



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

José António Silvério de Almeida

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(Ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof. Doutor Luís José Andrade Pais

Covilhã, outubro de 2015

Dedico este trabalho antes de mais a Deus por tudo e aos meus progenitores em especial ao meu falecido pai João dos Santos Almeida, pelos ensinamentos, valores e amor transmitidos ao longo de toda a vida.

Agradecimentos

Sou a expressar todo o meu agradecimento a todos os que de forma direta ou indiretamente apoiaram e contribuíram para que fosse possível a realização da presente dissertação.

Em especial ao Professor Doutor Luís Pais, pela transmissão de conhecimentos, orientação e tempo dispensado no acompanhamento e esclarecimento de dúvidas durante todo o percurso talhado para a elaboração desta dissertação.

À Professora Doutora Isabel Falorca, pela sua disponibilidade e incansável apoio durante a realização desta dissertação, o meu muito obrigado por tudo.

Aos meus queridos irmãos e sobrinhos, pelo incansável apoio, amor, carinho que deles tive, tenho e com certeza continuarei a ter eternamente.

Aos meus amigos e colegas, principalmente aqueles com quem trocamos longas conversas sobre as matérias, trabalhos realizados e o futuro da Engenharia Civil.

Por fim, um bem-haja ao meu Bem Adelaide Ajú pelo incansável apoio, incentivo, paciência e carinho que sempre demonstrou durante a realização do presente trabalho.

A todos um sincero muito Obrigado!

Resumo

A presença de estruturas de contenção ou armazenamento de grandes volumes de água propicia grandes alterações nos vales, essencialmente no que diz respeito a segurança de vidas humanas, bens e perturbações ambientais de todo o vale.

A segurança de barragens tem sido um problema que obriga os especialistas a analisar soluções complexas, cuja avaliação é de difícil controlo e previsão. Estas soluções são condicionadas essencialmente por fatores de ordem humana (sabotagem, projetos ou construção deficiente e má gestão da albufeira) e de ordem accidental ou natural (erosão, sismo, chuvas intensas, deslizamentos, assentamentos entre outros).

A dificuldade de prever e de quantificar de forma exata ações de caráter accidental ou natural tem sido ultrapassada, através de fórmulas probabilísticas, por vários fatores (ambientais, humanos, accidentais e económicos) que permitem ter uma ideia aproximada do índice de risco associado.

Porém, o trabalho apresentado representa o estudo de uma possível barragem de aterro no Município da Covilhã sobre a Ribeira das Cortes. Esta barragem foi adequada ao local em questão. Para tal, foram considerados um conjunto de equipamentos para a monitorização e planos de observação que permitiram uma contribuição redutora na fórmula do cálculo do índice final de risco associados à obra.

Assim determinou-se este índice que permite aos responsáveis ter uma perceção dos valores de risco em barragens de aterro.

Palavras-chave

Barragens de aterro, Observação de barragens, segurança de barragens e Índice global de risco.

Abstract

The presence of containment and storage of large volumes of water conducive to large changes in the valleys structures, mainly when we talk about safety human lives, assets and environmental disturbances across the valley. The safety dam has been an issue that requires experts analysis about de complex solution, where is difficult evaluation, control or predict. Theses solution are essentially conditioned by human factors (sabotage, poor projects and construction and poor reservoir management) and accidental or natural order (erosion, earthquake, heavy rains, landslides, settlements etc.).

The difficulty to predict and quantify accurately accidental or natural actions, has been resolved by probabilistic equations that allow to have an idea of the associated index risk associated.

However the presented work is the study of a possible embankment dam (Ribeira das Cortes) in the Covilhã city. This dam was considered appropriate to the site. Was considered a set of equipment for monitoring and observation plans that contribute to reduce the risk in the equation that we used to calculate the associated dans risk.

However this index risk has determined allows all dams disgner and researchers have a perception of risk values in the embankment dams.

Keywords

Fill dams, Observation of dams, safety dams and Global risk level.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
1 Estado de arte	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.2 Revisão bibliográfica	2
1.3 Objetivos	6
1.4 Organização da dissertação	7
2 Tipos de barragens	8
2.1 Conceitos Gerais	8
2.2 Barragens rígidas	8
2.2.1 Barragens de gravidade	8
2.2.2 Barragens de abóbada	9
2.2.3 Barragens de contraforte	10
2.3 Barragens de aterro	11
2.3.1 Barragem de terra	12
2.3.2 Barragem de enrocamento	13
2.3.3 Barragem de terra/enrocamento	15
2.3.4 Barragem de perfil homogéneo e zonadas	16
3 Problemática em barragens de aterro	19
3.1 Conceitos Gerais	19
3.2 Planos de observação de barragens	24
3.2.1 Observações visuais	26
3.2.2 Grandezas e equipamentos do sistema de observação	26
3.2.2.1 Deslocamentos superficiais	28
3.2.2.2 Deslocamentos verticais internos	29
3.2.2.3 Deslocamentos horizontais internos	30
3.2.2.4 Tensões totais	31
3.2.2.5 Tensões neutras	33
3.2.2.6 Pluviómetro	35
3.2.2.7 Sismógrafos	36
3.2.3 Controlo de segurança de barragens	37
4 Caracterização da barragem em estudo	40
4.1 Objetivo e localização	40
4.2 Características da barragem em estudo	42
4.3 Notas de dimensionamento da barragem de aterro	45

4.3.1	Definição do coroamento e cálculo da folga	45
4.3.2	Cálculo da largura do coroamento	51
4.3.3	Proteção de taludes	51
4.3.4	Estudo de percolação	52
4.3.5	Dimensionamento do sistema de drenagem	56
4.3.5.1	Caraterísticas do filtro - chaminé	56
4.3.5.2	Estudo da permeabilidade	57
4.3.5.3	Tapete drenante	57
4.3.5.4	Permeabilidade	58
4.3.6	Estudo da fundação	59
4.3.7	Análise da estabilidade	59
5	Plano de observação para a barragem	61
5.1	Controlo de segurança	61
5.1.1	Modelos teóricos e de comportamento	61
5.1.2	Tratamentos dos dados recolhidos	62
5.1.3	Critérios da tomada de decisão	62
5.2	Plano de observação	63
5.3	Aparelhagem da barragem e as grandezas a medir	65
5.4	Definição das frequências de leituras	66
5.5	Cálculo do índice global de risco	68
5.6	Recomendações finais	69
6	Conclusão	71
6.1	Aspetos gerais	71
6.2	Trabalhos futuros	73
	Bibliografia	74
	ANEXOS	77

Lista de Figuras

Figura 1 - Barragem de Corgas (extraído em 03-07-2015 de http://cnpqb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Corgas.htm)	9
Figura 2 - Barragem do Alqueva (extraído em 11-06-2015 de http://pt.wikipedia.org/wiki/Barragem_de_Alqueva)	10
Figura 3 - Barragem de Miranda extraído em 14-06-2015 de (http://cnpqb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Miranda.htm)	10
Figura 4 - Barragem de terra do Sabugal (extraído em 14-06-2015 de http://cnpqb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Sabugal.htm)	13
Figura 5 - Perfil tipo da barragem de terra do Sabugal (extraído em 14-06-2015 de http://cnpqb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Sabugaldes.htm)	13
Figura 6 - Barragem de Apartadura (extraído em 14-06-2015 de http://cnpqb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Apartadura.htm)	14
Figura 7 - Perfil tipo da barragem de Apartadura (extraído em 14-06-2015 de http://cnpqb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Apartadura.htm)	14
Figura 8 - Barragem de Alcoutim (extraído em 14-06-2015 de http://cnpqb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Alcoutim.htm)	15
Figura 9 - Perfil Tipo de Alcoutim extraído em 14-06-2015 de (http://cnpqb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Alcoutimdes.htm)	15
Figura 10 - Perfil homogéneo (Lança 1997)	16
Figura 11 - Perfil homogéneo modificado com dreno em Chaminé (Lança 1997)	17
Figura 12 - Perfil homogéneo modificado com chaminé horizontal (Lança 1997)	17
Figura 13 - Perfil homogéneo modificado com dreno em pé de talude (Lança 1997)	17
Figura 14 - Perfil zonada com núcleo interno (Lança 1997)	18
Figura 15 - Perfil zonada com talude impermeável a montante e de enrocamento a jusante (Lança 1997)	18
Figura 16 - Exemplo de rede de fluxo em barragens de aterro (extraído em 08-07-2015 de http://pt.scribd.com/doc/246107591/2-ST-636-Fluxo-Bidimensional-Redes-de-Fluxo-2009a#scribd)	21
Figura 17 - “ <i>Piping</i> ”: (a) corpo da barragem e (b) fundação da barragem (<i>Filho</i> , 2006)	21
Figura 18 - Erosão interna na <i>Tunbridge Dam</i> , Tasmânia, Austrália - (extraído em 10-06-2015 de http://pt.slideshare.net/Ricardosgeral/acqua-live-expo-eroso-internaricardo-santos)	22
Figura 19 - Possível geometria da brecha numa situação de rotura por erosão interna: a) Surgimento do poro (pode ser na base da barragem); b) Aumento por erosão; c) Colapso do paramento superior e erosão lateral (extraído de <i>Rodrigues</i> , 2006)	22
Figura 20 - Fenómeno de galgamento de barragem (<i>Filho</i> , 2006)	23
Figura 21 - Possível geometria da brecha em situação de rotura por galgamento- a) Início da brecha no ponto mais fraco; b) Brecha em forma de “V”; c) Aprofundamento da brecha; d) aumento lateral por erosão (<i>Rodrigues</i> , 2006)	24

Figura 22 - Marca superficial através de tacos de nivelamento (<i>Marcelino, 2009</i>)	28
Figura 23 - Estação total (extraído em 16 de maio 2015: http://pt.wikipedia.org/wiki/Esta%C3%A7%C3%A3o_total)	28
Figura 24 - Nível hidráulico (<i>Marcelino 2009</i>)	30
Figura 25 - Inclínometro (<i>Marcelino 2009</i>)	31
Figura 26 - Células de tensão total (<i>Marcelino 2009</i>)	33
Figura 27 - Piezómetro hidráulico (<i>Marcelino 2009</i>)	34
Figura 28 - Piezométrico elétrico extraído em (10-06-2015) de (http://geonor.no/en/piezometers/).	34
Figura 29 - Piezométrico pneumático extraído em (10-06-2015) de (http://soil.co.uk/products/water-monitors-piezometers-meters/pneumatic-piezometer/)	35
Figura 30 - Piezómetro de corta vibrante (<i>Marcelino 2009</i>)	35
Figura 31 - Pluviómetro Ville de Paris (extraído de www.pluviometros.com.br)	36
Figura 32 - Sismógrafo de 7 canais “ <i>Vibracord VX</i> ” (<i>Vibracord, 2010</i>)	37
Figura 33 - Localização da bacia hidrográfica - Freguesia Cortes do Meio, Covilhã - ao nível da cartografia nacional (extraído de Centro de Informação Geoespacial do Exército).	40
Figura 34 - Marcação da bacia hidrográfica (8.65 Km ²) referente a ribeira das Cortes	41
Figura 35 - Perfil tipo da barragem de terra zonada	43
Figura 36 - Pontos a partir dos quais foram traçadas os <i>fetch</i> na albufeira	46
Figura 37 - Marcação das regiões (zonas) em função do tipo de material constituinte	53
Figura 38 - Capacidade de permeabilidade e de sucção do núcleo	54
Figura 39 - Capacidade de permeabilidade e de sucção do maciço	54
Figura 40 - Condições de fronteira	55
Figura 41 - Linhas de fluxos final	55

Lista de Quadros

Quadro 1 - Acidentes ocorridos em barragens e respectivas causas e efeitos (adaptado de <i>Wise</i> 2011)	4
Quadro 2 - Quadro de fenómenos que levam a rotura de barragens (adaptado de <i>Singh</i> 1996)	5
Quadro 3 - Rotura em função aos diferentes tipos de barragens (adaptado de <i>Atallah</i> 2002)	19
Quadro 4 - Resumo de problemas e equipamentos direcionados a barragens de aterro (adaptado de <i>Slope Indicador</i> , 2010)	38
Quadro 5 - Resumo dos parâmetros e respetivos valores de dados hidrológicos	42
Quadro 6 - Valores de declives de taludes sugeridos (<i>Cruz</i> , 2004)	43
Quadro 7 - Cálculo do <i>fetch</i> no ponto A	47
Quadro 8 - Cálculo do <i>fetch</i> no ponto B	47
Quadro 9 - Cálculo do <i>fetch</i> no ponto C	48
Quadro 10 - Maré de vento sobre albufeira	48
Quadro 11 - Valores de coeficientes de sismicidade, α (<i>RSA</i> , 2003)	49
Quadro 12 - Valores de cálculo da sobrelevação	50
Quadro 13 - Cálculo de cota final do coroamento	50
Quadro 14 - Correlação entre altura de onda máxima e diâmetro e espessura do rip-rap propostos por <i>Sherard et al.</i> (1963), apud <i>Mendonça</i> (2012).	52
Quadro 15 - Tabela de relação entre altura da barragem e profundidade da cortina da ASCE (<i>Sandroni</i> , 2012)	59
Quadro 16 - Fatores de segurança aconselhados	60
Quadro 17 - Equipamentos e respetivas grandezas a medir	65
Quadro 18 - Resumo de instrumentação da barragem da ribeira das Cortes	66
Quadro 19 - Proposta da frequência de Observações	67
Quadro 20 - Dispositivos de observação e auscultação na barragem de Cortes	69
Quadro 21 - Recomendações finais	70
Quadro 22 - Matriz interpretativa do índice de risco global em várias fases de vida de barragens	72
Quadro 23 - Avaliação do risco final	72

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Tipos de barragens (extraído em 22 de março de 2015
http://www.icold-cigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp).

11

Lista de Acrónimos

ICOVI	Infraestruturas e concessão da Covilhã
NMC	Nível Máximo de Cheia
NOIB	Normas de Observação e Inspeção de Barragens
NPA	Nível do Plano de Armazenamento
RSA	Regulamento Segurança e Ações
RSB	Regulamento Segurança de Barragens
UBI	Universidade da Beira Interior
PROVIC	Autoridade Nacional de Proteção Civil
CNPGB	Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
ICOLD	International Commission Large Dams
CEIB	Comité Euro-International du Beton
GTICOLD	International Commission Large Dams
CIGB	Comission Internationale des Grands Barrages

Simbologia

D_{10}	Diâmetro efetivo, com 10% do peso são de diâmetro inferior [mm]
D_{15}	Diâmetro efetivo, com 15% do peso são de diâmetro inferior [mm]
D_{60}	Diâmetro efetivo, com 60% do peso são de diâmetro inferior [mm]
K_0	Coefficiente de impulso em repouso
γ_{sat}	Peso específico saturado [kN/m^3]
σ'_{h0}	Tensão efetiva horizontal [kN/m^2]
σ'_{v0}	Tensão efetiva vertical [kN/m^2]
L	Comprimento [m]
a_g	Valor do índice do risco global
B	Largura da base [m]
C	Coefficiente sísmico
E	Condições exteriores de ambiente
F	Condições da obra fiabilidade estrutural
FS	Fator de segurança
g	Aceleração da gravidade [m/s]
hw	Ondulação derivada à onda sísmica [m]
ϕ	Ângulo de atrito [°]
T	Período da onda [s]
θ	Linhas equipotenciais
ψ	Linhas de fluxo
A	Área da seção com percolação transversal [m ²]
C_u	Coefficiente de uniformidade
D	Granulometria dos blocos [m]
$D1$	Altura da barragem [m]
Fe	<i>Fetch</i> efetivo [m]
H	Carga hidráulica [m]
H_s	Coefficiente da rugosidade do paramento a montante [m]
K	Coefficiente de permeabilidade do solo [m/s]
L	Comprimento da onda [m]
LT	Largura do topo [m]
L_c	Largura do coroamento [m]
Q	Caudal de vazão [m ³ /h]
$Q1$	Caudal total que sai [m ³ /s/m]
$Q2$	Caudal proveniente da fundação [m ³ /s/m]
Q_d	Caudal drenado [m ³ /s]
Q_t	Caudal efluente [m ³ /s]
R	Valor do risco humano e económico
R'	Sobrelevação do espraiamento de uma albufeira [m]
S	Ação do vento [m]
W_a	Peso aproximado do bloco [kgf]
c'	Coesão do material [kN/m^2]
e	Espessura do dreno [m]
i	Gradiente do vale [%]
α	Ângulo entre <i>fetch</i> máximo e os restantes segmentos de reta [%]
γ	Peso específico [kN/m^3]
v	Velocidade de circulação de uma partícula de água [m/s]

1. Estado de arte

1.1. Enquadramento do tema

Na presente dissertação, foi desenvolvido um trabalho de estudo sobre os vários tipos de barragens de aterro, os materiais utilizados, as técnicas construtivas, a problemática nas barragens de aterro e todo o plano de observação que deve ser executado, preventivamente para que sejam evitados acidentes.

Na componente prática realizou-se uma análise de uma possível barragem de aterro denominada por “Ribeira dos Cortes - Serra da Estrela” localizada na Covilhã, que será implantada na proximidade das Penhas da Saúde, no concelho de Cortes do Meio. Considera-se ideal a solução (barragem de terra zonada), por razões geológicas, topográfica e reduzido risco de sofrer infiltrações quando comparada a barragens de aterro homogéneo. Quando não existem solos apropriadas, em quantidade suficiente, recorre-se ao tipo zonado que não é mais do que o aproveitamento dos solos mais fracos para aterros estabilizadores e do melhor para o núcleo central (Costa, 2001).

Assumindo que a barragem de aterro para o local, é a mais adequada, o projeto de construção integra num sistema de monitorização da estrutura, através da montagem de equipamentos de observação e equipas de inspeção ajustadas as necessidades da obra. Com base em parâmetros idealizados para a nova estrutura, é possível determinar o valor de índice global de segurança coerente para a futura estrutura. A dificuldade na determinação numérica ou mesmo previsão exata de um possível acidente, obriga a que sejam utilizadas fórmulas de cálculo que permitam caracterizar de forma aproximada o risco (estrutural, ambiental e material) assumido no processo de aceitação ou negação de uma estrutura de aterro. É neste contexto que este trabalho pretende encontrar um coeficiente coerente na determinação do índice global de segurança para a hipotética barragem.

Existem diferentes tipos de riscos associados à construção e manutenção de aproveitamentos hidráulicos (Almeida, 2011). Os planos de gestão de risco em barragens, de um modo geral, deve contemplar os riscos arquitetónicos, como por exemplo, como desativar estruturas de retenção de água. Nas zonas onde o clima está propício a grandes alterações, durante a fase de construção de barragens, podem ocorrer riscos para os ecossistemas e submersão de terrenos agrícolas férteis. No entanto, este tipo de estruturas acarreta um elevado risco para as vidas humanas, bens materiais e impactos ambientais a jusante da obra. Este só pode ser redutível quando todos os fatores (exploração, manutenção, riscos climáticos, impactos ambientais e arquitetónicos.) forem considerados, para além dos riscos conhecidos na fase de construção.

1.2. Revisão bibliográfica

As estruturas de contenção de grandes volumes de água (barragens) são das maiores obras de construção na história do ser humano, seja pela sua utilidade na sociedade (abastecimento de água as redes públicas e industriais, zonas de lazer, entre outras) ou pelo elevado custo de construção, manutenção e desmantelamento.

As barragens são estruturas de extrema importância para a sociedade e torna-se ainda maior a partir do momento que se descobre que estas estruturas são essenciais no processo de produção de energia elétrica.

Em 2000 a.C., surgiu na Mesopotâmia um novo tipo de construção, designada de barragem de terra que em tudo era semelhante às barragens de gravidade, excetuando o facto de serem constituídas por solo ou enrocamento. Um exemplo é a barragem de Nimrod, construída a norte de Bagdad, sobre o rio Tigre. Esta barragem foi usada para controlar as cheias e ajudar na irrigação dos campos de cultivo (*Yang et al.*, 1999).

Relativamente ao período que está compreendido entre 1940 até 1990, foi notório que a primeira década caracteriza-se pela construção de barragens, com alturas e soluções construtivas bastante arrojadas para a época. Foram construídas estruturas altas, onde eram aplicadas cortinas metálicas ou de betão. Foi também neste período que foram construídas barragens de terra-enrocamento com alturas sem precedentes.

A nível mundial, a aplicação de cortinas de betão armado em barragens de enrocamento é vista como uma solução futura.

No final dos anos 60, concluiu-se que a construção de aterros de enrocamentos associados as cortinas de betão no paramento de montante era pouco eficaz nas barragens de enrocamento com alturas significantes.

Entre 1960 a 1980, passou-se a utilizar os materiais de granulometria extensa, sendo este material quase em toda a sua totalidade proveniente de alterações xistosas, que passam a ser compactados por cilindros vibradores. É neste período que se adotam perfis tipo onde o corpo da barragem apresenta uma zona central designada de núcleo, a qual contém uma percentagem de finos maior que nas zonas a montante e a jusante da barragem. Estas estruturas já dispõem de uma galeria de injeção (corta - águas).

De 1970 a 1980 são utilizados filtros chaminé a jusante do núcleo que eram prolongados através de um tapete com função drenante até ao pé de jusante da estrutura. Algumas barragens da época apresentam um revestimento vegetal para proteção do paramento a jusante contra possível erosão pluvial.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Na década de 80, mundialmente é notório o crescente recurso de estruturas de enrocamento com cortinas a montante em betão armado e betão betuminoso.

Em Portugal, as barragens construídas no decorrer destes anos foram na sua maioria estruturas de aterro e enrocamentos compactados, com núcleo estreito, constituídas por um sistema de filtros e drenos a montante e a jusante da estrutura. Nessa época, usou-se pela primeira vez um núcleo compactado com teor de água ótimo no ensaio de compactação leve.

Em Portugal verificar-se-á uma tendência crescente para a construção de barragens de aterro, designadamente de enrocamento. No necessário confronto com todas as restantes soluções possíveis, a ponderação de fatores económicos e de segurança - fatores básicos na tomada de decisões em engenharia - determinará essa tendência, colocando Portugal em sintonia com o panorama internacional nesta matéria (*Maranha das Neves, 1987*).

A evolução das barragens de aterro ganha maior número de adeptos com a evolução de cilindros vibradores de grande potência, o que permite a compactação de enrocamentos de tamanhos de maiores dimensões, com garantia de obtenção de índices de vazios com menores dimensões aos que até então eram produzidos (*Maranha das Neves, 2002*).

Estudos de 2007 indicavam a existência de 231 grandes barragens em Portugal, dos quais 66% destas são de aterro ou enrocamento. Em Portugal, cerca de 153 grandes barragens de aterro, são destinadas à irrigação e as restantes de alvenaria e betão estão associadas à produção de energia elétrica (*Pimenta, 2008*).

As barragens de terra predominam em cerca de 63% de todas as barragens registadas, sendo este tipo de barragens, naturalmente, o tipo mais antigo e o que tem acompanhado o desenvolvimento das civilizações (*ICOLD, 2014*).

Conclusivamente, denota-se uma crescente tendência de se privilegiar a construir as barragens de aterro em detrimento das barragens de betão, mas o armazenamento de grandes quantidades de água, condição vital para as sociedades, induz por si só um elevado grau de risco do vale. O reconhecimento da grande utilidade das barragens é tão preponderante como a necessidade da procura de um decrescente número de acidentes em barragens.

O quadro 1 relembra alguns acidentes ocorridos em barragens, envolvendo os engenheiros para uma reflexão sobre as técnicas de construção adquiridas ao longo dos séculos e necessidades que devem ser tidas em conta. As melhorias dos mesmos surgem quando existe domínio de novos campos de estudos (geologia, comportamento dos materiais rochosos e aparelhagem de barragens), com o claro objetivo da melhoria ao nível da segurança.

Quadro 1 - Acidentes ocorridos em barragens e respetivas causas e efeitos (adaptado de Wise, 2011).

<i>Ano</i>	<i>Localização da barragem</i>	<i>Causas de ocorrência do acidente</i>	<i>Impactos causados</i>
1996	Wales, Reino Unido	Liquefação devido a chuvas intensas	Libertaram-se 162m ³ de água onde morreram 144 pessoas
1972	Virginia, E.U.A.	Colapso da barragem após chuvas intensas	Morte de 125 pessoas e destruição de 500 habitações
1985	Trento, Itália	Inadequado descarregador de cheias	Morte de 268 vidas humanas e destruição de 62 edifícios
1998	Aznalcóllar, Espanha	Assentamento da fundação	Terras de cultivo agrícola inundadas por lamas
2011	Sichuan, China	Deslizamento de terra causadas por chuva intensa	Destruição de estradas e habitações.

A possibilidade de uma barragem falhar constitui nos dias de hoje um evento com baixo índice de ocorrência, mas a sua ocorrência gera por si só uma catástrofe, o que leva os organismos responsáveis em segurança de barragens a investigar as razões de acidentes ou incidentes com objetivo de levar a cabo medidas preventivas na segurança dos vales a jusante (segurança populacional, ambiental e económicos).

Os problemas de rotura de barragens não se prendem apenas com problemas de ordem humana, mas igualmente problemas de ordem natural, fenómenos estes que saem do completo controlo humano, deslizamento de terras, ocorrência de sismos e cheias com caudais superiores aos considerados no projeto. São estas as situações que podem influenciar de forma direta ou indireta o comportamento de barragens, levando mesmo a rotura.

Em 1996, Singh considerou que os fenómenos que levam a rotura de barragens podem ter origem accidental ou de natureza humana. Esses fenómenos estão representados no quadro 2 a seguir representado:

Quadro 2 - Quadro de fenómenos que levam a rotura de barragens (adaptado de Singh 1996).

<i>Fenómenos que levam à rotura de barragens</i>	
<i>Natureza humana</i>	<i>Forma accidental</i>
Atos de sabotagem	Erosão interna
Construção ou projetos deficientes	Deterioração natural das estruturas
Demolição descontrolada	Ações da natureza tal como sismos e chuvas intensas
Localização imprópria	Assentamentos diferenciais
Má gestão da albufeira	Deslizamentos
-	Galgamento
-	Ações de ondas

Na segunda metade do século XX, a comunidade tecnocientífica, de projeto, construção e exploração de barragens realizou os primeiros Procedimentos de Segurança.

A nível mundial o problema de segurança /gestão das grandes barragens é debatido nas conferências ou reuniões organizadas pelo *ICOLD* (designado na literatura inglesa *International Commission Large Dams*), comissão esta que Portugal faz parte através de um grupo Nacional apelidado por Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens (CNPGB).

“O Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) é o documento legal que na atual legislação portuguesa (Decreto-Lei nº 344/2007, de 15 de Outubro) define quais os meios a implementar no controlo e segurança de barragens, por intermédio de medidas adequadas de projeto, construção, exploração, observação e inspeção” (PROVIC, 19 de abril de 2015).

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) tem desempenhado um papel fulcral, na observação e controlo de qualidade das barragens portuguesas e do mundo, partilhando esse mesmo conhecimento com os projetistas e donos de obra no sentido de otimizar os critérios e métodos de dimensionamento de barragens.

Nas décadas 80 e 90, surgem novos conceitos e metodologias integrados para a segurança dos vales a jusante de barragens que aglomeram diversos domínios, não só o domínio tradicional respeitando a tecnologia de engenharia de barragens, como também novas tecnologias de

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

apoio à decisão e à proteção civil, os meios de comunicação social, as ciências aplicadas, o ordenamento e a gestão do vale (*Almeida 2000 e Almeida 2001*).

Todo o esforço levado a cabo pelas entidades responsáveis (engenheiros, investigadores, dono de obra e equipas de manutenção),supõe a melhoria em segurança de barragens, contudo toda a máquina pode falhar, quando esquecida ou mal elaborada a observação no controlo de segurança. O sistema de gestão de risco é comparável a uma engrenagem onde cada elemento tem definido a sua função, onde o êxito de todas as peças, contribui para o alcance do objetivo final.

Assim um bom plano de observação deve dar respostas ou ajudar na tomada de decisão. As observações assentes num plano de observação realizadas por técnicos com experiência e competência permitem analisar comportamentos e tomar medidas adequadas em prol da segurança de tudo que pode existir a jusante da albufeira.

Atualmente, os dispositivos de observação de barragens de aterro, devido ao grande desenvolvimento tecnológico, permitem uma elevada fiabilidade de resultados. A engenharia não sendo uma ciência exata, constrói ou desenvolve produtos onde a possibilidade dos mesmo falharem ou falirem, são riscos calculados através de fórmulas probabilísticas onde os avanços tecnológico, experiência acumulada através da aprendizagem em erros passados, entram nestas fórmulas como fatores redutores no cálculo do nível de risco a associada a problemática da segurança de barragens de aterro.

O conceito de risco assenta na estimativa de probabilidade de ocorrência e danos provocados pelo acidente, conduzindo à necessidade de modelação de fenómenos (*Santos et al.,2007*).

É neste contexto que será feita a apreciação de risco que envolve a barragem em estudo “Ribeira dos Cortes - Serra da Estrela”, sobre a qual procura-se analisar e avaliar os riscos inerentes e a sua viabilidade construtiva através da aceitação dos benefícios da mesma em segurança contra os riscos a ela associados.

1.3. Objetivos

A presente dissertação apresenta o estudo sobre a apreciação de risco que envolve uma possível barragem de aterro “Ribeira dos Cortes - Serra da Estrela”, sobre a qual procura-se analisar e avaliar os riscos inerentes e a sua viabilidade construtiva.

No final deste trabalho espera-se que sejam atingidos os seguintes objetivos:

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

- ✓ Verificação de métodos, equipamentos de instrumentação e observação, o seu uso a sua aplicação;
- ✓ Determinar coeficiente de índice de segurança adequado e coerente para futura barragem de aterro de Ribeira das Cortes;
- ✓ Abertura de campos de discussão sobre a melhoria e crescimento no âmbito de segurança de barragens de aterro.

1.4. Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos, sendo o primeiro relativo ao Estado de arte, no qual este subcapítulo está incluído.

No capítulo 2 abordou-se os tipos de barragens, nomeadamente barragens de betão, barragens de aterro e barragens de enrocamento. Neste capítulo foi dado maior ênfase às barragens de aterro ou enrocamento relativamente às de betão.

O capítulo 3 trata sobre a abordagem dos problemas em barragens de aterro, grandezas a observar, técnicas e características da aparelhagem e por fim, o controlo de segurança destinado à escolha do tipo de barragens de aterro

O capítulo 4 traduz-se na caracterização do local onde se pretende construir a futura barragem da Serra da Estrela, perfil transversal tipo da barragem e materiais a empregar.

No capítulo 5 executou-se planos de observação a implementar na futura estrutura, grandezas que devem ser medidas, os aparelhos de medição a instalar, e por fim o cálculo do índice global de risco.

O último capítulo consiste na conclusão do trabalho desenvolvido assim como são apresentados trabalhos futuros sempre com objetivo de melhoria.

2. Tipos de barragens

2.1. Conceitos Gerais

A construção de barragens é uma tarefa que na fase de projeto obriga a tomada de decisão quanto ao tipo de barragem a ser projetada, sendo a sua escolha essencialmente dependente de fatores geológico, morfológicos, finalidade da estrutura, fatores de segurança e o fator económico. Em seguida, faz-se uma reflexão não exaustivo sobre os tipos de barragens existentes distinguindo as barragens rígidas e as não rígidas ou de aterro.

2.2. Barragens rígidas

Este tipo de estruturas com funções preferenciais, cujo principal material utilizado na sua construção é betão ou alvenaria. A decisão em construir uma barragem deste tipo, advém de vários fatores, nomeadamente local (topografia, geologia), da finalidade (aproveitamento hidrelétrico por exemplo) e por fim quando se pretende dotar as barragens de características inerentes ao betão, tal como durabilidade, maneabilidade, conservação entre outras. Apesar da sua grande resistência quando construídas em zonas de fundação com boas capacidades de carga e pouco fraturadas, as barragens rígidas apresentam algumas fragilidades relativamente à possibilidade de fender com consequências catastróficas. No entanto, este tipo de barragens em situação de galgamento pela água na albufeira, não trará consequências tão prejudiciais.

No núcleo das barragens rígidas temos três tipos de barragens: gravidade, abóbada ou em arco e as de contrafortes resistentes. Todavia, a seleção de uma destas barragens depende dos fatores económicos, da qualidade do maciço de fundação e do vale encaixante.

2.2.1. Barragens de gravidade

A barragem de gravidade é uma estrutura mais resistente, associada a baixos custos de manutenção. As barragens de gravidade podem ser solução construtiva para praticamente todos os locais do globo terrestre, com especial atenção ao nível da limitação da altura da estrutura cuja seja muito elevada, pode prejudicar a resistência da barragem a nível da fundação. Assim quando as estruturas são construídas sobre material de aluvião incoerente, a altura deve ser inferior aos 20 m, mas no caso de construir-se uma barragem sobre uma fundação de rocha sã, situada a considerável profundidade relativamente à superfície do terreno, torna-se mais adequada a construção de barragem de terra ao invés de uma

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

barragem de betão. Uma vez que, esta última torna-se muito cara devido à quantidade de escavação necessária até encontrar a rocha sã.

A estabilidade destas estruturas é garantida devido ao peso e largura da base. O peso e a pressão da água tanto no paramento a jusante como a montante são os principais esforços aplicados às estruturas. Normalmente, quando ocorrem ruturas por tombamento ou deslizamento deve-se às forças mencionadas. As barragens de Cercosa, Bouçais - Sonim e de Corgas em Castelo Branco (figura 1), são exemplos de barragens de gravidade.



Figura 1 - Barragem de Corgas extraído em 03-07-2015 de
(http://cnpqb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Corgas.htm)

2.2.2. Barragens de abóbada

Este não é um tipo construtivo muito utilizado a nível global, existindo mais barragens deste tipo no continente Europeu, pelos seus vales profundos e fechados. Esta tipologia de barragens deve ter uma relação comprimento/altura muito pequeno e deve estar situada em encostas de vales onde exista material rochoso adequado e de elevada resistência, por forma a suportar os esforços que a estrutura transmite.

A barragem do Alqueva ilustrada na figura 2, Alto Lindoso, por exemplo apresentam uma curvatura para montante, que faz com que exista a transmissão de pressão hidrostática à fundação e aos encontros. Este fenómeno ocorre devido ao comportamento dos arcos à compressão, que obriga à construção deste tipo de barragens em zonas com solos com boa capacidade de carga dos encontros e da base de fundação. A técnica construtiva utilizada consegue reduzir as dimensões e respetivamente a quantidade de betão, comparativamente às barragens de gravidade.



Figura 2 - Barragem do Alqueva (extraído em 11-06-2015 de http://pt.wikipedia.org/wiki/Barragem_de_Alqueva)

2.2.3. Barragens de contraforte

Este tipo de barragens são estruturas contínuas a montante para garantir a estanquicidade da água, sendo estruturalmente suportada por um contraforte a jusante, mas este tipo de barragem está associado à barragem de betão, seja de gravidade ou em arco. Um exemplo de barragem com contraforte é a Barragem de Miranda, ilustrada na figura 3, próximo da cidade de Miranda do Douro no distrito de Bragança.

Na realidade estas barragens são muito semelhantes às barragens de gravidade, mas o facto de ser construído um contraforte, faz com que exista um aumento de compressão a nível das fundações, obrigando a maiores cuidados a este nível em todo o processo construtivo e estudo geológico.

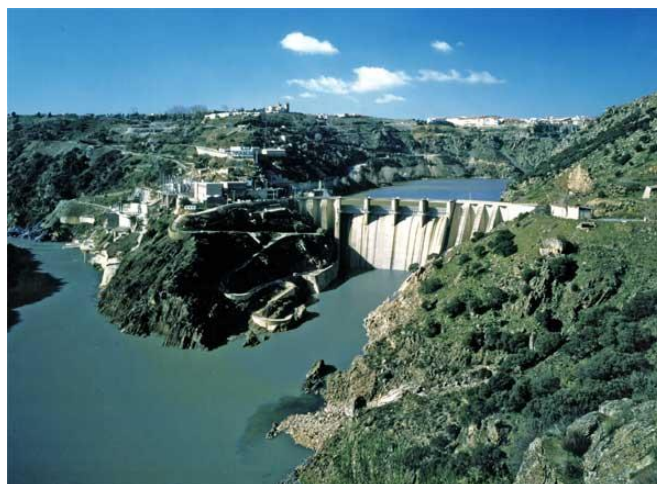


Figura 3 - Barragem de Miranda extraído em 14-06-2015 de (http://cnpqb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Miranda.htm)

2.3. Barragens de aterro

Os avanços tecnológicos juntamente com a construção de equipamentos mecânicos (que facilitam as escavações, transporte, compactação de grandes volumes de aterro), associados a procedimentos de controlo de qualidade na construção, permitem um maior conhecimento das propriedades dos solos. Este facto fez com que as barragens de aterro resultassem numa solução mais apetecível e cuja segurança atualmente está ao nível das barragens de betão, pois funcionam como se tratasse de uma barragem de gravidades mas são deformáveis o que consequentemente diminui os riscos de rotura.

Conforme o nome indica, esta é uma barragem que resulta de um aterro de terra e ou rocha compactada, como principais materiais de construção, sendo estes materiais explorados no local ou nas proximidades, sem recurso a grandes adições de materiais aglutinante com capacidade de retenção da água. As barragens de aterro são do tipo de barragens mais antigas e utilizadas conforme é possível ver no gráfico 1.

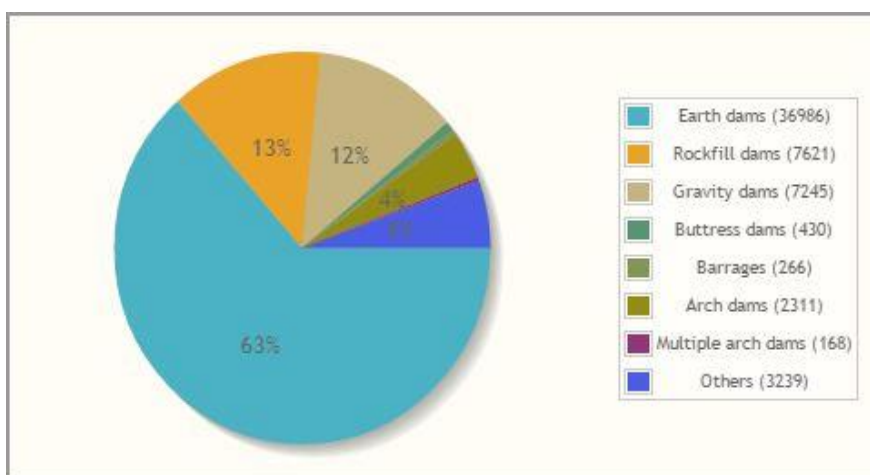


Gráfico 1 -Tipos de barragens (extraído em 22 de março de 2015 http://www.icold-cigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp).

Este tipo de barragens apresenta grandes vantagens, essencialmente por utilizar como material de construção em grande parte o existente no local, sem necessidade de utilizar materiais resultantes da intervenção fabril (betão entre outros aglutinantes, madeiras e aço), o que em regiões com dificuldades de acesso quer devido a topografia quer pela distância das unidades industriais, torna a solução vantajosa.

Além do mencionado, as barragens de aterro justificam-se pela vantagem, de poderem sofrer deformação e alguma fissuração sem que se adivinhe uma catástrofe no horizonte, quando comparadas com as barragens de betão, o que faz com que sejam aconselháveis em zonas do globo onde exista a possibilidade de ocorrência de fenómenos naturais como o sismo.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Barragens de aterro adequam-se principalmente a vales largos. Independentemente do local de construção e da simplicidade estrutural da barragem, a avaliação das condições geológicas e geotécnicas tem um papel relevante na escolha da fundação da estrutura, a qual pode variar em função do material disponível e utilizado na construção” (Quintela, 1990).

As barragens de aterro consoante o tipo de materiais predominantes na sua construção, podem classificar-se de terra ou de enrocamento conforme se utilize solos ou enrocamentos respetivamente.

Caldeira, 2001, distinguiu em geral os seguintes tipos de barragens:

- ✓ Barragens de terra, com perfil homogéneo ou perfil zonado;
- ✓ Barragens de enrocamento, com órgão de estanquidade a montante ou com órgão de estanquidade interno;
- ✓ Barragens mistas, com perfil constituído por maciços de terra e enrocamento.

A Norma de Projeto de Barragens, dentro do universo de barragens de aterro e em função do material disponível para a construção, classifica as barragens tendo em conta que sempre que o corpo de uma barragens seja constituída por mais de 50% de determinado solo (barragem de terra), maciço rochoso (barragem enrocamento) e se for de metade solo e outra metade de maciço rochoso (Barragem de terra / enrocamento).

2.3.1. Barragem de terra

As barragens de terra são estruturas que resultam do aterro/depósito de grandes quantidades de terra segundo a transversal a um curso de água, onde as terras são posteriormente compactados através de equipamentos mecânicos adequados. As barragens são classificadas como sendo de terra quando o seu corpo é constituído em mais de 50% por solo compactado. Este tipo de barragens pode ser erguido sobre os vales largos, em qualquer tipo de fundação, rocha ou materiais inconsolidados, nomeadamente solos argilosos ou arenosos.

No distrito da Guarda, concelho do Sabugal, foi erguida uma barragem de terra zonada como verificar-se-á nas figuras 4 e 5 sobre a bacia hidrográfica do Douro, uma estrutura com finalidade de rega, abastecimento e produção de energia (Barragem do Sabugal). Outras barragens de terra são as barragens de Alijó, Armamar, Teja e Santa Justa.



Figura 4 - Barragem de terra do Sabugal (extraído em 14-06-2015 de http://cnpqg.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Sabugal.htm)

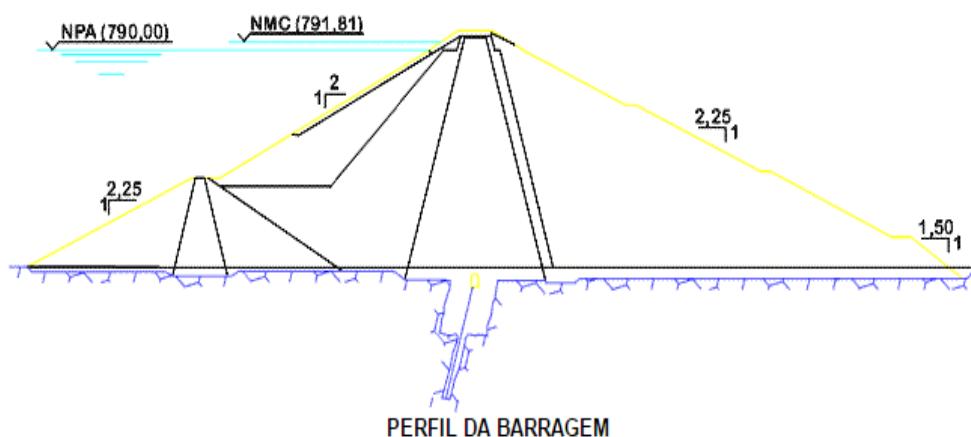


Figura 5 - Perfil tipo da barragem de terra do Sabugal (extraído em 14-06-2015 de http://cnpqg.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Sabugaldes.htm)

2.3.2. Barragem de enrocamento

Entende-se como enrocamento os fragmentos rochosos, pelo que as barragens deste tipo, são estruturas construídas por fragmentos rochosos devidamente colocados de forma a garantir maior contacto entre superfícies, sendo os vazios entre elas preenchidos por material de menor granulometria. Os maciços de dimensões variável e com permeabilidade global significativa, são os elementos que asseguram a estabilidade.

Neste tipo de barragem, normalmente, é adotada como solução quando se trata de locais onde o custo de betão é bastante elevado quando comparado com o custo de produção de grandes quantidades de rocha. Importa relembrar que as barragens de enrocamento devem

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

ser construídas utilizando materiais locais (rochas) com capacidade de resistência as intempéries, tanto físicas e químicas, as rochas não devem ser de fácil fragmentação, pelo que a sua construção estando condicionada a fatores económicos e de resistências dos materiais utilizados, torna-se uma solução que deve ser bastante ponderada e justificada.

Como exemplo de barragens de enrocamento (Paradela, Vilar e Lagoacho) cita-se a barragem de Apartadura (figura 6 e 7) no distrito de Portalegre, sobre a bacia hidrográfica do Tejo, cuja estrutura é formada por aterro de enrocamento com cortina a montante e com uma fundação essencialmente constituída por material xistoso. A barragem de Apartadura tem como principal objetivo o abastecimento e rega.



Figura 6 - Barragem de Apartadura (extraído em 14-06-2015 de http://cnpgb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Apartadura.htm)

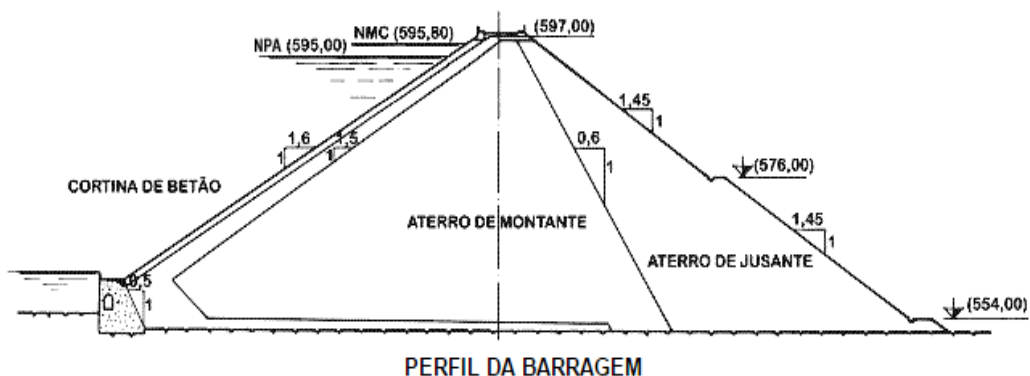


Figura 7 - Perfil tipo da barragem de Apartadura (extraído em 14-06-2015 de http://cnpgb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Apartadura.htm)

2.3.3. Barragem de terra / enrocamento

São estruturas hidráulicas que resultam da mistura /aglomerado de terra e pedra ou fragmentos rochosos devidamente compactados, que permite erguer um reservatório de armazenamento de água para os objetivos da obra.

Uma das barragens de terra / enrocamento (Óbidos, São Domingos, Vale do Gaio) é a barragem e Alcoutim representada na figura 8 e cujo perfil corresponde à figura 9, cita no distrito de Faro, sobre a bacia hidrográfica do Guadiana, tem como principal função o abastecimento de água. A barragem de aterro de Alcoutim apresenta um núcleo de enrocamento, onde a zona da fundação é essencialmente formada por xisto e grauvaques.



Figura 8 - Barragem de Alcoutim (extraído em 14-06-2015 de http://cnpgeb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Alcoutim.htm)

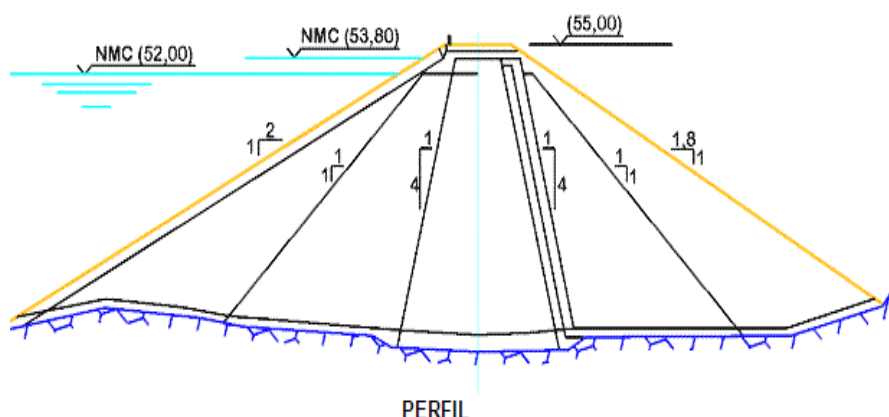


Figura 9 - Perfil Tipo de Alcoutim (extraído em 14-06-2015 de http://cnpgeb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Alcoutimdes.htm)

2.3.4. Barragens de perfil homogéneas e zonadas

As estruturas de perfil homogéneo (figura 10), são compostas por um tipo de material, sem proteção dos taludes. Neste tipo de barragens, sem dispositivos de controlo de percolação, tal como filtros e drenos, todo o maciço tem a função não só de fazer transferência de cargas para as fundações, como também servem de controlo à percolação da água. Normalmente este perfil é constituído com argilas arenosas, misturas de argilas, areias argilosas e areias, cascalho.

Os paramentos devem ser de 1:2 ou de 1:3, o que garante maior estabilidade das estruturas, ou seja quanto menor for a inclinação do talude a montante submerso, melhor resistirá a estrutura ao abatimento.

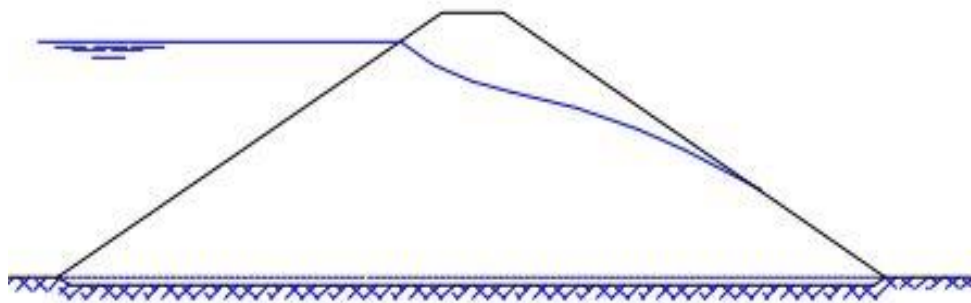


Figura 10 - Perfil homogéneo (Lança 1997)

No perfil homogéneo pelo facto das fundações não garantirem a necessária estanquidade, existindo a possibilidade de ocorrência de ressurgências a jusante da base do talude, para evitar erosão tubular interna causada pelas forças de percolação, decide-se muitas vezes recorrer ao perfil homogéneo modificado.

As barragens de perfil homogéneo modificado (figura 11) diferenciam-se das de perfil homogéneo apenas, pela aplicação de uma pequena percentagem de material mais permeável para a construção de drenos com finalidade de controlo de percolação. Nas figuras seguintes apresenta-se os três tipos de barragens de perfil homogéneo modificado, onde cada um deles apresenta um sistema drenagem diferente. Sempre que ocorram defeitos de construção, matérias disponíveis com fracas propriedades, problemas de compactação ou utilização de material de construção constituído por solos dispersivos, é construído um sistema de correção, através da combinação entre um dreno em chaminé e um dreno horizontal.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

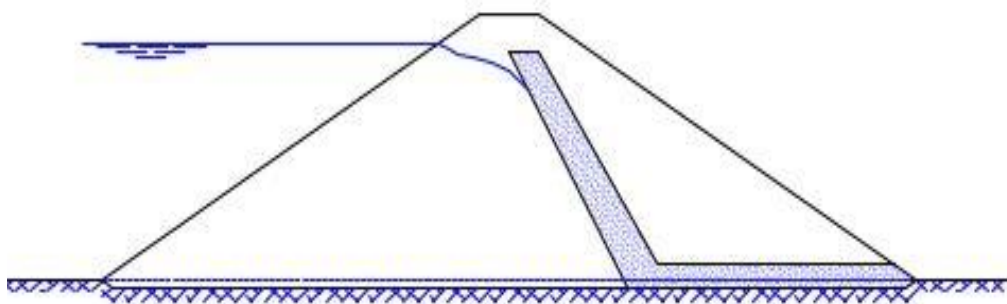


Figura 11 - Perfil homogêneo modificado com dreno em Chaminé (Lança 1997)

Esta solução pode ser utilizada sempre que se esta perante um material disponível para construção do dreno bem graduado, com especial atenção as possíveis forças de percolação entre o filtro, fundação e aterro (figura 12).

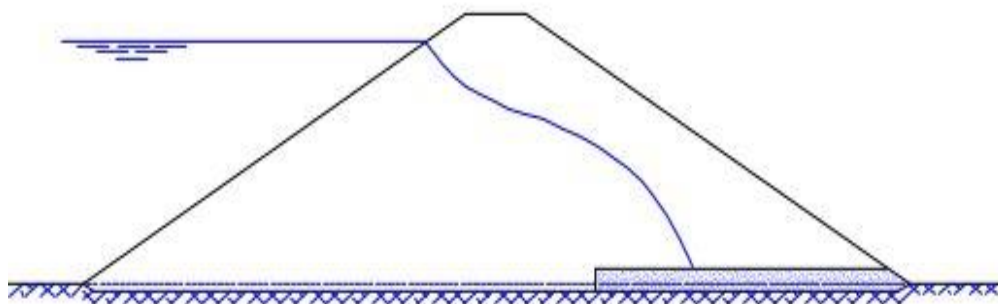


Figura 12 - Perfil homogêneo modificado com chaminé horizontal (Lança 1997)

A solução de construção de dreno em pé de talude visível na figura 13 faz sentido em casos que se dispõe de material necessário à construção do dreno com elevada granulometria.

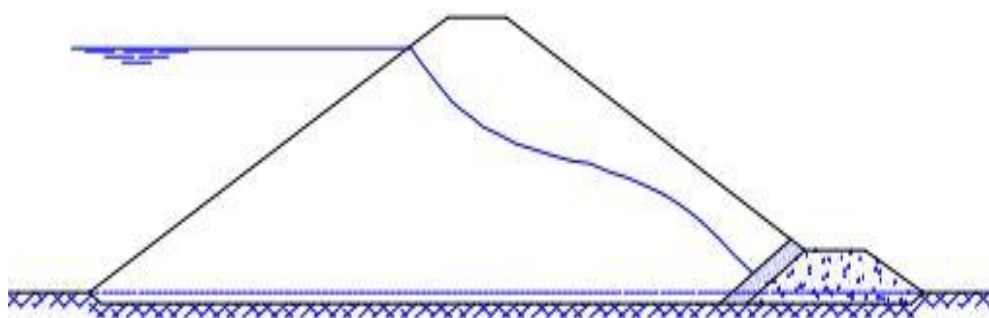


Figura 13 - Perfil homogêneo modificado com dreno em pé de talude (Lança 1997)

Em barragens de perfil zonado, existe um núcleo central impermeável, coberto por materiais de maior permeabilidade, cujos servem para suportar e proteger o núcleo. Sendo as zonas

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

permeáveis constituídas principalmente por areias, cascalho ou mistura de cascalho, areia e fragmentos rochosos.

Para além do perfil zonado acima mencionado, existem barragens zonadas com núcleo constituído principalmente por material impermeável e um talude de jusante que protege a estrutura de sofrer erosões internas resultantes das forças de percolação, pelo que esta zona deve ser constituída por material permeável. Nas figuras seguintes é possível visualizar os perfis tipos de barragens zonada com núcleo interno (figura 14) e com talude de montante impermeável e o de jusante de enrocamento (figura 15).

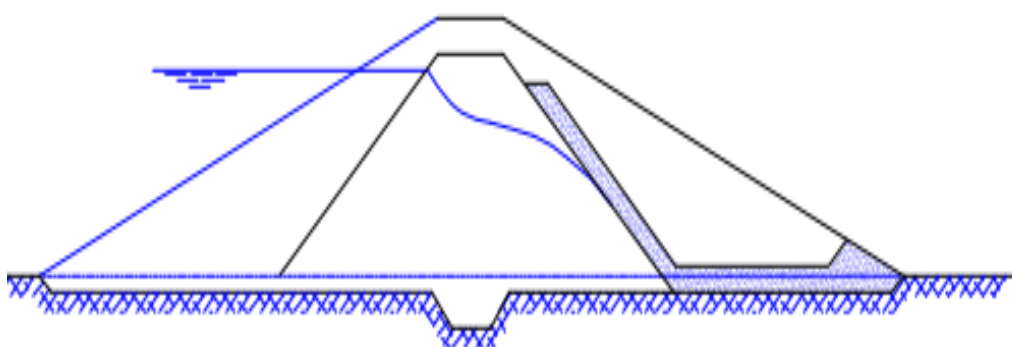


Figura 14 - Perfil zonada com núcleo interno (Lança 1997)

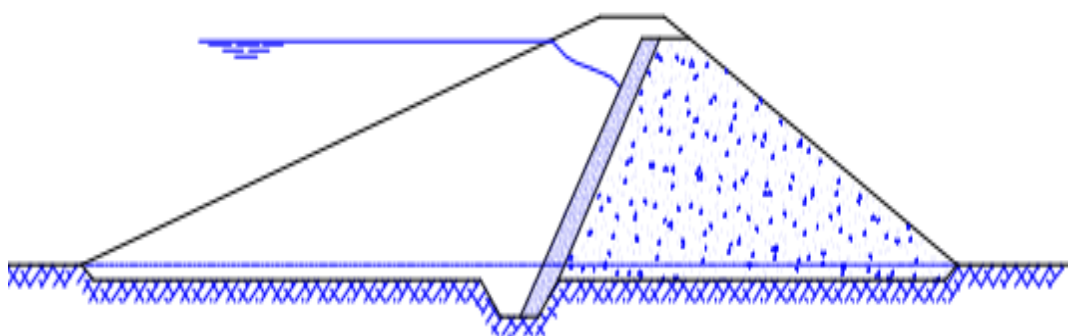


Figura 15 - Perfil zonada com talude impermeável a montante e de enrocamento a jusante (Lança 1997).

3. Problemática em barragens de aterro

3.1. Conceitos Gerais

Na sua maioria os acidentes de barragens está relacionado com o tipo de estrutura que é projetada para um determinado local. Uma escolha desadequada para as condições do local pode ser fatal no que diz respeito à possibilidade de ocorrência de um acidente ou incidente.

Por maior que seja a experiência dos projetistas, estes nunca poderão descuidar de um estudo detalhado sobre as condições geotécnicas, geológicas, tipos de materiais existentes e dados hidrológicos entre outros fatores que ajudam na tomada de decisão sobre o tipo de barragem que melhor se adapta ao local, quer a nível de segurança estrutural, ambiental e viabilidade económica.

Porém várias razões podem levar à rotura de barragens (erosões internas, deslizamento de taludes, fissurações, galgamento) conforme o apresentado no quadro 3, onde estão descritas as principais causas da rotura de barragens por tipologias. Para melhor responder estes problemas devem ser investigados e por fim solucionados para que a resposta quanto à segurança em barragens seja cada vez mais uma garantia para todo o vale a jusante.

Quadro 3 - Rotura em função aos diferentes tipos de barragens (adaptado de Atallah 2002).

<i>Mecanismos de rotura</i>	<i>Tipos de barragens</i>				
	<i>Aterro</i>	<i>Gravidade</i>	<i>Com reforço</i>	<i>Arco</i>	<i>Múltiplos arcos</i>
<i>Deslizamento</i>	✓	✓	✓	X	X
<i>Piping</i>	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Derrubamento</i>	X	✓	X	✓	X
<i>Galgamento</i>	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Esvaziamento rápido</i>	✓	X	X	X	X
<i>Infiltração interna</i>	✓	✓	✓	✓	✓

Em análise rápida ao quadro 3, facilmente se conclui que o maior problema nas barragens de aterro é a quantidade de água que pode circular pela fundação, corpo da barragem, na albufeira, situações de esvaziamentos rápidos, enchimentos rápido e transbordo.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Estatisticamente verifica-se que na maioria dos acidentes com barragens de terra ocorreram devido à falta de um sistema eficiente de controlo de fluxo (Massad, 2003). Em termos de barragens de aterro devemos ter em conta a permeabilidade (facilidade ou não da circulação de água através do corpo ou fundações das barragens e maciços). O efeito devido à percolação não controlada nas barragens de aterro, leva à instabilidade hidráulica da estrutura, erosão interna ou “*Piping*” e rotura hidráulica. Sobre a matéria é necessário distinguir os fluxos de água, os quais podem ser considerados unidimensionais nos fluxos em que a água ocorre na mesma direção, sendo estes igualmente fluxos unidirecionais (vertical ou horizontal), com o caudal de vazão Q (m³/h) calculado através da Lei de Darcy:

$$Q = v \times A = K \times i \times A, \quad (1)$$

Em que v (m/s) corresponde à velocidade de circulação de uma partícula de água, A (m²) é área da secção do solo com percolação transversal, K (m/s) representa o valor de coeficiente de permeabilidade do solo, i (%) significa o gradiente do vale representado pelo quociente entre a carga hidráulica e a extensão do caminho de percolação transversal.

O fluxo da água pode em determinadas condições deslocar-se seguindo ou descrevendo caminhos curvos em planos paralelos, o que sucede essencialmente em barragens. Este tipo de fluxo é considerado fluxo bidimensional. O estudo deste fenómeno torna-se mais fácil de entender através de visualizações gráficas (figura 16).

O fluxo da água nas barragens pode ser determinado pela análise bidimensional da percolação com a construção das linhas de fluxo (ψ) e linhas equipotenciais (θ) (perpendiculares entre si). A construção da rede de fluxo bidimensional, assim designada, obedece a condições fronteira do próprio problema, ou projeto. As condições fronteiras são as soluções para a resolução das equações de Laplace que as linhas obedecem. O estudo deste fenómeno torna-se mais fácil de entender, e permite calcular o fluxo, o caudal, a tensão efetiva e a pressão de água nos poros em qualquer ponto do interior da barragem. Por exemplo, a linha que intersecta as linhas de fluxo e que é a fronteira do dreno, será uma condição fronteira em que se conhece o potencial, tal como a linha definida como linha de entrada de água no paramento de montante. A figura 16 mostra o esquema típico de uma rede de fluxo em barragem de aterro homogénea. Caso fosse zonada teríamos descontinuidades nas linhas derivadas a diferentes permeabilidades (uso das noções de permeabilidade equivalente).

Entende-se como linhas de fluxo a trajetória que a água faz no interior do maciço, deslocando-se de pontos de potencial mais elevada (montante), para os pontos de potencial mais baixa (jusante).

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

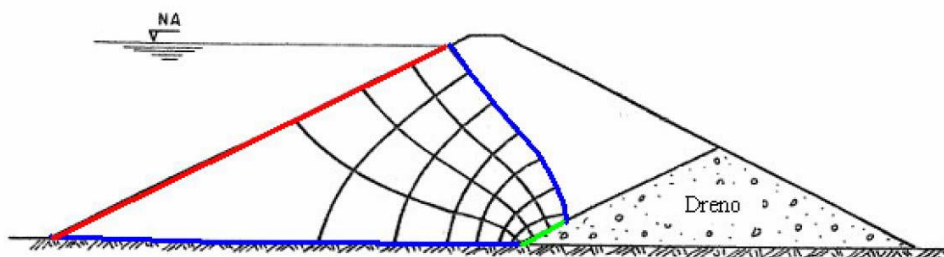


Figura 16 - Exemplo de rede de fluxo em barragens de aterro (extraído em 08-07-2015 de <http://pt.scribd.com/doc/246107591/2-ST-636-Fluxo-Bidimensional-Redes-de-Fluxo-2009a#scribd>)

No entanto, os fluxos de água pelo maciço ou núcleo quando controlados, não garantem a instabilidade hidráulica (“*piping*” e rotura hidráulica) por si só, ocorrendo estes fenómenos quando o fluxo de água não é controlado (figura 17, 18 e 19), traduz-se em erosão, gerando o transporte de terras que compõem o corpo da barragem, com tendência de agravar-se à medida que a água tende a percolar pelo corpo da estrutura, até ocorrer a rotura total da mesma.

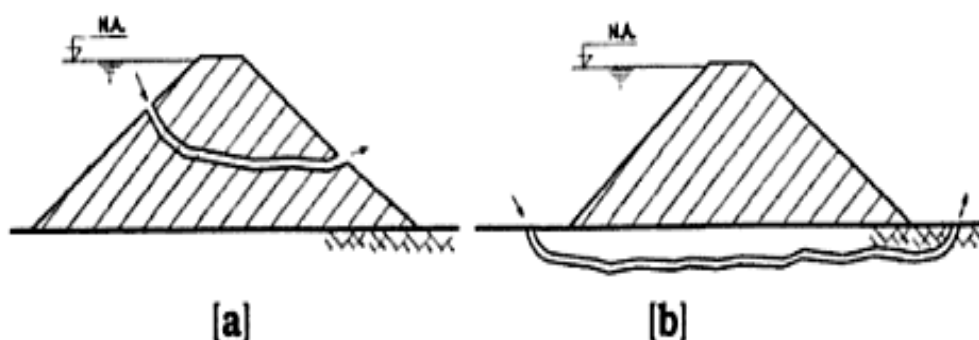


Figura 17 - “*Piping*”: (a) corpo da barragem e (b) fundação da barragem (Filho, 2006).

Os especialistas consideram como a melhor forma de evitar este fenómeno, é aumentar o caminho da percolação, fazendo diminuir a energia, ou modificando-lhes o caminho, usando drenos, cortinas impermeáveis, tapetes impermeáveis a montante entre outros.

Utilizam-se as argilas na zona do núcleo, por estas apresentarem maior plasticidade o que significa maior resistência ao mecanismo, ao contrário dos materiais sem coesão, que oferecem a menor resistência ao desenvolvimento do “*Piping*”. Daí o uso das argilas em barragens zonadas em que servem de núcleo, mas não dispensam normalmente a aplicação de filtros a montante.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Nos casos de barragens em funcionamento com problemas alguma bibliografia, indica como solução:

- ✓ Construir-se uma parede contínua a jusante ou cravação de estacas muito próximas umas das outras, obrigando a água a percolar numa linha de fluxo mais longa, o que origina a que as velocidades de percolação diminuam;
- ✓ Construção a jusante de um tapete impermeável que garante maior base a barragem.

Em síntese no dimensionamento de barragens de terra, para além do descrito sobre o “Piping”, deve o projetista preocupar-se em aspetos que podem levar ao colapso das estruturas de aterro por deslizamentos. A melhor solução para evitar o problema, passa por evitar que exista o transporte das partículas finas que constituem o núcleo, através da aplicação de filtros entre o núcleo e o paramento de jusante da estrutura.



Figura 18 - Erosão interna na Tunbridge Dam, Tasmânia, Austrália - (extraído em 10-06-2015 de <http://pt.slideshare.net/Ricardosgeral/acqua-live-expo-eroso-internaricardo-santos>).

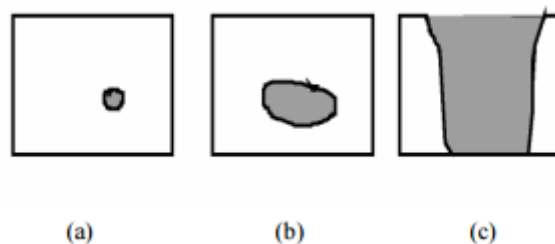


Figura 19 - Possível geometria da brecha numa situação de rotura por erosão interna: a) Surgimento do poro (pode ser na base da barragem); b) Aumento por erosão; c) Colapso do paramento superior e erosão lateral (extraído de *Rodrigues, 2006*).

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

No que diz respeito à estabilidade de taludes, deve garantir inclinações máximas adequadas aos materiais utilizados, as condições das fundações, controlo de qualidade e por fim à altura da barragem.

Este dimensionamento deve ser feito determinando um fator de segurança (FS), que deve ser $FS > 1,5$. No contexto deve ser contemplado o correto valor de inclinação dos taludes a montante e a jusante, no qual o paramento de montante é dimensionado para situações de esvaziamento rápido, onde as pressões intersticiais por falta de tempo para a sua dissipação criam instabilidade essencialmente nos maciços homogêneos. Ao invés, no primeiro enchimento, as forças de percolação têm sobre o talude uma ação benéfica (estabilização).

Quando se trata do paramento a jusante, este deve sofrer um dimensionamento adequado a uma possível situação de catástrofe no seu pleno armazenamento, por existir nesta fase o maior fluxo de percolação. O paramento a jusante relativamente ao de montante pode apresentar maior inclinação, pela ausência de um esvaziamento rápido.

Para diminuir o risco de deslizamento da barragem, as medidas usualmente aplicadas são a introdução de um sistema de drenagem (diminuindo a subpressão) e o aumento do peso do corpo da barragem (Atallah,2002).

O galgamento traduz-se no volume de água armazenada que ultrapassa a cota de coroamento da barragem (figura 20 e 21). A ocorrência do fenômeno está ligada à possibilidade de aparecimento de ondas criadas na albufeira, devido a possíveis cheias ou ondas sísmicas. O escoamento da água sobre o coroamento provoca um efeito de corte no coroamento, erodindo posteriormente o material constituinte do talude de jusante, o que leva ao colapso da estrutura pela zona mais frágil, normalmente esta zona é a central da barragem, onde o caudal escoado é maior devido à concentração de maior altura de água.

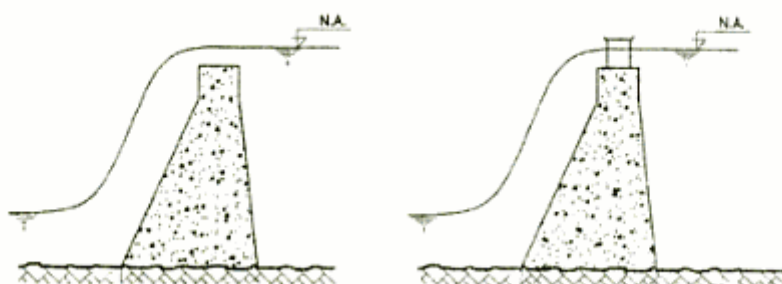


Figura 20 - Fenómeno de galgamento de barragem (Filho, 2006).

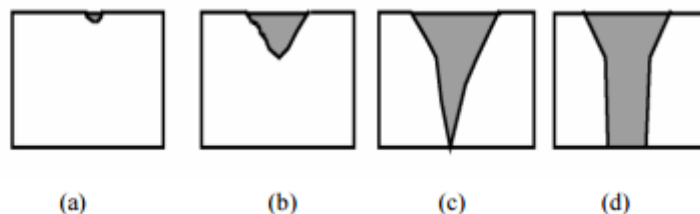


Figura 21 - Possível geometria da brecha em situação de rotura por galgamento- a) Início da brecha no ponto mais fraco; b) Brecha em forma de “V”; c) Aprofundamento da brecha; d) aumento lateral por erosão (Rodrigues, 2006).

O fenómeno de galgamento pode ser ultrapassado ou minimizado através da construção de descarregadores de cheia. O descarregador de cheia é nada mais que um órgão hidráulico que permite a descarga controlada do volume de água que se encontra em excesso na albufeira.

A erosão interna, dá-se quando a água infiltrada, a montante consegue atravessar o núcleo (zona mais impermeável) da estrutura arrastando as partículas mais finas que constituem o núcleo. Atingido o núcleo aparece no paramento de jusante, ocorrendo o colapso da estrutura. O fenómeno de erosão interna é bastante semelhante ao de “*Piping*”, ocorrendo o primeiro entre o pé de jusante e o núcleo e o segundo entre o corpo ou fundação da barragem.

A melhor solução para evitar o problema, passa por evitar que exista o transporte das partículas finas que constituem o núcleo, através da aplicação de filtros entre o núcleo e o paramento a jusante da estrutura.

Por fim, devem ser tidos em conta os estudos de impactos ambientais, cujos estudos aprovados devem contemplar todos os procedimentos necessários à garantia de corretas formas de desmatamento, florestação e ainda os cuidados e tratamentos das zonas de empréstimo, minimizando os possíveis impactos ambientais.

3.2. Planos de observação de barragens

Os sistemas de observação de barragens de aterro têm como principal função ajudar técnicos na deteção de problemas do comportamento de barragens, avaliar os modelos e critérios teóricos de dimensionamento e agilizar procedimentos preventivos que evitem ocorrência de acidentes ou incidentes.

Assim, os planos de observação devem ser elaborados no sentido de responder a problemas específicos de cada obra, focalizados nas dificuldades de projeto e avaliação de potenciais riscos. A correta implementação de um plano de observações implica que sejam definidas, as grandezas a medir, escolha adequada dos equipamentos para medição das mesmas, frequências de leituras e critérios de interpretação de dados resultantes das leituras.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

As grandezas que devem ser medidas são inúmeras, mas essencialmente devem ser considerados os níveis de água na albufera (cujo fator é um dos que mais varia durante toda a vida útil da barragem), deslocamentos externos e internos, pressão de água nos poros, tensões horizontal e vertical no interior do maciço criado e possíveis impactos ambientais.

A análise será cada vez mais adequada à realidade e melhorada quando os projetistas, consultores, equipas de observação e dono de obra, reconhecerem a importância vital de um plano de observação bem estruturado e implementado particularmente para cada obra. Um dos grandes problemas da implementação de observação de barragens passa pela má localização dos equipamentos, essencialmente quando estes são colocados em locais de difícil acesso, dificultando as leituras.

Na definição de sistemas de observação e durante o processo de seleção das grandezas/ações a serem observadas, é de extrema importância ter em consideração as condições de projeto e os cenários de risco associados à barragem assim como as ocorrências verificadas na fase construtiva (*Marcelino, 2005*).

O êxito de um bom plano de observação depende de vários fatores que devem ser considerados na implementação:

- ✓ Equipas de observação formadas por profissionais motivados e especializados;
- ✓ Periodicidade das observações de acordo com o previsto nas Normas de Observação e de Inspeção do Regulamento de Segurança de Barragens;
- ✓ Equipamentos devidamente calibrados e adequados ao tipo de estrutura;
- ✓ Interpretação de dados observados com base em limites de validação de dados previamente estabelecidos de acordo com as características dos aparelhos;
- ✓ Reconhecimento de fatores históricos inerentes a cada local.

A grande dificuldade de atribuir valores de solicitação às estruturas no seu dimensionamento é colmatada através do princípio probabilístico de distribuição estatística da vida da obra. Este método consiste na aceitação de valores desfavoráveis que podem solicitar a estrutura durante toda a vida. No entanto, o método nem sempre se revela fácil na prática, devido a fatores naturais como as cheias, sismicidade e climas agressivos cuja consideração pouco adequada em projeto conduz a uma maior deterioração dos materiais, com risco de roturas pontuais ou global das estruturas.

As condições de risco global a considerar não devem no entanto, limitar-se a ações exteriores e as características da estrutura, mas contemplar os valores humanos e os danos materiais envolvidos na ocorrência de uma eventual rotura (*ICOLD, 1981*).

É neste sentido que o sistema de observação torna-se imprescindível, uma vez que consegue-se através dos equipamentos instalados, frequências de leitura e através da comparação com os limites de grandezas definidas detetar anomalias.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Conclusivamente, pode-se dizer que apesar da observação de barragens significar um encargo financeiro relevante, a sua realização é algo inquestionável na tomada de decisões em tempo útil para estruturas existentes e futuras barragens. Desta forma o esforço de garantir um adequado plano de observação, leva a que as grandezas observadas e frequência ocorram em todas as fases de vida das estruturas (construção, enchimento da barragem, fase de serviço e descarga ou desativação).

3.2.1. Observações visuais

A inspeção visual deve fazer parte do sistema de observações, por permitir deteção de anomalias e alterações que podem comprometer o comportamento operacional e estrutural das barragens.

A credibilidade das observações visuais é tanto ou mesmo mais importante que observações auxiliadas por equipamentos, por estas permitirem a localização exata de sinais de evidentes perigos, nomeadamente movimentos ou deformações contínuas.

Por vezes o estado das aberturas, fissuras, infiltrações entre outras deteriorações podem ser ou não detetáveis com o auxílio de aparelhos instalados.

Quando se pretende realizar observações rigorosas, este tipo de ação obriga a que seja previamente preparado ou desenvolvido previamente, uma *check list* de inspeção adequada a obra e ao local (ver anexo 1). A falta ou mesmo uma pobre preparação prévia leva a falhas grosseiras.

Pelo processo dinâmico que devem ter as inspeções visuais, os técnicos devem guardar sempre os dados das observações anteriores, criando uma base de dado do histórico da obra, que permitirá a consulta dos resultados das últimas inspeções durante o tratamento e julgamento dos resultados recolhidos em determinado momento.

3.2.2. Grandezas e equipamentos do sistema de observação

A solidificação de conhecimentos sobre o real comportamento de elementos estruturais passa principalmente pela observação de grandezas que permitam a introdução de fatores corretivos no cálculo do comportamento das estruturas. Só com a introdução do coeficiente de correção, este cálculo dará valores mais próximos do real comportamento das estruturas.

Das inúmeras grandezas que podem ser observadas nas barragens de aterro, consideram-se as mais correntes:

- ✓ As tensões totais que atuam em todas as direções, instaladas no maciço;
- ✓ Tensões neutras que podem ser desenvolvidas nas zonas superficiais das fundações;
- ✓ Os caudais de percolação no corpo da barragem e fundação;

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

- ✓ O nível de água da albufeira que permite o conhecimento das alterações da linha de saturação no caso de pleno enchimento da barragem;
- ✓ Deslocamentos superficiais e do interior dos maciços; interessa o conhecimento de deslocamentos verticais (assentamentos) e horizontais em ambas as zonas;
- ✓ A reação dos maciços aos abalos sísmicos, quantificar as tensões, acelerações e deslocamentos desenvolvidos.

Os contratemplos de observação, não se concentram apenas na definição das grandezas a analisar, mas também na escolha dos aparelhos ideais para o tipo de observação programada e nos cuidados a ter com os equipamentos por estes estarem expostos a danos que podem ser causados pelos efeitos climáticos, agressões químicas, vibrações das máquinas, deterioração dos equipamentos e danos ocorridos na fase de instalação.

Resumidamente, a aparelhagem de observação de barragens obriga a ter em conta alguns dos fatores de maior importância. *Arthur (1973)* propôs a análise dos seguintes fatores:

- ✓ Definição das grandezas a medir.
- ✓ Fenómeno físico inerente ao dispositivo de medida.
- ✓ Robustez, isto é, a capacidade de resistir às condições adversas do meio, tais como: variações de pressão e temperatura, agentes corrosivos, ataque de água, efeito das vibrações, etc.
- ✓ Sensibilidade, ou seja, a menor variação de grandeza que pode ser detetada pelo aparelho.
- ✓ Tempo de resposta, definido como o intervalo de tempo que medeia entre a variação de uma grandeza e a resposta do dispositivo.
- ✓ Campo de leitura. A diferença entre o máximo e o mínimo valor que pode ser medido pelo aparelho.
- ✓ Estabilidade. A evolução no tempo da grandeza com que a medida de uma variável se desvia do seu valor real. Depende em grande medida do fenómeno físico inerente ao dispositivo da medida.
- ✓ Efeito do meio. A relação entre a leitura fornecida pelo aparelho e a leitura real, se fosse possível evitar todas as perturbações originadas pela sua colocação.
- ✓ Precisão. O desvio que uma dada leitura apresenta em relação ao valor real.
- ✓ Garantia das leituras. Este fator diz respeito à precisão e à possibilidade de situar os erros das leituras.

O grande leque de questões que deve ser tido em conta obriga a instalação de equipamentos. Seguidamente será feita uma descrição dos equipamentos de uso mais corrente associados às observações.

3.2.2.1. Deslocamentos superficiais

Os deslocamentos superficiais podem ser divididos em deslocamentos verticais e horizontais. Os deslocamentos externos podem ser observados através de marcas superficiais em maciços que sejam solidários com o aterro que se pretende estudar.

Os tacos de nivelamento são uma das marcas superficiais utilizadas em observação de superficiais (figura 22).



Figura 22 - Marca superficial através de tacos de nivelamento (Marcelino, 2009)

Os deslocamentos verticais podem ser obtidos através de nivelamento geométrico. A observação de deslocamentos horizontais pode ser acompanhada através do método de triangulação com auxílio de um teodolito ou estações totais (figura 23).



Figura 23 - Estação total (extraído em 16 de maio 2015:
http://pt.wikipedia.org/wiki/Esta%C3%A7%C3%A3o_total)

3.2.2.2. Deslocamentos verticais internos

Em deslocamentos verticais internos, recorre-se a um vasto leque de equipamentos que passa-se em seguida a abordagem sobre os de uso mais corrente.

As baterias do tipo U.S.B.R são equipamentos populares no campo das observações de deslocamentos verticais internos. Sumariamente o equipamento é formado por tubos telescópico em serie, onde os tubos de menor diâmetro não se movimentam relativamente ao terreno de aterro.

Os extensómetros eléctricos são elementos instalados com o objetivo de medir assentamentos e deformações verticais. O seu funcionamento consiste em ligar dois pontos tencionados ancorados ao solo, cuja distância entre os pontos é conhecida. Normalmente neste tipo de equipamento está associado a utilização de potenciómetros lineares com sensores. As deformações são observadas através das variações de comprimentos dos fios que podem ser mediadas através de uma ponte de *Wheatstone* de grande sensibilidade.

O medidor de assentamento *Geonor* é um equipamento constituído por um tubo que contém no seu interior um varão onde na sua extremidade existe um sistema de ancoragem formado por três garrafas que entram no solo. O equipamento é colocado no aterro. O varão interior deve ser desenroscado alguns centímetros e assim o tubo e varão interior podem sofrer deslocamentos, tendo como referência a zona superior do varão.

O Nível hidráulico, apresentado na figura 24, é um instrumento muito simples e permite medir os possíveis assentamentos que podem ocorrer segundo um plano de alinhamento quase horizontal. O equipamento é formado por inúmeros tubos de plástico com 1,2 cm de diâmetro que tem numa das suas extremidades um descarregador e na outra um leitor de níveis. O tubo de plástico do equipamento é protegido por uma serie de telescópicas em aço galvanizado.

Apesar de simples, o equipamento em causa requer alguns cuidados na sua instalação. Os tubos devem ser colocados com suficiente inclinação entre o descarregador e à câmara de leituras, no qual deve estar instalado o medidor. A montagem nestes modos permite evitar que se crie o efeito de um sifão invertido no momento em que se registe o máximo assentamento nos descarregadores e a água não consiga deslocar-se por gravidade.

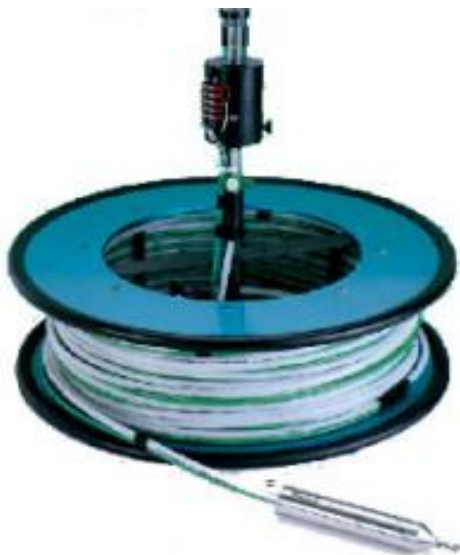


Figura 24 - Nível hidráulico (Marcelino 2009)

O Tubo inclinómetro é utilizado na observação de deslocamentos verticais internos, em muito este equipamento é idênticas as Baterias tipo U.S.B.R. A grande diferença entre ambos são as uniões que ligam os tubos, por apresentarem configurações diferentes.

Os inclinómetros horizontais têm tido uma importância relevante para a obtenção de deslocamentos em barragens de aterro pela facilidade de manuseamento, fiabilidade, durabilidade e fornecimento de dados de assentamento de perfis completos dos assentamentos diferenciais. No entanto, este equipamento torna-se bastante dispendioso e lento nas leituras, exigindo trabalho manual do operador.

3.2.2.3. Deslocamentos horizontais internos

Quando se trata de observações de deslocamentos horizontais internos, normalmente são utilizados os inclinómetros e extensómetros de fios, sendo o inclinómetro o aparelho mais utilizado por permitir a medição de deslocamentos ao longo de uma linha, leitura de resultados correspondente a um perfil de assentamento e pelo facto de poder ser instalado durante a fase de construção da barragem.

Apesar de serem pouco utilizado o extensómetro de fios, é um aparelho aplicado em obras onde se pretenda realizar medições de deslocamentos horizontais. O equipamento em causa deve ser instalado a jusante da barragem, onde vão dar os fios que fazem a ancoragem de pontos de medição situados no corpo da barragem (Marcelino,2008).

O inclinómetro é constituído por um tubo que envolve calhas que estão ajustadas a sensores de leituras ou medição (figura 25). O tubo de leitura deve ser instalado num furo vertical do aterro que se pretende observar, com base na marcação de um ponto auxiliar fixo que geralmente é assumido como ponto fixo da observação a base do tubo inclinómetro.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

O inclinómetro serve para verificar variações de inclinação de um tubo relativamente a sua posição inicial. As observações são efetuadas segundo uma profundidade pré - definidas, no interior do furo, o que permite calcular a variação de inclinação entre pontos.

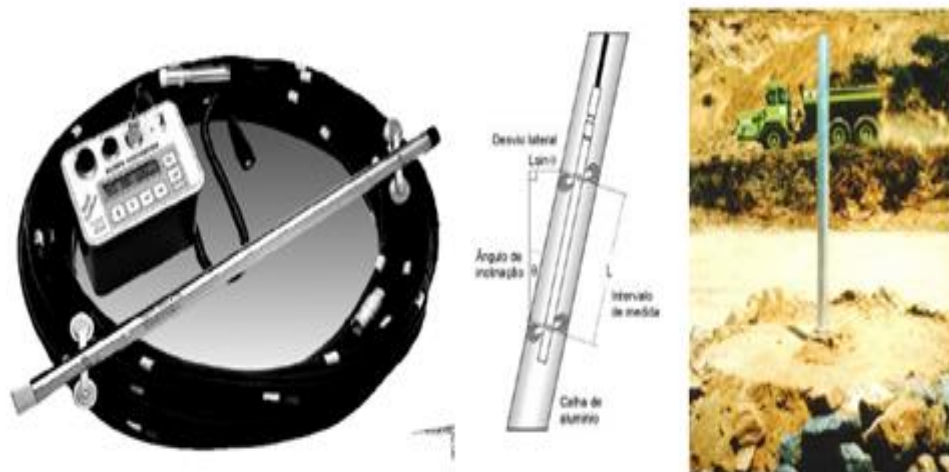


Figura 25 - Inclinómetro (Marcelino 2009)

3.2.2.4. Tensões totais

A dificuldade na observação de tensões totais leva os técnicos a utilizar ensaios de fracturação hidráulica. Como um método alternativo as células de tensões totais que obriga a célula de tensão total a ter as mesmas características de deformabilidade, viscosidade e a mesma reologia do solo envolvente. Estas características evitam que as tensões registadas sejam superiores do que as realmente aplicadas no solo quando as células são mais rígidas e o inverso quando sucede o oposto.

O princípio de aplicação do método de fracturação hidráulica consiste na introdução de água a pressões crescentes, possibilitando o registo do volume de caudal absorvido que permite a abertura da primeira fenda no solo. As leituras dos resultados permitem considerar se os solos são normalmente consolidados ou sobreconsolidados, sendo a tensão efetiva vertical (σ'_{v0}) e horizontal ($K_0\sigma'_{h0}$). Estas leituras são possíveis através do coeficiente de impulso em repouso K_0 , pois é possível determinar se o solo em estudo é normalmente consolidado quando $K_0 < 1$ ou sobreconsolidado quando $K_0 > 1$.

Algumas das células de tensões totais de maior aplicação são as *células Bourdon* que fazem parte das primeiras que apareceram. Um líquido é confinado no interior de uma caixa circular com uma membrana na sua parte superior. O manómetro *Bourdon* regista a pressão que o solo exerce sobre a membrana. Este equipamento além de nos dias de hoje ter caído em desuso, deve existir algumas preocupações pela sua grande sensibilidade as variações de temperaturas.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

A célula *Goldbeck* equilibra a pressão exercida na face superior do aparelho através de ar injetado no interior da câmara. Quando sucede o descrito, obrigando ao movimento da face superior que resulta na extinção de uma luz ou a queda na leitura num amperímetro. Estas células apesar de tudo apresentam resultados com erros por excesso, o que é uma desvantagem.

As células *Carlson* são elementos formados por dois pratos com um diâmetro aproximados de 18,5 cm, cujos pratos encontram-se separados por mercúrio, que ajuda a transmitir ao diafragma flexível as pressões sofridas pelo aço que faz parte integrante do equipamento, permitindo assim o registo da deformação num medidor de deformação *Carlson*. Este medidor é formado por duas bobinas, onde os movimentos do diafragma elevam a tensão numa das bobinas, baixando na outra do mesmo valor. Pelo facto das variações de tensão alterarem a relação das resistências elétricas permite que estas variações sejam medidas através de ponto *Wheatstone*.

As células elétricas de corda vibrantes, desenvolvida por *Thomas e Ward* no ano de 1969, são formadas por dois discos metálicos associados a um diafragma que sofre deflexão devido a tensão total instalada no solo, que atua sobre uma corda vibrante variando a própria frequência de vibração.

Por fim temos as células hidráulicas tipo *Glötzl*, que consiste em introduzir no solo uma almofada com forma retangular ou circular que com tem no seu interior óleo hidráulico que equilibrará a tensão do solo que atua sobre a almofada até que as pressões se igualem, o que permite a passagem de baixo fluxo de óleo por uma linha de retorno.

A medição da pressão total atuante no solo e pressão intersticial do solo ou nas barragens de terra, podem ser observadas através de células de tensão total (figura 26), pela sua robustez em aço inox, compatibilidade com vários tipos de transdutores e com um sistema de medida formado por extensómetros de resistência elétrica e fibra ótica, faz do equipamento bastante competitivo quando comparado com os restantes. O equipamento é instalado tendo o cuidado de colocar as células com diferentes orientações e coberto com terra compactada, assim a pressão aplicada no aterro é transmitida ao fluido existente no interior da célula.

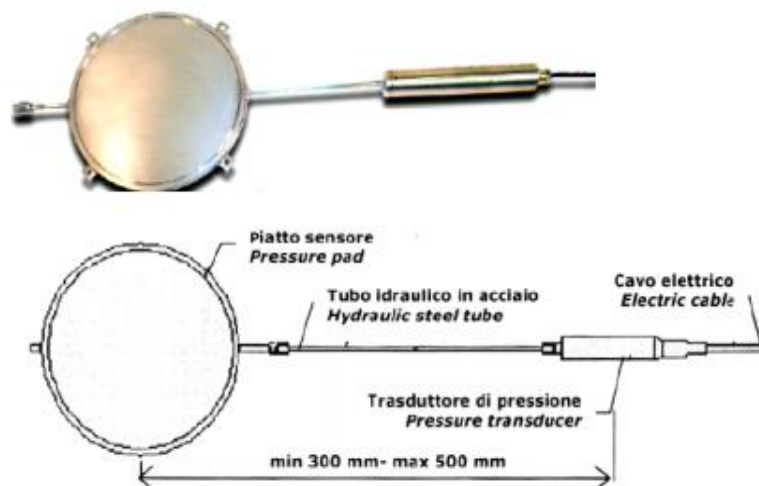


Figura 26 - Células de tensão total (Marcelino 2009).

3.2.2.5. Tensões neutras

A pretensão de observar as tensões neutras deve partir do conhecimento dos fundamentos teóricos que servem de suporte ao cálculo do tempo de resposta de um piezômetro, culminando nos requisitos do piezômetro.

O piezômetro é um dos dispositivos mais utilizados e com alguns cuidados a ter quando se fazem observações através do equipamento, pelo que devemos:

- ✓ Saber qual o tempo de resposta de um piezômetro, o intervalo de tempo entre a variação de pressão intersticial no solo e o momento em que o equipamento indica a totalidade da variação. Resumidamente deve ser implementado um piezômetro adequado à situação em estudo;
- ✓ Robustez do equipamento e baixos custos;
- ✓ Precisão nas leituras.

Assim durante a fase de escolha do piezômetro, deve ser tido em conta que pode-se subdividir em três categorias:

- ✓ Piezômetros hidráulicos.

O piezômetro hidráulico (figura 27) é normalmente utilizado para medir com precisão as pressões da água dos poros no solo ou terras rochosas, total ou parcialmente saturado. O sistema é formado de uma ponta porosa cerâmica, com o horizonte de medição ligado a um aparelho de medição de comando através de cabos de *nylon* duplos, cujos tubos estão cheios hidráulicamente.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

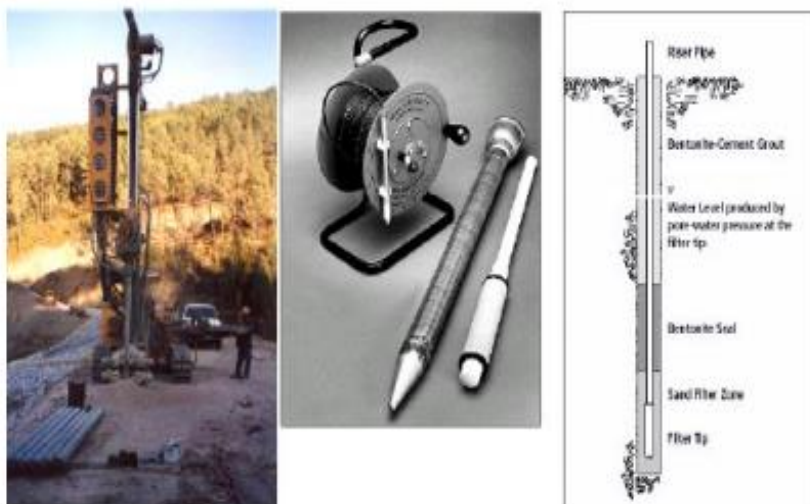


Figura 27 - Piezómetro hidráulico (Marcelino 2009).

✓ Piezómetros elétricos

Os piezómetros elétricos (figura 28) são equipamentos com o princípio de funcionamento baseado no princípio de fio em vibração, tem sido utilizados nos últimos 40 anos, substituindo os hidráulicos de dois tubos e os pneumáticos, pela garantia de fiabilidade em solos moles, soltos ou para imersão/enterro e facilidade de instalação. O aparelho pode ser equipado com sensor de temperatura.



Figura 28 - Piezométrico elétrico (extraído em 10-06-2015 de <http://geonor.no/en/piezometers/>).

✓ Piezómetros pneumáticos

Este equipamento é economicamente viável, fiável e suficientemente robusto, distinguindo-se dos equipamentos elétricos pelos poucos problemas em termos de avarias. É um equipamento formado por elemento poroso de alta qualidade que permite medir com precisão as pressões totais ou parciais da água dos poros o solo (figura 29).



Figura 29 - Piezométrico pneumático (extraído em 10-06-2015 de <http://soil.co.uk/products/water-monitors-piezometers-meters/pneumatic-piezometer/>)

✓ Piezómetros de corta vibrante

Este equipamento com cuja facilidade de instalação, precisão, com possibilidade de leituras de forma automática e com um tempo de resposta curto, contraria alguns pontos em desfavor do equipamento, nomeadamente o facto de acusar grande sensibilidade à temperatura, elevado custo e uma curta duração de vida (figura 30).



Figura 30 - Piezómetro de corta vibrante (Marcelino 2009)

3.2.2.6. Pluviómetro

As obras hidráulicas obrigatoriamente devem estar munidas de elementos de medição de níveis hidráulicos e de pluviosidade, de forma a testar o previsto em projeto relativamente ao histórico pluviométrico da zona e tomar medidas preventivas em eventuais cheias na albufeira cujas poderão conduzir ao galgamento da estrutura.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Assim, os pluviômetros são equipamentos que permitem determinar a quantidade de chuva e intensidade que cai em determinado local.

Na atualidade são de uso mais comum os pluviômetros de *Ville de Paris* (figura 31), do tipo gangorra ou báscula, que contm um funil pelo qual entram as gotas da chuva, ligado a um reservatório que quando cheio ativa o sistema de medio e registo dos dados.

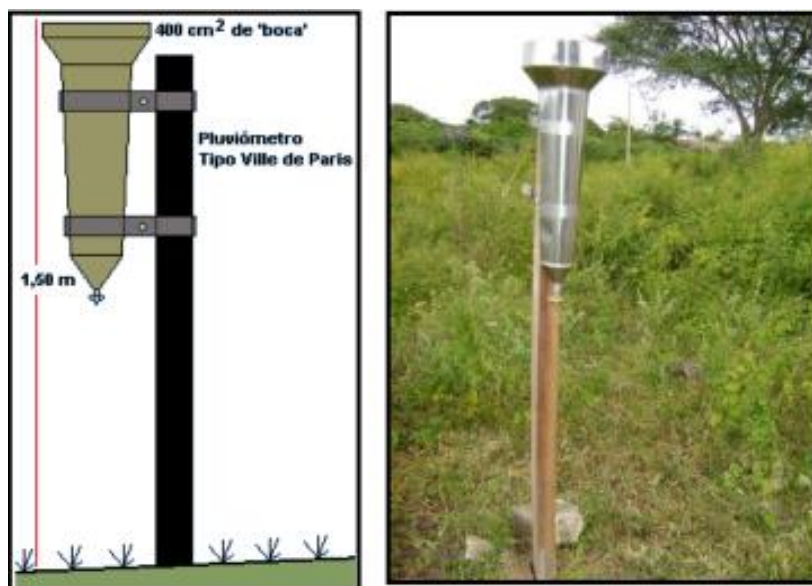


Figura 31 - Pluvimetro Ville de Paris (extraído em 10-6-2015 de www.pluviometros.com.br).

3.2.2.7. Sismógrafos

Em funo destes problemas (movimento de terras, placas tectnicas e galgamento) que advm da ocorrência de sismos obriga a que sejam instalados sismógrafos em obras hidráulicas. Apesar de dos sismógrafos serem utilizados principalmente na área da sismologia, este equipamento tem sido utilizado na aparelhagem de barragens, essencialmente em zonas onde o risco e ocorrência de sismos so mais prováveis.

Sismógrafo ou vibrômetro (figura 32)  um equipamento que permite detetar possíveis vibraes, ondas sísmicas nas três direes: vertical, longitudinal e transversal, de origem natural ou induzidas e movimentos do solo.

Este aparelho sofreu grande evoluo tecnológica destes os primeiros equipamentos mecânicos até aos utilizados atualmente mais elétricos e eletrnicos com tratamentos e registo de dados em formato digital. Constituído por sensor que permite registar os movimentos nos sismógrafos que traam gráficos (sismogramas). Através dos gráficos os especialistas conseguem obter informaes sobre o sismo, nomeadamente onde se encontra o hipocentro e a magnitude do sismo.









Figura 32 - Sismógrafo de 7 canais “Vibracord VX” (Vibracord, 2010)

3.2.3. Controlo de segurança de barragens

O controlo de segurança em barragens é um assunto de importância extrema na prevenção de danos humanos, impactos ambientais e danos materiais. Esse controlo assenta essencialmente nas observações e monitorização através de equipamentos instalados na estrutura que dizem respeito a um plano de observação que permitirá interpretação de resultados que testam equipamentos durante a construção das obras e validação de princípios teóricos de projeto, segurança e economia na construção de barragens. O quadro 4 é um resumo dos equipamentos e problemas que devem ser contemplados no controlo de segurança de barragens.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Quadro 4 - Resumo de problemas e equipamentos direcionados a barragens de aterro
(adaptado de *Slope Indicador*, 2010).

<i>Grandezas/ Esquemas</i>	<i>Equipamentos</i>
Deslocamentos verticais 	Marcas de nivelamento
	Inclinómetros
	Extensómetros
	Células de assentamento hidráulicos
	Extensómetros de assentamentos
Deslocamentos horizontais 	Inclinómetros verticais
	Extensómetros
	Alvos de taludes
Tensões 	Células hidráulicas
	Células elétricas
	Células de corda Vibrante
Tensões Neutras 	Piezómetros corda vibrante
	Piezómetros hidráulicos
	Piezómetros elétricos
Pluviosidade 	Pluviómetros
Ondas sísmicas 	Sismógrafo

A atividade de controlo tem o seu princípio fundamentado na procura do desenvolvimento de conhecimento na área, beneficiando a problemática de controlo de segurança das barragens. O desenvolvimento desta matéria torna possível a deteção de falhas e respetivas correções em condições preventivas.

O Regulamento de Segurança de Barragens (RSB), 1990, integra a segurança de barragens de forma diferenciada em três temas base:

- ✓ Segurança estrutural;
- ✓ Segurança operacional;
- ✓ Segurança ambiental.

A segurança estrutural aborda problemas que podem desenvolver-se durante a vida útil da obra, promovendo a prevenção de rotura ou problemas funcionais das barragens. A segurança operacional é direcionada as falhas e problemas que degradam os equipamentos hidráulicos.

Por último, temos a segurança ambiental que consiste na implantação de procedimentos com finalidade de minimizar ou mesmo eliminar possíveis impactos ambientais oriundos da construção da barragem em determinado local.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Na atualidade com os avanços da tecnologia, nomeadamente no que diz respeito à inteligência artificial, permite o desenvolvimento de sistemas de controlo que possibilitam ao utilizador autorizado acompanhar as observações através do acesso via internet ou mesmo por sistemas de GPS.

4. Caracterização da barragem de aterro em estudo

4.1. Objetivo e localização

O caso de estudo é uma barragem de aterro que a Câmara Municipal da Covilhã pretende construir, deixando a exploração entregue à Infra-estruturas e Concessões da Covilhã (ICOVI), de forma a solucionar definitivamente o problema de abastecimento de água a todo o concelho da Covilhã, evitando em época de estio o recurso de captações privadas sem grande controlo e economicamente dispendiosas.

A possível barragem de aterro da ribeira das Cortes tem previsto a sua implantação numa zona muito próxima das Penhas da Saúde, freguesia de Cortes do Meio, concelho da Covilhã, sobre a bacia hidrográfica do rio Tejo, cuja zona é ilustrada na figura 33. A ribeira das Cortes que nasce em plena Serra da Estrela desenvolve-se até ao local onde se pretende construir a nova infraestrutura cujas coordenadas (medidas por bússola) 365 375 000 Norte e 245 255 000 Oeste, à cota de 1265 m aproximadamente. A futura barragem terá a montante a já existente a barragem de Cova de Viriato, barragem de gravidade, com capacidade de armazenamento de 1.5 hm³ de água, associada a uma área da bacia hidrográfica de 2.25 km².

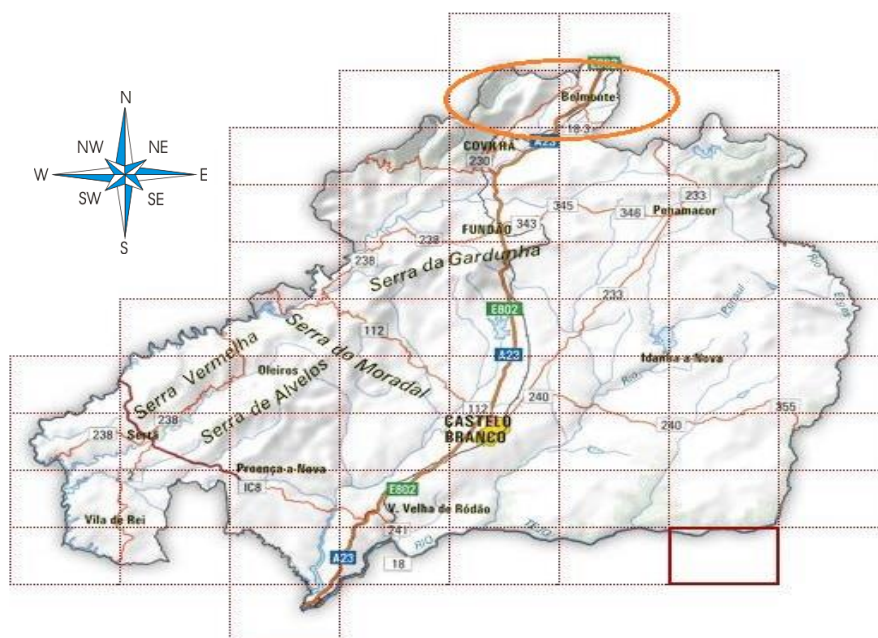


Figura 33 - Localização da bacia hidrográfica - Freguesia Cortes do Meio, Covilhã - ao nível da cartografia nacional (extraído de Centro de Informação Geoespacial do Exército).

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

A determinação do valor do caudal de cheia resulta de um estudo hidrológico da região, que procurando ser mais conservativo deve assentar essencialmente nos dados hidrológicos fornecidos pelas duas estações (Manteigas no rio Zêzere e Pai Diz no rio Mondego).

Para o caso de estudo apenas foram recolhidos dados apresentados na estação de Manteigas (111/01H)), referente ao período entre 1981 a 1991, uma vez que muitos destes dados já tinham sido tratados na elaboração de um trabalho prático da disciplina de 4º ano (Hidrologia). Assim com base nas tabelas de cálculo, ajustadas às condições da nova bacia hidrográfica (figura 34),

No entanto, apesar de não ser um dos objetivos desta dissertação, aproveitou-se alguns dados hidrológicos e climáticos que se consideram ajustados ao local obtendo-se as características patentes no quadro 5.

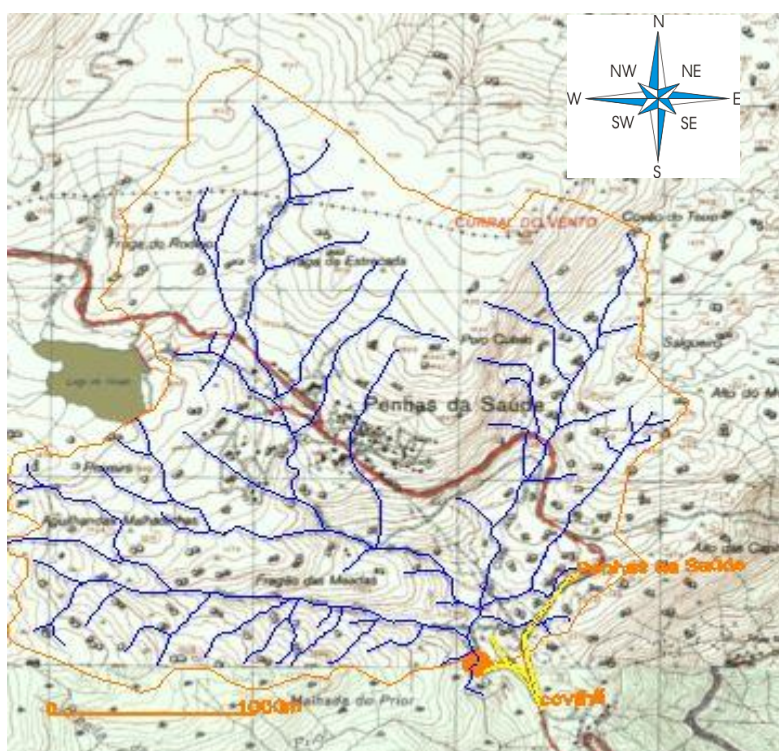


Figura 34 - Marcação da bacia hidrográfica (8.65 Km²) referente a ribeira das Cortes

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Quadro 5 - Resumo dos parâmetros e respetivos valores de dados hidrológicos

<i>Parâmetros</i>	<i>Valor</i>
<i>Área da bacia hidrográfica</i>	8,65 km ²
<i>Volume de água armazenada</i>	1,70 hm ⁴
<i>Nível de Plano Armazenamento (NPA)</i>	1308,00 m
<i>Caudal de cheia (T=1000 anos)</i>	85,00 m ³ /s
<i>Nível Máximo de Cheia (NMC)</i>	1309,50 m
<i>Largura do coroamento da barragem</i>	6,00 m
<i>Comprimento do coroamento</i>	400,00 m
<i>Altura da barragem em relação ao terreno</i>	30,00 m

4.2. Características da barragem em estudo

O vale onde está prevista a implantação da barragem é constituída morfologicamente por blocos graníticos de dimensões variadas e nas zonas mais suaves encontram-se geralmente algumas rochas do tipo areno-siltoso e argilosa. Visualmente é notório que os encontros apresentam inclinações acentuadas, principalmente a margem direita (com inclinação entre 20° e 30°) e a margem esquerda (com inclinação entre os 10 e 20°), aparentando um vale profundo e assimétrico.

Com base nas informações geotécnicas observadas no local, conclui-se estar perante um vale aberto e assimétrico, sobre o qual é notório a existência de material disponível para construção de uma barragem de aterro zonado por considerar-se tecnicamente e economicamente viável a construção de uma barragem de terra zonada cujo perfil tipo é o indicado na figura 35.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

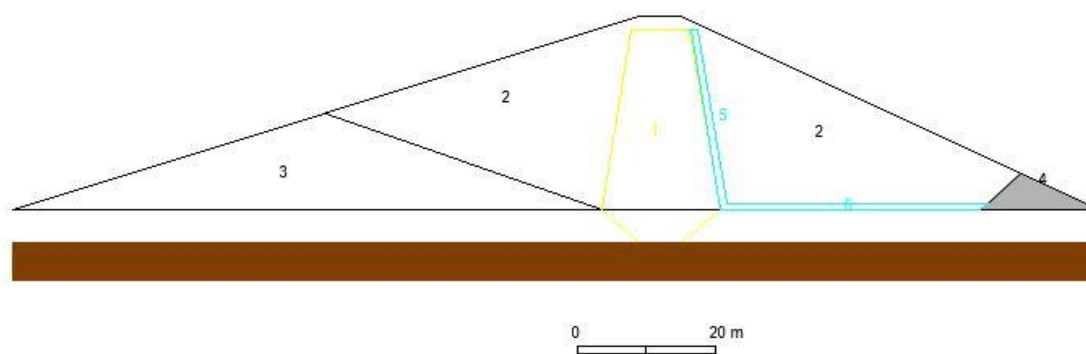


Figura 35 - Perfil tipo da barragem de terra zonada

Legenda:

- 1- Núcleo central da barragem;
- 2- Maciços estabilizadores;
- 3- Enscadeiras;
- 4- Enrocamento de proteção e pé de talude;
- 5- Filtro;
- 6- Tapete drenante.

A nossa estrutura apresenta um núcleo constituído essencialmente por SC e Cl (silte e argila), por este material apresentar características adequadas, essencialmente por apresentar permeabilidade baixa a muito baixa (10^{-6} a 10^{-7} cm/s). Ao invés os maciços estabilizadores devem ser constituídos por materiais mais permeáveis. Com base nos valores de declive para barragens de terra sugeridos por Cruz, 2004, a infraestrutura deve ter para o talude a montante uma inclinação horizontal e vertical respetivamente de (3:1) e o talude a jusante (2,5:1).

Quadro 6 - Valores de declives de taludes sugeridos (Cruz, 2004).

Material da Barragem	Montante	Jusante
Solo Compactado	2.5 H - 1.0 V	2.5 H - 1.0 V
	3.0 H - 1.0 V	3.0 H - 1.0 V
Solos compactados	2.0 H - 1.0 V	2.0 H - 1.0 V
Argilosos	3.0 H - 1.0 V	3.0 H - 1.0 V
Solos Compactados e Siltosos	3.5 H - 1.0 V	3.5 H - 1.0 V
Enrocamento	1.3 H - 1.0 V	1.3 H - 1.0 V
	1.6 H - 1.0 V	1.6 H - 1.0 V

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Para ultrapassar os fenómenos de erosão interna por arrastamento de finos para jusante devido ao efeito do escoamento controlado ou para montante devido a pressões intersticiais caso ocorra um esvaziamento rápido, considerou-se a aplicação de filtros entre o núcleo e os maciços estabilizadores. Nas estruturas de aterro homogéneo é normal aparecer água sobre o paramento a jusante a (1/3) da altura da água existente na albufeira. O fenómeno é justificado pelo longo período que o nível de água permanece na albufeira em pleno armazenamento.

Assim e apesar de se estar perante uma barragem de aterro zonado, partindo de um princípio de dimensionamento mais conservador, deve a estrutura dispor de um dreno no pé de jusante, o que permite evitar possíveis instabilidades do talude.

O núcleo central da barragem deve ser de geometria trapezoidal, com a cota de coroamento ligeiramente superior ao N.M.C. e cuja largura no topo será metade da largura da base, a qual é calculada considerando igual a 0.6 da carga hidráulica (H), onde a carga hidráulica é determinada através da expressão 2:

$$H = (N.M.C.) - Cota\ de\ fundo\ do\ vale + Espessura\ da\ camada\ de\ aluvião \quad (2)$$

$$\Leftrightarrow H = 1308,5 - (1307 - 30) + 3 = 28,5\ m$$

A largura da base (B) é calculada através da seguinte expressão:

$$B = 0,6 \times H = 17,1\ m \quad (3)$$

A largura do topo (LT) é determinada pela seguinte equação:

$$LT = 0,5 \times B = 8,55\ m \quad (4)$$

Para a zona dos maciços estabilizadores e à ensecadeira, será preenchido através de GC (seixo), cujos valores de ângulo de atrito considera-se igual a ($\phi = 34^\circ$). Este valor deve em caso de projeto confirmado através de ensaios por ser ter neste trabalho considerado um valor considerado ideal. No que diz respeito à compactação, deve ser efetuado o espalhamento do material formando superfície plana em camadas de 0,5 m, sucedendo o mesmo no talude jusante.

Em termos da inclinação do talude jusante, considera-se a situação mais gravosa sempre que ocorra o pleno armazenamento. Em termos de segurança ($FS = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} > 1,5$), terá este talude de ter uma relação de 1:2,5 (V:H) e $\beta = 22^\circ$. Relativamente ao talude a montante a sua segurança em termos do deslizamento será reduzido sempre que ocorra um esvaziamento brusco, pelo que opta-se por uma inclinação mais suave, 1:3 (V:H), cujo ângulo é de 18° .

4.3. Notas de dimensionamento da barragem de aterro

4.3.1. Definição do coroamento e cálculo da folga

O cálculo da folga pode ser desprezado a partir do momento que o projetista tenha a certeza que a estrutura em causa não se encontra sobredimensionada ou com dimensionamento insuficiente. Sempre que um dos dois fatores referidos permanece na incerteza, é de todo aconselhável ao cálculo da folga.

Mas a determinação da folga, apesar de importante na segurança das barragens, a sua fixação por excesso encarece muito o custo empreitada, por sua vez a definição por defeito pode torna-se catastrófica em caso de galgamento da barragem.

Desta forma deve ser calculado um valor ponderado da folga, através da consideração dos 3 fatores abaixo mencionados na determinação:

- ✓ Fatores hidrológicos e hidráulicos: essencialmente no que respeita à ocorrência de possíveis cheias;
- ✓ Fatores meteorológicos: possível ondulação na albufeira, provocada por ventos habituais ou mesmo excepcional;
- ✓ Fatores derivados de fenómenos naturais: sismo e deslizamentos das margens.

A maré criada pela ação do vento (S) é determinada através da velocidade do vento (v) (km/h), ângulo (α) resultante entre a direção do vento e o *fetch* e a altura da barragem representada por (D).

$$S = \frac{v^2 \times F \times \cos \alpha}{63000 \times D} \quad (5)$$

Em que, F corresponde ao *fetch* (m) que equivale à velocidade do vento na albufeira e altura da onda gerada devido a fatores de topografia e forma desenvolvimento da albufeira. O *fetch* máximo (0,610 km) é dado pelo maior segmento de reta que é possível traçar sobre a albufeira.

Comumente utiliza-se o *fetch* efetivo (0,474 km) que resulta da média de todos os comprimentos dos segmentos traçados e para o caso da ribeira das Cortes estão traçados os segmentos de reta nos pontos A, B e C ilustrados na figura 36 (ver anexos 2 e 3).

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

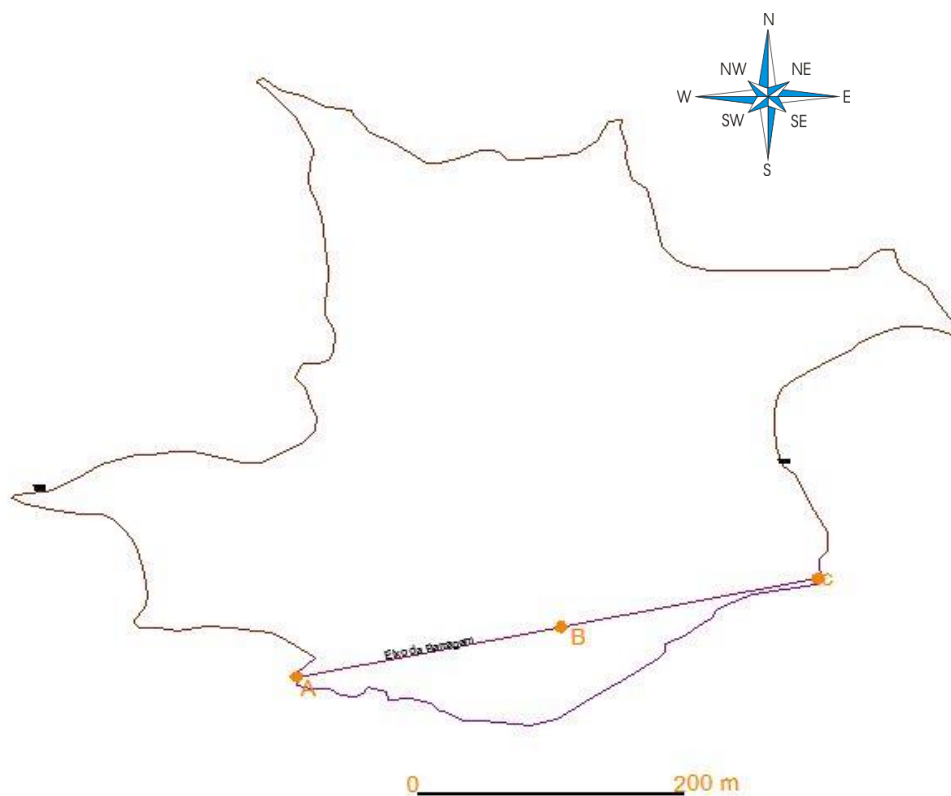


Figura 36 - Pontos a partir dos quais foram traçados os *fetch* na albufeira.

Calculou-se o *fetch* em três pontos (A, B,C respetivamente quadro 7,8 e 9), recorrendo a método mais rigoroso (*T. Saville e McClendon*) em que o cálculo do *fetch* efetivo é dado pela expressão (7):

$$Fe = \frac{\sum_{i=1}^{15} Fi \times \cos^2 \alpha_i}{\sum_{i=1}^{15} \cos \alpha_i} \quad (6)$$

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Quadro 7 - Cálculo do fetch no ponto A

α	$\cos \alpha$	$Fi (km)$	$Fi \times \cos \alpha$	$Fe = \frac{\sum Fi \times \cos \alpha}{\cos \alpha}$
19	0,946	0,41	0,388	0,467
10	0,985	0,408	0,401	
0	1	0,563	0,563	
4	0,998	0,559	0,558	
8	0,99	0,484	0,479	
13	0,974	0,444	0,433	
18	0,951	0,434	0,413	
23	0,922	0,463	0,427	
26	0,899	0,481	0,433	
28	0,883	0,498	0,44	
29	0,875	0,492	0,43	
36	0,809	0,434	0,351	
38	0,788	0,436	0,343	
47	0,682	0,423	0,289	
51	0,629	0,433	0,273	

Quadro 8 - Cálculo do fetch no ponto B

α	$\cos \alpha$	$Fi (km)$	$Fi \times \cos \alpha$	$Fe = \frac{\sum Fi \times \cos \alpha}{\cos \alpha}$
50	0,643	0,415	0,266	0,366
42	0,743	0,347	0,258	
31	0,857	0,249	0,214	
18	0,951	0,281	0,268	
3	0,999	0,397	0,397	
0	1	0,461	0,461	
4	0,998	0,432	0,431	
11	0,982	0,373	0,366	
17	0,956	0,371	0,355	
27	0,891	0,369	0,329	
32	0,848	0,398	0,337	
36	0,809	0,347	0,281	
47	0,682	0,3	0,204	
61	0,485	0,34	0,165	
66	0,407	0,386	0,157	

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Quadro 9 - Cálculo do fetch no ponto C

α	$\cos \alpha$	Fi (km)	$Fi \times \cos \alpha$	$Fe = \frac{\sum Fi \times \cos \alpha}{\cos \alpha}$
0	1	0,61	0,61	0,474
5	0,996	0,523	0,521	
16	0,961	0,424	0,407	
23	0,922	0,424	0,391	
30	0,866	0,462	0,4	
34	0,829	0,5	0,415	
37	0,799	0,573	0,457	
38	0,788	0,535	0,422	
40	0,766	0,484	0,371	
41	0,755	0,467	0,352	
45	0,707	0,425	0,3	
48	0,669	0,415	0,277	
51	0,629	0,39	0,245	
55	0,574	0,377	0,216	
59	0,515	0,385	0,198	

Em relação ao vento, pode-se recorrer ao regulamento de português (RSA) que ajuda a caracterizar a exposição do vento em todo o território português. Martins em 2002, propôs valores de 120 km/h para ventos excecional e 70 km/h para vento normal. Assim considera-se os valores indicados. Na falta de elementos exatos, os valores para a velocidade de vento habitual e excecional segundo B.R. (1973), são 80 e 160 Km/h respetivamente (quadro 10). Assim utiliza-se estes valores que parecem aceitáveis e estão no lado da segurança.

Quadro 10 - Maré de vento sobre albufeira

Combinação da ação do vento	V (km/h)	$D1$ (m)	S (m)	Fe (km)
Vento Excecional	160	30	0,008	0,474
Vento normal	80	30	0,002	

A determinação de ondulação derivada à onda sísmica (hw) é dada por:

$$hw = C \times T \times \sqrt{g \times h} \times \frac{1}{2} \quad (7)$$

Em que, C representa o coeficiente sísmico, g é o valor da aceleração gravítica (9,8 m/s), T corresponde ao período de duração do sismo (1s) e H é a altura da barragem de aterro.

Através da expressão anterior obteve-se um resultado para a ondulação derivada à onda sísmica, ou seja, um valor de 4,3m.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Relativamente ao estudo sísmico, sabe-se que Portugal encontra-se próximo da fronteira entre as placas Euroasiática e placa Africana, assim a atividade sísmica que se faz sentir resulta essencialmente devido à falha entre os Açores e Gibraltar. Segundo dados históricos conclui-se que em Portugal na sua maior parte tem sido atingido por sismos de magnitude inferior a 4.0. No entanto é de realçar que a sismicidade tende a aumentar no sentido de norte para sul.

Baseados no RSA, no que diz respeito à ação sísmica no país, deve o mesmo ser dividido em 4 zonas (A,B,C e D), onde a zona A é considerada a zona de maior incidência sísmica e a zona D a de menor incidência. O regulamento atribui valores de coeficiente sísmico para cada uma das 4 zonas que dividem o mapa de Portugal continental como está representado no quadro 11.

Quadro 11 - Valores de coeficientes de sismicidade, α (RSA, 2003)

Zona Sísmica	α
A	1.0
B	0.7
C - (Barragem de ribeira das Cortes)	0.5
D	0.3

O espraçamento da onda que se forma sobre a barragem é um fator dependente não só da inclinação mas também da rugosidade do paramento da barragem (montante). Com base em *Martins, 2002*, o espraçamento de uma albufera cria uma sobrelevação que pode ser determinada com a seguinte expressão:

$$R1 = 1,6 \times K \times \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{Hs}{L}}} \times Hs \quad (8)$$

Onde $R1$ (m) é o valor final de espraçamento, K representa o coeficiente de rugosidade do paramento de montante, Hs (m) altura significativa das ondas e L (m) representa o comprimento de onda.

$$Hs = \frac{V^{1,23} \times Fe^{0,5}}{422} \quad (9)$$

O período da onda T (s) é calculado através da seguinte expressão:

$$T = 0,33 \times V^{0,41} \times Fe^{0,5} \quad (10)$$

Em que V significa a velocidade do vento (km/h).

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

O comprimento da onda (m) é determinado através da equação 11:

$$L = 1,56 \times T^2 \quad (11)$$

A sobrelevação que tem como principal objetivo contemplar os efeitos dos assentamentos, normalmente é considerada em cerca de 1% da altura da barragem. Apesar do valor anteriormente mencionado da sobrelevação, *Ray Linsley* (“*Water - resources Engineering*” pág 219) considera a sobrelevação da ordem dos 2% a 5% (quadro 12). Na presente dissertação considera-se o a percentagem de uso comum, cerca de 1% da altura da barragem.

Quadro 12 - Valores de cálculo da sobrelevação

	Comum (1%)	<i>Ray Linsley</i> (2 a 5%)
Sobrelevação (m)	0,3	0,6 a 1,5

Através das combinações de ações, determinou-se a folga:

✓ $CC1 > N.M.C + ondulação causada por vento (habitual) + assentamentos$ (12)

✓ $CC2 > N.P.A + ondulação causada por vento (excecional) + assentamentos$ (13)

✓ $CC3 > N.P.A + ondulação causada por fenómenos sísmicos + assentamentos$ (14)

Conclusivamente determina-se a cota de coroamento (CC), que deve ser o valor mais desfavorável resultantes das combinações abaixo calculadas. Atendendo às três combinações obtiveram-se os seguintes valores apresentados no quadro 13.

Quadro 13 - Cálculo de cota final do coroamento

Combinação	Nível da albufeira (m)	Ondulação (m)	Assentamento (m)	Cota Final do coroamento (m)
CC1	1308,5	1,1	0,3	1310
CC2	1307,0	2,2		1309,5
CC3	1307,0	4,0		1311,3

Ao observar os resultados, conclui-se que a situação mais gravosa resulta da ocorrência de sismo conjugado ao nível de pleno armazenamento. Desta forma, considera-se adequado manter o coroamento à cota 1311 m, que garante condições fiáveis em situação de não galgamento da barragem. Devem ser garantidos processos construtivos adequados para que a barragem não sofra assentamentos elevados, uma prática corrente neste tipo de obras.

4.3.2. Cálculo da largura do coroamento

O cálculo da largura do coroamento (L_c) é determinado através da fórmula de *Preece*, onde o valor final de L_c depende apenas da altura da barragem (h).

$$L_c = 1,1 \times \sqrt{h + 1} \quad (15)$$

$$\Leftrightarrow L_c = 6,12 \text{ m}$$

O Regulamento de Segurança de Barragens impõe valores mínimos para a largura do coroamento (3 m) e nos casos onde se preveja tráfego sobre o coroamento (5 m). Seguindo um princípio mais conservativo e considerando o coroamento aberto ao tráfego, adota-se $L_c = 6,0\text{m}$.

4.3.3. Proteção dos taludes

Um dos problemas que deve ser previsto nas barragens de aterro, diz respeito a proteção dos taludes (de montante e de jusante).

O paramento de montante, devido à sua grande exposição às ações erosivas das ondas, deve ser protegido através da aplicação do material de enrocamento em camadas (rip-rap) ou mesmo solo-cimento. O rip-rap a aplicar deve ser suficientemente forte para resistir ao impacto das ondas produzidas na albufera, com as dimensões dos blocos determinadas com a seguinte fórmula:

Peso aproximado do bloco: $Wa = \frac{100 R^2}{\cos \alpha} = 125 \text{ kgf}$ (16)

Onde α representa o ângulo de inclinação do talude e R (m) representa altura de onda, devido ao vento habitual e Wa (kgf) traduz-se no peso do bloco.

$$D = \left[\frac{Wa}{2650} \right]^{\frac{1}{3}} = 0,35 \text{ m} \quad (17)$$

É aceitável que a granulometria dos blocos (D) oscile entre $1/8D$ e $4D$ ou seja entre 0,35 e 1,44 m. No caso em estudo a granulometria do nosso material de enrocamento será de $1,5D$ ou seja 0,60 m que assentará sobre uma camada arenosa protegida com geotêxtil e cuja deve ser metade da espessura da camada de enrocamento, num mínimo de 0,30 m.

Os valores calculados quando comparados pelo quadro 12 conclui-se que os valores de cálculo estão dentro dos valores da relação entre altura de onda máxima e espessura do rip-rap propostos por *Sherard et al.* (1963), apud *Mendonça* (2012).

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Quadro 14 - Correlação entre altura de onda máxima e diâmetro e espessura do rip-rap propostos por *Sherard et al.* (1963), apud *Mendonça* (2012).

<i>Altura de onda máxima (m)</i>	<i>Diâmetro médio do rip-rap (cm)</i>	<i>Espessura do rip-rap (cm)</i>
<i><0,60</i>	25	30
<i>0,60 a 1,20</i>	30	45
<i>1,20 a 1,80</i>	37	60
<i>1,80 a 2,40</i>	45	75
<i>2,40 a 3,00</i>	55	90

No talude a jusante a grande preocupação passa por proteger o talude das possíveis erosões, ravinamento e impactos ambientais. A resolução do problema traduz-se em revestir o talude com vegetação rasteira e adequada ao clima da região.

4.3.4. Estudo da percolação

Um dos maiores, se não o maior problema nas barragens de aterro, é sem dúvida o fenómeno da percolação, seja através da fundação, seja através do corpo da barragem. A percolação influencia de forma direta o comportamento/funcionamento da estrutura no controlo da água a montante e em termo da segurança da barragem. O estudo de percolação permite ter conhecimento do modo como a água circula na fundação e no corpo da barragem, o que garante a segurança das barragens, através do correto dimensionamento da inclinação dos taludes e da implementação de medidas e dispositivos que previnem possível instabilidade hidráulica na estrutura. A circulação de água no corpo da barragem (solos) cria alterações de estabilidade, originando assim fenómenos de perturbação hidráulica que conduzem a ocorrência de erosões internas (*Piping*).

Atualmente devido ao grande avanço tecnológico, o estudo da percolação, é efetuado recorrendo a programas computacionais, sendo o programa de elementos finitos, dos mais utilizados, permitindo traçar redes de percolação mais aproximados do real ao invés de redes traçadas de forma manual, onde o rigor é sempre inferior ao traçado através de programas computacionais.

No nosso caso de estudo da percolação será realizada recorrendo ao programa Geostudio versão estudante que permitira determinar o caminho de percolação no aterro, essencialmente o valor de fluxo que chega ao pé de talude a jusante.

Para conseguir uma análise credível, é necessário adaptar o modelo a nossa barragem, considerando que temos uma barragem constituída por diferentes zonas que englobam, a fundação, núcleo e o corpo da barragem.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Relativamente ao corpo da barragem, deve ser simplificado relativamente a sua forma, facilitando assim o cálculo.

Relativamente ao estudo de percolação da barragem das cortes, não foi considerada a percolação que ocorre através da fundação, uma vez que propõem-se uma cortina de injeções que deve ser dimensionada com base em critérios mais ou menos empíricos, mas deve ser igualmente baseada em critérios de avaliação resultantes de ensaios de permeabilidade do local. Assim considera-se aceitável uma cortina de injeção a profundidade de 25 m.

No que se refere as simplificações adotadas para a simulação, consistiu em não realizar o estudo da percolação pela fundação e ignorar a ensecadeira existente no maciço de montante. Outra das simplificações foi ignorar a existência do filtro chaminé e do dreno horizontal, uma vez que estes bem dimensionados garantem a não passagem de água por essa zona. As simplificações tidas em conta são consideradas insignificantes quanto ao erro que as mesmas poderão incrementar aos valores da simulação.

Para a simulação foi inicialmente introduzida a geometria da barragem (maciços estabilizadores e núcleo), as propriedades e características de permeabilidade dos materiais. Quanto ao corpo da barragem sugere-se seixos e para o núcleo uma mistura de material silteoso e argila visível na figura 36.

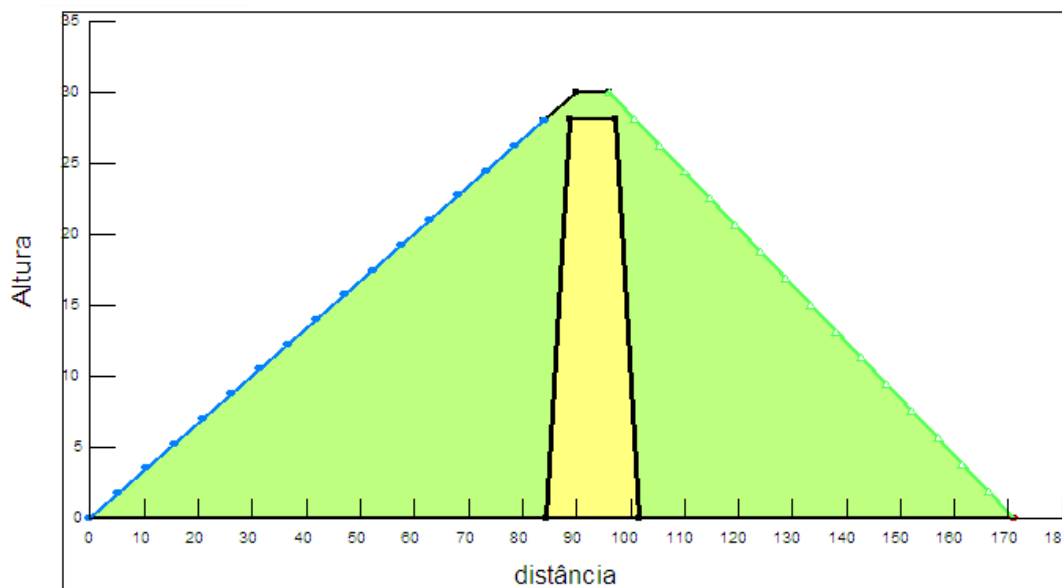


Figura 37 - Marcação das regiões (zonas) em função do tipo de material constituinte

Pela ausência de informação detalhada sobre os materiais foi admitida uma anisotropia de permeabilidade numa relação ($K_h = 2K_v$), nos maciços e no núcleo. Assim considerou-se o valor de permeabilidade vertical do maciço ($K_v=1.10^{-7}$ m/s) e ($K_v=5.10^{-9}$ m/s) para o núcleo. Considerou-se para o núcleo e maciço um grau de saturação ($Gr= 2,65$), teor em água do núcleo ($\Theta=0,4$) e teor em água residual do núcleo ($\Theta_r=0,02$). Para o maciço, temos teor de

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

água ($\Theta=0,3$) e quantidade de teor de água ($\Theta=0,015$), o que permitiu que o programa traçasse os gráficos das imagens 37 e 38, que representam o comportamento dos materiais que constituem a barragem em situações de saturação e não saturação.

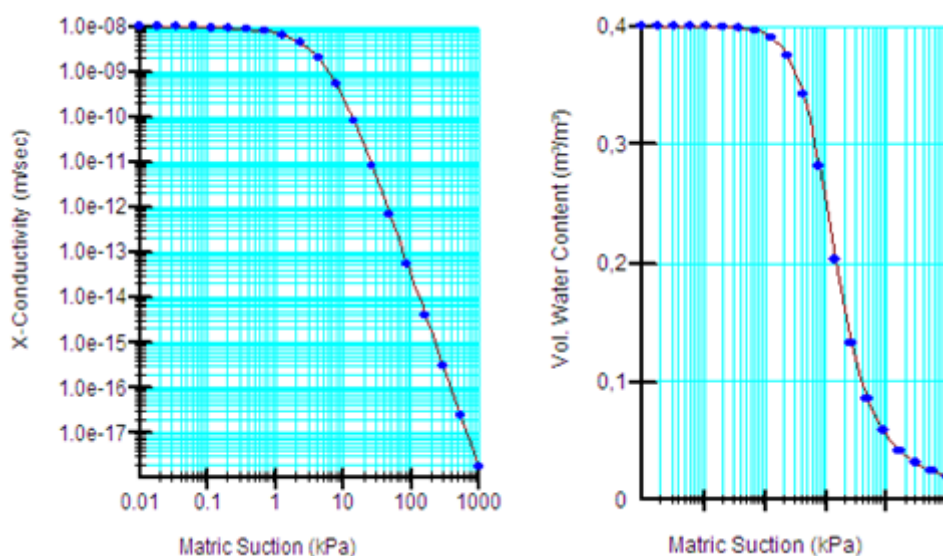


Figura 38 - Capacidade de permeabilidade e de sucção do núcleo

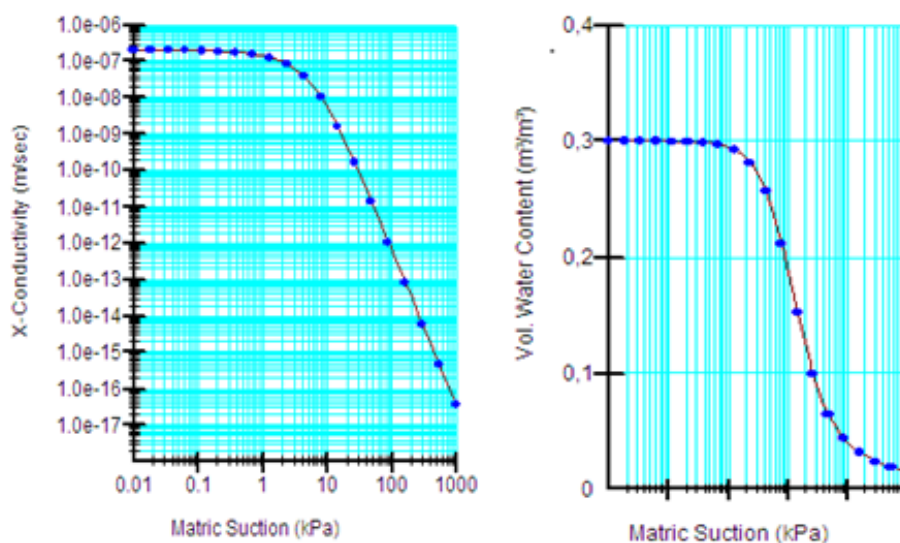


Figura 39 - Capacidade de permeabilidade e de sucção do maciço

Com a geometria e materiais definidos, são definidas as condições de fronteira (considerando para o maciço a montante temos a zona de infiltração (azul) e a jusante (verde) como zona de perda (figura 39).

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

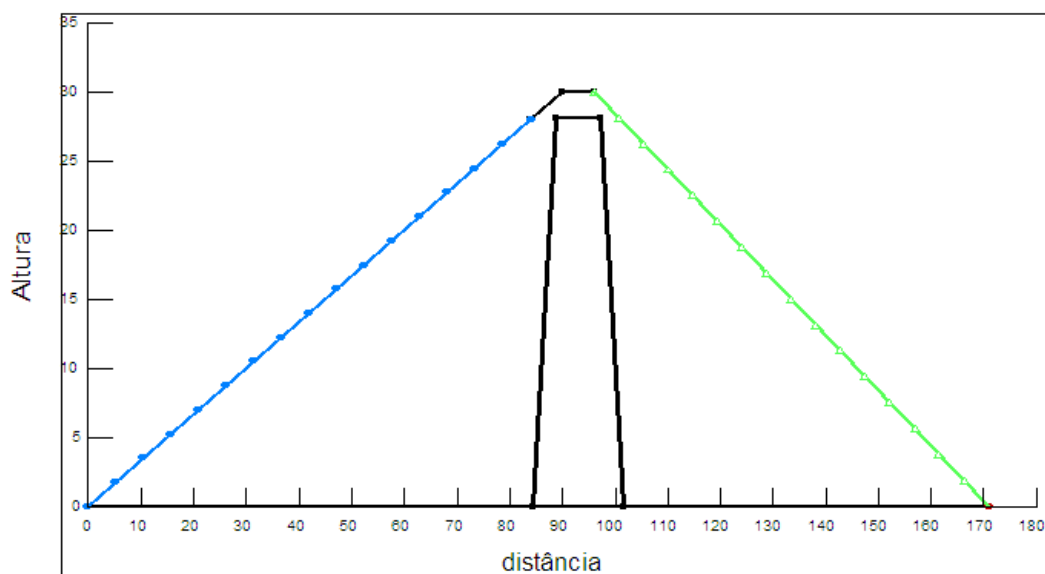


Figura 40 - Condições de fronteira

Com todas as condições e materiais definidos, o programa determina as linhas de fluxo, vetores velocidades e as secções de fluxo.

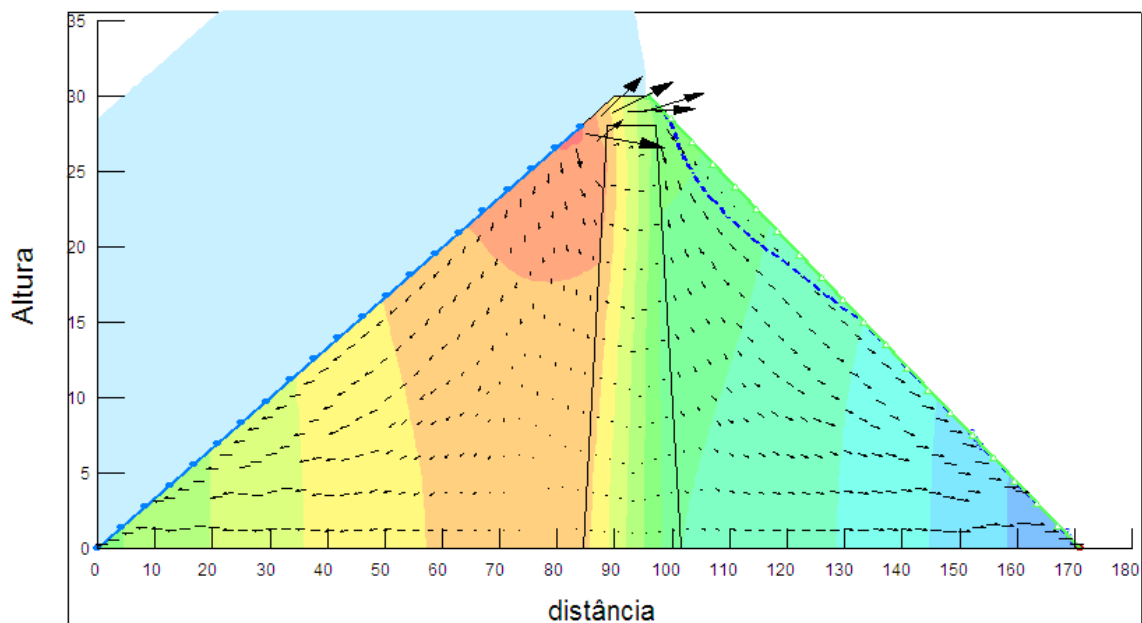


Figura 41 - Linhas de fluxos final

Por fim retirou-se as informações necessárias para o estudo de sistemas de drenagem de todo o corpo da barragem. Assim temos um caudal afluente ao filtro chaminé ($Q_s = 1,16 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$).

4.3.5. Dimensionamento do sistema de drenagem

Apesar do modelo ter sido bastante simplificado quando ao estudo de percolação, a mesmo mostra a existência de linhas de fluxo a intersectar o maciço de montante, o que não é previsto acontecer, pelo que propõem-se a introdução de drenos.

Para a futura infraestrutura, deve ser prevista a jusante um filtro - chaminé que deve permitir a drenagem do caudal proveniente do núcleo e evitar a fuga de finos do material que protege o núcleo. O tapete drenante neste caso funcionará como um prolongamento do filtro-chaminé, horizontal até ao enrocamento de pé de jusante. O dimensionamento destes elementos recorre-se aos critérios de *Dunningham* e *Sherard* (1989).

4.3.5.1. Características do filtro - chaminé

As características dos filtros das chaminés dependem unicamente da granulometria dos materiais (solo) que protegem as chaminés, isto segundo *Sherard* e *Dunningham* (1989).

Os critérios propostos têm um coeficiente de segurança implícito. Deve ser verificado o peso do material do núcleo passado no peneiro nº 200, ou seja com diâmetro inferior a 0,074 mm, oscila de 26 a 60% e 60 a 90% do material passado no peneiro nº 4 (anexo 10 - fuso de granulométrico do material do núcleo).

Assim deve ser tido em conta que:

- ✓ $D_{15} \leq 0,7 \text{ mm}$ quando $0,25 \text{ mm} < D_{15} < 0,65 \text{ mm}$;
- ✓ $D_{15} > 0,2 \text{ mm}$ (para ser permeável);
- ✓ $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 20 = \frac{D_{60}}{D_{10}} < 20$ (o que evita possível segregação).

Este caso deve (anexo 9 - fuso granulométrico do filtro chaminé) D_{60} varia entre 2,5 e 7 mm e D_{10} entre 0,15 e 0,45 mm, obtendo-se valores de Cu de 16,67 e 15,56.

Para garantir que o filtro não apresenta características coesivas, a percentagem em peso passado no peneiro nº 200 deve ser inferior a 5%.

Devido à insuficiência de dados para traçar a curva granulométrica ou saber os valores de d_{15} e d_{85} , supôs-se os seguintes valores desfavoráveis: d_{15} com valores entre 0,05 e 0,005 mm e d_{85} a oscilar entre 1,5 e 20 mm,

Conclusivamente e recorrendo à *Sarma* que por razões económicas e construtivas diz que este deve estar compreendido entre 1 e 1,5 m, assim considera-se a espessura do filtro da chaminé igual a 1,2 m.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Deve existir o cuidado de garantir que o coeficiente de permeabilidade do filtro deve ser pelo menos de 25 vezes maior que o valor de coeficiente de permeabilidade do núcleo ($Kh=10^{-6}$ a 10^{-7} cm/s). Comumente o coeficiente dos filtros é de 10^{-3} pelo que o filtro deve ter um coeficiente de permeabilidade de 10^{-3} .

4.3.5.2. Estudo de permeabilidade

Recorrendo ao estudo de permeabilidade considera-se que o caudal afluyente ao filtro - chaminé é $Q_s = 1,16 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

O caudal total que sai é determinado por:

$$Q_1 = Q_s \times \frac{1}{2} h \times L = 8 \times 10^{-6} \times 0,5 \times 30 \times 400 = 0,0035 \text{ m}^3/\text{s} \quad (18)$$

$$Q_2 = \frac{0,988 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{\text{s}} \times L = 0,000395 \text{ m}^3/\text{s}$$

Em que, L representa o desenvolvimento da barragem e considerando um valor médio de carga hidráulica ($\frac{1}{2}h$) onde h (m) representa altura média de água .

$$Q_d = v \times A = K \times \left(\frac{AH}{L \times 0,5} \right) \times e \times L \Leftrightarrow 10^{-5} \times \frac{400}{400 \times 0,5} \times 1,8 \times 400 = 0,0027 \text{ m}^3/\text{s} \quad (19)$$

Verifica-se que a relação $\frac{Q_d}{Q_t} = 11,6$ é um valor superior ao da condição logo esta do lado da segurança.

4.3.5.3. Tapete drenante

Para o tapete drenante em termos de granulometria, pode ser utilizado materiais que verifiquem as condições de critério de *Terzaghi*:

- ✓ $D_{15} \geq 5d_{15}$, o que garante a drenagem do solo, no caso de estudo verifica-se que D_{15} varia entre 0,25 e 0,65 mm , igual a 0,25 e superior a 0,025 mm.
- ✓ $D_{15} \leq 5 d_{85}$, para evitar o fenómeno de arraste das partículas, que no caso de estudo considera-se que D_{15} é inferior a 7,5 ou 100 mm.

A fim de garantir que exista facilidade de escoamento, o tapete deve ter uma inclinação longitudinal de 2% para jusante, como valor de uso corrente.

4.3.5.4. Permeabilidade

O caudal afluente ao tapete drenante (Q_t) que resulta do somatório dos caudais provenientes dos filtros (Q_1) e o caudal proveniente da fundação (Q_2). Por razões construtivas e de funcionamento considerou-se um dreno com espessura de 0,5 m. Assim o dreno deve ser mais permeável ($K=1$ cm/s) segundo (Veiga Pinto, 1993), pois receberá maior quantidade de água.

Assim o caudal drenado deve obedecer a seguinte condição:

$$\frac{Q_d}{Q_t} \geq 10, \quad (20)$$

Onde $Q_d = 0,0027 m^3 / s / m$ representa o caudal drenado.

Para o cálculo da espessura do tapete drenante, deve ser tida em conta a capacidade drenante do tapete, determinada através da seguinte equação:

$$Q_d = K \times i_m \times A \quad (21)$$

Com Q_d representativo do caudal drenante, K significa o indicativo do coeficiente de permeabilidade, i_m é o valor do gradiente hidráulico que é nada mais que o declive do dreno (2%), por fim temos o A (m^2) traduz-se na área de secção do filtro. O valor do gradiente hidráulico é calculado através da equação 22:

$$i_m = \frac{\Delta l}{l} \times 0,5 \quad (22)$$

Onde $\frac{\Delta l}{l}$ significa a razão da perda de carga por unidade de comprimento (m/m) ou seja é aproximadamente o declive do dreno.

A área de Influência $A = e \times L'$, onde e é o valor da largura do tapete na zona plana do leito, que é aproximadamente igual a $L' = 400$ m.

$$e = 0,5 m \geq \frac{10 \times 0,000233}{0,01 \times 0,02 \times 0,5 \times 200} = 0,233m$$

4.3.6. Estudo da fundação

Com base no conhecimento geotécnico da zona e tendo a noção dos valores de permeabilidade admissíveis para o núcleo da barragem, torna-se mais conservativo a construção de uma cortina de injeção sob o núcleo. As fases construtivas da injeção devem ser previamente estudadas para que se realize injeções adequadas.

Segundo indicação de Sandroni 2012, podem ser utilizadas as relações entre altura da barragem e profundidade de injeção prevista no quadro 15 da ASCE que deve ser seguida como meros valores indicativos. Assim consideramos uma cortina com 25m de profundidade.

Quadro 15 - Tabela de relação entre altura da barragem e profundidade da cortina da ASCE (Sandroni, 2012)

<i>Altura da barragem (m)</i>	<i>Profundidade da cortina (m)</i>
8 a 25	12
30 a 66	25
60 a 120	45
Maior de 150	60

4.3.7. Análise da estabilidade

A garantia de segurança estrutural de uma barragem passa pelo conhecimento das características mecânicas dos materiais utilizados na construção da mesma. Para a futura obra foram considerados os materiais cujas características se apresenta:

✓ **Núcleo:**

Peso específico: $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$

Peso específico saturado: $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$

Coesão do material: $c' = 0 \text{ kN/m}^3$

Ângulo de atrito interno: $\phi' = 29^\circ$

✓ **Maciços:**

Peso específico: $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

Peso específico saturado: $\gamma_{sat} = 21 \text{ kN/m}^3$

Coesão do material: $c' = 0 \text{ kN/m}^3$

Ângulo de atrito interno: $\phi' = 34^\circ$

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

✓ Fundação Superficial:

Peso específico: $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

Peso específico saturado: $\gamma_{sat} = 21 \text{ kN/m}^3$

Coesão do material: $c' = 0 \text{ kN/m}^3$

Ângulo de atrito interno: $\phi' = 30^\circ$

Com base nestes materiais é aconselhável a determinação da estabilidade dos taludes que nas várias situações devem verificar-se os coeficientes de segurança propostos no quadro 16. Neste trabalho não sendo o grande objetivo a determinação ou dimensionamento da barragem, considera-se que para os paramentos de montante e jusante verifica-se a segurança em relação ao deslizamento, uma vez que no pré - dimensionamento foi considerada uma inclinação de 1:3 (V:H) para o paramento de montante, o que garante segurança para situação de pleno armazenamento e para o paramento de jusante considerou-se uma inclinação de 1:2,5 (V:H) de modo a verificar-se a segurança ao deslizamento na situação de esvaziamento brusco.

Com estes dados conclui-se que a segurança em relação a estabilidade dos taludes encontra-se assegurada.

Quadro 16 - Fatores de segurança aconselhados

	<i>Fatores de segurança aconselhados</i>	
	<i>Paramento a montante</i>	<i>Paramento a jusante</i>
<i>Fase de construção</i>	1,3	-
<i>Esvaziamento brusco</i>	1	-
<i>Fase de construção</i>	-	1,3
<i>Pleno armazenamento</i>	-	1,5

5. Plano de observação para a barragem

5.1. Controlo de segurança

O papel da observação no controlo de segurança das barragens, tem um papel inquestionável, por fazer parte integrante do sistema de observação. Já foi abordado neste trabalho em capítulos anteriores sobre os equipamentos de observação utilizados, os cuidados a ter na sua aplicação, grandezas a observar e seleção de técnicos competentes que assegurem observações, análises, interpretação dos dados com o máximo profissionalismo. Assim, os dados recolhidos e conclusões devem ser comunicados de imediato às entidades ou técnicos com poder de decisão sobre a implementação de soluções aos problemas.

Em seguida através do controlo de segurança será feita abordagem de alguns fatores que devem reger o sistema integrado de controlo de segurança e plano de observação adequado à futura barragem de ribeira das Cortes.

5.1.1 Modelos teóricos e de comportamento

Numa primeira fase é importante garantir a verificação da aplicação dos modelos teóricos (estatísticos, determinísticos e híbridos) de base no dimensionamento da futura estrutura através de comparação dos comportamentos da estrutura nos períodos iniciais de vida (construção e primeiros tempos de exploração). O modelo estatístico utiliza como base do seu dimensionamento (estruturas), resultados de experiências acumuladas de determinado problema. Este é um modelo dentro do campo estatístico, assente em análise de variâncias e de valores de desvios entre as grandezas de causas e efeito, o que permite estabelecer correlações de valores de referência.

Os modelos determinísticos em barragens deduz que todo o corpo da barragem, tal como a fundação inclusive, têm uma forma geometricamente bem definida, com todas as propriedades das materiais conhecidas e sujeitas as ações exteriores.

A junção de modelos estatísticos e determinísticos resulta num novo modelo de cálculo conhecido por modelos híbridos. O modelo tem maior aceitação relativamente à utilização de cada um dos dois anteriores de forma particular. Os modelos híbridos têm a vantagem de retirar o melhor de cada um dos dois modelos (estatísticos e determinísticos).

Assim para a futura obra deve ser aplicado o modelo híbrido, tendo em conta que o modelo determinístico permitirá calibrar alguns parâmetros durante o período de construção e primeiro enchimento. A calibração nesta fase tem como objetivo aproximar os modelos

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

teóricos utilizados no dimensionamento da realidade. Com aplicação do modelo passa a existir um maior conhecimento do real comportamento dos materiais e das solicitações.

Por outro lado o modelo estatístico, que pressupõe um grande número de dados para que passe a ser viável, não se aconselha a sua utilização durante a fase construtiva e primeiro enchimento, mas é um bom modelo para estudar as evoluções do comportamento da barragem ao longo da sua vida útil.

Em termos de segurança estrutural é usualmente utilizado o modelo estatístico, através de análises probabilísticas, que são na prática uma ajuda para a tomada de decisão para projetistas, donos de obra e consultores.

5.1.2 Tratamento dos dados recolhidos

Desde a sua construção e por toda a vida útil da obra deve existir um plano de tratamento dos dados recolhidos. Deve persistir o princípio de tirar o maior partido dos dispositivos de observação, na conversão dos valores lidos em grandezas físicas de fácil interpretação. Os resultados das observações devem ser sempre analisados e validados, com finalidade de eliminar possíveis anomalias de erros de resposta dos aparelhos, erros de leitura de valores por parte dos técnicos entre outros. Com este procedimento, os técnicos devem ter a capacidade e conhecimento para distinguir respostas erradas dos dispositivos de uma possível anomalia na estrutura.

O tratamento dos dados recolhidos deve ser preferencialmente calculado com auxílio de programas de cálculo automático baseado em modelos matemáticos e deve ser criado um arquivo de todo o historial da obra desde o projeto, construção e exploração.

5.1.3 Critérios de tomada de decisão

Os critérios e princípios que devem ser estipulados no sistema de segurança são justificados para resolver uma das questões mais difíceis, tomada de decisões.

À chegada de informações de alterações no comportamento da estrutura, comportamentos anormais ou solicitações não esperadas (sismos, chuvas intensas, sabotagem entre outras) levam a tomar decisões, que geralmente são condicionadas pelos custos económicos de reparações e riscos associados. Assim, as instituições ou pessoa singular que tiver o poder de decidir deve sempre agir com base no bom senso.

A abordagem dos resultados deve ser inicialmente filtrada, enquadrando os dados num dos três fase das deteriorações de barragens. Numa primeira abordagem deve ser entendida se as falhas ou deteriorações são ou não de evolução lenta ao ponto de permitirem intervenções

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

mais tardias. Nos casos de problemas com progressão exigem intervenções a curto prazo e por fim todas as alterações que pela acelerada evolução colocam em risco vidas humanas e bens, devem ser consideradas situações muito graves (erosões internas ou *piping*), logo a intervenção tem de ser imediata.

Em síntese, as equipas responsáveis pelo sistema de segurança devem adir esforços que possibilitem atrasar, diminuir ou evitar catástrofes resultantes sejam por motivos estruturais, hidráulicos ou ambientais.

Nos casos de algum fracasso de todas as ações já indicadas, deve estar preparado um sistema de emergência com normas e procedimentos criteriosamente definidos. Os critérios passam por existir uma entidade que deve ser alertada sobre o nível de risco que a estrutura apresenta e em casos de catástrofe, toda a população civil deve ser informada, para promover o processo de evacuação essencialmente de vidas humanas.

A eficiência do sistema de emergência apresentará resultados positivos se as populações a jusante da albufeira estiverem informadas de todos os procedimentos, que devem ser avaliados através de simulacros executados de cinco em cinco anos.

5.2. Plano de observação

O dimensionamento de estruturas seguras e económicas obriga a soluções algo mais conservadoras, mas essencialmente obriga a um conhecimento do comportamento real das estruturas, pelo que o plano de observação é a ação na qual devem todos os intervenientes (projetistas, donos de obra e fiscalização) estar interligados para benefício de todos, quanto ao teste dos equipamentos durante a fase construtiva, validação dos critérios de projeto, promoção da segurança da estrutura durante toda a sua vida útil e incrementar experiência para um futuro cada vez mais seguro e económico em estruturas a projetar.

Os equipamentos aplicados nos planos de observação de barragens tem como principal objetivo superar as simplificações e limitações que os projetistas assumem para caracterizar as solicitações e materiais utilizados. Estes equipamentos permitem quando devidamente aplicados e calibrados aos critérios de atuação, informar quando as estruturas se aproximam dos limites previstos nos modelos teóricos, o que permite a tomada de decisão sobre o futuro das mesmas, de forma económica e segura para todo o vale a jusante.

A instalação de equipamentos de observação deve estar assente na utilização de equipamentos de conceção simples, com elevada durabilidade e robustez para que durante a sua vida útil não sofram danos associados aos efeitos climatéricos, deterioração, danos oriundos de possíveis movimentos, vibrações das máquinas e muitas vezes devido a danos ocorridos na fase de instalação.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Os critérios de escolha dos equipamentos não podem apenas estar restringidos aos fatores já descritos, deve igualmente focalizar-se em equipamentos com robustez para resistir ao meio, sejam em variações de pressão, temperatura, como também deve-se ter em conta a capacidade do tempo de resposta dos equipamentos, campo de leitura, precisão e estabilidade dos aparelhos a serem instalados.

A execução de planos de observação adequados e eficazes tem-se relevado uma tarefa com alguma dificuldade, causada pela atribuição de valores de solicitação de forma probabilística (projeto) e da instalação dos equipamentos que não obedece a normas rígidas, obedecendo na maioria das vezes da maior ou menor preocupação do dono de obra, projetista, consultores e por vezes através da opinião de empreiteiros mais experientes e conservadores.

A segurança do vale será garantida não apenas quando respeitados os critérios anteriormente descritos, mas sempre que aos mesmos sejam adicionados outros parâmetros tais como os critérios de dimensionamento (se estes foram os mais adequados ao local em função da configuração do vale, das características dos materiais mais utilizados, os métodos construtivos, características da fundação e a fiabilidade dos órgãos hidráulicos instalados).

Em modo de conclusão é essencial que sejam respeitadas as normas existentes e criados planos de observação e emergência de forma a garantir melhores condições de segurança estrutural, populacional e ambiental.

O (C.E.I.B. 1976) e o (I.C.O.L.D. 1981) propõem condições de risco global a considerar não deve no entanto limitar-se a ações exteriores e às características exteriores. Deve-se contemplar os valores humanos e os danos materiais numa eventual rotura.

O I.C.O.L.D., 1981, sugeriu através de um grupo de trabalho propôr índices numéricos (a_i) aos diferentes fatores de risco segundo uma definição simples.

Os fatores foram agrupados nas seguintes categorias:

- ✓ Condições exteriores ou de ambiente (Fator E);
- ✓ Condições de obra e fiabilidade (Fator F);
- ✓ Risco humano e económico potencial (Fator R).

O valor final do índice de risco global (a_g) resulta do produto dos três fatores (E,F,R).

5.3. Aparelhagem da barragem e as grandezas a medir

A aparelhagem da barragem garante a medição de parâmetros considerados importantes na segurança estrutural da barragem. É neste contexto que propõem-se para a barragem de ribeira das Cortes a instalação de equipamentos de medição selecionados e devidamente testados e calibrados antes da sua aplicação definitiva. Não menos importantes são os cuidados a ter durante a instalação dos equipamentos, pela natureza delicada de alguns deles. Este tipo de equipamentos deve ser instalado e posteriormente monitorizado e inspecionado por técnicos qualificados e motivados na prevenção e segurança de todo o vale. No quadro 16 abaixo indicado é feita uma breve descrição dos equipamentos considerados perentórios para a obra e respetivas grandezas pelos mesmos medidos.

Quadro 17 - Equipamentos e respetivas grandezas a medir

<i>Designação do Equipamento</i>	<i>Grandezas a medir</i>	<i>Descrição de medição</i>
<i>Inspeção Visual dos técnicos</i>	Fendas	A inspeção visual é uma das medidas que deve ser sempre contemplada no plano de observação, pela sua extrema importância na deteção de fendas. Este tipo de inspeção deve estar focado essencialmente no coroamento, zona dos encontros e paramentos de jusante. De forma a facilitar as inspeções e deteção de fissurações, infiltrações e inícios de escorregamentos entre outros.
	Fissurações	
	Infiltrações	
	Início de escorregamento	
<i>Medidor de débitos total</i>	Medição de débito	Este tipo de equipamentos serve para medir os caudais totais percolados e devem ser instalados na base de jusante da barragem. Deve ser utilizado preferencialmente um aparelho automatizado, o que permite a leituras contínuas do volume de água coletada.
<i>Piezómetros</i>		Devem ser instalados piezómetros hidráulicos, por estes apresentarem tempos de respostas lentos, adequados ao enchimento lento da albufeira, mas na zona da fundação devem ser utilizados piezómetros de resposta rápida que permitirão testar a eficiência da cortina de injeção entre outras.
<i>Marcas superficiais</i>	Deslocamentos vertical	Através do nivelamento geométrico de precisão avalia-se os deslocamentos verticais e utilizando o método de triangulação os deslocamentos horizontais. Devem ser instalados no coroamento e sobre os paramentos.
	Deslocamentos horizontais	
<i>Instrumentação mateológica</i>	Precipitação	É importante a instalação deste instrumento, que garantem a obtenção de leituras de valores de precipitação, temperatura e evaporação. Estes dados permitem essencialmente o confronto e ajustamento histórico ao nível pluviométrico do local.
	Temperatura	
	Evaporação	
<i>Sismicidade</i>	Ondas sísmicas	Apesar de situada em zona de fraca incidência sísmica, devem ser instalados sismógrafos na barragem e sismocópios na encosta da albufeira.
	Vibrações	

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Conclusivamente e com base no discutido, para a barragem proposta, foram considerados três perfis de instrumentação da barragem:

- ✓ Zona central - perfil 1
- ✓ Zonas dos dois encontros - perfis 2 e 3.

Faz-se de seguida um quadro resumo dos equipamentos aplicados nos perfis em anexo onde resumidamente têm 9 pilaretes, 11 piezómetros hidráulicos, 7 piezómetros elétricos, 3 medidores de débito e 2 sismógrafos.

Quadro 18 - Resumo de instrumentação da barragem da ribeira das cortes

Perfis	Equipamentos aplicados				
	Marcas superficiais	Piezómetros Hidráulicos	Piezómetros Elétrico	Medidor de débitos	Sismógrafo
Perfil 1	3	5	3	1	2
Perfil 2	3	3	2	1	
Perfil 3	3	3	2	1	

Devem ser colocados dois pilaretes de estacionamento que permitiram realizar observações de nivelamento e triangulação em zonas (pontos fixos) que não estejam expostos a sofrer deslocamentos ao longo da vida da obra. Estarão implantados dois pilaretes no coroamento e uma banquetta a jusante e 2 no coroamento e base.

Todos os equipamentos instalados encontram-se representados nos desenhos em anexo.

5.4. Definição das frequências de leituras

A definição da frequência de leituras varia de obra para obra. A periodicidade com que se faz as leituras deve estar essencialmente relacionada com o tipo de barragem (obra), a sua idade e finalidade (tipo e condições de exploração).

A fase construtiva obrigará a que inicialmente exista uma maior frequência de leitura, no caso de aterros elevados, constituídos por materiais de baixa permeabilidade, onde tenha sido colocados um teor de água acima do ótimo ou em situações de drenagem pouco eficiente. Nestes casos podem ocorrer grandes tensões neutras, daí a necessidade de ter uma maior frequência de leituras.

Os problemas de saturação do maciço estabilizador de montante e da fundação das barragens de aterro tem o seu período crítico quando ocorre o primeiro enchimento da barragem. Este momento pode provocar movimentos internos do aterro provocados pela redistribuição das tensões, o que leva muitas vezes a formações de fendas transversais e longitudinais. Com

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

base nestes fatores nesta primeira fase de vida da obra deve existir um acompanhamento minucioso até que sejam obtidos valores mais estáveis. Os primeiros anos devem estar patentes num bom plano de observação de forma a conduzirem a uma melhor compreensão do comportamento da obra, do meio e da população.

Existe a grande preocupação de manter um nível de observação mais criterioso nos primeiros anos, não só porque isso garante o confronto da realidade com os critérios de teóricos de dimensionamento, mas também porque dados estatísticos levam a conclusão que o risco de acidentes de uma barragem são elevados no primeiro enchimento e seguintes 5 anos de vida, decrescendo até atingir os 50 anos, idade à partir da qual o risco aumenta. Apesar da informação é de extrema importância que os intervenientes mantenham o maior profissionalismo e dedicação durante toda a vida útil da obra.

O I.C.O.L.D. 1981, propõem frequências de leitura em função da idade, condições de exploração, altura da barragem, cuja é apresentada no quadro 19.

Quadro 19 - Proposta da frequência de Observações

<i>Vida da Obra</i>	<i>Função /Tipo de exploração</i>	<i>Tipo A</i>	<i>Tipo B</i>	<i>Notas</i>
Fase construtiva	Plurianual	Não é necessário	Duas vezes durante o mês ou várias vezes por semana. A necessidade de observações depende da velocidade de construção do	A inspeção nesta fase esta associada na sua totalidade no controlo e fiscalização da construção
	Sazonal			
Fase do 1º enchimento	Plurianual	Varias vezes por dia e dependendo da velocidade do enchimento aconselha-se a 1 ou 2 vezes ao dia.	Todas as semanas ou mesmo várias vezes ao dia, função da velocidade de enchimento e do nível de água na albufeira.	A inspeção visual deve manter-se periódica. Se o comportamento for anómalo deve-se aumentar a frequência de leituras
	Sazonal			
Os 5 primeiros anos	Plurianual	Trimestral	Trimestral	A inspeção visual deve manter-se periódica e Se o comportamento for anómalo deve-se aumentar a frequência de leituras
	Sazonal			
Após os primeiros 5 anos	Plurianual	Semestral	Semestral	A inspeção visual deve manter-se periódica e Se o comportamento for anómalo deve-se aumentar a frequência de leituras
	Sazonal			

Conclusivamente as condições de exploração da obra devem ser o culminar de uma planificação e definição dos adequados dispositivos de observação e frequência de leitura.

Mas todo este plano de observação será ainda mais eficiente complementado por investigações sobre as condicionantes de cada local, através de análises químicas da água, históricos de existência ou exploração de materiais radioativos, frequentes leituras de humidade, temperaturas e precipitação da zona.

5.5. Cálculo do índice global de risco

O cálculo de risco global (a_g) de acordo com a C.I.G.B. fundamenta-se no cálculo de três fatores de risco relativa a condições exteriores ou de ambiente (E), relativo a condições de obra - fiabilidade ou seja a estrutura em si (F) e por fim aspetos relativos ao risco humano e económico potencial (R). A nível nacional tem sido utilizado este método através das Normas de Observação e Inspeção de Barragens (NOIB), que ajudam na orientação das grandezas a observar e o tipo de procedimentos de segurança a ter em conta (inspeções visual e controlo de qualidade em todas as fases da vida). Os valores de índices numéricos (a_i) podem ser retirados através quadro do anexo 2 do I.C.O.L.D (1981).

O índice global é o valor resultante do produto dos três fatores como indica a seguinte expressão:

$$a_g = E \times F \times R \quad (23)$$

O risco das condições exteriores ou de ambiente é calculado através da expressão:

$$E = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 a_i \quad (24)$$

Ou seja, considerando os seguintes coeficientes:

- ✓ Sismicidade (velocidade 4-8 cm/s) - $a_1=2$
- ✓ Perigo de deslizamento de taludes da albufeira fraca - $a_2=2$
- ✓ Perigo de inundações superiores às estimadas no projeto - $a_3=3$
- ✓ Objetivo do represamento anual, plurianual ou sazonal - $a_4=1$
- ✓ Ações ambientais agressivas fracas - $a_5=4$

A expressão A é calculada em (B)

$$E = \frac{1}{5} \times (a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5) = 2,4$$

O risco das condições de obra é determinado através de:

$$F = \frac{1}{4} \sum_{i=6}^9 a_i \quad (25)$$

Assim sendo, consideram-se os seguintes coeficientes para o cálculo de F :

- ✓ Dimensionamento estrutural é adequado - $a_6=1$
- ✓ A fundação é comum - $a_7=3$
- ✓ Os equipamentos dos órgãos de descarga são fiáveis - $a_8=1$

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

✓ Condições de manutenção são satisfatórias - $a_9=3$

Ou seja, $F = \frac{1}{4} \times (a_6 + a_7 + a_8 + a_9) = 2$

$$R = \frac{1}{2} \sum_{i=10}^{11} a_i \quad (26)$$

Considerando os seguintes valores:

Volume de retenção é de $1,7 \times 10^6$ - $a_{10}=3$

Instalações a jusante (pequenas aldeias e agricultura) - $a_{11}=3$

É possível determinar o valor do fator de R , ou seja, $R = \frac{1}{2} \times (3 + 3) = 3$

Por fim, o índice global a_g para a barragem de ribeira das Cortes é de:

$$a_g = E \times F \times R = 2,4 \times 2 \times 3 = 15$$

O tipo de dispositivos de observação e auscultação a colocar com base na tabela de orientação (anexo 3) e tendo como base a altura da barragem, índice a_g , o fator R e o fator a_1 (sismologia), onde em casos de barragens com alturas superior a 15 m e até 30 m, verifica-se assim que deve ser considerados os dispositivos de observação descritos no quadro 20.

Quadro 20 - Dispositivos de observação e auscultação na barragem de Cortes

Dispositivos de observação /auscultação	Tipo A	Simples inspeção visual
		Medidas de débito total incluindo a turvação: $a_g=15$ e $R=3$
	Tipo B	Piezómetros (hidráulicos e elétricos)
		Deslocamentos superficiais $a_g=15$ e $R=2$
Outros	Sismologia $a_g=15$ e $R=2$	

5.5. Recomendações finais

É de extrema importância que se faça leituras dos débitos, precipitações, níveis de humidade na albufeira e se possível deve ser instalada uma estação meteorológica no local.

Em resumo devem ser realizadas observações periódicas e por técnicos especializados de acordo com quadro 20, que ajudaram na deteção de deformações, fendas e por exemplo percolações desadequadas que são fatores suscetíveis de afetar a segurança da barragem.

Quadro 21 - Recomendações finais

<i>Parâmetros</i>	<i>Medidas de grandezas e outras observações</i>
<i>Deformações</i>	Observação direta (movimentos de verticais e horizontais).
<i>Resistência ao corte e alterações</i>	Observação direta investigação do local e ensaios laboratoriais.
<i>Percolação</i>	Medidas de chuvas, turvação, observação direta e débitos.
<i>Erosão interna</i>	Ensaio laboratoriais e turvação
<i>Dispositivos de estanqueidade e cortinas e de injeção</i>	Observação direta, turvação subpressões intersticiais e débitos.
<i>Sistemas de drenagem filtros</i>	Observação direta, débitos e turvação
<i>Terras residuais, rochas decompostas e rochas alteradas</i>	Amostragens, ensaios laboratoriais, assentamentos e subpressões.
<i>Compactação</i>	Ensaio laboratoriais e observação direta
<i>Precipitação</i>	Medição da quantidade de chuva
<i>Tremores de terras</i>	Observação direta, assentamentos medidas sísmicas (suscetível de auto matização)
<i>Forma de inserção no vale</i>	Revisão do projeto
<i>Núcleo impermeável e Sistemas de estanquidade</i>	Assentamentos, débitos e turvação
<i>Sistema de drenagem</i>	Observação direta
<i>Buracos abertos por animais</i>	Observação direta
<i>Proteção de paramentos</i>	Assentamentos, movimentos, observação direta e movimentos relativos.
<i>Manutenção dos drenos</i>	Observação direta e débitos.
<i>Manutenção da proteção dos paramentos</i>	

6. Conclusão

6.1 Aspetos gerais

O trabalho incidiu preferencialmente na observação e instrumentação de uma hipotética barragem na Ribeira das Cortes, alterando-lhe a tipologia para uma barragem zonada devido às vantagens que apresenta (razões geológicas, topográficas e aproveitamento de solos fracos para aterros estabilizadores e os melhores para o núcleo). Foi feito um plano de observação adequado à possível estrutura e em função do mesmo foi determinado o índice global de segurança condicionado ao risco estrutural, ambiental e material.

No final do presente trabalho, conclui-se que os conceitos de gestão de risco em barragens, ganham contornos cada vez mais importantes na atual sociedade, através da busca de métodos que devem ser utilizados no âmbito de segurança de barragens. As análises de risco têm sido uma mais-valia neste contexto, por ser um processo estruturado com intuito final de colmatar as estimativas probabilísticas tidas em conta durante o projeto numa aproximação mais adequada entre os princípios de dimensionamentos (teóricos) com o comportamento real de cada obra.

Os acidentes gerados por grandes obras (barragens), podem ter em si só consequências catastróficas relativamente às possíveis perdas de vidas humanas, perda material e impactos ambientais. Deste modo a questão do controlo de segurança de uma barragem devem estar assentes num conjunto de procedimentos a ser tidos em conta em todas as fases da vida da obra, em busca de conhecimentos, deteção em tempo útil de eventuais anomalias e consequente intervenção atempada e eficaz.

Só com o conhecimento adequado dos comportamentos dos vários fatores que entram na fórmula de cálculo do risco global, é possível através da mesma determinar este risco com alguma certeza.

Conclusivamente, todo o processo inerente a observação de barragens, mesmo quando sinónimo de grandes encargos financeiros, deve ter um lugar prioritário pelo imensurável auxílio que disponibiliza no momento de tomadas de decisão e respetiva segurança em barragens de aterro ou enrocamentos.

Por fim sobre o método de cálculo de risco global (a_g), utilizado no presente trabalho, conclui-se que a hipotética barragem caso seja construída e respeitando os procedimentos propostos, abarcaria um valor de índice global de risco ($a_g=15$). Pela dificuldade de interpretação do valor propõem-se o quadro abaixo indicado que permite de uma forma mais rápida e fácil de entender em que condições se poderá enquadrar determinada obra. Assim a

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

leitura do quadro permite confirmar que a barragem de ribeira das Cortes representa um risco leve para todo o vale.

O quadro 22 é uma tabela de dupla entrada que permite ao determinar-se o índice de risco global, que a cada intervalo de 25 unidades corresponde um determinado grau de risco. O grau de risco resultante dos índices (a_g) quando multiplicado pelo grau de risco resultante do estado ou fase de vida da obra, permite ter uma escala de risco que de forma mais fácil é possível qualquer pessoa ter uma ideia do ponto de situação ou estado de risco das barragens.

Quadro 22 - Matriz interpretativa do índice de risco global em várias fases de vida de barragens

		<i>Barragens novas</i>	<i>Barragens com 1 a 5 anos</i>	<i>Barragens com 6 a 50 anos</i>	<i>Barragens com mais de 50 anos</i>
<i>Índice de risco global (a_g)</i>	<i>Grau de risco (gr)</i>	3	2	1	4
0-25	1	3	2	1	4
26-50	2	6	4	2	8
51-75	3	9	6	3	12
76-100	4	12	8	4	16

Quadro 23 - Avaliação do risco final

<i>Grau de risco final (grf)</i>	<i>Avaliação do risco</i>
1 a 4	Leve
5 a 8	Moderado
9 a 12	Elevado
13 a 16	Intolerável

6.2 Trabalhos Futuros

Com o trabalho desenvolvido e as conclusões retiradas fica uma verdadeira vontade de continuidade de estudo do tema devido aos conhecimentos adquiridos neste curto período que existe para realizar a dissertação.

A segurança de barragens de aterro ou enrocamento é sem dúvida uma das maiores exigências que existe, quando se pretende definir o risco de determinada obra. Exigência esta que diz respeito essencialmente à dificuldade que há em determinar o fator de risco global, através de fórmulas que apesar de contemplarem fatores estruturais, ambientais, humanos e económicos, não deixa de ser uma fórmula probabilística. Esta fórmula poderá ser melhorada se incrementado um fator que contabilize as situações de emergências e respetivas medidas. É neste contexto que há uma grande possibilidade de desenvolvimento do tema, chegando mesmo a propor uma nova fórmula de cálculo do índice global de risco que contemplasse o fator de emergência em barragens.

Para além do referido, existem alguns pontos que podem ser abordados no futuro. Assim sugere-se as seguintes propostas para estudos futuros:

- Caso a futura barragem seja construída, efetuar estudos da mesma a fim de comparar os resultados com os resultados apresentados no presente trabalho;
- Com base nos métodos estatísticos, determinar percentagem de importância na contribuição de cada fator (E,F e R), comparativamente ao grau de importância dos fatores na proposta do I.C.O.L.D, 1981.

Bibliografia

- ✓ A.Atallah, Tony. **A Review on dams and breach**. Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.
- ✓ Almeida, A., **Emergências e Gestão do Risco – Capítulo 7**, Curso sobre Operação e Segurança de Barragens.
- ✓ Almeida, António Betâmio, **Gestão da Água, Incertezas e Riscos, conceptualização Operacional**, Esfera do Caos, Lisboa, 2011.
- ✓ Azevedo, M., **Barragens de Terra – Sistemas de Drenagem Interna**, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2005.
- ✓ Coelho, F., **Análise e Dimensionamento à Acção Sísmica**, Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Outubro, 2010.
- ✓ Colle, G., **Metodologias de Análise de Risco para Classificação de Barragens Segundo a Segurança**, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Abril, 2008.
- ✓ Costa, Teixeira e Lança, Rui., **Barragens**. Escola Superior de Tecnologia Universidade de Algarve, Portugal, 28 de fevereiro de 2001.
- ✓ Cruz, P.T da, 2004, 100 **Barragens Brasileiras. Casos Históricos, Materiais de Construção e Projectos**. Oficina de textos, 2ª Edição, Sal Paulo.
- ✓ Duarte, A., **Barragem e Albufeiras em Portugal: Usos da Água, Preocupações Ambientais e Ordenamento do Território – Caso de Estudo: Albufeira de Foz Tua**, Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Setembro, 2013.
- ✓ E. Maranha das Neves, **Barragens de aterro. Experiência Portuguesa**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Conferências Ibero – Americanas sobre aproveitamentos hidroelétricos, Lisboa, Junho 1987.
- ✓ Fonseca, A., **Auscultação por Instrumentação de Barragens de Terra e Enrocamento para Geração de Energia Eléctrica – Estudo de Caso das Barragens da UHE São Simão**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dezembro, 2003.
- ✓ **Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens**, Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens, Janeiro, 2005.
- ✓ Guerreiro, L., **A Definição de Acção Sísmica na regulamentação Actual**, Reabilitação Sísmica de Edifícios, Junho, 2010.
- ✓ I.C.O.L.D. (Internacional Committee on Large Dams), (1981) – **Observation automatique pour le controle de la sécurité des barrages**. Comité de Détérioration des Barrages et Reservoirs. Group de Travail pour l'Observation Automatique.
- ✓ Jónatas, R., **Rotura de Barragens de Aterro por Galgamento – Ensaio Experimentais com Aterros Homogéneos**, Dissertação de Mestrado Integrado, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013.
- ✓ Lança, R., Tipologias, **Condicionantes e Acções em Barragens de aterro**, Escola Superior de Tecnologia do Algarve, Faro, 1997.
- ✓ Linsley e Franzini (1972), **Water Resources engineering**.
- ✓ Malveira, V. Furtado, F., Gomes, F., Ponte, A., **A Fragilidade da Infraestrutura na Avaliação do Estado de Conservação das Barragens de acordo com a R143**, UVA, Sobral-CE, Brasil.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

- ✓ Marques, J., Carvalho, R., ***Critérios de Projeto de Barragens de Concreto à Gravidade: Uma Visão de Sustentabilidade***, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- ✓ Marques, J., ***Plano de Emergência Interno de Barragens***, Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Dezembro, 2014.
- ✓ Massad, F. Obras de terra: ***Curso básico de geotecnia***; São Paulo, Oficina de textos, 2003.
- ✓ Oliveira, J., ***Contribuição para a verificação e Controle da Segurança de Pequenas Barragens de Terras***, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Novembro, 2008.
- ✓ Pedro S. Sêco e Pinto, ***Observação de barragens de Aterro***, Ministério da habitação obras públicas e transportes, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Seminário 281, Lisboa, 1982.
- ✓ Pereira, T., ***Avaliação do Desempenho de Diferentes Métodos de Análise de Estabilidade de Taludes em Barragens de Terra***, Universidade Federal de Santa Marias, Dissertação de Mestrado, Santa Marias, 2013.
- ✓ Pinto, A., ***Gestão de Riscos e Segurança de Barragens, 3º Simpósio de Segurança de Barragens e Riscos Associados***, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Novembro, 2008.
- ✓ Quintas, F., ***Planeamento da Construção de Barragens de Terra***, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, Setembro, 2002.
- ✓ Rocha, C., Neves, L., Persechini, M., ***Manual de Segurança e Inspeção de Barragem***, Ministério de Integração Nacional Secretaria de Infraestruturas Hídricas, Brasília, Julho, 2002.
- ✓ Rodrigues H., ***Controlo de Segurança Hidráulico Operacional em Barragens de Aterro***, Universidade do Algarve, 2006.
- ✓ Sandroni, S., 2012, ***Notas de Aulas da Disciplina de Barragens de Terra e Enrocamentos***; Curso de Mestrado da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- ✓ Sardinha, R., Faustino, V., Pimenta, L., Silva, H., ***Concepção e Projecto Geotécnico da Lagoa da Portela***, Aqualogus – IGSERV, Funchal.
- ✓ Seara, R., ***Avaliação do desempenho da Barragem da Usina Hidrelétrica Governador Parigot de Souza (Cativari-Cachoeira)***, Dissertação de Mestrado, Escola de Minas/UFOP, Ouro Preto, Agosto, 2010.
- ✓ Sepulveda, J., ***Plano de Segurança Contra Incêndios – Medidas de Autoprotecção***, ISPA, Instituto Universitário, Lisboa, Março, 2015.
- ✓ Sherard, J. L, Woodward, R.J, Gizienski, S.F. Clevenger, W., 1963, ***A Earth Rock Dams – Engineering Problem of Design and Construction.***, John Wiley and Sons, Inc.
- ✓ Souza, M., ***Estudo para o Projecto Geotécnico de Barragem de Alto Irani***, SC, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Abril, 2013.
- ✓ Stephens, T., ***Manual sobre Pequenas Barragens de Terra – Guia para a localização***, Projectos e Construção, Roma, 2011.
- ✓ Tavares, J., ***Aplicação de Redes Neurais no Planeamento de Emergência em Barragens de Aterro***, Dissertação de Mestrado, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa, Outubro, 2011.
- ✓ Tomaz, P., ***Curso de manejo de Águas Pluviais – Capítulo 88***, Pequenas Barragens de Terra, Brasis, Setembro, 2011.

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

- ✓ Torres, J., ***Métodos de Observação durante a Execução de Obra Subterrâneas***, Politécnico do Porto, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2010.
- ✓ Viseu, T., Martins.R e Santos, A.,2002, ***Mitigação do Risco Associado à Deterioração nos Orgãos de Segurança das Barragens***, Relatório Lnec. 175/02.
- ✓ Yang, H. et al. (1999). Dam History page.

ANEXOS

Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento

Anexo 1 - Ficha de inspeção visual da barragem de aterro

Anexo 2 - Tabela de Quantificação de risco (NOIB 1993)

Anexo 3 - Dispositivos de auscultação e observação propostos (NOIB)

Anexo 4 - Traçado da zona de albufeira e curvas de nível do Local

Anexo 5- Fetch da albufeira

Anexo 6 - Perfil tipo e instrumentação da barragem

Anexo 7 - Instrumentação da barragem

Anexo 8 - Desenho de pormenor do coroamento

Anexo 9 - Fuso granulométrico do material do filtro - chaminé

Anexo 10 - Fuso granulométrico do material do núcleo