou, gerando um efeito tampão e obstruindo a passagem da água. No total de aproximadamente de 247 metros de perfuração, foram injetados cerca 1,1 toneladas de cimento e 74,7 toneladas de asfalto. Houve êxito nos resultados da intervenção, reduzindo a vazão a valores aceitáveis da ordem de 2,4 l/s.

Em 1992, foram identificadas mais 4 surgências na região da ombreira direita, próxima a tomada d'água. Por meio de medidas de vazão no local, estimou-se uma vazão média da ordem de 26 l/s. A elevada vazão provocou ainda uma grande erosão próxima à estrutura do canal de saída da tomada d'água. Uma nova intervenção foi executada no local, no início do ano de 1993, com a perfuração total de cerca de 3.300 metros de sondagens e a injeção de aproximadamente 330 toneladas de cimento. Como consequência, a vazão sofreu uma redução de 26 l/s iniciais para cerca de 12,5 l/s, comprovando assim a eficácia do tratamento. Após a intervenção realizada, o

monitoramento da barragem foi intensificado por meio da instalação de sete piezômetros (tipo Casagrande) no maciço e pela construção de mais uma unidade de medidor de vazão na ombreira esquerda.

Em dezembro de 2009, foi identificado no medidor de vazão próximo a ombreira esquerda (local da 1ª intervenção) a presença de asfalto e de sedimentos finos depositados. As vazões no instrumento (medidor de vazão v-7) também aumentaram consideravelmente, do valor de 3,4 l/s para 5,4 l/s. Outro fato importante é que em janeiro de 2010, a vazão continuou aumentando até um pico de 19 l/s, mesmo sem haver elevações no nível do reservatório. Os acontecimentos relatados indicam que ocorreu erosão interna provocada pela percolação na ombreira, carregando sedimentos presentes no maciço arenítico juntamente com o material asfáltico injetado na intervenção do ano de 1989. Em caráter de urgência, a COGERH realizou no ano de 2010 uma nova intervenção no local. Preliminarmente, houve a tentativa de injetar cimento com um traço de 1:1:1 (água-cimento-areia) em 12 furos de sondagem, sendo que em cinco deste houve comunicação com a surgência, de forma que não havendo êxito na obstrução do fluxo.

Semelhante a intervenção de 1989, também se adotou a injeção de asfalto quente, almejando obter um efeito tampão como feito anteriormente. Os efeitos deste tratamento com asfalto foram muito positivos, havendo uma redução significativa da vazão inicial 12,2 l/s para 1,5 l/s após o tratamento. Com a redução do fluxo na ombreira, houve ainda um reforço no tratamento com a injeção de calda de cimento em linhas de sondagens a montante da área tratada. Com medidas de precaução, houve ainda o tratamento de outros locais considerados críticos, como na ombreira direita da barragem e ao longo do canal do vertedouro. O material injetado nestes locais foi uma calda de cimento traço 1:1:1(água: cimento: areia)

Um ano após a intervenção realizada na ombreira esquerda, o local voltou a apresentar anormalidades. Foi identificado novamente carreamentos de asfalto e sedimentos, fazendo com que acontecesse um aumento progressivo da vazão até um valor de pico 22,7 l/s em agosto de 2011. Souza (2013) estima que entre 2005 e 2013 os registros nos medidores de vazão contabilizaram 2,5 milhões de m^3 de água percolada através da fundação da barragem.

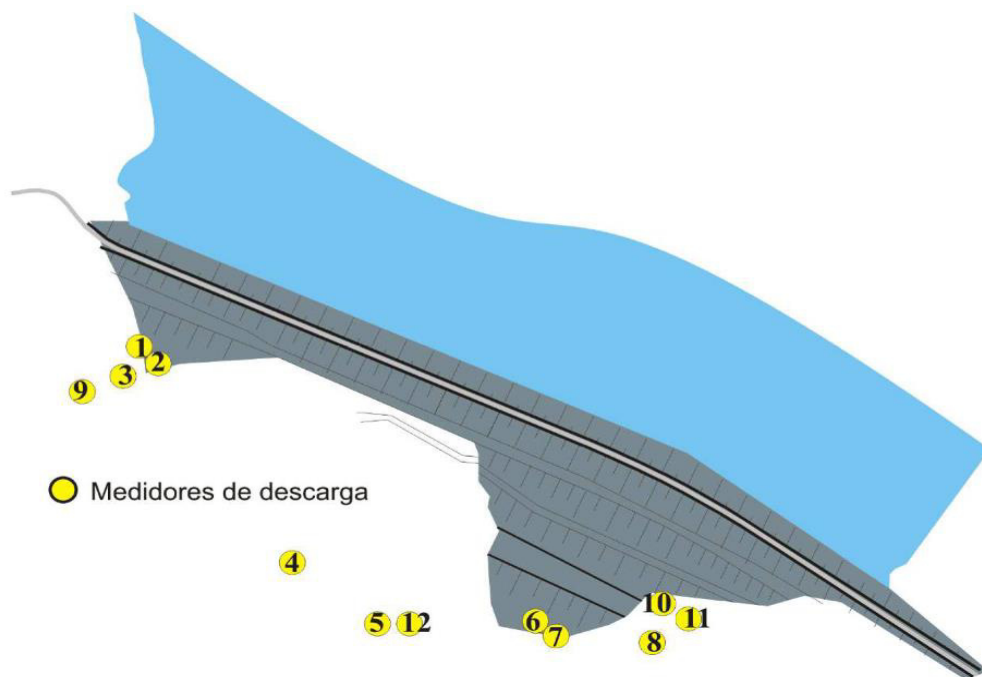
Neste caso, devido ao histórico de problemas relacionados que comprometem a segurança do empreendimento, é de fundamental importância verificar como a obra se comportou nos últimos anos, averiguando a segurança da mesma com base nos valores de vazão medidos na fundação da estrutura.

3.2. Obtenção de dados de instrumentação da barragem Jaburu I

O estudo realizado parte da obtenção do histórico de dados da instrumentação presentes na barragem retirados da base gerenciada pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). Especificamente dos valores aferidos pelos medidores de vazão presentes na barragem. A barragem Jaburu I apresenta 12 medidores de vazão instalados ao longo de sua extensão, segundo informações do Relatório Anual de Segurança de Barragens elaborado pela COGERH em 2020. As informações aferidas no local indicam o comportamento da estrutura em pleno funcionamento e proporcionam análise criteriosa e ampla para proposição de intervenções. Para isso, espera-se que tais equipamentos apresentem bom funcionamento e constância de medições.

Os dados utilizados são de medidores situados entre as estacas 23 e 36 percorrendo um trecho de 260 m ao longo da extensão da barragem. Nesse sentido, indica-se que os medidores de vazão considerados neste estudo são: Q5, Q6, Q7, Q10, Q11, Q12. A escolha destes deriva de sua localização, já que esses instrumentos contemplam as medições realizadas no trecho com a seção mais espessa da barragem localizada na estaca 30. Todos os dados disponibilizados pela COGERH e empregados na pesquisa estão no apêndice deste trabalho. A Figura 24 indica a localização dos medidores de vazão instalados na barragem.

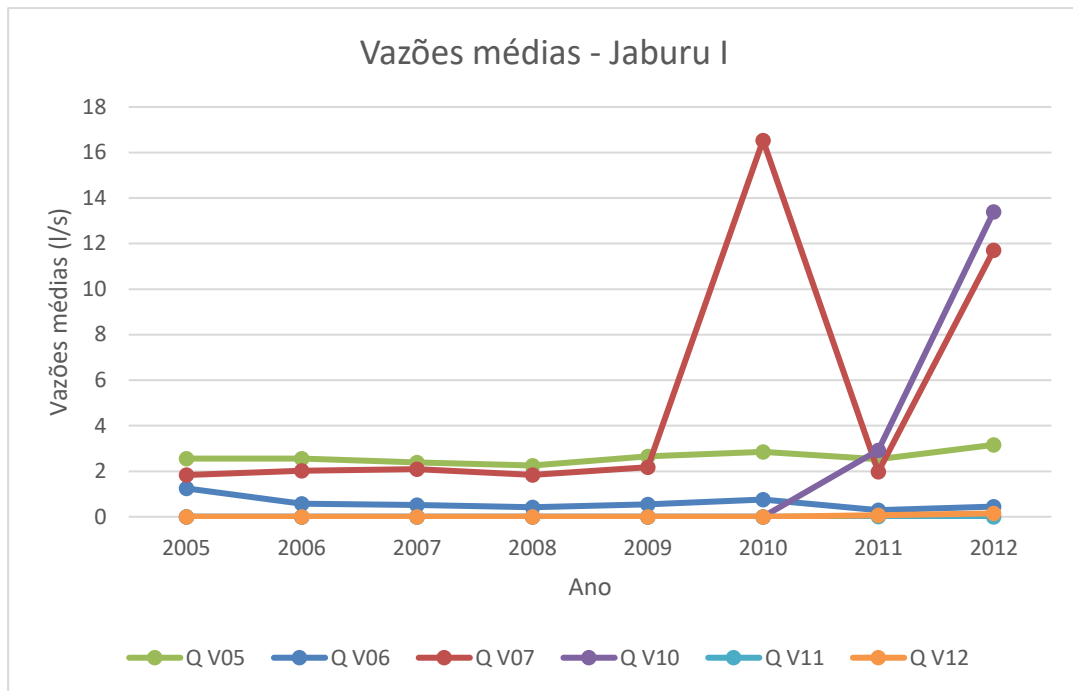
Figura 24 - Localização dos medidores de vazão da barragem Jaburu I.



Fonte: COGERH

Os valores aferidos representam a quantidade percolada no local da medição em l/s, sendo realizadas diariamente. Para uso neste estudo optou-se por utilizar a média das vazões medidas ao longo do trecho. Os dados utilizados são das medições realizadas entre 31 de janeiro de 2005 e 31 de dezembro de 2012. A seguir o gráfico de vazões médias anuais obtido a partir dos dados aferidos nos medidores.

Gráfico 2 – Vazões médias anuais (2005 – 2012).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022) a partir de dados disponibilizados pela COGERH.

Os dados demonstram o crescimento nos valores contabilizados nos medidores ao longo dos anos desde 2005. Dentre os 6 medidores utilizados nesta pesquisa, ao menos 2 apresentaram vazões médias acima de 6 l/s. Tais dados apresentaram descontinuidades em alguns dias, no entanto, tais ocorrências não impedem o prosseguimento do estudo. Para obtenção da média ao longo do trecho deve-se separar os dados de maneira a evitar sobreposição de vazões. Nesse sentido, agrupam-se as médias anuais dos dados de cada medidor cuja área de influência se estende pelo corpo da barragem. O somatório destas vazões dividido pelo tamanho do trecho considerado será o indicador utilizado na construção do modelo conforme ilustrado na relação adiante.

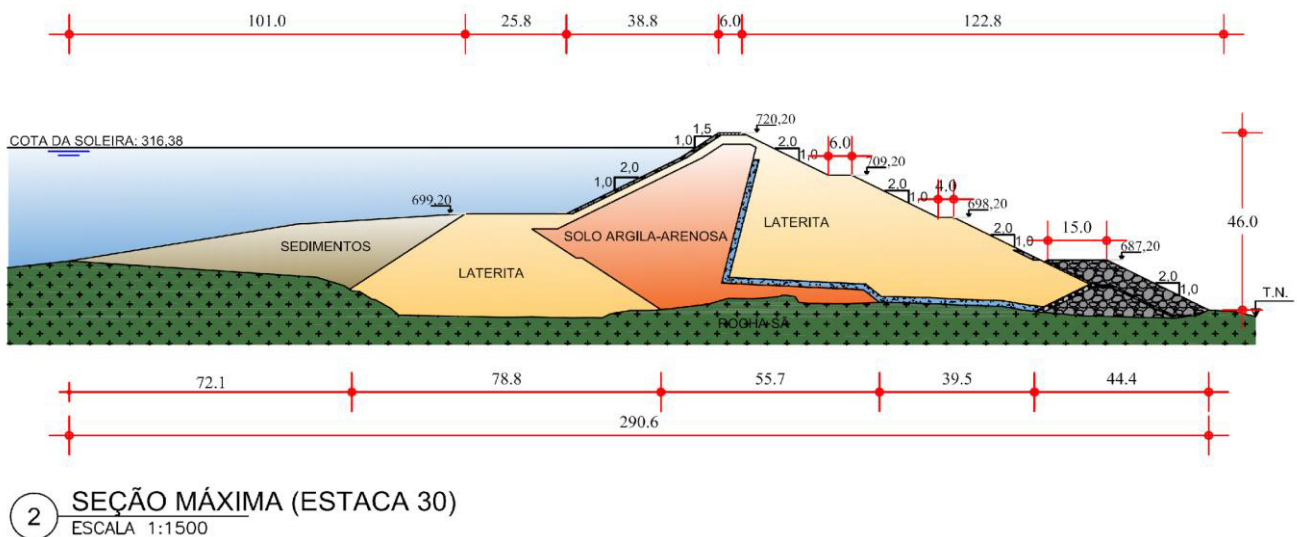
$$Vazão\ adotada = \frac{(M.Q\ V05 + M.Q\ V06 + M.Q\ V07 + M.Q\ V010 + M.Q\ V11 + M.Q\ V12)}{comprimento} \quad (\text{Equação 1})$$

3.3. Modelagem numérica da barragem Jaburu I para a atual fundação

A modelagem numérica da barragem parte dos dados obtidos da geometria da estrutura do barramento. Para isso utiliza-se o *software* GeoStudio desenvolvido pela GEOSLOPE International Ltd, mais precisamente em seu módulo “SEEP/W” para a análise de fluxo e o projeto geométrico da estrutura. O módulo utiliza o método dos elementos finitos para simular o comportamento da estrutura.

O modelo construído leva em conta as dimensões da barragem em sua seção máxima que fica localizada na estaca 30. Este passo objetiva construir protótipo matemático responsivo da barragem, onde pode-se simular situações diferentes para a estrutura e verificar o impacto gerado nos dados resultantes (vazão de percolação medida na fundação) a partir do método dos elementos finitos. Dessa forma, teremos um sistema com características semelhantes ao sistema real, a barragem construída. Vale salientar que o modelo não consegue representar fielmente as características do sistema real por se tratar de um modelo numérico com simplificações, todavia teremos uma aproximação representativa do comportamento real da obra. A Figura 25 apresenta a geometria e materiais da seção adotada na construção do modelo no *software*.

Figura 25 - Seção transversal da barragem Jaburu I.



Fonte: Fonte: Plano de Operação e Manutenção – POM e Projeto Executivo e das Obras para Recuperação da Barragem Jaburu I – 2010.

O método impõe que a geometria da barragem submetida a água barrada no reservatório seja subdividida em pequenas partes. A divisão da geometria da estrutura em pequenos elementos permite a resolução do problema complexo, subdividindo-o em problemas mais simples. O procedimento ainda estabelece que o número infinito de variáveis desconhecidas, sejam substituídas por um número limitado de elementos de comportamento bem definido. Nesse sentido, a seção da barragem foi discretizada em uma malha de 18.217 elementos finitos com tamanho global de 1 m, gerados automaticamente pelo *software* após a inserção da estrutura conforme representado na Figura 26. Após a conclusão da inserção da geometria da barragem, é

necessário definir as regiões. A cada região atribui-se um material com características definidas. Na sequência, são inseridos no modelo os materiais correspondentes às diferentes regiões existentes, como o filtro, o maciço de terra, o “rip-rap”, coroamento, entre outros. Os valores dos coeficientes de permeabilidade utilizados em todos os materiais empregados na construção do protótipo se baseiam na literatura estudada.

Para o maciço de fundação em solo arenítico toma-se conhecimento de sua permeabilidade para inserção no modelo em construção. Vargas (1977) aponta que os solos areníticos possuem permeabilidade que variam entre 10^{-8} m/s e 10^{-5} . No entanto, este material pode atingir valores ainda maiores, como aponta Azeredo *et al.* (2011) em sondagens realizadas no solo de fundação da barragem da usina hidrelétrica de Estreito. O solo examinado apontou permeabilidades entre 10^{-4} m/s e 10^{-2} . Além disso, Souza (2013) também aponta que a fundação apresenta arenito com intercalações de silito na matriz de rocha, logo, há alta condutividade devido à formação de cavidades na estrutura. Nesse sentido, optou-se por manter as estimativas iniciais de permeabilidade da fundação para construção do modelo da barragem em estudo entre os valores intermediários das duas faixas apresentadas anteriormente. Tal premissa busca evitar maior número de interações na calibragem do modelo, já que o valor de entrada do protótipo se situa dentro de valores esperados para o material.

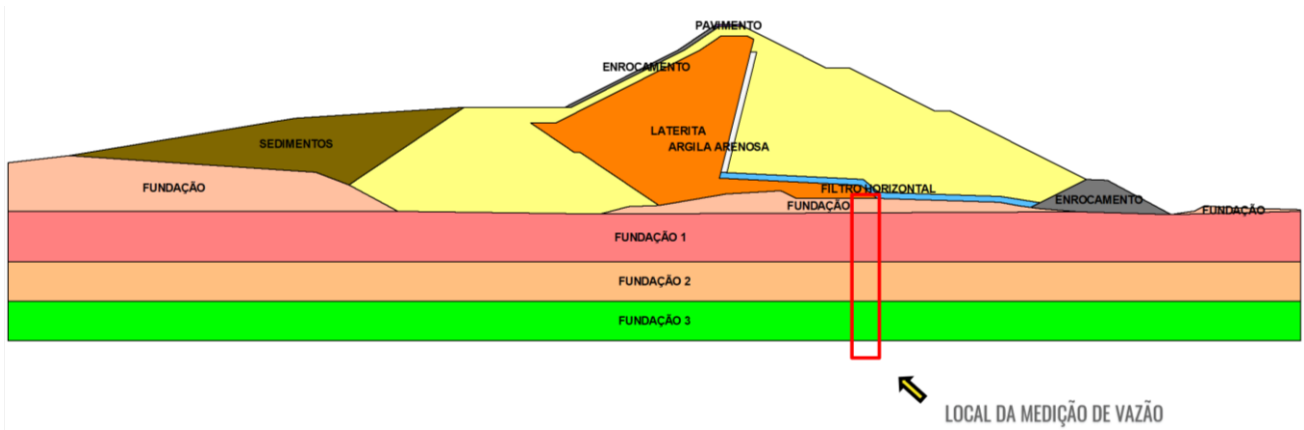
O maciço da fundação considerado no modelo será estratificado alterando sua permeabilidade em cada camada a fim de representar melhor as características reais do solo. Tal estratégia deriva da constatação de que os solos, em sua maioria, não são homogêneos e sim formados por diversas camadas com características diferentes. Essas camadas são normalmente horizontais e paralelas à superfície do solo (Massad, 2003). No modelo construído, entende-se que com o aumento da profundidade temos menor grau de permeabilidade, já que, o grau de compactação e coesão do solo aumenta. O modelo considerado é isotrópico em relação à permeabilidade e que o terreno se encontra saturado. A Tabela 1 exemplifica a relação adotada com os valores iniciais considerados de permeabilidade em cada camada conforme premissas descritas previamente. A Figura 26 apresenta a distribuição dos materiais em prévia do modelo da barragem.

Tabela 1 - Relação entre permeabilidade nas camadas da fundação - Modelo não calibrado

Camada	Espessura da camada (m)	Relação Permeabilidade (m/s)
Fundação	Variável	$1 * 10^{-5}$
Fundação 1	12,8	$1 * 10^{-5}$
Fundação 2	10	$1 * 10^{-6}$
Fundação 3	10	$1 * 10^{-7}$

Fonte: O autor (2022).

Figura 26 - Prévia do modelo construído.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.3.1. Calibração do modelo para análise das vazões

Utilizando a base de dados de instrumentação fornecidos pela COGERH, realiza-se a calibração do protótipo construído através de uma retroanálise. O objetivo deste processo é calibrar o modelo numérico da barragem para que este apresente um comportamento hidráulico o mais próximo possível do aferido *in loco* utilizando os dados dos medidores de vazão. Dessa maneira, a vazão aferida no modelo será o ponto chave para calibração.

Na calibração toma-se como base um trecho específico da seção da barragem para medição da vazão. Na seleção buscou-se escolher um ponto que se encontra em uma região intermediária na fundação da estrutura. Nesse sentido, têm-se boa representação do fluxo que passa através dela. A Figura 26 ilustra a localização aproximada do ponto selecionado.

Foram realizadas análises da seção natural, sem a presença do elemento de controle da percolação. A calibragem do modelo parte da comparação do valor medido no modelo construído com a vazão adotada a partir dos dados dos medidores de vazão. O procedimento leva em conta a permeabilidade das camadas de fundação, alternando os valores estabelecidos a fim de atingir o mesmo resultado de vazão aferida na instrumentação. Nesta etapa a alternância de valores não

deve alterar a ordem de grandeza dos dados selecionados previamente de modo a manter o solo que contém arenito dentro da faixa de permeabilidade que caracteriza o material. Assim sendo, o valor obtido ao fim desta etapa será representativo. Na sequência, inicia-se os estudos com a inclusão do elemento para controle de percolação na fundação.

3.4. Dimensionamento de parede diafragma

Como descrito antecipadamente, a parede diafragma se caracteriza como elementos de impermeabilização que costuma ser utilizado em obras de contenção. Neste estudo verifica-se a aplicação deste elemento no controle de percolação na fundação. A seleção deste elemento deriva da análise de outras propostas para a ação previamente citada. Nesse sentido, observou-se que a parede diafragma é uma solução delgada que pode atingir grandes profundidades e possibilita maior grau de estanqueidade quando comparada aos outros métodos apresentados no capítulo anterior. Além disso, o teste considera as ações já realizadas na estrutura tomada para verificação.

Neste estudo o dimensionamento de estrutura decorrerá de forma simplificada, já que o elemento será verificado principalmente quanto ao seu grau de impermeabilidade conferida à fundação de barragem construída em solo arenítico. Assim sendo, o projeto se resume a definição dos seguintes parâmetros da parede:

- Permeabilidade da parede diafragma (m/s);
- Comprimento da parede diafragma (m);
- Altura da parede diafragma (m).

Especifica-se que a parede utilizada é de diafragma plástico, já que, o elemento neste sistema não possui função estrutural. Além do que, a parede deve ser capaz de absorver deformações sem a formação de trincas e fraturas, pois o solo se comprime e recalca durante e após a construção.

3.4.1. Permeabilidade da parede diafragma

A permeabilidade da parede diafragma deve ser inferior à permeabilidade estimada para as camadas de fundação, já que, este elemento busca minimizar o fluxo de água na fundação. Além disso, tem-se que o valor estabelecido para este parâmetro está intrinsecamente ligado ao material utilizado em sua execução. Nesse sentido, estima-se o uso de argilas para composição do *caulis* utilizado na construção da parede, pois o grau de permeabilidade deste material pode chegar a $10^{-11}m/s$, como aponta Vargas (1977).

3.4.2. Altura da parede diafragma

A altura da parede diafragma deve ser estimada conforme a sondagens para verificar a permeabilidade da fundação, já que esta deve atingir camadas com maior permeabilidade a fim de garantir boa vedação. Dessa maneira, sua altura pode ser variável conforme a estratificação do solo. Para este estudo, onde a estratigrafia da fundação segue camadas horizontais, estima-se uma altura única praticada ao longo da seção da barragem. Além disso, a altura adotada leva em conta os valores admitidos para permeabilidade das camadas de fundação.

3.4.3. Espessura da parede diafragma

A espessura da camada foi dimensionada para evitar problemas na malha de elementos finitos. Dessa maneira, adotou-se 1 metro para espessura da parede diafragma, já que o tamanho dos elementos finitos considerados neste estudo possui tal medida.

3.5. Modelagem numérica da barragem Jaburu I com uma fundação com parede diafragma

A partir dos dados obtidos na seção 3.4 constrói-se um novo modelo da barragem no *software* Geostudio. O novo protótipo conterá uma nova região que representa a parede diafragma. Na nova região insere-se as dimensões da estrutura no plano (altura e espessura) estimadas e a permeabilidade do material que a forma. Vale salientar, que o elemento é isotrópico nas direções x e y em relação à permeabilidade. O método segue os mesmos procedimentos descritos na seção 3.3.

O Quadro 3 apresenta os valores da permeabilidade, altura e referencial de posição da parede diafragma.

Quadro 3 - Parâmetros da parede diafragma.

Parâmetro	Valor dimensionado
Permeabilidade da parede diafragma (m/s)	$1 * 10^{-11} m/s$
Altura da parede diafragma (m)	33 m
Posição da parede diafragma em relação a barragem	Posterior ao filtro vertical

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A altura da parede diafragma apresenta valor quase 70% menor que o valor máximo praticado pelo tipo de elemento. Já que, como foi descrito no capítulo anterior as paredes podem ser executadas em até 120 m de profundidade. Além disso, tal profundidade possibilita contato dos elementos com a camada de menor permeabilidade do modelo em estudo.

3.6. Comparativo da eficiência hidráulica das alternativas estudadas

Neste estudo o indicador do comportamento do fluxo na fundação de uma barragem considerado será a vazão que percola através desta. Com tais modelos construídos pode-se comparar os dados obtidos e, conseqüentemente, avaliar o impacto da execução da parede diafragma que iria causar nos valores de vazão de água através da fundação. Nesse sentido, faz-se a comparação direta entre o valor medido no modelo calibrado e o medido no modelo com parede diafragma inclusa.

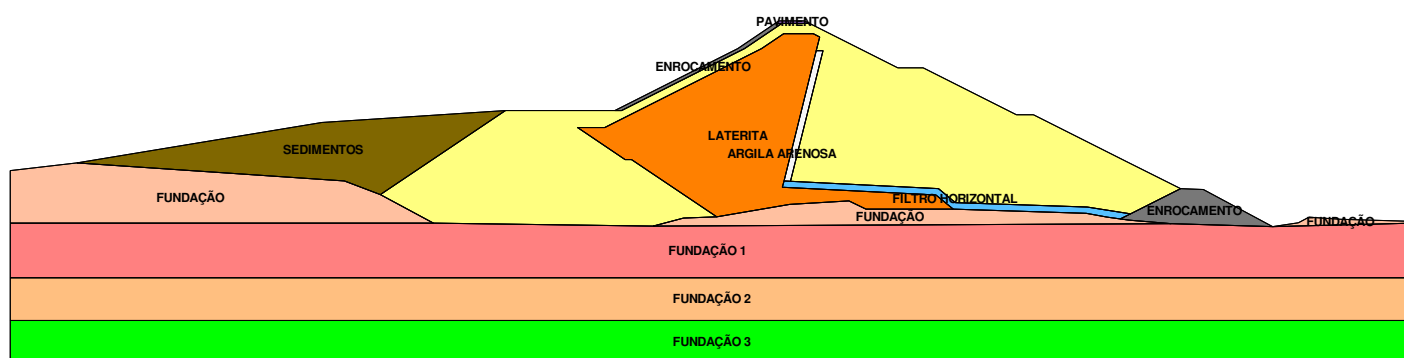
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo apresenta-se os resultados obtidos a partir da aplicação do método descrito no capítulo anterior, ademais, discute-se os valores encontrados e suas implicações. As análises foram executadas levando em conta a condição de fluxo permanente, onde não há variação de níveis ou cargas hidráulicas ao longo do tempo. A organização deste capítulo segue a ordem de objetivos do estudo proposto no capítulo 1.

4.1. Modelo Calibrado

O modelo construído no *software* Geostudio é apresentado na Figura 27. Como descrito no capítulo anterior, este protótipo foi desenvolvido a partir da geometria da seção máxima da barragem.

Figura 27 - Modelo construído.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Como descrito no capítulo anterior, a análise de percolação feita através do *software* Geostudio leva em conta os dados do coeficiente de permeabilidade de cada material. O valor do coeficiente de permeabilidade dos materiais que compõem o maciço compactado foi fixado e o coeficiente da fundação permeável variou. A Tabela 2 inclui os materiais utilizados nas 12 regiões que constituem o modelo e seus parâmetros geotécnicos:

Tabela 2 - Parâmetros geotécnicos dos materiais

Material	Coefficiente de permeabilidade (m/s)	Anisotropia
Argila arenosa	10^{-9}	0,1
Enrocamento	0,001	1
Terreno da fundação	Variável	1
Laterita	10^{-9}	0,1
Pavimento	10^{-9}	1
Material para o filtro vertical	10^{-9}	1
Material para o filtro horizontal	10^{-6}	1
Sedimentos	10^{-7}	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2022) a partir de dados da literatura.

4.1.1. Cálculo da vazão adotada

Como descrito previamente, a calibragem do modelo da barragem construído a partir da geometria desta partiu dos dados de vazão aferidos nos medidores localizados ao longo da barragem. O valor médio das leituras realizadas ao longo de 7 anos entre 2005 e 2012 em cada medidor estão representados na Tabela 3. Usa-se a média como indicador de tendência central, dessa maneira têm-se uma ideia das características de grupo de números considerado, por meio de um único número.

Tabela 3 - Vazões médias nos medidores de vazão.

Medidor	Vazão média (l/s)
Q5	2,80
Q6	0,60
Q7	3,70
Q10	6,90
Q11	0,05
Q12	0,09
Vazão total	14,14

Fonte: Elaborado pelo autor (2022) a partir de dados da COGERH.

Divide-se o somatório desses valores pelo tamanho do trecho estudado, dessa forma obtêm-se o valor médio de vazão por metro de trecho estudado.

$$Vazão adotada = \frac{14,14}{260} = 0,05438 \text{ L/s/m}$$

$$Vazão adotada = 5,4384 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s/m}$$

$$Vazão adotada = 0,0544 \text{ l/s/m}$$

O valor obtido reflete em quase 70% o limite estabelecido por Cruz (1996) *apud* Souza (2013) para vazão na fundação de barragem. Demonstrando a necessidade de intervenções que minimizem esse número.

4.1.2. Retroanálise

Através do processo de calibração foram aplicados diferentes valores para permeabilidade do solo na camada de fundação, em busca daquele que seria mais representativo em comparação aos valores de vazão medidos no local.

Com base no modelo com a isotropia do solo do maciço $k_y/k_x = 1$, procedeu-se a alterações nas propriedades do solo de fundação. A permeabilidade do solo foi modificada durante o processo de calibração do modelo, conforme descrito no capítulo anterior. A Tabela 4 abaixo apresenta os valores obtidos para permeabilidade do solo que constitui a fundação e a Tabela 5 o valor de vazão medido no modelo calibrado.

Tabela 4 - Relação entre permeabilidade nas camadas da fundação - Modelo calibrado.

Camada	Espessura da camada (m)	Relação Permeabilidade (m/s)
Fundação	Variável	$1,9359 * 10^{-5}$
Fundação 1	12,8	$1,9359 * 10^{-5}$
Fundação 2	10	$1,9359 * 10^{-6}$
Fundação 3	10	$1,9359 * 10^{-7}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 5 - Vazão medida na fundação - Modelo calibrado.

Vazão de Água ($\text{m}^3/\text{s/m}$)
$5,4389 * 10^{-5}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2022) a partir de dados da COGERH.

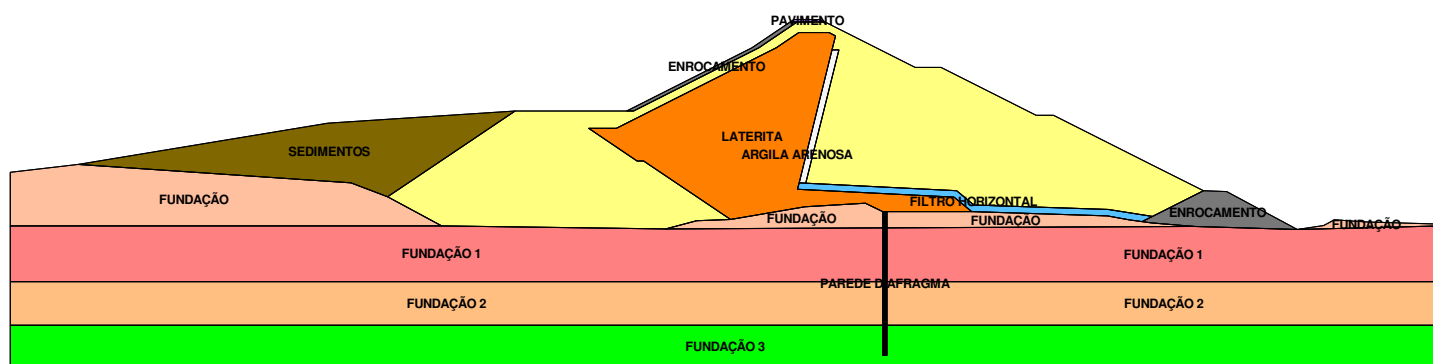
Como descrito previamente, as interações na simulação não pretendiam alterar a ordem de grandeza dos dados de percolação do solo em estudo. Ao todo foram realizadas 15 interações até que a vazão aferida no modelo apresentasse boa aproximação do valor medido *in loco*. O valor aferido no modelo se mostrou bem próximo ao obtido nos medidores de vazão no local apresentando diferença de apenas 0,0092%. Em vista disso, conclui-se que o modelo tem boa

representação do estado atual da fundação da barragem Jaburu I e que poderá ser utilizado para verificação de seu comportamento hidráulico.

4.2. Modelo com parede diafragma

Como explicado antecipadamente, a inserção da parede diafragma no modelo busca verificar a influência desta alternativa no fluxo pela fundação da barragem observada.

Figura 28 - Modelo construído com a inserção da parede diafragma.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.3. Comparativo da eficiência hidráulica das alternativas estudadas

Com tais modelos construídos é possível comparar os dados obtidos e, conseqüentemente, avaliar o impacto da execução da parede diafragma que iria causar nos valores de vazão de água através da fundação. Em relação à vazão medida no trecho selecionado após a inserção da parede diafragma obteve-se o seguinte valor:

Tabela 6 - Vazão medida na fundação - Modelo com parede diafragma.

Vazão de Água (m ³ /s/m)
2,6770 * 10 ⁻⁶

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 7 – Comparativo - Vazão medida no modelo x Vazão medida *in loco*.

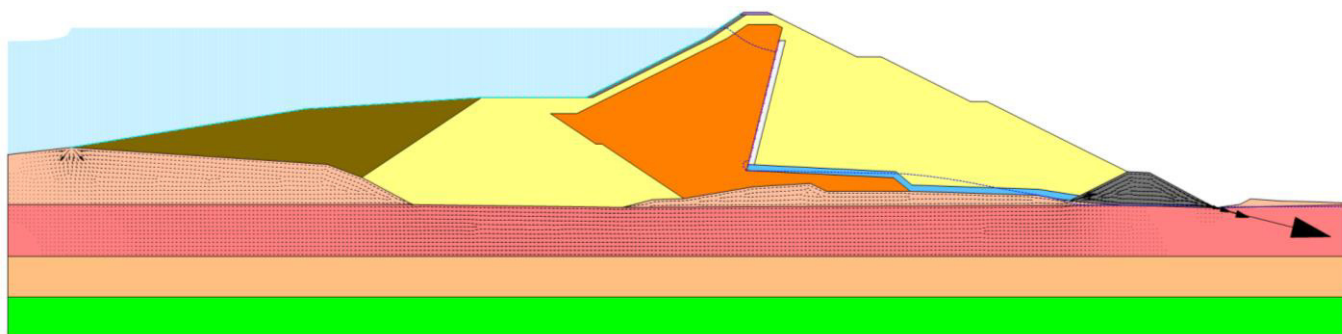
Medidor	Vazão de Água (l/h/m)
Simulação	9,64
<i>In loco</i>	195,78

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Sobre a vazão obtida, o valor medido demonstrou bom resultado quando comparado com a situação anterior. Já que, a vazão medida no modelo com parede diafragma apresentou valor 95% menor que o verificado previamente. Dessa maneira, confirma-se bom comportamento hidráulico de barragem com a inserção de parede diafragma projetada, dentro das premissas consideradas. Já que, a diminuição da vazão de percolação possibilitada pelo elemento em teste se mostrou considerável. O valor de vazão medido no modelo com a parede representa apenas 3,4% do limite de vazão na fundação estabelecido por Cruz (1996) apud Souza (2013).

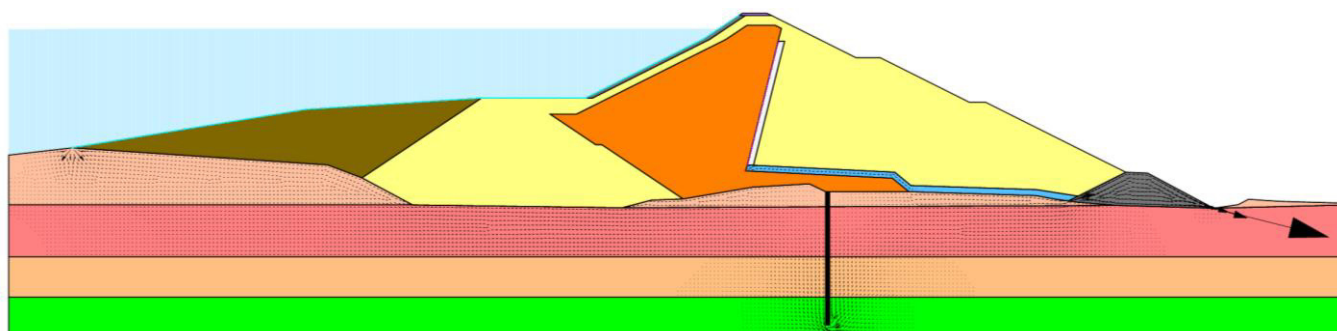
Sobre a análise do fluxo, as Figuras 29 e 30 apresentam-se a representação dos vetores de velocidade para o fluxo no modelo sem a inclusão da parede diafragma e com a inclusão desta solução, respectivamente.

Figura 29 - Vetores de velocidade – Modelo sem parede diafragma.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 30 - Vetores de velocidade – Modelo com parede diafragma.



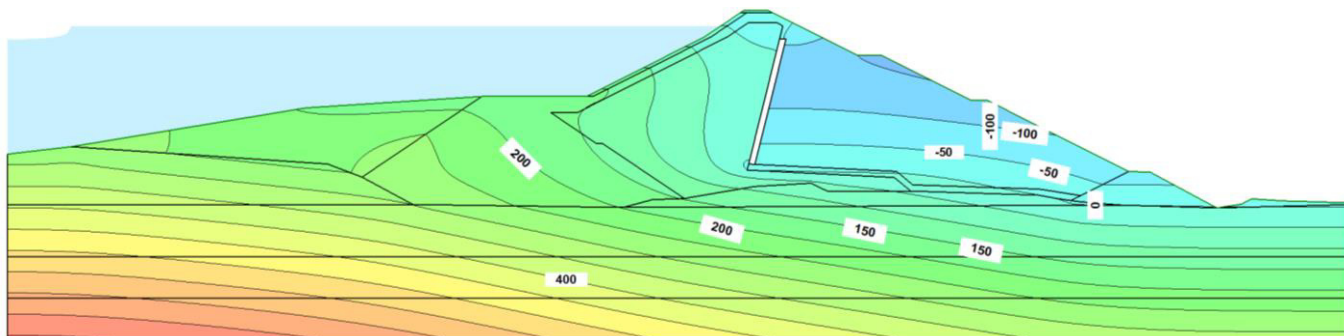
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A partir da análise da direção dos vetores de velocidade do fluxo de água nas duas citações, nota-se a predominância de fluxo na camada mais permeável no protótipo que não contém a parede diafragma. No segundo modelo, com a inclusão do diafragma plástico, percebe-se que o fluxo é completamente contornado pela parede, dessa maneira, o caminho de percolação é

aumentado demonstrando o bom funcionamento da estrutura.

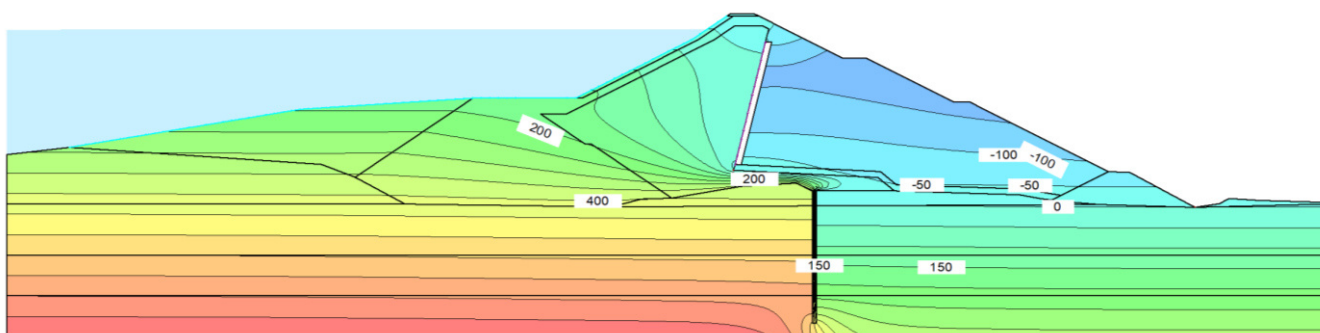
Sobre a análise das perdas de carga, as Figuras 31 e 32 apresentam-se a perda de carga no modelo sem a inclusão da parede diafragma e com a inclusão desta solução, respectivamente.

Figura 31 - Perda de carga – Modelo sem parede diafragma.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 32 - Perda de carga – Modelo com parede diafragma.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 32 pode-se notar a concentração da perda de carga na parede diafragma, o que comprova a efetividade da solução delgada nesse aspecto.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho pretendeu avaliar o comportamento da barragem de origem sedimentar em conjunto com parede diafragma frente a ocorrência de percolação na fundação. Nesse sentido, construiu-se modelo responsivo que utiliza dados aferidos nos medidores de vazão instalados na barragem Jaburu I para estudo de caso comparando-o com protótipo construído a partir da geometria da barragem com a inserção de parede diafragma plástica. A escolha desta barragem para estudo derivou do resultado da avaliação realizada pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos - COGERH, órgão responsável pelo monitoramento e gerenciamento dos recursos hídricos do estado do Ceará. No último relatório de segurança das barragens no estado, apresentado em 2020, a barragem foi a única classificada na categoria de risco alto.

Duas análises utilizando o *software* Geostudio em seu módulo SEEP/W foram realizadas para verificar o comportamento da barragem. A primeira possibilitou a construção de modelo numérico responsivo que apresenta comportamento próximo ao medido *in loco*. Dessa maneira foi possível obter resposta numérica com erro de apenas 0,0092% para a vazão medida na fundação da estrutura em estudo. A segunda verificação, realizada com a inserção da parede diafragma plástico, permitiu a comparação direta entre a vazão medida na estrutura com e sem a inclusão da solução delgada. Os resultados obtidos indicam redução em 95% na vazão medida na fundação após a inserção do diafragma plástico.

Nesse sentido, conclui-se, que a implementação de parede diafragma em barragens que apresentam anomalia por percolação na fundação se mostra eficiente, já que, o estudo demonstrou a minimização das vazões medidas no local. Além disso, conclui-se, que a implementação de uma hidrofresa na execução do diafragma plástico representa ganhos de produtividade na execução das escavações, conforme dados deste tipo de execução na barragem UHE Estreito.

Vale salientar que o método empregado é uma aproximação da realidade, dessa maneira, a aplicação da estrutura dimensionada neste estudo na estrutura real pode não apresentar o mesmo comportamento obtido na simulação em termos de diminuição das vazões medidas. Visto que, o estudo partiu de dados da literatura para construção do exemplar. O uso de dados diretos da barragem obtidos a partir de sondagem *in loco* poderia aperfeiçoar a precisão do método empregado.

Ademais, informa-se que a base de dados utilizada para valores de vazão pode não refletir completamente o estado atual da barragem, já que são valores medidos são de medições realizadas entre os anos de 2005 à 2013. No entanto, entende-se que a barragem ainda apresenta a anomalia descrita previamente com base nos relatórios de segurança emitidos pela COGERH.

REFERÊNCIAS

- AZEREDO, A.L.C.; Meirelles, M.C.; LUCENTI, F.; Silva, S.A. **Desempenho da Parede Diafragma Plástica na UHE Estreito, XXVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens**, CBDB, Rio de Janeiro, Brasil. 2011.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: mecânica das rochas, fundações e obras de terra**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- CEDERGREN, H. R. **Seepage, Drainage, and Flow Nets**. 3 ed. Sacramento: John Wiley & Sons, 1989.
- CERQUEIRA, H. **Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas em mineração**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
- CHIOSSI, N. **Geologia de Engenharia**. 3 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2013. COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens**. 1 ed. Rio de Janeiro: CBDB, 2011.
- COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (COGERH). **Plano de Operação de Manutenção do Sistema de Água Bruta do Estado do Ceará - POM**. COGERH, Fortaleza. 2008.
- CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens. Núcleo Regional do Paraná. **Dicionário de barragens: linguístico** / Comitê Brasileiro de Barragens. Núcleo Regional do Paraná. – Porto Alegre: Nova Prova. 2010
- COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012.
- CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção Projeto**. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 1996.
- DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 8 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- DUNNICLIFF, J. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. 1 ed.

Estados Unidos: John Wiley & Sons, 1988.

FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D. **Geotechnical Engineering of Embankment Dams**. 1 ed. Rotterdam: A. A. Balkema, 1992.

FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G. **Geotechnical Engineering of Dams**. 1 ed. Rotterdam: A. A. Balkema, 2005.

FONSECA, A. da R. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – Estudo de caso das barragens da UHE São Simão**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

FREITAS, M. A. C. **Análise de Estabilidade de Taludes pelos Métodos de Morgenstern- Price e Correia**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2011.

GAIOTO, N. **Sistemas de controle de Percolação de Água em Projetos de Barragens de Terra**. Concurso de Livre-Docência. EESC/USP, São Carlos/SP. 1992

GAIOTO, N. **Introdução ao projeto de Barragens de Terra e de Enrocamento**. São Carlos/SP: EESC-USP, 126 p. 2003.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. 1 ed. New York: John Wiley & Sons, 1969.

MASSAD, F. **Obras de Terra: curso básico de geotecnia**. 2 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

MASSAD, F. **Mecânica dos Solos Experimental**. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2016.

MELLO, V. F. B de. Reflections on design decisions of practical significance to embankment dams. **Géotechnique**, v. 27, n. 3, p. 281-355, set. 1977.

MIGUEL, M. G.; ALBUQUERQUE, P. J. da R.; BENATTI, J. C. B.; MARQUE, R.; CARVALHO, D. de. Estudo da condutividade hidráulica do solo laterítico de Campinas/SP. **XIII COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, Curitiba, v. 1, n. 1, p. 261-266, 2006.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces.

Géotechnique, v. 15, n. 1, p. 79–93, mar. 1965.

PALMEIRA, E. M.; GARDONI, M. G. Geotextiles in Filtration: a state of the art review and remaining challenges. **International Symposium on Geosynthetics - GeoEng 2000**, Melbourne, p. 85-110, 2000.

PINTO, C. de S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS (SRH). **Relatório da execução dos serviços de recuperação da Barragem Jaburu I – Tomo 1**. Fortaleza, 2010.

SILVA, J. P. M. da. **Os Métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidade de Taludes**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2011.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

SOUSA, L. N. **Avaliação do comportamento da fundação da barragem em rocha arenítica: Estudo de caso da Barragem Jaburu I**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

THOMAS, H. H. **The engineering of large dams**. 1 ed. London: John Wiley & Sons, 1976.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, **Engineering and Design - Slope Stability**. Manual N° 1110-2-1902, Washington, 2003.

ZHANG, L. M.; XU, Y.; JIA, J. S. Analysis of earth dam failures: A database approach. **Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards**, v. 3, n. 3, p. 184–189, 11 set. 2009.

Medidor	Ano	Média de Vazão											
		Mês											
		1	2	Total	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Q V05		2,51	2,59	2,62	2,87	3,25	3,03	2,94	2,89	2,74	2,60	2,65	2,55
	2005	2,56	2,56	2,62	2,95	3,08	3,14	3,10	3,04	2,99	2,81	2,64	2,56
	2006	2,56		2,40	2,55	2,93	3,01	3,07	3,09	2,93	2,73	2,67	2,54
	2007	2,38	2,33	2,47	2,48				2,72			2,25	2,25
	2008	2,25	2,30	2,40	3,27	3,49	3,36	3,22	3,09	2,98	2,97	2,81	2,72
	2009	2,66	2,62	2,97	3,61	4,55	3,79	3,73	3,44	3,44		2,98	2,98
	2010	2,85	2,81	2,81			3,01	3,11	2,98		2,64		2,50
	2011	2,53	2,56	2,98	3,06	3,50	3,57	3,53	3,61	3,44	3,58		
	2012	3,16	2,37	2,61	2,98	2,98	2,83	2,81	2,70	2,52	2,38	2,18	2,18
	2013	2,18		1,64	1,66	1,61	1,34	1,47	1,42	1,24	1,09		
Q V06		0,52	0,65	0,66	0,80	0,81	0,62	0,59	0,54	0,51	0,51	0,50	0,46
	2005	1,25	1,25	1,24	1,00	0,96	0,90	0,92	0,71	0,67	0,58	0,60	0,57
	2006	0,57		0,53	0,55	0,51	0,51	0,50	0,52	0,51	0,51	0,51	0,51
	2007	0,51	0,51	0,51	0,51				0,51			0,48	0,47
	2008	0,42	0,40	0,45	1,23	1,03	0,91	0,78	0,69	0,68	0,68	0,65	0,57
	2009	0,54	0,68	0,79	1,26	1,14	0,59	0,51	0,40	0,39		0,40	0,40
	2010	0,76	0,33	0,31			0,31	0,21	0,20		0,21		0,26
	2011	0,29	0,31	0,33	0,32	0,40	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45		
	2012	0,45	0,69	0,65	0,85	0,71	0,36	0,29	0,28	0,28	0,28	0,31	0,28
	2013	0,32		0,35	0,40	0,55	0,68	0,68	0,68	0,67	0,55		
Q V07		4,98	5,50	3,98	2,83	2,94	4,16	3,13	4,07	4,29	3,27	2,96	2,71
	2005	1,83	1,83	2,21	2,71	2,96	2,98	2,98	2,94	2,87	2,57	2,14	2,04
	2006	2,02		1,90	1,91	2,15	2,54	2,61	2,54	2,24	2,18	2,11	1,97
	2007	2,10	1,90	1,90	1,90				2,48			1,90	1,90
	2008	1,83	1,71	1,71	2,47	2,76	2,72	2,62	2,56	2,40	2,40	2,40	2,33
	2009	2,18	2,16	2,37	3,27	4,74	3,59	3,63	3,63	3,63		3,53	4,40
	2010	16,54	16,16	13,57			9,81	1,92	2,11		1,88		1,87
	2011	1,98	1,83	1,90	2,33	2,79	3,27	3,43	11,25	11,70	11,70		
	2012	11,70	6,88	6,32	6,34	9,56	8,69	7,38	7,13	5,75	5,73	5,07	4,82
	2013	4,47		2,25	1,40	1,07	1,05	1,05	0,87	0,51	0,35		
Q V10		0,96	1,06	1,80	1,90	1,03	2,30	2,37	3,82	4,61	3,09	1,63	1,07
	2005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2006	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2007	0,00	0,00	0,00	0,00				0,00			0,00	0,00
	2008	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2009	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
	2010	0,00	0,00	0,00			0,00	1,03	1,83		2,98		2,94
	2011	2,92	2,67	3,02	3,38	3,98	4,48	4,47	17,89	16,80	16,80		
	2012	13,40	12,11	10,78	10,87	16,67	15,12	12,91	12,86	11,70	10,96	8,88	7,12
	2013	5,74		3,44	2,18	1,47	1,25	1,16	0,87	0,45	0,20		
Q V11		0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00
	2005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2006	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2007	0,00	0,00	0,00	0,00				0,00			0,00	0,00
	2008	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2009	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
	2010	0,00	0,00	0,00			0,00	0,40	0,84		0,01		0,01
	2011	0,01	0,03	0,03	0,04	0,08	0,06	0,09	0,02	0,01	0,01		
	2012	0,00	0,00	0,02	0,04	0,16	0,16	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01

	2013	0,01		0,02	0,02	0,04	0,04	0,07	0,07	0,05	0,05		
Q V12		0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,02	0,01
	2005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2006	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2007	0,00	0,00	0,00	0,00				0,00			0,00	0,00
	2008	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2009	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
	2010	0,00	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00		0,00		0,02
	2011	0,07	0,07	0,07	0,07	0,11	0,09	0,09	0,10	0,10	0,12		
	2012	0,15	0,11	0,10	0,09	0,01	0,10	0,11	0,06	0,05	0,09	0,09	0,09
	2013	0,09		0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,06		