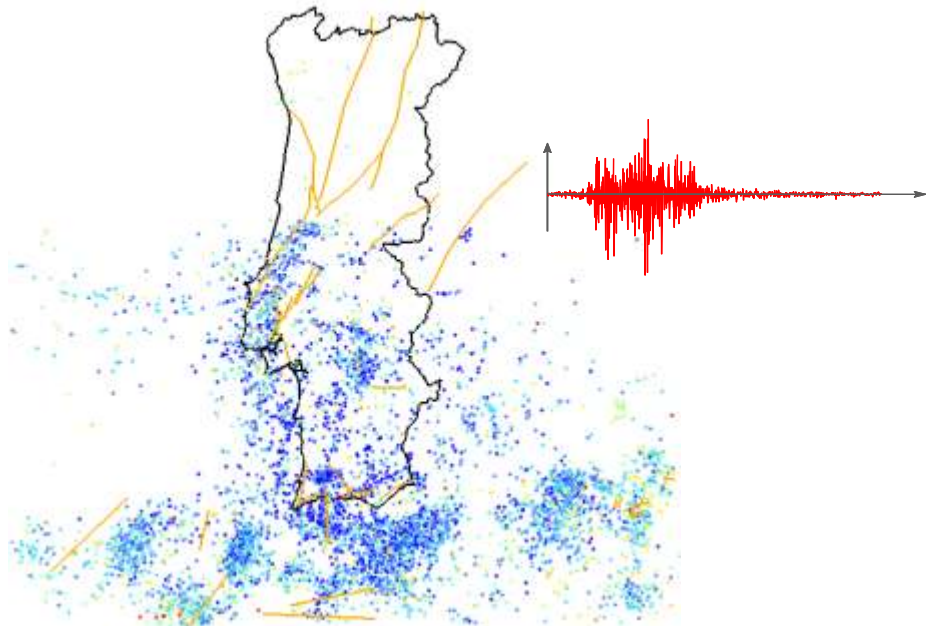




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil

ISEL



DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA SIG PARA APOIO AO ESTUDO DA SISMICIDADE EM PORTUGAL

MARCO FELICIANO GUERREIRO GONÇALVES

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)
Doutora Alexandra Maria Rodrigues de Carvalho, Investigadora Auxiliar (LNEC)
Mestre Paulo José de Matos Martins, Professor Adjunto (ISEL)

Júri:

Presidente: Mestre Cristina Machado, Coordenadora do ISEL (ISEL)
Vogais:
Mestre Nuno Filipe Neves Viegas da Silva Afonso (LNEC)
Doutor Sérgio Bruno Martins de Oliveira, Investigador Auxiliar (LNEC/ISEL)
Doutora Alexandra Maria Rodrigues de Carvalho, Investigadora Auxiliar (LNEC)
Mestre Paulo José de Matos Martins, Professor Adjunto (ISEL)

Dezembro de 2013

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação contou com o apoio de várias pessoas e entidades, aos quais quero expressar os meus sinceros agradecimentos.

Agradeço desde já ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, a oportunidade de realização do estágio no Departamento de Barragens de Betão (Núcleo de Modelação Matemática e Física) para desenvolver a minha dissertação.

Gostaria de agradecer ao Doutor Sérgio Oliveira toda a disponibilidade, incentivo e apoio que muito contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

À Doutora Alexandra Carvalho, agradeço as sugestões importantes, a disponibilidade e todo o material disponibilizado, sem o qual este trabalho não teria sido possível.

Ao Engenheiro Paulo Matos Martins, agradeço a oportunidade de realização deste trabalho, bem como a disponibilidade e ensinamentos transmitidos.

À Engenheira Inês Soares do ISEL queria agradecer por o tempo dedicado, a disponibilidade e a motivação transmitida. A sua contribuição foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de agradecer o apoio incondicional dos meus pais, irmã, cunhado, sobrinhos e aos meus avôs.

Gostaria de agradecer também aos meus amigos Carlos Almeida e André Silvestre.

Por fim um especial agradecimento á Carolina pela motivação, e pelo apoio, não só durante este trabalho, mas durante todos os anos académicos.

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA SIG PARA APOIO AO ESTUDO DA SISMICIDADE EM PORTUGAL

Resumo

Com esta dissertação pretende-se mostrar o interesse dos SIG (Sistemas de Informação Geográfica) no estudo da sismicidade em Portugal Continental salientando-se de que forma este tipo de ferramentas permite obter informação com interesse para a caracterização dos fenómenos sísmicos na perspectiva da Engenharia Civil.

Descrevem-se os princípios básicos envolvidos no estudo dos fenómenos sísmicos, referindo-se, em particular, os conceitos de magnitude, intensidade e zonamento sísmico; bem como a localização das principais falhas que existem no território nacional.

Apresentam-se os princípios de funcionamento dos sistemas de informação geográfica, onde se descrevem as cinco etapas principais para a construção destes sistemas: a pesquisa de dados, a criação de base de dados, a criação dos modelos SIG, a identificação do *software* a utilizar na exploração e a escolha da melhor solução para o problema.

Introduzem-se também alguns conceitos de Dinâmica de Estruturas, fundamentais para o cálculo de espectro de respostas e para a realização de uma análise dinâmica numa estrutura.

Para uma melhor interpretação dos objetos de estudo é exemplificado o funcionamento da plataforma SIG criada, com os fenómenos sísmicos incorporados, fazendo a demonstração do procedimento adotado desde a obtenção da informação; à organização dos dados; à implementação destes na plataforma SIG; como foram estudados; e por fim como foi tomada a decisão.

Para validar os objetivos do trabalho foi efetuado o estudo de alguns casos. Em primeiro lugar deu-se particular atenção à geofísica, onde se analisa a localização de falhas sísmicas através de focos sísmicos. Na área da engenharia civil, interliga-se o ArcGis e o MatLab com o objetivo de obter de espetros de resposta para acelerogramas sísmicos.

Por fim mostra-se que estes sistemas têm a vantagem de permitir uma efectiva colaboração dos utilizadores na recolha de informação, na ampliação dos elementos de estudo e no desenvolvimento de *software* associado. Assim facilitam o desenvolvimento de ferramentas com as quais é possível realizar estudos mais completos e rigorosos, não só a nível dos fenómenos sísmicos como também a nível de outros fenómenos associados.

Palavras-chave: Sismos, SIG, Geofísica, Engenharia Civil

DEVELOPMENT OF A GIS PLATFORM TO SUPPORT THE STUDY OF SEISMICITY IN PORTUGAL

Abstract

The main role of this thesis is to show that the Geographic Information Systems can become an important tool for providing useful information to characterize the seismic phenomena in Portugal, namely in the Civil Engineering perspective.

The description of the basic principles of earthquakes occurrence of is made; the characterization of multiple occurrences from these phenomena of particular interest to civil engineering is also done, including magnitudes, intensities and seismic zoning, as well as the location of major faults affecting the country and the description of its fundamental principles.

The operating principles of Geographic Information Systems, which describes the five essential steps for building this systems are presented: data research, creation of the databases, creation of the GIS models, the definition of software use and the choice of the best solution to the problem.

Main concepts of Structural Dynamics are essential to the calculation of spectrum and answers for performing and a dynamic analysis on a structure are also introduced.

For a better interpretation of the study, the operation of the GIS platform created is shown with earthquakes incorporated, making evidences of the procedures adopted to obtain the needed information, the organization of data and its implementation as well how the problem was studied and finally how the decisions were made.

To validate the objectives of the work some case studies were developed. First, particular attention was given to Geophysics and to the analysis of the location of seismic faults through seismic foci. In the area of civil engineering, it is shown how to use ArcGIS and Matlab in order to obtain seismic response spectra.

Finally, it is shown that this system can be greatly advantageous in that it allows an effective collaboration of users on information collection, in the expansion of elements of study and development of associated software. This allows the development of tools with which it is possible to conduct a far most complete and accurate study about the seismic phenomena and other phenomena related with seismicity.

Keywords: Earthquakes, GIS, Geophysics, Civil Engineering

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificação e enquadramento	1
1.2	Objetivos da dissertação	4
1.3	Estruturação do trabalho.....	6
2	UTILIZAÇÃO DOS SIG NO ESTUDO DO RISCO SÍSMICO EM PORTUGAL CONTINENTAL	9
2.1	Considerações iniciais	9
2.2	Sistemas de informação geográfica. Contexto histórico, definição e componentes básicos.....	10
2.2.1	Contexto histórico dos SIG	10
2.2.2	Definição de SIG.....	11
2.2.3	Arquitetura SIG e Componentes Básicos	12
2.3	Caracterização dos fenómenos sísmicos em Portugal. Generalidades e conceitos básicos	14
2.3.1	Os SIG e a historicidade sísmica.....	15
2.3.2	Os SIG e as escalas de classificação sísmica	17
2.3.3	Os SIG e as falhas geológicas	21
2.3.4	Os SIG e a caracterização da ação sísmica	24
2.3.5	Os SIG e a rede sísmica nacional	25
2.4	Considerações finais	26
3	CONCEITOS BÁSICOS DE DINÂMICA DE ESTRUTURAS.....	27
3.1	Considerações Iniciais	27
3.2	Sistemas de um grau de liberdade (1 G.L.)	27
3.2.1	Vibração livre sem amortecimento	28
3.2.2	Vibração livre com amortecimento	29
3.3	Vibração forçada	32
3.3.1	Resposta a forças com variação arbitrária ao longo do tempo. Integral de convolução	33
3.3.2	Resposta a acelerogramas sísmicos aplicados na base	36
3.3.2.1	Espectros de Resposta	37
3.4	Considerações finais	39

4 FERRAMENTAS DE APOIO AO ESTUDO DO RISCO SÍSMICO EM PORTUGAL CONTINENTAL.....	41
4.1 Considerações iniciais	41
4.2 Utilização o ArcGIS	42
4.3 Obtenção e manipulação de dados.....	45
4.3.1 Mapas	46
4.3.2 Sismicidade.....	47
4.3.3 Falhas geológicas.....	47
4.3.4 Intensidades sísmicas.....	48
4.3.5 Zonamento sísmico.....	48
4.3.6 Rede sísmica nacional.....	49
4.4 Importação de dados para ambiente SIG	49
4.4.1 Ambiente 2D.....	49
4.4.2 Ambiente 3D.....	53
4.5 Análise da informação em ambiente SIG	59
4.6 Utilização do MatLab	64
4.7 Considerações finais.....	65
5 EXPLORAÇÃO DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO.....	67
5.1 Considerações iniciais	67
5.2 Aplicação à geofísica	67
5.2.1 Estudo de posição de falhas	68
5.3 Exemplos de aplicação à Engenharia Civil	73
5.3.1 Criação de Espectros de Resposta para uma zona envolvente à Barragem do Cabril.....	73
5.3.2 Distância da Barragem do Cabril às falhas envolventes	76
5.4 Considerações finais.....	77
6 CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS.....	79
6.1 Síntese do trabalho.....	79
6.2 Desenvolvimentos Futuros.....	80

7	ANEXOS.....	81
8	BIBLIOGRAFIA.....	83

Índice de tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1 - Escala de Richter. Fonte: (Lopes, 2012)	18
Tabela 2.2 - Escala de Intensidades Mercalli Modificada. Fonte: (Lopes, 2012)	20
Tabela 2.3 - Aceleração máxima de referência para um período de retorno de 450 anos.	24

Capítulo 4

Tabela 4.1 - Atributos dos mapas.....	46
Tabela 4.2 - Tabela de atributos da sismicidade histórica.....	47
Tabela 4.3 - Atributos das falhas.....	47
Tabela 4.4 - Atributos da intensidade sísmica.....	48
Tabela 4.6 - Atributos do zonamento sísmico.....	48
Tabela 4.5 - Anexo NA.I do EC8.....	48
Tabela 4.7 - Dados da Rede sísmica nacional.....	49

Índice de figuras

Capítulo 1

Figura 1.1 – a) Falhas geológicas em Portugal. Epicentros sísmicos e magnitudes (desenvolvido em ambiente SIG no âmbito da dissertação). b) Movimento numa falha e acelerograma sísmico.	2
Figura 1.2 – Visualização 3D do traço e plano das falhas geológicas em Portugal Continental	3
Figura 1.3 - Princípio de funcionamento dos SIG: a) <i>Layer</i> referente aos planos das falhas. b) <i>Layer</i> referente aos rios e principais barragens de Portugal. c) <i>Layer</i> referente aos traços das falhas e aos focos sísmicos. d) Visualização resultante da sobreposição dos vários <i>layers</i>	5
Figura 1.4 - Exemplo de uma operação de análise em ambiente SIG.	6

Capítulo 2

Figura 2.1 - Sobreposição de <i>layers</i> . (MundoGeo)	12
Figura 2.2 - Modelo de funcionamento dos SIG.	13
Figura 2.3 - Teoria do Ressalto Elástico. (UALG).....	14
Figura 2.4 - Foco e epicentro. (UALG).....	15
Figura 2.5 - Sismicidade histórica e falhas do território nacional.	17
Figura 2.6 - Intensidades sísmicas máximas em Portugal Continental.	19
Figura 2.7 - Carta de Isossistas do sismo de 1755. (Piaget)	21
Figura 2.8 - Tipos de rotura sísmica e mecanismo focal associado. (Lopes, 2012)	22
Figura 2.9 - Geometria de uma falha. (Lopes, 2012)	22
Figura 2.10 – Batimetria e algumas das principais falhas em Portugal Continental.	23
Figura 2.11 - Ações Sísmicas em Portugal Continental. (IPQ, 2001)	25
Figura 2.12 - Estações de registo sísmico.	26

Capítulo 3

Figura 3.1 - Edifício de 1 piso e correspondente modelo de 1 GL.....	28
Figura 3.2 - Vibração livre sem amortecimento.....	29
Figura 3.3 - Vibração livre com amortecimento.	30
Figura 3.4 - Acelerações sísmicas na base das estruturas.	32
Figura 3.5 - Representação esquemática de uma força arbitrária decomposta numa sequência de impulsos infinitesimalmente próximos.....	33
Figura 3.6 - Representação esquemática do cálculo numérico do integral de Duhamel pelo método dos trapézios... ..	34
Figura 3.7 - História de cargas aproximada por troços lineares.	34
Figura 3.8 - Estrutura de 1GL sujeita a movimentos na base.....	36
Figura 3.9 - História de acelerações de um sismo.	37
Figura 3.10 - Resposta em deslocamentos de sistemas de 1 G.L.	38
Figura 3.11 - Resposta em pseudo-acelerações de sistemas de 1 G.L.....	38

Figura 3.12 - Espectros de resposta em deslocamentos com $\xi=1\%$	38
Figura 3.13 - Espectro de resposta de pseudo-acelerações com $\xi=1\%$	39

Capítulo 4

Figura 4.1 - Logotipo ArcGis. (Fonte: www.arcgis.com).....	42
Figura 4.2 - Onde podemos aceder ao ArcGIS. Fonte: www.arcgis.com.....	43
Figura 4.3 - Tabela de atributos referente a sismicidade histórica.....	44
Figura 4.4 – Exemplo de uma base de dados do tipo <i>File Geodatabase</i>	44
Figura 4.5 - Centro Geodésico de Portugal. Serra de Melriça.....	45
Figura 4.7 - Conversor do Site GPSVISUALIZER.....	46
Figura 4.6 - Malha para definição do relevo, referente à zona de Lisboa.....	46
Figura 4.8 - Transformação de Excel em <i>Shapefile</i> através de ArcGIS.....	49
Figura 4.9 - Importação de dados do Excel para ArcMap.....	50
Figura 4.10 - Dados georreferenciados.....	50
Figura 4.11 - Transformação do ficheiro de Excel num <i>shapefiles</i>	51
Figura 4.12 - Representação em <i>shapefiles</i> da historicidade sísmica e da Batimetria de Portugal.....	52
Figura 4.13 – Estrutura em <i>File Geodatabase</i>	52
Figura 4.14 - <i>Shapefile</i> do mapa de Portugal, zona do Algarve.....	53
Figura 4.15 - Sequência de criação de <i>TIN</i> , no ArcToolbox.....	53
Figura 4.16 - Criação de <i>TIN</i>	54
Figura 4.17 – Ficheiro <i>TIN</i> representando a batimetria e relevo da zona envolvente à foz do Rio Tejo.....	55
Figura 4.18 - Modelo de elevação construído a partir de uma <i>TIN</i>	55
Figura 4.20 - Representação dos focos sísmicos.....	56
Figura 4.19 - <i>TIN</i> da falha do vale inferior do Tejo.....	56
Figura 4.21 - Quadro das propriedades das <i>Layers</i> . <i>Shapefile</i> referente à sismicidade histórica.....	57
Figura 4.22 - Focos definidos em função da magnitude.....	58
Figura 4.23 - Sequência de criação de <i>layer</i>	58
Figura 4.24 - Seleção por atributos e respetiva representação.....	59
Figura 4.26 – Seleção por atributos: a) <i>Layer</i> referente à sismicidade histórica. b) <i>Layer</i> referente ao zonamento sísmico. c) <i>Layer</i> referente às intensidades máximas.....	60
Figura 4.25 - Seleção com base em vários atributo do mesmo <i>shapefile</i>	60
Figura 4.27 – Seleção por atributos das várias camadas. a) <i>Layer</i> dos focos sísmicos. b) <i>Layer</i> do zonamento sísmico. c) <i>Layer</i> das intensidades máximas. d) Resultados das três <i>Queries</i> realizadas.....	61
Figura 4.28 - Gráfico da história de magnitudes.....	62
Figura 4.29 - Processo de criação de Buffer.....	63
Figura 4.30 - Menu Buffer.....	63
Figura 4.31 – Buffer realizado aos sismos com magnitudes superiores a 7.....	64
Figura 4.32 - Leitura de um ficheiro criado no ArcGIS em MatLab.....	64
Figura 4.33 - Importação de um tema em formato <i>shapefile</i> para Matlab.....	65

Capítulo 5

Figura 5.1 - <i>Layers</i> utilizados no estudo de falhas. a) <i>Layer</i> da batimetria e relevo de Portugal. b) <i>Layer</i> das falhas mais importantes. c) <i>Layer</i> dos focos sísmicos.	69
Figura 5.2 - Resultado (em perspetiva) dos <i>layers</i> sobrepostos.	70
Figura 5.4 - Perspetiva da falha de Marques de Pombal e focos envolventes.	71
Figura 5.3 - Representação da falha do Marquês de Pombal e dos focos sísmicos envolventes.	71
Figura 5.5 - Gráfico representativo dos sismos ocorridos na envolvente da falha.	72
Figura 5.6 - Profundidade dos focos sísmicos.	72
Figura 5.7 - Procedimento para obtenção de espectro de resposta (Lopes, 2012).	73
Figura 5.8 - Representação da camada da rede sísmica nacional e das grandes barragens.	74
Figura 5.9 - <i>Buffer</i> envolvente à Barragem do Cabril.	74
Figura 5.10 - Aplicação para cálculo de espectro de resposta partindo de histórias de acelerações.	75
Figura 5.11 - <i>Layer</i> das Grandes Barragens e as falhas de Ponsul e Seia.	76
Figura 5.12 - Distância da Barragem do Cabril à falha de Seia-Lousã (à esquerda).	76

Lista de abreviaturas

<i>BLAS</i>	<i>Basic Linear Algebra System</i>
<i>DBMS</i>	<i>Data Base Management System</i>
<i>SIG</i>	<i>Sistema de Informação Geográfico</i>
<i>TIN</i>	<i>Triangulated Irregular Network</i>
<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System</i>

1

Introdução

1.1 Justificação e enquadramento

Portugal é um país com sismicidade relativamente elevada onde já foram registados diversos sismos de grande magnitude, destacando-se o sismo de 1 de Novembro de 1755, que atingiu a zona de Lisboa e costa algarvia, provocando uma forte destruição.

Para o estudo da sismicidade em Portugal, quer do ponto de vista dos Sismólogos ou dos Engenheiros Civis, que têm que projetar e dimensionar as suas estruturas para resistir a ações sísmicas, é de grande utilidade ter informação sobre a sismicidade disponível em plataformas próprias para esse efeito. No presente trabalho testou-se o potencial da utilização de uma plataforma baseada num Sistema de Informação Geográfica (SIG).¹

Com estes sistemas é possível visualizar graficamente os dados georreferenciados² disponíveis acerca da sismicidade em Portugal, muito mais eficazmente, nomeadamente: falhas geológicas (localização, traço da falha, plano da falha, ângulos e profundidades), sismicidade histórica e instrumental (localização, data de ocorrência, profundidade e magnitude), intensidade sísmica, zonamento sísmico e rede sísmica nacional, como se observa nas Figura 1.1 e Figura 1.2.

Para o desenvolvimento destes sistemas é necessário realizar uma investigação sobre os dados que são relevantes para o trabalho. É indispensável definir o objetivo do trabalho, para determinar quais os dados geográficos que interessa incluir no estudo.

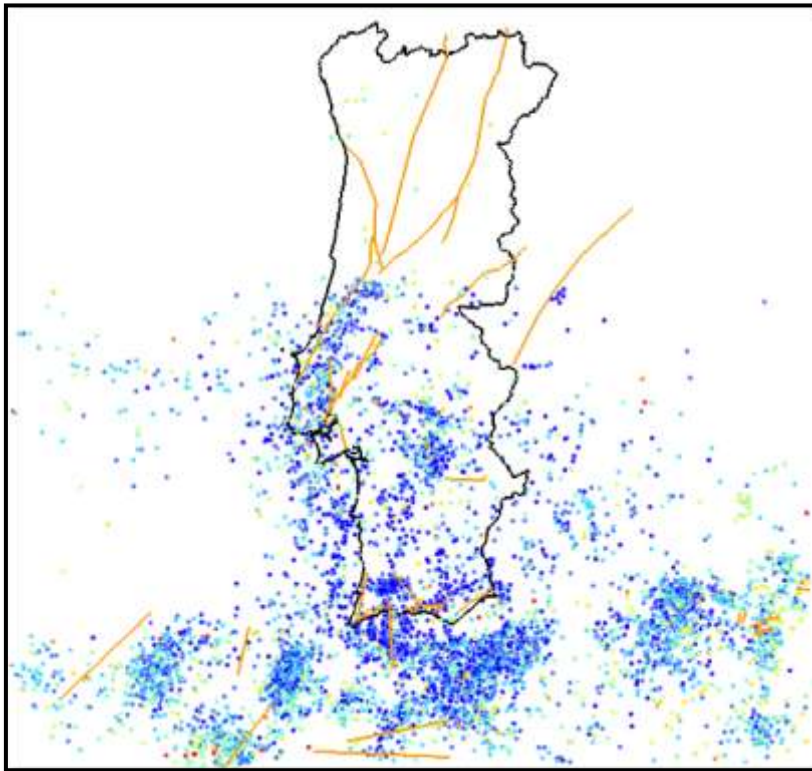
¹ Um SIG tem a potencialidade de juntar uma base de dados relacional de informação alfanumérica com capacidades gráficas e de desenho, tirando partido do chamado geoprocessamento, ou seja, da possibilidade de efetuar *queries* (perguntas) à base de dados tendo por base questões geográficas.

Adicionalmente, estes sistemas têm a capacidade de efetuar o chamado geoprocessamento, que corresponde a análises espaciais e a *queries* que dão resposta a questões espaciais, o que não acontecia com os anteriores sistemas de bases de dados e programas de desenho.

² A Georreferenciação é um processo de levantamento, de qualquer ponto da superfície terrestre, tornando as suas coordenadas conhecidas num dado sistema de referência,.

Uma vez definidos os dados a incluir, procede-se à sua gestão e manipulação, para que o resultado do estudo proporcione aos utilizadores uma ferramenta útil. A manipulação e análise de dados em sistemas SIG pode ser efetuada recorrendo a *software* especializado, como é o caso do ArcGIS que foi o *software* SIG adoptado para desenvolver o presente trabalho (é de referir que também existe *software* SIG *open source*, compatível com o ArcGIS, como é o caso do conhecido Quantum GIS).³

a)



b)

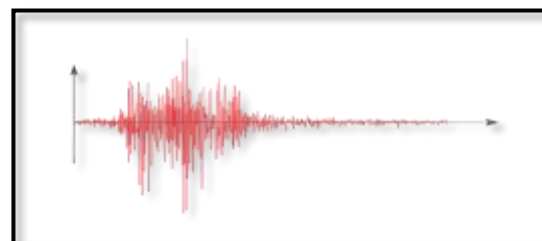


Figura 1.1 – a) Falhas geológicas em Portugal. Epicentros sísmicos e magnitudes (desenvolvido em ambiente SIG no âmbito desta dissertação). b) Movimento numa falha e acelerograma sísmico.

³ A escolha do *software* ArcGIS deve-se ao facto do ISEL possuir esse *software*, e é permitido aos alunos terem uma licença de estudante.

O ArcGIS caracteriza-se por ser um *software* de fácil manuseamento, e que permite visualizar, manipular e organizar a informação geográfica. Encontra-se organizado de forma extremamente clara de forma a poder-se retirar o máximo partido das suas funcionalidades.

A aplicação ArcGIS é composta por vários módulos, dos quais se destacam o ArcMap, o ArcCatalog e o ArcScene. O primeiro permite uma visualização de dados geográficos em 2D e a visualização das tabelas alfanuméricas de dados. Permite ainda executar inúmeros tipos de análise aos elementos de estudo a nível espacial. O segundo é responsável pela criação e gestão do sistema de ficheiros que incorporizam os vários formatos de bases de dados disponíveis. Por fim, o ArcScene desenvolve-se num ambiente em 3D, como se pode observar na Figura 1.2 e permite efetuar os mesmos tipos de análise que o ArcMap, mas em ambiente 3D.

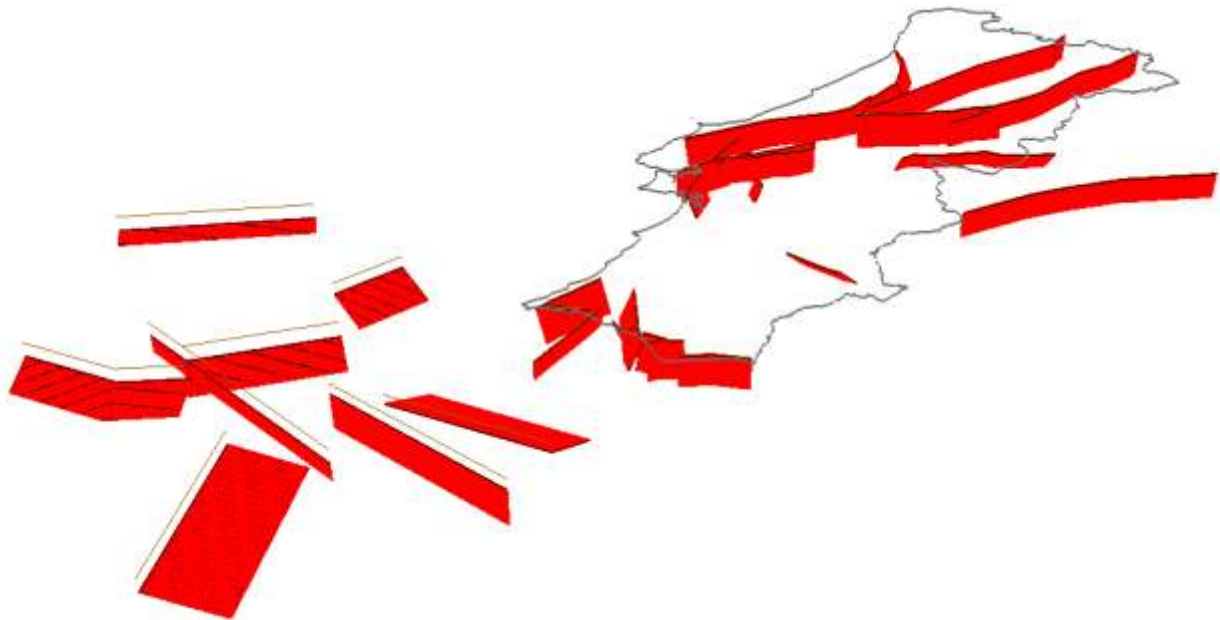


Figura 1.2 – Visualização 3D do traço e plano das falhas geológicas em Portugal Continental

Por fim, refere-se também a utilização do ArcGlobe, que é também um visualizador 3D equivalente ao conhecido Google Earth, no qual as projeções 3D da informação geográfica são efetuadas sobre o globo terrestre.

1.2 Objetivos da dissertação

Tendo em consideração o até aqui exposto, existe a necessidade de estabelecer o objetivo de observar os fenômenos de origem sísmica e de aceder a informação mais atualizada e mais precisa sobre a sismicidade. Igualmente perceber características geomorfológicas das principais falhas do nosso território que permitam, por exemplo, simular cenários sísmicos com origem nessas falhas.

O desenvolvimento de uma plataforma que contenha informação específica sobre os vários fatores de influência sísmica e a possibilidade de cruzar os vários dados sobre essa informação, irá contribuir para a realização de estudos de sismicidade e estudos de segurança de estruturas sob ações sísmicas.

Assim para uma melhor organização e facilidade no estudo da informação, pretende-se criar um sistema SIG, que inclua os dados agrupados de acordo com os diversos temas de interesse. A sismicidade histórica e as falhas geológicas que existem no território nacional são os principais temas abordados neste estudo, porém dados acerca do relevo; batimetria; rios; rede sísmica nacional; e escalas de classificação sísmicas; são temas igualmente apontados.

A base de dados visa fornecer o suporte de informação para o desenvolvimento de modelos de análise em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), e caracteriza-se por ser uma ferramenta que permite trabalhar com informação espacial, integrando e sobrepondo vários tipos de informação.

O processo passa pela criação de uma estrutura de dados compatível com o ArcGIS, como o formato *shapefile*⁴, contendo dados geoespaciais, para uso direto no ArcGIS, mas permitindo a exportação para outras plataformas, como o MatLab.

As *shapefiles* contêm as informações que foram criadas na base de dados e são independentes umas das outras, sendo possível obter a informação de um determinado ponto, linha ou região comum a várias *shapefiles* sobrepostas.

Estes sistemas funcionam por “camadas” de informação ou *layers* e o interesse do SIG é que permitem a sobreposição dessas *layers*⁵ (Figura 1.3). Com esta sobreposição é possível cruzar informação respeitante a uma determinada localização geográfica. Deste modo, pode-se

⁴ O formato *shapefile* é um formato de dados nativo do ArcGIS, desenvolvido pela ESRI, a empresa que comercializa o ArcGIS e que assenta na organização dos dados num conjunto de vários ficheiros de dados relacionados que ficam armazenados numa pasta do sistema operativo. Não requer cuidados especiais no seu manuseamento e são muito robustos. Por esse motivo, ao longo dos anos tornaram-se num dos standards de importação e exportação de dados entre sistemas SIG, promovendo a sua interoperabilidade.

⁵ Na dissertação será utilizado o termo *layer* para designar as “camadas” de representação gráfica da informação nos temas a disponibilizar no ArcGIS. O termo “camada” será utilizado para a designação das camadas geológicas que intervêm na caracterizam os fenômenos sísmico.

facilmente obter um mapa onde aparece toda a informação que seja útil para analisar diversos fenómenos. Esse cruzamento da informação possibilita vários estudos de análise espacial com base nos vários parâmetros.

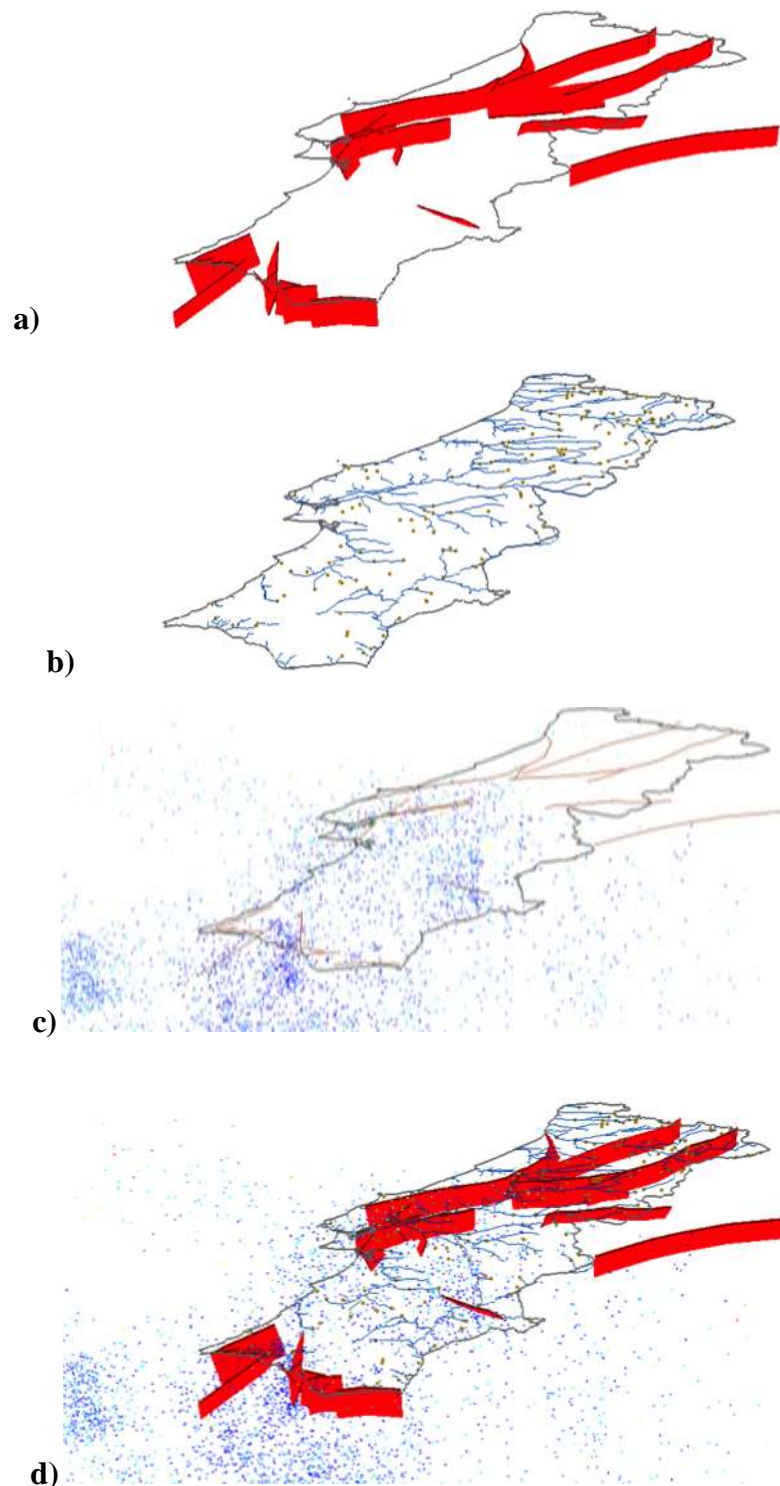


Figura 1.3 - Princípio de funcionamento dos SIG: a) *Layer* referente aos planos das falhas. b) *Layer* referente aos rios e principais barragens de Portugal. c) *Layer* referente aos traços das falhas e aos focos sísmicos. d) Visualização resultante da sobreposição dos vários *layers*.

Os SIG permitem ainda realizar diferentes operações de análise (Figura 1.4), como calcular distâncias ou identificar os elementos que se encontram em determinados locais ou que tenham determinadas características.

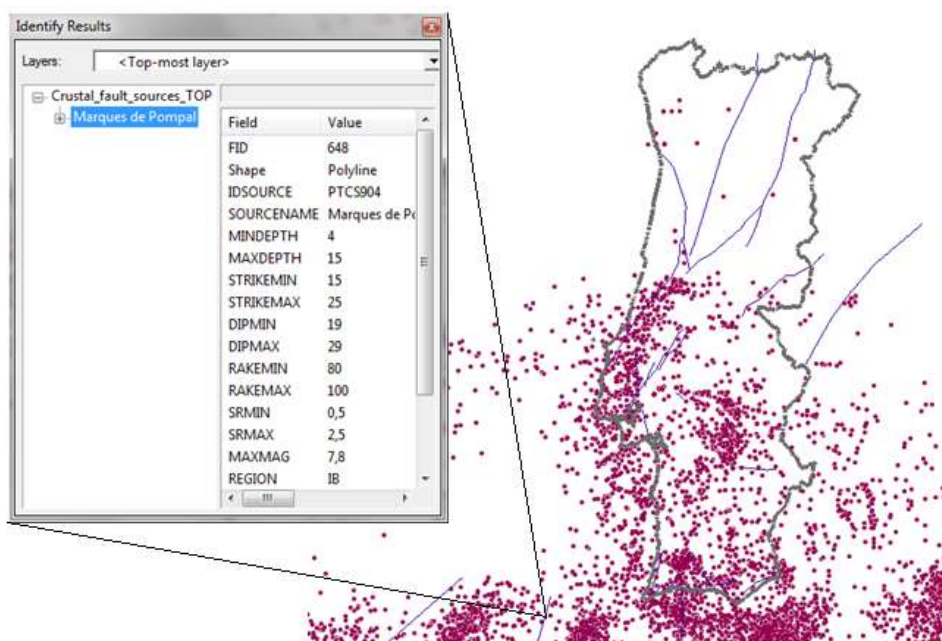


Figura 1.4 - Exemplo de uma operação de análise em ambiente SIG.

Como já foi referido, o ArcGIS foi a plataforma utilizada para representação dos dados, mais propriamente o ArcMap onde foi desenvolvido um estudo numa plataforma 2D. No entanto, a necessidade de observação dos dados num formato 3D, levou a explorar a plataforma ArcScene, sendo assim possível ter uma percepção muito mais real do ambiente que nos rodeia, nomeadamente pela observação conjunta de todos os “níveis de informação” (as *shapefiles* ou as *layers* formadas a partir destes).

1.3 Estruturação do trabalho

Neste ponto, apresenta-se resumidamente os tópicos a abordar na presente dissertação.

Capítulo 2 – Utilização dos SIG no Estudo do Risco Sísmico em Portugal Continental

Numa primeira fase, expõem-se os SIG, no seu contexto histórico, as suas componentes básicas e a sua importância.

Apresentam-se inicialmente conceitos mais elementares dos sismos, através do enquadramento histórico e de claras explicações para a sua causa. Aprofunda-se a definição dos

conceitos geofísicos sobre as falhas geológicas e na fase final do capítulo menciona-se o Zonamento Sísmico, segundo o Eurocódigo 8.

Capítulo 3 – Conceitos Básicos de Dinâmica de Estruturas

Definem-se os conceitos básicos de Dinâmica de Estruturas, dando-se principal atenção ao método de obtenção de espectros de resposta através de histórias de acelerações medidas num local, e ao procedimento de um cálculo de estudo dinâmico de uma estrutura com um grau de liberdade.

Capítulo 4 – Ferramentas de Apoio ao Estudo Risco Sísmico em Portugal Continental

Desenvolve-se o estudo do risco sísmico em Portugal Continental, dando a conhecer como se realiza a obtenção de dados, como são manipulados, como é feita a análise num ambiente SIG, qual é o software utilizado e, por fim, como é tomada a decisão. É ainda feita uma introdução ao software MatLab.

Capítulo 5 – Exploração do Sistema Desenvolvido

Mostram-se várias aplicações do programa ArcGIS nas áreas da Geofísica e da Engenharia Civil.

No âmbito da Geofísica é possível mostrar, num ambiente em três dimensões, que a aglomeração de vários focos sísmicos pode significar a existência de falhas até agora desconhecidas.

No âmbito da Engenharia Civil, interligando o ArcGIS e o MatLab, desenvolve-se uma aplicação que permite ler ficheiros *shapefile* que contêm dados de histórias de acelerações que levam posteriormente à obtenção de espectros de resposta.

Capítulo 6 – Conclusões e Perspetivas Futuras

São apresentadas as principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho.

Também se apresentam algumas sugestões para o desenvolvimento de futuros estudos e propostas de dados a incluir num SIG para apoio ao estudo da sismicidade em Portugal. Prevê-se assim a possibilidade de uma análise mais específica em estruturas onde se pretenda informação sobre sismos em particular.

2

Utilização dos SIG no estudo do risco sísmico em Portugal Continental

2.1 Considerações iniciais

Neste capítulo apresenta-se uma síntese dos principais temas da dissertação. Numa primeira fase surge uma introdução sobre os Sistemas de Informação Geográfica, expondo a sua evolução e a sua forma de funcionamento. Numa segunda fase, aborda-se a temática da sismologia e todos os efeitos provenientes desta.

Os sistemas de informação geográfica são conhecidos por serem uma ferramenta de fácil manuseamento, que disponibiliza informações de forma clara e objetiva. Os fenómenos sísmicos são caracterizados pela sua imprevisibilidade, pois nunca se sabe quando poderão acontecer nem com que grau de intensidade.

Aliar os SIG ao estudo da sismologia em Portugal é o desafio deste trabalho. Este capítulo pretende desta forma enquadrar o leitor nos princípios básicos dos SIG e da sismologia no nosso país.

A informação relativa a fenómenos sísmicos encontra-se muito dispersa e muitas vezes pouco relacionada. No entanto, é importante que todos os elementos que levam à ocorrência de um sismo e todas as conclusões daí retiradas estejam interligadas.

É importante assim existir um sistema que contenha toda a informação relativa a este fenómeno de forma a facilitar o acesso a dados de suma importância, não só na engenharia civil, mas também em outras áreas científicas.

A criação de uma base de dados, feita em colaboração entre várias entidades e vários coadjutores independentes, iria converter este sistema numa ferramenta de elementar importância e de fácil acesso, com resultados previsivelmente de maior interesse.

2.2 Sistemas de informação geográfica. Contexto histórico, definição e componentes básicos

Neste ponto refere-se o contexto histórico no qual os SIG se desenvolveram, explicando a evolução que estes tiveram ao longo dos séculos. Para um melhor entendimento sobre o que é um SIG, será feita referência a autores que desenvolveram os SIG e os modelaram na forma que hoje os conhecemos. Numa fase final serão identificados os componentes básicos que constituem os SIG e apresentada a sua definição.

2.2.1 Contexto histórico dos SIG

A ideia de representar camadas diferentes de dados em sobreposição num mapa é um conceito que apareceu muito antes dos primeiros computadores. O cartógrafo francês Louis-Alexandre Berthier foi um dos primeiros impulsionadores desta técnica, executando pela primeira vez mapas da batalha de Yorktown, na Revolução Americana. Os seus mapas mostravam os possíveis movimentos de tropas através deste recurso (BRETERNITZ, 2001).

No início do século XIX, surgiram as primeiras utilizações com carácter empresarial, representadas no "*Atlas to Accompany the Second Report of the Irish Railway Commissioners*", no qual estavam representados *layers* com dados acerca da população, do fluxo de tráfego, de geologia e de topografia, todas estas informações, sobrepostas no mesmo mapa.

O Dr. John Snow realizou uma das primeiras análises geográficas para determinar o local onde se desenvolvia um surto de cólera. Desenvolveu então um mapa onde estavam registadas as localizações dos casos de morte por cólera no centro de Londres em 1854 e após o estudo deste mapa descobriu um poço contaminado que desencadeara a doença.

Atualmente o desenvolvimento dos SIG é caracterizado por vários aspetos que geraram uma mudança na forma de pensar e atuar da comunidade técnica e científica, destacando-se os seguintes fatores:

- Progressos na tecnologia computacional;
- Aumento do conhecimento social, com a sociedade impondo os seus direitos de maneira mais incisiva;
- Necessidades de integração das informações sobre transportes, rotas, destinos, origens, tempos.

No entanto a maior contribuição para o desenvolvimento dos SIG é proveniente de Harvard, onde Howard Fischer começou estudos para o desenvolvimento de um software de mapeamento para uso geral. Criou-se então o "*Harvard Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis*" que se caracterizou por ser um local que levou a um progresso enorme dos SIG até aos anos 80. Todo o *software* desenvolvido por Howard foi muito utilizado para a criação dos primeiros SIG e, muitas das bases por ele desenvolvidas, são ainda hoje utilizadas.

2.2.2 Definição de SIG

Os Sistemas de Informação Geográfica são uma ferramenta com enorme potencial e em constante desenvolvimento. Os SIG têm a capacidade de aliar a informação oriunda de variadas fontes, como por exemplo informação de sensores espaciais ou informação recolhida com GPS. A nível da engenharia civil, o estudo de estruturas e o seu comportamento ao longo do tempo está cada vez mais dependente dos SIG, pois permite informação mais organizada, detalhada e em menores intervalos de tempo, como por exemplo no estudo de deslocamentos devidos a fenómenos naturais.

A forma mais simples de definirmos um sistema de informação geográfica é ser um conjunto de ferramentas computacionais que permitem trabalhar com informação espacial (geográfica), integrando e sobrepondo vários tipos de informação, como se pode observar na Figura 2.1. No entanto existem especialistas que chegam inclusive a considerar os SIG como uma ciência e não como uma ferramenta (Goodchild, 1991).

Apesar desta variedade de definições (Clarke, 2010), define uma série de características comuns e componentes que podem ser usados para dar aos SIG uma definição funcional:

- conjunto de dados associados a atributos espaciais;
- sistema de classificação dos vários tipos de atributos;
- repositórios ou sistema de dados comuns;
- capacidade do sistema para recolha de dados;
- restabelecimento, manipulação e criação automática de mapas.

Resumidamente pode-se considerar um SIG como sendo:

- um sistema que permite escolher e utilizar vários tipos de ferramentas;
- um sistema desenvolvido e suportado por computador;
- um sistema que permite estudar várias opções e que ajuda na decisão;
- uma tecnologia que fornece informação atualizada e precisa.

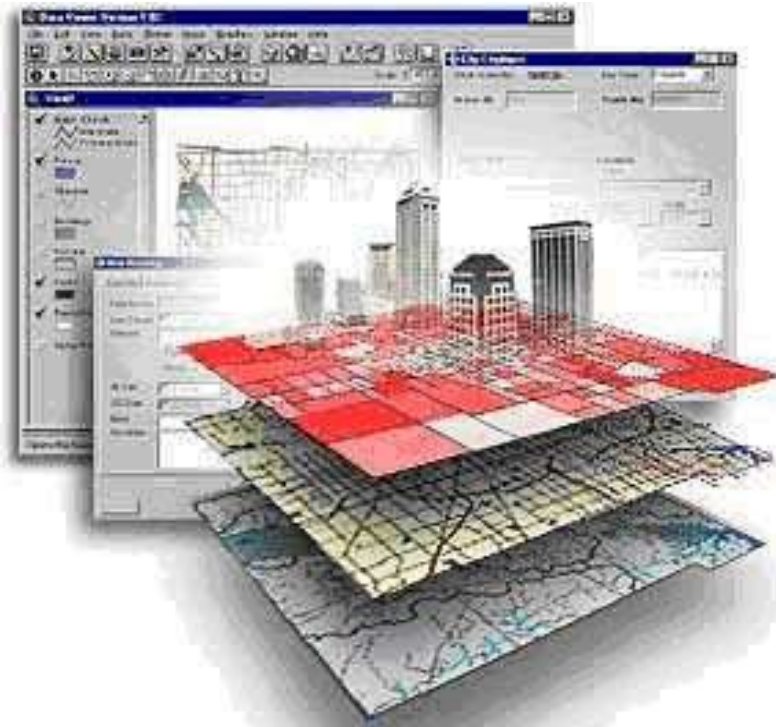


Figura 2.1 - Sobreposição de *layers*. (MundoGeo)

2.2.3 Arquitetura SIG e Componentes Básicos

A arquitetura SIG envolve três “camadas”: a visualização, as ferramentas de geoprocessamento e os dados (Figura 2.2). A primeira camada referente à visualização e manipulação permite utilizar funções básicas de visualização de objetos tradicionais e georreferenciados e oferece funções para manipulação de objetos. A segunda camada corresponde à representação do modelo, este disponibiliza serviços de manipulação de grande qualidade para atributos convencionais, e ainda permite representações *raster* e vetorial. A última camada oferece serviços de armazenamento, dividida em dados não espaciais, dados em formato *raster* e em formato vetor.

Os componentes básicos dos SIG permitem um desempenho claro e racional desta plataforma. Entre os diversos elementos, que constituem os SIG, destacam-se os seguintes:

Hardware – houve uma grande mudança no tipo de computadores e periféricos onde o SIG é desenvolvido, tal facto levou a um rápido desenvolvimento do *hardware*⁶ de computador e fez com que os SIG passassem a ser desenvolvidos nos simples ambientes *desktop*, em detrimento dos computadores *mainframe*.

⁶ Parte física que constitui o computador.

Software – os *software*⁷ classificam-se como sendo a parte lógica de um computador, e tem como principal função fornecer instruções para o *hardware*.

Dados – fazem a representação do mundo real nos modelos computacionais. Caracterizam-se por ser o fator que consome mais tempo e aquele que demora mais a ser implementado nos SIG. A sua disponibilidade varia com a área, sendo que na maior parte dos casos a informação está dispersa e desorganizada.

Método – é a estratégia, a forma de organização e as práticas utilizadas com a qual as plataformas SIG são desenvolvidas. O método deve estar ligado a todos os outros sistemas de organização para um aproveitamento máximo das suas capacidades.

Pessoal – os SIG são constituídos por inúmeras ferramentas, tal facto implica que para se usufruir na plenitude do sistema, o programador deva ter uma formação que lhe permita desenvolver qualquer projeto eficazmente. Ensinar, e manter pessoal qualificado é talvez o ponto mais importante para o desenvolvimento de um SIG com sucesso (Matos, 2008).



Figura 2.2 - Modelo de funcionamento dos SIG.

⁷ Sequência de instruções escritas, que são lidas pelo computador e posteriormente executadas por este.

2.3 Caracterização dos fenómenos sísmicos em Portugal. Generalidades e conceitos básicos

Segundo Mário Lopes (Lopes, 2012), a origem dos fenómenos sísmicos tem tido várias explicações e conotações ao longo do tempo: inicialmente especulou-se que fossem castigos aplicados pelos deuses da antiguidade ou, na Grécia antiga supôs-se que eram provenientes de ventos ou marés no interior da terra. No entanto só em 1906, após o sismo ocorrido na cidade de São Francisco, Califórnia, H.F. Reid estabeleceu a teoria do ressalto elástico (Figura 2.3).

Esta teoria parte do princípio que a litosfera era composta por várias placas indeformáveis e que estas se deslocariam sobre a astenosfera. Forças desenvolvidas na astenosfera produziriam deslocamentos lentos na litosfera, que conseqüentemente iriam provocar a colisão e o desligamento das várias placas, originando uma libertação imensa de energia nos locais onde ocorressem movimentos. Quando a tensão de corte atingisse o valor crítico, ou seja o seu valor fosse superior ao valor de resistência do atrito, dava-se uma movimentação brusca e repentina, onde as rochas nos lados da fronteira ressaltavam elasticamente, libertando a energia acumulada e por sua vez, originando o sismo.

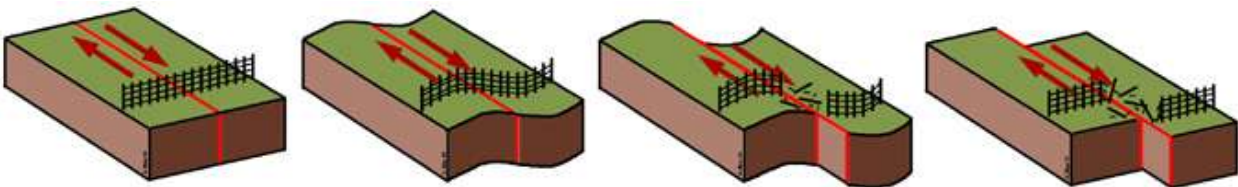


Figura 2.3 - Teoria do Ressalto Elástico. (UALG)

Os sismos podem no entanto ter outras origens como por exemplo a atividade vulcânica ou, em casos mais excepcionais, deslocamentos superficiais do terreno (como é o caso dos escorregamentos e dos abatimentos de terras), sendo estes classificados como sismos de origem natural.

Para além dos sismos de origem natural, existem ainda os sismos induzidos, que são diretamente associados a ação humana. Podemos ter como exemplo as explosões mineiras, a extração de minerais ou a queda de grandes edifícios.

Dentro deste contexto interessa ainda explicar alguns termos relacionados com os fenómenos sísmicos, que irão ter interesse no decorrer deste trabalho, como é o caso do foco sísmico, do epicentro sísmico, da magnitude e da intensidade sísmica.

O ponto onde se inicia a libertação de energia no plano de falha é chamado de foco ou hipocentro e, o local à superfície, na vertical do foco tem o nome de epicentro (Figura 2.4).

Há um problema de diretividade, direção da rotura na falha, que pode fazer com que a zona mais intensa não seja na vertical do foco (o hipocentro) mas, por exemplo, a zona mais próxima do fim do plano da falha.

A magnitude é uma medida da energia libertada por um sismo, no plano de falha. A intensidade avalia os efeitos do evento sísmico.

Toda a zona em redor do epicentro é aquela que é mais afetada num abalo sísmico. Assim, uma zona atingida com grande energia sísmica, se for desabitada os estragos serão muito menores do que, por sua vez, na proximidade de uma zona edificada (Figura 2.4). Nas secções seguintes estes dois conceitos serão novamente introduzidos.

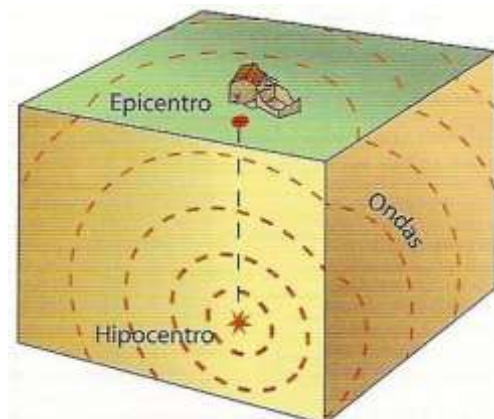


Figura 2.4 - Foco e epicentro (UALG).

Caso o sismo seja de origem vulcânica este ponto localiza-se quase a superfície, mas a energia libertada é muito menor. Os focos sísmicos mais profundos foram registados a 700km de profundidade, localizando-se a oeste da América do Sul. O foco sísmico está limitado a uma camada estreita localizada à superfície da terra, isto porque a energia derivada de um sismo é consequência de uma rotura frágil. Nas várias camadas constituintes a que tem uma rotura frágil é aquela que se situa mais a superfície, denominada de litosfera.

2.3.1 Os SIG e a historicidade sísmica

Portugal Continental caracteriza-se por ser uma zona que ao longo dos séculos tem sofrido eventos sísmicos de magnitudes moderadas a fortes (ANPC, 2013). O sismo mais forte data de 1 de Novembro de 1755, e é considerado um dos maiores de sempre, com uma magnitude estimada entre 8,5 e 9 na escala de Richter.

O território nacional está perto da zona de fronteira entre duas placas tectónicas, nomeadamente a Africana e a Euroasiática. A interação entre as duas placas origina uma atividade sísmica significativa. O estudo da sismicidade histórica mostra que vários sismos tiveram origem nesta fronteira.

Dos sismos que ocorreram perto desta fronteira destacam-se os seguintes:

- Ano de 60 a.C., provocou grandes destruições na costa portuguesa e originou um tsunami;
- Ano de 382 d.C., sentido em todo território e fez submergir algumas ilhas perto do Cabo de São Vicente;
- Ano de 1755 d.C., provocou imensos prejuízos no Algarve e em Lisboa, originando ainda um enorme tsunami;

Existirem no entanto outros sismos, provocados por falhas existentes no território nacional.

As zonas sísmicas mais importantes situam-se nos seguintes locais:

- Vale inferior do Tejo, que deu origem aos sismos de 1344, 13 de Agosto de 1899 e o de 23 de Abril de 1909, este último que provocou a destruição total de Benavente;
- Região do Algarve, onde se destacam as falhas de Loulé, nos sismos de 1587 e 12 de Janeiro de 1856, a falha de Tavira no sismo de 1722;
- Região de Moncorvo, que tem associada aos movimentos sísmicos a falha de Vilarica, responsável pelos sismos de 19 de Dezembro de 1751 e de 19 de Março de 1858;
- Região de Batalha, que sofreu grandes abalos em 1528 e a 21 de Fevereiro de 1980, provocados pela falha de Nazaré-Pombal (Senos, 2003).

Resumindo, existem dois tipos de ação sísmica acima referida, uma devido a sismos interplacas, que se caracterizam por terem elevada sismicidade, apresentando magnitudes superiores a 6, e períodos de retorno de algumas centenas de ano; outra devido a sismos intraplaca, ou seja, que acontecem no interior das placas, e se caracterizam por terem uma sismicidade moderada, podendo no entanto ocorrer sismos de elevada magnitude, mas com períodos de retorno na ordem dos milhares, ou até mesmo dezenas de milhares de anos. (Cabral, 1995)

Observando a Figura 2.5 é visível o aglomerado de epicentros na região sul de Portugal e na região do Vale do Tejo.

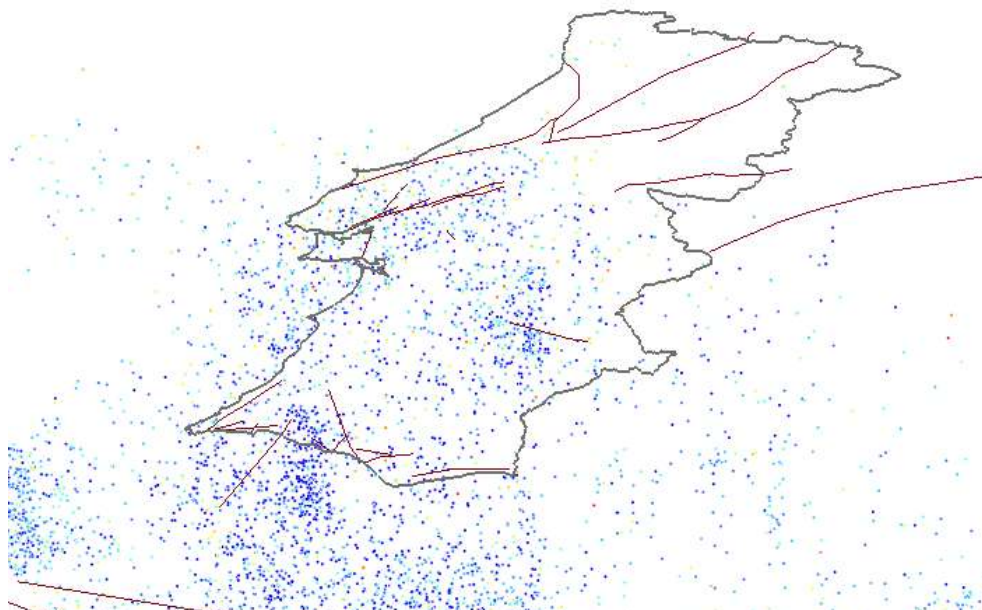


Figura 2.5 - Sismicidade histórica e falhas do território nacional.

A plataforma SIG desenvolvida ofereceu todas as informações relevantes sobre a sismicidade histórica e instrumental, com um registo de aproximadamente 2000 anos. Será assim possível saber a data em que ocorreram os sismos (com uma precisão de minutos), o local exato onde foi o epicentro, a profundidade do foco e a sua magnitude.

2.3.2 Os SIG e as escalas de classificação sísmica

A classificação dos fenómenos sísmicos é feita de várias formas, dependendo da unidade que se pretenda medir. Como já foi referido, na avaliação de um evento sísmico, recorre-se à escala da magnitude para determinar a quantidade de energia libertada a partir do foco, e à escala de intensidades para a avaliação do evento sísmico. Estas escalas mostram que existem várias intensidades associadas a uma magnitude, para cada evento sísmico. Este fato deve-se a que um sismo é sentido com diferentes intensidades, dependendo da distância ao epicentro, do tipo de solo, da qualidade das construções e da densidade populacional. (Melo, 2001)

Contrariamente à escala de intensidades, que se caracteriza por ser uma escala qualitativa, a escala que mede magnitudes provém dos sismogramas caracterizando-se por apresentar uma escala quantitativa. A escala de magnitudes mais utilizada é a Escala de Richter (Tabela 2.1), tratando-se de uma escala logarítmica, o que implica que a subida de uma unidade na escala representa um aumento da energia libertada cerca de trinta vezes maior. (Melo, 2001)

Tabela 2.1 - Escala de Richter. Fonte: (Lopes, 2012)

ESCALA DE RICHTER	
MAGNITUDE	EFEITOS
< 2	Regra geral não sentido perto do epicentro, mas registado em instrumentos de alta sensibilidade.
2.0 – 2.9	Difícilmente perceptível na proximidade do epicentro. Não afeta as construções.
3.0 – 3.9	Sentido por algumas pessoas.
4.0 – 4.9	Sentido pela maioria. Afeta as construções próximas do epicentro. Pequenos estragos
5.0 – 5.9	Forte. Moderadamente destruidor. Deslocações de mobiliário.
6.0 – 6.9	Destruidor em regiões populosas. Derrube de paredes.
7.0 – 7.9	Desastoso. Danos severos. Destruição de edifícios.
> 8	Catastrófico. Destrói as comunidades perto do epicentro.

A magnitude sísmica, segundo Richter, é determinada a partir do logaritmo da amplitude máxima, registada num sismograma por um sismógrafo colocado a 100 km do epicentro.

$$M = \log\left(\frac{A}{T}\right) + Y \quad (2.1)$$

sendo,

M – Magnitude sísmica

A – Amplitude máxima

T – Período

Y – Constante que depende da distância entre a estação sísmica e o epicentro sísmico

Os sismos com magnitude igual ou inferior a dois não são sentidos, apenas são registados por sismógrafos, no entanto, quando é superior a cinco já provocam danos materiais.

Ao contrário da magnitude, que como já foi referido mede a energia libertada por um sismo, a intensidade sísmica é um parâmetro que avalia os efeitos produzidos pelo mesmo, ou seja, avalia aquilo que foi sentido e o que sucedeu em determinada região.

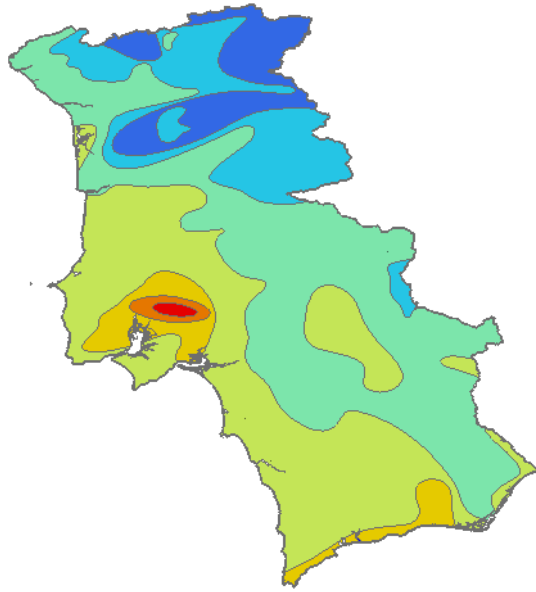


Figura 2.6 - Intensidades sísmicas máximas em Portugal Continental.

Do ponto de vista da engenharia civil, a escala de intensidades não é de grande utilidade quando se pretende dimensionar uma estrutura, pois apenas fornece o relato dos indivíduos que sentiram o fenómeno e a observação dos danos que foram causados pelo sismo. Por sua vez, fornece informação acerca da qualidade das estruturas, indicando o grau de destruição por estas sofridas. Este parâmetro é assim determinado mediante o preenchimento de um questionário padrão fornecido pelas entidades oficiais.

A Escala de Mercalli Modificada (Tabela 2.2) é a mais utilizada nos dias de hoje, e é dividida em doze pontos baseados na perceção e nos acontecimentos sentidos e observados pelos indivíduos.

Tabela 2.2 - Escala de Intensidades Mercalli Modificada. Fonte: (Lopes, 2012)

I	Não é sentido, apenas é registado por instrumentos.
II	Sentida apenas por poucos indivíduos em repouso e/ou em andares elevados.
III	Sentido por muitos dentro de casa. Objetos suspensos oscilam. Os indivíduos no exterior podem não identificar como um sismo.
IV	A maioria dos indivíduos dentro de casa sentem. Objetos suspensos oscilam. Pratos, e janelas e portas fazem ruído. Parece um camião pesado a chocar contra uma parede. Alguns indivíduos no interior de edifícios sentem. Automóveis estacionados oscilam.
V	Quase todos sentem. Pessoas adormecidas acordam. As portas abrem os fecham. Pratos quebram-se. Os quadros das paredes movem-se. Pequenos objetos movem-se ou tombam. As árvores podem abanar. Líquidos entornam-se de recipientes abertos.
VI	Todos sentem. É difícil andar. Objetos caem das prateleiras. Quadros caem das paredes. Móvel desloca-se. O estuque das paredes pode rachar. Árvores e arbustos abanam. Ligeiros danos em edifícios de fraca construção. Não há danos estruturais.
VII	É difícil permanecer de pé. Os condutores sentem os automóveis vibrar. Alguma mobília quebra-se. Caem tijolos soltos dos edifícios. Danos ligeiros a moderados em edifícios bem construídos. Danos consideráveis em edifícios de fraca construção.
VIII	Os condutores tem dificuldade em conduzir. Casas simplesmente apoiadas nas fundações podem deslocar-se. Estruturas como torres ou chaminés podem torcer-se e cair. Edifícios bem construídos sofrem danos ligeiros. Edifícios de construção fraca sofrem danos severos. Ramos de árvores quebram-se. Podem abrir gretas nas encostas se o solo estiver húmido. O nível de água nos poços pode variar.
IX	Edifícios bem construídos sofrem danos consideráveis. Casas simplesmente apoiadas nas fundações deslocam-se. Alguns canos subterrâneos quebram-se. O solo abre fendas.
X	A maioria dos edifícios e as suas fundações são destruídos. Algumas pontes são destruídas. Barragens sofrem danos graves. Ocorrem grandes deslizamentos de terra. Água é lançada contra as margens de canais, rios ou lagos. O solo fende em grandes áreas. Linhas de caminho de ferro ligeiramente torcidas.
XI	A maioria dos edifícios colapsa. Algumas pontes são destruídas. Grandes fendas surgem no solo. Canalizações subterrâneas são destruídas. Linhas de caminho de ferro severamente destruídas.
XII	Destruição quase total. Objetos são atirados ao ar. O solo move-se em ondas. Grandes massas de rochas podem deslocar-se.

Após a ocorrência de um sismo os vários relatos são analisados. Determina-se assim a intensidade sísmica ocorrida nos diversos pontos e a localização do epicentro. A partir desse momento traça-se num mapa da região várias curvas que representam linhas com níveis de intensidade diferentes, denominando-se linhas isossistas. Essas linhas unem pontos com igual intensidade sísmica (Figura 2.7).



Figura 2.7 - Carta de Isossistas do sismo de 1755. (Piaget)

A plataforma SIG permite aceder ao mapa de intensidades máximas de Portugal Continental, identificando as localizações onde os danos foram maiores.

2.3.3 Os SIG e as falhas geológicas

A origem dos sismos deriva da libertação de energia ocorrida num plano de falha. Uma grande quantidade de energia armazenada, num espaço de tempo impossível de prever, é libertada com uma determinada magnitude, podendo provocar grande destruição.

Uma falha é um acidente tectónico originado por fratura do terreno, ao longo da qual houve deslocamento relativo, maior ou menor, dos dois compartimentos contíguos.

As falhas desenvolvem-se quando as tensões que se exercem nas rochas ultrapassam o ponto de rutura. Existem assim três tipos de falhas principais: as normais, que se formam em ambientes distensivos, as inversas que se formam em ambientes compressivos e as de desligamento ou cisalhamento que se formam em ambientes de tensões tangenciais (Figura 2.8). Porém, os dois primeiros tipos têm normalmente a componente de desligamento associada, não sendo comum encontrar-se falhas "puras".

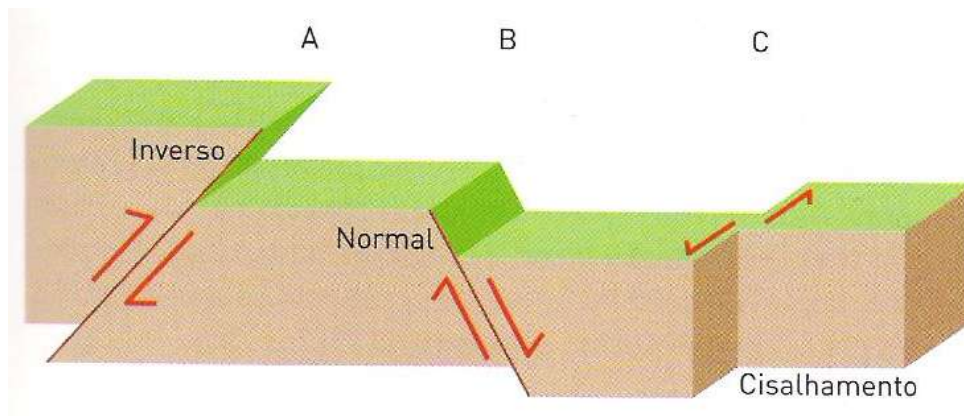


Figura 2.8 - Tipos de rotura sísmica e mecanismo focal associado. (Lopes, 2012)

Interessa no entanto abordarmos o tema das falhas geológicas num campo mais pormenorizado.

Uma falha geológica é separada por dois blocos que se encontram normalmente um sobre o outro (Figura 2.9). A área da falha que divide os blocos denomina-se plano da falha. Esta caracteriza-se essencialmente pela direção e pela inclinação do plano de falha.

Devido à movimentação ocorrida na mesma, dois pontos previamente adjacentes (ditos pontos homólogos) ficam afastados de determinada distância. Essa distância é designada por rejeito da falha. As designações de rejeito horizontal (distância, na horizontal, que separa dois pontos homólogos), e rejeito vertical (distância, na vertical, que separa dois pontos homólogos) são também normalmente utilizadas. Em resultado, a adição vetorial destes dois rejeitos dá o rejeito real.

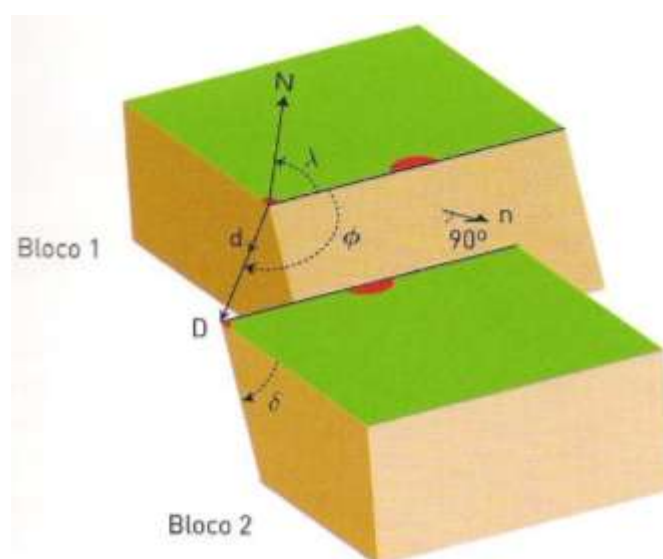


Figura 2.9 - Geometria de uma falha. (Lopes, 2012)

A interseção da falha com a superfície topográfica designa-se por traço de falha, o qual muitas vezes não é evidente devido à existência de solo e vegetação que o cobrem.

Os ângulos λ (azimute) e δ (inclinação) são os principais elementos da geometria da falha que pode também ser expressa pelo vetor de módulo unitário n . O movimento relativo entre os dois blocos é caracterizado pelo vetor unitário d , contido no plano da falha. O ângulo ϕ (rake) mostra o movimento relativo.

As falhas que afetam Portugal Continental (Figura 2.10) estão essencialmente situadas a Sul e na zona Centro, sendo as primeiras as que evidenciam uma maior atividade.

Os SIG terão um papel fundamental, pois permitem mostrar a localização destas falhas e ter todas as características relevantes acerca de cada uma, nomeadamente a sua localização, a sua profundidade, inclinação e direção. Para além dos aspetos mencionados foi desenvolvida uma plataforma em três dimensões que permite a observação numa perspetiva até agora pouco explorada, onde é possível efetuar medições 3D das suas posições até as estruturas construídas.

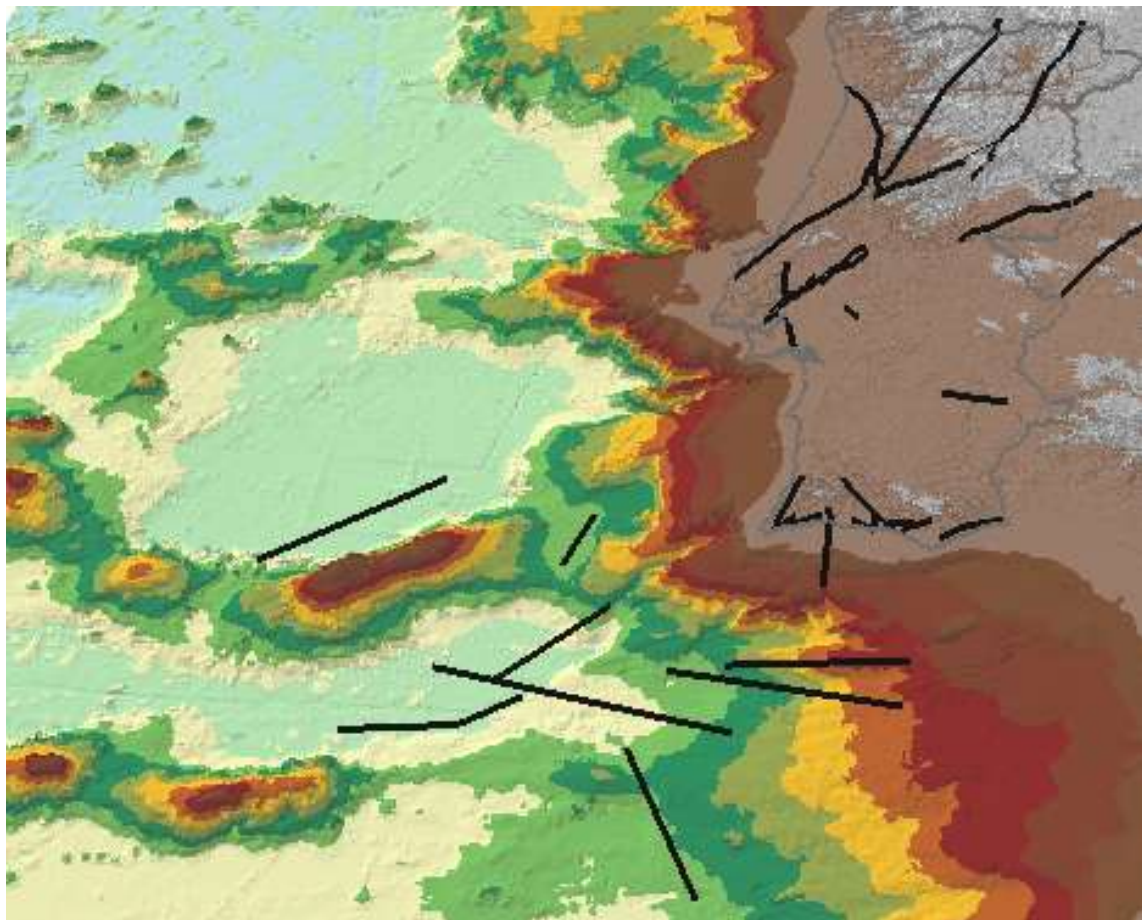


Figura 2.10 – Batimetria e algumas das principais falhas em Portugal Continental.

2.3.4 Os SIG e a caracterização da ação sísmica

O zonamento sísmico define-se como um elemento de apoio ao cálculo de ações sísmicas em estruturas. O seu objetivo é fornecer dados sobre a aceleração no solo, devido à ocorrência de sismos próximos ou afastados.

É um documento definido pelas autoridades nacionais e é estabelecido em termos de aceleração máxima de projeto de referência a_{gR} (aceleração no solo de referencia).

O zonamento sísmico proposto na NP-EN 1998-1 para o território continental português representa-se na Figura 2.11. Estes zonamentos são definidos para dois cenários, correspondente a uma ação sísmica afastada (sismo interplaca – tipo 1) e uma ação sísmica próxima (sismo intraplaca – tipo 2).

Os valores da aceleração máxima de referência (a_{gR}), para as várias zonas, num período de retorno $T=475$ anos, são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Aceleração máxima de referência para um período de retorno de 450 anos.

Acção sísmica tipo 1 (interplaca)		Acção sísmica tipo 2 (intraplaca)	
Zona sísmica	a_{gR} (m/s ²)	Zona sísmica	a_{gR} (m/s ²)
1.1	2,50	2.1	2,50
1.2	2,00	2.2	2,00
1.3	1,50	2.3	1,70
1.4	1,00	2.4	1,10
1.5	0,60	2.5	0,80
1.6	0,35	-	-

As principais fontes sísmicas localizam-se a sul do país, logo o zonamento para a ação sísmica interplacas tem valores de aceleração no solo a_{gR} maiores a sul, diminuindo para norte. As amplitudes das ondas sísmicas atenuam com a distância, por conseguinte o norte tem valores mais baixos. Se fosse efetuado um projeto de um edifício no norte do país, ou seja na zona 1.5, este teria que resistir a acelerações no solo muito inferiores em relação a mesma situação a sul.

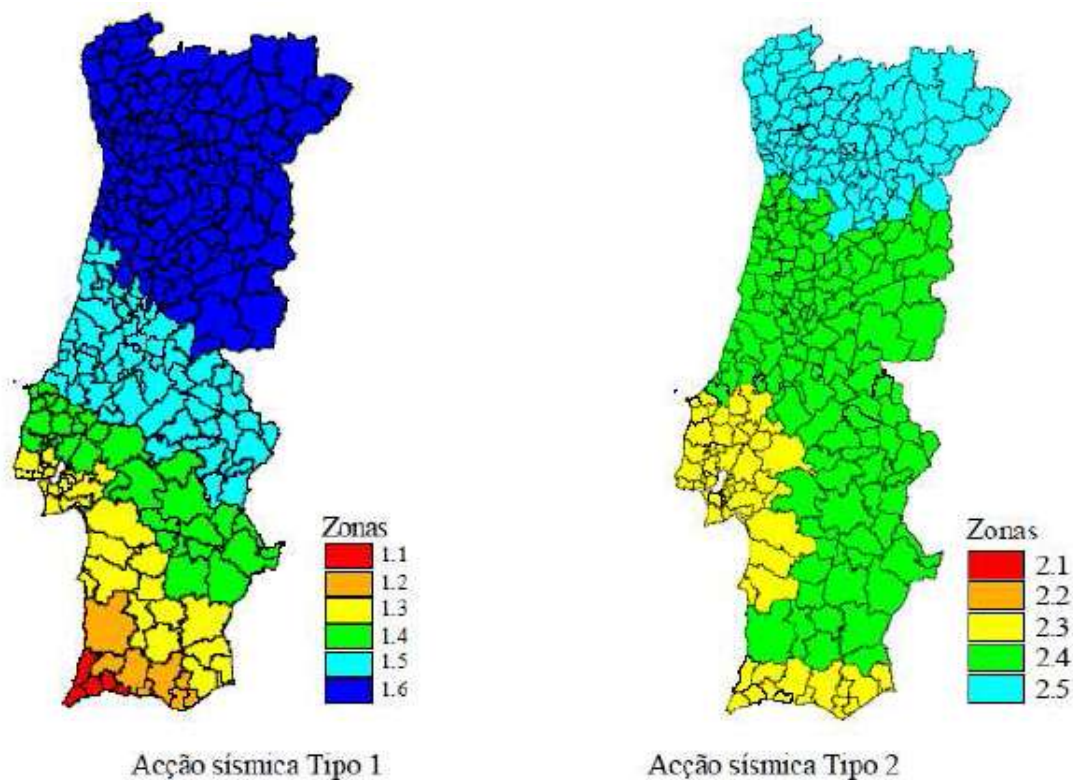


Figura 2.11 - Ações Sísmicas em Portugal Continental. (IPQ, 2001)

Numa plataforma SIG será possível a visualização dos mapas bem como toda a informação relativa à aceleração máxima de referência de ambas as ações sísmicas.

2.3.5 Os SIG e a rede sísmica nacional

As primeiras estações de registo sísmico foram instaladas no arquipélago dos Açores em 1902, no ano seguinte instalou-se a primeira em território continental, na cidade de Coimbra.

Hoje em dia estão instaladas só em Portugal Continental 27 estações de registo sísmico como está representado na Figura 2.12. A atual rede permite localizar eventos com magnitude mínima de 2,0 na escala de Richter, chegando a ser inferior a 1,0 no Algarve.

Todos os dados obtidos são compilados e arquivados e a partir deles são produzidos boletins sismológicos mensais, anuários e cartas de sismicidade que são distribuídos por diversas instituições científicas nacionais e internacionais. São criadas ainda bases de dados históricos e instrumentais e cartas de intensidades máximas. (Dias, 2013)

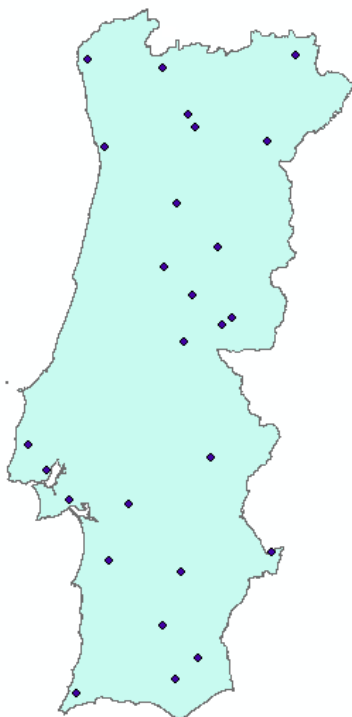


Figura 2.12 - Estações de registo sísmico.

O desenvolvimento de uma plataforma SIG permite ao utilizador retirar toda a informação técnica sobre as estações sísmicas, nomeadamente o tipo de equipamento que usam, a que altitude se encontram, a localidade, a localização exata, por quem é gerida, entre outros aspetos.

2.4 Considerações finais

No decorrer deste capítulo deu-se a conhecer os princípios básicos dos sistemas de informação geográfica. O enquadramento histórico em que estes se desenvolveram pretendeu clarificar o cenário em que surgiram os primeiros SIG's, aliados às necessidades de desenvolvimento tecnológico das sociedades atuais. As definições apresentadas por especialistas e os seus componentes básicos expressam elementos mais técnicos em relação ao tema, que são de extrema importância para a sua compreensão.

Abordaram-se vários aspetos relacionados com os fenómenos sísmicos e com as escalas que se utilizam para os quantificar, bem como o processo utilizado para a caracterização das intensidades e a utilidade dos SIG na consulta de dados referentes as regiões de Portugal.

Destacaram-se as falhas como principal fonte destes fenómenos, as suas características formais e a regulamentação associada. Por fim, deu-se a conhecer a Rede Sísmica Nacional e as suas bases de funcionamento.

3

Conceitos básicos de Dinâmica de Estruturas

3.1 Considerações Iniciais

Existem diversos tipos de ações que atuam nas estruturas de engenharia civil, induzindo respostas estáticas ou dinâmicas (Mendes, 2013).

Ações como a gravidade, são responsáveis pelas respostas estáticas, enquanto os sismos são responsáveis por respostas dinâmicas.

No nosso país é fundamental estudar o comportamento dinâmico das estruturas sob ações sísmicas pois encontramos-nos num local onde a atividade sísmica é considerável, existindo várias zonas de risco sísmico (Espada, 2010).

Neste capítulo é feita uma apresentação dos princípios básicos da dinâmica de estruturas apresentando-se o estudo pormenorizado dos osciladores de um grau de liberdade, referindo-se o interesse dos espectros de resposta utilizados na análise de modelos estruturais de vários graus de liberdade.

3.2 Sistemas de um grau de liberdade (1 G.L.)

Quando se pretende realizar o estudo dinâmico de uma estrutura simples como um edifício de um piso, pode-se utilizar como modelo um oscilador de um grau de liberdade do tipo sistema massa-mola: mola de rigidez k , massa m e amortecimento c .

Para exemplificar melhor os sistemas de um grau de liberdade apresenta-se o modelo físico de uma estrutura, representado na Figura 3.1 constituído por uma laje de aço com 1cm de espessura e 4 pilares de alumínio. Este edifício de 1 piso pode ser simulado através de um modelo de 1 G.L. correspondente ao deslocamento de translação do piso na direção de menor rigidez.



Figura 3.1 - Edifício de 1 piso e correspondente modelo de 1 GL.

Quando solicitamos esta estrutura por uma força variável ao longo do tempo $f(t)$, esta movimenta-se na direção do grau de liberdade considerado, partindo de uma posição de equilíbrio estático. O equilíbrio dinâmico verifica-se em cada instante t , onde todas as forças envolvidas no movimento devem estar em equilíbrio

$$fI(t) + fA(t) + fE(t) = f(t) \quad (3.1)$$

onde,

- $fI(t) = m \cdot \ddot{u}(t)$, que representa as forças de inércia
- $fA(t) = c \cdot \dot{u}(t)$, que representa as forças de amortecimento
- $fE(t) = k \cdot u(t)$, que representa as forças de restituição elásticas

Assim pode-se escrever a equação do movimento ou equação do equilíbrio dinâmico de forma diferencial, ficando com o seguinte aspeto:

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = f(t), \quad u = u(t) \quad (3.2)$$

3.2.1 Vibração livre sem amortecimento

No estudo do movimento oscilatório é conveniente começar por analisar a vibração livre sem amortecimento, que corresponde a uma situação em que as forças exteriores são inexistentes, ou seja, $f(t) = 0$, e o amortecimento é desprezado, ficando $c = 0$. Nesta situação só existe movimento se for imposto um deslocamento inicial e ou uma velocidade inicial.

Fica-se então com a seguinte equação do movimento:

$$m.\ddot{u} + k.u = 0 \quad (3.3)$$

Admitindo por simplificação que a massa e a rigidez tomam valores unitários ($m=1$ e $k=1$), as soluções da equação $u = u(t)$ devem corresponder a funções onde a 2ª derivada $\ddot{u}(t)$ somada com a própria função $u(t)$ é sempre zero. As funções trigonométricas $\sin(t)$ e $\cos(t)$ satisfazem a condição acima descrita, assim pela teoria das equações diferenciais lineares de coeficientes constantes, a solução geral será dada pela combinação linear das funções $\sin(t)$ e $\cos(t)$.

Desta forma, sabendo que a rigidez e a amassa tomam valores unitários, a equação anterior fica com o seguinte aspeto:

$$u(t) = a.\cos(\omega_N.t) + b.\text{sen}(\omega_N.t), \quad a \text{ e } b \in \mathfrak{R} \quad (3.4)$$

Onde, $\omega_N = \sqrt{k/m}$

Do ponto de vista físico este resultado explica que um oscilador com 1 G.L. de massa m e rigidez k oscila naturalmente com uma frequência ω_N .

Sendo o amortecimento c nulo, a amplitude das oscilações é constante ao longo do tempo, como se pode verificar na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Vibração livre sem amortecimento.

3.2.2 Vibração livre com amortecimento

Este tipo de movimento é aquele que dentro das vibrações livres retrata melhor a realidade, sendo também o caso mais geral da vibração livre, onde as forças exteriores a atuar continuam nulas, no entanto a parcela relativa as forças de amortecimento já não é nula. As forças de amortecimento têm um papel muito importante na dissipação de energia de uma estrutura,

provocando uma diminuição progressiva ao longo do tempo da amplitude do movimento oscilatório como se pode observar na Figura 3.3.

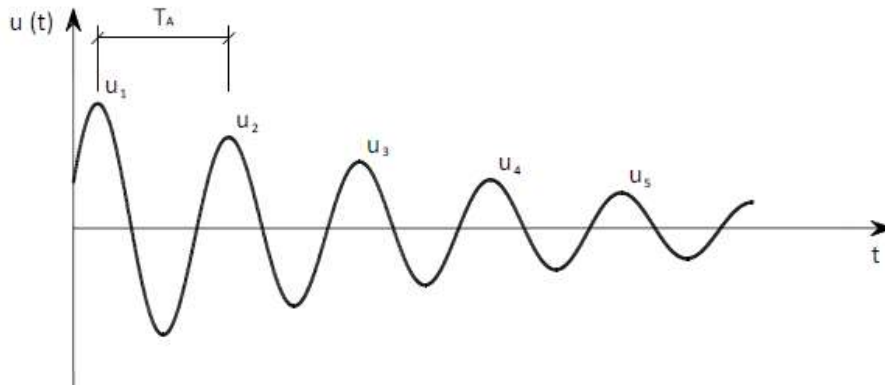


Figura 3.3 - Vibração livre com amortecimento.

A equação diferencial representativa deste tipo de vibração é dada por:

$$m.\ddot{u} + c.\dot{u} + k.u = 0 \quad (3.5)$$

Neste tipo de vibração é importante escrever a equação diferencial considerando funções do tipo $e^{\lambda t}$.

Temos então $u(t) = e^{\lambda t}$, $\dot{u}(t) = \lambda e^{\lambda t} = \lambda u$ e $\ddot{u}(t) = \lambda^2 e^{\lambda t} = \lambda^2 u$.

Pelo método do polinómio característico obtemos então a seguinte expressão:

$$m.\lambda^2 + c.\lambda + k = 0 \Rightarrow \lambda_{1,2} = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m} \quad (3.6)$$

As raízes λ_1 e λ_2 obtidas por uma equação algébrica do 2.º grau corresponde aos valores da equação 3.9.

Estas soluções dependem do valor que o discriminante obtiver, seja este positivo, nulo ou negativo. Do ponto de vista da engenharia o amortecimento é sempre baixo, logo apenas interessa estudar o caso negativo.

Assim temos $c^2 < 4mk$, com raízes λ constituídas por parte real α e parte imaginária β resultado a seguinte equação:

$$\lambda_{1,2} = \frac{-c}{2m} \pm \frac{\sqrt{4mk - c^2}}{2m}.i = \alpha \pm \beta i \quad (3.7)$$

Nestas condições de amortecimento, a equação $m.\ddot{u} + c.\dot{u} + k.u = 0$, tem duas soluções complexas, dadas pelas seguintes equações:

$$u(t) = e^{(\alpha+\beta i)t} = e^{\alpha t} \cdot e^{i\beta t} \text{ e } u(t) = e^{(\alpha-\beta i)t} = e^{\alpha t} \cdot e^{-i\beta t} \quad (3.8)$$

Utilizando a combinação linear das duas funções complexas, recorrendo a fórmula de Euler e usando os coeficientes $a = 1/2$, $b = 1/2$, $a = 1/2i$ e $b = -1/2i$, alcançam-se as seguintes soluções reais:

$$u(t) = \frac{e^{\alpha t} \cdot e^{i\alpha t} + e^{\alpha t} \cdot e^{-i\alpha t}}{2} = e^{\alpha t} \cdot \cos(\beta t) \quad (3.9)$$

$$u(t) = \frac{e^{\alpha t} \cdot e^{i\alpha t} - e^{\alpha t} \cdot e^{-i\alpha t}}{2i} = e^{\alpha t} \cdot \text{sen}(\beta t) \quad (3.10)$$

Obtém-se a solução geral real sabendo que as duas equações anteriores formam a base do subespaço que contem todas as soluções reais da equação 3.8.

$$u(t) = a \cdot e^{\alpha t} \cdot \cos(\beta t) + b \cdot e^{\alpha t} \cdot \text{sen}(\beta t), \text{ a e b } \in \mathbb{R} \quad (3.11)$$

A equação anterior pode ainda tomar uma aspeto diferente se utilizarmos os parâmetros ω_N , ξ e ω_A , que correspondem respetivamente a frequência natural, coeficiente de amortecimento relativo e frequência amortecida:

$$u(t) = (a \cdot \cos(\omega_A)t + b \cdot \text{sen}(\omega_A)t) \cdot e^{-\xi \omega_N t}, \text{ a e b } \in \mathbb{R} \quad (3.12)$$

onde,

$$\begin{aligned} \omega_N &= \sqrt{\frac{k}{m}}; \\ \xi &= \frac{c}{c_{crit}} = \frac{c}{2\sqrt{mk}}; \\ \omega_A &= \omega_N \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Em condições iniciais $u(0) = u_0$ e $\dot{u}(0) = v_0$, obtém-se uma solução particular em que as constantes a e b assumem a seguinte forma:

$$a = u_0 \text{ e } b = \frac{v_0 + u_0 \cdot \xi \cdot \omega_N}{\omega_A} \quad (3.14)$$

3.3 Vibração forçada

Nos dois casos anteriores as estruturas não estavam sujeitas a qualquer tipo de forças exteriores. Nesta secção as estruturas serão sujeitas a forças de excitação aplicadas durante o movimento. Na engenharia civil, estes são os casos onde o estudo tem mais interesse. Estas forças de excitação podem ser devidas a ação do vento, ao funcionamento de máquinas rotativas, a impactos, a acelerações sísmicas na base das estruturas, entre outras como podemos observar na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Acelerações sísmicas na base das estruturas.

Neste momento percebe-se que houve uma alteração muito importante na equação do equilíbrio dinâmico, uma vez que $f = f(t)$ ficamos com:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + k.u = f(t) \quad (3.15)$$

A solução geral desta equação deriva da soma da solução geral correspondente a equação homogénea (termo independente nulo), anteriormente analisada, com qualquer solução particular da equação 3.17, ou seja, $u(t) = u_H(t) + u_P(t)$. No caso mais geral, é obrigatório considerar-se o amortecimento, resultando uma solução geral com o seguinte aspeto:

$$u(t) = (a \cdot \cos(\omega_A t) + b \cdot \text{sen}(\omega_A t)) \cdot e^{-\xi \omega_N t} + u_p(t) \quad (3.16)$$

É apenas necessário determinar uma solução particular para qualquer tipo de força $f(t)$.

3.3.1 Resposta a forças com variação arbitrária ao longo do tempo. Integral de convolução

A resposta dinâmica sob a ação de uma força contínua $f(t)$, com variação arbitrária ao longo do tempo pode ser obtida como a sobreposição das respostas a uma sequência de impulsos infinitesimalmente próximos, como se pode observar na Figura 3.5, que se obtém matematicamente através de um integral, denominado de integral de Duhamel ou integral de convolução

$$u_p(t) = \int_0^t f(\tau) \cdot h(t-\tau) \partial\tau = f(t) \cdot h(t) \quad (3.17)$$

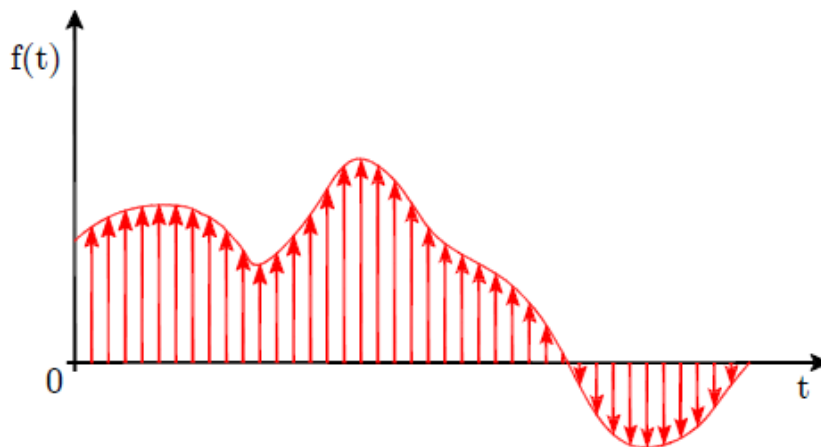


Figura 3.5 - Representação esquemática de uma força arbitrária decomposta numa sequência de impulsos infinitesimalmente próximos.

Assim, a solução correspondente à solitação de uma força $f(t)$ com variação arbitrária ao longo do tempo pode ser escrita da seguinte forma:

$$u(t) = \left(u_0 \cdot \cos(\omega_A t) + \left(\frac{v_0 + u_0 \cdot \xi \cdot \omega_N}{\omega_A} \right) \cdot \text{sen}(\omega_A t) \right) \cdot e^{-\xi \omega_N t} + \int_0^t f(\tau) \cdot h(t-\tau) \partial\tau \quad (3.18)$$

O cálculo do integral de Duhamel pode ser calculado numericamente, recorrendo a um método de integração baseado na técnica de aproximação da área sob uma curva, somando as

áreas dos trapézios como se pode observar na Figura 3.6, e como se demonstra na seguinte expressão:

$$u_p = \int_0^t f(\tau) \cdot h(t-\tau) \partial\tau \approx \sum A_{\text{trapézios}} \quad (3.19)$$

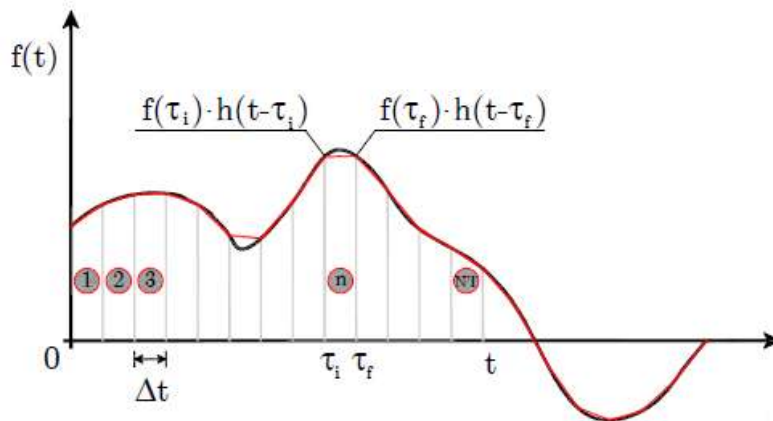


Figura 3.6 - Representação esquemática do cálculo numérico do integral de Duhamel pelo método dos trapézios.

A aplicação deste método exige no entanto, uma integração completa, ou seja, o cálculo da área de todos os trapézios, até ao instante t , tornando-se computacionalmente pouco eficiente.

Alternativamente, apresenta-se uma solução com maior eficiência computacional, sendo esta referida em (Chopra, 2001) e (Clough, et al., 2010).

Este método aplica-se a sistemas lineares e baseia-se na interpelação da excitação em cada instante considerado. A obtenção de uma solução próxima da exata, depende do intervalo de tempo considerado, isto é, quanto menor o intervalo considerado, melhor será feita a aproximação (Figura 3.7).

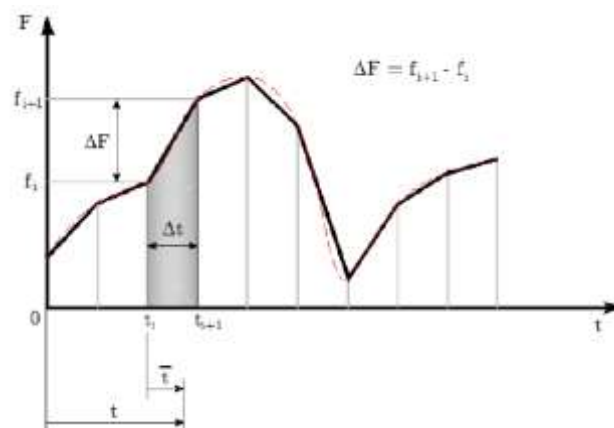


Figura 3.7 - História de cargas aproximada por troços lineares.

No método da fórmula recursiva, a equação do movimento é resolvida de forma independente para cada um dos intervalos definidos, apenas tendo que ser considerada as condições iniciais de deslocamento e velocidade de um determinado intervalo igual ao anterior.

A expressão final inicia-se definindo a notação como $u = (\bar{t} = \Delta t) = u_{i+1}$, com as condições iniciais $u = (\bar{t} = 0) = u_i$ e $\dot{u} = (\bar{t} = \Delta t) = \dot{u}_i$.

A força no intervalo de tempo \bar{t} , é definida por um troço linear, podendo a sua expressão ser escrita como sendo a equação de uma reta de declive $(f_{i+1} - f_i)/\Delta t$, isto é:

$$f\left(\bar{t}\right) = f_i + \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta t} \cdot t \quad (3.20)$$

A solução geral é então escrita da seguinte forma (Chopra, 2001):

$$u\left(\bar{t}\right) = u_H\left(\bar{t}\right) + u_P\left(\bar{t}\right) = \left(a \cdot \cos\left(\omega_A \bar{t}\right) + b \cdot \text{sen}\left(\omega_A \bar{t}\right) \right) \cdot e^{-\xi \cdot \omega_N \bar{t}} + \int_0^{\bar{t}} f(\tau) \cdot h\left(\bar{t} - \tau\right) \partial \tau, \quad a \text{ e } b \in \mathbb{R} \quad (3.21)$$

Substituindo as condições iniciais obtemos:

$$u\left(\bar{t}\right) = \left(u_i \cdot \cos\left(\omega_A \bar{t}\right) + \left(\frac{u + \dot{u}_i \cdot \xi \cdot \omega_N}{\omega_A} \right) \cdot \text{sen}\left(\omega_A \bar{t}\right) \right) \cdot e^{-\xi \cdot \omega_N \bar{t}} + \int_0^{\bar{t}} f(\tau) \cdot h\left(\bar{t} - \tau\right) \partial \tau \quad (3.22)$$

A fórmula recursiva pode assim ser obtida matricialmente:

$$\begin{bmatrix} u_{i+1} \\ \dot{u}_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ A' & B' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ \dot{u}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C & D \\ C' & D' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_i \\ f_{i+1} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

No capítulo seguinte é exemplificada a utilidade da fórmula recursiva para o cálculo de espetros de resposta.

3.3.2 Resposta a acelerogramas sísmicos aplicados na base

Para o estudo da resposta dinâmica de sistemas estruturais de 1 G.L. submetidos à ação de movimentos na base (Figura 3.8), a fórmula recursiva apresentada no ponto 3.3.1 tem grande utilidade.

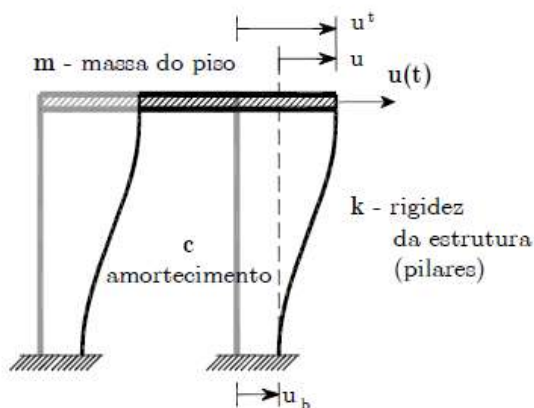


Figura 3.8 - Estrutura de 1GL sujeita a movimentos na base.

A equação de equilíbrio tem agora uma nova parcela, que corresponde ao movimento da base, este é caracterizado usualmente pelo acelerograma sísmico $a_s = a_s(t)$. A história de acelerações registada na base, deve corresponder a história de velocidades sísmicas, ou seja, $v_s = v_s(t)$, e de deslocamentos sísmicos, $d_s = d_s(t)$. A cada instante, a aceleração total do piso \ddot{u}_T , corresponde a aceleração sísmica da base $a_s(t)$ somada com a aceleração relativa $\ddot{u}(t)$:

$$\ddot{u}_T(t) = \ddot{u}(t) + a_s(t) \quad (3.24)$$

O mesmo acontecendo com a velocidade \dot{u}_T e o deslocamento total u_T :

$$\dot{u}_T(t) = \dot{u}(t) + v_s(t) \quad (3.25)$$

$$u_T(t) = u(t) + d_s(t) \quad (3.26)$$

Segundo (Chopra, 2001), a equação diferencial do movimento que descreve a resposta a movimentos harmónicos da base de fundação é dada por:

$$m.\ddot{u}(t) + c.\dot{u}(t) + k.u = -m.\ddot{u}_b(t) \quad (3.27)$$

Se dividirmos a equação 3.27 pela massa m ficamos com:

$$\ddot{u}(t) + 2.\xi.\omega_N.\dot{u}(t) + \omega_N^2.u = -\ddot{u}_b(t) \quad (3.28)$$

Assim obtêm-se com a equação dinâmica para o caso do movimento sísmico da base.

3.3.2.1 Espectros de Resposta

Para uma aceleração na base de fundação $\ddot{u}_b(t)$, devido a um sismo, a resposta em deslocamento $u(t)$ de um sistema de 1 G.L. depende unicamente do seu período de vibração e do coeficiente de amortecimento.

Na Figura 3.9 está representada a história de acelerações para um dado sismo, a partir da qual se calcula a resposta em deslocamentos de alguns osciladores de 1 G.L., assinalando o valor máximo obtido na resposta como está representado Figura 3.10.

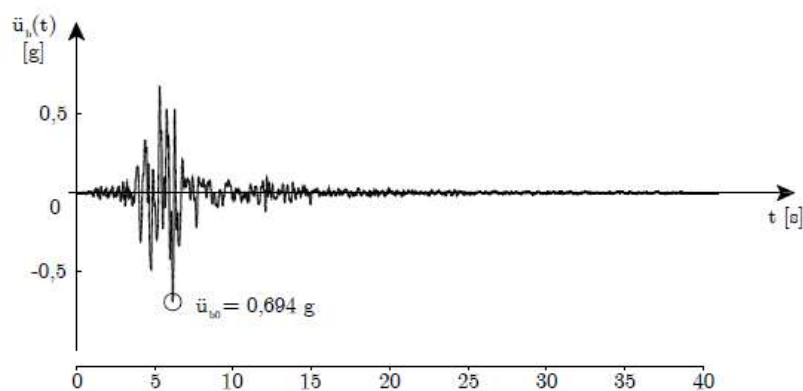


Figura 3.9 - História de acelerações de um sismo.

Em termos de pseudo-acelerações a resposta de um sistema estrutural pode ser facilmente determinada, a partir da resposta obtida em termos de deslocamentos, para tal, basta multiplicar por $\omega_N^2 = (2\pi/T_N)^2$ (Figura 3.11).

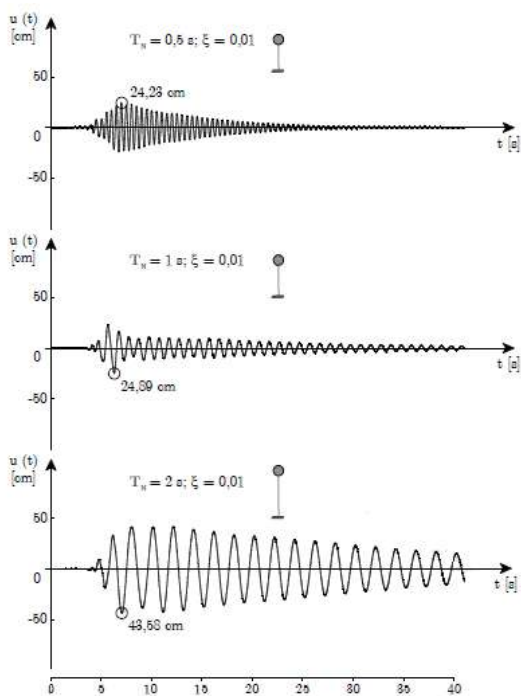


Figura 3.10 - Resposta em deslocamentos de sistemas de 1 G.L.

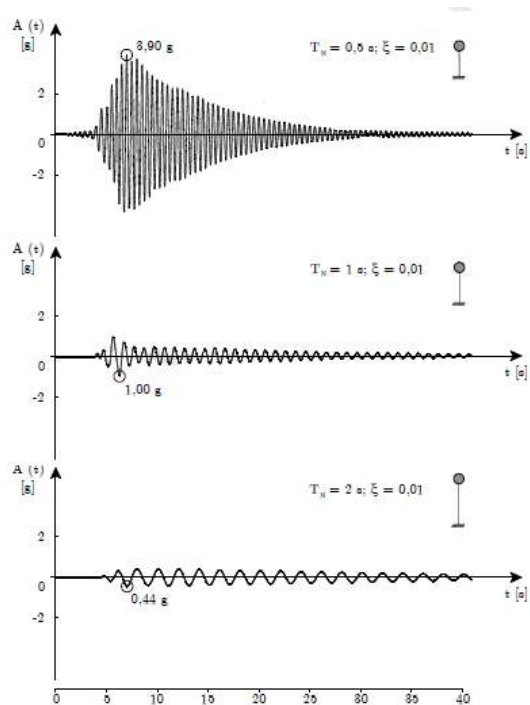


Figura 3.11 - Resposta em pseudo-accelerações de sistemas de 1 G.L.

Neste momento já é possível a criação de espectros de resposta, partindo do espectro de resposta em deslocamento com coeficiente de amortecimento $\xi = 1\%$, desenvolvido para o registo de acelerações sísmicas exemplificado na Figura 3.12. Para tal utilizam-se os valores máximos obtidos para a resposta dos vários osciladores de 1 G.L. com período natural de vibração entre 0 s e 3 s, como se pode verificar na Figura 3.13.

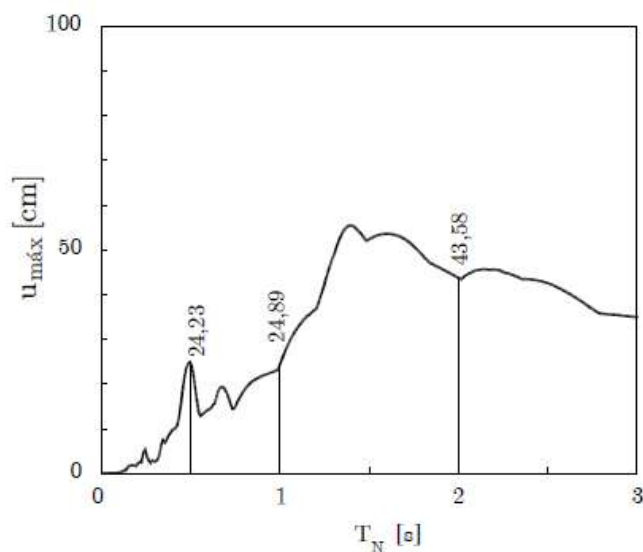


Figura 3.12 - Espectros de resposta em deslocamentos com $\xi=1\%$.

É de referir que para se obter os espectros de pseudo-velocidades, basta utilizar a seguinte expressão:

$$V(t) = \omega_N \cdot u(t) = \frac{2\pi}{T_N} \cdot u(t) \quad (3.29)$$

E as pseudo-acelerações:

$$A(t) = \omega_N^2 \cdot u(t) = \left(\frac{2\pi}{T_N}\right)^2 \cdot u(t) \quad (3.30)$$

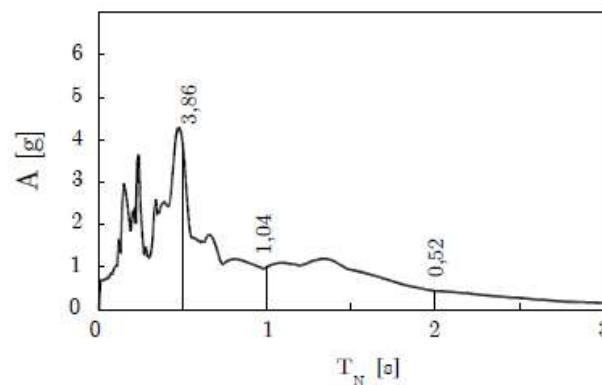


Figura 3.13 - Espectro de resposta de pseudo-acelerações com $\xi=1\%$.

3.4 Considerações finais

Neste capítulo descreveram-se os princípios básicos da dinâmica de estruturas. Abordaram-se os sistemas de um grau de liberdade com e sem amortecimento, recorrendo ao exemplo de um modelo de edifício com apenas um piso.

Este modelo foi igualmente utilizado no estudo das vibrações forçadas, descrevendo-se todo o processo de cálculo para obtenção de um espectro de resposta, desde o estudo das forças com variação arbitrária até a resposta de acelerogramas sísmicos aplicados na base.

Por fim descreveu-se uma forma simplificada de realizar os cálculos dinâmicos de um sistema com rigidez e massa distribuída.

4

Ferramentas de apoio ao estudo do risco sísmico em Portugal Continental

4.1 Considerações iniciais

Para a construção de uma aplicação SIG é necessário percorrer várias etapas, cujo objetivo será a execução de um *workflow*, em que o início corresponde ao levantamento da situação existente e o fim corresponde à representação da mesma através de modelos e ferramentas que operacionalizam esses modelos, isto é, toda a informação relevante do objeto de estudo é recriada num ambiente digital de forma a ser o mais fiel possível à realidade.

O estudo de um objeto, pode ser desenvolvido por tecnologias e ferramentas SIG, estas tem a capacidade de simular com elevada fiabilidade as informações fornecidas pelos utilizadores. Quanto mais detalhada e pormenorizada for a informação, melhor será a solução obtida.

A estrutura desenvolvida no SIG foi assim dividida em cinco etapas:

- Pesquisa e seleção de dados;
- Criação da base de dados;
- Utilização da plataforma SIG;
- Identificação do *Software* a utilizar;
- Seleção de melhor opção.

A informação relevante sobre o estudo de fenómenos sísmicos, não se encontra de uma forma geral organizada e compilada, pelo que houve necessidade de, numa primeira fase, criar uma base de dados utilizando o Microsoft Excel. Posteriormente usou-se no ArcGIS, nas suas componentes ArcMap, ArcScene e o ArcCatalog, que permitem uma gestão de informação, ao mesmo tempo que permitem a visualização 2D e 3D dos objetos em estudo.

A interligação entre software expandiu-se ainda até ao MatLab, que permite a manipulação de ficheiros criados em ArcGIS.

4.2 Utilização o ArcGIS

Para o estudo de qualquer matéria é comum recorrer a bibliografia, onde os dados estão muitas vezes organizados em tabelas e sob a forma de gráficos, contudo a visualização e análise de dados relativos a um dado problema numa plataforma digital (que com uma simples ferramenta de seleção de objectos, permite obter a informação relevante e efectuar o seu posterior tratamento) é muito mais rápida e eficiente.

Este trabalho desenvolveu-se no sistema ArcGIS (Figura 4.1), que permite o armazenamento digital de dados, o tratamento dos mesmos e ainda a escolha das melhores solução de análise para a resolução de problema semelhantes, no futuro.



Figura 4.1 - Logotipo ArcGis. (Fonte: www.arcgis.com)

O ArcGIS é um sistema de informação que, como já referido, permite recolha, organização, gestão, análise e distribuição da informação geográfica. Este sistema foi desenvolvido pela ESRI e atualmente é utilizado de forma generalizada para a criação, manipulação e utilização de informação geográfica, sendo esta disponibilizada para computadores, *tablets* ou *smartphones*, como se pode observar na Figura 4.2.

O ArcGIS é constituído por vários módulos, entre os quais destacam-se o ArcMap, ArcCatalog, ArcScene e ArcGlobe. O ArcMap permite a visualização e manipulação dos dados através de operações de análise espacial, ou seja, em duas dimensões, e o ArcScene permite as mesmas opções num ambiente em três dimensões.



Figura 4.2 - Onde podemos aceder ao ArcGIS. Fonte: www.arcgis.com

O ArcCatalog é um módulo de gestão e criação de dados, enquanto o ArcToolBox é o principal repositório de ferramentas e operações disponíveis, sendo a maioria das ações de geoprocessamento e análise efetuadas a partir do mesmo. O ArcGlobe é o módulo que permite efetuar a visualização 3D dos dados num modelo de globo assente em coordenadas geográficas.

O ArcGIS é então uma ferramenta computacional que permite organizar a informação por *layers* que permitem uma visualização associada dos objetos e informação assim organizados. Neste trabalho os *layers* vetoriais (em oposição aos dados obtidos em formato matricial) serão os mais utilizados, estando representados por pontos, linhas e polígonos. Cada *layer* tem associado uma tabela de atributos com a respetiva informação atribuída, como se pode ver na Figura 4.3. A cada registo da tabela de informação alfanumérica corresponde uma e uma só entidade gráfica no mapa.

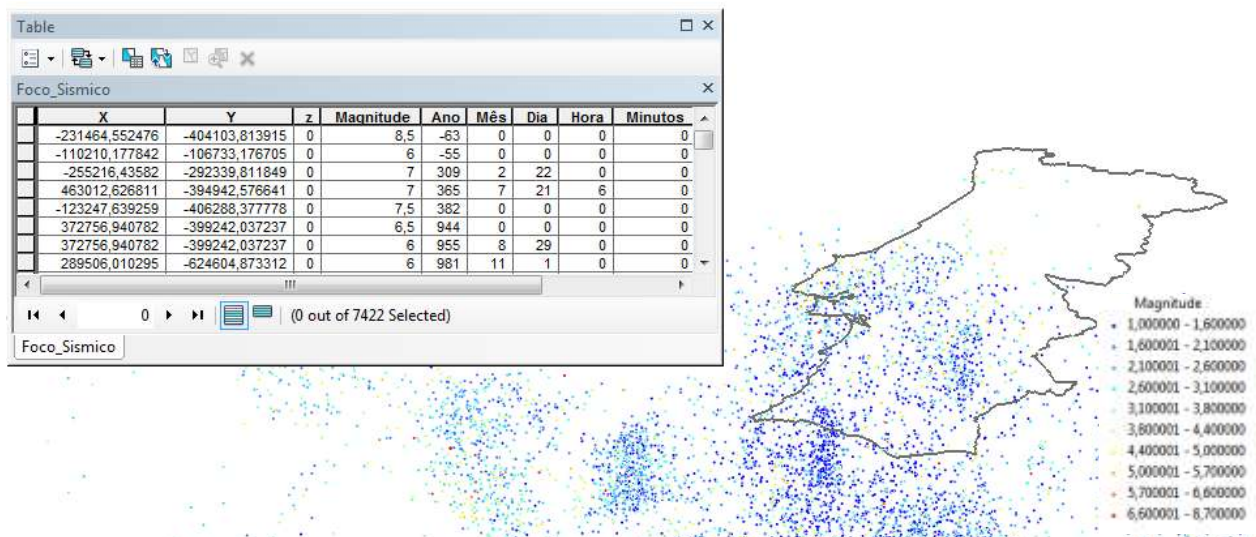


Figura 4.3 - Tabela de atributos referente a sismicidade histórica.

Apesar de a informação acessível estar geralmente contida em *shapefiles* distintas, o objetivo é poder organizar e gerir todos os dados, de forma coerente e eficiente. Assim, quando os temas de dados a incluir nos modelos são diversos e há necessidade de criar rotinas de geoprocessamento, o ArcGIS permite utilizar estruturas de armazenamento de dados mais sofisticadas e eficazes dos que os *shapefiles*. Refere-se, por exemplo, as bases de dados *File Geodatabase*, que se caracterizam por serem bases de dados geográficas, nativas do ArcGIS, que permite a integração de todos os tipos de informação (alfanumérica e geográfica), usando uma hierarquia de organização (Figura 4.4). Permitem ainda a criação de temas de dados complexos, que incluem regras relacionais, como por exemplo, os temas de validação da topologia, que contêm cum conjunto alargado de regras de validação topológica das estruturas de dados. Dentro das *File Geodatabase* podem ser criadas estrutura do tipo “pasta”, as *Feature Dataset*, que permite agrupar diversos temas relacionados, que tenham o mesmo sistema de coordenadas e algum tipo de relação espacial. As *Feature Dataset* permitem fazer o agrupamento de *Feature Classes* e reúnem informação com as mesmas características, permitindo também criar temas complexos, como as topologias ou as redes de transportes ou de utilities, a partir de temas simples de pontos e arcos.

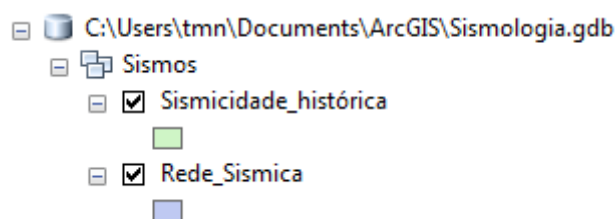


Figura 4.4 – Exemplo de uma base de dados do tipo *File Geodatabase*.

4.3 Obtenção e manipulação de dados

A obtenção de dados distingue-se por ser uma etapa que pode representar um grande investimento a nível económico, e na qual se despende muito tempo para juntar e organizar a informação pretendida. No presente caso, a necessidade de informação muito específica acarretou um elevado investimento na procura de dados, nem sempre considerados, o que levou à criação de vários objetos de estudo por iniciativa própria, como por exemplo os mapas em três dimensões.

A aquisição de dados não foi efetuada apenas a nível geográfico, em muitos casos existiu uma pesquisa de carácter mais diversificado e aprofundado, com recurso a outros materiais e suportes, nomeadamente livros, internet, etc. Após a obtenção dos dados, estes tiveram que ser manipulados e processados. Remete-se então para a próxima etapa do ciclo de desenvolvimento da plataforma SIG.

A manipulação de dados envolve a edição, tratamento e integração dos dados obtidos na etapa anterior. Decidiu-se utilizar o sistema de coordenadas planas ETRS89 PORTUGAL TM06 (Figura 4.5) para registar e especificar as localizações das entidades gráficas dentro da base de dados⁸.

Nas secções seguintes é explicada a forma como foram adquiridos os dados, bem como a sua manipulação.



Figura 4.5 - Centro Geodésico de Portugal. Serra de Melriça.

⁸ Foram utilizadas as coordenadas planas ETRS89 por sugestão dos orientadores. Originalmente as coordenadas dos diversos elementos de estudo eram espaciais ou planas.

4.3.1 Mapas

A aquisição de um ficheiro em formato vetorial com toda a informação pretendida sobre os mapas necessários para a realização deste trabalho, tornar-se-ia uma ferramenta extremamente dispendiosa para um estudo desta natureza.

No entanto, nesta fase, seriam necessários mapas com alguma definição, para que os resultados tivessem uma margem de erro pequena. Foi então imperativa a criação de uma malha (desenvolvida no programa Autocad) constituída por vários quadrados com 500 metros de lado preenchendo completamente Portugal Continental e a Costa Portuguesa, como é possível ver na Figura 4.6.

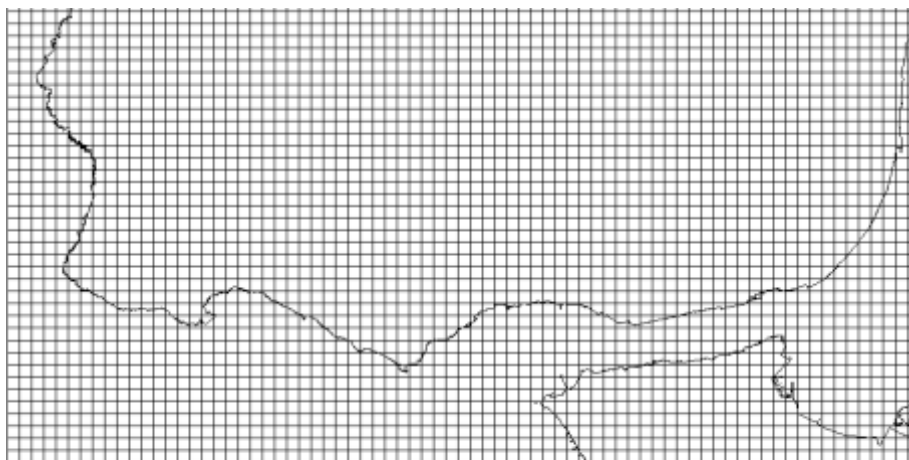


Figura 4.6 - Malha para definição do relevo, referente à zona de Lisboa.

Definidas as coordenadas (X,Y), determinaram-se as cotas a que os pontos definidos se encontravam, utilizando-se a aplicação GPSVisualizer (ver Anexo) onde, ao colocar as coordenadas se obtém a cota (Z) correspondente (Figura 4.7).

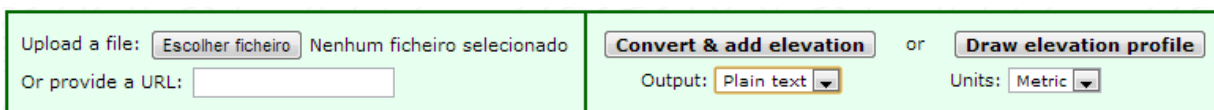


Figura 4.7 - Conversor do Site GPSVISUALIZER.

Os dados que foram armazenados numa folha de Excel e foram ordenados através das coordenadas (X,Y,Cota) como se pode observar na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Atributos dos mapas.

Coordenadas ETRS PORTUGAL TM 06		
X (m)	Y (m)	Z (m)

4.3.2 Sismicidade

Relativamente à sismicidade histórica obtiveram-se dados referentes à localização dos sismos, data, profundidade de ocorrência e magnitude. Estes dados foram fornecidos pelo Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas do LNEC, e após a sua análise foram organizados num ficheiro de Excel, como mostra a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Tabela de atributos da sismicidade histórica.

X (m)	Y (m)	Foco (m)	Magnitude	Ano	Mês	Dia	Hora	Minutos
-231464,55	-404103,81	0	8,5	-63	0	0	0	0
-110210,18	-106733,18	0	6,0	-55	0	0	0	0
-255216,44	-292339,81	0	7,0	309	2	22	0	0

4.3.3 Falhas geológicas

As falhas geológicas são um elemento com inúmeras características particulares e sobre as quais os dados existentes não são totalmente fiáveis. São estruturas que se encontram a profundidades elevadas e os aparelhos disponíveis atualmente para o seu estudo não permitem tirar conclusões definitivas.

Os dados obtidos são relativos a um programa de estudo feito em parceria por investigadores do LNEC e de outras instituições internacionais, sendo fornecidos pelo Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas do LNEC. As informação relevantes referem-se aos seguintes pontos:

- localização do traço;
- profundidade da falha;
- ângulo com o Norte;
- ângulo do plano da falha.

Como já foi referido os valores dos ângulos das falhas não são conhecidos de forma exata, assim os dados relativos a este pormenor variam dentro de um intervalo de incerteza, como se pode observar na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Atributos das falhas.

Nome da falha	Profundidade mínima (km)	Profundidade máxima (km)	Strike mínimo (°)	Strike máximo (°)	Dip mínimo (°)	Dip máximo (°)
Alqueva	1	17,5	272	282	30	60

4.3.4 Intensidades sísmicas

Para criação das “Intensidades Sísmicas” foi solicitado à Agência Portuguesa do Ambiente o fornecimento dos dados referentes a este tema. Os dados foram fornecidos em formato vetorial (*shapefile*), o qual pôde ser editado diretamente através do software ArcMap. Este tema tem como características os dados relativos à intensidade sísmica máxima no território nacional, bem como a área que ocupa, como é visível na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Atributos da intensidade sísmica.

Código	Área ocupada (km ²)	Perímetro (km)	Intensidade
6	1.950.494	6.281	6

4.3.5 Zonamento sísmico

A consulta do Eurocódigo 8 foi essencial para a recolha de dados deste elemento, mais propriamente o Anexo NA.I da lista de Concelhos com definição do zonamento sísmico (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 - Anexo NA.I do EC8.

Portugal Continental		Acção sísmica			
Código do município	Designação	Tipo 1		Tipo 2	
		Zona sísmica	Aceleração a_{gR} (m/s ²)	Zona sísmica	Aceleração a_{gR} (m/s ²)
1401	Abrantes	1.5	0,6	2.4	1,1
0101	Águeda	1.6	0,35	2.4	1,1
0901	Aguiar da Beira	1.6	0,35	2.5	0,8

Foi obtido um *shapefile* com os dados dos concelhos do território nacional, o qual foi editado de forma a conter informação sobre o zonamento sísmico (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 - Atributos do zonamento sísmico.

Concelho	Distrito	Área ocupada (km ²)	Zona	agR (m/s ²)
Pombal	Leiria	626.080.712	1.5	0,6

4.3.6 Rede sísmica nacional

Os dados referentes à rede sísmica nacional foram obtidos na página do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). As características presentes neste elemento são as coordenadas onde se localizam as estações de registo sísmico, o concelho e localidade a que pertence e a que altitude se encontra. A informação foi então organizada como apresenta a Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Dados da Rede sísmica nacional.

Coordenadas			Distrito	Localidade
X (m)	Y (m)	Cota (m)		
11507.08	256235.81	1084	Viana do Castelo	Gavieira

4.4 Importação de dados para ambiente SIG

Os dados iniciais foram organizados num ficheiro Excel, no entanto efetuou-se o seu manuseamento e criaram-se ficheiros a partir dos quais foi possível a sua inclusão na base de dados e na plataforma SIG desenvolvida.

O ArcGIS é um *software* SIG e como tal, permite várias opções de manuseamento e transformação de dados de e a partir de vários formatos. Para o trabalho desenvolvido foram criados dois formatos para as estruturas de dados já referidas, tendo sido utilizados nomeadamente *shapefiles* para análise no módulo ArcMap, e *TIN*, para observação no módulo ArcScene.

4.4.1 Ambiente 2D

Como foi referido anteriormente, para o desenvolvimento da plataforma em 2D utilizou-se o ArcMap, que possibilitou a transformação dos dados organizados no Microsoft Excel, em dados com o formato *shapefile*, (Figura 4.8) o que permite a sua fácil visualização em SIG.



Figura 4.8 - Transformação de Excel em *Shapefile* através de ArcGis.

Apresenta-se um exemplo do processo de criação dos objetos de estudo. No ArcMap inicia-se o processo de transformação de dados, importando os ficheiros em Excel como se pode ver na Figura 4.9.

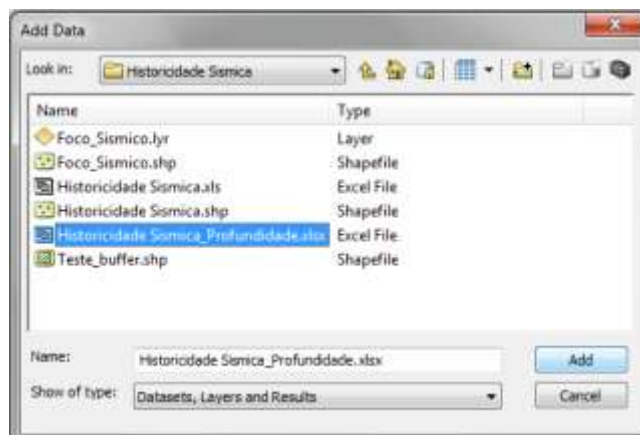


Figura 4.9 - Importação de dados do Excel para ArcMap.

Pretende-se de seguida colocar as coordenadas no sistema Português ETRS 1989 Portugal TM06⁹, de todos os objetos de estudo como já referido anteriormente. Para tal seguiram-se os passos representados na Figura 4.10.

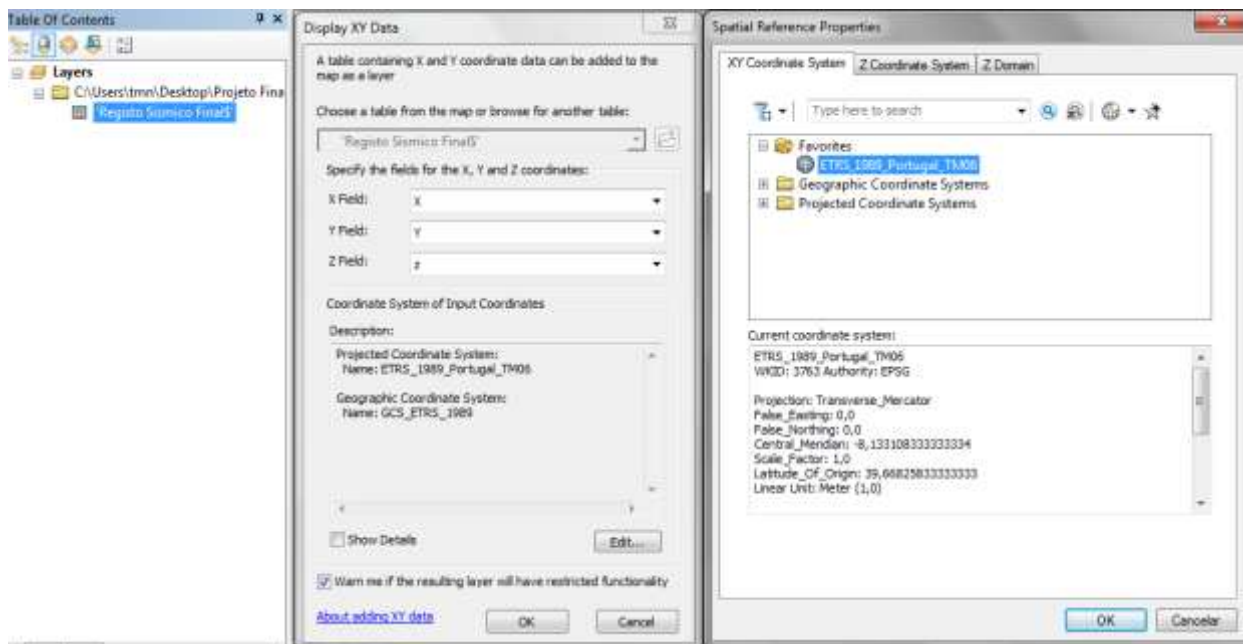


Figura 4.10 - Dados georreferenciados.

⁹ Os elementos de estudo fornecidos em formato *shapefile* tinham sistema de coordenadas espaciais e posteriormente foram convertidos em planas. Os elementos desenvolvidos foram executados em coordenadas planas.

Uma vez exportados os dados do Excel para o ArcMap, com tema já georreferenciado, procede-se à sua conversão num tema de dados *shapefile*¹⁰, permitindo a sua completa integração no ArcGIS e a fácil manipulação da informação geográfica (Figura 4.11).

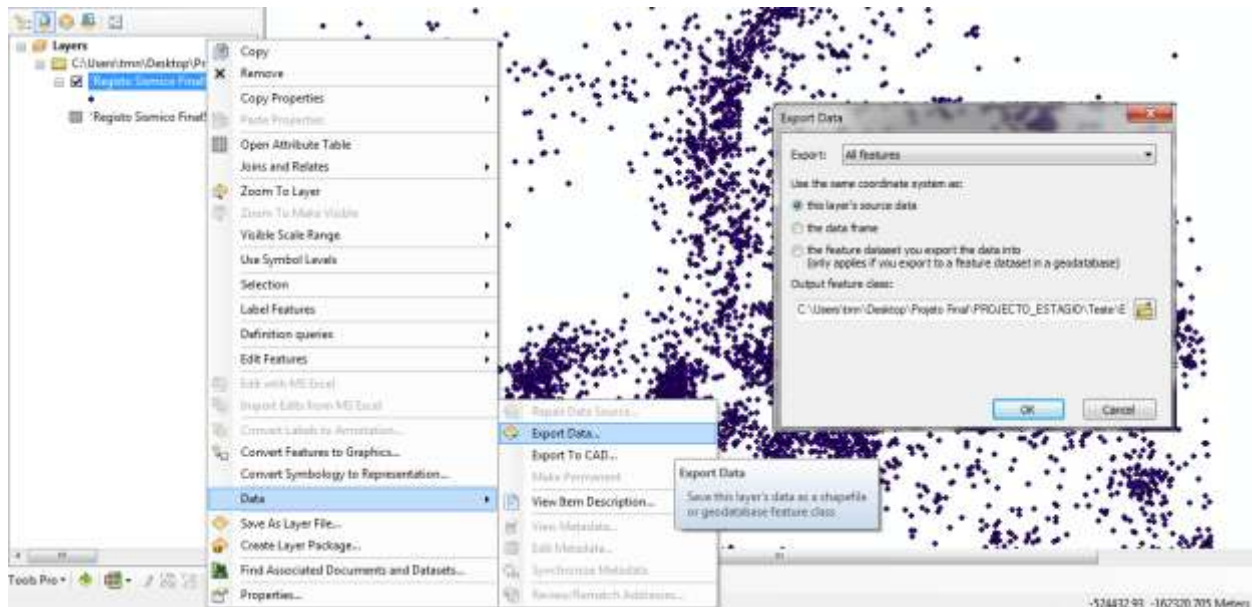


Figura 4.11 - Transformação do ficheiro de Excel num *shapefiles*.

Após este passo é possível ter acesso a toda a informação sobre a historicidade sísmica no ArcGIS, sendo possível explorar caminhos para o desenvolvimento da plataforma. Todos os outros temas de dados tiveram o mesmo processo de criação. Na Figura 4.12 mostra-se o registo de sismicidade histórica através de um mapa para melhor perceção dos locais onde estes fenómenos ocorreram.

¹⁰ Um tema de dados em formato *shapefile* corresponde fisicamente à criação de um conjunto de entre 6 e 8 ficheiros numa pasta do sistema operativo que trabalham de forma interligada e que constituem o *shapefile*. O seu manuseamento deve ser efetuado obrigatoriamente com a aplicação ArcMap ou outras aplicações especialmente preparadas para o efeito.

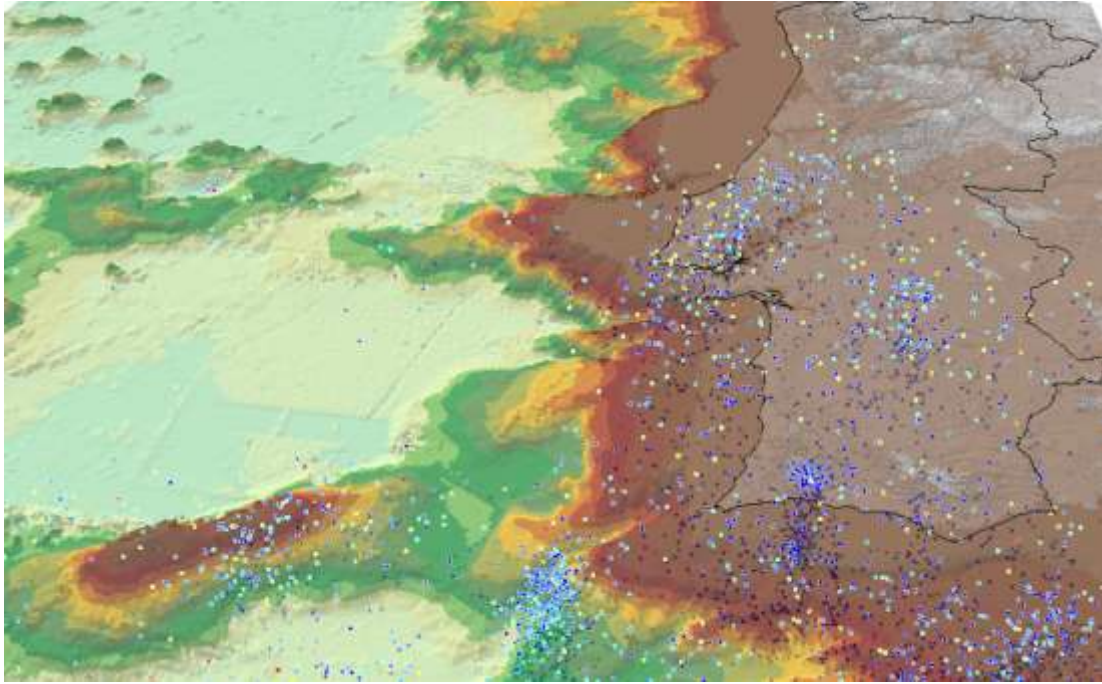


Figura 4.12 - Representação em *shapefiles* da historicidade sísmica e da Batimetria de Portugal.

Como descrito no ponto 4.2, após a criação das *shapefiles* dos temas em estudo, para melhorar a qualidade das estruturas de dados é importante fazer a sua migração para uma base de dados, por exemplo, do tipo *File Geodatabase*. Para tal utilizou-se o ArcCatalog e procedeu-se também à hierarquização dos temas de forma organizada e com a informação acessível, como mostra a Figura 4.13.

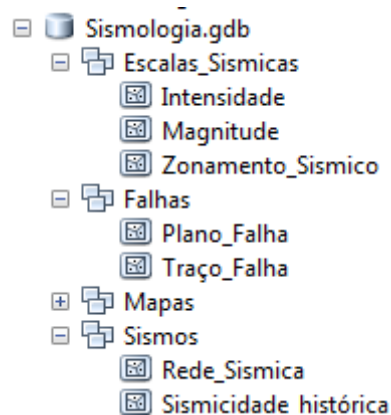


Figura 4.13 – Estrutura em *File Geodatabase*.

4.4.2 Ambiente 3D

A plataforma 3D foi desenvolvida utilizando o módulo ArcScene. Para a criação dos mapas utilizaram-se as três coordenadas para cada ponto, isto é, segundo x, y e uma cota, como foi descrito no ponto 4.3.1. Transformaram-se em seguida esses dados numa *shapefile* no ArcMap como foi descrito no ponto 4.4.1. Criada a *shapefile* (Figura 4.14), o objetivo seguinte passou por mostrar os dados num ambiente 3D, através do *software* ArcScene.

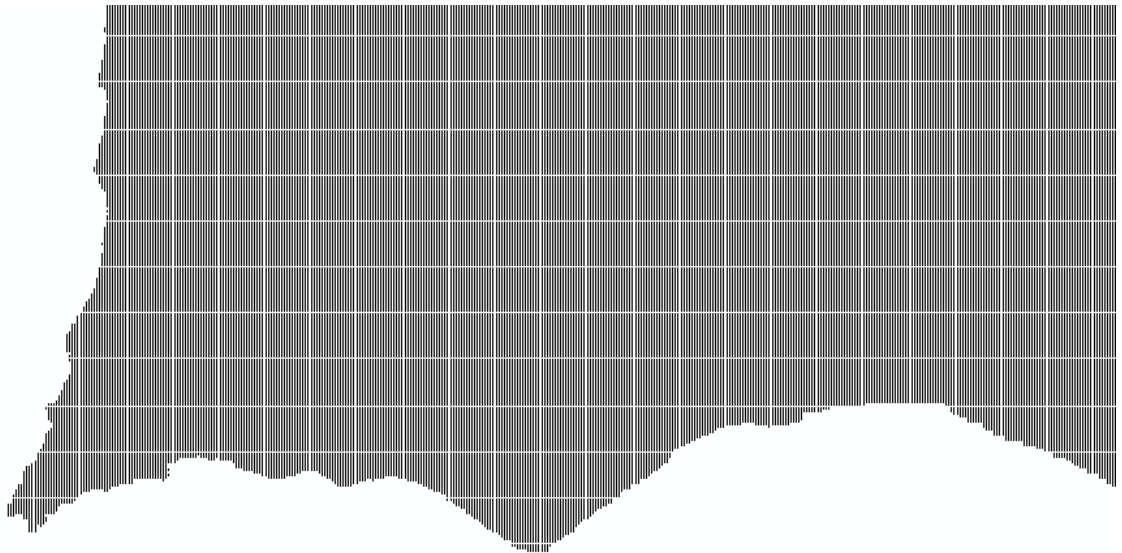


Figura 4.14 - *Shapefile* do mapa de Portugal, zona do Algarve.

A criação do modelo em 3D é feita através de comandos disponíveis no módulo ArcToolbox: selecciona-se 3D Analyst Tools, Data Management, *TIN* e por fim Create *TIN*, como está exemplificado na Figura 4.15.

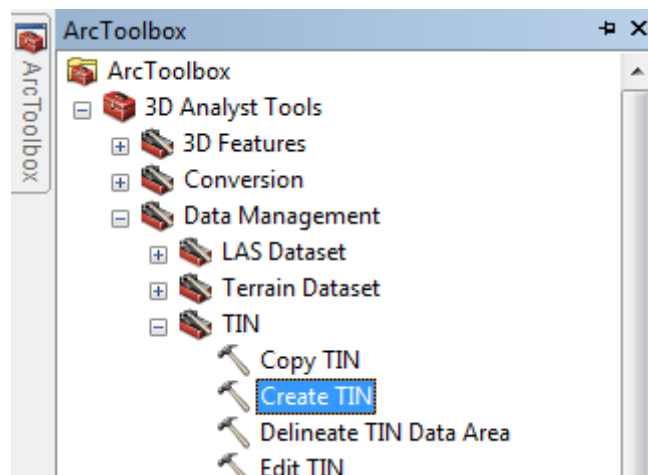


Figura 4.15 - Sequência de criação de *TIN*, no ArcToolbox

O passo seguinte consistiu em definir a designação do ficheiro *TIN* (*Triangulated Irregular Network*, ou “Rede Triangular Irregular”, em português), o seu sistema de coordenadas e especificar na base de dados qual a coluna definida para a cota do mapa (Figura 4.16).

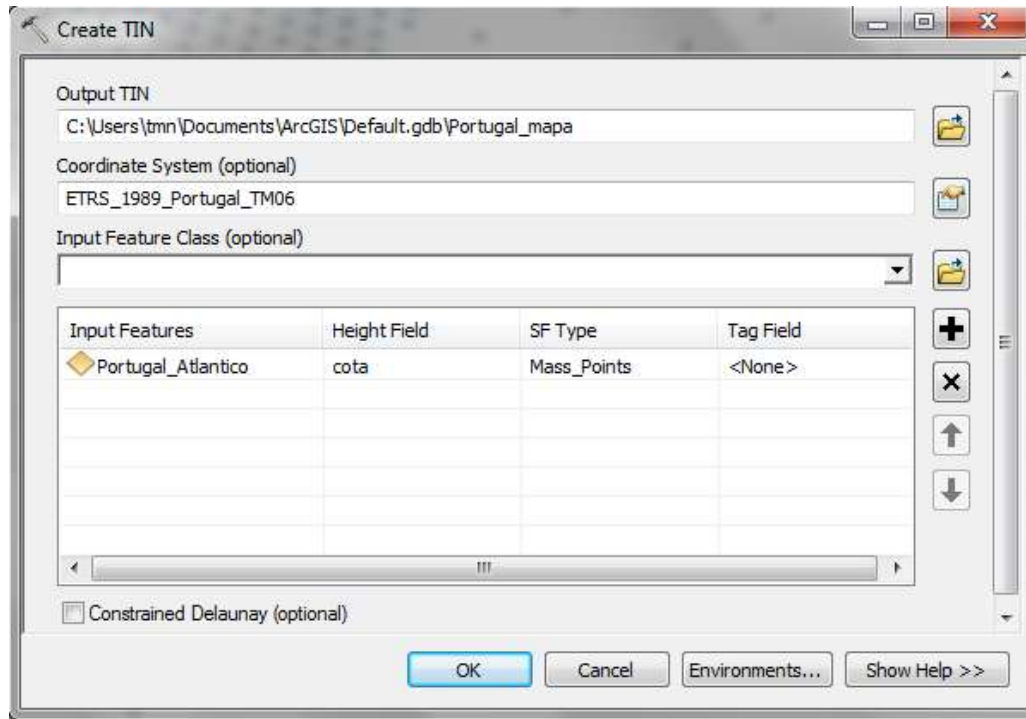


Figura 4.16 - Criação de *TIN*.

Os ficheiros TIN são modelos digitais criados a partir de curvas de nível ou de pontos cotado. Nestes é feita uma interpolação dos valores de altitude por meio da criação de triângulos entre uma linha e outra, levando à criação de um modelo matemático com valores de altitude (Manzato, 2005). Na Figura 4.17 podemos observar a batimetria e relevo da zona envolvente à foz do Rio Tejo, onde é possível visualizar a interpolação por triângulos.

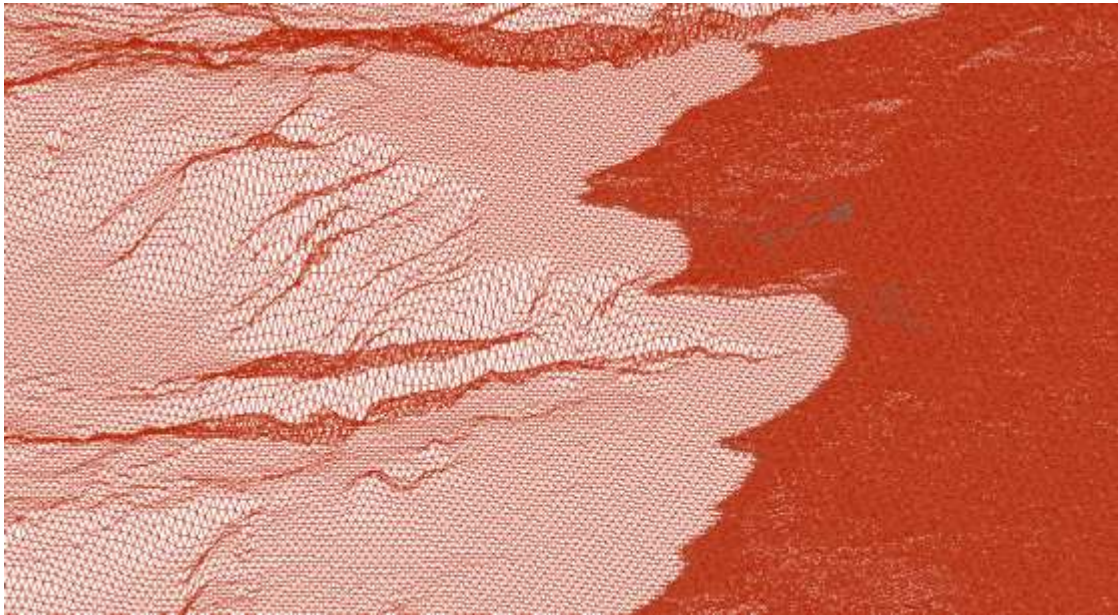


Figura 4.17 – Ficheiro TIN representando a batimetria e relevo da zona envolvente à foz do Rio Tejo.

Na Figura 4.18 mostra-se outro tipo de definição, acessível a partir da opção *Symbology*, escolhe-se o formato *Elevation*, que tem como objetivo uma representação mais real dos objetos.

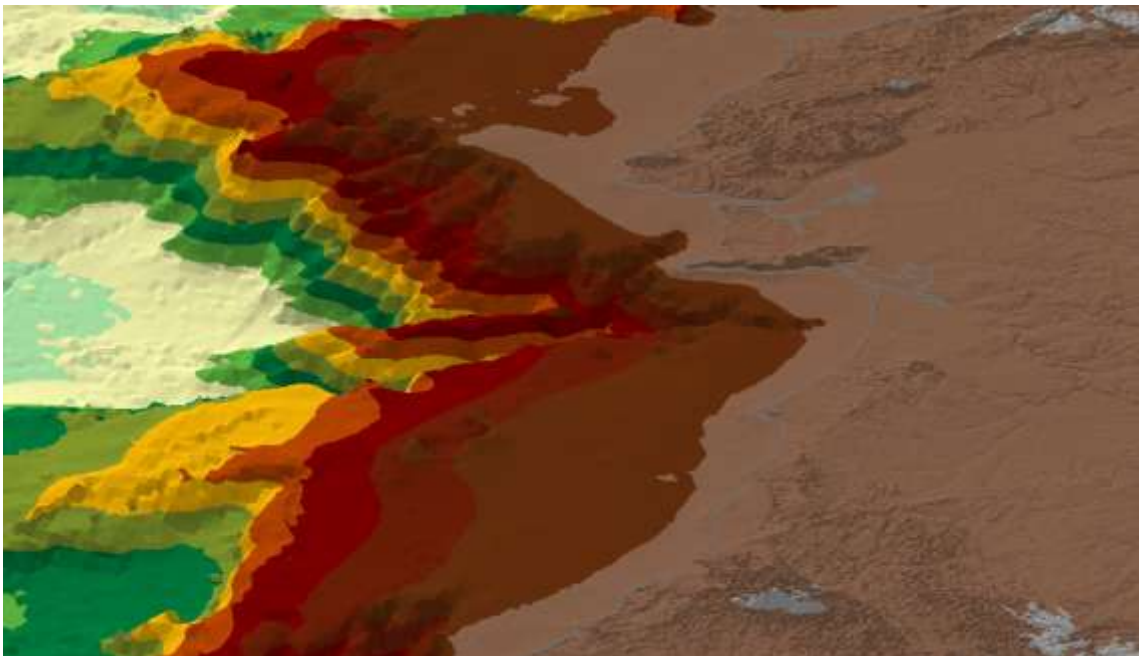


Figura 4.18 - Modelo de elevação construído a partir de uma *TIN*.

Neste trabalho era igualmente importante efetuar a representação em 3D das falhas geológicas e dos focos sísmicos que foram anteriormente criados, como já explicado. No entanto o seu

aspecto é ligeiramente diferente, uma vez que as falhas são planos, como se pode observar na Figura 4.19.

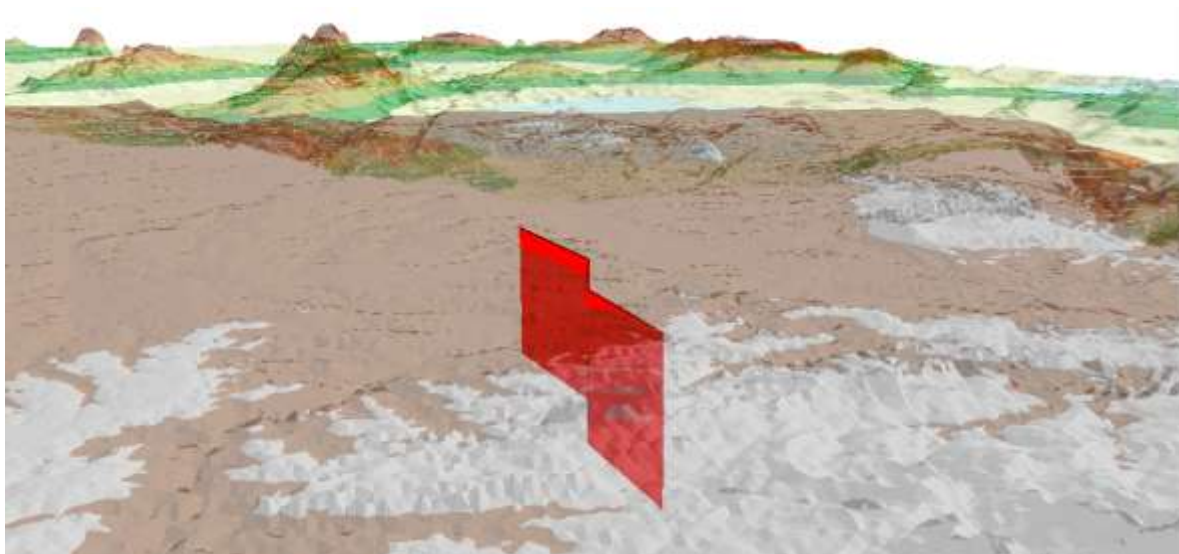


Figura 4.19 - TIN da falha do vale inferior do Tejo.

Os focos sísmicos são definidos por pontos, como é possível observar na Figura 4.20.

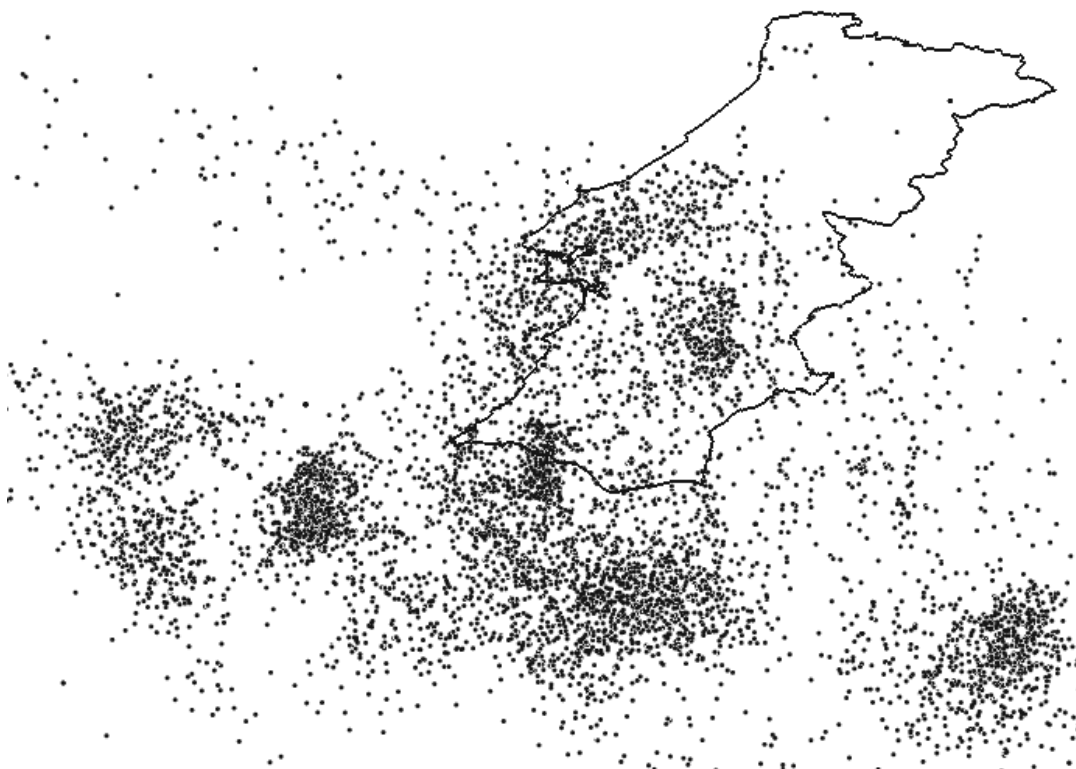


Figura 4.20 - Representação dos focos sísmicos.

Por último, foi criado um ficheiro do tipo *layer*. Este tem como objetivo guardar as opções de representação gráfica associadas à visualização dos ficheiros *shapefiles* e *TIN*, com opções específicas associadas a cada projeto ou modelo. Tome-se como exemplo a Figura 4.21 novamente, na qual se pode observar os focos sísmicos. Não sendo possível observar-se a magnitude que cada um teve, por sua vez, pode-se mudar as propriedades da *layer*, como mostra a Figura 4.21. Com a opção *Symbology* fazem-se alterações nas *Quantities*, alterando o valor que se quer observar, dividindo-o em quantas classes seja necessário e escolhendo a sua graduação de cores.

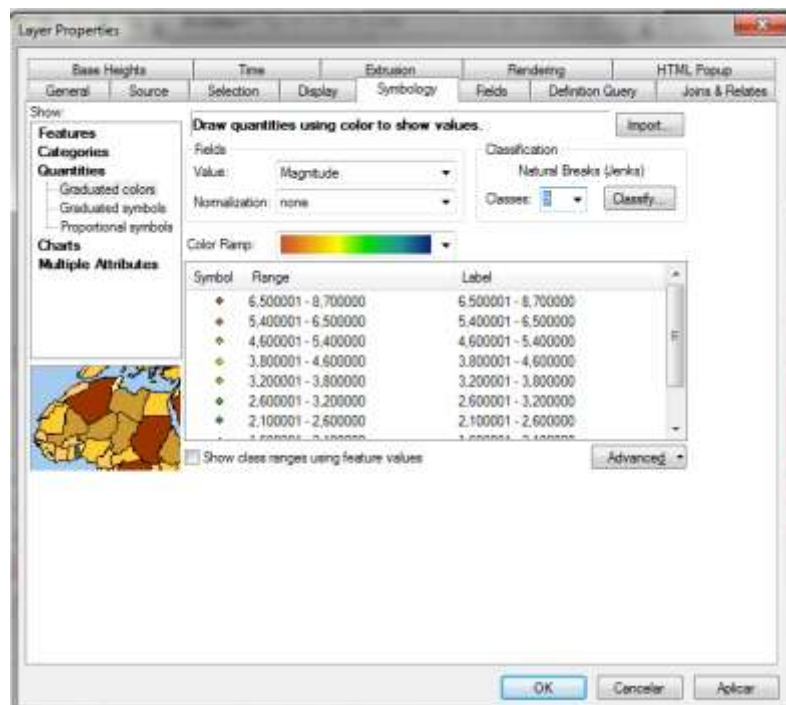


Figura 4.21 - Quadro das propriedades das *Layers*. *Shapefile* referente à sismicidade histórica.

O aspeto final do tema é o observado na Figura 4.22. Para se evitar a repetição dos procedimentos de ajuste da forma de visualização dos dados é aconselhável guardar a estrutura de visualização como um ficheiro de *layer*. Mostra-se na Figura 4.23 o procedimento para a criação da *layer*.

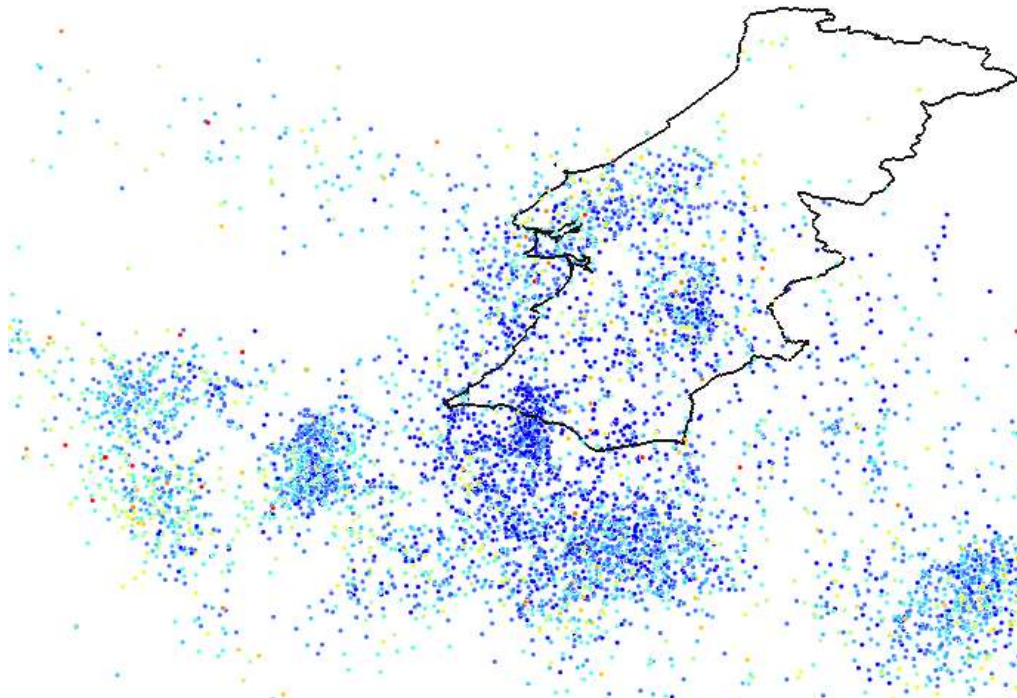


Figura 4.22 - Focos definidos em função da magnitude.

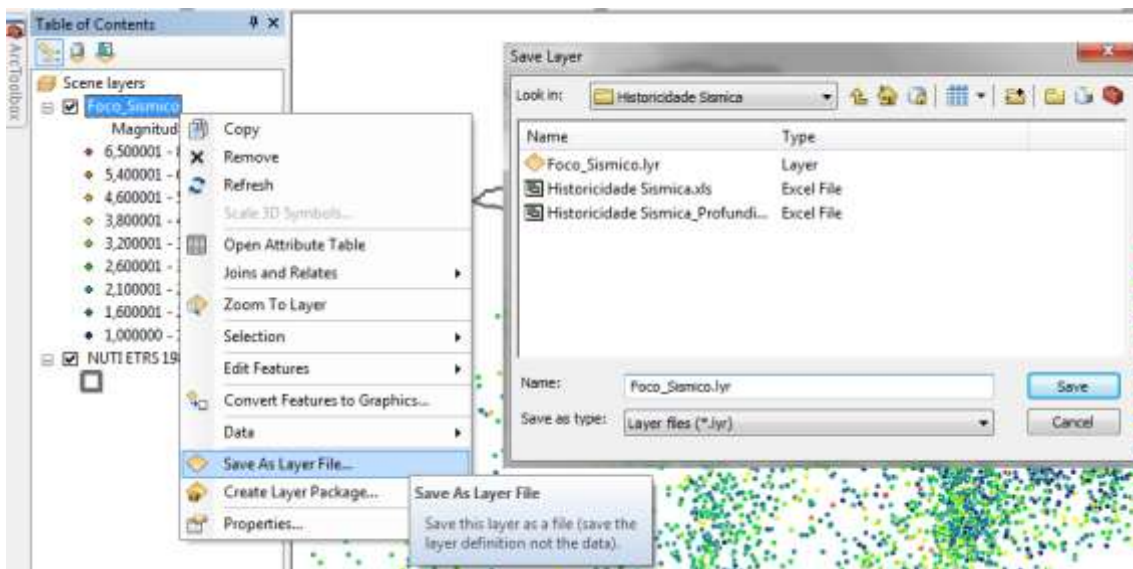


Figura 4.23 - Sequência de criação de *layer*.

4.5 Análise da informação em ambiente SIG

O modelo desenvolvido pode ser utilizado em ambiente SIG 2D ou 3D, dependendo dos objetivos da avaliação que se pretenda realizar.

A análise de informação tem que ser realizada em função dos atributos das *shapefiles*, como seguidamente será demonstrado. As análises podem ser realizadas por seleção de atributos, seleccionando a tabela *Layer Properties*, seleccionando a janela *Definition Query*, onde é possível efetuar simples operações, como por exemplo, escolher os sismos com magnitude superior a 4 (Figura 4.24).

A utilização de *Queries* (“consultas”) permite analisar informação através de expressões matemáticas, o que possibilita, por exemplo, a definição exata das entidades a localizar, em função dos atributos das mesmas. A utilização de expressões é de grande utilidade pois permite incluir vários atributos e operadores matemáticos na análise.

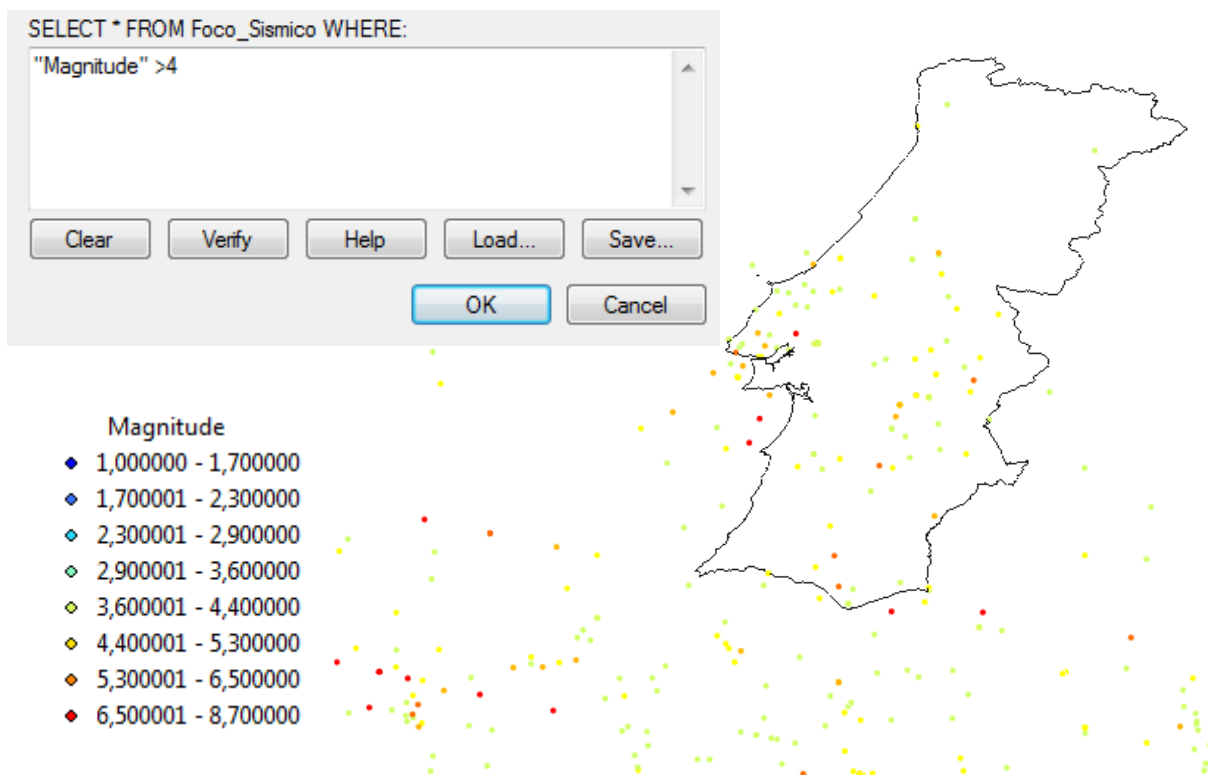


Figura 4.24 - Seleção por atributos e respetiva representação.

Desta forma, existe também a possibilidade de efetuar seleções através de expressões lógicas correspondentes a condições definidas com base em vários atributos do mesmo *shapefile*, utilizando o mesmo processo acima referido e exemplificado na Figura 4.25.

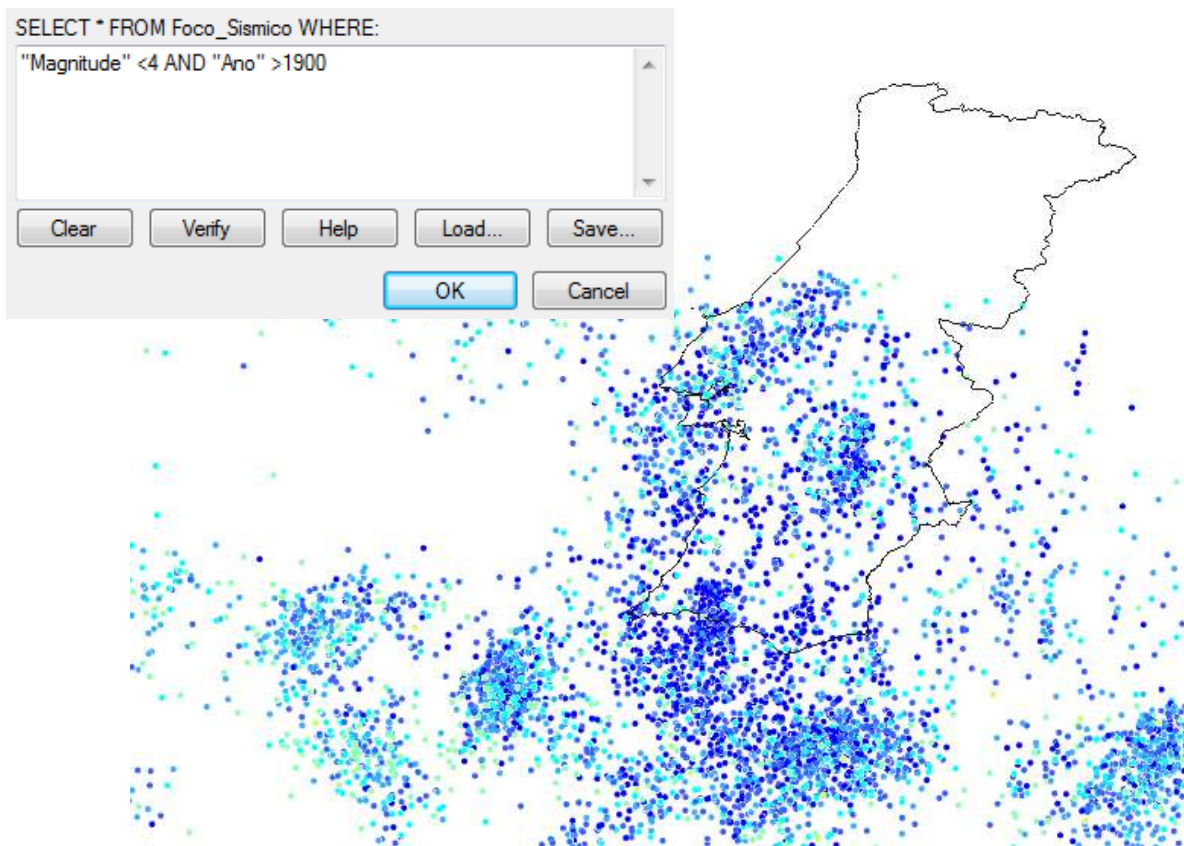


Figura 4.25 - Seleção com base em vários atributos do mesmo *shapefile*.

Existe a possibilidade de sobrepor vários *layers* de dados, e fazer uma seleção por atributos em cada um dos *layers*, utilizando mais uma vez a ferramenta *Query*, de forma a constituir conjuntos de dados que possam estar relacionados entre si, e que sejam relevantes para determinado tipo de análise, como se exemplifica na Figura 4.26.

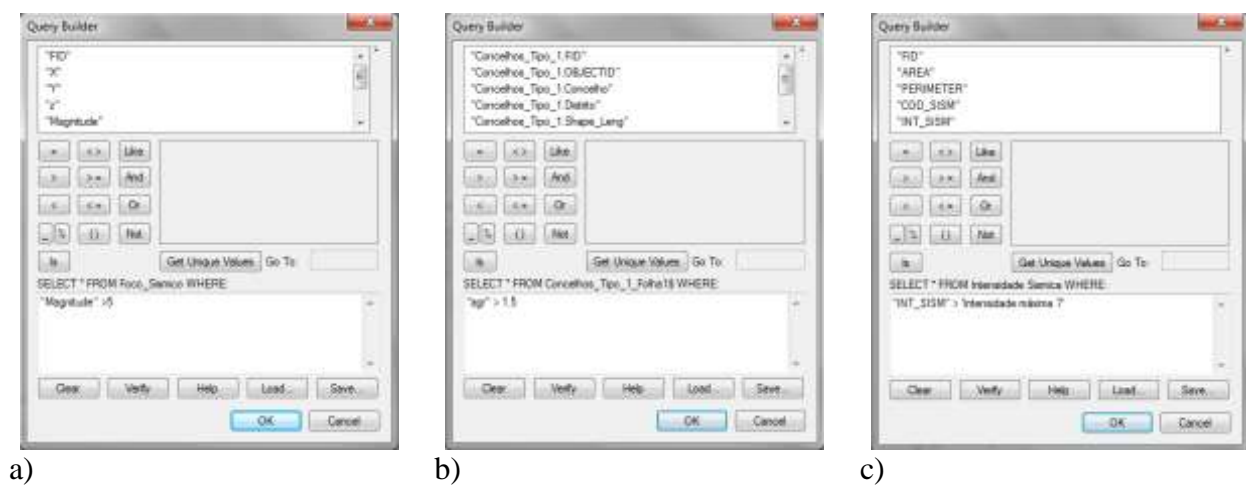


Figura 4.26 – Seleção por atributos: a) *Layer* referente à sismicidade histórica. b) *Layer* referente ao zonamento sísmico. c) *Layer* referente às intensidades máximas.

Na Figura 4.27, está ilustrado o resultado da seleção por atributos realizada nos vários *layers*.

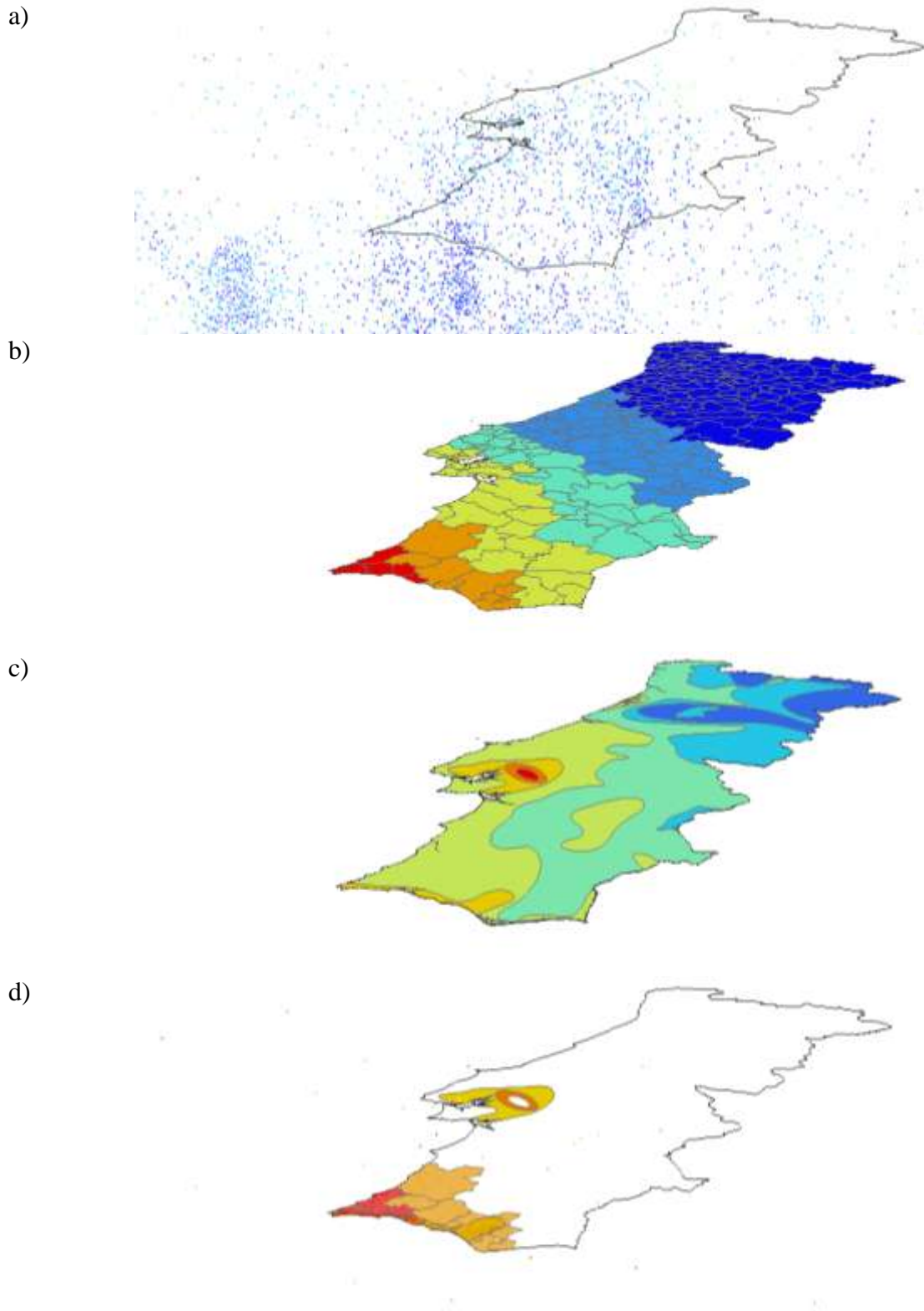


Figura 4.27 – Seleção por atributos das várias camadas. a) *Layer* dos focos sísmicos. b) *Layer* do zonamento sísmico. c) *Layer* das intensidades máximas. d) Resultados das três *Queries* realizadas

A criação de gráficos é outra funcionalidade disponível no ArcMap e ArcScene. Esta permite obter outra forma de informação visual dos atributos, possibilitando a interligação dos vários atributos presentes num elemento de estudo como mostra a Figura 4.28, onde se podem visualizar os sismos ocorridos desde 63 a.C. até 2007, em função das magnitudes registadas.

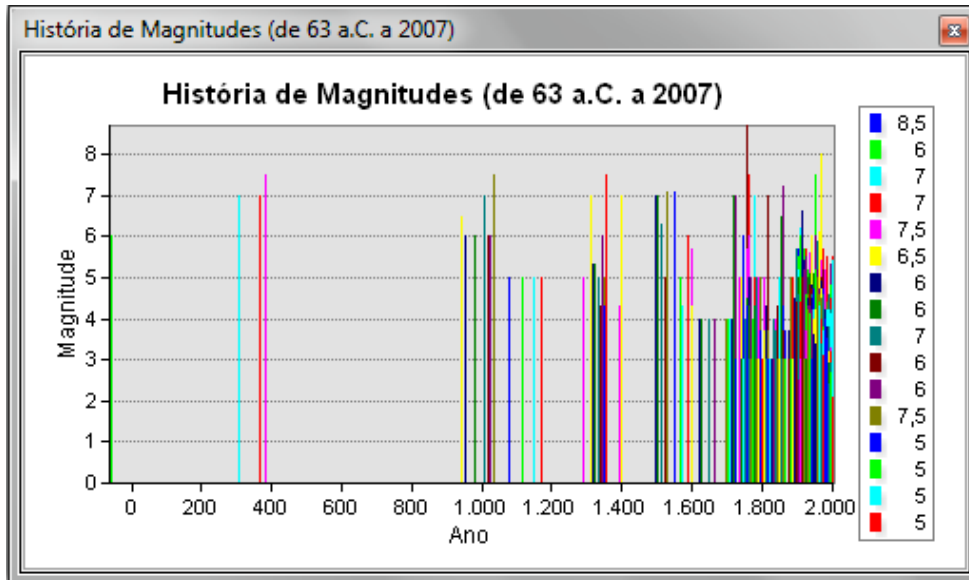


Figura 4.28 - Gráfico da história de magnitudes.

O ArcGIS disponibiliza muitas outras formas de análise. Muitas destas correspondem a técnicas de geoprocessamento, em que as seleções são efetuadas com base em características e relações geográficas entre as entidades, em alternativa às características dos atributos (cuja abordagem foi apresentada anteriormente). Apresenta-se a título de exemplo uma das técnicas de geoprocessamento mais importantes, designada por *Buffer*¹¹, que se caracteriza pela identificação e escolha das entidades de um dado tema (*shapefile* ou *feature class*) com base na sua distância até um ponto, ou linha a definir. Mostra-se o procedimento para utilização da ferramenta *Buffer*, neste caso, a partir da aplicação *ArcToolbox* (Figura 4.29).

¹¹ Análise de vizinhança ou proximidade.

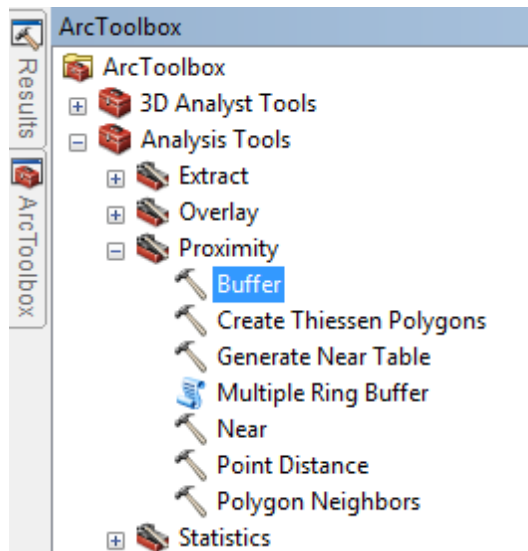


Figura 4.29 - Processo de criação de Buffer.

Define-se posteriormente na janela do comando *Buffer* (Figura 4.30) qual o tema (de dados) que se pretende estudar (*Input Features*), a localização física onde se quer que seja armazenado o resultado da análise no *Output Feature Class* (geralmente, o resultados das *queries* de geoprocessamento são armazenadas em novos *shapefiles* ou *feature classes*), o atributo a ser estudado no *Field*, e qual o raio pretendido através do *Distance*.

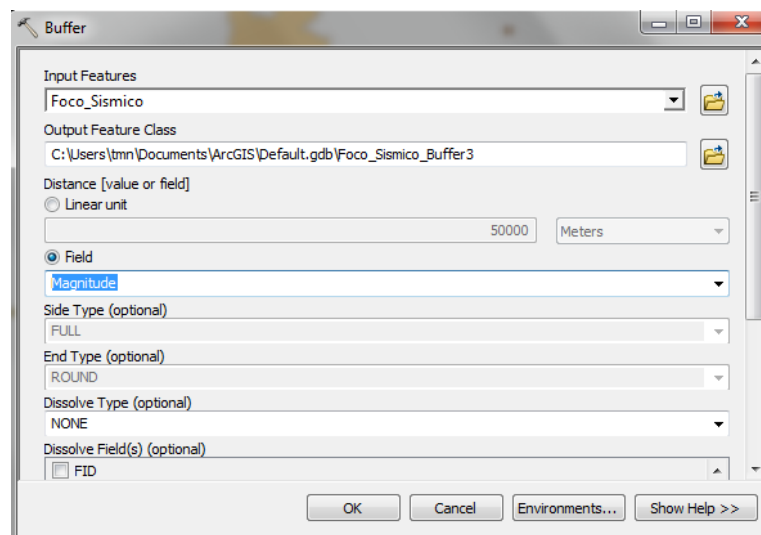


Figura 4.30 - Menu Buffer.

Na Figura 4.31, apresenta-se uma análise de proximidade, onde o objetivo passa por criar uma área de 50 quilómetros em redor dos sismos com magnitude superior a 7.

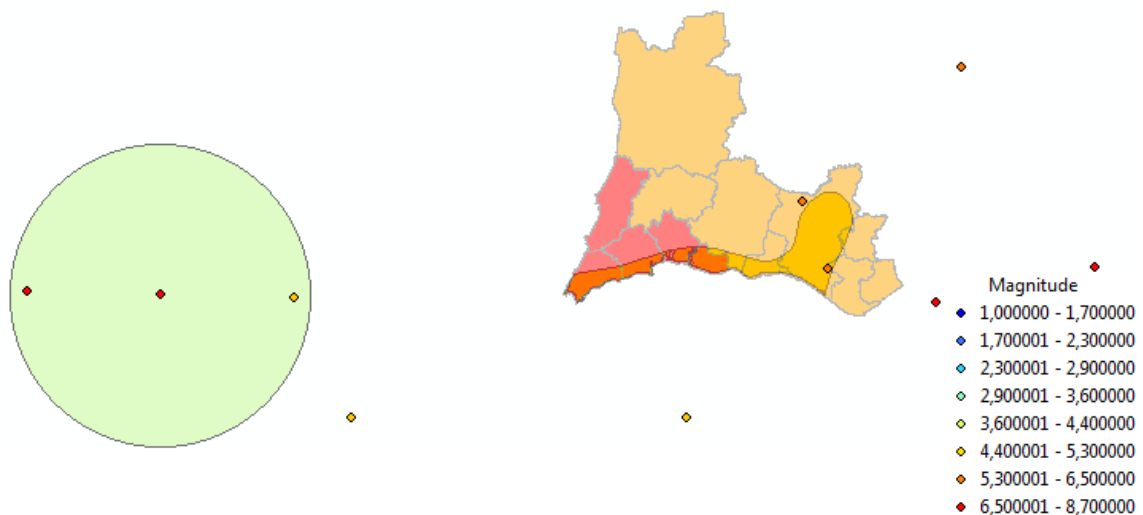


Figura 4.31 – Buffer realizado aos sismos com magnitudes superiores a 7.

4.6 Utilização do MatLab

O MatLab é classificado como sendo uma *software* interativo que desenvolve o cálculo numérico com uma grande eficiência (Gilat, 2006). A utilização do MatLab teve uma grande importância no desenvolvimento deste trabalho, uma vez que permitiu demonstrar que apesar das plataformas SIG não possuírem elementos de cálculo de estruturas, permitem que a extensão dos seus ficheiros seja utilizada em programas de cálculo automático, utilizados na engenharia civil.

O MatLab tem a capacidade de ler ficheiros em formato *shapefile*, criados pelo ArcGIS. Desta forma é possível integrar dados destes dois programas (Figura 4.32) em procedimentos de análise.

Através da extensão Mapping Toolbox do MatLab é possível importar *shapefiles*, e com a função *shaperead* consegue-se a leitura de funções vetoriais e atributos das *shapefiles*.

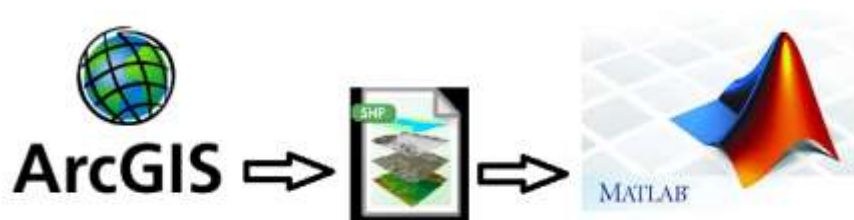


Figura 4.32 - Leitura de um ficheiro criado no ArcGIS em MatLab.

O programa desenvolvido baseia-se nos conceitos estudados no capítulo 3, os quais serão exemplificados com maior pormenor no capítulo 5. Para a leitura de temas em formato *shapefile* no MatLab é necessário importar o tema e manipulá-lo para que apenas os dados requeridos

sejam lidos. Na Figura 4.33 exemplifica-se como importar um tema em *shapefile* para o MatLab (ver Anexo).

```
S = shaperead (filename)
S = shaperead (filename, nome, valor , ...)
[S, A] = shaperead (...)
```

Figura 4.33 - Importação de um tema em formato *shapefile* para Matlab.

A escolha dos atributos a importar é outro passo importante, para tal é aconselhável limitar os atributos que se pretende observar, utilizando para tal a ferramenta 'Atributos' que permite limitar as propriedades que serão importadas para o MatLab.

4.7 Considerações finais

Neste capítulo apresentou-se o ArcGIS, os seus componentes e algumas das suas características de funcionamento, relevantes para os objetivos da presente dissertação. A obtenção e manipulação dos dados é um passo de extrema importância, pois quanto mais fíáveis e bem organizadas as informações, mais fidedigno será o resultado final alcançado. Analisou-se o processo de desenvolvimento e de transformação de dados, em ambientes 2D e 3D, mais propriamente todo o processo de criação dos *shapefile*, das TIN e das bases de dados File *Geodatabase*. Exemplificou-se como deve ser a hierarquia de organização de ficheiros no ArcGIS. Descreveram-se os processos de análise possíveis através da plataforma, finalizando com uma referência à ligação do programa MatLab ao ArcGIS.

Exploração do protótipo desenvolvido

5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo mostra-se que o estudo do risco sísmico em Portugal Continental com o auxílio de SIG pode ter aplicações relevantes na vertente estrutural do curso de Engenharia Civil.

Devido ao estado embrionário deste tipo de aplicação, advoga-se que com o desenvolvimento de procedimentos de interligação de programas de cálculo, num futuro próximo o estudo de estruturas com SIG passará a ser de grande utilidade.

Tal como foi proposto no âmbito da presente dissertação, atualmente o utilizador deve importar os temas de dados em estudo para uma das plataformas, seja o ArcMap ou o ArcScene (ou ambas) e deve desenvolver as análises seguindo os procedimentos identificados neste trabalho. No ArcGIS é possível realizar-se dois tipos de análise, como já foi referido nos capítulos anteriores: a seleção por atributos ou a seleção de entidades com base em propriedades de geoprocessamento, como a distância (a análise através de *Buffers*). No entanto foram exploradas outras opções de análise, não ficando esta limitada ao ArcGIS, como foi referido no final do capítulo anterior: os *shapefile*, podendo ser reproduzidos no MatLab, possibilitam um estudo não só a nível geográfico, mas também a um nível de cálculo estrutural.

5.2 Aplicação à geofísica

A geofísica é conhecida por ser uma ciência que estuda a Terra, especificamente a partir de métodos de propagação de campos de energia na superfície terrestre. É uma ciência que usa os princípios da física para o estudo da Terra. O princípio de funcionamento da pesquisa passa pela realização de medições efetuadas na superfície, sendo influenciadas pela constituição interna do planeta. Os resultados obtidos traduzem-se numa escala vertical e horizontal.

Apesar de esta ciência ser considerada exata, e aquela que nos fornece mais informação sobre a constituição do nosso planeta, os resultados recolhidos não podem ser considerados fiéis. A tecnologia para o estudo de camadas tão complexas como a crosta terrestre não se encontra muito desenvolvida, como é exemplo a afirmação do ponto 2.3.3, que mostra os ângulos feitos pelas falhas dentro de um intervalo (Lopes, 2012).

5.2.1 Estudo de posição de falhas

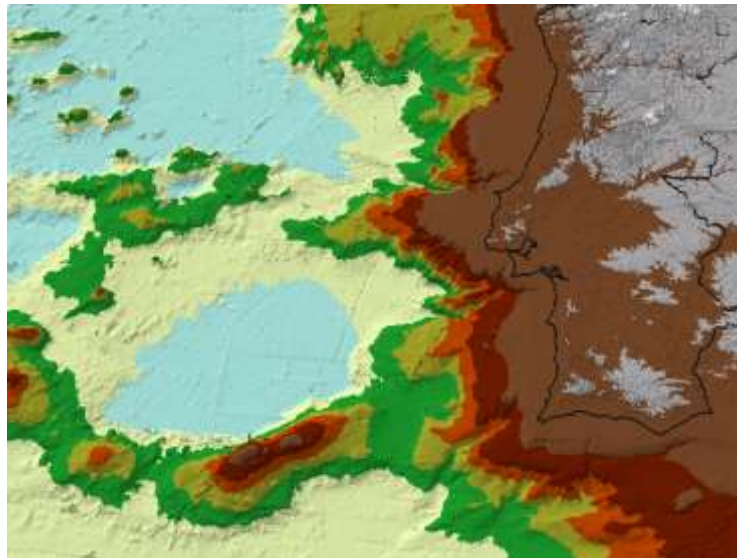
As falhas que influenciam o território nacional estão localizadas em Portugal Continental e ao longo da sua costa. Tal como já foi referido no capítulo 2, o estudo de falhas não permite conclusões exatas. Tal facto impede a determinação com exatidão do local das falhas e do ângulo que estas possuem em profundidade.

O estudo da sismologia refere que, o foco sísmico pode ocorrer nas falhas geológicas ou nas suas proximidades. Assim sendo, a inclusão de este tema de estudo no protótipo desenvolvido permitiu a identificação de várias zonas onde se reúnem vários focos sísmicos, o que aumenta a probabilidade de existirem falhas geológicas nesses locais. É de referir que os registos antigos sobre sismos pouco contribuíram para este estudo, já que não tinham indicadores do foco sísmico, apenas do epicentro.

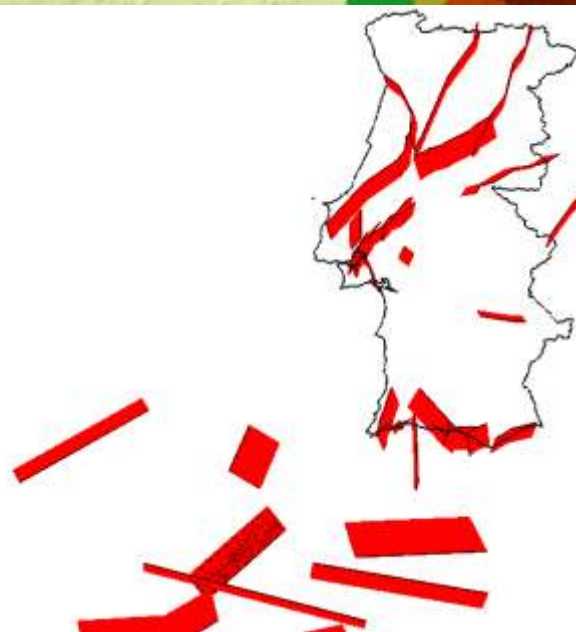
Para o desenvolvimento deste estudo utiliza-se o módulo ArcScene, porque este permite a manipulação e análise de dados e, simultaneamente, a uma visualização em 3D.

Inicialmente teve-se em consideração todos os temas (*layers*) relevantes para este estudo, como tal a Figura 5.1 mostra em a) o *layer* referente à batimetria e ao relevo de Portugal continental, em b) o *layer* referente às falhas mais importantes e em c) o *layer* ilustrativo dos focos sísmicos, em que a cor representa a magnitude registada.

a)



b)



c)

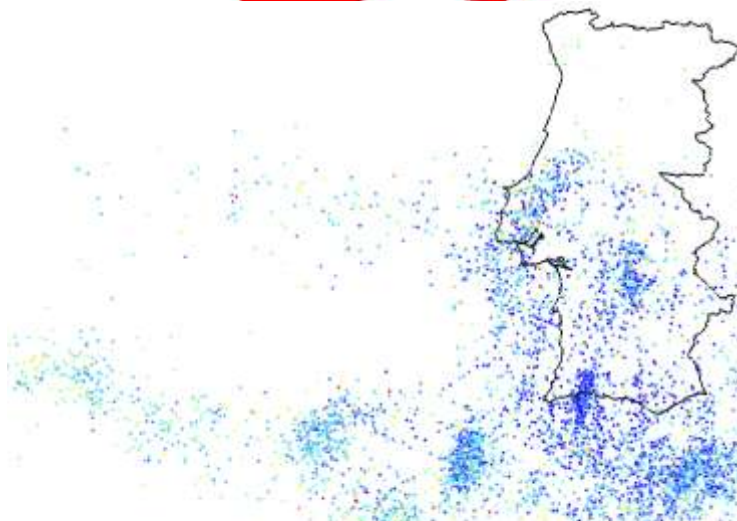


Figura 5.1 - *Layers* utilizados no estudo de falhas. a) *Layer* da batimetria e relevo de Portugal. b) *Layer* das falhas mais importantes. c) *Layer* dos focos sísmicos.

A análise conjunta dos *layers* anteriores resulta no mapa representado na Figura 5.2. Observando esta figura podem-se retirar as seguintes conclusões:

- A ocorrência de sismos dá-se principalmente na zona centro do país, no sul do país e ao largo da costa, também a sul do país;
- As falhas a norte não registam qualquer atividade sísmica significativa, partindo-se do princípio que estas não estarão ativas;
- Na zona centro, existe grande acumulação de focos sísmicos e de falhas, pelo que se prevê que estas se encontrem ativas;
- No sul do país existe igualmente grande acumulação de focos sísmicos e de falhas, supondo-se que estas se encontrem ativas.

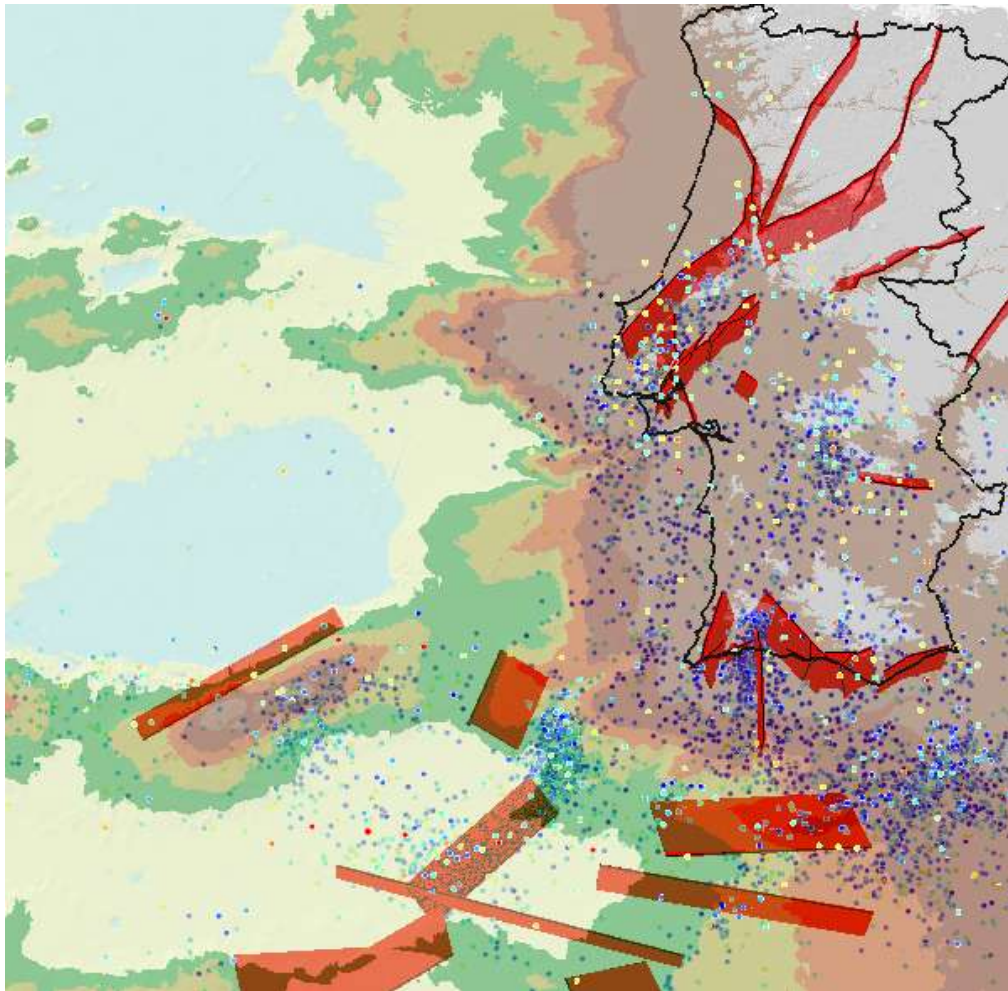


Figura 5.2 - Resultado (em perspetiva) dos *layers* sobrepostos.

Interessa no entanto uma observação mais pormenorizada, com o intuito de mostrar possíveis resultados interessantes para o leitor.

A falha de Marquês de Pombal (Figura 5.3), situada a sudoeste de Portugal Continental, sempre foi associada a inúmeros eventos sísmicos, nomeadamente ao sismo de 1 de Novembro de 1755.

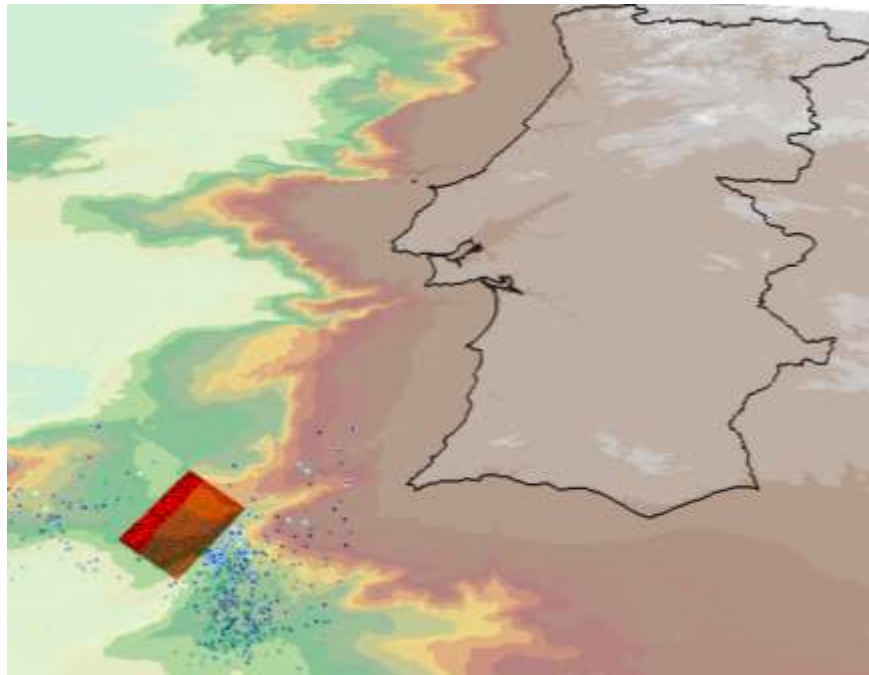


Figura 5.3 - Representação da falha do Marquês de Pombal e dos focos sísmicos envolventes.

A Figura 5.4 revela uma outra perspetiva da falha e dos focos, onde se pode observar um aglomerado destes à direita da falha. Este facto comprova que pode haver um erro na determinação da localização da falha, uma vez que os focos não se encontram no plano da falha.

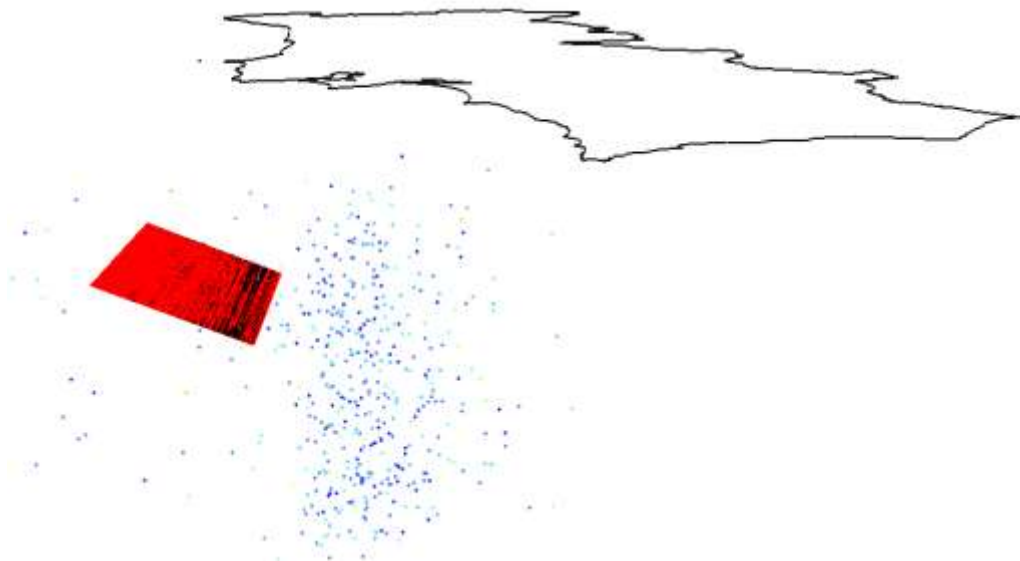


Figura 5.4 - Perspetiva da falha do Marquês de Pombal e focos envolventes.

O gráfico da Figura 5.5 mostra que antes de 1755 nenhum sismo foi registado nesta zona, devendo-se este facto à inexistência de aparelhos de medição de tal fenómeno e os estudos realizados aos sismos antigos não se localizam nesta região. A partir de 1950 existe uma enorme ocorrência de sismos, com magnitudes inferiores a 4.

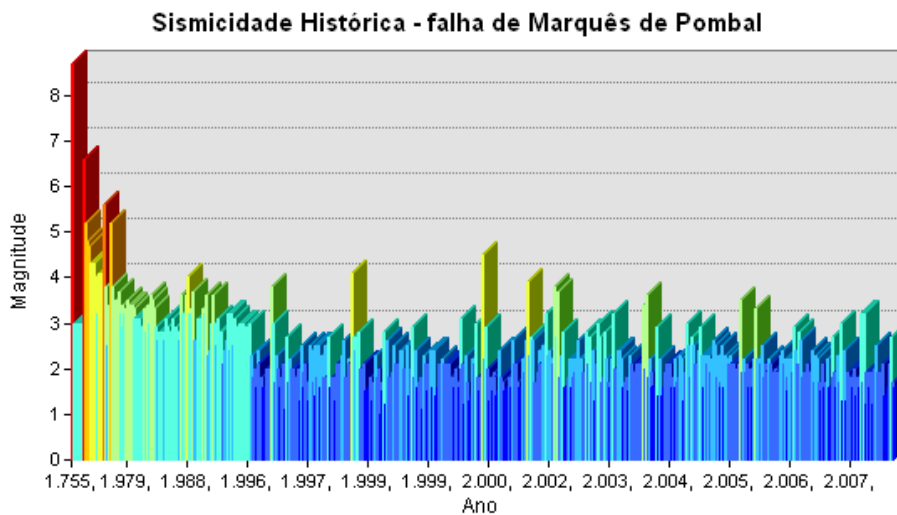


Figura 5.5 - Gráfico representativo dos sismos ocorridos na envolvente da falha.

Por fim, a Figura 5.6 ilustra a que profundidade ocorreu o sismo, podendo-se observar que o sismo de 1755 não tem tal registo, e que raramente ocorrem a profundidades inferior a 10.000 metros.

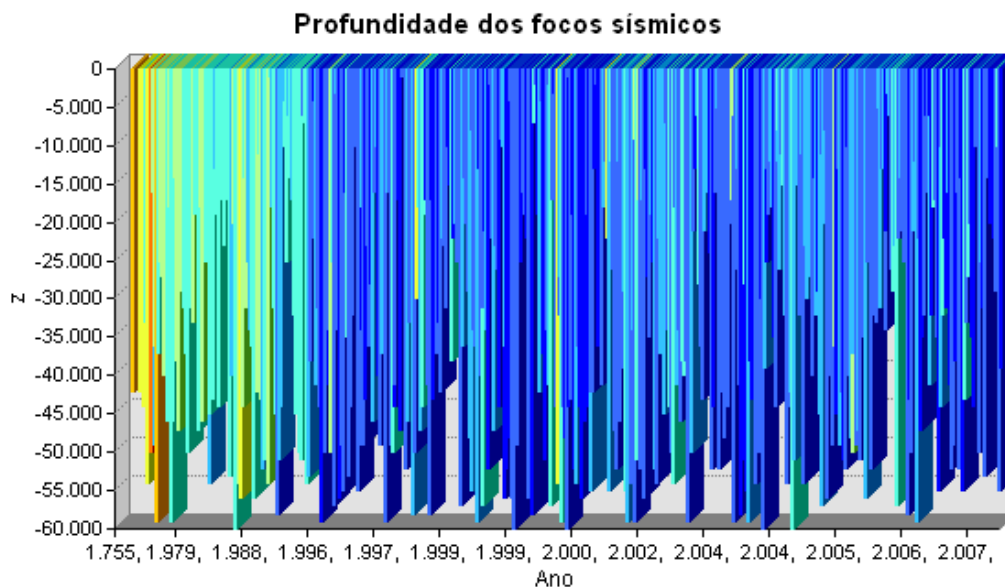


Figura 5.6 - Profundidade dos focos sísmicos.

5.3 Exemplos de aplicação à Engenharia Civil

Neste ponto efetuam-se análises com recurso à plataforma SIG com aplicação à engenharia civil. Estuda-se qual o espectro de resposta com valores de aceleração mais elevados na envolvente da Barragem do Cabril, para tal, é necessário realizar-se uma seleção por atributos determinando-se as estações sismográficas mais próximas. Posteriormente criam-se espectros através de registos de histórias de acelerações.

É ainda efetuada uma análise à melhor localização para implementação de uma estrutura tendo em atenção os vários temas de estudo incluídos na base de dados da plataforma. Após a determinação do local, faz-se uma análise dinâmica da estrutura, determinando deslocamentos e esforços devido aos fenómenos sísmicos da região.

5.3.1 Criação de Espectros de Resposta para uma zona envolvente à Barragem do Cabril

A ação de um sismo é em vários tipos de estruturas a ação condicionante no seu dimensionamento. No entanto, o registo sísmico por si só não é suficiente. É necessário transformá-lo num espectro de respostas, pois no âmbito da engenharia civil, é uma forma direta de obtermos resultados úteis (Figura 5.7).

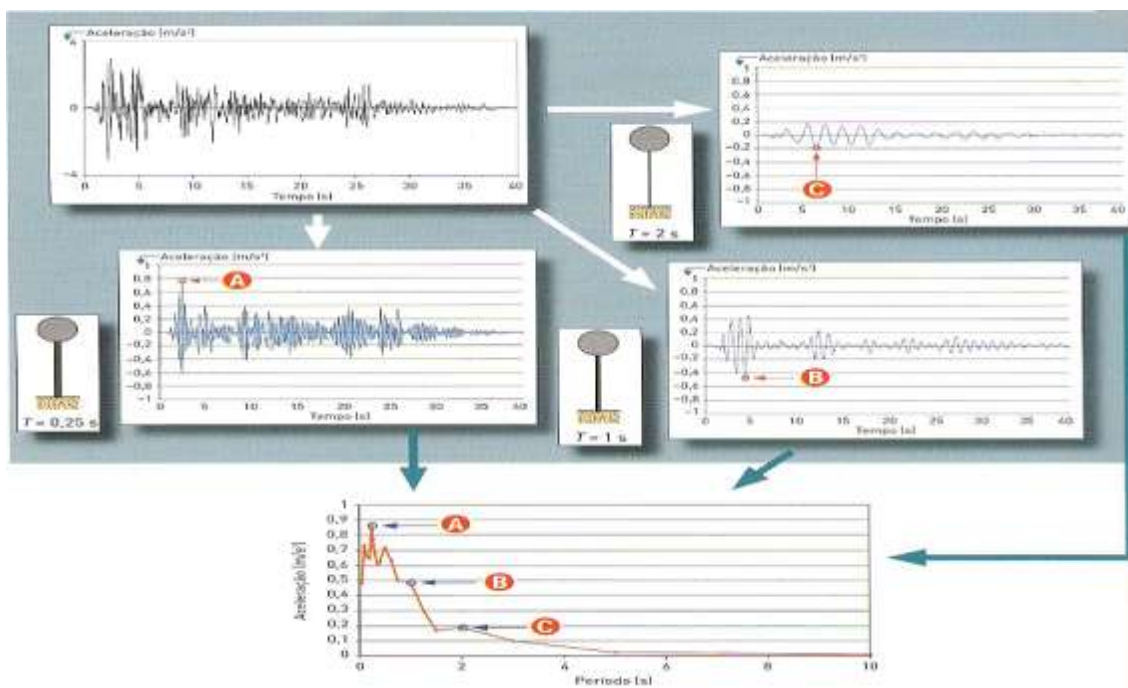


Figura 5.7 - Procedimento para obtenção de espectro de resposta (Lopes, 2012).

Inicialmente, para exemplificar o que se pretende demonstrar, utiliza-se o ArcScene, no qual representa-se a Rede Sísmica Nacional e as grandes barragens portuguesas.

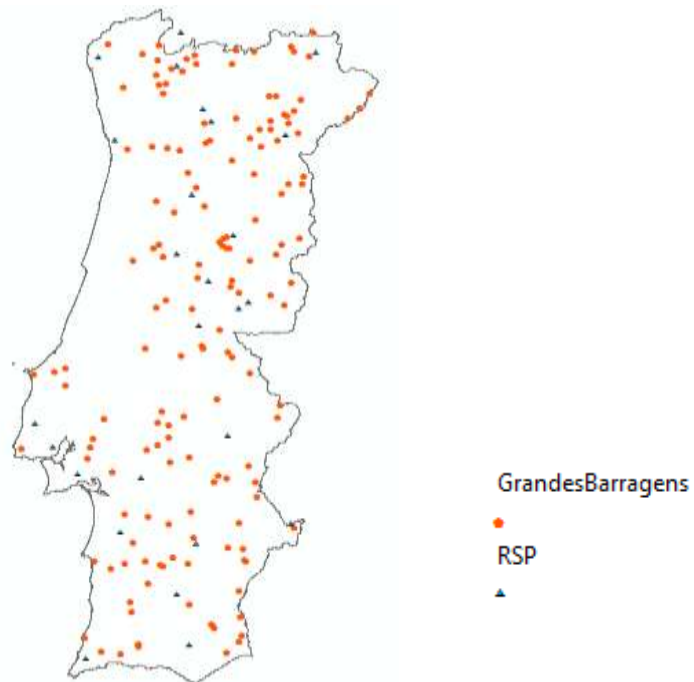


Figura 5.8 - Representação da camada da rede sísmica nacional e das grandes barragens.

Seguidamente seleciona-se a Barragem do Cabril e executa-se a função *Buffer* para determinar as estações sísmicas num raio de 100 quilómetros, como se pode observar na Figura 5.9.

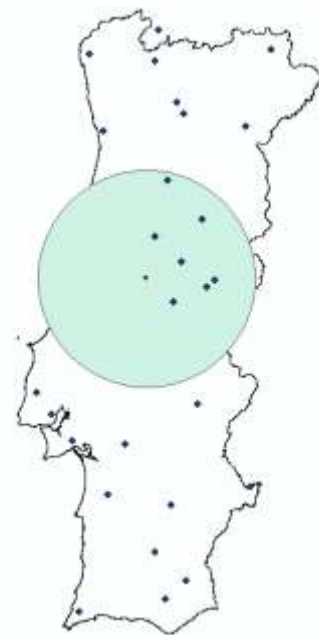


Figura 5.9 - *Buffer* envolvente à Barragem do Cabril.

Do *Buffer* executado em torno da barragem, são identificadas sete estações sísmicas, estando arquivado em cada uma o registo da história de acelerações mais intensa.

O próximo passo é criar o espectro de resposta para cada registo, utilizando as noções básicas e metodologias descritas no capítulo 3.

O ArcGIS não está preparado internamente para o desenvolvimento imediato das rotinas de programação necessárias à criação de espectros de resposta, no entanto os ficheiros criados no ArcGIS podem ser executados no MatLab, como já foi referido no capítulo 4.

A Figura 5.10 mostra uma pequena aplicação desenvolvida que permite calcular o espectro de resposta a partir da história de acelerações, obtida no MatLab, para tal é necessário importar uma *shapefile* que tem como dados a história de acelerações de um sismo. A aplicação permite ainda escolher as propriedades do oscilador, como a massa e o coeficiente de amortecimento, e permite ainda definir o intervalo de tempo e os incrementos que queremos observar.

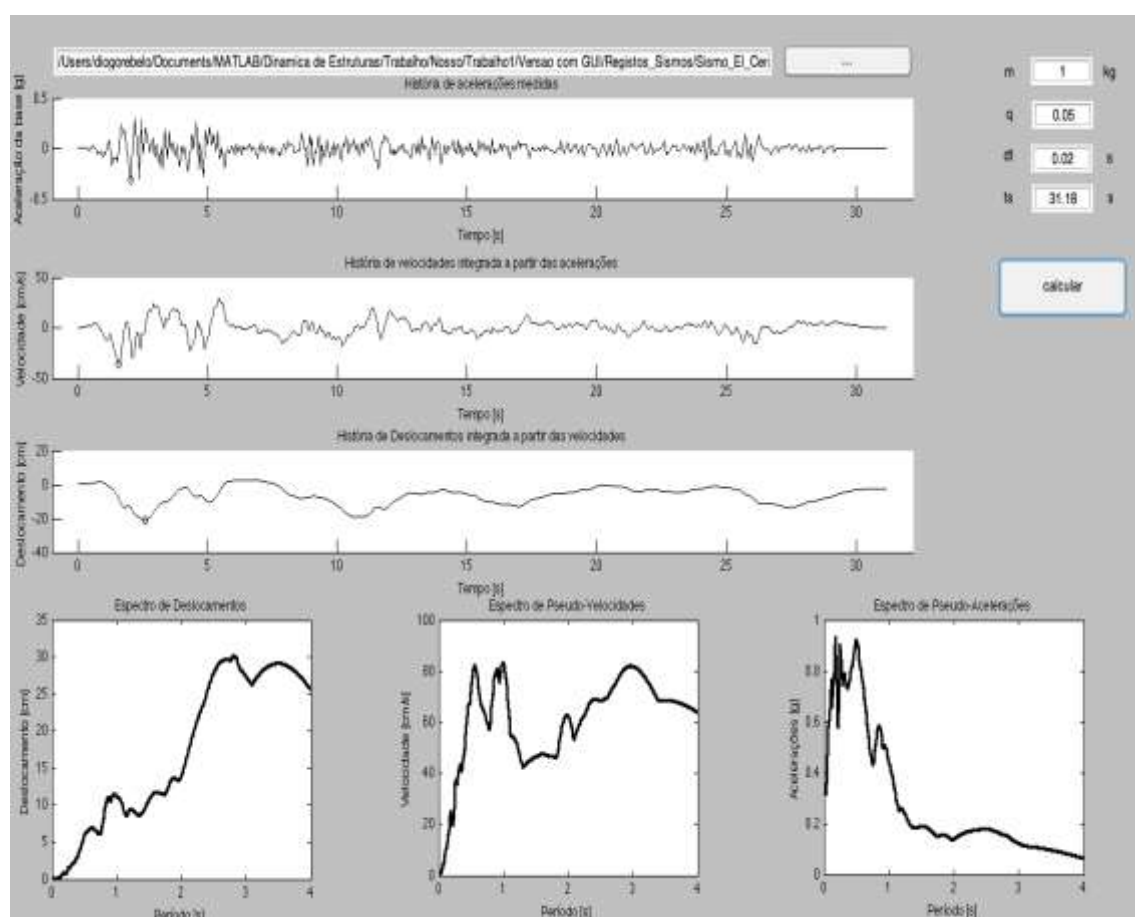


Figura 5.10 - Aplicação para cálculo de espectro de resposta partindo de histórias de acelerações.

Os resultados mostram um espectro de resposta com valores muito elevados para períodos naturais baixos, logo o interesse deste espectro passa por ser utilizado em estruturas com períodos naturais mais elevados, onde a aceleração no solo não teria um efeito muito grave.

5.3.2 Distância da Barragem do Cabril às falhas envolvidas

Outra ferramenta disponível nos módulos do ArcGIS permite a medição de distâncias entre elementos. A título de exemplo, na Figura 5.11, representam-se as grandes barragens de Portugal e duas falhas de grandes extensões.



Figura 5.11 - Layer das Grandes Barragens e as falhas de Ponsul e Seia.

Pretende-se agora calcular a distância da Barragem do Cabril até às falhas mais próximas (Figura 5.12), ou seja, a de Seia-Lousã e a de Ponsul. Este parâmetro pode ser importante quando se pretende determinar a distância do foco até a uma estrutura de engenharia.

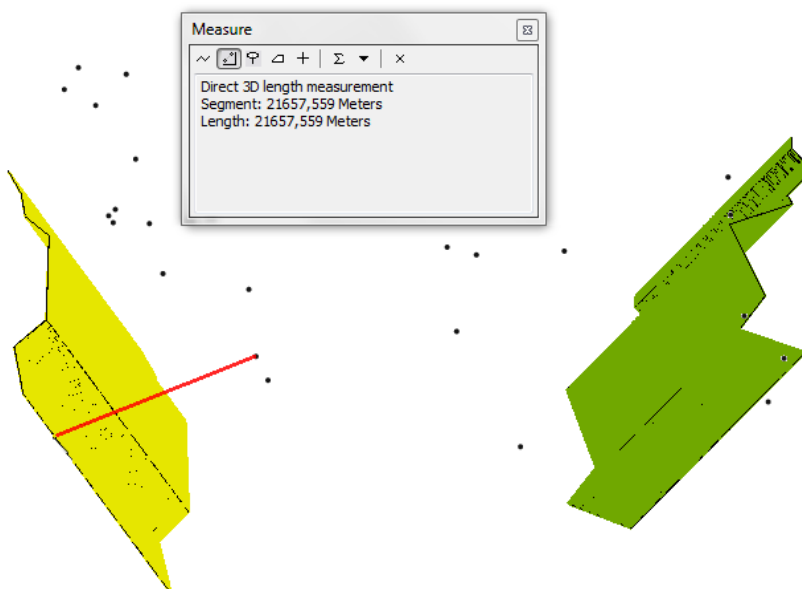


Figura 5.12 - Distância da Barragem do Cabril à falha de Seia-Lousã (à esquerda).

5.4 Considerações finais

Neste capítulo foram dados a conhecer alguns exemplos de aplicação ligados à geofísica e à engenharia civil. No âmbito da geofísica estudou-se a posição de falhas sísmicas através dos focos sísmicos. Utilizando o ArcScene determinaram-se os locais de aglomeração dos mesmos, indicativos da presença de uma falha. Para este estudo foi essencial a plataforma 3D, pois facilitou a visualização, tanto dos focos, como das falhas.

Os exemplos aplicados à engenharia civil foram desenvolvidos no ArcMap e no ArcScene. No primeiro utilizaram-se várias ferramentas que possibilitam a seleção por atributos, e por área de influência, e no segundo executaram-se medições entre falhas e barragens. O primeiro exemplo teve como objetivo mostrar que o ArcGIS pode ser interligado com outras plataformas, como é o caso do MatLab, possibilitando não só um estudo a nível geográfico, mas também a nível estrutural.

Conclusões e Perspetivas Futuras

6.1 Síntese do trabalho e conclusões

Os fenómenos sísmicos caracterizam-se pela sua imprevisibilidade e período de retorno incerto e normalmente muito grande, constituindo efetivamente um problema para os engenheiros civis. Obrigam desta forma à conceção de estruturas que tenham capacidade de dissipar a energia por eles produzida.

Este trabalho teve como objetivo principal estudar o desenvolvimento de uma ferramenta que auxilie futuramente o estudo destes fenómenos, que devido à sua complexidade, não podem ser resolvidos por uma receita previamente definida. Implicam a sua análise em função de todos os fenómenos sísmicos e de todos os elementos envolventes que os provocam. A ferramenta ensaiada correspondeu a um sistema de informação geográfica, neste caso o ArcGIS, que foi a ferramenta utilizada para realizar este trabalho.

Descrevem-se assim vários fenómenos sísmicos, abordando-se a forma como estes foram interligados através da plataforma SIG implementada, descrevendo todas as características com interesse para o desenvolvimento de novos procedimentos de análise.

Aborda-se o tema da dinâmica de estruturas, nomeadamente alguns princípios básicos sobre osciladores de um grau de liberdade, vibrações forçadas, obtenção de espetros de resposta e osciladores generalizado de um grau de liberdade.

Descreve-se como foi desenvolvida a plataforma, explicando numa primeira fase os conceitos relevantes associados ao ArcGIS e aos SIG e, posteriormente, como foi feita a recolha de dados, como foram manipulados, como foram transformados e por fim como é feita a análise e cruzamento de informação. Foi exemplificado o funcionamento básico do MatLab nos parâmetros que se definiu como necessários.

Numa fase final foram implementados vários exemplos de aplicação através dos quais foi possível observar várias funcionalidades proporcionadas pelo ArcGIS e a sua interligação com

outro *software*. A possibilidade de retirar vasta informação sobre vários fenómenos sísmicos numa determinada zona foi também evidenciada na fase final do trabalho.

6.2 Desenvolvimentos Futuros

Os sistemas de informação geográfica são neste momento uma ferramenta em grande desenvolvimento em várias áreas, mas ainda numa fase embrionária na engenharia de estruturas.

No futuro, com uma base de dados que contenha muito mais informação acerca dos fenómenos sísmicos e de outros fenómenos naturais e sociais (por exemplo associados à proteção civil) este tipo de plataforma permitirá um estudo mais aprofundado e preciso da dinâmica de estruturas associada à sismicidade. É essencial que existam mais modelos estruturais interligados com os SIGs. Desta forma será possível num único ambiente um maior aprofundamento do conhecimento acerca de uma estrutura e do seu comportamento, evitando a consulta de normas, documentos e outras fontes de dados dispersos. Tudo isto pode ser incluído nessa plataforma SIG, bem como os projetos efetuados em várias zonas, que incluam todos os cálculos armazenados numa base de dados, o que permitirá a partilha de informação e de ideias.

Os utilizadores (pelo menos do universo académico) poderiam desenvolver programas e partilha-los, poderiam adicionar informações que reconhecessem como necessária, poderiam notificar problemas encontrados em projetos partilhados ou até mesmo informações de características específicas de uma zona.

Como foi referido no capítulo 4, a recolha de dados é a fase mais crítica da formação de um SIG, mas se existir um SIG com acesso ‘aberto’, os dados poderiam ser nele colocado não apenas por uma pessoa, mas por todos os utilizadores (pelo menos do universo de especialistas) e com *software* interoperacional que permita aceder às bases de dados de informação e ler os dados existentes e escrever resultados de análises, permitindo criar uma verdadeira comunidade técnica cooperante (em rede), com vista a minimizar os riscos sísmicos do edificado e a segurança de populações e bens.

Criação de mapas

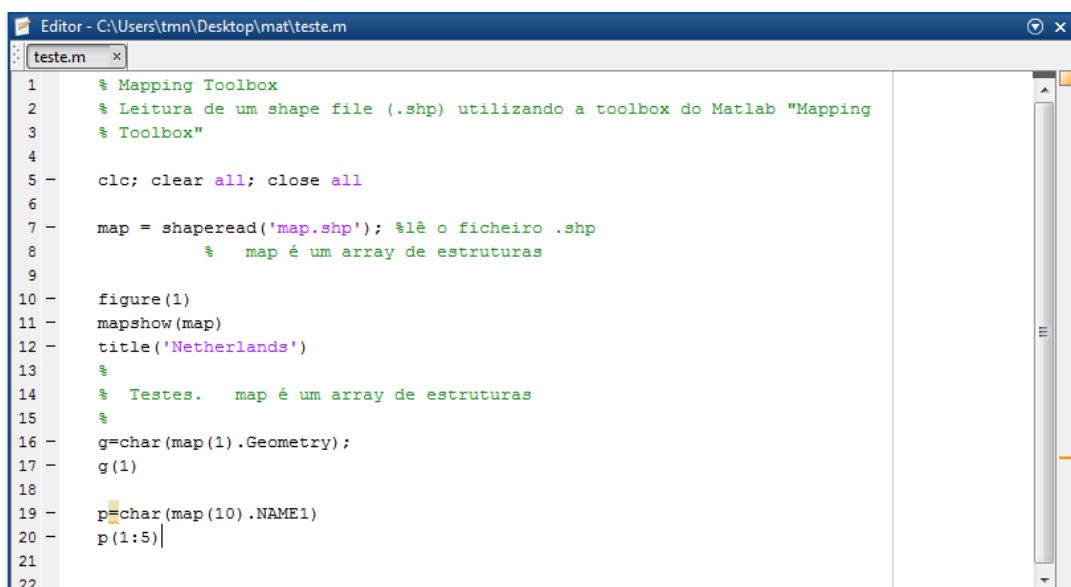
A base de dados fornecida pelo site GPS Visualizer é da responsabilidade da NASA, e disponibiliza dados com 90 metros de resolução horizontal (SRTM3).

Procedimento para criação de mapas:

- Definir pontos com latitude e longitude num ficheiro tipo txt.;
- Importar dados para <http://www.gpsvisualizer.com/elevation>;
- Converter coordenadas geográficas em planas;
- Num ficheiro xls. organizar na forma (x,y,altitude);
- Importar ficheiro para o ArcMap e definir coordenadas ETRS89 PORTUGAL, como exemplificado no ponto 4.4.1.

Utilização de Matlab em interligação com ArcGis

O MatLab contém ferramentas que possibilitam a leitura de *shapefiles*, ou seja, ficheiros criados através do ArcGis. Se no ArcGis for desenvolvido um mapa, onde na tabela de atributos estejam as coordenadas, a *shapefile* correspondente a esse mapa pode ser executado no MatLab através de uma Toolbox, como descrito na Ilustração 1.



```
Editor - C:\Users\tmn\Desktop\mat\teste.m
teste.m x
1 % Mapping Toolbox
2 % Leitura de um shape file (.shp) utilizando a toolbox do Matlab "Mapping
3 % Toolbox"
4
5 - clc; clear all; close all
6
7 - map = shaperead('map.shp'); % lê o ficheiro .shp
8     % map é um array de estruturas
9
10 - figure(1)
11 - mapshow(map)
12 - title('Netherlands')
13 %
14 % Testes. map é um array de estruturas
15 %
16 - g=char(map(1).Geometry);
17 - g(1)
18
19 - p=char(map(10).NAME1)
20 - p(1:5)
21
22
```

Ilustração 1 - Leitura de *shapefiles* no MatLab.

O resultado do programa no ArcGis (Ilustração 2).



Ilustração 2 - Mapa da Holanda obtido no ArcGis.

E no Matlab (Ilustração 3):

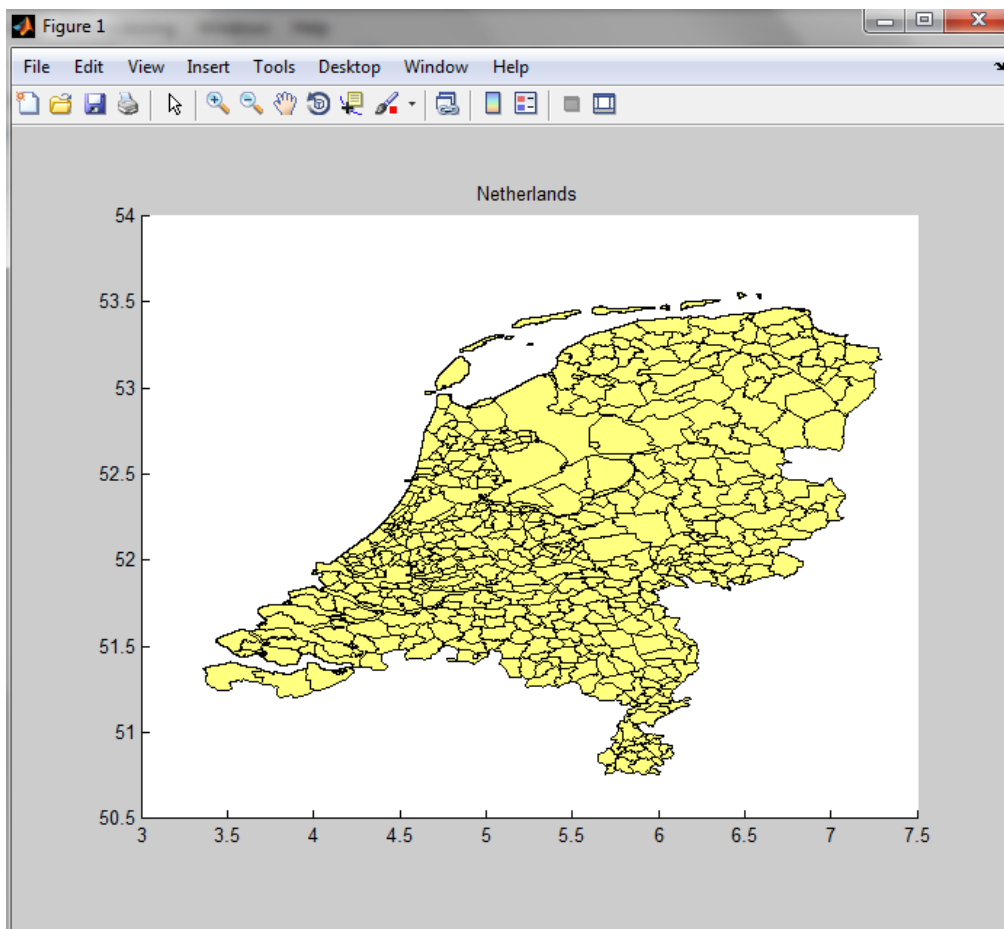


Ilustração 3 - Mapa da Holanda obtido no MatLab.

Bibliografia

- [1] ANPC. 2013. Os Sismos em Portugal Continental. <http://www.proteccaocivil.pt/>. [Online] 2013
- [2] BRETERNITZ, Vivaldo José. 2001. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS: UMA VISÃO PARA ADMINISTRADORES E PROFISSIONAIS DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO. 2001.
- [3] Cabral, João. 1995. *Neotéctonica em Portugal Continental*. 1995.
- [4] Chopra, Anil K. 2001. *Dynamics of Structures*. 2001.
- [5] Clarke, Keith. 2010. *Getting Started With Geographic Information Systems*. 2010.
- [6] Clough, Ray and Penzien, Joseph. 2010. *Dinamics of structures*. s.l. : Berkeley, 2010.
- [7] Dias, J.Alveirinho. 2013. Geologia Ambiental. <http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/>. [Online] 2013
- [8] Espada, Margarida. 2010. *Desenvolvimento de modelos para análise dinâmica de estrururas. Aplicação a barragens de betão e estruturas auxilires* . 2010.
- [9] Gilat, Amos. 2006. *Matlab com Aplicações em Engenharia*. s.l. : Bookman, 2006.
- [10] Goodchild, Michael F. 1991. *Geographical Information Systems*. 1991.
- [11] GPSVisualizer. gpsvisualizer. www.gpsvisualizer.com. [Online]
- [12] IPMA. Instituto Portugues do Mar e da Terra. www.ipma.pt. [Online]
- [13] IPQ. 2001. *Norma Portuguesa - Eurocódigo 8*. 2001.
- [14] Lopes, Mário. 2012. *Sismos e Edifícios*. s.l. : Edições Orion, 2012.
- [15] Manzato, Gustavo. 2005. GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE POR MEIO DE PLATAFORMAS COMPUTACIONAIS COM ESTRUTURA VETORIAL E RASTER. 2005.
- [16] Matos, João. 2008. *Fundamentos de Informação Geográfica*. s.l. : Lidel, 2008.
- [17] Melo, Ana Fonseca de. 2001. *Sismologia*. Coimbra : s.n., 2001.
- [18] Mendes, Paulo. 2013. *Apontamentos de Dinamica de Estruturas*. 2013.
- [19] MundoGeo. MundoGeo. www.mundogeo.com. [Online]
- [20] Piaget, Instituto. Instituto Piaget. www.ipiaget.org. [Online]
- [21] Senos, Maria Luisa. 2003. *Sismicidade de Portugal Continental*. 2003.
- [22] UALG. Universidade do Algarve - Disciplina de Geologia Ambiental. <http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB.html>. [Online]