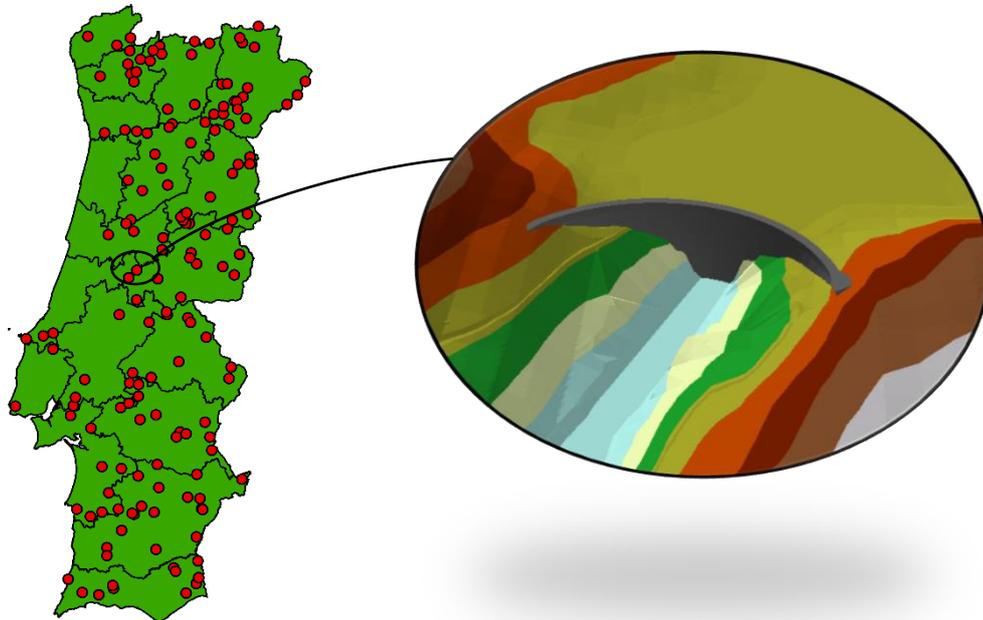




ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil



DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA SIG PARA APOIO AO CONTROLO DA SEGURANÇA DAS GRANDES BARRAGENS PORTUGUESAS

CARLOS ALEXANDRE LEÇA ALMEIDA
(Licenciado em Engenharia Civil)

Trabalho Final de Mestrado elaborado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pelo Instituto Superior de Engenharia de Lisboa no âmbito do protocolo de cooperação entre o ISEL e o LNEC

Orientadores:

Doutor Sérgio Bruno Martins de Oliveira, Professor Adjunto (LNEC/ISEL)
Mestre Paulo José de Matos Martins, Professor Adjunto (ISEL)

Júri:

Presidente:

Mestre Cristina Ferreira Xavier de Brito Machado, Prof. Coordenadora (ISEL)

Vogais:

Doutor Paulo Jorge Henriques Mendes, Professor Adjunto (ISEL)
Doutor Sérgio Bruno Martins de Oliveira, Professor Adjunto (LNEC/ISEL)
Mestre Paulo José de Matos Martins, Professor Adjunto (ISEL)

Dezembro 2013

AGRADECIMENTOS

Gostaria de exprimir o meu sincero agradecimento a todos os que contribuíram para a realização deste trabalho final de mestrado, sem o vosso apoio esta etapa não estaria concluída.

Em primeiro lugar agradeço ao Professor Sérgio Oliveira por todo o apoio, dedicação e motivação que transmitiu no decurso deste trabalho, pelo interesse e pela proposta apresentada para a elaboração do mesmo em cooperação com o LNEC, ao Professor Paulo Matos Martins pela orientação, motivação e pelos meios disponibilizados. Sem a Vossa orientação este processo não teria atingido o patamar pretendido.

Em segundo lugar, agradeço ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pela possibilidade da realização desta dissertação na instituição e pelos meios disponibilizados.

Não poderia deixar de expressar o meu agradecimento à Engenheira Inês Soares, do ISEL e ao Engenheiro Nuno Afonso, do LNEC, pela atenção, apoio, motivação e tempo despendido no decorrer desta jornada. O vosso acompanhamento foi fundamental para a elaboração deste trabalho.

Gratifico ainda, o constante apoio e o esforço prestado pelos meus pais, ao meu irmão agradeço os momentos de distração proporcionados, aos meus amigos agradeço o contributo e a companhia que mantiveram ao longo desta etapa, nomeadamente ao Marco Gonçalves, Luís Santos e André Silvestre, e por fim, agradeço especialmente à Filipinha, pela força, motivação e apoio que me transmitiu não só no decorrer deste trabalho, como em toda a minha vida académica.

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA SIG PARA APOIO AO CONTROLO DA SEGURANÇA DAS GRANDES BARRAGENS PORTUGUESAS

Resumo

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), cada vez mais presentes na nossa sociedade, como auxílio ao processamento, recolha e organização de dados, encontram-se em constante desenvolvimento. Com o presente trabalho pretende-se criar uma plataforma SIG com vista a apoiar o controlo da segurança das Grandes Barragens Portuguesas, do ponto de vista da segurança estrutural, hidráulico-operacional e ambiental do conjunto barragem-fundação-albufeira. Foi recolhida informação sobre as Grandes Barragens Portuguesas e as principais características de cada uma foram introduzidas num modelo SIG georreferenciado para apoio ao controlo da segurança. O modelo desenvolvido foi utilizado conjuntamente com outros modelos SIG já construídos, nomeadamente com informação sobre a sismicidade em Portugal com ligações a programas de análise estrutural de barragens em observação. Numa fase final foi criada uma aplicação *Web*, acessível a qualquer utilizador da internet, com toda a informação trabalhada.

Desenvolveu-se ainda um modelo SIG da barragem do Cabril, considerando a geometria da obra em 3D, com o intuito de mostrar as potencialidades dos sistemas SIG no apoio ao controlo da segurança de barragens, na vertente estrutural e também nas vertentes hidráulico-operacional e ambiental.

Para o desenvolvimento desta plataforma SIG recorreu-se ao *software* ArcGIS da ESRI. Foi utilizado o módulo ArcMap para processamento de dados em 2D e o módulo ArcScene para efetuar as visualizações 3D. A criação da aplicação *Web* foi efetuada através da interface ArcGIS Online também da ESRI.

Palavras-Chave

Barragens, SIG, Barragem do Cabril, Controlo de Segurança, Barragens de Betão

DEVELOPMENT OF A GIS PLATFORM TO SUPPORT SECURITY CONTROL OF LARGE DAMS IN PORTUGAL

Abstract

The Geographic Information Systems (GIS) which are more and more present in our society, as an aid to processing, collecting and organizing data, are in constant development. As such, this work has the aim to create a GIS platform to support the safety control of Large Portuguese Dams, concerning the structural, hydraulic-operational and environmental safety of the whole dam-foundation-reservoir. Information about Portuguese Large Dams was gathered and their main characteristics were introduced into a georeferenced GIS model in order to support the safety control activities. The developed model was used together with other GIS models already built, namely with information about seismicity in Portugal, with links to programs of structural analysis of dams under monitoring. A web application was also created, accessible to any internet user, allowing the visualization of all the processed information.

A GIS model of the Cabril's Dam was also developed, considering the geometry of the dam in 3D, in order to show the potential of the GIS systems in supporting the safety control of dams (in view of structural, hydraulic-operational and environmental aspects). The ESRI ArcGIS software was used to develop the referred GIS platform. ArcMap module was used for 2D data processing and the ArcScene module for 3D visualization. The web application was also developed through the interface of ESRI ArcGIS Online.

Keywords

Dams, GIS, Cabril's Dam, Safety Control, Concrete Dams

Índice

Capítulo 1

Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos da Dissertação	4
1.3 Estrutura da Dissertação.....	5

Capítulo 2

Barragens: utilização de um SIG para apoio ao controlo da segurança estrutural, hidráulico-operacional e ambiental	7
2.1 Considerações Iniciais	7
2.2 Os SIG e a Internet	9
2.3 Controlo da segurança estrutural, hidráulico-operacional e ambiental das Grandes Barragens	11
2.3.1 SIG e controlo da segurança estrutural.....	12
2.3.2 SIG e Controlo da segurança hidráulico-operacional.....	16
2.3.3 SIG e controlo da segurança ambiental	18
2.4 Considerações finais	21

Capítulo 3

Controlo de segurança das barragens portuguesas. Implementação em SIG	23
3.1 Considerações iniciais.....	23
3.2 Breve introdução ao ArcGIS	24
3.3 Recolha e organização dos dados	26
3.3.1 Modelação da informação 2D	26
3.3.2 Modelação da informação 3D	30
3.4 Desenvolvimento das plataformas	30
3.4.1 Plataforma 2D.....	31
3.4.2 Plataforma 3D.....	34
3.5 Desenvolvimento da aplicação Web	41
3.6 Considerações finais	44

Capítulo 4

Introdução de elementos sobre o controlo da segurança estrutural em plataformas SIG.....	45
4.1 Considerações Iniciais	45
4.2 Utilização de modelos de interpretação do comportamento observado.....	46
4.2.1 Modelos numéricos de Elementos Finitos.....	46
4.2.2 Modelos de Interpretação Quantitativa.....	49
4.3 Considerações Finais	53

Capítulo 5

Exemplos de exploração das plataformas SIG	55
5.1 Considerações iniciais.....	55
5.2 Exploração da plataforma 2D em ArcMap	55
5.3 Exploração da plataforma 2D em ArcGIS Explorer Desktop	59
5.4 Exploração da plataforma 2D em ArcGIS Online.....	62
5.5 Exploração da plataforma 3D em ArcScene	69
5.6 Considerações Finais	71

Capítulo 6

Conclusões e perspectivas futuras	73
6.1 Síntese do trabalho.....	73
6.2 Desenvolvimentos futuros	74

Referências	77
--------------------------	-----------

Índice de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1– Grandes Barragens em Portugal, com referência para a barragem do Cabril [adaptada de (Wikipédia, 2013)].	3
Figura 1.2 - Atributos da Barragem.	4

Capítulo 2

Figura 2.1 - Barragem do Alqueva (Pinto, 2009).....	7
Figura 2.2 – Utilização de informação do Google Earth no desenvolvimento de sistemas SIG para o apoio ao controlo da segurança de barragens.....	10
Figura 2.3 – Barragens de betão. Tipos estruturais. (CNPGB, 1992).	11
Figura 2.4 - Tensões Principais nos Paramentos da Barragem (ação: pressão hidrostática). Resultados de modelos numéricos (Oliveira, 2006).....	13
Figura 2.5 - História de deslocamentos à cota 250 na barragem do Cabril (Oliveira, 2006).	14
Figura 2.6 - Equipamentos de observação para controlo de barragens [adaptado de (Oliveira, 2006)].	16
Figura 2.7 - Descarga de meio fundo - barragem de Cahora-Bassa (Gamesby, 2013).	18
Figura 2.8 - Descarga de fundo - barragem do Alto Lindoso (Rui, 2010).	18
Figura 2.9 - Tomada de água (Suisted, 1995).	18
Figura 2.10 - Descarregador de cheia (Lencastre, 2010).....	18
Figura 2.11 – Barragem da Agueira (CNPGB, 1992).	19
Figura 2.12 - Escada de peixes da barragem da Caniçada (Santo, 2005).....	20
Figura 2.13 - Turbina " <i>fish-friendly</i> " (Dham, 2011).	21

Capítulo 3

Figura 3.1 - Exemplo hierarquia ArcGis.	25
Figura 3.2 - Criação da <i>File Geodatabase</i>	31
Figura 3.3 - Adicionar e georreferenciar informação no ArcMap.....	32
Figura 3.4 – Exportação de dados para o sistema ArcGis.	32
Figura 3.5 – Janela de visualização referente à informação introduzida da barragem de Castelo do Bode.	33
Figura 3.6 - Visualização das <i>shapefiles</i> com mapa base.....	33
Figura 3.7 - <i>File Geodatabase</i> - organização das novas <i>feature classes</i>	34
Figura 3.8 - Importação do terreno adjacente à barragem do Cabril.....	35

Figura 3.9 - Curvas de nível do terreno adjacente à barragem do Cabril.....	35
Figura 3.10 - Tratamento de dados no AutoCAD.....	36
Figura 3.11 - Curvas de nível no ArcMap.....	37
Figura 3.12 - Criação do TIN do terreno da barragem do Cabril.....	38
Figura 3.13 - Terreno da barragem do Cabril.....	38
Figura 3.14 - Malha de elementos finitos da barragem do Cabril.....	39
Figura 3.15 - Barragem do Cabril - Google SketchUp.....	39
Figura 3.16 - Importação da barragem do Cabril para o ArcScene.....	40
Figura 3.17 - Modelo 3D da barragem do Cabril.....	40
Figura 3.18 - Criação do mapa para posterior criação da aplicação <i>web</i>	41
Figura 3.19 - Criação da aplicação <i>web</i>	42
Figura 3.20 - Aproximação à barragem do Cabril na aplicação.....	42
Figura 3.21 - Escolha do mapa a visualizar.....	42
Figura 3.22 - Detalhes da aplicação.	43
Figura 3.23 - Logótipo do ISEL e do LNEC.....	43
Figura 3.24 - Janela de características da barragem do Cabril.....	43

Capítulo 4

Figura 4.1 – Equações da Mecânica Estrutural (Oliveira, 2012).	47
Figura 4.2 - Ação simultânea de várias ações observadas nas barragens.....	49
Figura 4.3 – Utilização integrada de modelos numéricos e de modelos estatísticos de separação de efeitos.	50
Figura 4.4 - Modelo de Interpretação Quantitativa do deslocamento radial observado no ponto superior da consola central de uma barragem (Oliveira, 2006).....	53

Capítulo 5

Figura 5.1 - Selecionar barragens cuja utilização se destina a fins energéticos.	56
Figura 5.2 – Selecionar barragens que se encontram no distrito de Castelo Branco.....	57
Figura 5.3 – Seleção de barragens com mais de 1000 x 1000 m ³ de volume.....	57
Figura 5.4 - Grandes barragens com representação das falhas sísmicas próximas.	58
Figura 5.5 – Envolvente sísmica das Grandes Barragens (pontos vermelhos) com dados sísmicos desde 1700 (pontos verdes).	59
Figura 5.6 – Visualização da plataforma SIG no ArcGIS Explorer Desktop.....	60
Figura 5.7 – Informação disponibilizada acerca de cada Barragem no ArcGIS Explorer Desktop. (Ex. Barragem de Belver).....	60

Figura 5.8 – Aproximação à barragem de Castelo de Bode, através do ArcGIS Explorer Desktop.	61
Figura 5.9 – Visualização da aplicação web das Grandes Barragens Portuguesas através do Internet Explorer.	62
Figura 5.10 – Detalhes da Aplicação Web.	63
Figura 5.11 – Ligar e desligar a visualização de camadas.	63
Figura 5.12 – Segurança Estrutural – Barragem do Cabril.	64
Figura 5.13 – Desenhos: barragem do Cabril.	64
Figura 5.14 – Barragem do Cabril: Rede de drenagem.	65
Figura 5.15 – Barragem do Cabril: Fios-de-prumo e extensómetros de fundação.	65
Figura 5.16 – Barragem do Cabril: Rede de drenagem, vista em planta.	66
Figura 5.17 – Barragem do Cabril: Fissuração.	66
Figura 5.18 – Barragem do Cabril: Expansão do betão.	67
Figura 5.19 – Barragem do Cabril: História de Deslocamentos na consola central.	67
Figura 5.20 - Segurança Ambiental: barragem Crestuma-Lever.	68
Figura 5.21 - Segurança Ambiental: barragem de Coimbra.	68
Figura 5.22 - Descarga de fundo.	69
Figura 5.23 - Descarregador de cheias.	69
Figura 5.24 - Central hidroelétrica.	69
Figura 5.25 - Vista 3D do conjunto barragem-albufeira do Cabril.	70
Figura 5.26 - Análise na plataforma 3D: <i>buffer</i> de falhas sísmicas junto à barragem do Cabril.	70
Figura 5.27 - Análise na plataforma 3D: <i>buffer</i> de sismos ocorridos após 1500 junto à barragem do Cabril.	71

Índice de Tabelas

Capítulo 2

Tabela 2-1 - Grandezas medidas no comportamento das grandes barragens e respetivos aparelhos.	15
--	----

Capítulo 3

Tabela 3-1 - Extrato da recolha de dados referente à localização das barragens.	27
Tabela 3-2 - Exemplo de informações sobre algumas barragens.	27
Tabela 3-3 - Exemplo das características de algumas barragens.	27
Tabela 3-4 - Características hidrológicas de algumas barragens.....	28
Tabela 3-5 - Informações relativas ao controlo da segurança estrutural das barragens.	28
Tabela 3-6 - Informação relativa a descarregadores de fundo.	29
Tabela 3-7 - Informação relativa a descarregadores de cheias.....	29
Tabela 3-8 - Informação relativa a centrais hidroelétricas	29
Tabela 3-9 - Exemplos de informação recolhida relativa a controlo de segurança ambiental. ...	30

Lista de Abreviaturas

SIG	Sistema de Informação Geográfica
CNPGB	Comissão Nacional Portuguesa de Grandes Barragens
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
INAG	Instituto da Água
ANPC	Autoridade Nacional de Proteção Civil
RSB	Regulamento de Segurança de Barragens
CSB	Comissão de Segurança de Barragens
NEB	Normas de Exploração de Barragens
IGP	Instituto Geográfico Português
ETRS	<i>European Terrestrial Reference System</i>
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
EF	Elementos Finitos
SQL	<i>Structured Query Language</i> (Linguagem de Consulta Estruturada)
EDP	Energias de Portugal

1

Introdução

1.1 Enquadramento

As barragens desde cedo tornaram-se num elemento indispensável à melhoria da qualidade de vida das sociedades modernas. A principal função das barragens, é adaptar o regime natural das águas dos rios, com o propósito de servir as populações de forma mais económica, e por outro lado proteger o ambiente de eventuais efeitos prejudiciais, como por exemplo aqueles associados às cheias. (Tanchev, 2005).

A água é um recurso indispensável, quer para abastecimento da população, quer para os sectores industrial, energético, agrícola e turístico. Nos dias de hoje, gerir a água em Portugal, significa, primeiramente investir em obras hidráulicas (CNPGB, 1992). Neste grupo de estruturas hidráulicas, estão inseridas as barragens que são estruturas de grandes dimensões, que requerem uma manutenção sistemática. Estas obras podem ser classificadas em, pequenas barragens e grandes barragens. No presente trabalho consideram-se as grandes barragens portuguesas.

Em Portugal existem atualmente várias dezenas de Grandes Barragens cujo controlo da segurança envolve os Donos de Obra, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e várias autoridades públicas como o Instituto da Água, I.P. (INAG) e a Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC). Este controlo visa garantir a boa funcionalidade destas grandes estruturas, permitindo que as mesmas cumpram os objetivos previamente estabelecidos. A maior ameaça inerente à exploração de barragens é o risco de rotura, uma vez que em geral, existe um significativo número de pessoas que

vive em zonas potencialmente atingíveis pelas ondas de cheias associadas a eventuais roturas.

Em Portugal o controlo da segurança de barragens rege-se pelo Regulamento de Segurança de Barragens (RSB, 2007), o qual abrange as barragens com as seguintes características:

- Altura igual ou superior a 15m;
- Altura igual ou superior a 10m, cuja albufeira tenha uma capacidade superior a 1 hm³ (1 milhão de metros cúbicos);
- Albufeira com capacidade superior a 100 000 m³;
- Barragens cujos estudos de avaliação de segurança indiquem a necessidade de tal controlo.

O controlo da segurança de barragens é um processo contínuo, que envolve três componentes: segurança estrutural, segurança hidráulico-operacional e segurança ambiental. O objetivo é obter um conhecimento adequado e continuado do estado da barragem, detetando possíveis anomalias e assegurando a possibilidade de uma eventual e atempada intervenção caso seja necessária (RSB, 2007).

O controlo da segurança das barragens envolve a elaboração de planos de observação, visitas de inspeção e relatórios de interpretação de dados.

De modo a facilitar as atividades de controlo de segurança de barragens, podem ser utilizadas plataformas SIG: Sistemas de Informação Geográfica¹. As plataformas SIG podem ser desenvolvidas recorrendo a *software* comercial como é o caso do ArcGIS ou a *software* de utilização livre como e o caso do Quantum GIS. Neste trabalho optou-se por utilizar o ArcGIS².

Este tipo de plataformas computacionais facilita o processo de organização, gestão e manipulação de dados, tornando-o mais rápido e intuitivo. Os SIG requerem a utilização

¹ Os SIG têm a potencialidade de juntar uma base de dados relacional de informação alfanumérica com capacidades gráficas e de desenho, tirando desta forma partido de uma ferramenta de geoprocessamento, através da possibilidade de efetuar *queries* (perguntas) à base de dados construída com base em questões geográficas.

² Foi utilizada uma licença individual do ArcGIS 10.1 com a extensão 3D Analyst e uma licença estudante do ArcGIS Online, obtidas no âmbito do contrato de licenciamento e manutenção que a Área Departamental de Engenharia Civil celebra anualmente com a ESRI

de dados georreferenciados, o que potencia a pesquisa a nível espacial, e tendo em conta a contínua atualização da informação ao longo do tempo, facilita também a realização de análises comparativas, nomeadamente sobre a evolução do estado de conservação/deterioração das obras.

Devido à elevada quantidade de informação relativa às Grandes Barragens Portuguesas, em 1992 a Comissão Nacional Portuguesa de Grandes Barragens (CNPGB), em parceria com o Instituto da Água (I.P.), criou um grupo de trabalho com os seguintes objetivos:

- Recolha de dados sobre as grandes barragens, para apoio à contribuição portuguesa para o Registo Mundial de Barragens;
- Organização e manutenção dos dados apresentados no *site* da CNPGB;
- Organização da documentação da Comissão.

As Barragens incluídas neste estudo cumprem um dos seguintes critérios, mais de 15 metros de altura (contados a partir da fundação) ou mais de 1hm^3 (1 milhão de metros cúbicos) de capacidade total de armazenamento (CNPGB, 1992).

Atualmente Portugal conta com quase 170 Grandes Barragens, distribuídas de norte a sul do país, como é possível ver na Figura 1.1.

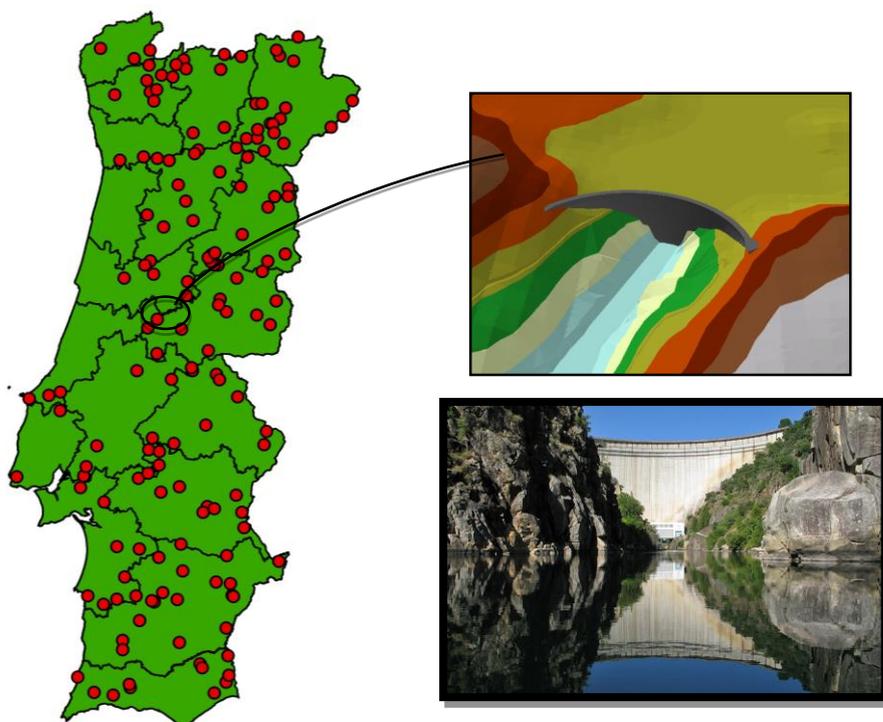


Figura 1.1– Grandes Barragens em Portugal, com referência para a barragem do Cabril [adaptada de (Wikipédia, 2013)].

1.2 Objetivos da Dissertação

O objetivo principal da presente dissertação, consiste no desenvolvimento de uma plataforma SIG, das Grandes Barragens Portuguesas, com vista a facilitar a análise destas obras de arte a nível estrutural, hidráulico-operacional e ambiental. A plataforma deverá ser adequada para efetuar pesquisas com vista a obter informação acerca das Grandes Barragens Portuguesas, de forma eficiente e objetiva, através de ferramentas de seleção de atributos (Figura 1.2).

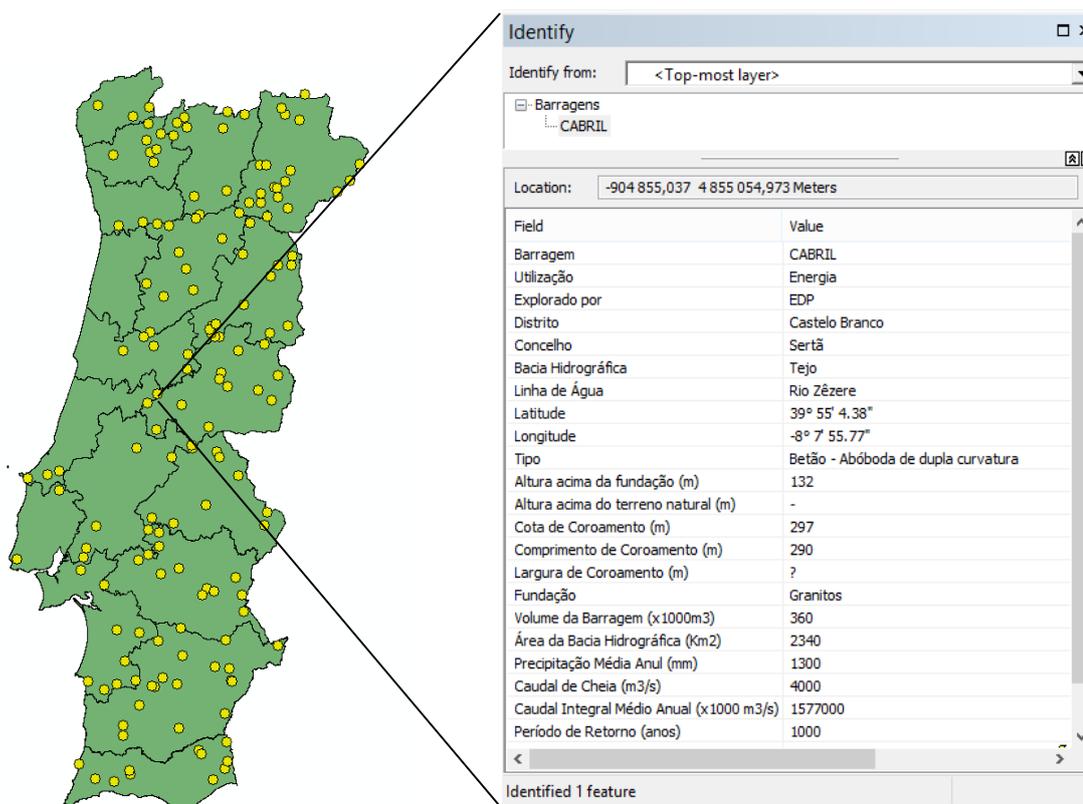


Figura 1.2 - Atributos da Barragem.

Desta forma, é necessário que a plataforma esteja acessível a qualquer utilizador que necessite de informação relativa à matéria, e que seja possível ser utilizada de forma prática e simples. Deste modo, um outro objetivo será mostrar o interesse da utilização da plataforma num navegador *Web*.

Para além deste objetivo principal:

- será feita uma abordagem à análise estrutural, hidráulico-operacional e ambiental de algumas das Grandes Barragens Portuguesas;

- apresenta-se um modelo 3D da Barragem do Cabril (envolvendo a albufeira) para ilustrar a utilização dos SIG na avaliação da segurança das barragens em conjunto com outro tipo de plataformas e ainda para mostrar as vantagens inerentes à utilização do *software* ArcGIS;
- será feita uma abordagem ao controlo de segurança estrutural de barragens, nomeadamente aos modelos utilizados para interpretação do comportamento observado, em particular, modelos numéricos de elementos finitos e modelos estatísticos de interpretação quantitativa.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação divide-se em seis capítulos, sendo o primeiro a presente Introdução e o último correspondente às Conclusões e Perspetivas Futuras.

No capítulo 2, apresentam-se os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), refere-se a importância de aceder eficazmente a diverso tipo de informação, discute-se o interesse do controlo da segurança das barragens a nível estrutural, hidráulico-operacional e ambiental e salientam-se as potencialidades dos SIG neste campo.

No capítulo 3, apresenta-se a metodologia adotada no desenvolvimento da presente plataforma SIG das barragens portuguesas, iniciando-se com uma breve explicação dos programas utilizados, referindo os aspetos mais importantes dos mesmos, de maneira a que o leitor possa entender as bases para o seu manuseamento. De seguida é apresentado o processo de seleção e tratamento de dados utilizados nas plataformas 2D e 3D, com vista ao desenvolvimento das mesmas. Por fim é descrito o método utilizado para a criação de uma aplicação *web* acessível a qualquer utilizador que tenha acesso a um dispositivo de visualização gráfica com internet.

No capítulo 4 é dado ênfase ao controlo da segurança estrutural das barragens, mostrando a importância da utilização de modelos de interpretação do comportamento das obras utilizados na análise de grandezas observadas (em particular dos modelos numéricos de EF e de modelos estatísticos de interpretação quantitativa). Por fim são ainda referidas algumas vantagens na utilização da plataforma desenvolvida neste trabalho para facilitar a utilização dos modelos mencionados.

No capítulo 5 apresentam-se exemplos de exploração das plataformas SIG desenvolvidas, de modo a ilustrar o interesse e as potencialidades das mesmas no controlo da segurança de grandes barragens.

2

Barragens: utilização de um SIG para apoio ao controlo da segurança estrutural, hidráulico-operacional e ambiental

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo referem-se as principais vantagens na utilização de plataformas SIG para o acesso, manuseamento, gestão e partilha de informação com vista à criação de modelos para o apoio ao controlo da segurança de barragens (Figura 2.1), quer a nível estrutural, hidráulico-operacional ou ambiental.



Figura 2.1 - Barragem do Alqueva (Pinto, 2009).

Atualmente as barragens portuguesas permitem que as suas albufeiras armazenem cerca de 8.000 hm³ de água (8.000 milhões de metros cúbicos), o que mostra a importância das barragens na gestão dos recursos hídricos em Portugal. No entanto têm surgido preocupações relativamente ao impacto que estas estruturas de elevada dimensão podem ter no ambiente, nomeadamente, no transporte de sedimentos, na alteração de caudais ecológicos, na descontinuação da existência de vida aquática, entre outros, o que nos últimos anos tem gerado movimentos de objeção à construção destas grandes obras.

Estas estruturas servem diferentes propósitos, tais como:

- Rega;
- Produção de energia;
- Abastecimento doméstico;
- Abastecimento industrial;
- Defesa contra cheias;
- Armazenamento de rejeitados;
- Navegação;
- Derivação.

Quanto ao tipo de material, as barragens dividem-se em:

- Barragem de Aterro;
- Barragem de Betão;
- Barragem de Alvenaria;
- Barragens Mistas.

Dada a dimensão das barragens e o seu grau de importância é necessário efetuar sistemáticas verificações de segurança, quer na fase de projeto, quer durante toda a vida das obras. O RSB classifica as barragens segundo os danos potenciais a elas associados, nas classes a seguir indicadas por ordem decrescente da gravidade dos danos potenciais:

- Classe I;
- Classe II;
- Classe III;

nas quais se tem em conta as vidas humanas, bens e ambiente (RSB, 2007).

2.2 Os SIG e a Internet

A ideia da criação de uma rede para partilha de informações remonta dos tempos da guerra fria, onde havia a necessidade de intercomunicar entre as bases militares e os departamentos políticos. Para tal o governo Norte-Americano desenvolveu uma organização conhecida por ARPA (Advanced Research and Projects Agency – Agência de Pesquisas de Projetos Avançados), que desenvolveu a rede denominada de ARPANet, conhecida também como a “mãe” da internet.

A ARPANet foi a primeira rede utilizada para troca de informações, sendo a primeira mensagem enviada em 1969.

No início da década seguinte, década de 70, esta rede expandiu-se a várias universidades, o que permitiu uma grande evolução a nível da troca de informações por este meio. No início da década de 80, a evolução do uso da ARPANet foi tão acentuada que houve a necessidade de se separar, sendo criada a MILNet para uso Militar e a Internet para o uso público (Waldrop, 1963).

Devido à elevada rapidez de troca de informações por parte da rede pública, foi criada em 1983 a *World Wide Web* (www), criada por Tim Berners Lee, a qual viria a permitir a visualização de um aglomerado de documentos por um *browser*³ (navegador) acessível a qualquer utilizador.

De modo a facilitar a organização e o acesso a grandes quantidades de informação, geralmente são utilizadas bases de dados, que permitem a organização da informação por temas, ou de acordo com os critérios que sejam mais vantajosos para os utilizadores. Os sistemas SIG baseiam-se na utilização dos princípios das bases de dados, recorrendo nomeadamente ao armazenamento de informação no formato *File Geodatabase* ou *Personal Geodatabase*. A grande vantagem da utilização destes sistemas reside no facto dos registos das bases de dados terem uma relação unívoca com as entidades gráficas representadas (ou seja, a cada registo corresponde uma entidade gráfica e vice-versa). Esta característica única permite processar informação através da aplicação de *queries* espaciais (com recurso a perguntas e filtros espaciais) naquilo que se designa comumente como geoprocessamento. Esta possibilidade de análise relacional espacial (além das tradicionais capacidades clássicas das bases de dados) faz dos sistemas SIG únicos na análise e identificação de respostas a problemas de incidência espacial.

As bases de dados permitem a interação entre utilizadores, aplicações e com a própria base de dados para capturar e analisar a informação nela contida. Deste modo cada base de dados requer um sistema de gestão, que permita a definição, criação, pesquisa, atualização e administração da mesma.

³ *Web browser* ou simplesmente *browser*, é um programa de computador que permite aos utilizadores partilhar e visualizar páginas Web, através da comunicação entre servidores.

Nas últimas décadas, tem-se acentuado a necessidade de caracterizar a informação a um nível espacial, para que seja possível analisar a localização física dos objetos e a distância entre os mesmos. É neste contexto que os SIG surgiram e têm sido desenvolvidos, permitindo analisar a informação a nível geográfico, temporal e espacial.

Um dos sistemas mais conhecidos em todo o mundo que contextualiza a informação a este nível, é o Google Earth, inicialmente criado pela companhia Keyhole, Inc, que trabalhou em parceria com a Agência de Informação Central (CIA), que mais tarde viria a ser adquirido pela Google. Este sistema permite a sobreposição de imagens de satélite, de fotografia aérea e de Sistemas de Informação Geográfica em 3D (CIA, 2007).

Na realização deste trabalho, a utilização das ferramentas disponíveis no Google Earth foram de grande utilidade visto tratar-se de um sistema *open source*, ou seja, que permite o acesso universal a todos os utilizadores, os quais podem interagir com a sua base de dados e contribuir para o desenvolvimento da mesma (Figura 2.2).

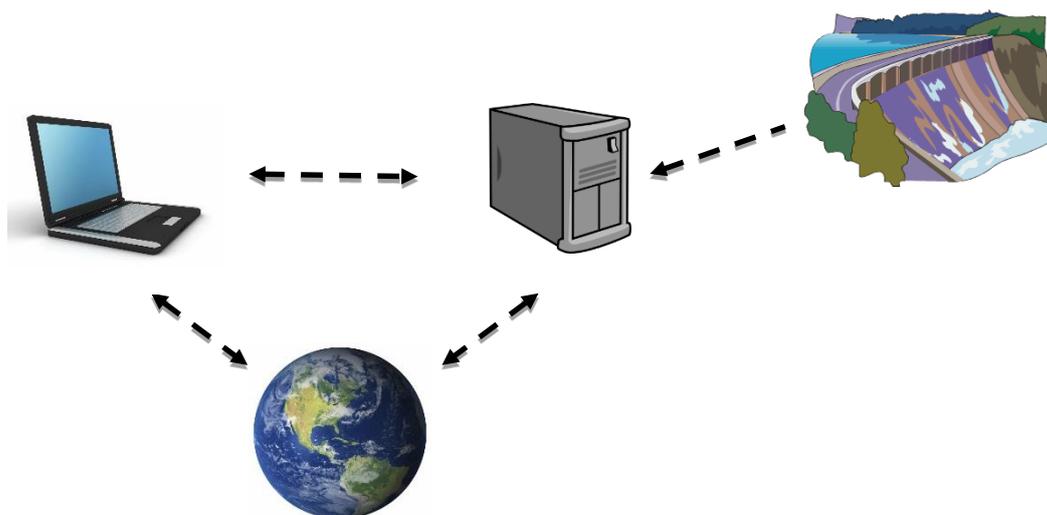


Figura 2.2 – Utilização de informação do *Google Earth* no desenvolvimento de sistemas SIG para o apoio ao controlo da segurança de barragens.

2.3 Controlo da segurança estrutural, hidráulico-operacional e ambiental das Grandes Barragens

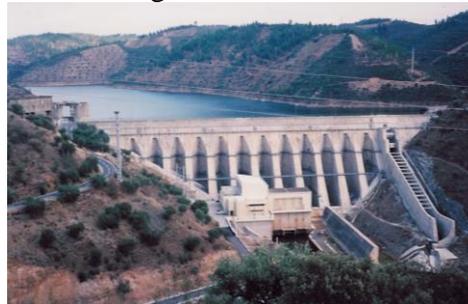
O controlo da segurança de uma barragem inicia-se na fase de planificação, em que a escolha do local a construir é um fator determinante. Numa determinada linha de água, deve dar-se preferência a locais cujo vale tem a forma de garganta apertada, aberto a montante (Ramos, 2004).

O tipo de barragem a construir (Figura 2.3), para além de depender do fim a que se destina, depende também da forma do vale. O modo mais simples de definir a forma de um vale na perspetiva de local de construção de uma barragem é através da sua relação corda/altura (c/a) à cota do coroamento dessa barragem (Thomas, 1979), em que para relações inferiores a 4 ou 5 é apropriada a construção de uma barragem em abóboda, e para relações superiores será mais adequada uma solução em gravidade ou arco-gravidade. No entanto o tipo de rocha ou solo é condicionante nestas decisões. No caso de o vale ser muito largo e com possíveis misturas de rocha de boa e má qualidade é adotada uma solução de contrafortes. Soluções em aterro são adotadas em vales muito largos onde a rocha de fundação é de má qualidade.

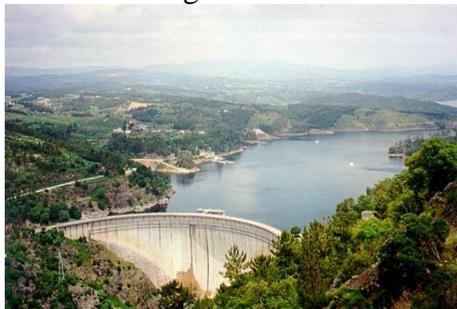
Barragem de gravidade



Barragem de contrafortes



Barragem abóboda



Barragem de abóbodas múltiplas



Figura 2.3 – Barragens de betão. Tipos estruturais. (CNPGB, 1992).

Segundo o RSB, o controlo de segurança das barragens, promovido e fiscalizado pela Autoridade Nacional de Segurança de Barragens com a intervenção do LNEC e a colaboração da ANPC e da CSB (Comissão de Segurança de Barragens), é exercido desde a fase de projeto e por toda a vida

das obras: fase de projeto, fase de construção, fase de primeiro enchimento da albufeira e fase de exploração. Quanto ao controlo da segurança, o presente regulamento impõe regras ao nível estrutural, hidráulico-operacional e ambiental.

Em termos estruturais, é necessário garantir que o sistema barragem-fundação suporta as ações de serviço a que está sujeito: peso próprio, pressão hidrostática, variações térmicas, ações sísmicas, reações expansivas do betão, etc.

Em termos hidráulico-operacionais, é necessário garantir a capacidade adequada dos órgãos de descarga, como é o caso dos descarregadores de cheias, descargas de fundo e tomadas de água.

O bom funcionamento destes órgãos é controlado através de inspeções, de modo a garantir a adequada qualidade e capacidade de resposta dos mesmos.

Quanto à segurança ambiental, há que ter em conta que é possível adotar medidas com vista à diminuição dos impactes ambientais que as barragens, principalmente as grandes barragens, provocam no ambiente. É possível, por exemplo, construir escadas/elevadores de peixes, usar turbinas “*fish-friendly*”, controlar a qualidade da água, etc.

Nas próximas subsecções será abordada e analisada a utilidade dos SIG no apoio ao controlo da segurança das barragens, referindo como os SIG podem incluir informação útil para os técnicos responsáveis pela segurança destas obras e como esta informação fica facilmente acessível.

2.3.1 SIG e controlo da segurança estrutural

A preocupação referente ao controlo da segurança estrutural de uma barragem não diz respeito apenas à fase de exploração. Desde a fase de escolha do tipo de barragem a construir que a componente estrutural está subjacente.

Desta forma, do ponto de vista da segurança estrutural, entendeu-se que seria útil incluir informação na plataforma SIG, relativa aos seguintes aspetos:

1. Tipo de material utilizado na construção (ex.: betão, aterro, alvenaria, enrocamento);
2. Tipo estrutural (ex.: contrafortes, abóboda, gravidade);
3. Características geométricas (ex.: altura, comprimento de coroamento, relação corda/altura, espessura, volume da barragem);
4. Propriedades dos materiais (ex.: deformabilidade e resistência);
5. Tipo de rocha na fundação (ex.: xistos, rocha, granitos);
6. Tratamentos na fundação (ex.: cortinas de impermeabilização, injeções);
7. Resultados de estudos em modelo numérico ou modelo físico (ex.: deslocamentos, campos de tensões calculados (Figura 2.4));

8. Desenhos de projeto;
9. Sistemas de observação instalados;
10. Resultados de inspeções visuais;
11. Resultados de observações de grandezas que caracterizam as ações (ex.: evolução do nível da água);
12. Observação de grandezas que caracterizam a resposta estrutural (ex.: histórias de deslocamentos ao longo do tempo (Figura 2.5), tensões/extensões observadas entre épocas).

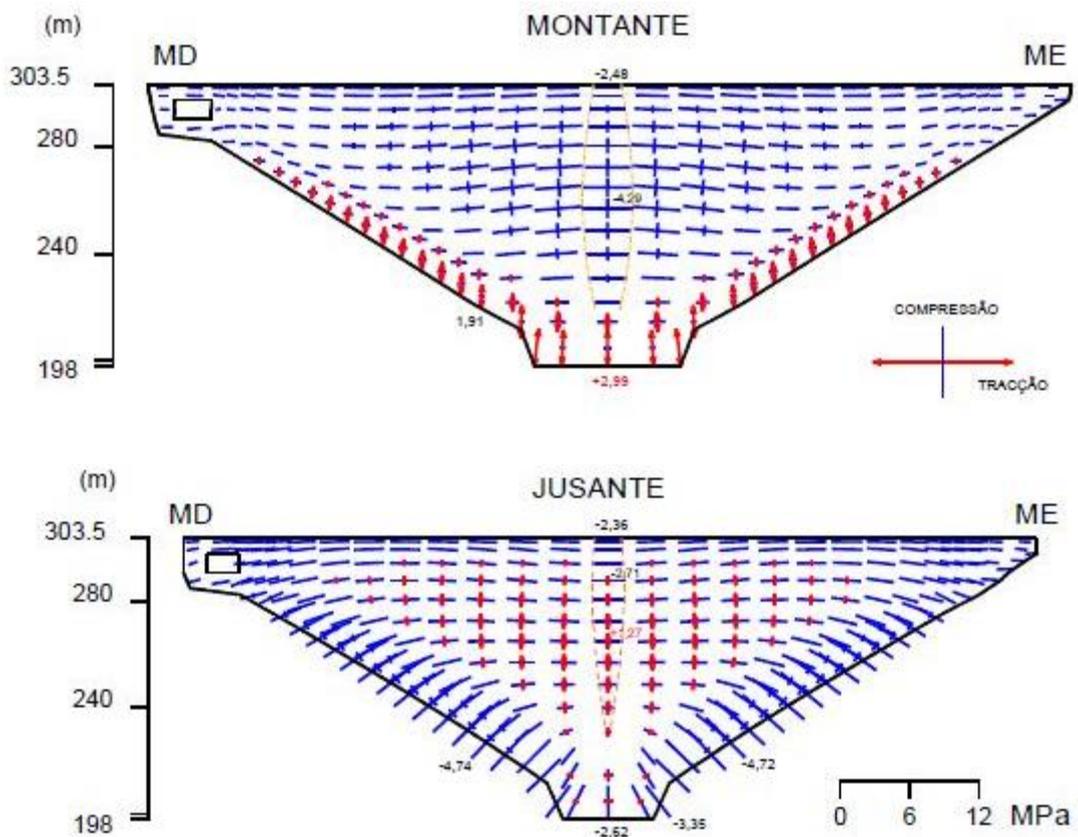


Figura 2.4 - Tensões Principais nos Paramentos da Barragem (ação: pressão hidrostática). Resultados de modelos numéricos (Oliveira, 2006).

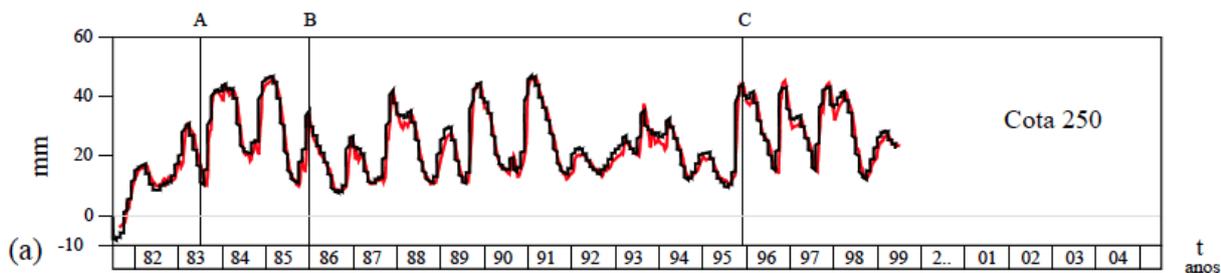


Figura 2.5 - História de deslocamentos à cota 250 na barragem do Cabril (Oliveira, 2006).

Na elaboração do plano de observação resultante do controlo de segurança estrutural da barragem, é fundamental a definição dos sistemas de instrumentação que ao longo da vida da obra permitirão a medição das variáveis representativas das ações, das propriedades estruturais e das respostas estruturais, designadas por variáveis de controlo (Pedro, 1978).

No controlo de segurança de barragens é conveniente ter em conta a evolução de diversas grandezas para caracterização das ações, das propriedades dos materiais e da resposta estrutural:

- Ações: Peso próprio, variações de temperatura, pressões hidrostáticas, sismicidade;
- Propriedades dos materiais: módulo de elasticidade, parâmetros viscoelásticos, resistência à compressão e à tração;
- Respostas estruturais: deslocamentos, movimentos de juntas, tensões, deformações, fendas, subpressões na fundação, caudais drenados, etc.

Nos sistemas de observação de barragens utilizam-se diversos tipos de equipamentos, como os que se apresentam na seguinte tabela:

Tabela 2-1 - Grandezas medidas no comportamento das grandes barragens e respectivos aparelhos.

Grandeza	Aparelhos
Deslocamentos Horizontais	Fios-de-prumo/Métodos geodésicos
Deslocamentos Verticais	Extensómetros na fundação/Nivelamentos
Movimentos relativos de juntas	Bases de alongâmetro
Caudais	Drenos e bicas
Subpressões	Piezómetros
Extensões e tensões	Extensómetros e tensómetros
Nível na albufeira	Escala de Níveis/Limnímetro/Limnígrafo
Temperatura	Temperatura ambiente e no betão
Ações sísmicas	Sismógrafos
Deformabilidade do betão	Células de fluência
Variação do Volume do Betão	Extensómetros corretores

Os aparelhos apresentados fazem parte do sistema de observação das barragens, permitem a aquisição automática de valores através de programas informáticos, e deste modo reduzem a leitura manual dos mesmos, permitindo assim obter valores mais fiáveis ao controlo da segurança, sendo no entanto importante efetuar uma correta interpretação dos mesmos.

De seguida é representado um esquema do posicionamento dos aparelhos de observação na barragem:

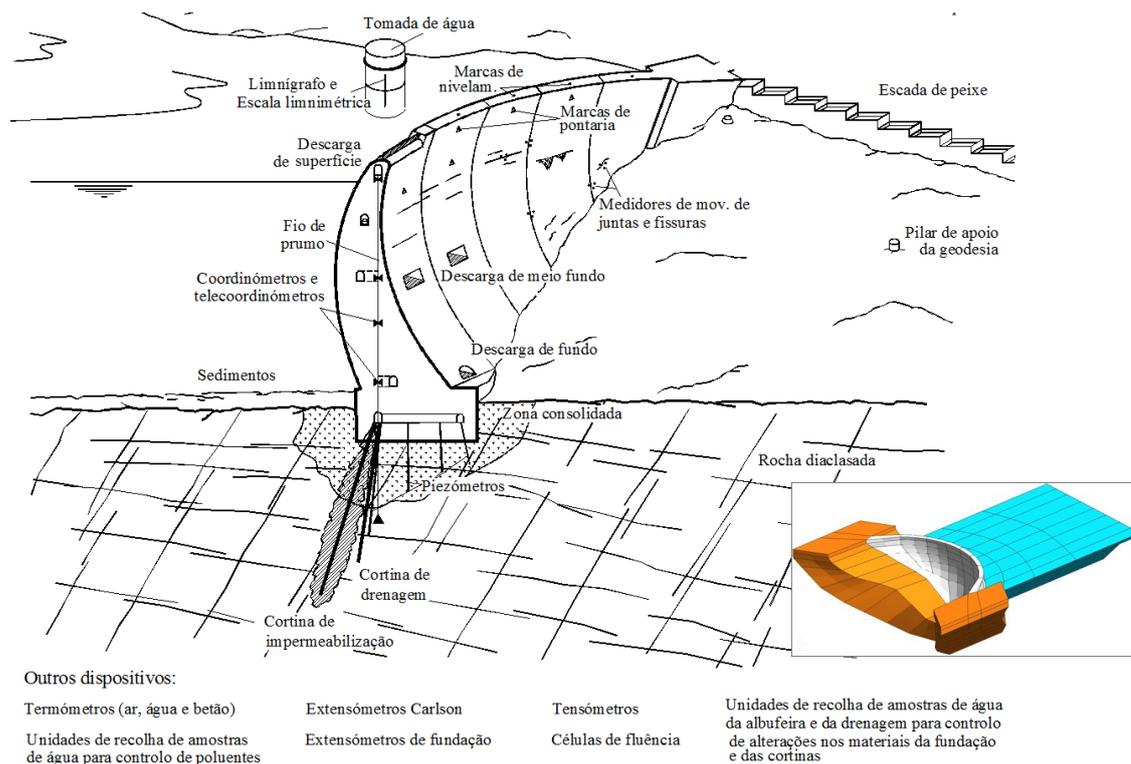


Figura 2.6 - Equipamentos de observação para controlo de barragens [adaptado de (Oliveira, 2006)].

De modo a analisar as variáveis e as grandezas envolvidas no controlo de segurança das barragens, são por vezes utilizados modelos matemáticos. Estes modelos permitem interpretar os resultados obtidos referentes à observação do comportamento estrutural.

A plataforma SIG possibilita, por exemplo, a visualização 2D ou 3D dos aparelhos de observação instalados na barragem. Pode igualmente conter informação sobre os modelos matemáticos existentes e sobre eventuais problemas de expansão do betão.

No caso da barragem do Cabril, será efetuada uma análise detalhada com apresentação de histórias de deslocamentos observados ao longo de vários anos.

2.3.2 SIG e Controlo de segurança hidráulico-operacional

Segundo o 35º Artigo do Regulamento de Segurança de Barragens, “o controlo da segurança hidráulica é efetuado através da aplicação das Normas de Exploração de Barragens (NEB), bem como por verificação e eventual revisão dos critérios de projeto, nomeadamente em relação aos órgãos de segurança e exploração e aos sistemas de impermeabilização, de filtragem e de drenagem.”

O mesmo artigo refere ainda, que o controlo de segurança operacional é feito por aplicação das normas de exploração relativas:

- à operação dos equipamentos;
- medidas de manutenção;
- a medidas de conservação, quando se revelem necessárias.

O controlo da segurança hidráulico-operacional das grandes barragens visa essencialmente prevenir a deterioração dos equipamentos de descarga ou a sua insuficiente capacidade de vazão, de modo a não ocorrerem problemas na fundação, tais como subpressões, deslizamentos, assentamentos, erosões, etc.

Os órgãos a verificar no âmbito da segurança hidráulico-operacional, são essencialmente:

1. Descarregadores de cheias;
2. Descargas de fundo;
3. Tomadas de água.

Os descarregadores de cheias (Figura 2.10), têm como objetivo essencial a prevenção de galgamentos. Os sistemas de drenagem existentes na fundação da estrutura, permitem aliviar subpressões sendo importante analisar periodicamente o funcionamento destes dispositivos na fase de exploração. Quanto às descargas de fundo (Figura 2.7 e Figura 2.8), envolvem equipamentos hidromecânico que permitem efetuar esvaziamentos quando necessário e o controlo da acumulação de sedimentos a montante. No que se refere às tomadas de água, são equipamentos que têm como objetivo a recolha da água (Figura 2.9), sendo importante garantir o seu bom funcionamento, de modo a evitar fenómenos como a formação de vórtices e acumulação de material flutuante.



Figura 2.7 - Descarga de meio fundo - barragem de Cahora-Bassa (Gamesby, 2013).



Figura 2.8 - Descarga de fundo - barragem do Alto Lindoso (Rui, 2010).



Figura 2.9 - Tomada de água (Suisted, 1995).



Figura 2.10 - Descarregador de cheia (Lencastre, 2010).

A plataforma SIG terá como objetivo permitir identificar os tipos de dispositivos hidráulico-operacionais que se encontram instalados em cada barragem, assim como as suas características.

2.3.3 SIG e controlo de segurança ambiental

As grandes barragens oferecem muitos benefícios à sociedade mas também envolvem impactos negativos no meio ambiente (Dams, 2000). As consequências ambientais provocadas pelas grandes barragens são numerosas, quer a nível biológico, químico e físico dos rios e das suas margens, contudo é possível minimizar estes impactos.

Na plataforma SIG desenvolvida pode ser facilmente disponibilizada informação referente aos meios utilizados na minimização dos impactos negativos provocados pelas barragens, tais como dispositivos de auxílio às espécies migratórias, sistemas de monitorização, entre outros.

Como exemplo de alguns destes impactos, podem-se referir o bloqueio da migração de peixes, a acumulação de sedimentos e as alterações do habitat de animais e plantas. Outro significativo impacto ambiental é a transformação, a montante da barragem, de um rio com um fluxo livre em um lago artificial, que provoca alterações a nível de temperatura, composição química, qualidade do ar, entre outros.

No entanto, apesar de se verificar uma série de impactos negativos, por vezes também ocorrem impactos positivos, como é o caso da barragem da Aguieira (Figura 2.11), onde se verificou que a população de lontras aumentou após a construção da barragem.



Figura 2.11 – Barragem da Aguieira (CNPGB, 1992).

As barragens mais recentes têm sido sujeitas a processos de controlo de segurança ambiental mais exigentes, como foi o caso da conhecida barragem das Três Gargantas, situada na China, que é uma das maiores barragens do mundo, com 39,3 km³ de volume de água, o que equivale a 39 bilhões de kg. Especialistas da NASA chegaram à conclusão que ao elevar esta quantidade de água alterou o momento de inércia da Terra e consequentemente originou a perda de velocidade de rotação do planeta, o que apesar de não ser perceptível para o Homem, levou a que o dia ficasse 0,06 microssegundos mais longo, devido a essa elevação de massa.

De modo a controlar os impactos ambientais têm vindo a ser implementados sistemas de monitorização com o objetivo de analisar os prós e os contras, a nível ambiental, da construção de grandes barragens. Com o avanço da tecnologia tem vindo a ser possível recolher informação quer a nível temporal, quer a nível espacial, das alterações ambientais que ocorrem nos rios. No entanto, este tipo de tecnologia requer custos elevados comparativamente aos benefícios atingidos.

A longo prazo, o objetivo será utilizar informação obtida através de satélites, que permita detetar alterações na vegetação, topografia e batimetria dos canais remotamente. A nível de controlo das espécies, têm sido elaborados modelos e estruturas que permitem acompanhar a migração, como

por exemplo, escadas, elevadores de peixe, eclusas, defletores, fendas verticais, passagens de enguias, “*bypass channel*” e turbinas “*fish-friendly*”.

As escadas de peixe são estruturas que permitem a deslocação dos peixes de jusante para montante (Figura 2.12), através de pequenos degraus intercalando pequenas bacias, que possibilitam os peixes de nadar ou saltar entre elas. No caso dos elevadores, é utilizado um compartimento para onde são atraídos os peixes, que depois são elevados através de um equipamento mecânico, de jusante para montante. As eclusas forçam a subida dos peixes de jusante para montante, através da elevação do nível da água no interior de uma conduta.



Figura 2.12 - Escada de peixes da barragem da Caniçada (Santo, 2005).

Os defletores e as fendas verticais têm como objetivo a redução da velocidade de escoamento, são geralmente utilizados quando as espécies migratórias são de maior porte. As passagens para enguias diferem das passagens para as outras espécies de peixes, devido à sua fraca capacidade de se movimentarem, geralmente é colocada uma superfície com uma certa rugosidade para facilitar a sua migração. Os “*bypass channel*” requerem outro tipo de estrutura, pois são passagens que contornam as barragens, nem sempre são possíveis de fazer devido a falta de espaço para construção, no entanto caso o haja, podem ser executados após a conclusão da barragem. Quanto às turbinas “*fish-friendly*”, permitem uma passagem segura dos peixes devido ao movimento mais lento das lâminas e do característico posicionamento das mesmas (Figura 2.13). A escolha do equipamento a utilizar geralmente depende da espécie de peixe que se encontra em cada rio (Santo, 2005).

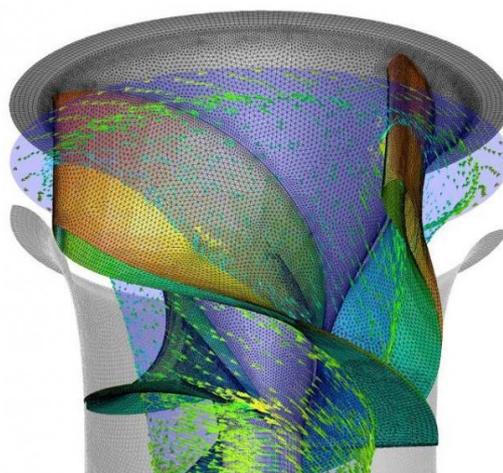


Figura 2.13 - Turbina "fish-friendly" (Dham, 2011).

Na plataforma SIG, será possível verificar quais as barragens que se encontram dotadas deste tipo de equipamentos e se os mesmos se encontram em funcionamento.

2.4 Considerações finais

Neste capítulo fez-se referência à importância que as barragens têm para a sociedade e o país, mencionando os principais fins a que se destinam, os vários tipos de materiais utilizados e os diversos tipos estruturais existentes. De seguida, de modo a mostrar a potencialidade dos sistemas SIG no apoio ao controlo da segurança das barragens, foi mostrada a interligação que está presente entre os SIG e a internet, de forma a facilitar a acessibilidade e a partilha de informações.

Por fim, descrevem-se os vários meios utilizados no controlo da segurança das barragens, segurança estrutural, hidráulico-operacional e ambiental e as vantagens que estão associadas à utilização de uma plataforma SIG e sua gestão.

Atualmente, com as crescentes preocupações em termos de segurança das barragens, tem aumentado o interesse no desenvolvimento de tecnologias que facilitem o acesso rápido e fiável à informação acerca dos meios utilizados para a observação e análise destas obras. Os sistemas SIG podem ser a resposta para esse grande desafio e facilitar o acesso a esse tipo de informação, de uma forma simples e rápida, permitindo a organização e gestão da mesma de variadas formas, de acordo com os objetivos e do tipo de análise que o utilizador deseja efetuar.

3

Controlo de segurança das barragens portuguesas. Implementação em SIG

3.1 Considerações iniciais

A necessidade de aceder a determinada informação de uma forma rápida, intuitiva e dinâmica é cada vez mais essencial no dia-a-dia, desta forma, ao criar um modelo de informação geográfico é determinante ter em atenção a indispensabilidade de o mesmo acompanhar as necessidades dos utilizadores.

Como será possível verificar no decorrer deste capítulo, para a organização em ambiente SIG da informação acerca das grandes barragens portuguesas, foi adotada uma estratégia de preparação dos dados de forma a tornar os mesmos acessíveis através de consultas das bases de dados (*queries*), ou seja, de uma forma mais organizada. Para tal, foi previamente utilizado o Microsoft Excel em conjunto com o ArcGIS, mais propriamente o ArcMap e o ArcCatalog, que permitem a gestão e visualização de toda a informação.

Neste capítulo serão ainda realçados alguns aspetos importantes na forma de manuseamento dos programas utilizados, que por sua vez será útil ao utilizador, como é o caso da importação de dados e da formatação dos aspetos de visualização.

3.2 Breve introdução ao ArcGIS

O ArcGIS constitui-se como um sistema de informação abrangente que permite a recolha, organização, gestão, análise e a distribuição da informação geográfica (ESRI, 1994). Este sistema, criado pela ESRI, é utilizado globalmente, na criação, manipulação e utilização de informação geográfica que fica acessível através de vários dispositivos (computador, *smartphone*, *tablet/PDAs*).

O sistema ArcGIS possui diversos módulos, dos quais foram usados os seguintes: ArcMap, ArcCatalog, ArcToolBox, ArcScene e ArcGlobe. O *software* ArcMap é utilizado para visualização e manipulação através de operações de análise espacial (2D), e o módulo ArcScene permite operações de visualização e manipulação da informação geográfica em ambiente plano 3D. Em relação ao módulo ArcCatalog, é utilizado para a gestão dos dados, assim como para a criação de novas bases de dados. Por outro lado, o ArcToolBox reúne grande parte das ferramentas e operações disponíveis de análise e manipulação, para os diferentes tipos de dados. O ArcGlobe funciona essencialmente como uma ferramenta de visualização e integração de outros tipos de informação em globo 3D.

O ArcGIS, sendo uma das ferramentas computacionais mais comum, utilizadas no âmbito dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permite efetuar a organização da informação por camadas (*layers*) onde diferem as propriedades espaciais representadas e que são dispostas de acordo com o objetivo da análise do utilizador.

Existem vários tipos de estruturas de dados, como por exemplo, as camadas vetoriais (*vector layers*), que podem representar diferentes classes, como pontos, linhas ou polígonos, e são escolhidos de acordo com a natureza da informação real a representar. Outro tipo corresponde às camadas matriciais (*raster*), que são representadas através de imagens constituídas por células (*pixéis*), em que a cada célula está associado um único valor numérico (que pode representar uma característica física, como por exemplo: altitude, localização, entre outros).

A cada *layer* pode estar associada uma tabela de atributos (*attribute table*), onde se encontra a informação alfanumérica relativa à categoria da *layer*, (e.g. concelho da barragem, volume da barragem, etc.).

Para uma organização mais compacta e gestão mais eficiente dos diferentes tipos de dados, o ArcGIS disponibiliza vários formatos de bases de dados, dos quais foi adotado o formato *Geodatabase*, que consiste numa base de dados geográfica que permite a integração de todos os

tipos de informação (alfanumérica e geográfica) e utiliza a seguinte hierarquia de organização de ficheiros (Figura 3.1):

- *Personal Geodatabase*
 - *Feature Dataset*
 - *Feature Class*

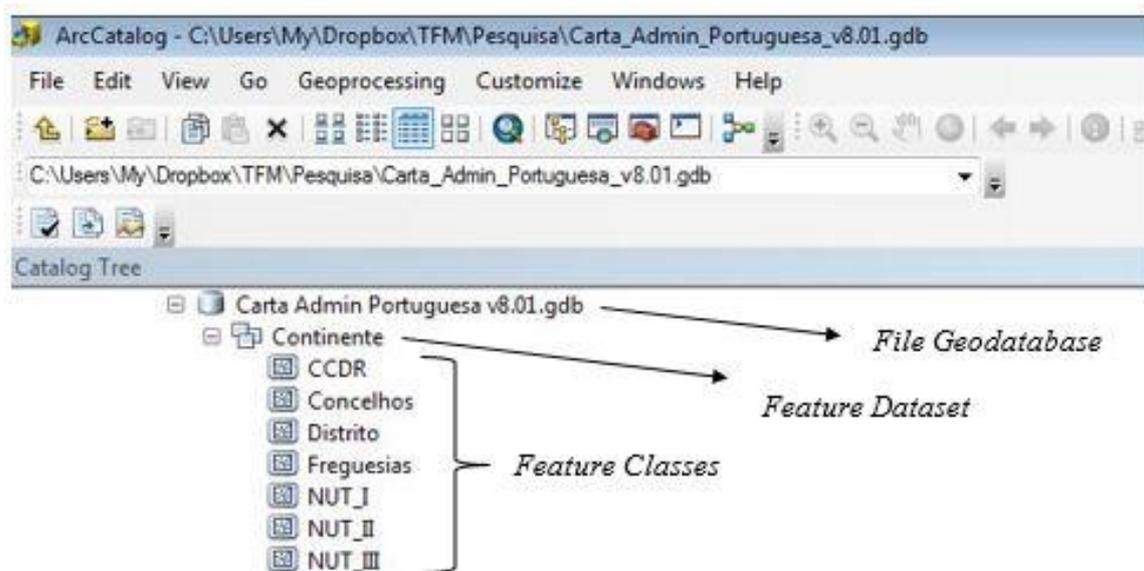


Figura 3.1 - Exemplo hierarquia ArcGis.

A *Feature Dataset* tem como objetivo agrupar diversos temas comuns (*feature classes*) que estejam relacionados e que partilhem o mesmo sistema de coordenadas e a mesma relação espacial. Quanto às *Feature Classes*, correspondem ao agrupamento em classes (leia-se tabelas) de entidades afins (registos), possuindo informação com as mesmas características (a mesma estrutura) e com a mesma representação espacial, como pontos, linhas ou polígonos, e com os mesmos atributos, como é o caso das barragens, que são representadas por pontos, e têm as mesmas colunas de atributos. Como já vimos, as *Feature Classes* podem ser de diferentes tipos, sendo os mais utilizados os pontos, linhas, polígonos e anotações.

Existem dois tipos base de *Geodatabase*⁴: *personal* e *file*. O que distingue a *File Geodatabase* da *Personal Geodatabase* é a forma e tipo de armazenamento. A *File Geodatabase* armazena a informação no computador como uma pasta de ficheiros binários codificados, tendo a limitação

⁴ Adicionalmente é possível fazer a conexão para bases de dados relacionais, multiutilizador e versionáveis, como as bases de dados SQL Server ou Oracle. A abordagem e integração destas estruturas de dados complexas sai fora do âmbito da presente dissertação.

de 1 TB de capacidade de armazenamento. É independente do sistema operativo utilizado, permitindo uma maior versatilidade, independência e capacidade de processamento. Quanto à *Personal Geodatabase*, o seu volume de armazenamento encontra-se limitado a 2Gb de informação, e é armazenada como um ficheiro do *Microsoft Access* (.mdb), estando desta forma dependente de tecnologia *Microsoft*.

3.3 Recolha e organização dos dados

A pesquisa de informação relativa à elaboração dos modelos em ArcGIS divide-se em 2 fases. Na primeira fase o objetivo foi a elaboração de uma plataforma 2D das Grandes Barragens Portuguesas e teve como base a publicação efetuada pela Comissão Nacional Portuguesa de Grandes Barragens (CNPGB), intitulada “Large Dams in Portugal”, onde se obtiveram os dados sobre as grandes barragens que à data estavam inseridas no Registo Mundial de Barragens (CNPGB, 1992). Esta publicação foi divulgada em 1992, em livro, e mais tarde no *site* da CNPGB. Como já foi referido anteriormente, a pesquisa efetuada restringiu-se às barragens com mais de 15 metros de altura, contados a partir da fundação e/ou com albufeiras com mais de 1 hm³ (1 milhão de m³) de capacidade total de armazenamento.

Na segunda fase da pesquisa de informação, o objetivo foi o desenvolvimento de um modelo SIG em 3D da barragem do Cabril, considerando o conjunto barragem-albufeira. Nesta fase procedeu-se à criação do modelo 3D da barragem, desenvolvendo também a zona da albufeira.

3.3.1 Modelação da informação 2D

A informação recolhida para o desenvolvimento da plataforma 2D iniciou-se com a introdução das características de cada barragem, tendo as mesmas de serem adaptadas para inclusão no modelo a desenvolver em ArcGIS. Por exemplo, os dados sobre a localização da barragem foram inicialmente recolhidos em coordenadas geográficas WGS84 (latitude e longitude), através dos sistemas da Google, e posteriormente convertidos em coordenadas retangulares (M e P) do sistema português, ETRS 1989 Portugal TM06, de forma a que fossem conjugáveis com os dados recolhidos anteriormente. Uma vez que os dados foram previamente trabalhados em Excel, foi utilizado um conversor de sistemas de coordenadas francês The World Coordinate Converter, disponível *online* no site twcc.free.fr e ainda um conversor disponibilizado pelo Instituto Geográfico Português (IGP) denominado Transcoord Pro.

Outro tipo de informação relativa à localização foi identificada ainda nesta primeira fase, como é o caso do distrito, o concelho, a bacia hidrográfica e a linha de água de cada barragem (Tabela 3-1).

Tabela 3-1 - Extrato da recolha de dados referente à localização das barragens.

Barragem	Localização				Coordenadas Geográficas		Coordenadas Retangulares	
	Distrito	Concelho	Bacia Hidrográfica	Linha de Água	Latitude	Longitude	X	Y
AGUIEIRA	Coimbra	Penacova	Mondego	Rio Mondego	40° 20' 24.72"	-8° 11' 48.44"	-5410.85	74610.8
ALQUEVA	Beja	Moura	Guadiana	Ria Guadiana	38° 11' 50.09"	-7° 29' 46.38"	55789.87	-163111.39
CABRIL	Castelo Branco	Sertã	Tejo	Rio Zêzere	39° 55' 4.38"	-8° 7' 55.77"	81.22	27716.03
PÓVOA	Portalegre	Castelo de Vide	Tejo	Ribeira de Nisa	39° 28' 38.09"	-7° 33' 12.32"	49877.2	-21046.86

Como características específicas da barragem, é possível introduzir dados sobre o tipo de utilização para a qual foi projetada, sobre qual o tipo de material da barragem, se é de aterro, betão, alvenaria ou mista e sobre o tipo estrutural (arco, gravidade, abóboda, etc.). Outras das informações também recolhidas foi o valor da altura da barragem acima da fundação e do terreno natural. (Tabela 3-2).

Tabela 3-2 - Exemplo de informações sobre algumas barragens.

Barragem	Utilização	Tipo	Alt. acima da fundação (m)	Alt. acima do terreno natural (m)
AGUIEIRA	Energia / Defesa contra cheias / Abastecimento / Rega	Betão - Arcos Múltiplos	89	-
ALQUEVA	Reserva / Rega / Abastecimento / Energia	Betão - Abóboda de dupla curvatura	96	-
CABRIL	Energia	Betão - Abóboda de dupla curvatura	132	-
PÓVOA	Energia	Betão - Gravidade	32	28.5

Introduziu-se também informação sobre o comprimento, espessura e cota do coroamento, volume da barragem e tipo de fundação (Tabela 3-3).

Tabela 3-3 - Exemplo das características de algumas barragens.

Barragem	Fundação	Volume da Barragem (x1000 m ³)	Cota de coroamento (m)	Comprimento de Coroamento (m)	Largura de coroamento (m)
AGUIEIRA	Xistos e Grauvaques	365	125	400	-
ALQUEVA	Rocha	687	154	458	7
CABRIL	Granitos	360	297	290	-
PÓVOA	Granitos	32	313.5	400	-

Quanto às características hidrológicas consideraram-se a área da bacia hidrográfica, a precipitação média anual, o caudal de cheia, o caudal integral médio anual e o período de retorno da cheia máxima de projeto (Tabela 3-4).

Tabela 3-4 - Características hidrológicas de algumas barragens.

Barragem	Área da Bacia Hidrográfica (Km ²)	Precipitação Média Anual (mm)	Caudal de Cheia (m ³ /s)	Caudal Integral Médio Anual (x1000 m ³ /s)	Período de Retorno (anos)
AGUIEIRA	3100	-	3500	-	1000
ALQUEVA	55000	-	12000	2851000	1000
CABRIL	2340	1300	4000	1577000	1000
PÓVOA	-	-	250	-	-

Concluída a primeira fase da recolha e tratamento de dados, efetuou-se uma recolha de informação a nível da segurança estrutural, hidráulico-operacional e ambiental.

Relativamente à segurança estrutural das barragens em estudo, foi recolhida informação acerca dos modelos matemáticos utilizados no controlo da segurança e acerca da ocorrência de problemas de deterioração (associados, p.ex. a expansões). Em particular, no caso da barragem do Cabril, foi recolhida informação a nível estrutural, tais como desenhos do sistema de observação, com a localização dos equipamentos utilizados para monitorização e desenhos com o levantamento da fissuração e histórias de deslocamentos. Os desenhos foram inseridos sob a forma de hiperligação, ou seja, o utilizador é encaminhado para um *site* onde os pode visualizar (Tabela 3-5).

A escolha da barragem do Cabril para o desenvolvimento destes últimos pontos resulta do facto de ser a barragem considerada no modelo SIG 3D, por ser uma das primeiras grandes barragens portuguesas, construída em 1953, e por ser a de maior altura (132 m).

Tabela 3-5 - Informações relativas ao controlo da segurança estrutural das barragens.

Barragem	Modelos Matemáticos	Expansões	Desenhos	Desenhos de Observação em Alçado	Desenhos de Observação em Planta e Perfil	Fissuração	Expansão do Betão	Deslocamentos
AGUIEIRA	Sim	Sim	-	-	-	-	-	-
ALQUEVA	Sim	-	-	-	-	-	-	-
CABRIL	Sim	Sim	Link 1	Link 2	Link 3	Link 4	Link 5	Link 6
PICOTE	Sim	Sim	-	-	-	-	-	-
PÓVOA	Sim	-	-	-	-	-	-	-

No que se refere à segurança hidráulico-operacional das barragens é possível ver se a barragem é dotada de descarregadores de fundo (Tabela 3-6) e descarregadores de cheia (Tabela 3-7), assim

como as características de cada um e no caso de a sua utilização ser para fins energéticos, o tipo de central elétrica e as suas características (Tabela 3-8).

Tabela 3-6 - Informação relativa a descarregadores de fundo.

Barragem	Localização	Tipo	Secção da Conduta	Caudal Máximo (m ³ /s)	Controlo a Montante	Controlo a Jusante	Dissipação de Energia
AGUIEIRA	Talvegue	Através da barragem	2,50 x 1,80m	180	-	Sim	-
ALQUEVA	Incorporada na galeria de derivação provisória	-	d 3,00 m	160	-	-	Trampolim
CABRIL	Talvegue	Através da barragem	3,00 m	200	-	Válvula dispersora	Jato oco e fossas de erosão
PÓVOA	Talvegue	Através da barragem	-	-	Comporta	Jato oco	Jato oco e fossas de erosão

Tabela 3-7 - Informação relativa a descarregadores de cheias.

Barragem	Localização	Tipo de Controlo	Tipo de Descarregador	Cota da crista de soleira (m)	Desenvolvimento da soleira (m)	Comportas	Caudal máximo descarregado (m ³ /s)	Dissipação de Energia
AGUIEIRA	No corpo da barragem	Controlado	Sobre a barragem	111	2 x 9,5 = 19	-	2080	Trampolim
ALQUEVA	2 no corpo da barragem e encontros	Controlado	Soleira tipo Wes c/ canal a jusante	139	2 x 19 = 38	-	6300	Trampolim
CABRIL	Em ambas as margens	Controlado	Poço vertical ou inclinado	278	-	2	2200	Jato e fossas de erosão
PÓVOA	Margem esquerda	Sem controlo	Canal de encosta	309,85	-	-	110	-

Tabela 3-8 - Informação relativa a centrais hidroelétricas

Barragem	Tipo de Central	Nº de grupos instalados	Tipo de Grupos	Potencia total instalada (MW)	Energia produzida em ano médio (GWh)
AGUIEIRA	Pé de barragem	3	Francis-Turbinas Bombas	270	209,6
ALQUEVA	Pé de barragem c/ bombagem	2	Reversíveis Turbo/Francis	240	269
CABRIL	Pé de barragem	2	Eixo Vertical	97	301
PÓVOA	Céu aberto	2	Francis	0,74	1,6

Quanto à segurança ambiental, como já foi referido, um dos maiores problemas é garantir a projeção das espécies. Deste modo foi recolhida informação acerca das barragens dotadas de sistemas de transposição para peixes e se o mesmo se encontra em funcionamento (Tabela 3-9).

Tabela 3-9 - Exemplos de informação recolhida relativa a controlo de segurança ambiental.

Barragem	Controlo de Espécies	Funcionamento
ALTO CÁVADO	Escadas de Peixes	Sim
BELVER	Eclusa	Sim
COIMBRA	Escadas de Peixes	Sim
TOUVEDO	Elevador de Peixes	Sim

Todos os dados foram inicialmente tratados no Microsoft Excel, e posteriormente importados para o ArcGIS.

3.3.2 Modelação da informação 3D

Relativamente à construção da plataforma 3D em torno da barragem do Cabril, foi necessária a utilização de programas externos ao sistema ArcGIS, como o Google Sketchup e o AutoCAD e só posteriormente se procedeu à instalação e utilização dos modelos de dados no ArcScene (e também no ArcMap em 2D), que como já foi referido é um *software* disponível no sistema ArcGIS para o desenvolvimento de plataformas planas 3D⁵.

Para o desenvolvimento desta plataforma foi efetuado um levantamento topográfico da zona envolvente da barragem, assim como um modelo 3D do corpo da própria barragem, através da utilização de uma malha de elementos finitos.

A pesquisa associada ao desenvolvimento desta plataforma, restringiu-se à utilização das ferramentas da Google, para determinar coordenadas geográficas de pontos determinantes envolventes à barragem e aspetos relacionados com o relevo, através de comparações entre determinadas cotas e a conhecida cota de coroamento da barragem.

3.4 Desenvolvimento das plataformas

Na presente secção pretende-se mostrar como foram desenvolvidas as plataformas, referindo a abordagem feita com os vários tipos de *software* utilizados.

⁵ O ArcGlobe é equivalente ao ArcMap, mas a visualização 3D é efetuada num modelo de globo terrestre, enquanto no ArcScene a visualização 3D é efetuada em coordenadas planas.

3.4.1 Plataforma 2D

De modo a manter a informação estruturada e organizada, foi criada uma base de dados *File Geodatabase*, através do *software* ArcCatalog (Figura 3.2).

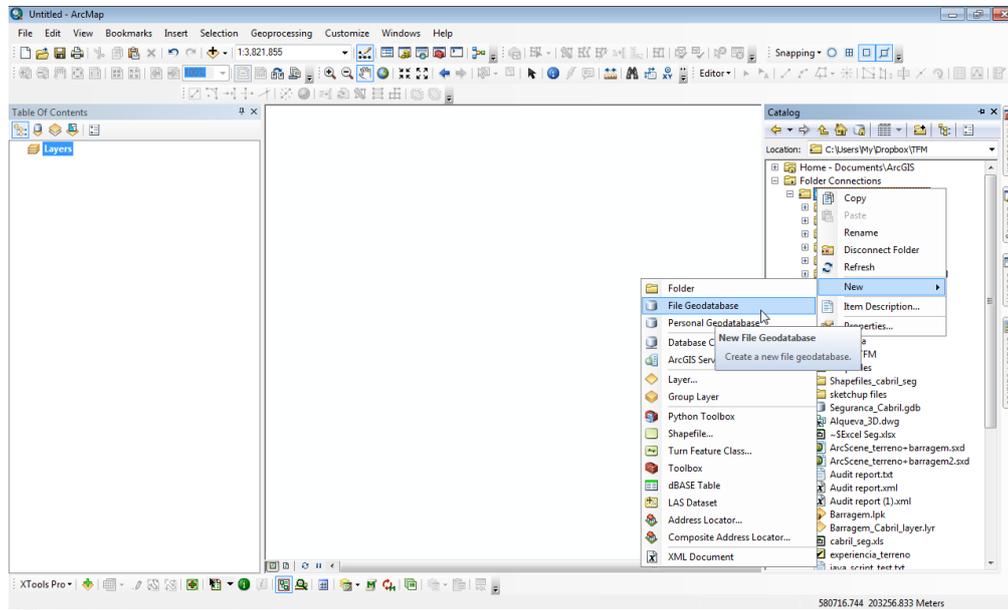


Figura 3.2 - Criação da *File Geodatabase*.

Após a organização dos dados no Excel, estes foram importados para o ArcMap. Nomeadamente as coordenadas retangulares, que representam a localização de cada barragem, com base no referido sistema de coordenadas Português, ETRS 1989 Portugal TM06 (Figura 3.3), juntamente com toda informação geral já referida na subsecção 3.3.1 do presente trabalho.

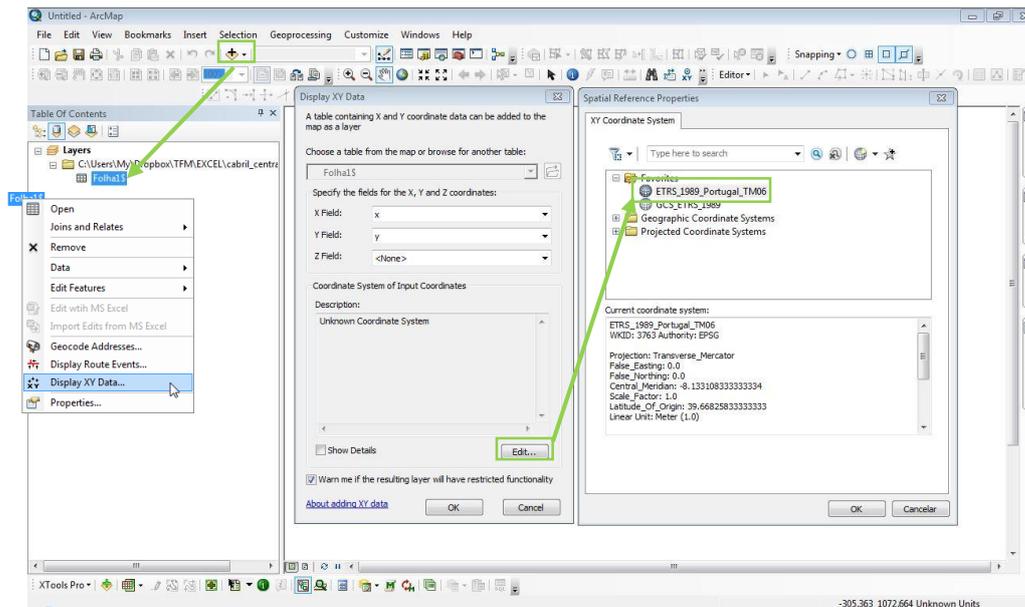


Figura 3.3 - Adicionar e georreferenciar informação no ArcMap.

Uma vez georreferenciada a informação, efetuou-se a exportação do conteúdo do ficheiro Excel para *shapefile*, criando-se assim um ficheiro do sistema ArcGIS, que pode ser manipulado, como se ilustra na Figura 3.4. A *shapefile* com os elementos representativos das Grandes Barragens, é exibida por pontos (Figura 3.4).

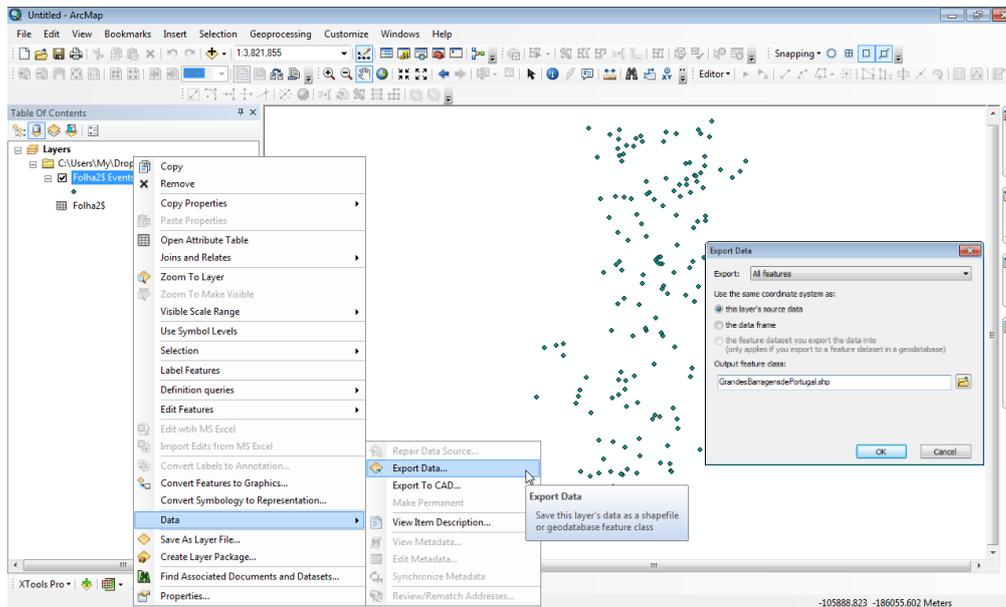


Figura 3.4 – Exportação de dados para o sistema ArcGis.

Com a informação convertida em formato *shapefile* já é possível visualizar os atributos importados de cada barragem, quer através de tabela, quer através de pedido de informação num dado ponto.

Para obter uma mais correta visualização dos atributos é necessário configurar os seus *aliás*⁶ nas propriedades da *shapefile* (Figura 3.5). O procedimento para a importação da restante informação seguiu os passos anteriores.

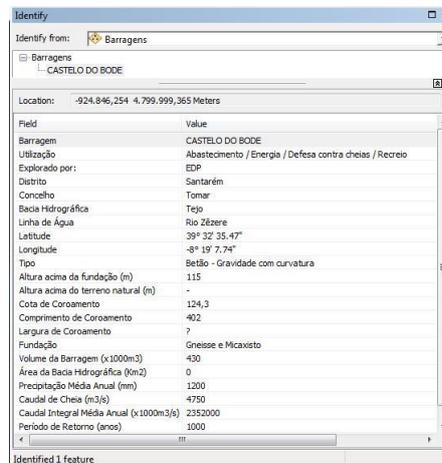


Figura 3.5 – Janela de visualização referente à informação introduzida da barragem de Castelo do Bode.

De modo a obter uma melhor visualização das *shapefiles* importadas é necessário adicionar um mapa base (Figura 3.6).

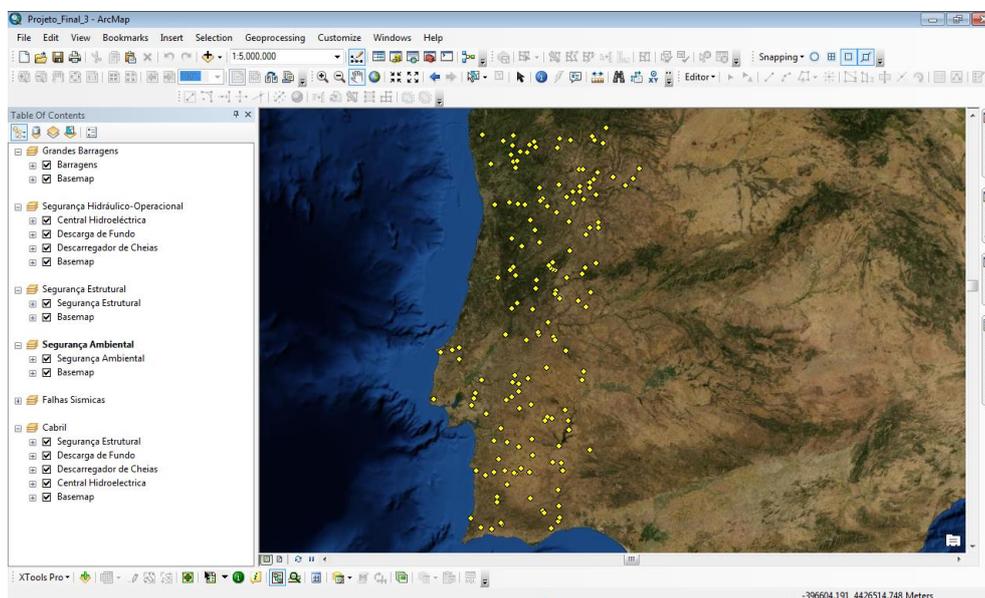


Figura 3.6 - Visualização das *shapefiles* com mapa base.

⁶ O termo *alias* utiliza-se em informática, nas bases de dados para designar os nomes fictícios que são atribuídos aos campos das bases de dados e que servem unicamente para visualização dos mesmos. Os *alias* são uma forma de contornar as regras rigorosas de identificação das bases de dados, que por exemplo, não permitem a utilização de caracteres especiais, o que já não acontece com os primeiros.

Concluída a criação de todas as *shapefiles*, procedeu-se à criação das bases de dados *File Geodatabase*. Para tal foi utilizado o *software* ArcCatalog. As *File Geodatabases* foram criadas com o intuito de facilitar a organização dos conteúdos importados inicialmente para as *shapefiles*, tendo para tal sido adotada a estrutura de dados ilustrada na Figura 3.7.

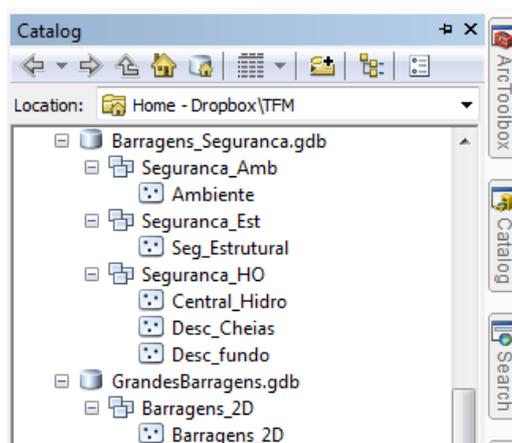


Figura 3.7 - *File Geodatabase* - organização das novas *feature classes*.

Outra vantagem na criação de *File Geodatabases* é o facto de facilitar o envio e partilha do trabalho realizado para outros utilizadores.

3.4.2 Plataforma 3D

Para o desenvolvimento da Plataforma 3D foram utilizados dois módulos do sistema ArcGIS: o ArcMap e o ArcScene, dando mais ênfase ao ArcScene, uma vez que é o *software* que permite o desenvolvimento de modelos em 3D. No entanto o AutoCAD e o Google Sketchup foram também indispensáveis para a criação inicial das estruturas de dados que serão geridas a partir desta plataforma. Como já tinha sido referido, a plataforma 3D foi apenas criada para a barragem do Cabril.

Os trabalhos iniciaram-se com a elaboração de um levantamento topográfico do terreno de um modo virtual, utilizando o Google Sketchup em conjunto com o AutoCAD, para extração das curvas de nível. No Google Sketchup é inserido o terreno adjacente à barragem do Cabril, a ser tratado em 3D (Figura 3.8), através das ferramentas *Add Imagery* e *Toogle Terrain* que estão disponíveis neste *software*.

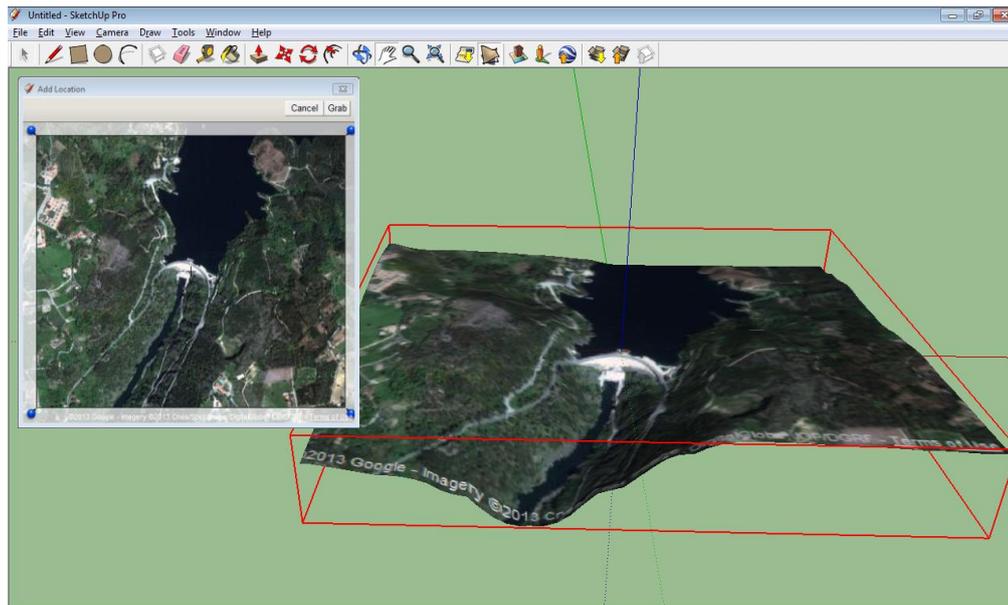


Figura 3.8 - Importação do terreno adjacente à barragem do Cabril.

De seguida são feitas camadas retangulares espaçadas de 2 em 2 metros (distância escolhida para as curvas de nível deste modelo), de modo a intercalar com o terreno importado e deste modo obter as curvas de nível, conseguindo como resultado final o apresentado na Figura 3.9.

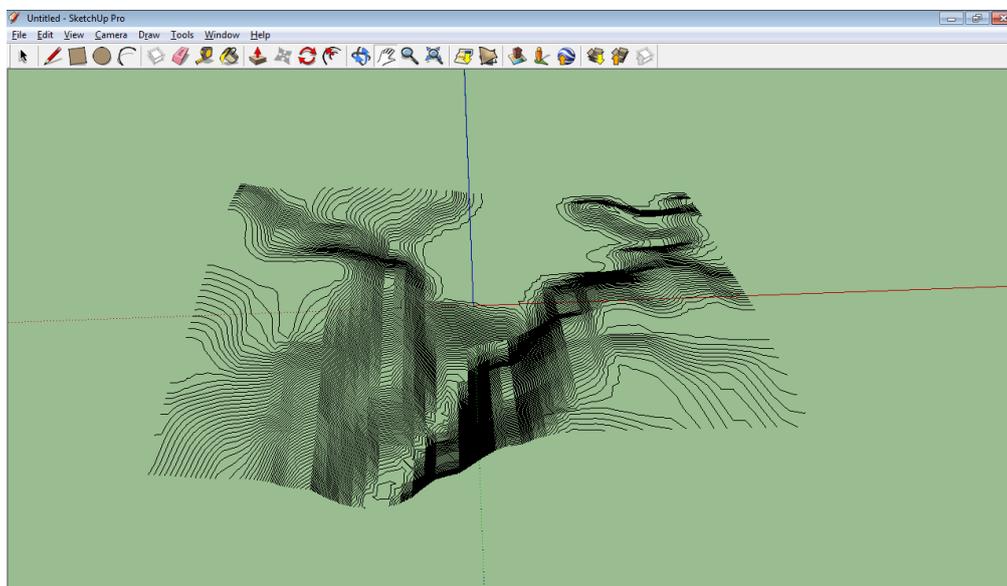


Figura 3.9 - Curvas de nível do terreno adjacente à barragem do Cabril.

Através de pontos de observação, cujas cotas são conhecidas, foi feita uma análise às curvas de nível obtidas onde foram encontradas algumas discrepâncias, sendo desta forma necessário

proceder a uma correção das mesmas. Para tal foi utilizado o AutoCAD (Figura 3.10) que permitiu ainda gravar as curvas de nível num formato executável no ArcMap.

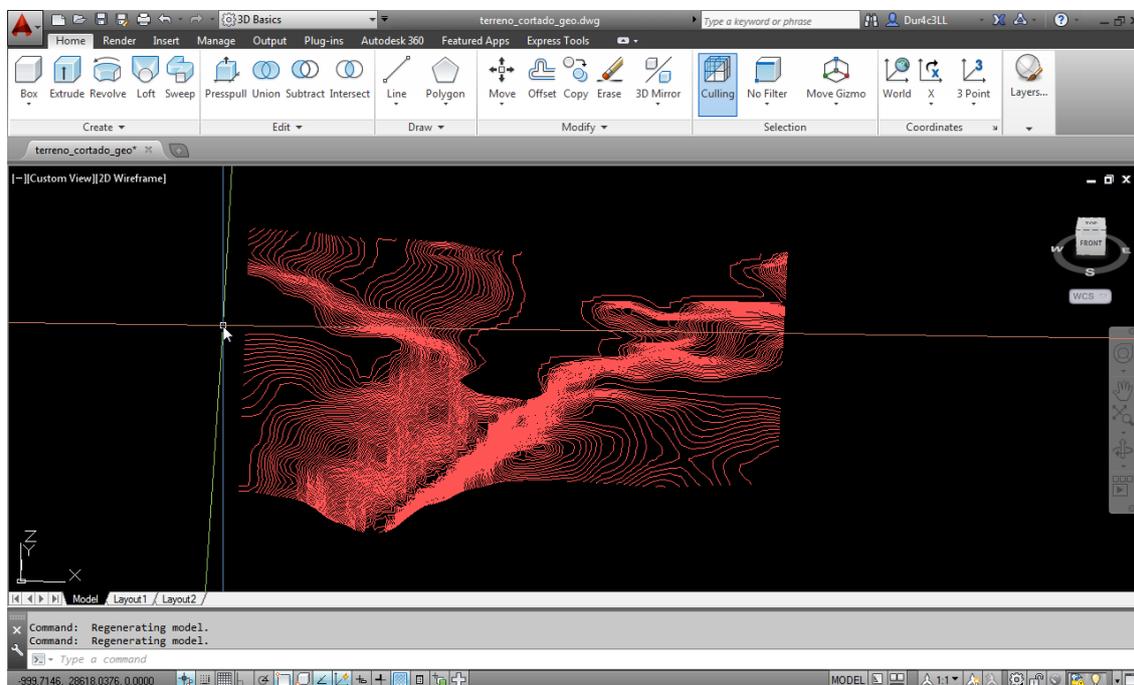


Figura 3.10 - Tratamento de dados no AutoCAD.

Ao importar o ficheiro dwg (formato AutoCAD) para o ArcMap, são criados cinco grupos que representam as várias geometrias do ArcMap que já foram referidas, no entanto a única a ser trabalhada nesta fase são as *polylines*, que representam as curvas de nível (Figura 3.11).

O ArcMap apenas permite trabalhar a informação em 2D, ou seja, as cotas de cada curva de nível apenas estão visíveis em tabela (Figura 3.11).

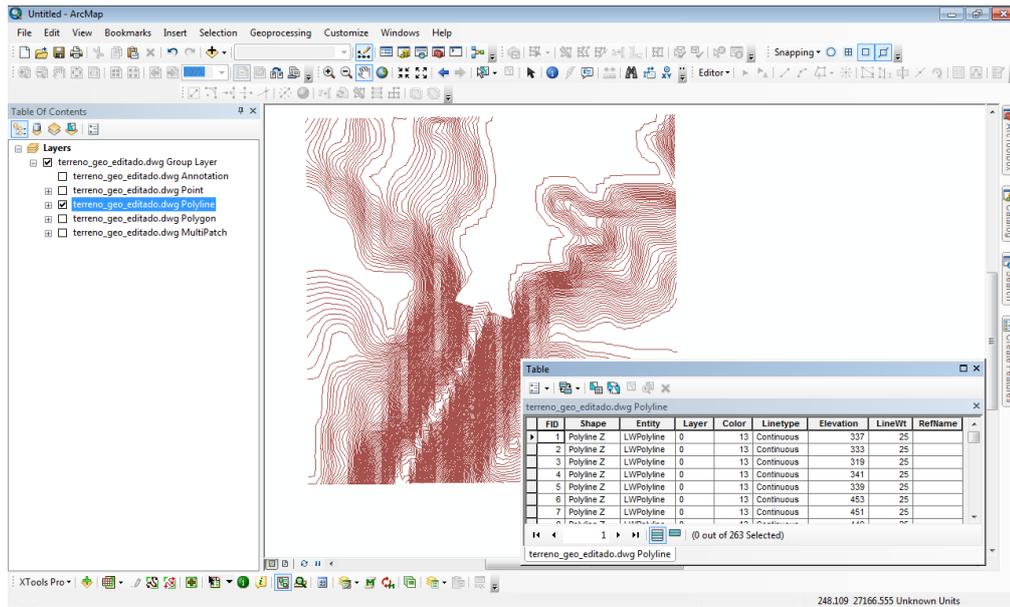


Figura 3.11 - Curvas de nível no ArcMap.

De modo a passar ao formato 3D é necessário utilizar o ArcScene. O modelo é exportado de dwg (formato AutoCAD) para *shapefile* (formato ArcMap), como já se mostrou na secção 3.4.1 do presente trabalho. De seguida procedeu-se à criação do TIN (formato lido pelo ArcScene). O formato TIN⁷ permite representar a morfologia do terreno e baseia-se no modelo de triangulação das cotas conhecidas, sendo utilizado quando é requerida elevada precisão para descrever um determinado espaço. É fundamental nas aplicações à engenharia pois permite o cálculo de áreas e volumes.

Para a criação do formato TIN é necessário recorrer ao módulo ArcToolbox (ArcToolbox > 3D Analyst Tool > Data Management > TIN > Create TIN) (Figura 3.12). O ArcToolbox é uma ferramenta de geoprocessamento que permite a análise e a gestão dos dados geográficos. Para a criação do TIN é necessário especificar um *input* e um *output*, ou seja, a *shapefile* a ser convertida, o caminho onde será guardado o TIN, e ainda o sistema de coordenadas que será utilizado, que continua a ser o ETRS 1989 Portugal TM06 (Figura 3.12).

⁷ TIN - Triangular irregular network.

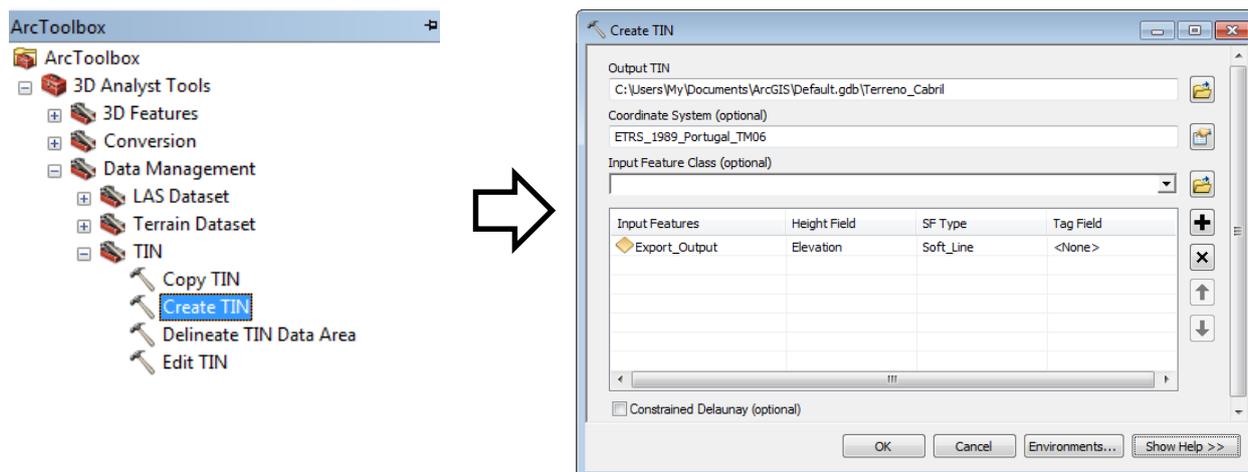


Figura 3.12 - Criação do TIN do terreno da barragem do Cabril.

É de referir que o processo de criação do TIN é demorado, principalmente quando se trata de um modelo com discretização apertada. Criada a malha TIN, é importada para o ArcScene para que seja possível visualizar o terreno em 3D (Figura 3.13).

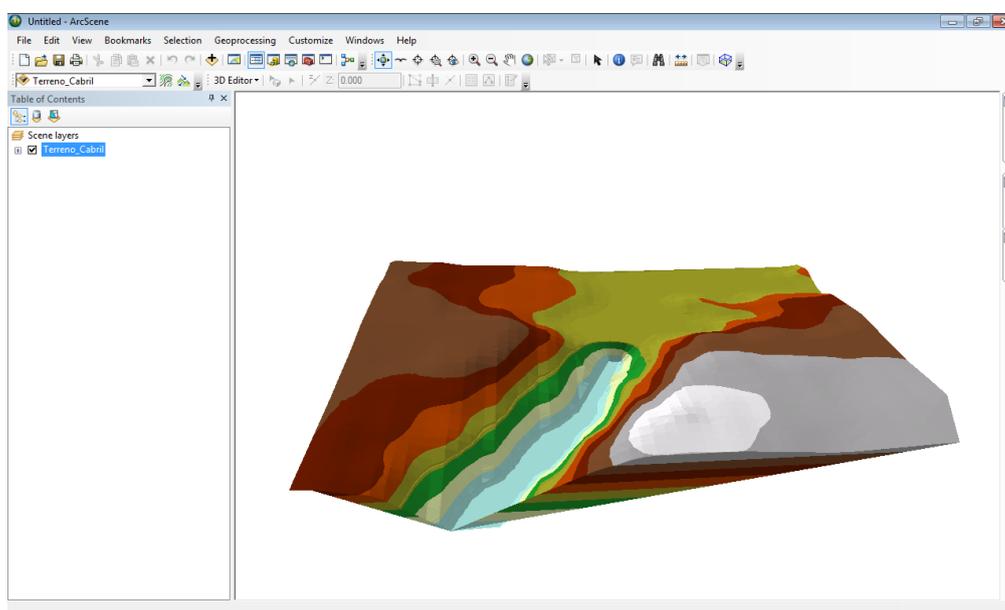


Figura 3.13 - Terreno da barragem do Cabril.

Concluído o modelo do terreno, procedeu-se à importação do modelo barragem propriamente dito, para tal, foi utilizado um modelo de elementos finitos, previamente fornecido pelo LNEC, em formato AutoCAD (Figura 3.14).

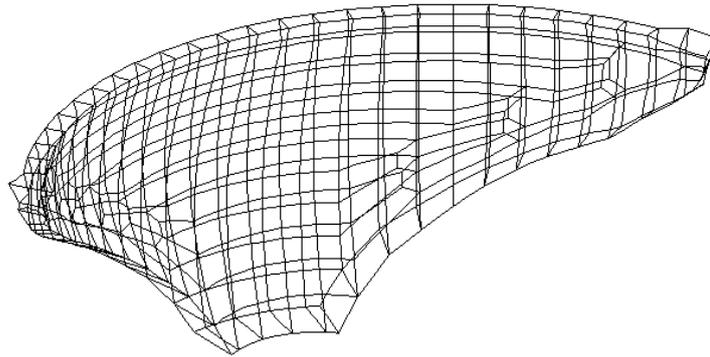


Figura 3.14 - Malha de elementos finitos da barragem do Cabril.

De modo a poder importar para o ArcScene foi necessário recorrer novamente ao Google SketchUp. Através deste *software* foi possível converter o ficheiro dwg em formato *collada* (.dae) e deste modo importar para o ArcScene (Figura 3.15).

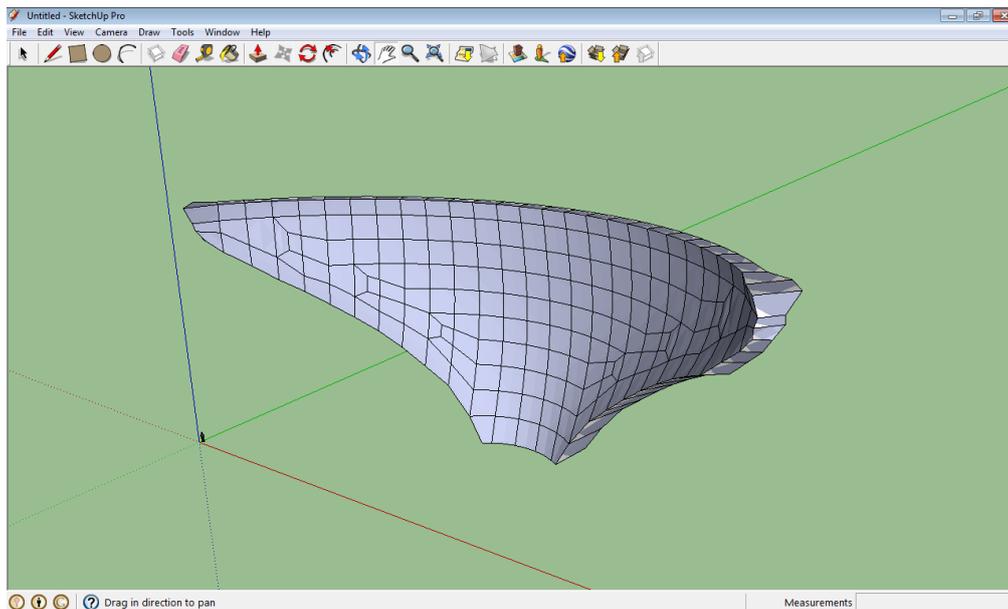


Figura 3.15 - Barragem do Cabril - Google SketchUp

De seguida importou-se o modelo da barragem para o ArcScene (Figura 3.16) recorrendo novamente ao ArcToolbox (ArcToolbox > 3D Analyst Tools > Conversion > From File > Import 3D Files).

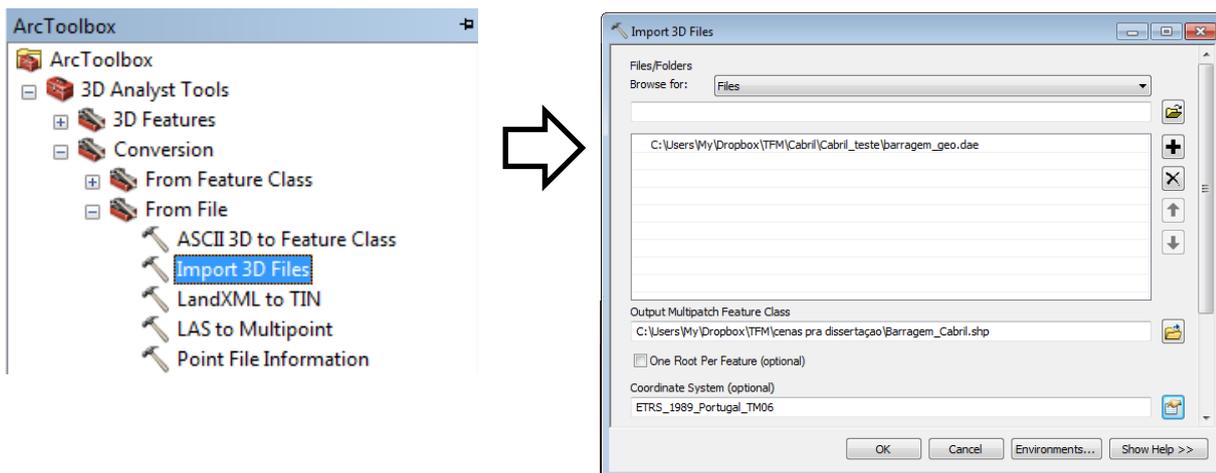


Figura 3.16 - Importação da barragem do Cabril para o ArcScene

Importado o modelo da barragem para sobrepôr no modelo 3D do terreno, obtém-se o modelo do conjunto que se encontra representado na Figura 3.17.

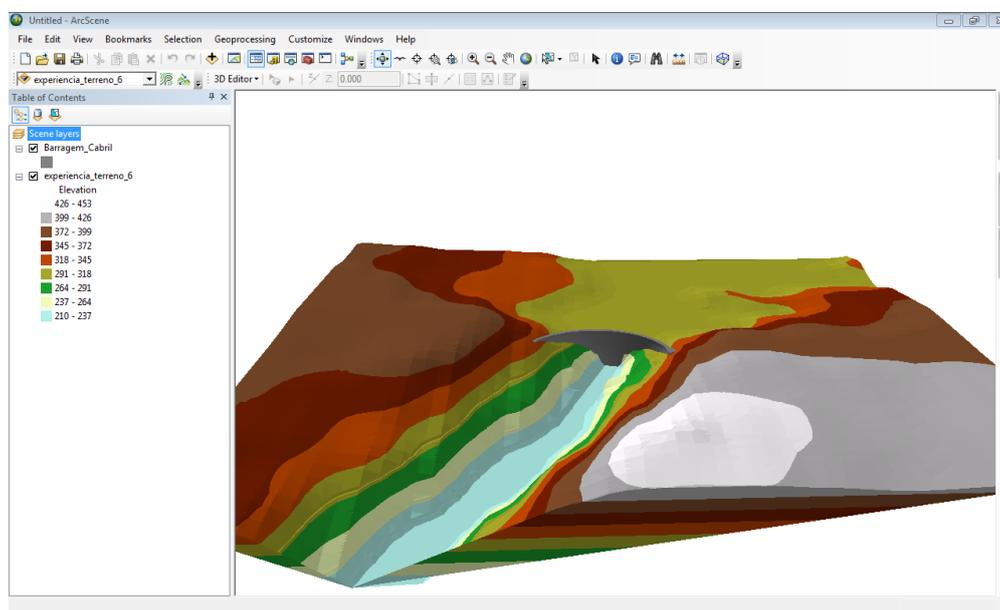


Figura 3.17 - Modelo 3D da barragem do Cabril.

3.5 Desenvolvimento da aplicação Web

A criação da aplicação *web* visa permitir a acessibilidade da plataforma 2D a qualquer utilizador, através de um *browser*. A solução utilizada foi a criação de um serviço web através do ArcGIS Online, um servidor que permite hospedar mapas e modelos construídos com base nas soluções ESRI, como é o caso do presente trabalho. Desta forma foi possível publicar a plataforma 2D e esta ficar acessível a qualquer utilizador da internet. O endereço atual da plataforma 2D pode ser encontrado através do motor de busca do site do ArcGIS online (www.arcgis.com/home) pesquisando por “Grandes Barragens Portuguesas” .

Sendo assim procedeu-se à criação de um mapa em ArcGIS Online, construído através da importação das *shapefiles* criadas no ponto 3.4.1 do presente trabalho (Figura 3.18).

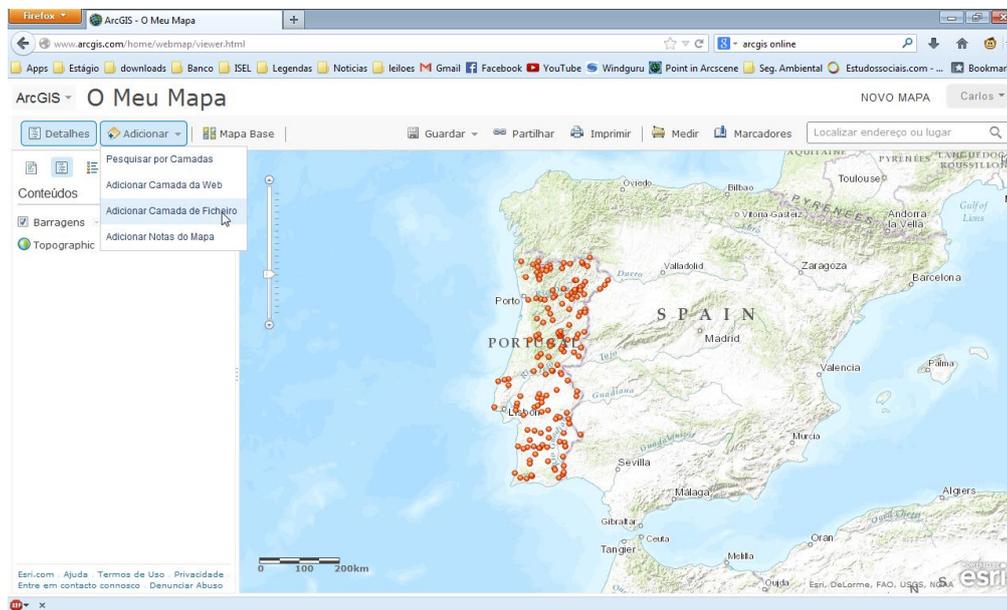


Figura 3.18 - Criação do mapa para posterior criação da aplicação *web*.

Desta forma procedeu-se à criação da aplicação *web* (Figura 3.19) e posterior configuração, incluindo a descrição do mapa em questão, de modo a ser perceptível a qualquer utilizador. A criação da aplicação *web* é feita através da ferramenta de partilha que está incluída no *site*.



Figura 3.19 - Criação da aplicação web.

Criada a aplicação *web*, procedeu-se à configuração dos detalhes, nomeadamente no que se refere a aspetos de visualização, como a escolha dos símbolos e o seu tamanho, a escolha do mapa de fundo. Para a aplicação em questão foi utilizado o mapa do tipo *Imagery* como abertura pois permite ao utilizador boas resoluções ao aproximar em cada barragem (Figura 3.20). No entanto é possível o próprio utilizador alterar o mapa de fundo ao visualizar a aplicação (Figura 3.21).

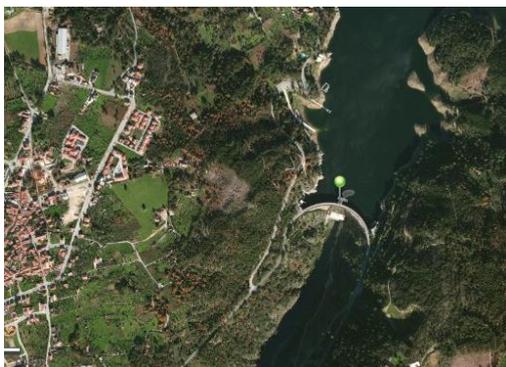


Figura 3.20 - Aproximação à barragem do Cabril na aplicação.

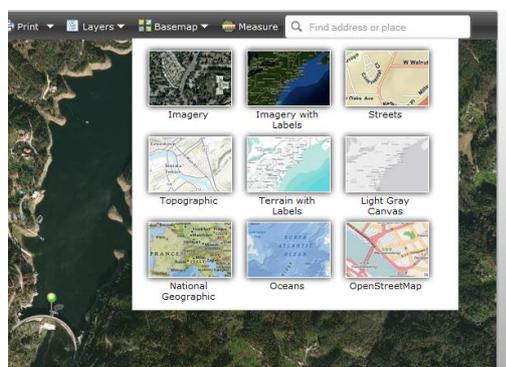


Figura 3.21 - Escolha do mapa a visualizar.

Um dos aspetos importantes na criação de um serviço é a sua descrição, deste modo ao abrir a aplicação, no lado esquerdo da mesma foi criado um separador descrevendo o âmbito do desenvolvimento da aplicação, os seus objetivos entre outros aspetos importantes (Figura 3.22). Neste mesmo separador encontra-se também a legenda referente ao mapa que se encontra na

aplicação. Outro aspeto importante é salientar as entidades envolvidas na criação da aplicação, deste modo foram colocados os logótipos do ISEL e do LNEC no canto inferior direito (Figura 3.23).

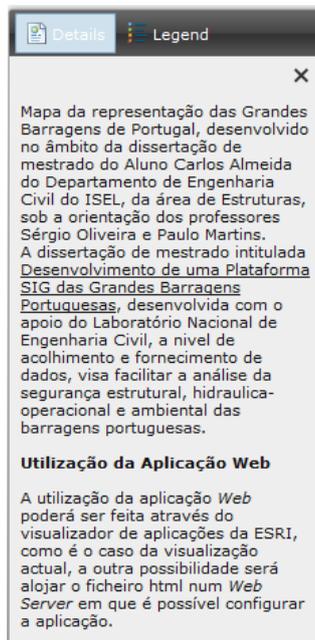


Figura 3.22 - Detalhes da aplicação.



Figura 3.23 - Logótipo do ISEL e do LNEC.

Concluídas as configurações iniciais, procedeu-se à configuração das janelas de atributos das barragens. Estas janelas permitem ao utilizador a visualização das características de cada barragem, assim como uma imagem da mesma (Figura 3.24).

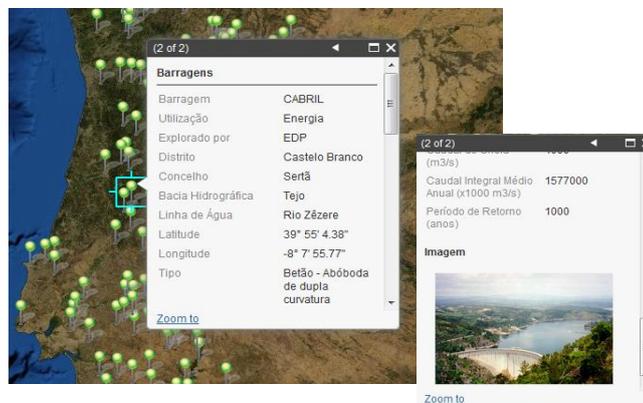


Figura 3.24 - Janela de características da barragem do Cabril.

Terminada a criação da aplicação *web* das Grandes Barragens Portuguesas, os utilizadores têm à sua disposição uma grande quantidade de informação sobre as mesmas, que é facilmente acedida, garantindo assim uma maior eficácia nas pesquisas efetuadas e no cruzamento de dados.

3.6 Considerações finais

Neste capítulo explicaram-se sumariamente as funcionalidades dos SIG e do ArcGIS. Apresentou-se uma breve explicação do sistema ArcGIS e das suas funções relevantes para o presente trabalho, com vista a permitir a compreensão de vários aspetos que irão surgir nos capítulos seguintes e a salientar as potencialidades da sua utilização.

Com vista à criação de duas plataformas SIG, uma em 2D e outra em 3D, foi proposto neste capítulo uma gestão da informação recolhida sobre as barragens portuguesas, de modo a atingir uma hierarquia que seja adaptável a qualquer utilizador, aquando da utilização das plataformas.

Os resultados obtidos com estas plataformas corresponderam ao pretendido. Obteve-se um mapa georreferenciado das grandes barragens portuguesas com os seus atributos associados, permitindo desta forma obter informações, quer da barragem em si, quer dos aspetos referentes ao controlo de segurança estrutural, ambiental e hidráulico-operacional. Quanto à plataforma 3D, possibilita ter uma noção do conjunto barragem-fundação-albufeira, para que no futuro seja possível delinear estratégias de colocação de instrumentos de monitorização do comportamento da obra, em prol de um melhor controlo de segurança.

4

Introdução de elementos sobre o controlo da segurança estrutural em plataformas SIG

4.1 Considerações Iniciais

Como já foi referido no decorrer do presente trabalho, as grandes barragens atualmente encontram-se dotadas de modernos sistemas de observação, muitos dos quais incluem já recolha automática de dados. No entanto, em prol de uma fiável e acessível análise destes dados é necessário o desenvolvimento de sistemas computacionais que permitam a utilização dos modelos de cálculo atualmente utilizados no controlo de segurança das grandes barragens, nomeadamente, modelos numéricos de elementos finitos e modelos de interpretação quantitativa de dados observados, também conhecidos por modelos estatísticos de separação de efeitos.

A evolução da utilização de modelos numéricos para análise do comportamento de barragens atingiu o seu auge na década de 60, com o aparecimento do Método dos Elementos Finitos (M.E.F.). Os modelos numéricos de EF são modelos que permitem simular o comportamento das obras para diversos tipos de solicitações e para diversas hipóteses de comportamento dos materiais com vista à realização de estudos de previsão de comportamento. Podem igualmente ser utilizados em estudos de interpretação do comportamento observado.

Na análise dos resultados de observação são também de grande utilidade os denominados modelos de separação de efeitos (ou modelos de interpretação quantitativa), os quais como o próprio nome indica, são adequados para estudos de interpretação (não são utilizados em estudos de previsão).

Atualmente o método dos elementos finitos permite modelar a fundação em elementos tridimensionais com juntas, simulando as descontinuidades, o que permite analisar o comportamento de barragens para cenários de rotura e prever situações de deterioração (dano). Neste capítulo apresentam-se os procedimentos de utilização dos modelos de cálculo para o controlo da segurança estrutural das grandes barragens. Estes permitem obter resultados numéricos da resposta às principais ações a que a barragem se encontra sujeita ao longo do tempo. Na plataforma SIG, para o caso da barragem do Cabril foram apresentados os resultados de modelos numéricos e os resultados observados após análise com modelos de separação de efeitos.

4.2 Utilização de modelos de interpretação do comportamento observado

A utilização de modelos de interpretação do comportamento observado das barragens é atualmente considerada uma ferramenta fundamental no controlo da segurança estrutural. Para a utilização destes modelos é feita uma calibração dos mesmos através de ensaios de materiais e/ou modelos físicos. Um dos fatores decisivos que marca a escolha dos métodos a utilizar nestas circunstâncias é o custo. Deste modo, os modelos numéricos garantem custos muito inferiores em comparação com a utilização de modelos físicos, e por sua vez permitem uma observação do comportamento da barragem na fase de exploração, vantajosa, pois permite analisar determinadas ações, como é o caso da fluência, tensões, expansões, subpressões, frequências próprias, variações térmicas, etc. A análise do comportamento das grandes barragens deve iniciar-se na fase de construção e ser acompanhada ao longo dos vários períodos de vida da obra.

Nesta secção será feita uma abordagem aos vários modelos existentes para interpretação do comportamento de barragens de betão, no entanto, é de salientar que atualmente os modelos mais utilizados são os modelos numéricos e modelos de interpretação quantitativa.

4.2.1 Modelos numéricos de Elementos Finitos

Na construção das primeiras grandes barragens, as verificações de segurança eram efetuadas com base em métodos de cálculo muito simplificados, como, por exemplo, o método dos arcos e das consolas. Como já foi referido, a década de 60, foi a década impulsionadora do desenvolvimento dos modelos numéricos computacionais, baseados sobretudo no Método dos Elementos Finitos (MEF). Trata-se de um método numérico para resolução de equações diferenciais com derivadas parciais, que permite analisar praticamente qualquer tipo de problema de mecânica estrutural.

A Mecânica Estrutural estabelece as equações diferenciais a que devem satisfazer os campos de deslocamentos, extensões e tensões que se instalam numa estrutura qualquer quando submetida a solicitações exteriores (Oliveira, 2006). Os diferentes campos são correlacionados por equações de equilíbrio entre forças e tensões, equações de compatibilidade entre deformações e deslocamentos e por equações constitutivas entre tensões e deformações, como se encontra esquematizado na Figura 4.1.

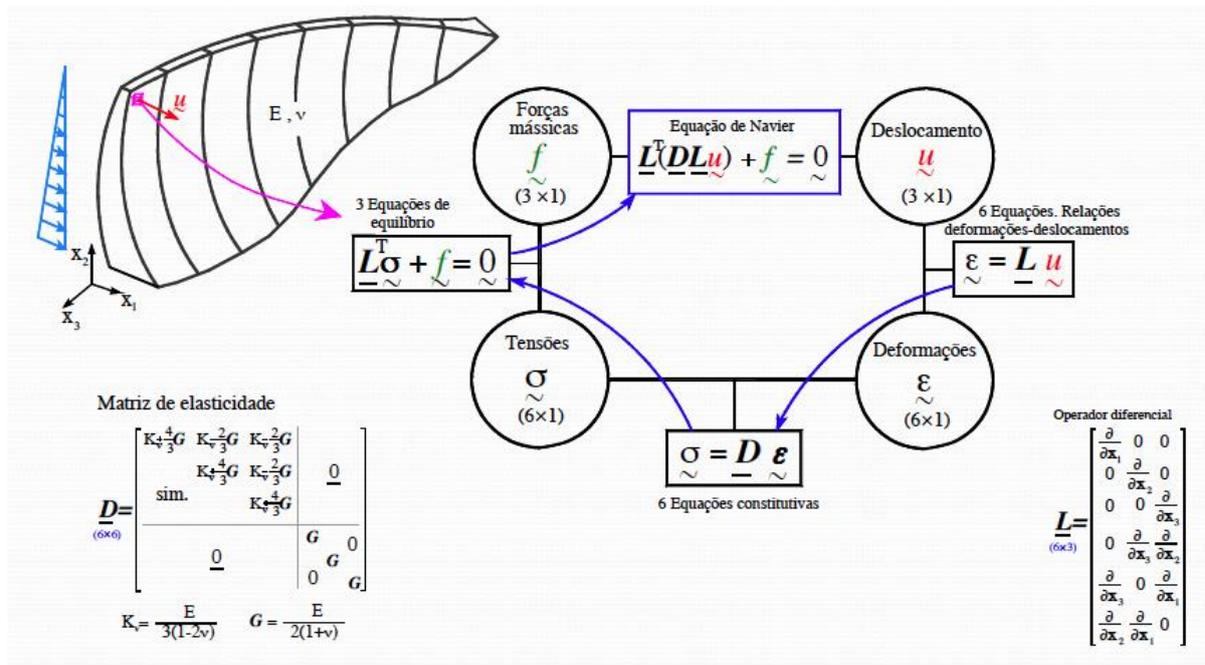


Figura 4.1 – Equações da Mecânica Estrutural (Oliveira, 2012).

No caso geral tridimensional, as equações da Mecânica Estrutural, constituem um sistema de 15 equações a 15 incógnitas que podem ser expressas apenas em termos de deslocamentos, reduzindo-se assim o problema a um sistema de 3 equações a 3 incógnitas (equações de Navier) (Pedro, 1975).

O Método dos Elementos Finitos, o mais utilizado na análise das barragens portuguesas, baseia-se na divisão da estrutura (por linhas ou superfícies imaginárias), num número discreto de elementos, denominados elementos finitos.

No caso das barragens, é geralmente considerada a formulação clássica em deslocamentos, baseada nas equações de Navier. Uma vez que são estruturas de elevadas dimensões, a aplicação deste tipo de formulação torna-se mais eficiente a nível computacional.

Na formulação clássica em deslocamentos, as principais incógnitas são os deslocamentos nos pontos nodais dos elementos finitos que dividem a estrutura. No caso 3D, a cada ponto nodal correspondem três graus de liberdade de translação. A aproximação fundamental do MEF consiste

em admitir que o vetor de deslocamento u_m ($m=1,2,3$) num ponto qualquer x_m ($m=1,2,3$) de um elemento finito pode ser obtido a partir dos deslocamentos dos pontos nodais $u_m^{e_i}$ através da seguinte equação que traduz o somatório em i (convenção da soma):

$$u_m = N_i \cdot u_m^{e_i} \quad (3.1)$$

Sendo N_i funções previamente definidas da posição do ponto no elemento e $u_m^{e_i}$ o vetor dos deslocamentos nos pontos nodais. As funções N_i ($i=1$ a x , em que x é o número de pontos nodais do elemento) são funções das coordenadas dos pontos, em geral coordenadas locais y_n que variam entre -1 e 1 . As funções de forma ou funções de interpolação, são geralmente polinómios escolhidos de maneira a que seja possível obter aproximadamente, através da equação anterior, os deslocamentos em cada ponto do elemento a partir do valor das coordenadas locais y_n do ponto. A função de interpolação associada ao nó i assume valor unitário nesse nó i e valor nulo nos restantes pontos nodais.

Na plataforma SIG 2D desenvolvida é possível colocar resultados de modelos numéricos de EF utilizados no projeto das barragens e depois, no controlo da segurança, durante a fase de exploração das obras.

4.2.2 Modelos de Interpretação Quantitativa

Após uma primeira análise qualitativa dos resultados das grandezas observadas no âmbito do controlo de segurança de barragens de betão em fase de exploração, podem surgir dificuldades de interpretação devido à sobreposição de efeitos (Figura 4.2).

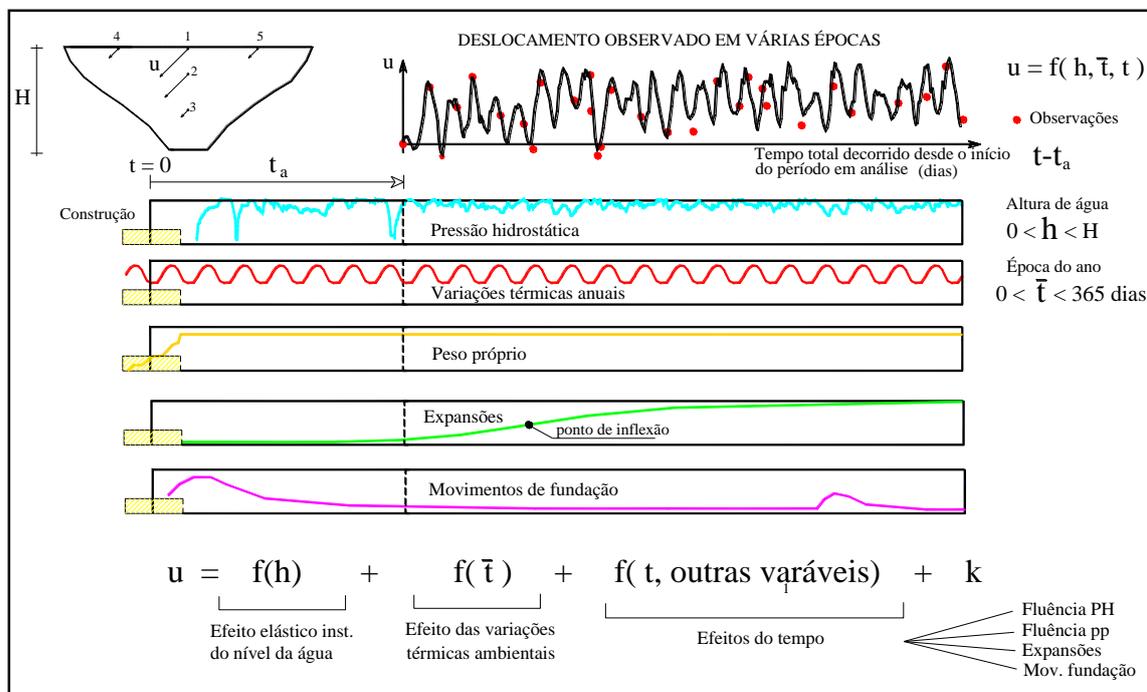


Figura 4.2 - Ação simultânea de várias ações observadas nas barragens.

Os modelos de interpretação quantitativa, ou modelos de separação de efeitos, visam facilitar a interpretação da ação simultânea de várias solicitações e podem ser utilizados no controlo do comportamento das obras (até de forma automatizada), com vista a garantir a segurança das mesmas. Permitem efetuar análises do comportamento da obra ao longo do tempo.

Os modelos de separação de efeitos geralmente aplicados em conjunto com o modelo numérico de elementos finitos nas barragens, têm como objetivo apoiar a interpretação dos deslocamentos obtidos por métodos de geodesia local (Figura 4.3).

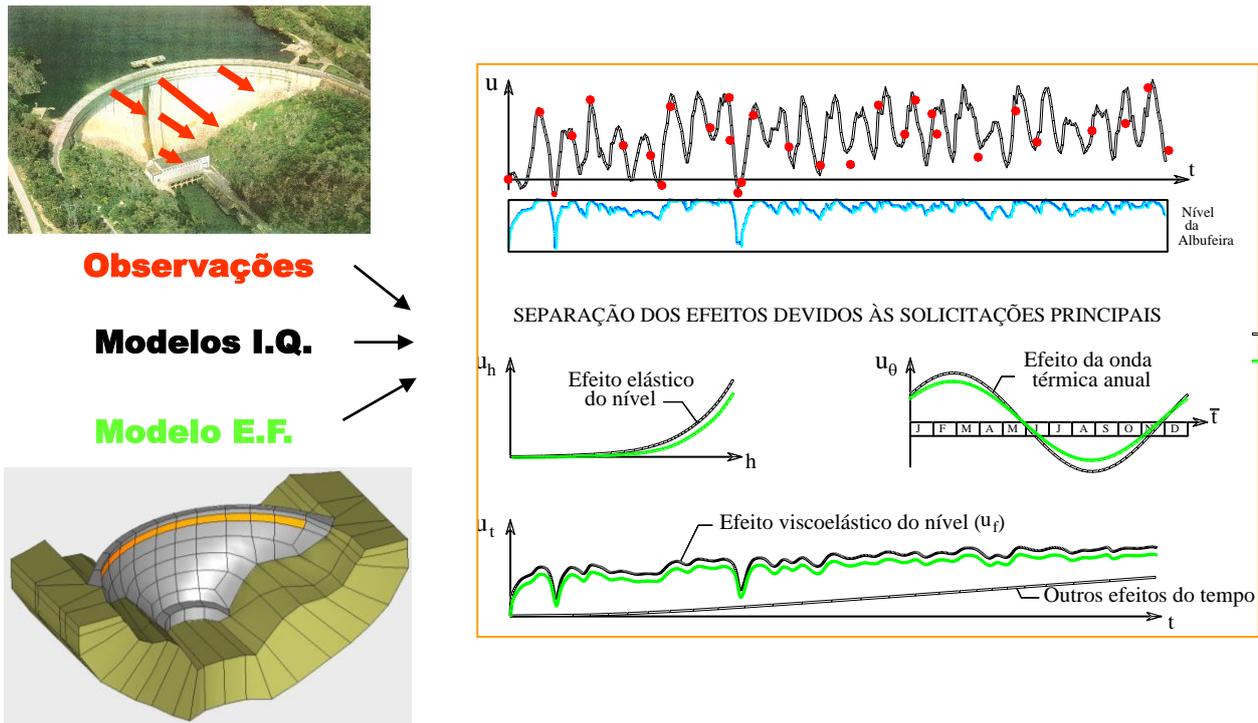


Figura 4.3 – Utilização integrada de modelos numéricos e de modelos estatísticos de separação de efeitos.

As componentes de deslocamento u_{mod} calculadas com um modelo de interpretação quantitativa, por ajustamento estatístico às componentes observadas u_{obs} , podem ser descritas em função de três variáveis associadas às principais ações e seus efeitos: uma representativa das variações do nível da albufeira, h ; outra representativa do estado térmico da obra, \bar{t} (época do ano, em dias contados a partir de 1 de Janeiro ou, em certos casos, valor de temperatura em °C medido em termómetros instalados em obra); e ainda uma última, representativa do tempo total decorrido, t . Admite-se assim a seguinte expressão para a separação dos efeitos da pressão hidrostática $u_H(h)$, da temperatura ambiente $u_T(\bar{t})$ e do tempo total decorrido $u_t(t)$.

$$u_{mod} = u_H(h) + u_T(\bar{t}) + u_t(t) + k \quad (3.2)$$

em que:

$u_H(h)$ – representa a componente do deslocamento que está associada à variação do nível de água na albufeira (efeito da pressão hidrostática); geralmente a variável h representa a altura da água contada a partir da cota da albufeira vazia, no entanto pode representar uma altura de água contada a partir de outra cota de referência, em geral superior à cota da albufeira vazia; a variável h poderá ainda representar a cota média da semana ou do mês que antecede a época de observação

considerada (admissível sobretudo na interpretação quantitativa de caudais ou subpressões); para a expressão de $u_H(h)$ uma das formas mais simples e frequentemente adotada é $u_H(h) = a \cdot h^4$; $u_T(\bar{t})$ – representa a parcela do deslocamento associada à variação térmica (efeito térmico); a variável \bar{t} representa a época do ano e é usualmente contada em dias a partir de 1 de Janeiro; para a expressão de $u_T(\bar{t})$ a seguinte forma sinusoidal é das mais adotadas:

$$u_T(\bar{t}) = b_1 \cdot \cos(2\pi \bar{t}/365) + b_2 \cdot \sin(2\pi \bar{t}/365) \quad (\text{William, et al., 1967})$$

é de referir que em determinadas situações esta parcela associada às variações térmicas pode ser considerada não como uma função da época do ano \bar{t} , mas antes como uma função da temperatura T (°C) medida num termómetro instalado em obra que se considere representativo para a resposta que se pretende analisar (ou como função de uma história de temperaturas correspondente à média de vários termómetros representativos); neste caso adota-se, em geral, uma expressão que traduz uma relação linear entre a grandeza em análise e a temperatura medida: $u_T(T) = b \cdot T$

$u_t(t)$ – representa a parcela de deslocamento associada a outras ações, ao carácter não elástico do comportamento estrutural e à variação de propriedades estruturais ocorridas no decurso do tempo (efeitos do tempo); a variável tempo, usualmente contada em dias, pode ser medida a partir: i) de uma data de referência tomada como origem absoluta do tempo e que pode geralmente coincidir com a época média do período construtivo (t); ii) da data de início do primeiro enchimento ($t-t_f$); iii) do início do período em análise ($t-t_a$); é de referir que para a expressão de $u_t(t)$ uma das formas usualmente adotadas é do tipo $u_t(t) = c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2$. Esta parcela pretende captar outros efeitos de tempo desde o início do período em análise ($t = t_a$);

k – representa uma constante que é introduzida, em parte, devido ao facto de os valores observados corresponderem a valores relativos das grandezas em análise; esta constante resulta do facto de, no caso geral, não serem coincidentes as datas correspondentes aos zeros das diferentes parcelas e de não serem coincidentes as datas da época e_0 , de origem das observações (em que os valores observados são inicializados com valores nulos), e da época e_a , de início do período em análise; para ilustrar este comentário é conveniente reparar na expressão que nos permite exprimir a constante k em função do valor observado u_{obs,e_a} , na época e_a de início do período em análise ($t=t_a$), a qual pode ser escrita como $k = u_{\text{obs},e_a} - (u_H(h_a) + u_T(\bar{t}_a) + r_a)$ quando se adota a notação introduzida no parágrafo seguinte (note-se que, nesta época e_a os efeitos do tempo correspondentes ao período em análise são naturalmente inicializados com o valor nulo: $u_i(t_a) = 0$).

Ou seja, construindo de novo a expressão (3.2), em ordem ao tempo:

$$u_{\text{mod}_n}(t) = a \cdot h_n^4 + b_1 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \bar{t}_n}{365}\right) + b_2 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \bar{t}_n}{365}\right) + c_1 \cdot t_n + c_2 \cdot t_n^2 + k \quad (3.3)$$

Verificamos assim que este modelo requer a determinação de seis variáveis para cada instante de tempo. No entanto, quando é aplicado, são utilizados vários instantes de tempo, por vezes na ordem dos milhares, de modo a obter um valor mais próximo do esperado, daí aparecer o fator n, que representa o número de deslocamentos conhecidos.

Desde modo, para a determinação das seis variáveis, é aplicado o Método dos Mínimos Quadrados, este método destina-se a minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados, ou seja, representando a expressão (3.3) de um forma matricial e vetorial:

$$\begin{bmatrix} h_1^4 & \cos(2\pi\bar{t}_1/365) & \sin(2\pi\bar{t}_1/365) & t_1 & t_1^2 & 1 \\ h_2^4 & \cos(2\pi\bar{t}_2/365) & \sin(2\pi\bar{t}_2/365) & t_2 & t_2^2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_n^4 & \cos(2\pi\bar{t}_n/365) & \sin(2\pi\bar{t}_n/365) & t_n & t_n^2 & 1 \end{bmatrix}_{n \times 6} \begin{bmatrix} a \\ b_1 \\ b_2 \\ c_1 \\ c_2 \\ k \end{bmatrix}_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ n \end{bmatrix}_{n \times 1}$$

De seguida, generalizando a expressão apresentada e aplicando o Método dos Mínimos Quadrados:

$$\underline{A} \cdot \underline{x} = \underline{b} \quad (3.4)$$

Multiplicando ambos os membros por \underline{A}^T

$$\underline{A}^T \cdot \underline{A} \cdot \underline{x} = \underline{A}^T \cdot \underline{b} \quad (3.5)$$

temos que

$$\underline{x} = (\underline{A}^T \cdot \underline{A})^{-1} \cdot \underline{A}^T \cdot \underline{b} \quad (3.6)$$

Desta forma, são determinados os parâmetros dos modelos de interpretação quantitativa que melhor se ajustam ao conjunto das épocas analisadas, através da minimização da soma dos quadrados dos resíduos (Método dos Mínimos Quadrados), obtendo deste modo resultados como o apresentado na Figura 4.4, que ilustram o modelo de interpretação quantitativa do deslocamento radial observado no ponto superior da consola central da barragem de Vilarinho das Furnas.

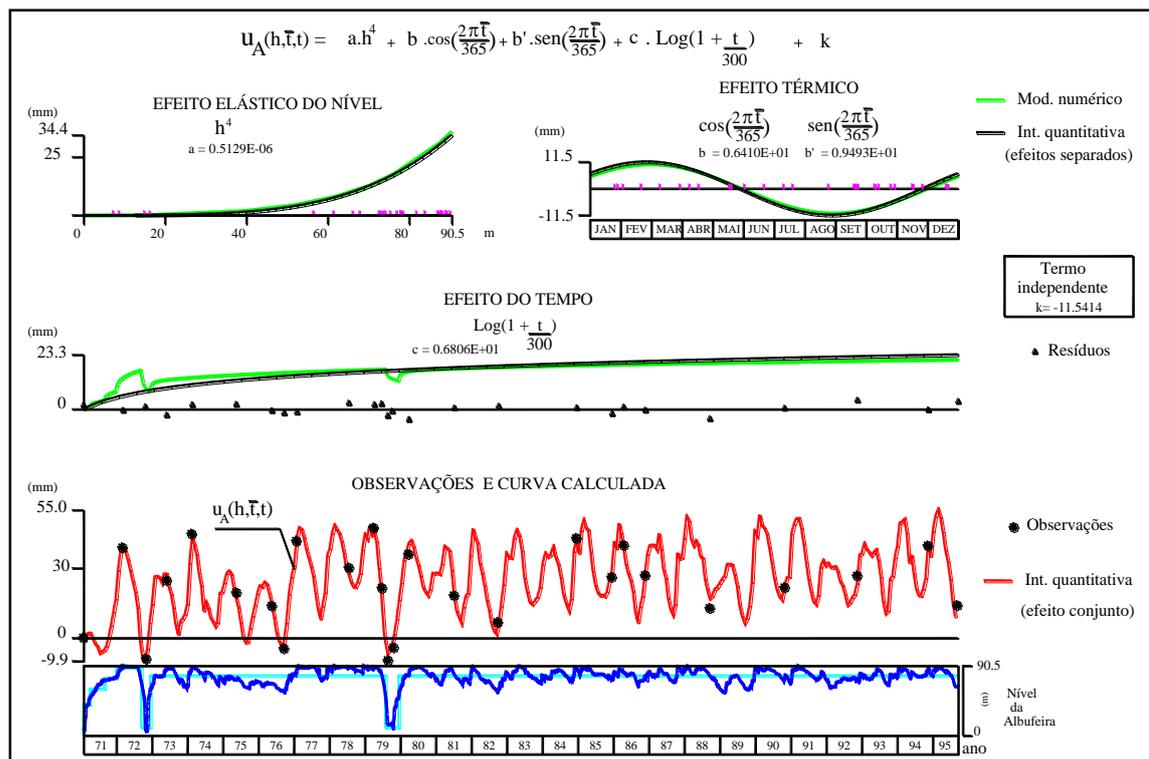


Figura 4.4 - Modelo de Interpretação Quantitativa do deslocamento radial observado no ponto superior da consola central de uma barragem (Oliveira, 2006).

4.3 Considerações Finais

Relativamente ao controlo de segurança estrutural das grandes barragens, é essencial modernizar os equipamentos de observação e os métodos de interpretação de dados, para garantir e prever correctamente o comportamento das mesmas em serviço.

De modo a garantir um melhor controlo das obras, é essencial confrontar resultados numéricos com resultados de modelos de interpretação quantitativa.

Neste capítulo referiu-se a importância dos modelos de EF para previsão do comportamento futuro das obras, e da importância dos modelos de separação de efeitos para interpretação de resultados previamente observados.

Com o apoio das plataformas SIG será possível verificar quais as barragens que têm modelos numéricos associados, acompanhando com um desenho do modelo de EF da barragem. Será ainda possível visualizar resultados obtidos após estudo do comportamento da barragem, através de modelos de separação de efeitos (ou modelos de interpretação quantitativa).

5

Exemplos de exploração das plataformas SIG

5.1 Considerações iniciais

No presente capítulo referem-se as potencialidades das plataformas SIG criadas. Trata-se de exemplos, que entre outros objetivos, visam evidenciar as capacidades das referidas plataformas para controlo da segurança (estrutural, ambiental e hidráulico-operacional) das grandes barragens portuguesas.

Como exemplo, apresenta-se o caso da barragem do Cabril que permite ilustrar, em concreto, as capacidades das plataformas SIG a nível estrutural. Pretende-se também salientar as potencialidades que as plataformas SIG oferecem, nomeadamente quando acessíveis através de *browsers*, o que permite que mais utilizadores possam usufruir das ferramentas disponíveis nos sistemas SIG.

5.2 Exploração da plataforma 2D em ArcMap

Como já foi referido, o ArcMap é uma aplicação do sistema ArcGIS que permite a criação, visualização e gestão de modelos SIG. Disponibiliza também ao utilizador um grande número de ferramentas, como por exemplo a pesquisa de atributos, comparação entre dados, geoprocessamento, entre outros. No entanto, não é o meio informático mais acessível a todos os utilizadores, uma vez que é um *software* proprietário de elevados custos.

Antes de iniciar a utilização da plataforma, o utilizador deve importar os dados para o seu computador (sob a forma de base de dados, ou ficheiros *shapefiles*), como foi descrito no capítulo 3 do presente trabalho. Futuramente, os dados poderão vir a ser disponibilizados em bases de dados

instaladas num servidor. Nesse caso, qualquer utilizador do sistema ArcGIS poderá aceder remotamente aos dados. No entanto, essa opção não foi implementada no âmbito deste trabalho. Como já foi referido, uma das ferramentas que o ArcMap disponibiliza é a pesquisa de atributos (*queries*), que permite a seleção de barragens através de determinadas características que se encontram na tabela de atributos. Esta ferramenta encontra-se disponível no menu *Selection > Select By Attributes*. Existem várias maneiras para efetuar pesquisas por atributos, obedecendo na sua essência à linguagem SQL⁸ a partir da qual se estruturam as consultas (*queries*) às bases de dados. Por exemplo, caso se pretenda aceder a elementos (registos da base de dados) através de atributos concretos é utilizado o “igual” (=). Caso se queira selecionar um atributo que se encontra entre outros atributos, é utilizado o “Like” e o atributo a pesquisar entre símbolos de percentagem (%). De seguida são apresentados alguns exemplos:

- 1) Filtrar barragens cuja utilização se destina a fins energéticos ("Utilizacao" LIKE '%Energia%'):

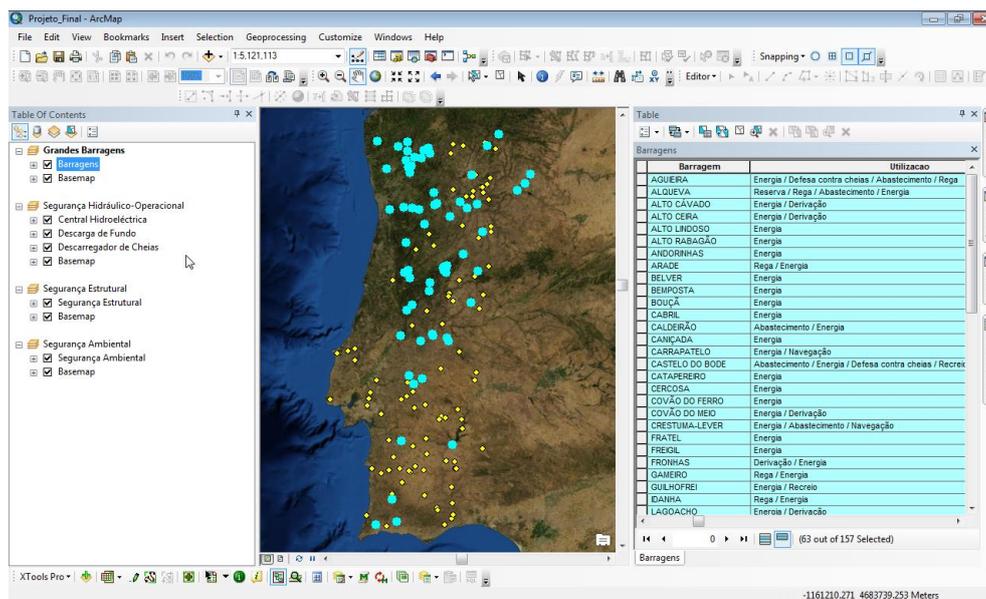


Figura 5.1 - Selecionar barragens cuja utilização se destina a fins energéticos.

⁸ SQL - *Structured Query Language*, ou Linguagem de Consulta Estruturada. É uma linguagem declarativa para pesquisa estruturada reconhecida pelos sistemas de bases de dados. Serve para efetuar consultas estruturadas (*queries*) às bases de dados.

- 2) Selecionar barragens que se encontram no distrito de Castelo Branco ("Distrito" = 'Castelo Branco'):

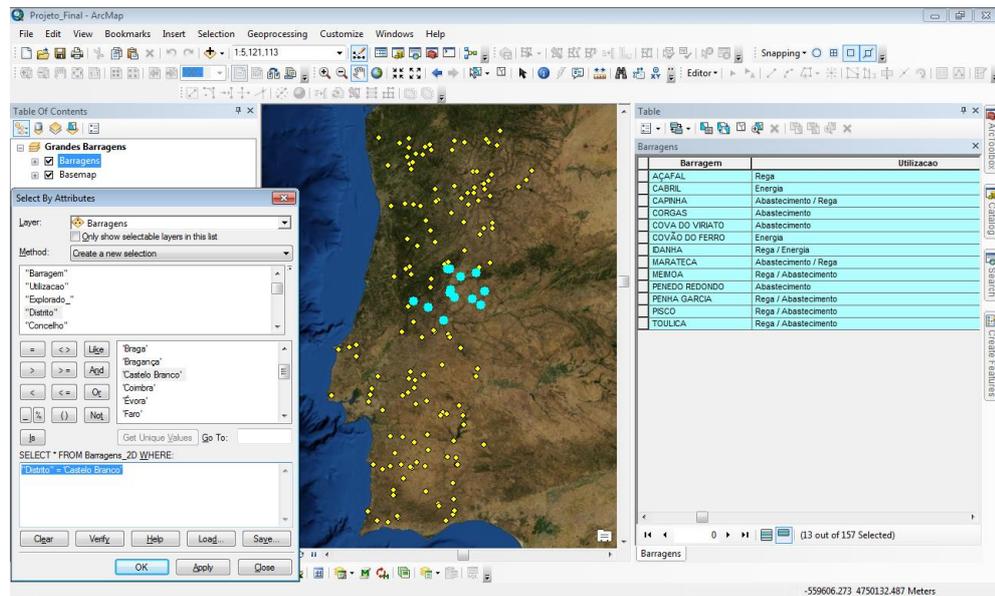


Figura 5.2 – Selecionar barragens que se encontram no distrito de Castelo Branco.

- 3) Por fim, uma pesquisa mais detalhada seria, selecionar as barragens cujo volume é superior ou igual a 1.000.000 m³:

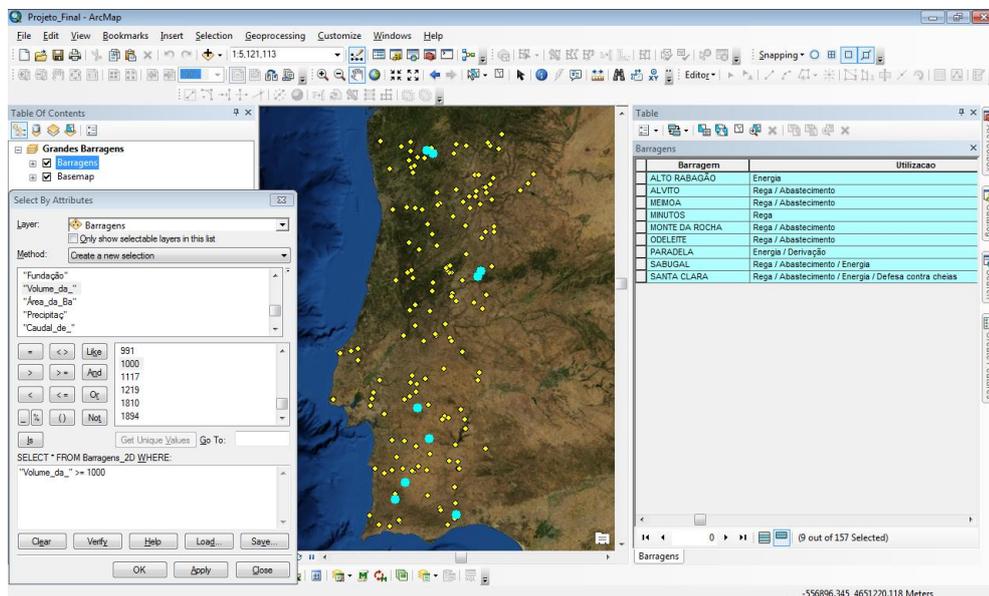


Figura 5.3 – Seleção de barragens com mais de 1.000.000 m³ de volume.

Fazendo a ligação com outros modelos de dados criados anteriormente é possível realizar outro tipo de análises. No exemplo ilustra-se a contextualização com as falhas sísmicas próximas de Portugal continental, onde é possível verificar que falhas existem junto a cada barragem (Figura 5.4).

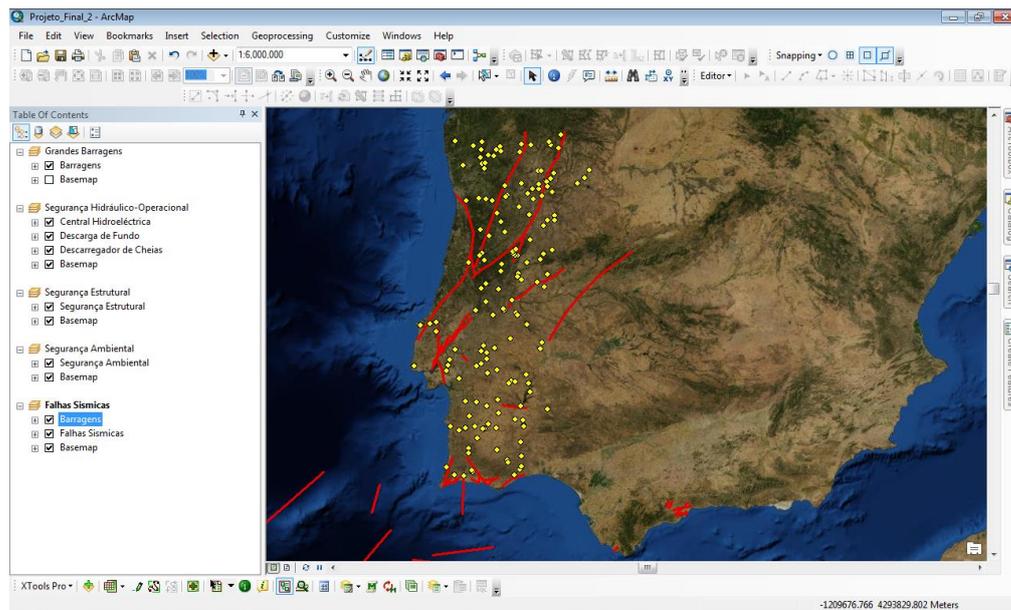


Figura 5.4 - Grandes barragens com representação das falhas sísmicas próximas.

Outra interessante análise corresponde ao estudo dos sismos ocorridos na envolvente de cada barragem. Deste modo é possível aceder e verificar os dados históricos dos sismos ocorridos desde 1700 (Figura 5.5).

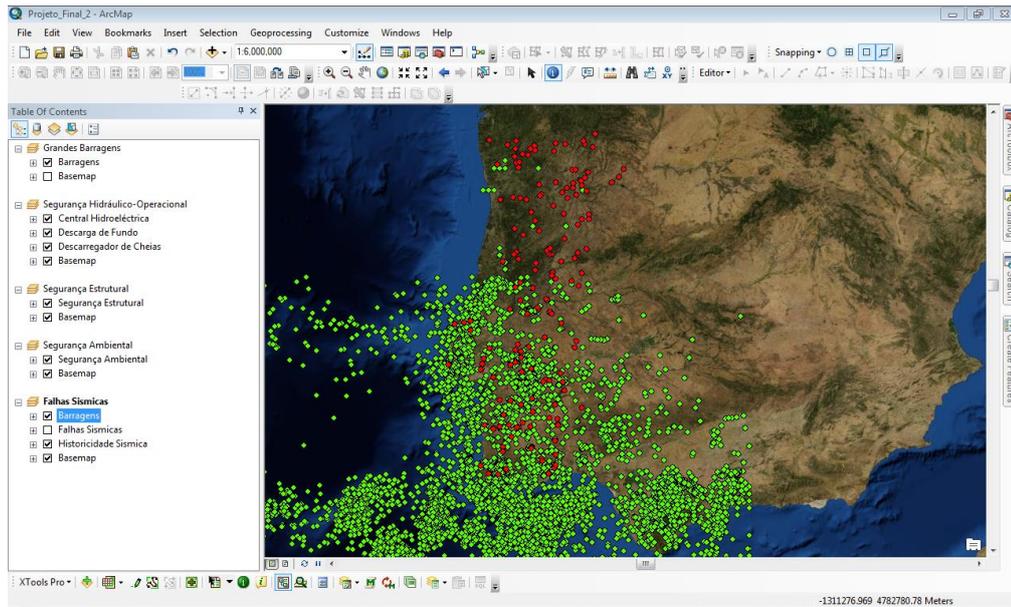


Figura 5.5 – Envolvente sísmica das Grandes Barragens (pontos vermelhos) com dados sísmicos desde 1700 (pontos verdes).

Da análise anterior, em pormenor, é possível verificar que ocorreram quatro sismos no século XX perto da barragem do Cabril: um em 1984, com magnitude 2.4, outro em 1909, com magnitude 5.2, um outro em 1936, com magnitude 3.7 e ainda um em 1975, com magnitude 4.1.

Por fim refere-se que no domínio público da internet é possível aceder a inúmeros conjuntos de dados oficiais na forma de *shapefiles* (ex. rios, relevo, etc.) , que podem ser interligadas com a base de dados das Grandes Barragens Portuguesas, permitindo, através de geoprocessamento adicional obter informações úteis sobre diversos assuntos ligados à temática das Grandes Barragens.

5.3 Exploração da plataforma 2D em ArcGIS Explorer Desktop

O ArcGis Explorer Desktop é uma ferramenta disponibilizada pela ESRI, que permite a visualização de dados e modelos previamente criadas por outras ferramentas, como o ArcMap (Figura 5.6). Essencialmente, é uma ferramenta de visualização que não permite efetuar alterações aos dados e tem recursos limitados. Como vantagens, permite a criação de melhores apresentações das plataformas criadas, possibilitando um mais fácil manuseamento por utilizadores não técnicos. Permite também efetuar algum tipo de pesquisas estruturadas previamente pré-definidas e não tem custos associados.

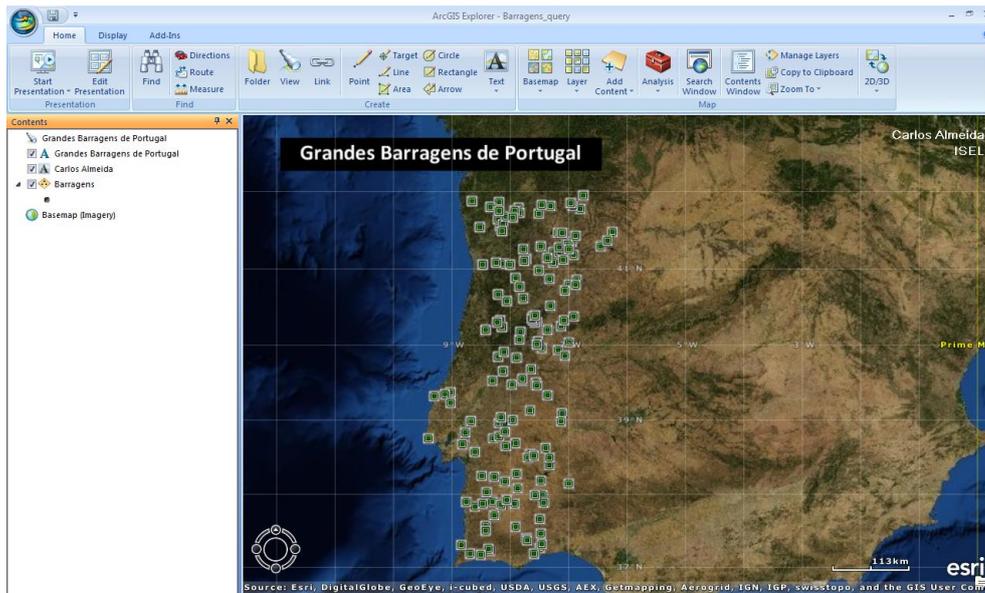


Figura 5.6 – Visualização da plataforma SIG no ArcGIS Explorer Desktop.

Esta ferramenta permite também aceder não só a outras bases de dados, como também outro tipo de ficheiros, como por exemplo os formatos kml ou kmz (ficheiros de dados geográficos da Google). Como já foi referido, esta ferramenta permite ainda criar apresentações, através do comando *Edit Presentation*. Ao clicar numa barragem, aparece toda a informação acerca da mesma, incluindo um *link* (ver Figura 5.7.) para acesso a uma imagem da referida barragem.

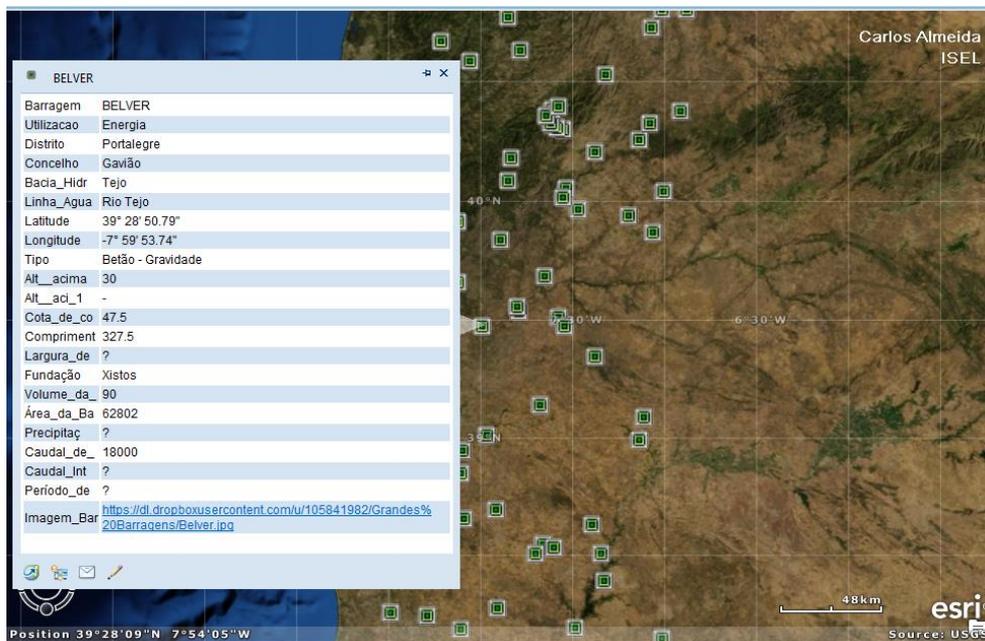


Figura 5.7 – Informação disponibilizada acerca de cada Barragem no ArcGIS Explorer Desktop. (Ex. Barragem de Belver).

Assim como no ArcMap, esta ferramenta também permite obter ótimas visualizações de cada barragem, quando em aproximação à mesma (Figura 5.8).

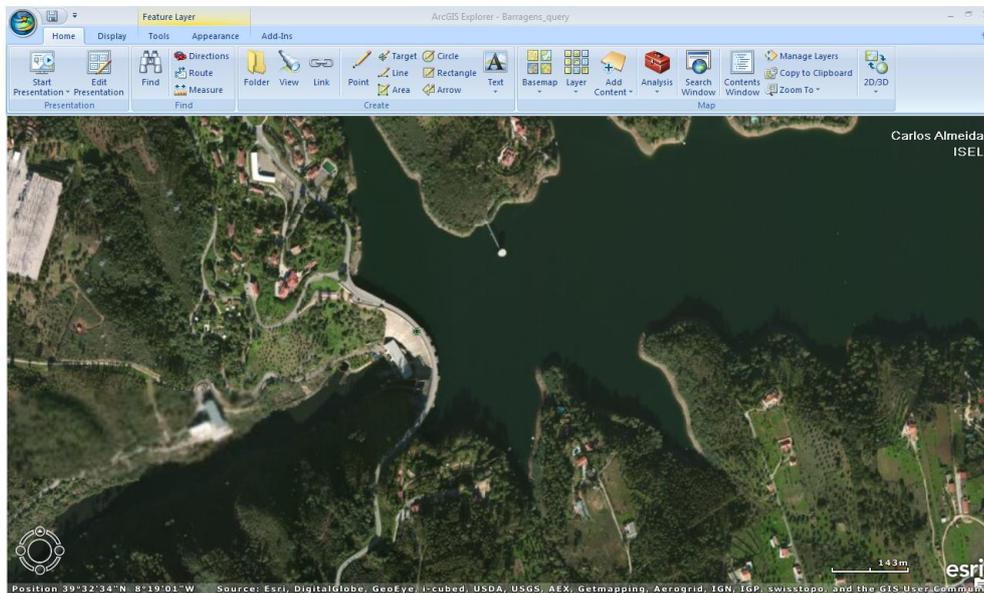


Figura 5.8 – Aproximação à barragem de Castelo de Bode, através do ArcGIS Explorer Desktop.

A principal desvantagem da utilização desta ferramenta é o facto de só permitir efetuar pesquisa de atributos e análises de forma bastante limitada, retirando alguns graus de liberdade à sua utilização no âmbito de tarefas técnicas. No entanto continua a ser uma importante ferramenta para acesso direto à informação disponibilizada.

5.4 Exploração da plataforma 2D em ArcGIS Online

Como já foi referido, a expansão da plataforma SIG para um ambiente *online*, visa permitir que qualquer utilizador possa aceder à mesma a partir de um *browser* da internet, sem a instalação de qualquer *software* adicional (como acontece, por exemplo, com o ArcGIS Explorer Desktop). Para tal é necessário entrar no *site* do ArcGIS Online (www.arcgis.com/home) e pesquisar por Grandes Barragens de Portugal no canto superior direito (Figura 5.9).

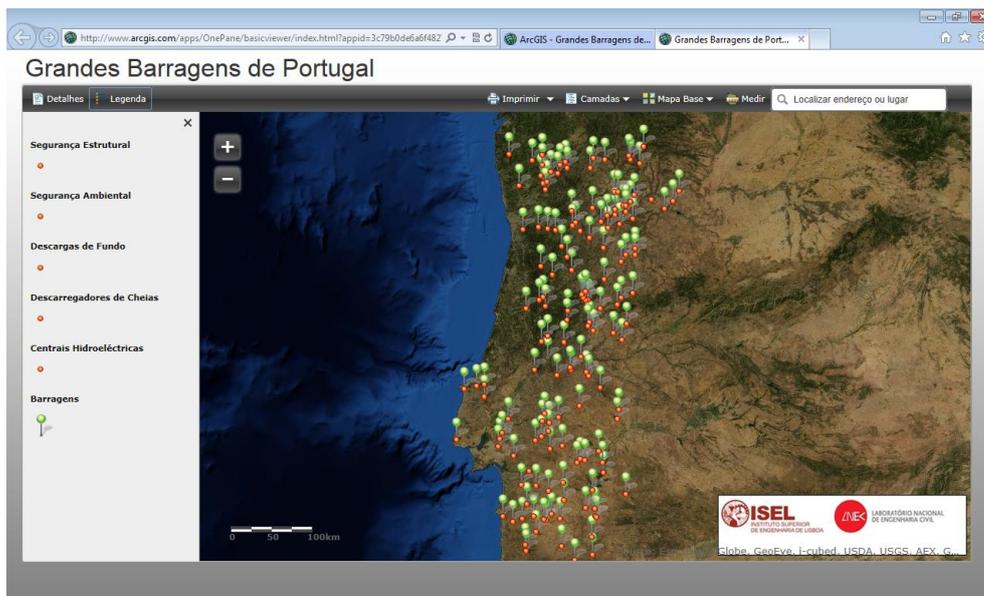


Figura 5.9 – Visualização da aplicação web das Grandes Barragens Portuguesas através do Internet Explorer.

No canto superior direito encontram-se os detalhes da aplicação, onde é possível obter informações acerca da mesma, assim como outros aspetos importantes para os utilizadores (Figura 5.10). Uma vez que a informação é vasta, é possível ligar/desligar camadas de dados através do botão que se encontra no canto superior direito (Figura 5.11).

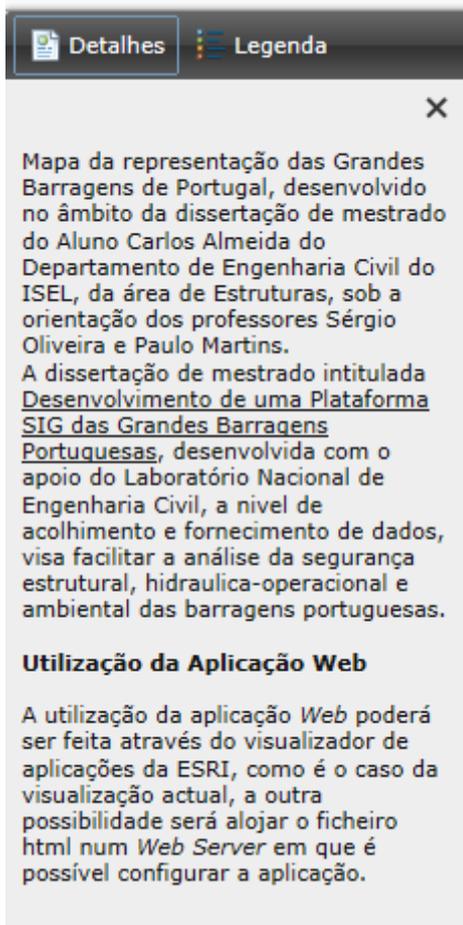


Figura 5.10 – Detalhes da Aplicação Web.

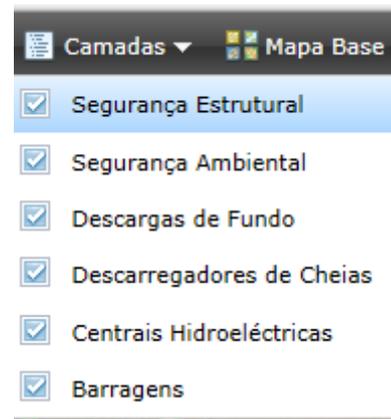


Figura 5.11 – Ligar e desligar a visualização de camadas.

Toda a informação que se encontra em cada camada já foi referida no capítulo 3. De seguida são apresentados alguns exemplos dos dados que se encontram em cada uma das camadas. O exemplo utilizado é, novamente, a barragem do Cabril, com o qual será efetuada a demonstração da informação que se encontra disponível relativamente à segurança estrutural. Para acesso à informação é possível visualizar o seguinte quadro (Figura 5.12):

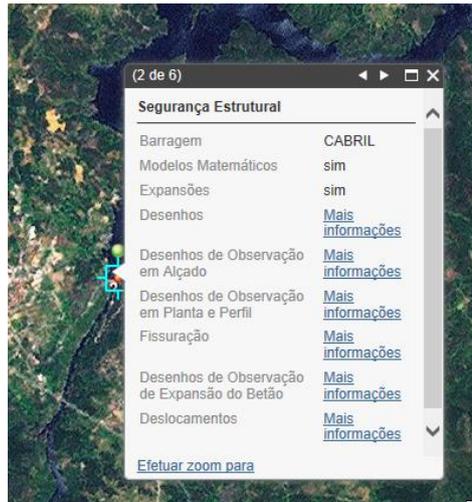


Figura 5.12 – Segurança Estrutural – Barragem do Cabril.

Nos atributos da caixa “Segurança Estrutural”, onde se lê “Mais informações”, encontram-se hiperligações que remetem para mais detalhes sobre os referidos atributos, como os desenhos da obra (Figura 5.13), onde se incluem as vistas de planta, alçado e corte pela consola central da barragem. É de salientar que toda a informação é visualizada também em ambiente web.

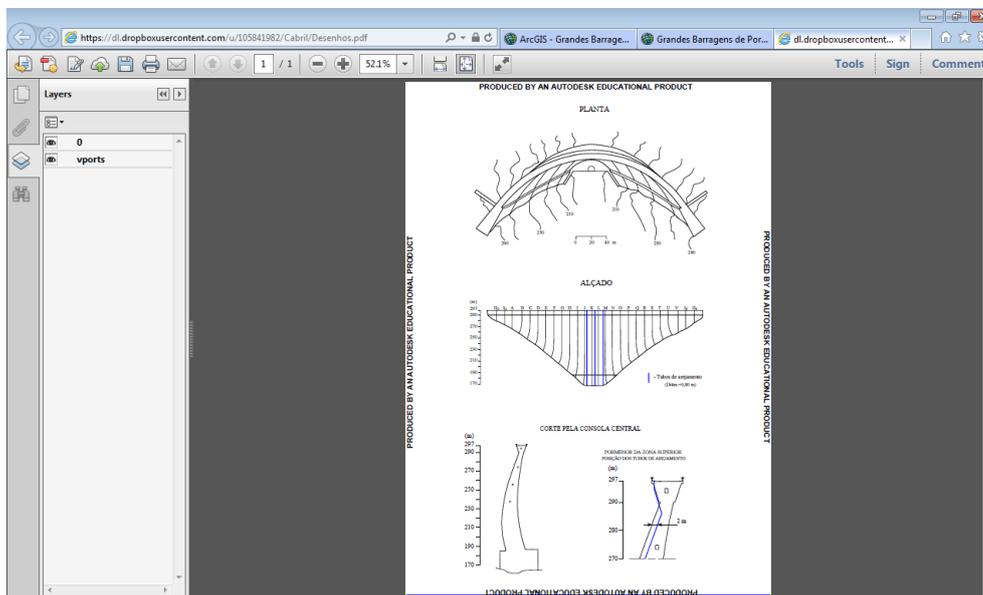


Figura 5.13 – Desenhos: barragem do Cabril.

No caso dos *Desenhos de Observação* em alçado, encontram-se os desenhos referentes à localização dos aparelhos de controlo de segurança da barragem, como os medidores de juntas em fissuras, bases de alongâmetro, bases de alongâmetro em fissuras e fendas, acelerómetros, rede de drenagem (Figura 5.14), piezómetros e drenos em furos utilizados em ensaios geofísicos,

medidores de juntas em juntas de contração, termómetros e pares termoelétricos, fios-de-prumo e extensómetros de fundação (Figura 5.15), nivelamentos e por fim geodesia.

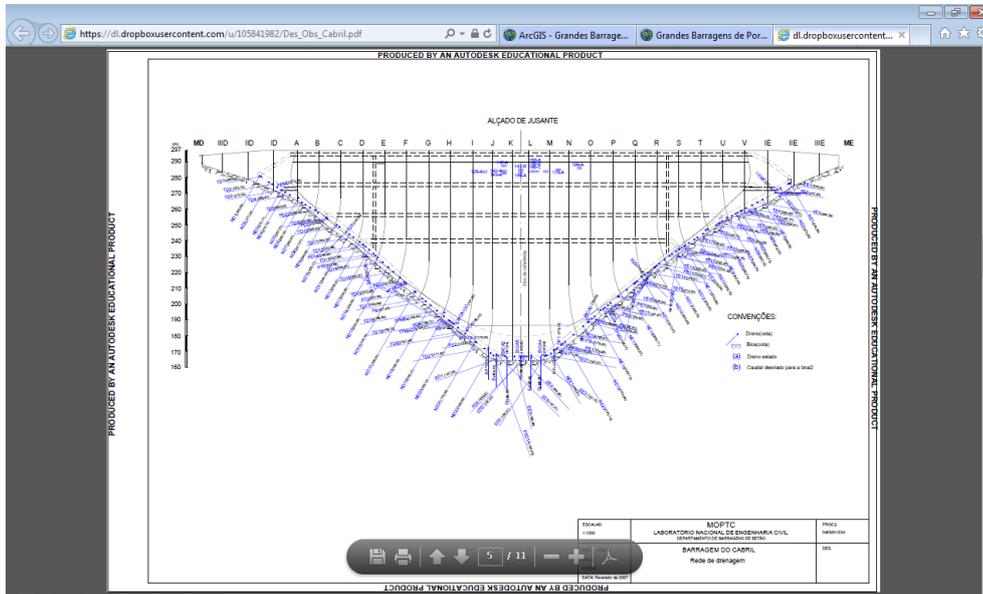


Figura 5.14 – Barragem do Cabril: Rede de drenagem.

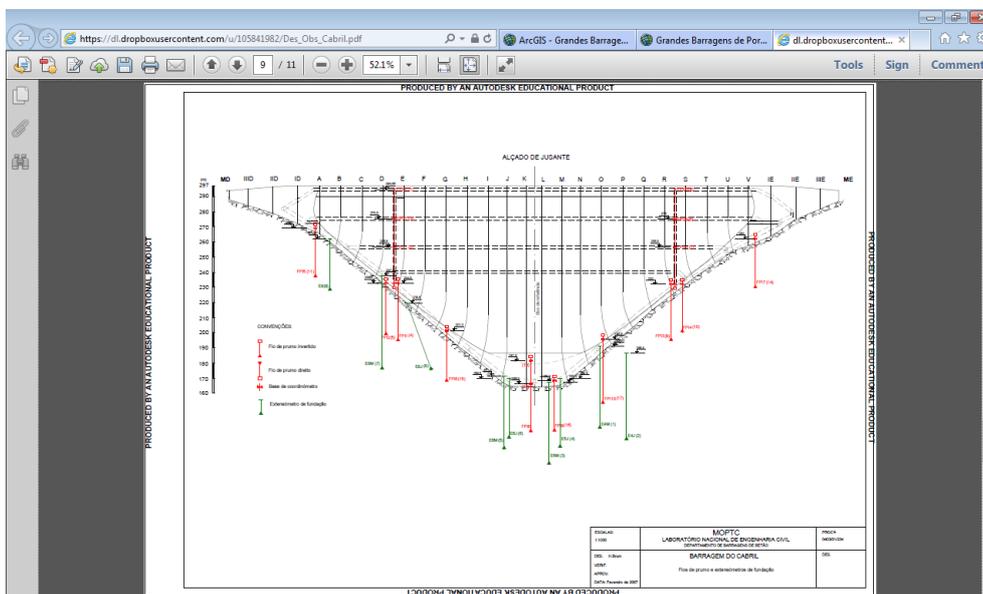


Figura 5.15 – Barragem do Cabril: Fios-de-prumo e extensómetros de fundação.

No atributo intitulado *Desenhos de Observação em Planta e Perfil*, encontra-se em detalhe a localização dos instrumentos mencionados anteriormente nas referidas vistas (Figura 5.16).

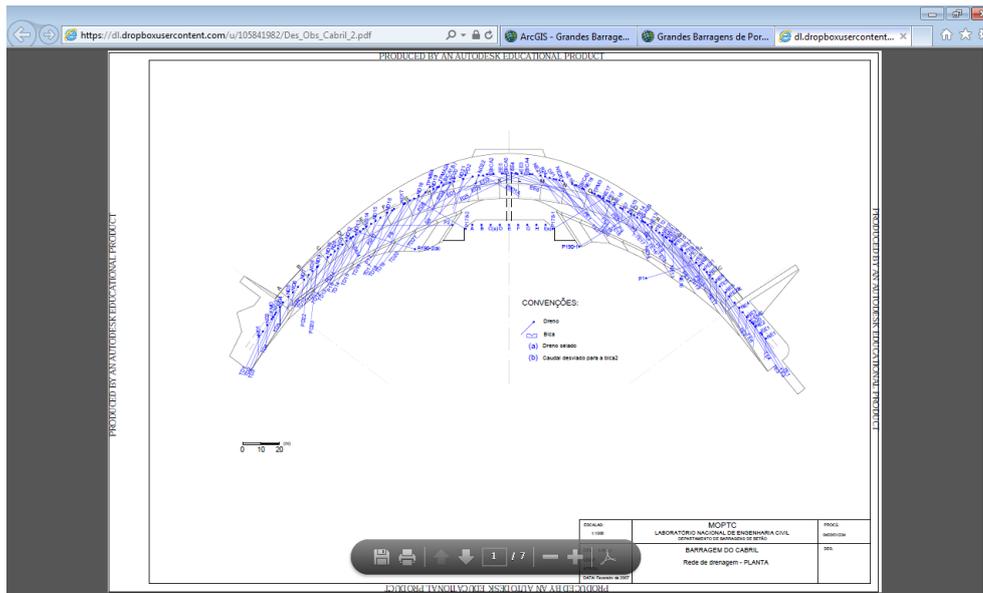


Figura 5.16 – Barragem do Cabril: Rede de drenagem, vista em planta.

Quanto ao atributo que faz referência à fissuração, é possível visualizar um esquema da evolução da mesma na barragem, entre 1960 e 1996, demonstrando a localização das fissuras, microfissuras e capilares (Figura 5.17).

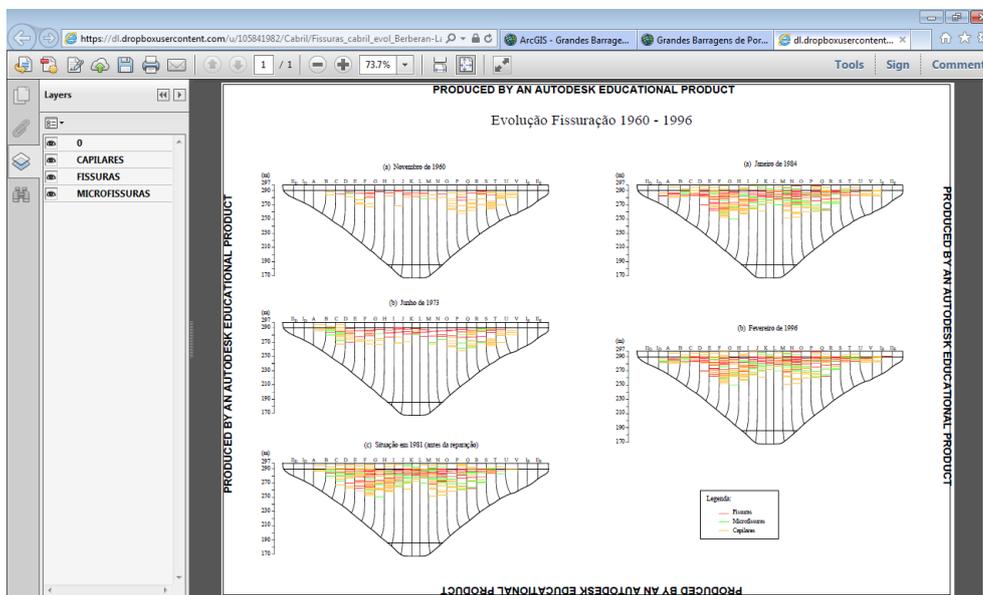


Figura 5.17 – Barragem do Cabril: Fissuração.

No atributo que alude aos *Desenhos de Observação de Expansão do Betão*, é possível visualizar graficamente a evolução da expansão do betão entre 1982 e 2005, em diferentes patamares da barragem (Figura 5.18).

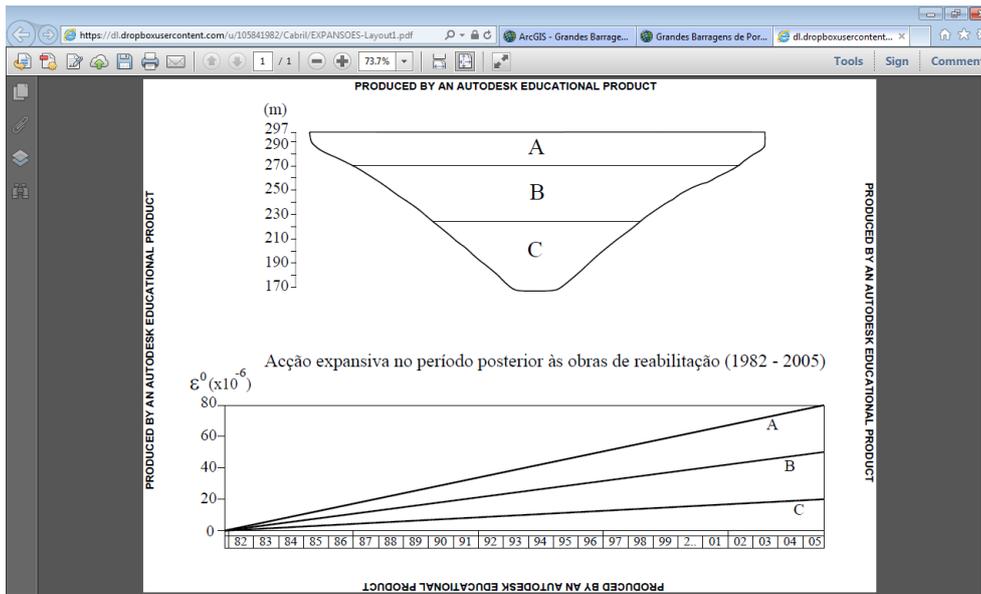


Figura 5.18 – Barragem do Cabril: Expansão do betão.

Por fim, no atributo referente aos *Deslocamentos*, é possível visualizar uma *História de Deslocamentos* em milímetros, na consola central da barragem, a diferentes cotas, entre os anos de 1982 e 2004 (Figura 5.19).

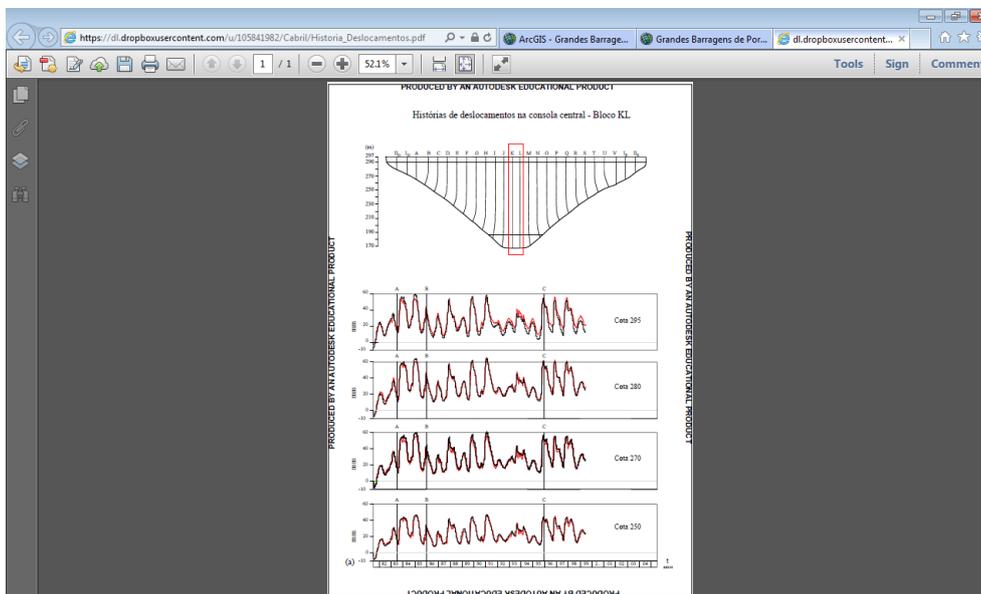


Figura 5.19 – Barragem do Cabril: História de Deslocamentos na consola central.

Como já foi referido, a plataforma engloba também a *Segurança Ambiental das Grandes Barragens*. Deste modo, ao ativar a camada Segurança Ambiental, é possível verificar se a barragem se encontra dotada de dispositivos de controlo de espécies, referenciando o seu tipo e se

se encontram em funcionamento. Apresenta-se nas Figura 5.20 e Figura 5.21 as visualizações correspondentes à Barragem de Crestuma-Lever e do Açude de Coimbra, onde é evidente o controlo da segurança ambiental.



Figura 5.20 - Segurança Ambiental: barragem Crestuma-Lever.



Figura 5.21 - Segurança Ambiental: barragem de Coimbra.

Por fim, quanto à informação relativa à segurança hidráulico-operacional, esta encontra-se dividida em três camadas: descargas de fundo, descarregadores de cheias e centrais hidroelétricas. Explorando a plataforma é possível visualizar a informação referida no capítulo 3, como é ilustrado nas seguintes figuras, para a barragem da Aguieira:



Figura 5.22 - Descarga de fundo.



Figura 5.23 - Descarregador de cheias.



Figura 5.24 - Central hidroelétrica.

Desta forma, conclui-se a demonstração de exemplos de exploração da plataforma SIG em ambiente *web*, que presentemente está disponível a qualquer utilizador com acesso a um computador provido de internet.

5.5 Exploração da plataforma 3D em ArcScene

A plataforma 3D da barragem do Cabril, é uma plataforma apenas de observação e apenas pode ser explorada através do ArcScene. Permite obter conhecimento das dimensões do conjunto barragem-albufeira (Figura 5.25) e avaliar o mesmo em conformidade com fenómenos envolventes, como falhas sísmicas e sismos ocorridos na proximidade, tal como foi descrito no subcapítulo 5.4, mas desta feita a nível 3D. Poderá ainda servir como ferramenta auxiliar na análise da barragem para possíveis projetos e instalação de dispositivos de monitorização, avaliando possíveis locais de fixação dos mesmos.

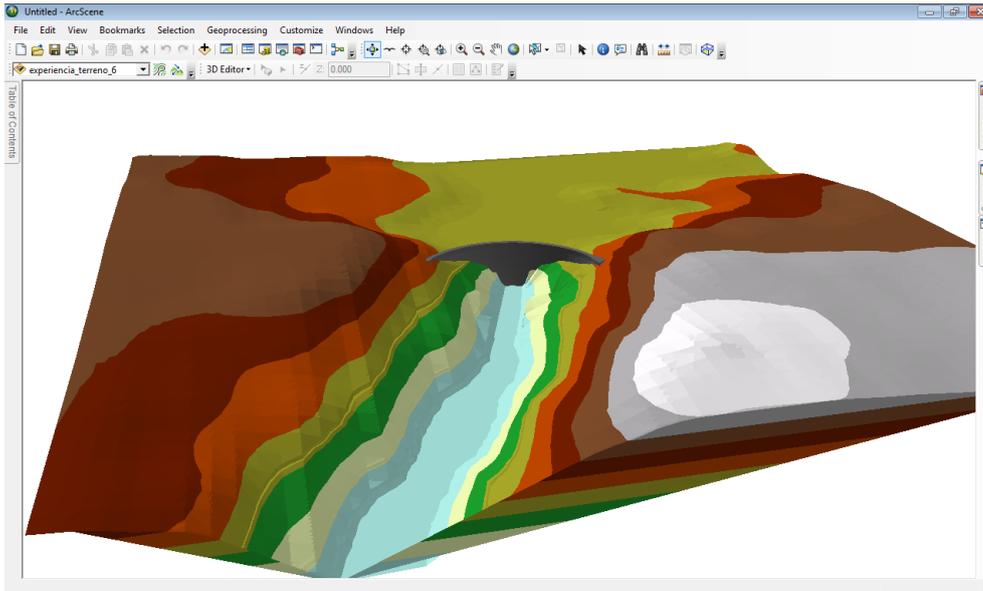


Figura 5.25 - Vista 3D do conjunto barragem-albufeira do Cabril.

O ArcScene possibilita analisar uma determinada área envolvente à barragem, através da ferramenta de geoprocessamento *buffer*, desta forma, para uma área de cinquenta quilómetros ao largo da barragem é possível verificar, por exemplo, que existem várias falhas na zona envolvente (Figura 5.26), mesmo que estas se encontrem inativas.

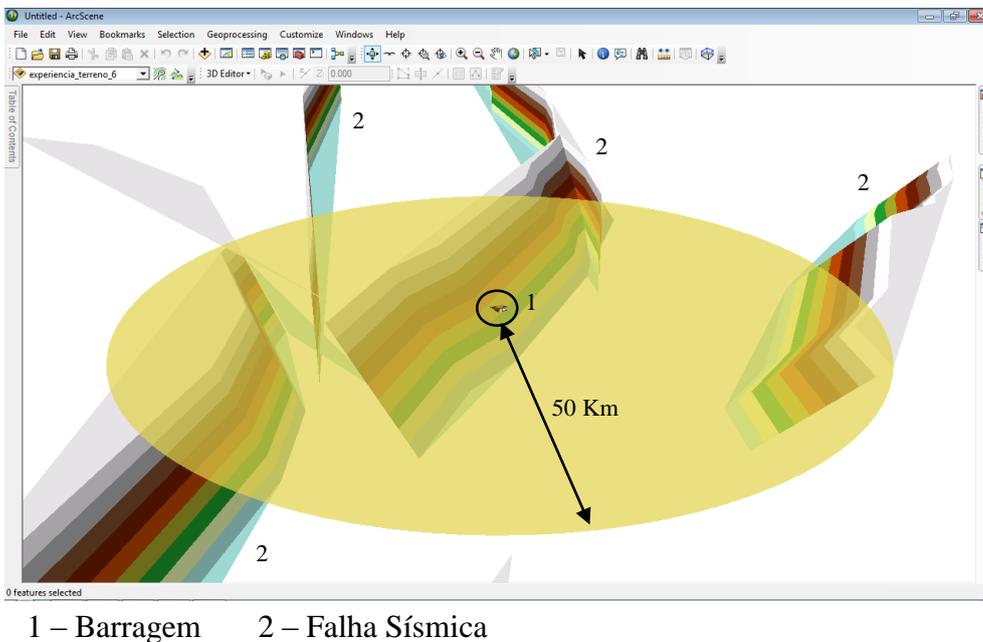


Figura 5.26 - Análise na plataforma 3D: *buffer* de falhas sísmicas junto à barragem do Cabril

Aplicando a mesma ferramenta para uma análise da ocorrência de sismos juntos à barragem, desta feita, para uma área de vinte quilómetros, verifica-se que ocorreram cerca de dez sismos após o ano 1500 (Figura 5.27).

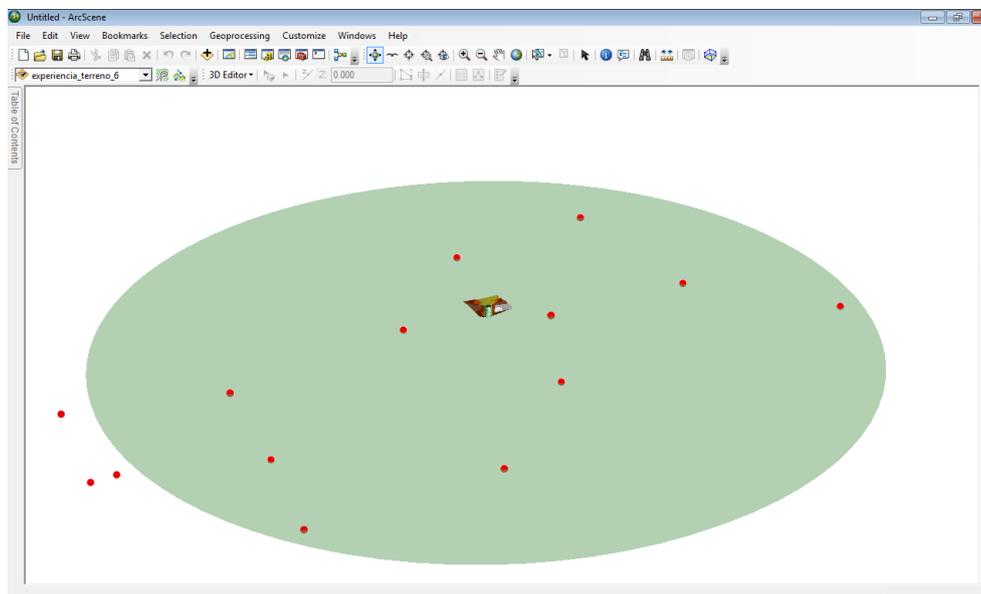


Figura 5.27 - Análise na plataforma 3D: *buffer* de sismos ocorridos após 1500 junto à barragem do Cabril.

Através dos exemplos apresentados verifica-se que a plataforma 3D da barragem do Cabril interligada com outras plataformas pode vir a ser muito útil para determinar, caracterizar e analisar ocorrências no seu redor. Adicionalmente, poderá ser efetuado o levantamento de informação geográfica da responsabilidade de várias empresas, como a EDP, e de serviços públicos (como, por exemplo, a Proteção Civil), que possuem serviços de dados de diversas naturezas, rastreados em formato SIG, que podem ser adicionados aos temas de informação apresentados, permitindo valorizar o potencial de análise disponibilizado pelas plataformas desenvolvidas no presente trabalho.

5.6 Considerações Finais

No decorrer deste capítulo foram apresentados vários exemplos de utilização e exploração das plataformas criadas no decorrer deste trabalho, com o intuito de ilustrar as capacidades produtivas que a criação de plataformas SIG para gestão e análise dos dados (que podem ser de várias naturezas e ter várias origens) oferecem no âmbito da exploração das Grandes Barragens Portuguesas e o seu controlo.

Verificou-se a possibilidade de utilizar as tecnologias SIG através de diversas soluções existentes no mercado, disponibilizadas pela ESRI: ArcMap, ArcGis Explorer Desktop e ArcGis Online. No entanto chegou-se à conclusão que apenas o conjunto de todos estes *softwares* permitem tirar total partido, nas plataformas 2D e 3D, do funcionamento dos modelos desenvolvidos. Em resumo, o ArcMap permite a construção, visualização, análise e gestão e é uma ferramenta fundamental para a definição de rotinas de pesquisa de atributos, como foi possível verificar na secção 5.2 e para a estruturação e criação dos próprios modelos. No entanto, é um *software* muito técnico, com elevados custos de aquisição e curvas de aprendizagem da sua utilização com algum grau de exigência. Quanto ao ArcGIS Explorer Desktop, disponível na internet, tem uma interface mais apelativa, onde o utilizador acede logo à plataforma e inicia a sua exploração, permite ainda adicionar dados obtidos a partir de outras fontes (tal como o ArcMap), mas tem como desvantagem o facto de não permitir liberdade completa ao utilizador na exploração das bases de dados e nas pesquisas de atributos. O ArcGis Online é uma aplicação *web*, sendo por isso a de mais fácil acesso e a mais intuitiva, não necessitando da instalação de outros componentes no computador. Permite também algum tipo de pesquisa (por exemplo, de locais), mas não permite a pesquisa de atributos, apesar de permitir a escolha das camadas que ficam visíveis de modo a focar o utilizador em temáticas concretas, como por exemplo, o controlo da segurança das barragens a analisar.

Quanto à exploração da plataforma 3D, concluiu-se que o *software* usado, o ArcScene, é adequado à sua exploração sendo fundamental neste caso interligar os dados relativos às barragens com outros já existentes, como as falhas sísmicas, como ficou evidenciado na secção 5.5. A exploração da plataforma 3D através de serviços web não foi abordada neste trabalho.

Existe ainda uma outra classe de ferramentas para disponibilização das plataformas que não foi abordada no presente trabalho. Trata-se do desenvolvimento de serviços proprietários web nos quais as plataformas desenvolvidas em ArcMap podem ser replicadas de forma quase total (no limite). Esta é realmente a forma mais universal de aceder e utilizar as plataformas, no entanto requer a existência de uma infraestrutura física com um servidor dedicado e a disponibilização de um serviço de ArcGIS Server. Adicionalmente, requer alguma preparação adicional das estruturas de dados e uma rigorosa definição das formas de visualização e edição dos mesmos, bem como dos privilégios a atribuir a cada perfil de utilizadores. Este tipo de serviços deve ser utilizado para a disponibilização distribuída de soluções já validadas pelas instituições responsáveis. Poderá corresponder, eventualmente, uma fase subsequente ao desenvolvimento das plataformas que são apresentadas nesta dissertação.

6

Conclusões e perspectivas futuras

6.1 Síntese do trabalho

A sistemática monitorização do comportamento das grandes barragens é um tema de elevada preocupação, uma vez que algumas barragens atualmente em serviço apresentam sinais de deterioração. Desta forma o objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento de dois protótipos das plataformas SIG (2D e 3D) que fornecem meios auxiliares ao diagnóstico e controlo de segurança das Grandes Barragens, a nível estrutural, ambiental e hidráulico-operacional.

De modo a permitir conhecer melhor o contexto e os objetivos deste trabalho, foi feita uma sintética abordagem descritiva acerca da importância do controlo da segurança das barragens nas seguintes áreas:

- i) a nível estrutural, a importância de garantir a correta monitorização dos sistemas instalados, através de modelos de cálculo numéricos, físicos e de interpretação quantitativa, de maneira a tornar possível a interpretação dos registos de comportamento da obra e desta forma assegurar um melhor controlo estrutural da mesma;
- ii) a nível ambiental, a importância dos sistemas de controlo de migração de espécies, através da utilização de escadas de peixe, elevadores, turbinas “*fish-friendly*”, entre outros mencionados no presente trabalho, e a importância dos mesmos se encontrarem em atividade. Abordou-se ainda a questão dos impactes ambientais negativos que surgem na fase de planeamento/construção das barragens, assunto muito discutido na atualidade, comparando com a criação de centrais elétricas que têm riscos bem mais notáveis para o ambiente;

- iii) a nível hidráulico-operacional, foi feita referência principalmente à importância da manutenção dos equipamentos hidráulicos instalados nas barragens (descarregadores de cheias e descargas de fundo) e ainda às centrais hidroelétricas também ali instaladas.

Nesta perspetiva, propôs-se uma metodologia inovadora, nomeadamente na abordagem à gestão da informação relacionada com as Grandes Barragens Portuguesas e da forma como esta foi tornada acessível nas plataformas propostas.

As plataformas propostas tornam possível o acesso à informação, de uma forma rápida e intuitiva, facilitando não só futuros projetos, mas também a gestão das obras atualmente em serviço (plataforma 2D). Quanto à plataforma 3D, apesar de apenas ser acessível através das ferramentas proprietárias da ESRI, veio permitir o desenvolvimento de modelos 3D das barragens, à escala, permitindo abrir novas perspetivas ao estudo do conjunto barragem- albufeira, possibilitando efetuar novas medições, cálculos e análises sem visitas de campo ao local e novos levantamentos.

6.2 Desenvolvimentos futuros

O desenvolvimento de sistemas de informação, modelos e plataformas SIG é uma área que se encontra em constante evolução, pelo que é de todo o interesse que as plataformas criadas no presente trabalho acompanhem essa evolução e a evolução das próprias tecnologias onde assentam, neste caso da ESRI.

Por outro lado, a construção de novas barragens faz com que seja necessária a introdução de novos dados nas plataformas e a verificação periódica da informação que se encontram nas bases de dados, de maneira a que esta se encontre atualizada. Ou seja, é necessária uma gestão continuada dos conteúdos e a sua constante atualização, o que obviamente acarreta alguns custos.

No trabalho desenvolvido, foi apenas construído o modelo 3D da barragem do Cabril. Numa abordagem futura seria interessante proceder ao desenvolvimento de modelos de dados tridimensionais das restantes barragens portuguesas e desta forma obter um mapa 3D completo das mesmas.

Como foi referido no desenvolvimento deste trabalho, nomeadamente no capítulo 5, a forma de visualização mais indicada da plataforma (no sentido da sua utilização disseminada) passa pela utilização de aplicações *web*, uma vez que promovem o rápido acesso e não necessitam de *software* extra para a sua visualização. No entanto, foi também mencionado que a atual aplicação (ArcGIS Online) não permite efetuar pesquisas de atributos, o que faz com que a plataforma SIG no seu formato atual perca algumas potencialidades. Seria de todo o interesse considerar a implementação, a médio prazo, de um servidor onde fosse possível alojar vários serviços *web* a

disponibilizar à comunidade - eventualmente com diferentes perfis de utilizadores - potenciando a utilização dos sistemas de informação criados nas plataformas desenvolvidas. No entanto, entre essa fase e a atual deve ainda mediar um período de tempo no qual as instituições responsáveis façam a transposição dos protótipos académicos agora desenvolvidos para modelos de informação estáveis e que estes sejam testados de forma intensa e ampliados a outras barragens (nas partes que foram só desenvolvidas para a barragem do Cabril) para detetar eventuais lacunas e proceder à sua correção, bem como permitir criar procedimentos de sistematização do tratamento da informação. Finalmente, a nível estrutural haverá ainda a possibilidade de melhorar a 'ligação' entre as plataformas e todo o sistema de aquisição e análise de dados implementado pelo LNEC, podendo ser criados diversos mecanismos de automatização e internalização de procedimentos atualmente existentes de forma a que o sistema de informação disponibilizado na plataforma funcione de forma mais completa e sem barreiras, ou melhor, que em última instância as plataformas desenvolvidas possam também ser usadas como consola de controle, visualização, manuseamento e análise de dados de monitorização, porque não, em tempo real.

Referências

- [1] **Barragens, Comissão Nacional Portuguesa de Grandes. 1992.** *Large Dams in Portugal*. Lisboa : Portuguese National Committee on Large Dams, 1992.
- [2] **CNPGB. 1992.** Large Dams in Portugal. [Online] 1992. http://cnpgb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/index.htm.
- [3] **Dams, The World Comission on. 2000.** *Damsand Development*. London : Earthscan Publications Ltd, 2000.
- [4] **Dham, Rajesh. 2011.** ENERGY.GOV. [Online] 21 de October de 2011. <http://energy.gov/articles/fish-friendly-turbine-making-splash-water-power>.
- [5] **ESRI. 1994.** ESRI. [Online] 1994. www.esri.com.
- [6] **Gamesby, Rob. 2013.** coolgeography. coolgeography.co.uk. [Online] September de 2013. http://coolgeography.co.uk/GCSE/AQA/Development_Gap/Cahora_Bassa/Cahora_bassa.htm.
- [7] **Lencastre, Armando. 2010.** Engenharia Civil. www.engenhariacivil.com. [Online] 18 de Setembro de 2010. <http://www.engenhariacivil.com/descarregadores-cheia-barragens>.
- [8] **Oliveira, E.R.A. 1975.** *Resistência dos Materiais. Livro II - Elementos da Teoria da Elasticidade*. Lisboa : Ed. Ass. Estudantes do Inst. Sup. Técnico (AEIST), 1975.
- [9] **Oliveira, Sérgio. 2012.** Elementos de Estudo da Cadeira de Mecânica dos Sólidos 3. 2012.
- [10] **Oliveira,Sérgio. 2006.** *Utilização Integrada de Modelos Numéricos e de Interpretação Quantitativa no Controlo da Segurança de Barragens de Betão*. Lisboa : LNEC, 2006. 972-49-2067-4.
- [11] **Pedro, J. O. 1978.** *Considerações sobre a segurança de barragens de betão*. Lisboa : LNEC, 1978.
- [12] **Pinto, Duarte Fernandes. 2009.** A Terceira Dimensão - Fotografia Aérea. *A Terceira Dimensão - Fotografia Aérea: Barragem de Alqueva*. [Online] 2009. <http://portugalfotografiaaerea.blogspot.pt/2011/04/barragem-de-alqueva.html>.
- [13] **Ramos, José Mora. 2004.** *Observação do Comportamento Estrutural de Barragens de Betão*. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2004. 9724920216.

- [14] **RSB. 2007.** DECRETO-LEI n.º 344/2007. "D.R. 1ª Série" 198 (07-10-15). *Aprova o Regulamento de Segurança de Barragens e revoga o Decreto-Lei n.º 11/90, de 6 de Janeiro.* Lisboa : s.n., 2007.
- [15] **Rui. 2010.** Olhar d'Ouro. *amegoimage.blogspot.pt*. [Online] 02 de 02 de 2010. <http://lamegoimage.blogspot.pt/2010/02/barragem-do-alto-lidoso.html>.
- [16] **Santo, Marta. 2005.** *Dispositivos de passagens para peixes em Portugal.* Lisboa : DGRF, 2005.
- [17] **Suisted, Rob. 1995.** Nature's Pic Images. *www.naturespic.com*. [Online] 1995. <http://naturespic.com/NewZealand/image.asp?id=25699>.
- [18] **Tanchev, Ljubomir. 2005.** *Dams and Appurtenant Hydraulic Structures.* London : A. A. Balkema Publishers Leiden, The Netherlands, a member of Taylor & Francis Group plc, 2005. ISBN 90 5809 586 X.
- [19] **Thomas, Henry H. 1979.** *The engineering of large dams.* London : John Wiley and Sons, 1979.
- [20] **Waldrop, Mitch. 1963.** Darpa and The Internet Revolution. *www.darpa.mil*. [Online] 1963. www.darpa.mil.
- [21] **Wikipédia. 2013.** Barragem do Cabril - Wikipédia. *Wikipédia*. [Online] 4 de Maio de 2013. http://pt.wikipedia.org/wiki/Barragem_do_Cabril.
- [22] **William, G. e Beaujoint, N. 1967.** *"Les méthodes de surveillance des barrages au service de la Production Hydraulique d'Electricité de France." Problèmes anciens e solutions nouvelles.* Istambul : IX Congresso da ICOLD, 1967.