

CLAÚDIA VANESSA DIAS REIS

**PROCESSOS FÍSICOS PARA A SIMULAÇÃO DE
MOVIMENTOS SÍSMICOS INTENSOS PARA OS
AÇORES**

Orientadora: Alexandra Carvalho

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Engenharia Civil

Lisboa

2013

CLAÚDIA VANESSA DIAS REIS

**PROCESSOS FÍSICOS PARA A SIMULAÇÃO DE
MOVIMENTOS SÍSMICOS INTENSOS PARA OS
AÇORES**

Dissertação apresentada para a obtenção do
Grau de Mestre em Engenharia Civil, no Curso
de Mestrado em Engenharia Civil, conferido
pela Universidade Lusófona de Humanidades
e Tecnologias.

Orientadora: Doutora Alexandra Carvalho
Co-orientadora: Prof.^a Doutora Maria João
Falcão

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Engenharia Civil

Lisboa

2013

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação, intitulada *Processos Físicos para a Simulação de Movimentos Sísmicos Intensos para os Açores*, resultou do trabalho da autora desenvolvido no Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas (NESDE) inserido no Departamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), no âmbito do projeto SIGMA - Caracterização da Ação Sísmica no Arquipélago dos Açores, da Fundação para a Ciência e Tecnologia, para obtenção do grau de mestre.

O desenvolvimento da dissertação é o somatório da contribuição de esforços de diversas pessoas representativas de múltiplas entidades, a designar:

- Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em geral, por ser uma entidade de referência na comunidade científica, possibilitando o contato e desenvolvimento de jovens aspirantes à carreira de investigação;

- Departamento de Estruturas, mais concretamente o Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas, pela partilha de informação e sentimento de inclusão que souberam experientemente transmitir;

- À Doutora Alexandra Carvalho, investigadora do LNEC, orientadora deste projeto e amiga, pelo conhecimento, objetividade, simplicidade e apoio;

- Ao Doutor José Borges da Universidade de Évora, Departamento de Geofísica, pelo auxílio na escolha e operacionalidade de *software* destinado à análise sísmica;

- Ao Dr Fernando Carrilho e à Dra Dina Vales, do Instituto Português do Mar e da Atmosfera, antigo Instituto de Meteorologia, pelo contributo na determinação de parâmetros essenciais ao desenvolvimento do trabalho e execução de mapas de localização das estações da rede acelerográfica nacional e mapas epicentrais;

- Ao grupo de ‘Inequianos’ do quotidiano por proporcionarem a facilidade de convívio e amizade em ambiente de trabalho.

À minha família, uma referência destacada, a minha profunda gratidão por existirem.

RESUMO

A ocorrência de um evento sísmico de relevante magnitude provoca um impacto devastador, a curto e a longo prazo na zona afetada, a nível social e económico. No sentido de minimizar os danos, é necessário o conhecimento da sismicidade global para que sejam implementadas as medidas regulamentares e financeiras que possibilitem reforçar a educação de populações e a prevenção, resposta e reparação de danos provocados por sismos. É importante a coordenação e a contribuição de todas as equipas multidisciplinares, de alguma forma relacionadas com a mitigação do risco sísmico.

No sentido de estabelecer os cenários sísmicos inerentes ao arquipélago dos Açores, são determinados parâmetros de caracterização dos movimentos intensos do solo da região. A caracterização da ação sísmica é assumidamente composta por três processos distintos mas complementares de libertação de energia na fonte sísmica, propagação da energia sísmica e alteração do conteúdo energético devido a efeitos locais.

As características da fonte sísmica e da propagação de energia no meio, têm origem nos registos em rocha da rede acelerográfica dos Açores e da rede sísmica de banda larga. A informação recolhida, sob a forma de acelerogramas, após processamento, origina os espectro de amplitude de Fourier em aceleração e em deslocamento.

Do espectro de amplitude de Fourier em aceleração, é determinado o fator de decaimento k , referente ao efeito de atenuação na crosta superior diretamente por baixo do local em estudo (válido para distâncias na ordem das centenas de metros até poucos quilómetros).

Do espectro de Fourier em deslocamento da fonte sísmica, são obtidos a frequência de esquina (f_c), o momento sísmico (M_0) e a queda de tensão (σ), considerando a fonte sísmica como uma fonte pontual e homogénea, descrita pelo modelo ómega quadrado (Boore, 1983).

A determinação dos parâmetros da fonte, permitem a calibração do modelo estocástico de simulação dos movimentos intensos do solo, a utilizar para obter a descrição do movimento do solo num determinado local (amplitude, direção e características espectrais), e a obtenção de uma base de dados sintéticos que complementar a base de dados reais e permitirá, entre outros estudos posteriores, a obtenção de leis de atenuação espectrais regionais, em desenvolvimentos futuros.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos estocásticos, Parâmetros de Fonte, Açores

ABSTRACT

The occurrence of a seismic event of significant magnitude causes a devastating impact in the short and long term in the affected area, as in the social and economic level. In order to minimize the damage, it is necessary to know the global seismicity to create regulatory and financial measures that enable populations to enhance education and prevention for seismic situations and adequate response to the damage caused by earthquakes. Therefore, it is important the coordination and contribution of all multidisciplinary teams, somehow related to seismic risk mitigation in order to establish the seismic scenarios, in seismic regions, namely in the Azores archipelago, to prevent the structural behavior of constructions.

For the knowledge of the seismic scenarios it is necessary the determination of the strong ground motion of the region, which is assumed to be composed of three distinct but complementary processes, namely the release of the energy in the seismic source; the propagation of the energy and the change in energy content due to local effects.

Considering the characteristics of the source and propagation, the study has its origins in the national accelerographic network and broadband seismic network. The information collected by the accelerographs is treated and the acceleration and displacement Fourier spectrum is generated.

From the Fourier amplitude spectrum of acceleration is determined the decay factor k , referring to quench the upper crust directly beneath the site under study (valid for distances on the order of hundreds of meters to a few kilometers).

From the Fourier spectrum of the displacement of the seismic source are obtained the corner frequency (f_c), the seismic moment (M_0) and the stress drop (σ), considering the seismic source as punctual and homogenous, described by the square omega model (Boore, 1983).

The source parameters, allows the calibration of the stochastic simulation of intense movements of the ground, used for the description of ground motion at a given location (amplitude, direction and spectral characteristics), and is obtained a synthetic database to complement the actual database.

The obtained parameters can also be used in future developments to determine regional spectral attenuation laws.

KEY-WORDS: Stochastic modelling, Seismic source parameters, Azores

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. Âmbito e Motivação.....	11
1.1.1. Objetivos da Dissertação.....	14
1.2. Metodologia	15
1.2.1. Modelos Cinemáticos ou Determinísticos	15
1.2.2. Modelos Dinâmicos ou Empíricos	16
1.2.3. Modelos Estocásticos.....	16
1.2.4. Modelos Híbridos ou Estocásticos, Empíricos e Semi-Empíricos considerando Características na Fonte, Trajetória das Ondas e Sítio	17
1.3. Organização.....	18
2. Contextualização.....	19
2.1. Fundamentos Teóricos	19
2.1.1. Gerais	19
2.1.2. Simulação de Movimentos Intensos do Solo	21
2.1.3. Modelação da Fonte Sísmica.....	22
2.1.4. Processos de Propagação no Meio	27
2.1.5. Efeitos Locais	30
3. Fonte Sísmica.....	36
3.1. Geral	36
3.2. Enquadramento Regional: Localização e Sismotectónica da Região dos Açores.....	38
3.3. Aquisição dos Dados	40
3.4. Tratamento dos Dados.....	49
3.5. Espectro de Amplitude de Fourier em Aceleração.....	52
3.5.1. Parâmetro de Decaimento Espectral, k	52
3.6. Espectro de Amplitude de Fourier em Deslocamento.....	62
3.6.1. Método Empírico ($M0$).....	63
3.6.2. Método Gráfico (f_c e $\Delta\sigma$).....	63
3.6.3. Método Teórico ou de Ajuste ($M0$, f_c e $\Delta\sigma$).....	66
4. Simulação do Sismo de 09 de Julho de 1998 dos Açores.....	71
4.1. Enquadramento Geral.....	71
4.2. Caracterização Tectónica	72

4.3.	Quantificação dos Parâmetros de Caraterização dos Movimentos Intensos do Solo para o Sismo de 09 de Julho de 1998	74
4.3.1.	Processamento da Informação	74
4.3.2.	Parâmetro de Decaimento, k	75
4.3.3.	Parâmetros da Fonte Sísmica	78
4.4.	Simulação do Sismo	82
5.	Conclusões	88
5.1.	Geral	88
5.2.	Aspetos de Caraterização da Ação Sísmica	88
5.3.	Quantificação dos Parâmetros de Caraterização da Ação Sísmica	89
5.4.	Aplicabilidade Real	92
5.5.	Dificuldades	93
5.6.	Trabalhos Futuros	94
6.	Bibliografia	95
ANEXO A	II	
A.	Relações de $Q(f)$ para algumas Regiões	II
ANEXO B	VI	
B.	Software Utilizado	VI
B.1	PAD	VI
B.1	LNEC-Spa	VII
B.2	Seisan	VII
B.3	Sac	VIII
ANEXO C	IX	
C.	Espetros de Amplitude de Fourier em Aceleração	IX
C.1	Gerados pelo LNEC-SPA	IX
C.2	Gerados pelo Excel	XLI
ANEXO D	LXXI	
D.	Espetros de Amplitude de Fourier em Deslocamento	LXXI
D.1	Tratamento Gráfico	LXXI
D.2	Tratamento por Ajuste	XCIV

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Fluxograma do projeto SIGMA.....	12
Figura 2.1 – Esquema das possíveis análises sísmicas de estruturas propostas pela regulamentação.....	19
Figura 2.2 – Esquema dos tipos de acelerogramas utilizados para análise sísmica de estruturas proposta pela regulamentação. Destaque do processamento utilizado neste trabalho.	21
Figura 2.3 - Espectros de deslocamento (U) e de aceleração ($\ddot{U}$) com consideração do decaimento espectral nas altas frequências (Carvalho A. , 2007)	25
Figura 2.4 - Espectros de amplitude de Fourier em aceleração da fonte sísmica, para diferentes valores de frequência-esquina, normalizados pelo momento sísmico (Carvalho A. , 2007)	26
Figura 2.5 – Fator de atenuação geométrica, considerando a espessura média da crosta de 50km (adaptado de Lam et al. <i>in</i> (Carvalho A. , 2007))	28
Figura 2.6 - Procedimento da metodologia estocástica para a obtenção de séries temporais (adaptado de Boore, 2003 <i>in</i> (Carvalho A. , 2007))	33
Figura 2.7 - Funções de modulação determinísticas utilizadas por a) Amin & Ang [1968]; b) Shinozuka & Sato [1967]; c) Saragoni & Hart [1974] (Carvalho A. , 2007).....	35
Figura 3.1 – Quadro-resumo do procedimento adotado para a determinação dos parâmetros necessários à utilização do modelo estocástico de caracterização dos movimentos intensos do solo, para a região dos Açores	37
Figura 3.2 - Enquadramento geotectónico da região dos Açores (Carvalho et. al, 2001 adaptado de Nunes, 1999)	39
Figura 3.3 – Aparência de um acelerómetro Geosys SSA-320 GSR-16	43
Figura 3.4- Mapa com a localização geográfica das estações da rede acelerográfica dos Açores e respectiva utilidade, com código de cores	45
Figura 3.5 – Mapa com a localização epicentral dos eventos e respectiva magnitude, com código de eventos coerente com a numeração da tabela de eventos	48

Figura 3.6 – Exemplo de espectro de amplitude de Fourier, em aceleração, gerado pelo Lnec-Spa.....	51
Figura 3.7 – Exemplo de espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 28 de Dezembro de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação TOP, a constituir o evento 8.	54
Figura 3.8 – Variação dos valores médios de k determinados a partir das diversas estações implementadas no grupo central dos Açores	60
Figura 3.9 – Variação de k para a região do grupo central do arquipélago dos Açores	61
Figura 3.10 – Valores de k em função da magnitude e da distância hipocentral dos registos da região do grupo central do arquipélago dos Açores (respetivamente à esquerda e à direita)	61
Figura 3.11 – Exemplo de espectro de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 04 de Março de 2000, em ambas as componentes horizontais X e Y, com origem no registo da estação PVI, a constituir o evento 4a.....	65
Figura 3.12 - Espectro de amplitude de Fourier em deslocamento da fonte sísmica para o evento 13 com respetivo ajuste do espectro teórico do modelo ómega quadrado...	66
Figura 3.13 - Valores médios de f_c e σ em função da magnitude dos registos da região do grupo central do arquipélago dos Açores	68
Figura 3.14 - Comparação dos resultados de frequência-esquina e queda de tensão obtidos pelos métodos gráfico e teórico, respetivamente.....	69
Figura 3.15 - Grandeza dos valores de diferença entre a determinação dos parâmetros da fonte através dos métodos gráfico e teórico	70
Figura 4.1 - Dispersão das localizações epicentrais propostas pelas variadas hipóteses, conjuntamente com o plano de falha (adaptado de Senos et al. 2008 in Zonno et al. 2009)	73

Figura 4.2 - Espectros de amplitude de Fourier para os registos das estações PVI (em cima) e MOS (em baixo) nas direções X e Y, respetivamente (gerados pelo LNEC-SPA).....	75
Figura 4.3 - Espectros logarítmicos de amplitude de Fourier, em aceleração, na fonte, do sismo de 09 de Julho de 1998, pelas estações PVI (em cima) e MOS (em baixo), nas direções ortogonais X e Y.....	76
Figura 4.4 - Determinação do parâmetro de decaimento espectral, k , através da metodologia de Brune para o evento de 09 de Julho de 1998, pelas estações PVI (em cima) e MOS (em baixo), nas direções ortogonais X e Y, com indicação da reta de ajuste utilizada para determinar k	77
Figura 4.5 - Determinação dos parâmetros da fonte, através da metodologia gráfica, considerando a rotura heterogénea, para o evento de 09 de Julho de 1998, com contribuição das estações PVI (em cima) e MOS (em baixo), nas direções ortogonais X e Y, com indicação do momento sísmico (azul), da reta de decaimento (verde) e da f_c (vermelho). A reta a tracejado azul, no gráfico da estação MOS, simboliza a pressuposta localização da reta de decaimento para determinação da 1ª frequência-esquina, se não se verificasse a falta de conteúdo nas altas frequências	80
Figura 4.6 - Determinação dos parâmetros da fonte, através da metodologia teórica, considerando a rotura heterogénea, para o evento de 09 de Julho de 1998, com o contributo das estações PVI (em cima) e MOS (em baixo), nas direções ortogonais X e Y, com indicação do espectro de deslocamento na fonte e do espectro teórico	81
Figura 4.7 - Valores comparativos da queda de tensão (em baixo), obtidos através da metodologia gráfica e teórica, para o sismo real de 09 de julho de 1998 nos Açores (azul) e comparação com os valores sintéticos da região do grupo central do arquipélago dos Açores.....	82
Figura 4.9 - Simulação com parâmetros da fonte altos, médios e baixos, com início de rotura na primeira falha e espessura da crosta de 12km, na estação PVI, na direção ortogonal X.....	85
Figura 4.10 - Simulação com função F_{max} e parâmetros da fonte altos, médios e baixos, com início de rotura na primeira falha e espessura da crosta de 12km, na estação PVI, na direção ortogonal X	85

Figura 4.11 - Simulação com função Fmax e parâmetros da fonte médios, com diferente localização do início de rotura da falha retangular, nomeadamente, com N1 a localizar-se no canto superior esquerdo, N2 a localizar-se centralmente e N3 com localização no canto inferior direito e espessura da crosta de 12km, na estação PVI, na direção ortogonal X	86
Figura 4.12 - Simulação com função Fmax e parâmetros da fonte médios, com início de rotura na primeira falha e espessuras da crosta de 12km e de 20km, na estação PVI, na direção ortogonal X.....	86
Figura 5.1 - Comparação dos valores médios de k de diferentes regiões.....	90
Figura 5.2 – Comparação dos valores médios da queda de tensão para algumas regiões	91
Figura 5.3 - Comparação dos valores dos parâmetros de fonte pelos métodos gráfico e teórico	92
Figura 5.4 - Comparação dos valores estimados dos parâmetros de decaimento e da fonte para o do sismo sintético (a azul) e do sismo de 1998 (a vermelho).....	93

ÍNDICE DE QUADROS

Tabela 3.1 - Tabela com as estações constituintes da rede acelerométrica de Portugal continental e Açores	41
Tabela 3.2 - Estações da rede acelerográfica dos Açores	44
Tabela 3.3 - Tabela de eventos da rede acelerográfica dos Açores, em solos duros, de 1969 a 2006	45
Tabela 3.4 - Velocidade das ondas P	49
Tabela 3.5 - Validação e valores de $R2$ das retas de ajuste dos registos, nas direções ortogonais X e Y	55
Tabela 3.6 – Contribuição de valores de k dos registos para a determinação do parâmetro de decaimento k da região dos Açores.....	58
Tabela 3.7 – Verificação de conformidade de valores obtidos pelas estações da rede acelerográfica do Grupo Central do Arquipélago dos Açores.....	60
Tabela 3.8 - Densidades para a região do grupo central do arquipélago dos Açores, a depender da profundidade	63
Tabela 3.9 - Valores da frequência-esquina e da queda de tensão obtidos pelos diversos métodos	67
Tabela 4.1 - Registos da rede acelerográfica nacional para o sismo de 1998 nos Açores (adaptado de Zonno et al. 2009)	73
Tabela 4.2 - Parâmetro de decaimento espectral estimado para o sismo de 09 de Julho de 1998 dos Açores	77
Tabela 4.3 - Valores dos parâmetros da fonte (momento sísmico, frequência-esquina e queda de tensão) para o sismo real de 09 de julho de 1998 dos Açores, determinados por método gráfico e teórico	81
Tabela 4.4 – Combinações de parâmetros de modelação para a falha do sismo de 09 de julho de 1998 dos Açores	84

1. INTRODUÇÃO

1.1. Âmbito e Motivação

A característica de imprevisibilidade dos sismos impõe que o ordenamento de locais com recorrente atividade sísmica deve ser assumidamente estratégico, nomeadamente ao nível da construção. Assim, o conhecimento da ação sísmica para o dimensionamento estrutural, constitui um ponto crítico, na medida em que pode contribuir fortemente para a redução dos impactes negativos que advêm de um evento sísmico de grandes proporções.

O arquipélago dos Açores, devido ao enquadramento geotectónico na junção tripla entre as placas litosféricas americana, eurasiática e africana, é uma zona de elevada atividade sísmica e onde podem ocorrer sismos de magnitude elevada, podendo considerar-se relevante e elevada a sismicidade da região, pelo que o estudo aprofundado da ação sísmica se torna imperativo como meio de mitigação do risco sísmico associado ao arquipélago.

Todavia, o estudo da sismicidade dos Açores depende maioritariamente da contribuição de documentação histórica e só a partir de 1980, na sequência do sismo gravoso de 1 de Janeiro, é que foi implementada a instrumentalização sismológica (Ferreira, 2005), o que torna escassa a informação acerca de acontecimentos de elevada magnitude, sendo comum o recurso a relações de caráter empírico, obtidas através de análises estatísticas de dados internacionais, para caracterização da ação sísmica.

Devido à influência da especificidade regional da ação sísmica, a fiabilidade do método empírico é condicionada, principalmente para a obtenção de séries temporais para a análise não linear de resposta estrutural e para análises de risco, pelo que se torna útil o desenvolvimento de modelos específicos para caracterização da ação sísmica em território nacional (movimento intenso do solo).

A necessidade de modelos mais fidedignos, com capacidade de caracterizar os movimentos intensos do solo, designadamente nos seus 3 processos elementares (de geração de energia na fonte sísmica, de propagação de energia sísmica e de alteração do conteúdo energético devido a efeitos locais (Carvalho, 2007)) desencadeou uma proposta de projeto de investigação com o objetivo de dar resposta à problemática da sismicidade do arquipélago dos Açores – o projeto SIGMA – Caracterização da Ação Sísmica no Arquipélago dos Açores, um projeto da FCT, com a duração de 3 anos (janeiro de 2012 a janeiro de 2015), que tem como investigadora responsável a Doutora Alexandra Carvalho do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e que conta ainda com a participação de mais 4 instituições (Fundação da Faculdade de Ciências – FFC/FC/UL; Instituto Português do Mar e da Atmosfera; Universidade de Évora – EU e Universidade do Algarve - UAlg).

Os objetivos principais deste projeto são:

- reunir, calibrar e interpretar a base de dados das redes acelerométrica e sísmica dos Açores e difundi-la pelos recentes portais internacionais de base de dados,
- caraterizar os movimentos fortes dos Açores, quer através da aplicação de modelos híbridos (baixas e altas frequências) quer através de equações de previsão dos movimentos (leis de atenuação), elementos chave para uma reavaliação da perigosidade sísmica nos Açores, para a determinação e caraterização de cenários sísmicos e estudos de risco sísmico nesta região;
- elaborar Shakemaps, para dar resposta em tempo real à comunidade científica e à proteção civil, quando ocorre um sismo (Figura 1.1).

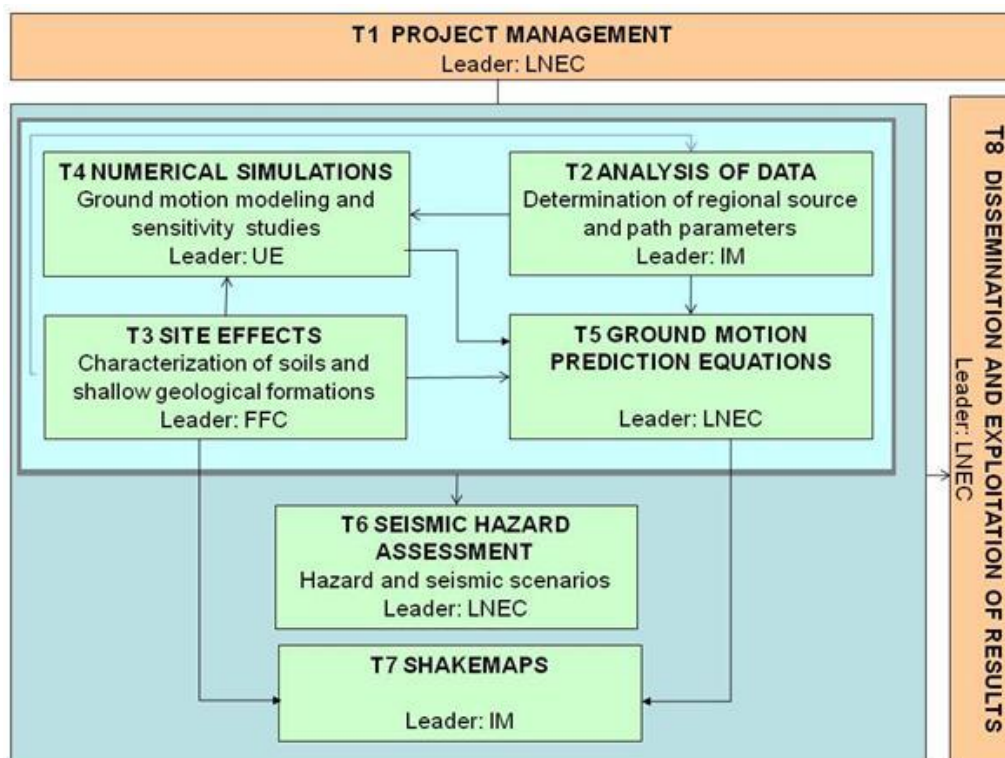


Figura 1.1 - Fluxograma do projeto SIGMA

A caraterização dos movimentos sísmicos fortes, para além da atualização da regulamentação sismo-resistente, é essencial para uma análise rigorosa da perigosidade sísmica no território, cujo interesse e oportunidade reside na sua aplicação aos estudos de mitigação de risco sísmico afetando áreas como o planeamento e gestão de emergência, o estabelecimento de estratégias para o reforço do parque habitacional existente e o estabelecimento de políticas de seguros. É indiscutível, também, a necessidade de séries temporais realistas para, por exemplo, análises não lineares da resposta de estruturas de interesse em engenharia, de que são exemplo pontes, barragens e viadutos.

É assim imperativo a utilização e desenvolvimento de modelos que consigam captar as particularidades dos processos envolvidos na geração dos movimentos do solo. A previsão dos movimentos fortes do solo pode ser conseguida de duas formas:

- simulação de séries temporais baseadas na física da rotura e da propagação das ondas no meio envolvente;
- previsão dos parâmetros do movimento do solo (aceleração, velocidade e deslocamento de pico) e dos parâmetros de resposta estrutural (espectro de resposta). Neste projeto as duas abordagens serão seguidas para a caracterização da ação sísmica do Arquipélago dos Açores.

Assim, as características da fonte e as propriedades do meio de propagação serão estudadas a partir dos registos em rocha, da rede acelerográfica dos Açores e da rede sísmica de banda larga. Os parâmetros obtidos servirão de *input* para os modelos a utilizar que, juntamente com o conhecimento detalhado do efeito dos solos (também objeto de estudo deste projeto), permitirá simular os movimentos intensos do solo para uma grelha de magnitudes, distâncias e frequências e, obter deste modo uma base de dados sintética que complementará a base de dados reais e permitirá, entre outros estudos posteriores, a obtenção de leis de atenuação espectrais regionais. Estas leis permitirão a reavaliação da perigosidade sísmica para o Arquipélago dos Açores e a determinação de cenários sísmicos probabilísticos, de importante utilidade para o planeamento e gestão de emergência para a proteção civil. Constitui, assim, um estudo que contribui para colmatar de forma significativa as necessidades na área da sismologia e do risco sísmico no Arquipélago dos Açores e um avanço significativo para a sismologia e engenharia sísmica.

É também objetivo central deste projeto, mas não da presente tese, a elaboração de *Shakemaps*. O resultado final destes mapas é a disponibilização de uma grelha geográfica com os valores dos parâmetros de pico do solo (aceleração, velocidade e deslocamento) e amplitudes para outros períodos de interesse.

Os objetivos deste projeto estão profundamente enquadrados nos interesses atuais da comunidade internacional e nos interesses nacionais, pois um dos principais problemas e interesses da engenharia sísmica é a caracterização da ação sísmica envolvendo a estimativa da intensidade, do conteúdo em frequência, da duração e da variabilidade espacial dos movimentos intensos do solo. A caracterização dos movimentos sísmicos intensos na forma espectral e os consequentes modelos de atenuação desenvolvidos pretendem contribuir para a diminuição da maior incerteza sistémica na avaliação da perigosidade sísmica e risco sísmico no Arquipélago dos Açores. De igual forma, os *Shakemaps* serão uma ferramenta indispensável para a proteção civil, para o público em geral e para a comunidade científica.

De referir ainda que a interpretação da base de dados e a sua divulgação em portais científicos internacionais é um objetivo ambicioso e extremamente desejável na comunidade científica internacional.

É no âmbito deste projeto que se insere o presente trabalho.

1.1.1. Objetivos da Dissertação

Em zonas de grande atividade tectónica e consequentemente de grande sismicidade, a caracterização da ação sísmica pode ser baseada em análises empíricas. Quando tal não é possível, a sua caracterização deverá ser baseada em modelos teóricos, que descrevam os diferentes processos físicos de geração na fonte, propagação até ao local e efeitos locais, que devem ser avaliados na caracterização fidedigna da ação sísmica.

Torna-se, assim, fundamental desenvolver para os Açores modelos especificamente dirigidos à caracterização da ação sísmica, não só em termos de valores de pico dos movimentos sísmicos intensos, como também da distribuição da energia desses movimentos através das ordenadas espectrais, tendo ainda em conta a sua duração e variabilidade espacial. Estes modelos terão de ser analíticos, com parâmetros devidamente identificados e sustentados teoricamente, para que possam ser quantificados regionalmente através de uma calibração efetuada com sismos registados no Arquipélago.

Pretende-se que os modelos desenvolvidos estimem adequadamente a duração e o conteúdo energético dos movimentos sísmicos, que servirão de base ao *design* de estruturas, e que possam, também, gerar séries temporais representativas do ambiente tectónico da região em estudo.

O resultado traduz o movimento do solo, com características diferentes nas diferentes gamas de frequências.

Nesse âmbito, este trabalho visa a quantificação dos parâmetros regionais que caracterizam os processos de geração e propagação de energia, necessários para a calibração do modelo estocástico, com base nos sismos registados na rede acelerográfica nacional, pretendendo-se obter os parâmetros necessários para a utilização de modelos de rotura de falha para simulação dos movimentos sísmicos intensos para o Arquipélago dos Açores.

1.2. Metodologia

Em regiões onde é inexistente ou escassa a informação da sismicidade regional, é necessária a respetiva simulação de movimentos intensos do solo, que resultam em dados sintéticos que substituem ou complementam os registos reais.

O movimento intenso do solo é composto pela integração de 3 processos distintos (Carvalho A. , 2007), nomeadamente:

1. Processo de geração de energia na fonte sísmica – geração das ondas sísmicas pela libertação energética resultante da rotura de uma falha geológica;
2. Processo de propagação da energia sísmica – propagação das ondas sísmicas no meio, desde a fonte até ao substrato rochoso;
3. Processo de alteração do conteúdo energético devido a efeitos locais – modificação das ondas sísmicas durante a propagação da camada superficial da crosta até à superfície.

No que concerne a esta dissertação, importa referir a metodologia utilizada para a modelação da fonte sísmica.

Resumidamente, o progresso desta área científica teve início em modelos cinemáticos, seguidos dos modelos dinâmicos e, finalmente, dos modelos estocásticos. Atualmente são integrados os modelos estocásticos, empíricos e semi-empíricos considerando as características da fonte, trajetória das ondas e de sítio, conforme brevemente descrito nos subcapítulos seguintes, com o intuito de introduzir a temática da modelação (Dalguer, 2000).

1.2.1. Modelos Cinemáticos ou Determinísticos

Os modelos cinemáticos admitem que o movimento na fonte é conhecido através de funções de deslocamento ou velocidade ao longo da falha.

Os primeiros estudos nesta área científica datam de 1910, com a teoria do ressalto elástico, de H.F. Reid, utilizada para a elaboração de acelerogramas sintéticos (Carvalho, 2007), que defende, resumidamente, que as deformações elásticas se vão acumulando progressivamente na região focal, levando à rotura quando atinge o limite de resistência dos materiais. A rotura dar-se-ia numa região e propagar-se-ia de forma irregular por toda a falha. Após a rotura, os bordos da falha ressaltam para uma nova posição de equilíbrio, caracterizada por ter a deformação elástica totalmente dissipada.

O desenvolvimento da teoria, contou com vários contributos puramente cinemáticos, ou seja, que descreviam a fenomenologia da fonte sísmica sem ter em conta as forças

responsáveis pelo sismo, considerando um deslizamento uniforme ao longo de uma falha retangular no início, evoluindo para o conceito de deslizamento não uniforme ao longo de uma falha subdividida por secções onde o comportamento de deslizamento divergia; e, mais recentemente, estudos de inversão cinemática dos registos dos movimentos para deduzir a distribuição de deslizamentos ao longo da falha.

1.2.2. Modelos Dinâmicos ou Empíricos

Os modelos dinâmicos simulam o processo mecânico da falha considerando as condições iniciais do campo de tensões, forças de atrito e forças de coesão ao longo da falha. A propagação da rotura na falha decorre em concordância com uma lei constitutiva previamente admitida, permitindo melhores previsões do processo dinâmico da fonte e do movimento sísmico perto da falha.

Os estudos iniciais consideraram a propagação espontânea da falha por corte longitudinal num meio infinito. Posteriormente o problema dinâmico é resolvido analítica e numericamente utilizando modelos simples numa direção, inicialmente, e depois evoluindo para modelos de duas dimensões onde o contínuo é considerado em estado plano de deformações e a falha rompe por corte longitudinal ou transversal sob diferentes critérios de fratura. Atualmente já se realizam simulações em três dimensões reproduzindo com realismo as principais características dos sismos, com o auxílio de métodos numéricos.

Estes modelos desenvolvem-se através de Métodos Numéricos (Diferenças Finitas), Método dos Elementos Distintos, Método dos Elementos Discretos e Método das Equações Integrais de Contorno.

1.2.3. Modelos Estocásticos

Em Engenharia Civil é consensual a utilização de simulações de acelerogramas artificiais em altas frequências ($> 1\text{Hz}$) para análise ou verificação de projetos.

A modelagem conta apenas com a incorporação de duas características observadas em acelerogramas reais – o conteúdo em frequência e a não-estacionariedade.

Inicialmente, a aceleração é idealizada como uma série de pulsos de determinada magnitude localizados aleatoriamente no tempo. Posteriormente são simulados acelerogramas sísmicos como processos de ruído branco. Evoluem para modelos estacionários desenvolvidos para criar processos aleatórios com um conteúdo em frequências semelhante ao observado em registos reais. Entretanto, com a maior disponibilidade de registos acelerográficos, são incorporados nos processos de aceleração a não-

estacionariedade como uma característica inerente dos processos sísmicos, assim como filtros de segunda ordem que permitem gerar conteúdo de frequências mais realista (fisicamente, são osciladores lineares com amortecimento viscoso).

Uma vez que a presente dissertação se baseia nesta modelação, são descritos os modelos propostos com maior detalhe no Capítulo 2 referente à Contextualização Teórica.

1.2.4. Modelos Híbridos ou Estocásticos, Empíricos e Semi-Empíricos considerando Características na Fonte, Trajetória das Ondas e Sítio

Estes modelos assumem a modelação teórica das baixas frequências ($<1\text{Hz}$) e a modelação estocástica e/ou empírica das altas frequências ($>1\text{Hz}$).

O primeiro modelo, proposto por Boore, 1983, a considerar as características da fonte num modelo estocástico, define a fonte pontualmente e descreve a formulação conhecida como método do ruído branco de banda limitada, cujo espectro é o chamado modelo de ómega quadrado, proposto por Brune, 1970, que constitui uma aproximação do espectro de aceleração dado sob considerações físicas.

Posteriormente, para simulações perto da fonte, foram considerados os efeitos de propagação da rotura, diretividade e distância da fonte ao sítio, através da subdivisão da falha em subfalhas, constituindo cada uma delas, uma fonte pontual (a soma dos valores registados empiricamente nas subfalhas, aproxima-se do registo do sismo principal – funções de Green empíricas).

As limitações dos modelos empíricos, quando não existe registo de informação suficiente, influenciaram o surgimento dos modelos semi-empíricos e aproximações teóricas, onde o modelo teórico da fonte substitui os registos empíricos, utilizando funções teóricas da fonte no domínio do tempo ou o modelo estocástico do modelo ómega quadrado.

Também a simulação de movimentos sísmicos em bandas de frequência ampla constituem elementos de desenvolvimento, utilizando o modelo ómega quadrado em bandas de frequência entre 0.05Hz e 10Hz .

Recentemente, a técnica de simulação de movimentos do solo utiliza as funções de Green híbridas ou ainda as funções de Green sintéticas aplicadas a pequenos eventos, calculando as baixas frequências deterministicamente e as altas frequências estocasticamente (o evento principal resulta do somatório dos pequenos eventos).

1.3. Organização

A presente dissertação, intitulada *Processos Físicos para a Simulação de Movimentos Sísmicos Intensos para o Arquipélago dos Açores*, encontra-se estruturada em 5 capítulos, designadamente:

- Capítulo 1, a que corresponde esta Introdução, a conter o enquadramento de âmbito geral no projeto em que se insere a dissertação, com os respetivos objetivos. Aborda a problemática associada ao tema e faz uma breve referência às metodologias em uso. Motivação que fundamenta o desenvolvimento da dissertação. Objetivos a atingir. Estruturação da tese.
- Capítulo 2, Contextualização: o enquadramento teórico das matérias, nomeadamente de obtenção e quantificação dos parâmetros regionais, na engenharia civil e respetivas diretrizes de aplicação no caso concreto da região dos Açores.
- Capítulo 3, a constituir o desenvolvimento prático da obtenção dos parâmetros de caracterização do movimento intenso do solo para a região dos Açores. Definição geotectónica da região em estudo e a rede acelerográfica de que se dispõe para fornecimento de dados. Descrição da aplicação das metodologias teorizadas no capítulo anterior e justificação das opções preteridas ao longo do processo de obtenção dos valores numéricos necessários à determinação e quantificação dos parâmetros de caracterização dos movimentos sísmicos intensos, enquadrados num contexto comparativo com valores determinados para diferentes regiões e com análise de possíveis fatores de influência.
- Capítulo 4, a incluir a aplicação prática da metodologia num sismo real para gerar espectros sintéticos.
- No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões sobre o trabalho desenvolvido, envolvendo a apreciação dos resultados obtidos, as dificuldades deparadas e as perspectivas de desenvolvimento futuro.

2. Contextualização

2.1. Fundamentos Teóricos

2.1.1. Gerais

A análise sísmica de estruturas proposta pela regulamentação, linear ou não linear, engloba as diversas abordagens (Figura 2.1):

- Análises Lineares
 - Análise linear estática com forças equivalentes às forças de inércia
 - Análise dinâmica linear estocástica com recurso a espectros de potência
 - Análise dinâmica modal por espectros de resposta
- Análises Não Lineares
 - Análises estáticas não lineares
 - Análises dinâmicas temporais não lineares

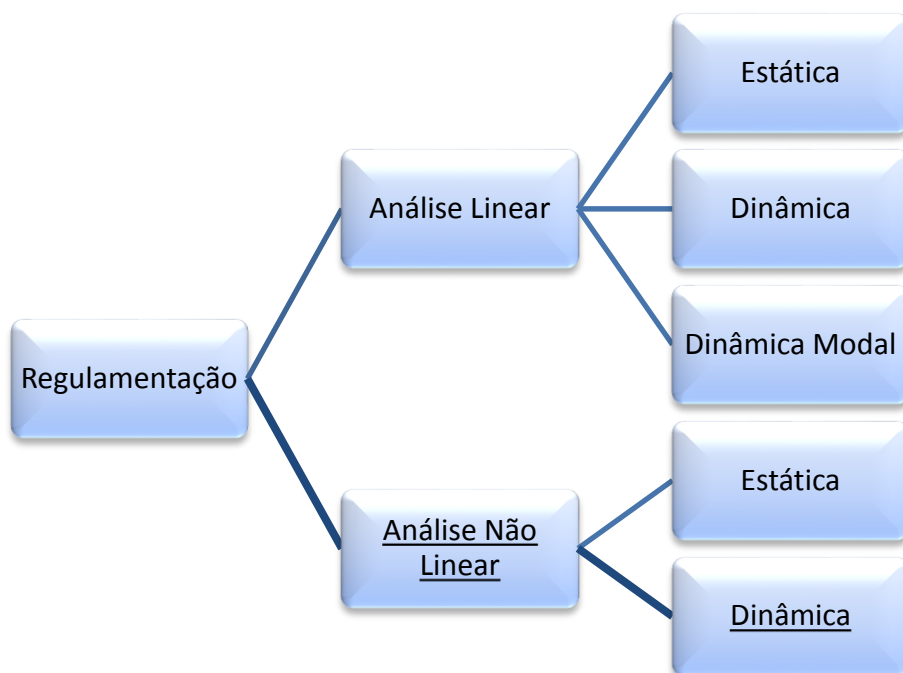


Figura 2.1 – Esquema das possíveis análises sísmicas de estruturas propostas pela regulamentação, com destaque em forma de sublinhado para a hipótese relevante para este trabalho

A análise dinâmica não linear possibilita a definição da ação sísmica na forma de acelerogramas¹, que podem ser sintéticos ou obtidos de registos de movimentos sísmicos intensos resultantes de um sismo real (Figura 2.2).

Os acelerogramas sintéticos distinguem-se em (Estêvão, 2012):

- Acelerogramas artificiais – funções do tempo ajustadas a um espectro de resposta de acelerações absolutas, normalmente não traduzindo o efeito de um evento sísmico único, em termos de magnitude, distância ao foco ou duração das vibrações;
- Acelerogramas simulados – gerados de modo a reproduzirem, de forma aproximada, a influência da magnitude, do mecanismo focal e do caminho de propagação, reproduzindo as características das fontes sismogénicas.

Os acelerogramas simulados são agrupáveis em função do método utilizado para os gerar, nomeadamente através dos métodos (Estêvão, 2012):

- Determinísticos – os movimentos sísmicos são o resultado da resolução de equações matemáticas que regem a propagação das ondas sísmicas em meios elásticos e dos parâmetros que controlam a radiação que as fontes sísmicas emitem;
- Empíricos – recurso a registos de sismos de pequena magnitude, extrapolados para prever os movimentos sísmicos resultantes de sismos de maiores magnitudes, na mesma localização;
- Estocásticos – comparativamente menos exigentes a nível computacional, os movimentos sísmicos são gerados de modo a produzirem um espectro de Fourier correspondente ao espectro médio do sismo a simular, considerando as características da fonte e do meio de propagação das ondas sísmicas;
- Híbridos – combinação das diversas abordagens.

Assim, para as análises não lineares, são utilizados registos de acelerogramas, reais ou sintéticos, conforme a informação existente. Se existir grande número de eventos e de moderada a elevada magnitude, são utilizados os registos reais da zona; se os eventos forem de magnitude em número reduzido ou com intensidade diminuta, são utilizados acelerogramas sintéticos.

¹ Acelerograma – série temporal de valores de aceleração.

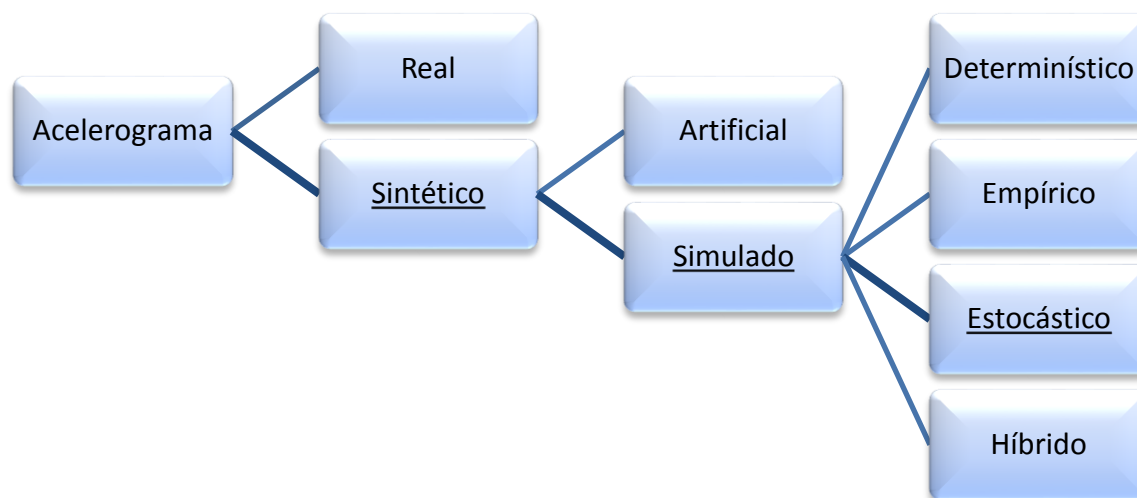


Figura 2.2 – Esquema dos tipos de acelerogramas utilizados para análise sísmica de estruturas proposta pela regulamentação. Destaque, em forma de sublinhado, do processamento utilizado neste trabalho.

Para a caracterização da ação sísmica nos Açores, serão gerados acelerogramas sintéticos, através do método estocástico, simulando, de forma aproximada a influência da magnitude, do mecanismo focal e do caminho de propagação.

2.1.2. Simulação de Movimentos Intensos do Solo

Em regiões de fraca ou moderada sismicidade, são escassos ou insuficientes os registos de atividade sísmica na gama de magnitudes e distâncias de interesse, pelo que é utilizada a simulação de movimentos do solo para descrever os movimentos intensos e/ou para gerar dados sintéticos que possam ser usados para substituir ou complementar registos reais.

Tal como já referido, o movimento do solo é a conjugação de três processos independentes mas complementares, nomeadamente:

- Processo de geração de energia na fonte sísmica – processo no qual as ondas sísmicas são geradas pela energia libertada decorrente da rotura de uma falha geológica;
- Processo de propagação da energia sísmica – processo no qual as ondas sísmicas se propagam através do meio, desde a fonte até ao substrato rochoso;
- Processo de alteração do conteúdo energético devido a efeitos locais – processo no qual as ondas sísmicas são modificadas enquanto se propagam na camada superficial da crosta até à superfície.

A compreensão dos processos envolvidos no mecanismo dos movimentos intensos do solo tem mobilizado a comunidade científica a desenvolver modelos que traduzam os processos, em particular, o processo de geração de energia na fonte sísmica.

A simulação dos movimentos intensos do solo através da modelação estocástica, caracterizada por um espectro de amplitude de Fourier em aceleração para uma banda de frequências entre 0.1Hz e 20Hz, é expresso pela fórmula (Carvalho, 2007):

$$A(f, M_0, R) = (2\pi f)^2 \cdot S(f, M_0) \cdot G(R) \cdot An(f, R) \cdot P(f) \cdot F_z(f) \quad (2.1)$$

em que,

- $S(f, M_0)$ representa o espectro de Fourier de deslocamento na fonte, refletindo as características espectrais dos movimentos na proximidade da fonte, sem influência dos meios de propagação e atenuação da energia - caracterização dos movimentos do solo no campo próximo;
- $G(R)$ e $An(f, R)$ são, respetivamente as funções de atenuação geométrica e de atenuação inelástica, que modelam a atenuação das ondas sísmicas no percurso desde a fonte sísmica até ao local em estudo – caracterização dos movimentos do solo no campo afastado;
- $P(f)$ e $F_z(f)$ são as funções de atenuação e de amplificação na crosta superior, que modelam o comportamento superficial das ondas sísmicas.

De seguida descrevem-se as funções aqui mencionadas.

2.1.3. Modelação da Fonte Sísmica

Os modelos sismológicos da fonte sísmica têm associada uma forma geral do espectro das ondas volúmicas produzido por um sismo, no campo afastado. A análise do espectro de radiação, $S(w)$, das ondas produzidas num sismo permite concluir que o espectro na fonte possui uma parte plana, Ω_0 , correspondente à amplitude espectral nas baixas frequências e diretamente proporcional ao momento sísmico escalar, e uma parte que decai com w^{-2} , ou seja, de forma inversamente proporcional ao quadrado da frequência. Assim, a forma do espectro pode ser delineada a partir de uma assíntota plana que define a amplitude nas baixas frequências e de uma assíntota associada ao decaimento w^2 . O cruzamento das duas assíntotas constitui a frequência-esquina, f_c (Carvalho A. , 2007). Em resumo, o modelo sismológico conhecido por modelo ómega quadrado, representa a amplitude espectral de um sismo na fonte, de acordo com a expressão (ver a Figura 2.3):

$$S(f) = \Omega_0 \cdot \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_c} \right)^2} \right] \quad (2.2)$$

O modelo de fonte mais simples associado ao modelo ómega quadrado é o modelo pontual ou modelo de Brune, para sismos de magnitude baixa a moderada (para magnitudes elevadas, superiores a 5.5, é utilizado o modelo de falha-finita²).

O modelo pontual representa a fonte sísmica como uma rotura circular, com raio finito, e relaciona a frequência-esquina e o raio de rotura, a , através da expressão:

$$a = \frac{2,33 \cdot \beta}{2 \cdot \pi \cdot f_c} \quad (2.3)$$

sendo β a velocidade das ondas S na vizinhança da fonte sísmica.

O espectro de deslocamento na fonte, assumindo então que toda a energia é libertada no foco, pode ser descrito por Boore (1983; 2003):

$$S(f, M_0) = C \cdot M_0 \cdot S_a(f) \cdot S_b(f) \quad (2.4)$$

Com,

$$C = \frac{\Re \cdot C_V \cdot C_F}{4\pi\rho\beta^3} \quad (2.5)$$

Em que M_0 [dyne.cm] é o momento sísmico, $\Re$ é o padrão de radiação da fonte sísmica (valor médio de 0,55 para as ondas S e 0,63 para as ondas P), $C_V=1/\sqrt{2}$ é a partição da energia em duas componentes horizontais, $C_F=2$ é a amplificação de superfície livre, ρ [g/cm³] é a densidade do meio na vizinhança da fonte, β [km/s] é a velocidade das ondas S na mesma zona.

O momento sísmico, M_0 , é uma estimativa direta da energia libertada na fonte, uma vez que corresponde à energia de deformação elástica libertada na falha e pode ser expresso na fórmula empírica (Aki, 1968 *in* (Carvalho, 2007)):

$$M_0 = \mu \cdot A \cdot D \quad (2.6)$$

² Modelo de falha-finita - a energia é libertada por um plano de falha limitado, retangular, assumidamente constituído por um conjunto de fontes pontuais (subdivisão da falha geradora do evento sísmico num número finito de falhas elementares). O modelo tem em consideração a geometria (dimensões, direção e inclinação) da falha relativamente ao local em estudo. Os momentos sísmicos são ajustados, existindo desfasamento da influência das diversas subfalhas no domínio do tempo.

Em que μ corresponde à rigidez do meio envolvente, D ao deslizamento médio entre as duas superfícies adjacentes ao plano da falha e A à área total medida sobre o plano da falha (Estêvão, 2012).

A grandeza M_0 pode ser relacionada com a magnitude, através da expressão empírica (Hans&Kanamori, 1979 *in* (Carvalho, 2007)):

$$\log M_0 = 1,5 M + 16,05 \quad (2.7)$$

Em relação ao espectro de deslocamento na fonte, apresentado em (2.4), o modelo de fonte mais comum é o modelo de ómega quadrado, w^2 , que se representa com a expressão:

$$S_a(f) = \frac{1}{1+\left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \text{ e } S_b(f) = 1 \quad (2.8)$$

Assim, a expressão que define o espectro de amplitude de Fourier de aceleração na fonte, $A_s(f, M_0)$, de acordo com o modelo de fonte pontual para modelação da fonte sísmica, pode ser escrita sob a forma:

$$A_s(f, M_0) = (2\pi f)^2 \cdot S(f, M_0) = \frac{C \cdot M_0 \cdot (2\pi f)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (2.9)$$

A frequência-esquina, f_c , pode ser escrita em função da queda de tensão, $\Delta\sigma$, medida pela diferença entre tensões pré e pós-rotura, e do movimento sísmico, M_0 , através da relação (Brune 1970 *in* (Carvalho, 2007)), considerando os parâmetros expressos em unidades do Sistema Internacional:

$$f_c = 0,49 \cdot \beta \cdot \sqrt[3]{\Delta\sigma / M_0} \quad (2.10a)$$

Ou, se β for expresso em km/s, $\Delta\sigma$ em bar e M_0 em dyne.cm:

$$f_c = 4,9 \cdot 10^6 \cdot \beta \cdot \sqrt[3]{\Delta\sigma / M_0} \quad (2.10b)$$

Alguns autores defendem ainda a limitação do decaimento para as altas frequências com a introdução do conceito de frequência-máxima, f_{max} , para que a forma do espectro seja a ilustrada na Figura 2.3, com um patamar constante delimitado nas baixas frequências pela f_c e nas altas frequências pela f_{max} . A Figura 2.3 mostra a forma dos espectros de deslocamentos e de aceleração, com a consideração do decaimento espectral nas altas frequências.

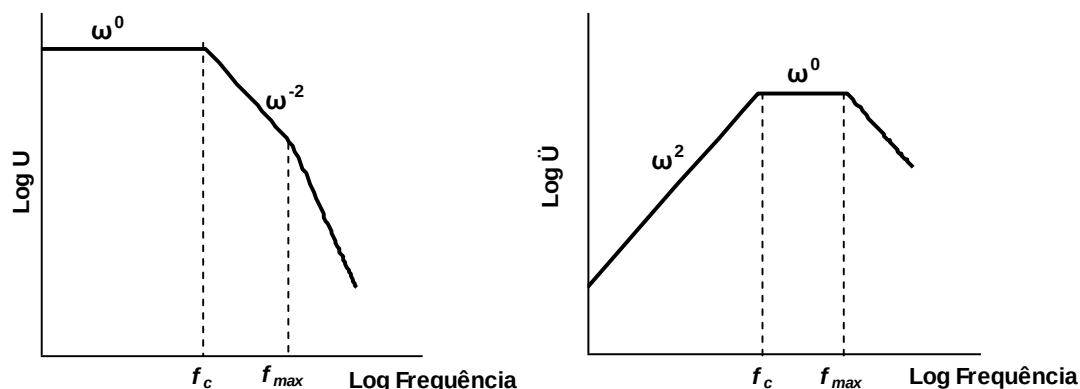


Figura 2.3 - Espectros de deslocamento (U) e de aceleração ($\ddot{U}$) com consideração do decaimento espectral nas altas frequências (Carvalho A. , 2007)

Através das expressões enunciadas, são demonstráveis alguns aspetos, designadamente:

- as expressões que definem o modelo ómega quadrado, 2.8 e 2.10, indicam que a forma do espectro na fonte é descrita pelo momento sísmico, M_0 , e pela queda de tensão, $\Delta\sigma$;
- a expressão do espectro de amplitude de Fourier de deslocamento, 2.4, é dependente do momento sísmico;
- a expressão do espectro de amplitude de Fourier de acelerações, 2.9, é para *frequência* $> f_c$.

Sucintamente, pode atribuir-se a influência da queda de tensão aos conteúdos nas altas frequências (acelerações) e a influência do momento sísmico aos conteúdos nas baixas frequências (deslocamentos).

A Figura 2.4 ilustra, para diferentes valores de frequência-esquina, os espectros de amplitude de Fourier em aceleração, na fonte, normalizados pelo momento sísmico, onde se pode observar que a intensidade da amplitude aumenta com a frequência-esquina, ou seja, com a queda de tensão. É igualmente observável o aumento de conteúdo nas baixas frequências em relação às altas frequências com valores de frequência-esquina menores, o que equivale a afirmar que sismos com quedas de tensão menores, para a mesma energia libertada, apresentam maiores conteúdos nas baixas frequências.

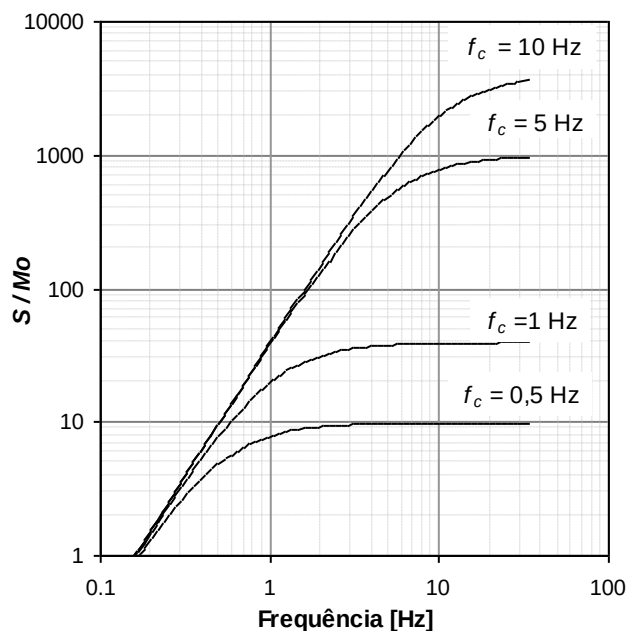


Figura 2.4 - Espectros de amplitude de Fourier em aceleração da fonte sísmica, para diferentes valores de frequência-esquina, normalizados pelo momento sísmico (Carvalho A. , 2007)

A queda de tensão associada a uma rotura sísmica ronda valores médios próximos de 100 bar (10Mpa). Existem, no entanto, casos pontuais onde se registam menores quedas de tensão (30 bar) ou maiores quedas de tensão (a atingir 500 bar) (Boore, 1983; Boore & Atkinson, 1987).

Enunciam-se alguns valores para a queda de tensão:

- na região leste da América do Norte, para frequências superiores a 1Hz, a queda de tensão varia entre 70 a 200 bar, para sismos de magnitude de momento superior a 4 (Carvalho A. , 2007);
- na região oeste da América do Norte, para frequências superiores a 1Hz, a queda de tensão varia de 50 bar para magnitudes de 7,5 a 120 bar para magnitudes de 5,5 (Carvalho A. , 2007);
- na região de Portugal continental, para frequências superiores a 1Hz, a queda de tensão varia entre 30 bar para magnitudes de 5,9 e 501 bar para magnitude de 4,0 (Carvalho A. , 2007), com um valor médio da queda de tensão próximo de 200 bar;
- o estudo do valor da queda de tensão no estado da Califórnia, para magnitudes entre 4,4 e 7,6, indica variações entre 25 bar e 230 bar (Moghaddam, Fanaie, & Motazedian, June 2010);

- o estudo do valor da queda de tensão na China, para magnitudes entre 4,4 e 7,6, indica variações entre 20 bar e 155 bar (Moghaddam, Fanaie, & Motazedian, June 2010);
- no Irão, para um sismo de magnitude 7,3, registou-se um valor de queda de tensão de 250 bar (Moghaddam, Fanaie, & Motazedian, June 2010);
- o estudo do valor da queda de tensão em Itália, para magnitudes entre 5,9 e 6,9, indica variações entre 90 bar e 150 bar (Moghaddam, Fanaie, & Motazedian, June 2010);
- no Japão, com sismos de magnitude entre 1,8 e 6,9, foi definido um valor médio de queda de tensão da ordem dos 59,2bar (Baltay, Ide, Prieto, & Beroza, 2011).

2.1.4. Processos de Propagação no Meio

A propagação de energia das ondas sísmicas ao longo do percurso desde a fonte até ao local é alterada devido à atenuação geométrica e à atenuação inelástica.

Fator de atenuação geométrica, $G(R)$

A equação (2.1), anteriormente apresentada, refere-se à amplitude do espectro de aceleração, e pressupõe o fator de atenuação geométrica³, $G(R)$, sob a forma:

$$G(R) = \frac{1}{R^n} \quad (2.11)$$

Onde R é a distância epicentral, desde a fonte ao local, e n é um expoente que depende da distância R .

O modelo trilinear da atenuação geométrica (expressão 2.12), dependendo da espessura da crosta, propõe que (Atkinson & Boore, 1995):

- As ondas que atinjam uma profundidade focal de cerca de 10km dominam os movimentos do solo num raio de cerca de 1,5 vezes a espessura da crosta e a propagação origina um decaimento na forma $1/R$ na amplitude do espectro de Fourier ($n=1$);

³ O Fator de Atenuação Geométrica não depende da frequência e reduz todo o espectro sem alterar a sua forma (Carvalho A. , 2007).

- Para distâncias compreendidas entre 1,5 e 2,5 vezes a espessura da crosta, as ondas são refletidas pela descontinuidade de Moho (fronteira entre a crosta e o manto), pelo que é nulo o decaimento da intensidade das ondas ($n=0$);
- Nas distâncias superiores a 2,5 vezes a espessura da crosta, os movimentos do solo são dominados por ondas volúmicas formadas por reflexões múltiplas no interior da crosta, a decair com a proporção $1/\sqrt{R}$ ($n=0,5$), resultado da propagação cilíndrica das ondas.

$$G(R) = \begin{cases} 1/R, & \text{se } R < 1.5D \\ 1/1.5D, & \text{se } 1.5 < R < 2.5D \\ 1/1.5D \cdot \sqrt{2.5D/R}, & \text{se } R > 2.5D \end{cases} \quad (2.12)$$

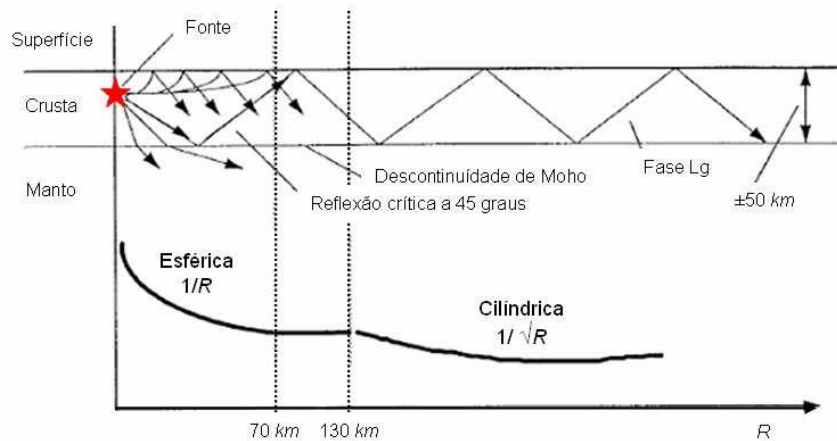


Figura 2.5 – Fator de atenuação geométrica, considerando a espessura média da crosta de 50km (adaptado de Lam et al. in (Carvalho A. , 2007))

Fator de atenuação inelástica, $An(f, R)$

A atenuação da energia das ondas sísmicas é, também, função da frequência, observando-se o aumento exponencial da energia dissipada no processo de propagação como consequência do aumento da frequência, que pode ser escrito através da expressão:

$$At(f) = e^{-\pi f K} \quad (2.13)$$

em que:

$$K = \int \frac{ds}{Q \cdot \beta} \quad (2.14)$$

Sendo ds o comprimento elementar do raio sísmico, Q o fator de qualidade do meio e β a velocidade das ondas S.

A expressão de K , pode, ainda, ter a especificidade de distinguir a propagação na crosta mais profunda e a propagação nas camadas mais superficiais:

$$K = \frac{R}{Q(f)\cdot\bar{\beta}} + \frac{H}{\bar{Q}\cdot\bar{\beta}} \quad (2.14a)$$

em que:

- R é a distância percorrida pelas ondas sísmicas através de um meio caracterizado por um fator de qualidade, $Q(f)$
- $\bar{\beta}$ representa a velocidade média das ondas
- $\bar{Q}$ representa o fator de qualidade do meio até uma profundidade H , abaixo da superfície.

Verifica-se que K aumenta com R e é sensível a efeitos não lineares do comportamento dinâmico do solo. $Q(f)$ é o fator de qualidade do meio e pode ser escrito na forma:

$$Q(f) = Q_0 \left(\frac{f^\nu}{f_0} \right) \quad (2.15)$$

(em que f_0 é a frequência unitária de 1Hz e Q_0 e f^ν são parâmetros regionais a calibrar para cada região).

O fator de qualidade do meio representa o amortecimento devido ao comportamento viscoelástico do meio de propagação e é tanto maior quanto menos atenuante seja o meio. Este amortecimento depende da qualidade média de transmissão do meio da região em estudo.

Para a determinação de Q é usual o recurso ao método de Havskov *et. al* (1989) baseado na análise temporal do decaimento da amplitude (análise da coda das ondas sísmicas, cujas características físicas são relacionáveis com a fonte, com a atenuação e com a dispersão ao longo do percurso). Alternativamente pode ser utilizado o recurso à análise da razão das amplitudes espectrais, medida em diferentes locais, a diferentes distâncias epicentrais usando as expressões da atenuação, expressão 2.13, e expressão 2.15 do fator de qualidade do meio.

Através da expressão 2.15, com valores de ν positivos, verifica-se que Q_0 é geralmente maior para rochas mais duras/antigas que se encontram em zonas tectonicamente estáveis, e menor em zonas mais recentes e tectonicamente ativas. Em geral, Q_0 representa o grau de heterogeneidade e ν o nível de atividade tectónica da região.

Estas conclusões são visíveis no estudo comparativo de $Q(f)$, em (Carvalho A. , 2007), reproduzido no Anexo 1, em que se verifica os baixos valores de Q_0 (inferior a 200) e altos valores de ν para regiões sísmicamente ativas (Guerrero México, Sul de Espanha, Califórnia

e Turquia), e valores Q_0 altos (superiores a 600) com valores de ν baixos para zonas estáveis (Carolina do Sul, New England, Norte da Sibéria).

De uma forma geral, os valores de Q_0 variam entre 47 e 755 e os valores de ν variam entre 0,36 e 1,06.

Mais recentemente, e no contexto do projeto SIGMA, foi estimado para o grupo central do arquipélago dos Açores, um valor de $Q_0 = 76$. A determinação deste valor teve por base a contribuição de 1377 eventos, no intervalo de tempo de 1999 a 2011, com magnitudes M_l superiores a 2,5 e com profundidade inferior a 25km (Vales, 2013).

A atenuação genérica nas altas frequências pode então ser descrita por 2 fatores a representarem 2 efeitos de atenuação distintos – em crusta profunda, a depender de R , $An(f, R)$ e em crusta superficial, $P(f)$, conforme re-escrito na expressão da atenuação:

$$At(f) = An(f, R) \cdot P(f) \quad (2.16)$$

Sendo:

- $P(f)$, a atenuação devido a efeitos locais que se encontra descrito no subcapítulo seguinte
- e
- $An(f, R) = e^{-\pi f R / Q(f) \cdot \beta}$ (2.17)

2.1.5. Efeitos Locais

Fator de atenuação na crusta superior, $P(f)$

A crusta superior insere-se no percurso inelástico, todavia, os baixos valores de Q estimados justificam a consideração como efeito local, uma vez que a amplitude de onda decai tão rapidamente que a taxa de atenuação se torna independente da distância.

Assim, o fator de atenuação na crusta superior, pode ser escrito sob a forma:

$$P(f) = e^{-\pi f k} \quad (2.18)$$

Em que k , em segundos, é o parâmetro estimado na 2ª parcela da expressão 2.14a, referente ao efeito da atenuação na crusta superior imediatamente abaixo do local em estudo, denominado parâmetro de decaimento espectral.

Para a obtenção de k , por análise dos registos sísmicos obtidos para uma determinada região, é necessária a remoção do efeito da atenuação inelástica, (Atkinson, 1996 in (Carvalho A. , 2007)).

Comparativamente (Carvalho A. , 2007):

- os valores de k na Califórnia, variam entre 0,04s e 0,07s;
- os valores de k , em solos muito duros da zona Este da América do Norte, são inferiores a 0.01s; para zonas de rocha, varia entre 0,02s e 0,04s;
- para Portugal Continental, faz-se a distinção entre ‘sismos mar’ (epicentro em região Atlântica) e ‘sismos terra’ (epicentro em território nacional), registando-se valores de 0,030 e 0,035s, respetivamente;
- na Islândia o valor de k é de 0,027s;
- no Irão os valores são inferiores a 0,015s;
- para Itália foram determinados valores de $k = 0,040s$ e $k = 0,042s$, respetivamente por Malagnini (2000) e Rouveli (1991);
- na Grécia a estimativa de valores realizada por Roumelioti et al (2004) fica entre o intervalo $k = 0,035s$ e $k = 0,066s$;
- para a região da China, Wang Haiyun et al. (2006) determinaram um valor de $k = 0,050s$;
- na Jugoslávia, Roumelioti & Kiratzi (2002), o valor de $k = 0,050s$.

Fator de amplificação na crosta superior, $F_z(f)$

Existem 2 efeitos distintos de amplificação na crosta superior:

- a impedância, causada pela variação de densidade e velocidade das ondas sísmicas, desde a fonte ao local em estudo, $F_{zi}(f)$
- a ressonância devida à configuração do local (aspetos geológicos e topográficos), $F_{zr}(f)$.

Assim, a amplificação da crosta superior pode ser escrita na forma:

$$F_z(f) = F_{zi}(f) + F_{zr}(f) \quad (2.19)$$

A impedância pode ser obtida empiricamente através da fórmula:

$$F_{zi}(f) = \frac{2}{1 + \left(\frac{f_{zi}}{f}\right)^2} \quad f > f_{zi} \quad (2.20)$$

A ressonância não possui fórmula analítica de modo a incluir todos os efeitos locais, sendo necessário um estudo detalhado local⁴.

⁴ O efeito geotécnico é o efeito de ressonância mais estudado – a influência das formações geotécnicas nas características dos movimentos sísmicos, através de relações empíricas ou modelos analíticos.

É usual, para a caracterização da ação sísmica, dividir o solo nas categorias ‘solos brandos’, ‘solos intermédios’ e ‘solos rígidos’. É igualmente usual assumir que a amplificação é independente da frequência se a profundidade do estrato for significativamente superior ao comprimento de onda da onda sísmica, todavia, pelos registos observados, pode verificar-se que os pequenos comprimentos de onda são mais amplificados que os grandes comprimentos de onda.

Para auxiliar ao estabelecimento de valores de referência (Carvalho A. , 2007):

- na Califórnia, zona de rochas recentes, com solos pouco consolidados, a amplificação da amplitude das ondas sísmicas é da ordem das 2 ou 3 vezes; e, quando considerada a influência da profundidade, nas altas frequências, a amplificação pode exceder as 3,5 vezes;
- no Leste da América do Norte, em solos duros e muito duros, com influência de profundidade, a amplificação da crusta superior é pequena e pode, geralmente, ser desprezada (=1);
- em Portugal Continental, também se adota um fator de amplificação da crusta superior unitário.

Com a contribuição dos fatores anteriormente descritos, fica definido o espectro de amplitude de Fourier⁵ e, conseqüentemente pode aplicar-se a metodologia estocástica para estimar o movimento intenso do solo.

Embora este procedimento não seja efetuado no âmbito deste trabalho, apresenta-se, resumidamente, a essência da metodologia estocástica para obter o espectro e as séries resultantes, segundo Boore (2003), que consiste em gerar séries cujo espectro seja coincidente com o espectro médio de determinado espectro de amplitude de Fourier obtido através da expressão geral (2.1).

O desenvolvimento da metodologia para obtenção das séries obedece a uma sequência de ações, representadas na Figura 2.6, designadamente:

- para dar início ao método, é gerada uma série temporal de ruído branco, para uma duração finita do movimento (imagem a);
- o sinal é multiplicado por uma função modulação no tempo (imagem b) e transformado para o domínio da frequência (imagem c);

⁵ Para rocha. Para outro tipo de solos, devem ser considerados outros fatores, como a não linearidade do solo em função da frequência.

- o espectro resultante é normalizado (imagem d) e, posteriormente, multiplicado pelo espectro de amplitude de Fourier (imagem e);
- o produto é transformado novamente no domínio do tempo de modo a obter-se o acelerograma pretendido (imagem f).

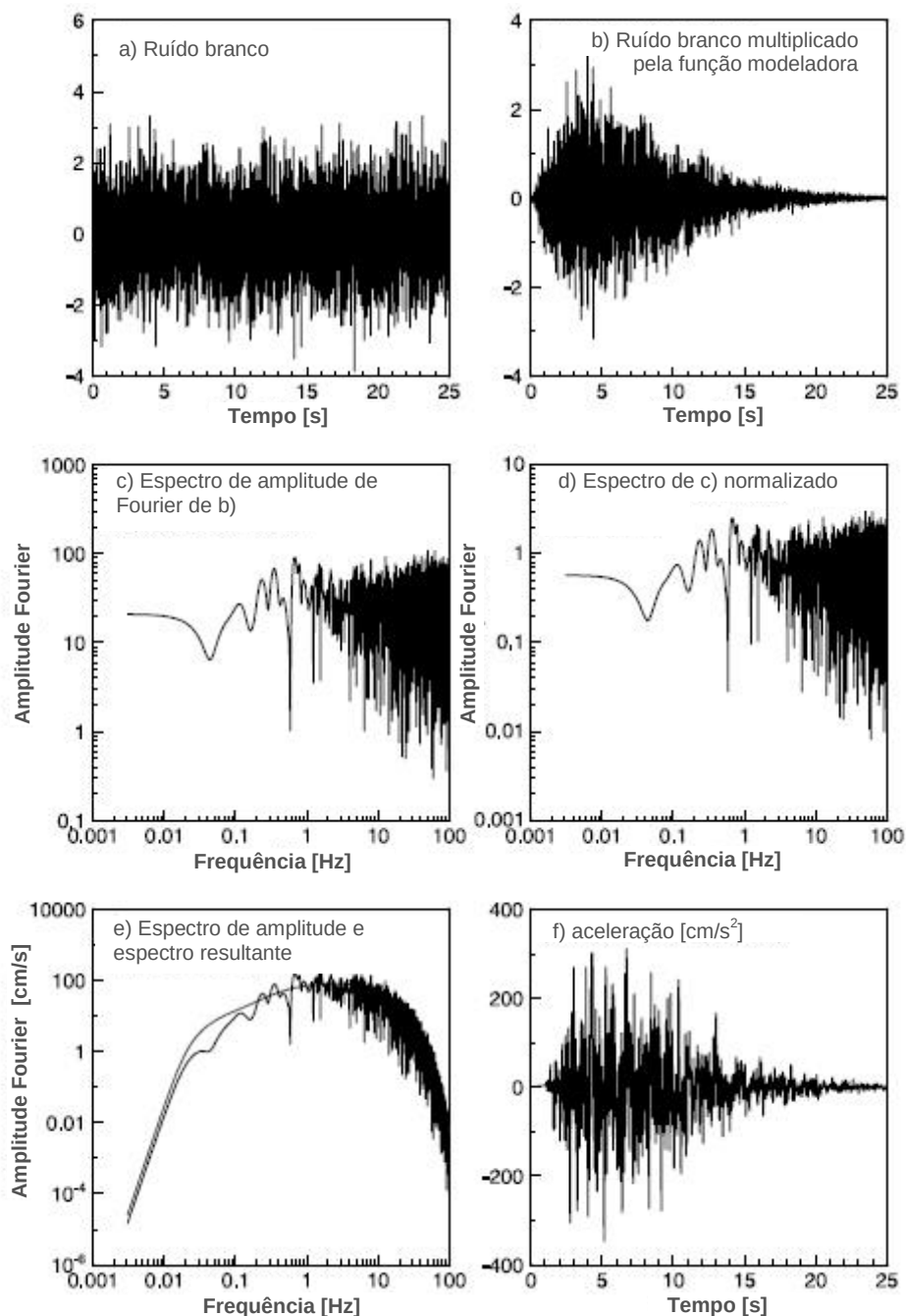


Figura 2.6 - Procedimento da metodologia estocástica para a obtenção de séries temporais (adaptado de Boore, 2003 in (Carvalho A. , 2007))

Na utilização deste método uma série temporal individual deve ser usada com o devido cuidado, uma vez que não há garantia que o espectro dessa série seja próximo do espectro

“alvo” dado pela expressão (2.1). O processo deverá ser repetido várias vezes para gerar um grande número de acelerogramas com diferentes ângulos de fase, e será a média dos espectros individuais que irá corresponder ao espectro desejado.

A função de modulação utilizada (Figura 2.6) para traduzir a não-estacionaridade da excitação atuante pode ter várias formas, sendo no entanto de realçar as mais vulgarizadas, que são as sugeridas por Amin & Ang [1968], Shinozuta & Sato [1967] e Saragoni & Hart [1974].

A função moduladora definida por Amin & Ang [1968] tem a forma:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \left(\frac{t}{t_1}\right)^2 & 0 \leq t \leq t_1 \\ 1 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ e^{-c(t-t_2)} & t > t_2 \end{cases} \quad (2.21)$$

em que t_1 , t_2 e c são parâmetros a calibrar.

A função moduladora definida por Shinozuta & Sato [1967] assume a forma:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \frac{1}{c}(e^{-at} - e^{-bt}) & t > 0 \end{cases} \quad (2.22)$$

sendo a e b constantes a definir e

$$c = \max(e^{-at} - e^{-bt}) = \left[\left(\frac{a}{b}\right)^{a/(b-a)} - \left(\frac{a}{b}\right)^{b/(b-a)} \right] \quad (2.23)$$

A função modeladora definida por Saragoni & Hart [1974] tem a forma

$$\theta(t) = a(t/t_n)^b \exp\left(-c\left(\frac{t}{t_n}\right)\right) \quad (2.24)$$

em que os parâmetros a , b , c são determinados de maneira a que a função modeladora tenha o pico igual à unidade quando $t = \varepsilon \cdot t_n$ e seja igual a η quando $t = t_n$. Assim,

$$b = -(\varepsilon \cdot \ln \eta) / [1 + \varepsilon (\ln \varepsilon - 1)], \quad (2.25)$$

$$c = \frac{b}{\varepsilon} \quad (2.26)$$

e

$$a = \left(\exp(1) / \varepsilon \right)^b \quad (2.27)$$

A Figura 2.7 apresenta as configurações características das representações gráficas destas 3 funções.

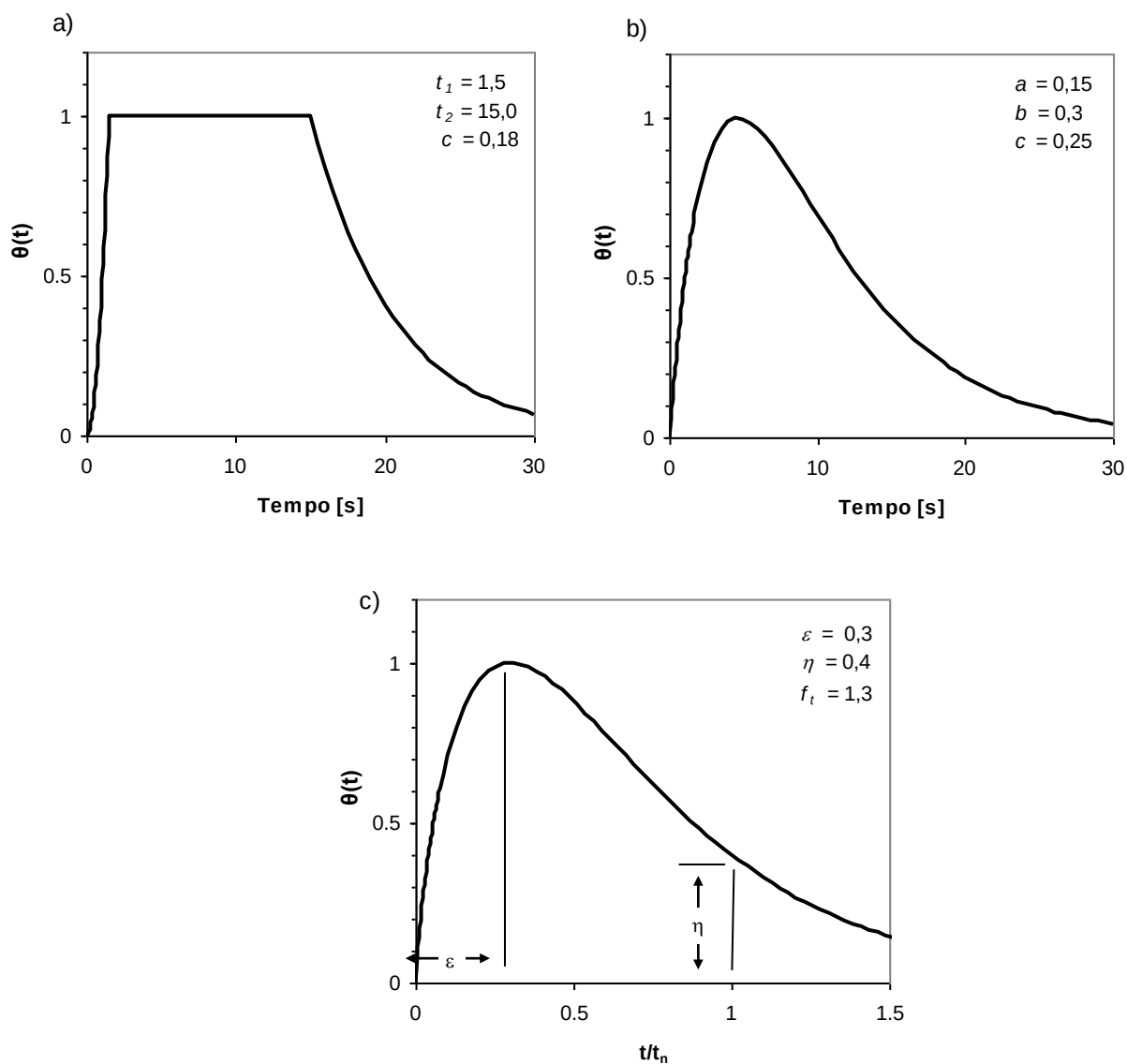


Figura 2.7 - Funções de modulação determinísticas utilizadas por a) Amin & Ang [1968]; b) Shinozuka & Sato [1967]; c) Saragoni & Hart [1974] (Carvalho A. , 2007)

3. Fonte Sísmica

3.1. Geral

A rede acelerográfica de Portugal, continental e insular, é responsável pela aquisição da informação a tratar que será utilizada para estimar os valores dos parâmetros que traduzem os processos físicos de geração de energia na fonte e propagação das ondas sísmicas.

Para o caso particular do arquipélago dos Açores, em que a rede acelerográfica é constituída por acelerómetros triaxiais, foram seleccionados os registos que obedecem a certos requisitos, nomeadamente condições geológicas do local (considerando-se apenas as estações em rocha ou solo muito duro) e local de instalação das estações (considerando-se somente as localizações em campo aberto ou na base de um edifício).

A Figura 3.1 ilustra sumariamente a metodologia do processo de tratamento da informação para determinar os parâmetros necessários à utilização do modelo estocástico de caracterização dos movimentos intensos do solo.

A informação é analisada com o auxílio do *software* informático, Lnec-Spa, referido no Anexo B, onde é seleccionada apenas a contribuição das ondas S nos registos, devido ao predomínio de conteúdos espectrais nas altas frequências, presentes nos registos da rede e é gerado o espectro de amplitude de Fourier em aceleração. Etapas *c)*, *d)* e *e)* da

Com os parâmetros através dos registos da rede acelerométrica e com valores determinados em outros estudos (como o parâmetro de qualidade do meio), é possível quantificar os parâmetros de caracterização dos movimentos intensos do solo para a região do arquipélago dos Açores, nomeadamente:

- através do espectro de amplitude de Fourier em aceleração, é determinado o parâmetro de decaimento espectral (determinação gráfica baseada no modelo ómega quadrado proposto por Brune). Etapas *f)*, *g)* e *h)* da figura 3.1
- através do espectro de amplitude de Fourier em aceleração, é determinado o parâmetro de decaimento espectral (determinação gráfica baseada no modelo ómega quadrado proposto por Brune). Etapas *f)*, *g)* e *h)* da através do espectro de amplitude de Fourier em deslocamentos, na fonte sísmica, sem a influência dos efeitos de propagação no meio, e com o valor de decaimento espectral já quantificado, são determinados o momento sísmico, a frequência-esquina e a queda de tensão (determinação empírica, gráfica e teórica). Etapas *h)*, *i)*, *j)* e *k)* da figura 3.1

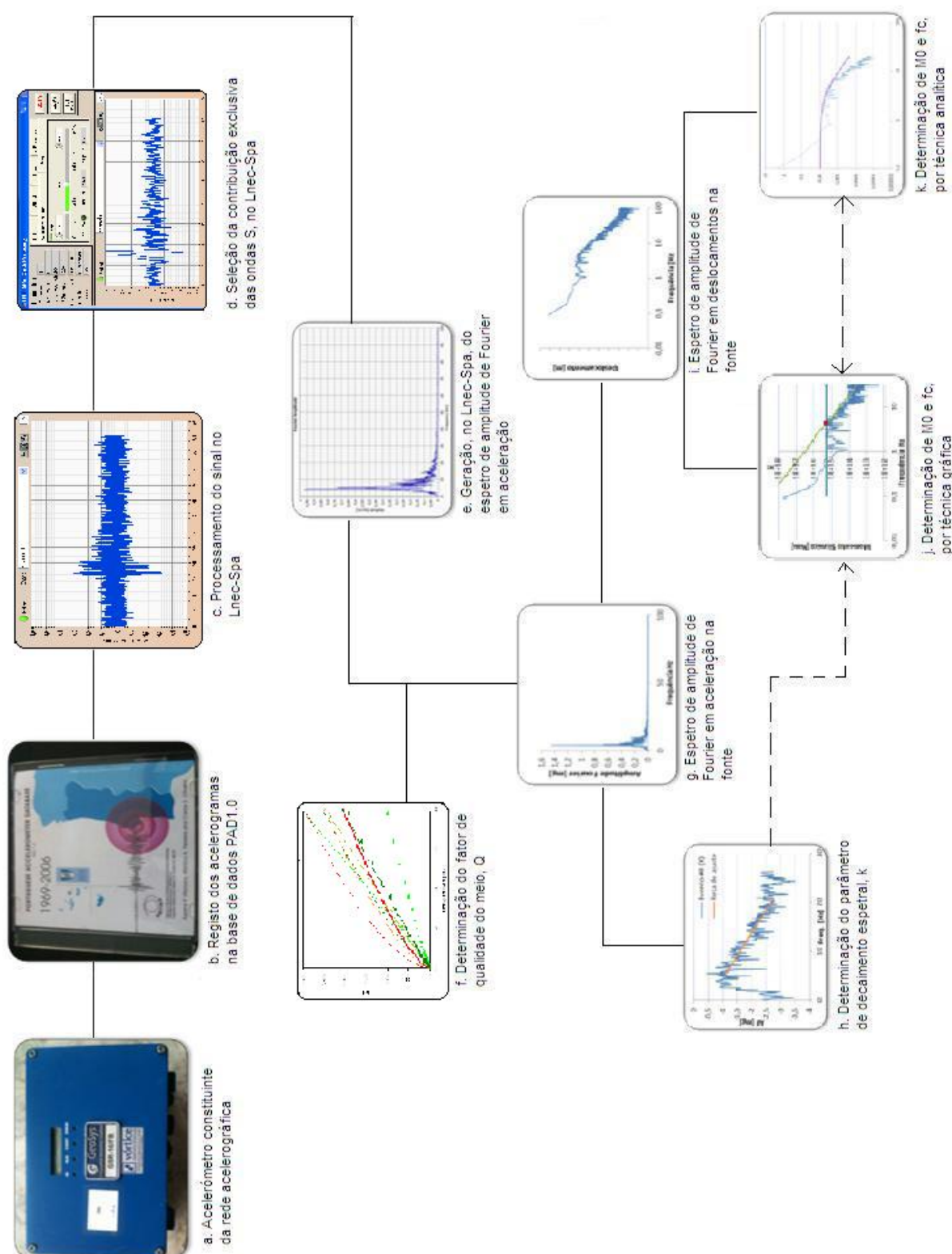


Figura 3.1 – Quadro-resumo do procedimento adotado para a determinação dos parâmetros necessários à utilização do modelo estocástico de caracterização dos movimentos intensos do solo, para a região dos Açores

3.2. Enquadramento Regional: Localização e Sismotectónica da Região dos Açores

O arquipélago dos Açores, de natureza vulcânica, situa-se sobre a Dorsal Média Atlântica, no nordeste do oceano Atlântico, com as coordenadas entre os 37° e 40° N de latitude e 25° e 31° W de longitude (Carvalho et al., 2001), numa faixa de cerca de 600km de comprimento. É formado por 3 grupos constituídos por ilhas, designadamente:

- Grupo Ocidental – Ilhas do Corvo e das Flores;
- Grupo Central – Ilhas do Faial, Graciosa, do Pico, de São Jorge e Terceira;
- Grupo Oriental – Ilhas de Santa Maria e de São Miguel.

O arquipélago ocupa uma área com cerca de 2333km², pouco profunda e irregular, a denominada Plataforma dos Açores, definida pela curva batimétrica dos 2000m e a ocupar uma área de 5.8*10⁶km², triangular, a marcar a transição para a planície abissal envolvente com profundidades que rondam os 3500m (Carvalho et al., 2001).

Sismotectonicamente, os Açores localizam-se na junção tripla das placas litosféricas americana, eurasiática e africana, em forma de T, Figura 3.2, com:

- Dois ramos de direção N-S, constituído pela Dorsal Média do Atlântico, ou Crista Médio-Atlântica, uma estrutura distensiva pura, localizada entre as ilhas Flores e Faial que estabelece a fronteira entre a placa norte americana e as placas euroasiática e africana;
- Um terceiro ramo, que separa a placa eurasiática da placa africana, considerado como a Falha Açores-Gibraltar ou o Rifte da Terceira, que apresenta 3 sectores distintos do ponto de vista geodinâmico:
 - Sector oriental, sensivelmente para Este do Banco de Goringe, com cavalgamento da placa eurasiática sobre a africana;
 - Sector central, para Oeste de 15°W e com cerca de 800km de extensão, o qual corresponde a uma bem definida estrutura de desligamento direito puro, chamada a Falha Gloria;
 - Sector Ocidental, que se estende entre a ilha de Santa Maria e a Crista Média Atlântica, caracterizado por estruturas do tipo transformante *leaky*, com expansão oblíqua (Carvalho et al., 2001).

A Figura 3.2 representa o enquadramento geotectónico da região dos Açores (Nunes, 1999 in Carvalho et al., 2001).



Figura 3.2 - Enquadramento geotectónico da região dos Açores (Carvalho et. al, 2001 adaptado de Nunes, 1999)

A globalidade das características da região dos Açores, nomeadamente a natureza vulcânica e as estruturas tectonicamente ativas da zona, contribuem para a relevância da sismicidade, manifestada sob a forma de um elevado número de microssismos (magnitudes inferiores a 3) registados anualmente na rede sísmica do arquipélago e, periodicamente, a ocorrência de eventos sísmicos moderados a fortes, a afetar uma ou mais ilhas e a causar destruição e fortes impactos económicos.

3.3. Aquisição dos Dados

Os dados de eventos sísmicos são registados pela rede acelerográfica, que é composta por 51 estações, 24 localizadas em Portugal Continental e 27 nos Açores e foram extraídos do *PAD 1.0 Portuguese Accelerometer Database* (Vilanova et al., 2009).

A Tabela 3.1 apresenta as estações constituintes da rede acelerométrica, com identificação da região onde a estação se posiciona, o código da estação, a latitude e a longitude da localização, o tipo de edifício em que se insere e o respetivo piso e, por fim, o tipo de geologia do local e o estado de utilização da estação (Vilanova et al., 2009):

- Região - a região é dividida em Portugal continental, (MP – *mainland Portugal*), Lisboa (MP-L – Lisbon, *mainland Portugal*), e Açores (AZ) associado às ilhas Graciosa (AZ-G), Faial (AZ-F), Pico (AZ-P), São Jorge (AZ-J), Terceira e São Miguel (AZ-M);
- Código – constituído por 3 carateres identificativos da zona onde está implementada a estação;
- Latitude e longitude da implementação da estação;
- Tipo de estrutura – a classificação do tipo de estrutura em que está instalado o acelerógrafo varia em poço de mesa sísmica (STP – *shaking-table pit*), ponte do tipo aqueduto (BLA – *bridge-like aqueduct*) e edifício. A tipologia do edifício permite catalogar os tipos de construção: edifícios do tipo A são edifícios anteriores a 1755, o tipo B são edifícios de alvenaria pombalinos (1755 a 1880), o tipo C constitui edifícios de alvenaria com mais de 3 pisos, com pavimento de madeira (1880-1940), os edifícios de tipo D são de alvenaria com estrutura ou pavimento de betão (1880-1940) e os edifícios do tipo E são de betão armado (após 1960). O número associado indica o andar em que se encontra o acelerógrafo;
- Piso - o piso pode variar entre o nível do solo (gl – *ground level*) e o andar do edifício; pode ser subterrâneo (ug – *underground*) ou constituir um poço de ancoragem de ponte (ap – *bridge anchorage pit*);
- Solo - a geologia do local pode variar no tipo aluvião (*alluvium*), solo intermédio (*intermediate soil*), solo rochoso (*rock*), solo mole (*soft soil*), solo duro sobre

muito mole (*stiff over very soft soil*), solo duro (*stiff soil*) e solo muito mole (*very soft soil*). A informação tem proveniência dos mapas geológicos de caracterização superficial, no caso de Portugal Continental (Serviços Geológicos de Portugal, 1992), e na classificação de Forjaz *et al.* (2001) para o arquipélago dos Açores.

Tabela 3.1 - Tabela com as estações constituintes da rede acelerométrica de Portugal continental e Açores

Região	Código	Latitude	Longitude	Tipo Estrutura	Piso	Solo
MP	ALC	39,5503	-8.9784	A_2-story	gl	V. soft
MP	VFX	38,9526	-8.9891	C_1-story	gl	Soft
MP	BEN	38,9834	-8.8104	A_3-story	gl	Medium
MP	EVM	38,7642	-7.7172	E_1-story	gl	Rock
MP	VER	38,5824	-9.1562	E_1-story	gl	Stiff
MP	STE	37,5469	-8.7281	Free-field	gl	Rock
MP	SVI	37,0233	-8.9962	A_3-story	gl	Rock
MP	PAL	37,1058	-8.5197	B_2-story	gl	Rock
MP	FAP	37,0280	-7.9227	E_1-story	gl	Alluv.
MP	FAR	37,0173	-7.9207	E_4-story	gl	Stiff
MP-L	PO1	38,7795	-9.1116	E_11-story	gl	Stiff
MP-L	ACU	38,7585	-9.1414	D_3-story	gl	Stiff
MP-L	PLA	98,7582	-9.1425	STP	ug	Stiff
MP-L	DE2	38,7370	-9.1399	E_7-story	6th	Stiff
MP-L	DE3	38,7372	-9.1399	E_7-story	6th	Stiff
MP-L	AGU	38,7299	-9.1706	BLA	gal	Rock
MP-L	SNP	38,7202	-9.2365	C_2-story	gl	Stiff
MP-L	SVF	38,7145	-9.1271	A_3-story	gl	Rock
MP-L	P25	38,7001	-9.1795	BRG	ap	Alluv.
MP-L	AVR	38,7474	-9.1406	D_8-story	8th	Stiff
MP-L	SMP	38,7361	-9.1628	B_3-story	gl	Rock
MP-L	BOM	38,7787	-9.1102	C_4-story	3th	Stiff

MP-L	PO2	38,7795	-9.1116	E_11-story	9th	Stiff
MP-L	IME	38,7759	-9.1261	E_8-story	gl	Stiff
AZ-G	SCR	39,0859	-28.0091	E_1-story	gl	Stiff
AZ-F	HOR	38,5294	-28.6290	C_2-story	gl	V.soft
AZ-F	HHT	38,5357	-28.6297	E_5-story	4th	Stiff
AZ-F	HSC	38,5352	-28.6289	E_3-story	2nd	Stiff
AZ-F	FHO	38,5303	-28.6281	E_4-story	2nd	Soft
AZ-F	HPT	38,5379	-28.6264	E_3-story	gl	Soft
AZ-P	SRO	38,5244	-28.3209	E_2-story	gl	Stiff
AZ-P	SMJ	38,4342	-28.4589	D_1-story	gl	Stiff
AZ-P	LAG	38,3971	-28.2472	E_1-story	gl	V.soft
AZ-P	PI1	38,4350	-28.4528	A_1-story	gl	Stiff
AZ-P	PI2	38,5414	-28.4149	A_1-story	gl	Stiff
AZ-P	SML	38,4352	-28.4721	D_1-story	gl	Stiff
AZ-J	VEL	38,6831	-28.2122	E_2-story	gl	Stiff
AZ-J	TOP	38,5500	-27.7560	D_1-story	gl	Stiff
AZ-T	SER	38,7595	-27.3640	A_1-story	gl	V.soft
AZ-T	PVI	38,7321	-27.0599	A_2-story	gl	Stiff
AZ-T	SEB	38,6673	-27.0897	B_2-story	gl	V.soft
AZ-T	GZC	38,6557	-27.2167	A_3-story	gl	Stiff/V.soft
AZ-T	PJU	38,6470	-27.1195	E_1-story	gl	Stiff
AZ-T	GAR	38,6562	-27.2172	E_2-story	gl	Stiff/V.soft
AZ-T	GZ1	38,6557	-27.2167	A_3-story	1st	Stiff/V.soft
AZ-T	GZ2	38,6557	-27.2167	A_3-story	2nd	Stiff/V.soft
AZ-T	SEM	38,6652	-27.0921	E_1-story	gl	Soft
AZ-T	SEJ	38,6659	-27.0910	E_2-story	gl	V.soft
AZ-M	MOS	37,8904	-25.8210	B_2-story	gl	Stiff
AZ-M	SOL	37,7403	-25.6645	E_23-story	21th	Stiff
AZ-M	LR1	37,7484	-25.6640	E_1-story	gl	Stiff

Os acelerómetros instalados na rede são digitais, de 12, 16 ou 18 bits, da marca Geosys, modelos SSA-320 GSR-12, SSA-320 GSR-16 e SSA-320 GSR-18, respetivamente. Os sensores são triaxiais, do tipo Force Balance⁶. Contêm circuito de amplificação e controlo, um registador com os respetivos circuitos A/D e memória de massa, bateria com autonomia de 48h e respetivo transformador de alimentação (Sousa & Martins, 2006). A Figura 3.3 ilustra a aparência de um acelerómetro Geosys SSA-320 GSR-16.



Figura 3.3 – Aparência de um acelerómetro Geosys SSA-320 GSR-16

O acelerómetro tem funcionamento pré-definido por *trigger*⁷, isto é, está em constante leitura dos movimentos, nas três direções ortogonais (canais) e, para cada uma delas, tem um valor mínimo para o qual é despoletada a função de registo para a memória. Os limites máximos e mínimos do sinal medidos, são de $\pm 2g$. A capacidade de memória é de 1024Kbyte. O acesso às configurações, controlo e informação é realizado por *software* próprio instalado em computador portátil.

As características de implementação das estações que conferem aptidão aos registos são: o tipo de solo, duro, e o piso de instalação do acelerómetro, piso térreo. De modo a minimizar a influência de fatores externos à propagação das ondas sísmicas, foram escolhidas apenas os registos em que as estações estavam implementadas em solo duro e em piso térreo ou em campo aberto.

A partir da listagem de estações e respetivas condições de implementação, é possível agrupar as estações em três grupos distintos:

⁶ Sensores constituídos por um pêndulo dinamicamente equilibrado num campo eletromagnético.

⁷ Os acelerómetros podem dar início ao registo através de vários critérios: o valor de aceleração registado ultrapassa o que está definido como *trigger*, é excedido um determinado valor da razão sinal/ruído, imposição de leitura por janelas temporais, imposição de registo por *software*, *trigger* em rede com influência de outro acelerómetro.

- as estações que reúnem as condições necessárias para que os seus registos sejam utilizados – com representação vermelha;
- as estações que reúnem as condições necessárias de implementação, mas que não contabilizam nenhum registo – com representação amarela;
- as estações que não reúnem as condições para serem utilizadas devido à geologia local – com representação verde.

A Tabela 3.2 agrupa as estações, com as respetivas características, por cores e a Figura 3.4 ilustra o mapa com a localização das estações que compõem a rede acelerográfica dos Açores.

Tabela 3.2 - Estações da rede acelerográfica dos Açores

Localização	Nome da estação	Código da estação	Lat. [°N]	Long [°W]	Altitude [m]	Solo
Graciosa	AZ-G	SCR	39,0859	-28,0091	12.00	Duro
Faial	AZ-F	HOR	38,5294	-28,6290		Muito mole
Faial	AZ-F	HHT	38,5357	-28,6297	0	Duro
Faial	AZ-F	HSC	38,5352	-28,6289	0	Duro
Faial	AZ-F	FHO	38,5303	-28,6281		Muito mole
Faial	AZ-F	HPT	38,5379	-28,6264	10.00	Duro
Pico	AZ-P	SRO	38,5244	-28,3209	45.00	Duro
Pico	AZ-P	SMJ	38,4342	-28,4589	50.00	Duro
Pico	AZ-P	LAG	38,3971	-28,2472		Muito mole
Pico	AZ-P	PI1	38,4350	-28,4528	0	Duro
Pico	AZ-P	PI2	38,5414	-28,4149		Duro
Pico	AZ-P	SML	38,4352	-28,4721		Duro
S. Jorge	AZ-J	VEL	38,6831	-28,2122	35.00	Duro
S. Jorge	AZ-J	TOP	38,5500	-27,7560	40.00	Duro
Terceira	AZ-T	SER	38,7595	-27,3640		Muito mole
Terceira	AZ-T	PVI	38,7321	-27,0599	15.00	Duro
Terceira	AZ-T	SEB	38,6673	-27,0897		Muito mole
Terceira	AZ-T	GZC	38,6557	-27,2167		Duro/mtto mole
Terceira	AZ-T	PJU	38,6470	-27,1195		Duro
Terceira	AZ-T	GAR	38,6562	-27,2172		Duro/mtto mole
Terceira	AZ-T	GZ1	38,6557	-27,2167		Duro/mtto mole
Terceira	AZ-T	GZ2	38,6557	-27,2167		Duro/mtto mole
Terceira	AZ-T	SEM	38,6652	-27,0921		Mole
Terceira	AZ-T	SEJ	38,6659	-27,0910		Muito mole
S. Miguel	AZ-M	MOS	37,8904	-25,8210	25.00	Duro

S. Miguel	AZ-M	SOL	37,7403	-25,6645	10.00	Duro
S. Miguel	AZ-M	LR1	37,7484	-25,6640	45.00	Duro

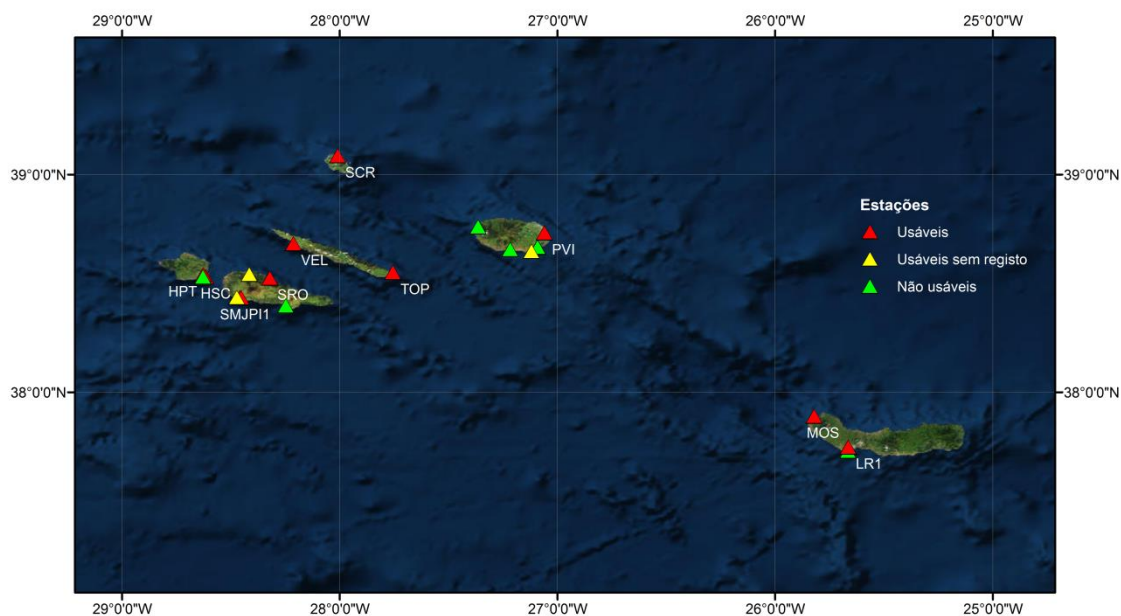


Figura 3.4- Mapa com a localização geográfica das estações da rede acelerográfica dos Açores e respectiva utilidade, com código de cores

Das estações válidas, foram compilados pelo PAD 1.0 os registos da atividade sísmica da região dos Açores de 1969 a 2006, em solos duros, o que originou uma listagem de eventos válidos para análise.

A comparação dos dados dos eventos apresentados no interface gráfico da aplicação PAD 1.0 com os dados gerados em ficheiro após a aplicação dos critérios pela aplicação PAD 1.0, permitiu detetar algumas incoerências de valores, nomeadamente de magnitude, pelo que todos os registos foram submetidos a validação através da consulta aos dados disponibilizados pelo *síte* do então Instituto de Meteorologia (IM), atual Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA).

A Tabela 3.3 resume os dados resultantes, depois de validados. Os valores a vermelho indicam valores incoerentes que foram substituídos pelos valores publicados pelo IM. As linhas a cinzento indicam eventos que não foram validados por não existir registo desse evento no *síte* do IM, e, por isso, não serão considerados para análise. O mapa de localização epicentral dos eventos registados na rede acelerográfica da região dos Açores e respetiva magnitude é apresentado na Figura 3.5.

Tabela 3.3 - Tabela de eventos da rede acelerográfica dos Açores, em solos duros, de 1969 a 2006

# Evento	Data	Hora	Epicentro		MI	Prof.	Código da estação	R
			Lat. [°N]	Long. [°W]		[km]		[km]
	1999-06-29	15:44:00	NULL	NULL	NUL	NULL	MOS	NUL
1	1999-07-21	21:18:36	37,87	-25,83	2.1	12	MOS	3
2	1999-07-21	21:19:18	37,86	-25,83	3,5	2	MOS	4
3	1999-07-21	23:03:08	37,87	-25,85	3,00	2,7	MOS	3
4	2000-03-04	18:42:47	38,34	-26,70	4,70	4	PVI	54
		18:42:47	38,34	-26,70		4	MOS	91
5	2000-08-01	04:35:46	38,79	-28,96	4,90	6	VEL	66
		04:35:46	38,79	-28,96		6	SRO	62
6	2000-09-03	19:24:14	38,6	-27,06	3,50	0.00	PVI	14
7	2000-11-10	21:08:24	38,66	-27,3	2,40	6	TOP	18
8	2000-12-28	05:22:38	38,69	-27,62	3,30	4	TOP	20
9	2001-01-29	23:21:59	38,64	-28,58	3,60	6	VEL	32
10	2001-02-06	05:00:28	38,12	-26,39	4,10	2	PVI	89
11	2001-02-13	13:19:59	37,55	-25,22	4,50	2	SOL	32
12	2001-06-02	12:13:24	38,65	-28,42	3,80	12	SRO	4
		12:13:24	38,65	-28,42		12	VEL	23
13	2001-07-06	08:27:05	38,69	-27,90	4,00	7	TOP	16
		08:27:05	38,69	-27,90		7	VEL	29
		08:27:05	38,69	-27,90		7	SCR	48
14	2001-10-03	18:53:14	38,98	-28,06	3,00	0	SCR	12
15	2001-10-12	02:36:19	38,64	-28,58	3,50	7	VEL	33
16	2001-12-23	19:24:50	38,4	-27,02	3,70	1	PVI	37
17	2002-02-13	08:31:47	39,11	-28,26	3,90	1	VEL	48
		08:31:47	39,11	-28,26		1	SCR	22
18	2002-02-13	08:42:45	39,10	-28,26	3,90	0	SCR	28
19	2002-02-13	09:04:32	39,10	-28,26	3,70	0	SCR	25
20	2002-02-13	11:30:05	39,06	-28,25	3,10	0.00	SCR	21
21	2002-03-11	01:44:46	38,4	-27,04	3,60	0.00	PVI	37
22	2002-06-10	14:33:12	38,13	-26,66	4,30	0	PVI	84
23	2002-11-30	22:53:12	39,13	-28,45	4,20	0	TOP	87
		22:53:12	39,13	-28,45		0	SCR	39
		22:53:12	39,13	-28,45		0	VEL	52
24	1998-07-09	05:19:07	38,63	-28,52	5,90	5	PVI	132
		05:19:07	38,63	-28,52		5	MOS	253
25	1998-07-10	11:49:00	38,67	-28,49	4,80	0	MOS	248

26	1998-07-18	08:55:00	38,49	-28,58	3,50	24	HSC	7
27	1998-07-18	11:06:00	38,64	-28,56	4,20	0	HSC	13
28	1998-07-20	06:14:00	38,56	-28,59	3,20	18	HSC	4
	1998-08-23	11:04:00	385500	-285700	3,50	NULL	HHT	5
	1998-08-23	11:11:00	385900	-285600	3,80	NULL	HHT	9
29	1998-08-31	08:45:00	38,66	-28,56	3,80	0	HHT	15
	1997-07-07	19:40:47	382167	-269150	3,80	NULL	MOS	102
	1997-07-07	20:07:22	382467	-269167	3,30	NULL	MOS	104
30	1997-07-14	02:24:02	38,3	-26,79	3,40	0	MOS	96
31	2002-11-30	22:53:12	39,13	-28,45	4,20	0	SMJ	74
	1996-03-24	06:19:15	383040	-267240	4,90	10.00	LR1	111
32	2003-11-05	04:43:51	39,1	-28,67	3,00	5.00	SCR	57
33	2003-12-23	09:03:23	39,07	-28,26	2,50	4	SCR	22
34	2004-01-01	18:26:57	39,1	-28,24	2,20	14	SCR	20
35	2004-01-17	20:28:45	39,15	-28,22	2,30	22	SCR	19
36	2004-01-18	03:55:53	39,12	-28,3	3,40	4.00	SCR	25
37	2004-01-27	02:10:25	39,14	-27,99	3,10	1	SCR	6
38	2004-01-28	15:47:44	39,11	-28,25	4,30	7	SCR	17
39	2004-01-28	15:48:41	39,1	-28,25	3,50	5	SCR	21
40	2004-01-28	20:23:40	39,11	-28,27	3,70	3	SCR	16
41	2004-01-31	19:58:00	39,12	-28,26	3,50	6	SCR	22
42	2004-02-03	19:33:49	39,16	-28,27	3,60	4	SCR	24
43	2004-02-07	19:31:48	39,16	-27,95	2,60	2	SCR	9
44	2004-04-25	09:30:03	39,12	-28,46	4,10	0	SCR	36
45	2005-01-01	20:04:20	39,01	-27,99	2,30	0.00	SCR	8
46	2005-01-05	20:00:31	37,76	-25,43	3,20	2	SOL	21
47	2005-05-05	20:15:50	38,66	-28,38	3,20	6.00	VEL	15
		20:15:50	38,66	-28,38		6.00	SMJ	26
48	2005-12-13	20:19:59	38,67	-28,99	3,00	0.00	VEL	67
49	2006-10-05	02:25:40	38,66	-28,56	3,00	6	VEL	30
		02:25:40	38,66	-28,56		6	HPT	14
50	1997-06-27	04:39:53	38,24	-26,82	5,30	0	LR1	110
	1997-06-28	17:23:54	382850	-267600	4,60	10.00	LR1	113
	1997-06-28	13:31:44	382442	-268057	3,30	4.60	LR1	114
	1997-06-29	04:22:37	382910	-268564	4,20	7.90	LR1	121
51	1997-08-27	18:50:11	38,24	-26,73	4,40	0	LR1	102
	1973-11-23	13:36:20	384270	-283200	5,00	0	PI1	12

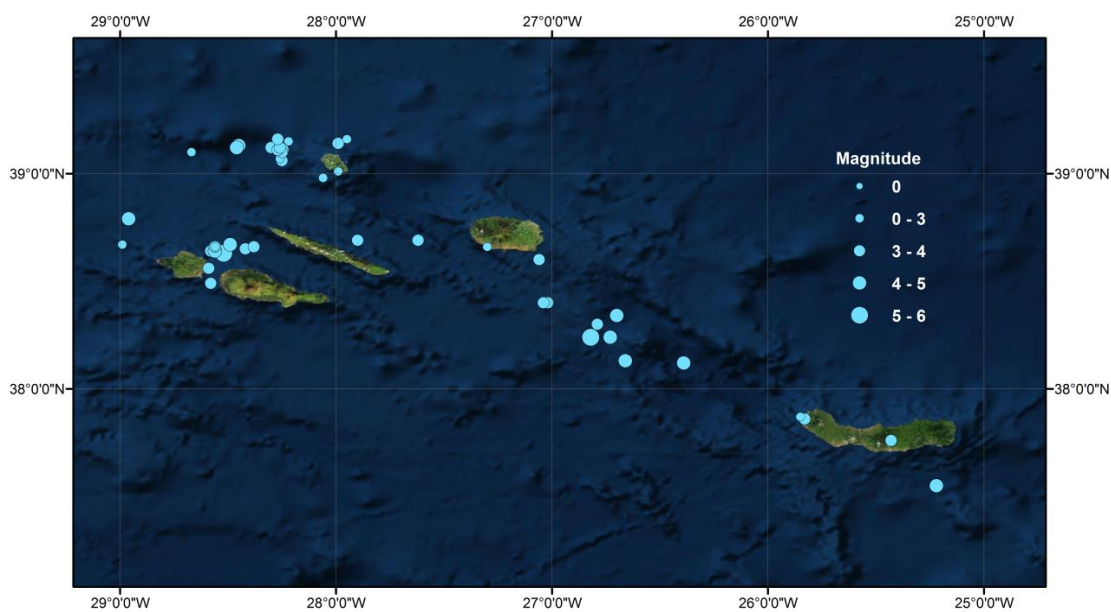


Figura 3.5 – Mapa com a localização epicentral dos eventos e respectiva magnitude, com código de eventos coerente com a numeração da tabela de eventos

3.4. Tratamento dos Dados

Os dados triaxiais recolhidos pelos acelerómetros são processados na aplicação Lnec-Spa, onde apenas são consideradas as direções ortogonais X e Y (plano horizontal), para gerar o respetivo espectro de amplitude de Fourier.

Os eventos mais fiáveis são os de registo múltiplos, ou seja, os que despoletaram várias estações, originando vários registos/ficheiros, para que os dados obtidos possam ser submetidos a comparação. Da informação contida no ficheiro, após a imposição de uma janela temporal, valoriza-se apenas a que é referente às ondas secundárias, ondas S. A seleção das ondas S deve-se a duas razões designadamente (Carvalho A. , 2007):

- para reduzidas distâncias entre o epicentro dos sismos e as estações, os conteúdos espectrais têm predomínio das altas frequências, garantindo-se maior domínio das ondas S;
- para sismos com epicentro afastado das estações, as ondas S são as que ativam o acelerómetro mas o desfasamento temporal entre a chegada das ondas P e das ondas S é superior a 20 segundos e o pré-evento está definido para 17 segundos, pelo que os registos contêm essencialmente a informação das ondas S, não registando o início e a chegada das ondas P.

Para determinar o início da contribuição das ondas S no acelerograma, é utilizada a relação entre o tempo de chegada das ondas P e o tempo de chegada das ondas S, que se traduz pela expressão (Carrilho, 2013)

$$V_P = 1,75 V_S \quad (3.1)$$

A velocidade das ondas P é afetada pelo meio de propagação e pela profundidade do hipocentro, pelo que se adota a Tabela 3.4 para a região dos Açores (Carrilho, 2013).

Tabela 3.4 - Velocidade das ondas P

MSM (Modelo para eventos ocorridos em S. Miguel)	
Profundidade (km)	Velocidade (m/s)
0	2.4
0.5	4.1
2.2	5.4
5	6.8
11.9	7.8

MRA (Modelo para eventos ocorridos no restante arquipélago)	
Profundidade (km)	Velocidade (m/s)
0	5.5
2.5	6.4
8	7.2
14	8

É possível então estimar o início da contribuição das ondas S no acelerograma, uma vez que se dispõe, igualmente, de dados como a distância entre o epicentro e a estação e a velocidade das ondas P. Assim, a informação é correlacionada para cada evento, através da expressão:

$$T_S = \frac{0.75 \cdot d}{V_P} \quad (3.2)$$

Como cada *sample* corresponde a 0.005 segundos, é relativamente simples, através da função *Crop* do *Quick Processing* do LneC-SPa definir onde se pretende que o registo tenha início – é detetado o início da atividade e soma-se-lhe o número de *samples* estimados, *N*, ou seja, o resultado obtido para o tempo de chegada das ondas S é dividido por 0.005 segundos.

$$N = \frac{T_S}{0.005} \quad (3.3)$$

Selecionada a informação do acelerograma, são gerados os espectros de amplitude de Fourier em aceleração.

A constituição do espectro de amplitude de Fourier atualizado (contributo exclusivo das ondas S) é definida e obtida a representação gráfica para as direções X e Y de cada evento. A Figura 3.6 exemplifica a aparência da informação gráfica obtida no LneC-Spa.

O Anexo C (C.1 Espectros de Amplitude de Fourier em Aceleração Gerados pelo LneC-Spa) contém os gráficos gerados pelo LNEC-SPA, para todos os registos da rede acelerográfica dos Açores, entre 1969-2006, em solos duros, registados em estações implementadas em piso térreo, para sismos com magnitudes entre 2,1 e 5,9, representando apenas o contributo das ondas S, originando 51 eventos, com contribuição ortogonal horizontal nas direções X e Y.

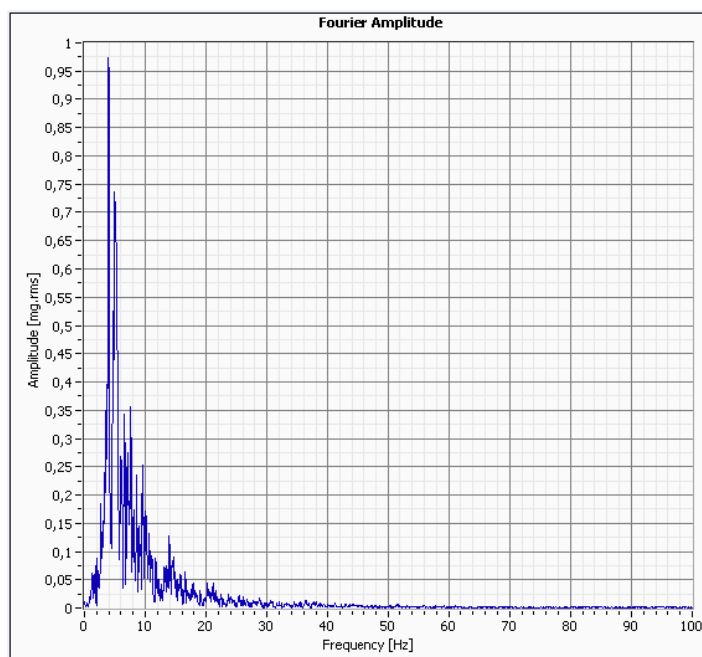


Figura 3.6 – Exemplo de espetro de amplitude de Fourier, em aceleração, gerado pelo LNEC-SPA

3.5. Espectro de Amplitude de Fourier em Aceleração

3.5.1. Parâmetro de Decaimento Espetral, k

A informação processada pelo LNEC-SPA é convertível em informação para o Excel, com indicação da frequência e respectiva amplitude de Fourier para cada direção X e Y, para processamento e determinação do parâmetro de decaimento espectral, k , que se obtém, graficamente, através do espectro de amplitude de Fourier em aceleração, tal como explicado no Capítulo 2.

A expressão geral da amplitude do espectro de aceleração, $A(f, M_0, R)$, é composta por um termo dependente da frequência, $(2\pi f)^2$, pelo termo referente ao espectro de Fourier na fonte, $S(f, M_0)$, pelo termo referente à atenuação geométrica, $G(R)$, ao da atenuação inelástica, $An(f, R)$, ao da atenuação superficial, $P(f)$, e ao termo referente à função de amplificação, $F_z(f)$:

$$A(f, M_0, R) = (2\pi f)^2 \cdot S(f, M_0) \cdot G(R) \cdot An(f, R) \cdot P(f) \cdot F_z(f) \quad (3.4)$$

De referir que o efeito do decaimento espectral observado nos espectros dos registos sísmicos é, obviamente, resultado dos vários processos físicos que caracterizam o movimento intenso do solo e que alteram o seu conteúdo espectral, nomeadamente, a atenuação inelástica devido às características do meio atravessado pelas ondas sísmicas e a atenuação crustal devido às características da crosta superior.

Desta forma, para o estudo da atenuação crustal, isto é, para o estudo do parâmetro de decaimento espectral, os espectros de amplitude de Fourier em aceleração devem ser desconvoluídos do efeito da atenuação inelástica.

Assim, o valor de amplitude de Fourier, FA , é corrigido, em ambas as direções, através da expressão:

$$FA_{corrigido} = FA * \frac{e^{\pi f R}}{Q(f)\beta} \quad (3.5)$$

Os restantes constituintes da fórmula, que não são incluídos na formulação de correção do espectro, são constantes, pelo que a sua consideração não influenciaria a forma do gráfico necessária para a determinação do parâmetro k .

Cada registo constitui, assim, uma folha de cálculo, com indicação de informação para a identificação do evento e todos os valores necessários à determinação de k , nomeadamente:

- data e hora do evento;
- localização do epicentro (latitude e longitude);
- estação que registou o evento;
- distância (medida do epicentro à estação que registou o evento);
- fator de qualidade do meio, Q^8 , calibrado para cada região, foi determinado com um valor constante de $Q = 76$ (Vales, 2013), para os Açores
- o fator η , igualmente calibrado regionalmente, determinado com o valor $\eta = 0.69$ (Vales, 2013);
- velocidade das ondas S, β , que é determinado através do conhecimento da localização da estação e da respetiva profundidade, remetendo para o quadro de velocidades das ondas P (Tabela 3.1), afetadas de uma relação $V_p = 1.75 V_s$.

Para cada registo, X e Y, de cada evento, e para posterior análise gráfica, são gerados gráficos de frequência (em Hz, no eixo dos X) – amplitude de Fourier em aceleração (em mg, no eixo dos Y), apresentados no Anexo (C).

Dos gráficos obtidos, é extraída a informação relativa ao conteúdo nas altas frequências ($> 1\text{Hz}$), e são gerados os gráficos em escala logarítmica. São selecionados os troços do gráfico que refletem o decaimento, em concordância com a teoria ómega quadrado proposta por Brune (onde o espectro de amplitude de Fourier em aceleração tem um patamar constante, plano, delimitado pelo frequência-esquina, nas baixas frequências e por uma frequência máxima nas altas frequências, a partir da qual o espectro apresenta um acentuado decaimento) e são traçadas as retas de ajuste, sob o espectro, com a equação da reta, por definição $y = mx + b$, a adotar a forma $y = km + k_0$, sendo, então, obtido o parâmetro k , que traduz o decaimento, obtido através do declive da reta de ajuste do decaimento das altas frequências do espectro de amplitude de Fourier em aceleração, para a escala logarítmica, conforme ilustrado pela Figura 3.7.

⁸ O fator de qualidade do meio, Q , e o fator η , relacionados na expressão $Q(f) = Q_0 \left(\frac{f}{f_0} \right)^\eta$, representam o amortecimento devido ao comportamento viscoelástico do meio de propagação.

O Q toma maiores valores quando o meio de propagação é menos atenuante.

Para zonas sísmicamente ativas, Q toma valores baixos e η toma valores altos ($Q_0 < 200$).

Para zonas estáveis, Q toma valores elevados e η toma valores baixos ($Q_0 > 600$).

Para zonas sísmicamente moderadas, Q e η tomam valores intermédios.

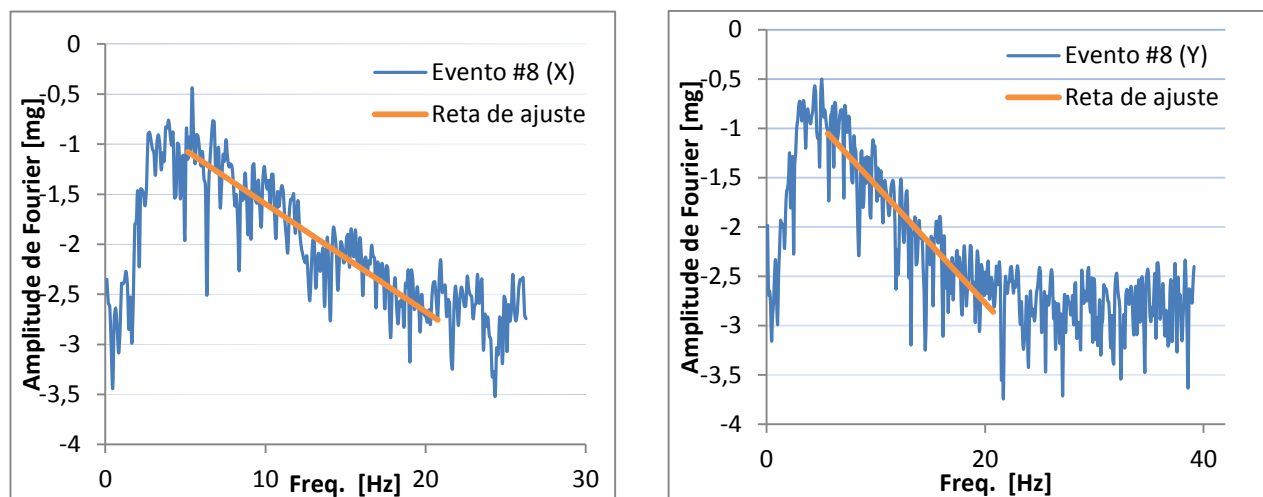


Figura 3.7 – Exemplo de espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 28 de Dezembro de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação TOP, a constituir o evento 8.

Associado a cada uma das retas de ajuste, foi determinado o coeficiente de correlação, R^2 , que pretende traduzir o grau de correlação entre as variáveis.

Na Tabela 3.5 são dispostos os valores dos coeficientes de correlação determinados para todos os registos, nas direções X e Y, em escala logarítmica, para validação dos resultados a utilizar na determinação do parâmetro k da região dos Açores. Através da análise de conteúdo nas altas frequências dos espectros e da relação fornecida pelo R^2 são validados os resultados a utilizar na determinação do parâmetro de decaimento, k . Designadamente, os registos com défice de conteúdo nas altas frequências, consideradas para valores acima de 1 ou 2 Hz, são anulados, conforme apresentado na Tabela 3.5, a vermelho, os eventos 10, 11, 12b, 25, 30, 32, 33, e 51. Na situação de anulação devido à relação proporcionada pelo R^2 , para valores inferiores a 20%, excluem-se os eventos 4b (em Y), 23b (em Y) e 50 (em Y). Foram ainda anulados os registos 24a e 24b⁹, por se tratar de um evento de elevada magnitude (5,9), ao qual não se pode aplicar a teoria de brune de falha pontual.

Dos eventos selecionados que contribuem com valores de declive da reta de ajuste, ou seja, que contribuem com valores de k , para a determinação estocástica do parâmetro k da região dos Açores, foram ainda excluídos todos os registos provenientes das estações acelerométricas de São Miguel, uma vez que apenas o Grupo Central do arquipélago dos Açores possuía estudo do fator de qualidade, Q , nomeadamente a contribuição das estações com os códigos MOS, SOL e LR1, assinaladas a azul na Tabela 3.5.

⁹ O evento 24 constitui o objeto de estudo da análise de um sismo real do Capítulo 4.

Tabela 3.5 - Validação e valores de R^2 das retas de ajuste dos registos, nas direções ortogonais X e Y

# Evento	Data	Hora	Código da estação	Escala Logaritmica	
				X	Y
1	1999-07-21	21:18:36	MOS	0,7462	0,7352
2	1999-07-21	21:19:18	MOS	0,3908	0,3985
3	1999-07-21	23:03:08	MOS	0,7926	0,7137
4a	2000-03-04	18:42:47	PVI	0,6096	0,5320
4b		18:42:47	MOS	0,5265	0,0012
5a	2000-08-01	04:35:46	VEL	0,4224	0,3122
5b		04:35:46	SRO	0,7951	0,7927
6	2000-09-03	19:24:14	PVI	0,7505	0,7404
7	2000-11-10	21:08:24	TOP	0,7979	0,8150
8	2000-12-28	05:22:38	TOP	0,7698	0,7936
9	2001-01-29	23:21:59	VEL	0,8200	0,7057
10	2001-02-06	05:00:28	PVI	Sem conteúdo	
11	2001-02-13	13:19:59	SOL	Sem conteúdo	
12a	2001-06-02	12:13:24	SRO	0,7502	0,7502
12b		12:13:24	VEL	Sem conteúdo	
13a	2001-07-06	08:27:05	TOP	0,6910	0,7466
13b		08:27:05	VEL	0,3378	0,5136
13c		08:27:05	SCR	0,4454	0,5507
14	2001-10-03	18:53:14	SCR	0,5524	0,5524
15	2001-10-12	02:36:19	VEL	0,5410	0,5790
16	2001-12-23	19:24:50	PVI	0,6301	0,6301
17a	2002-02-13	08:31:47	VEL	0,6040	0,4471
17b		08:31:47	SCR	0,4967	0,2661
18	2002-02-13	08:42:45	SCR	0,6061	0,5187
19	2002-02-13	09:04:32	SCR	0,4817	0,5098
20	2002-02-13	11:30:05	SCR	0,5422	0,6227
21	2002-03-11	01:44:46	PVI	0,6633	0,6229
22	2002-06-10	14:33:12	PVI	0,3532	0,4024
23a	2002-11-30	22:53:12	TOP	0,6881	0,4302
23b		22:53:12	SCR	0,7022	0,0016
23c		22:53:12	VEL	0,7657	0,7052
24a	1998-07-09	05:19:07	PVI	N/A teoria	
24b		05:19:07	MOS	N/A teoria	
25	1998-07-10	11:49:00	MOS	Sem conteúdo	
26	1998-07-18	08:55:00	HSC	0,4803	0,5593
27	1998-07-18	11:06:00	HSC	0,7083	0,7762
28	1998-07-20	06:14:00	HSC	0,5292	0,5807
29	1998-08-31	08:45:00	HHT	0,2167	0,4627
30	1997-07-14	02:24:02	MOS	Sem conteúdo	
31	2002-11-30	22:53:12	SMJ	0,7881	0,7642

32	2003-11-05	04:43:51	SCR	Sem conteúdo	
33	2003-12-23	09:03:23	SCR	Sem conteúdo	
34	2004-01-01	18:26:57	SCR	0,6953	0,5177
35	2004-01-17	20:28:45	SCR	0,4817	0,4900
36	2004-01-18	03:55:53	SCR	0,3148	0,3666
37	2004-01-27	02:10:25	SCR	0,4327	0,5520
38	2004-01-28	15:47:44	SCR	0,7284	0,5844
39	2004-01-28	15:48:41	SCR	0,5703	0,5703
40	2004-01-28	20:23:40	SCR	0,5791	0,5290
41	2004-01-31	19:58:00	SCR	0,7410	0,7088
42	2004-02-03	19:33:49	SCR	0,5285	0,5794
43	2004-02-07	19:31:48	SCR	0,6873	0,6942
44	2004-04-25	09:30:03	SCR	0,8343	0,7383
45	2005-01-01	20:04:20	SCR	0,6228	0,5708
46	2005-01-05	20:00:31	SOL	0,6096	0,6561
47a	2005-05-05	20:15:50	VEL	0,6473	0,6317
47b		20:15:50	SMJ	0,6525	0,7675
48	2005-12-13	20:19:59	VEL	0,5852	0,6730
49a	2006-10-05	02:25:40	VEL	0,5900	0,5496
49b		02:25:40	HPT	0,5487	0,5438
50	1997-06-27	04:39:53	LR1	0,3037	0,1259
51	1997-08-27	18:50:11	LR1	Sem conteúdo	

De 62 acelerogramas, 11 são provenientes das estações de São Miguel e os restantes 51 são provenientes das estações do Grupo Central e são desprezados registos devido a critérios de anulação que se relacionam com:

- obtenção de registos por estações da rede fora do grupo central do arquipélago dos Açores, onde ainda não existe estudo do fator de qualidade de propagação no meio;
- falta de conteúdo nas altas frequências para determinação do parâmetro k , em concordância com o pressuposto na teoria;
- valores de R^2 abaixo de 25%;
- simultaneidade de critérios.

Dos 11 registos provenientes de São Miguel, existem, simultaneamente, critérios de anulação que se relacionam com a falta de conteúdos nas altas frequências para determinação de k – 4 exemplos nas direções X e Y (eventos 11, 25, 30, 51). Os eventos 4b e 50, também são anulados com simultaneidade de critérios: são registos provenientes de estações exteriores ao grupo central e têm R^2 abaixo de 20%.

Dos 51 registos provenientes do Grupo Central, existem registos que verificam os critérios de anulação que se relacionam com a falta de conteúdos nas altas frequências para determinação de $k - 4$ exemplos nas direções X e Y (eventos 10, 12b, 33 e 51). O evento 23b tem R^2 abaixo de 20%.

O evento 24 também não é considerado uma vez que apresenta magnitude superior a 5,5, não se inserindo nos padrões de aplicabilidade da modelação pontual da fonte com rotura homogénea, tratado isoladamente no Capítulo 4, com modelação de falha-finita e rotura heterogénea, para não influenciar os resultados determinados estocasticamente.

A anulação de eventos com base nos critérios enunciados implica uma coloração das células invalidadas na Tabela 3.6.

Assim, com contributo de 46 registos (45 na direção X e 44 registos na direção Y), é possível determinar graficamente o parâmetro de decaimento espectral k médio da região do grupo central do arquipélago dos Açores, conforme já ilustrado a título de exemplo na logarítmica, com indicação da reta de ajuste.

. A análise dos restantes registos encontra-se no Anexo C (C.2 Espectros de Amplitude de Fourier em Aceleração Gerados pelo Excel), onde são apresentados os mesmos gráficos obtidos pelo LNEC-SPA transpostos para o Excel, após tratamento, da rede acelerográfica do arquipélago dos Açores, entre 1969-2006, em solos duros, registados em estações implementadas em piso térreo, para sismos com magnitudes entre 2,1 e 4,9, representando apenas o contributo das ondas S, com a respetiva seleção de conteúdos nas altas frequências, apresentadas em escala logarítmica, com indicação da reta de ajuste.

Após tratamento gráfico e analítico da informação, são tabeláveis (Tabela 3.6), sob a forma de resumo, os valores obtidos de k para os diversos eventos validados, nomeadamente:

- o valor de k médio, para o Grupo Central do arquipélago dos Açores, com valor de 0,075;
- o valor de k médio, para o Grupo Central do arquipélago dos Açores, na direção X, com valor de 0,074;
- o valor de k médio, para o Grupo Central do arquipélago dos Açores, na direção Y, com valor de 0,076.

Tabela 3.6 – Contribuição de valores de k dos registos para a determinação do parâmetro de decaimento k da região dos Açores

# Evento	Data	Hora	Código da estação	Decaimento		K_média
				K_x	K_y	
1	1999-07-21	21:18:36	MOS			
2	1999-07-21	21:19:18	MOS			
3	1999-07-21	23:03:08	MOS			
4a	2000-03-04	18:42:47	PVI	0,1318	0,1063	0,1190
4b		18:42:47	MOS			
5a	2000-08-01	04:35:46	VEL	0,0633	0,0592	0,0612
5b		04:35:46	SRO	0,0572	0,0576	0,0574
6	2000-09-03	19:24:14	PVI	0,0666	0,0641	0,0653
7	2000-11-10	21:08:24	TOP	0,0827	0,0910	0,0869
8	2000-12-28	05:22:38	TOP	0,0788	0,0875	0,0832
9	2001-01-29	23:21:59	VEL	0,0757	0,0667	0,0712
10	2001-02-06	05:00:28	PVI			
11	2001-02-13	13:19:59	SOL			
12a	2001-06-02	12:13:24	SRO	0,1425	0,1425	0,1425
12b		12:13:24	VEL			
13a	2001-07-06	08:27:05	TOP	0,1022	0,1119	0,1070
13b		08:27:05	VEL	0,0468	0,0890	0,0679
13c		08:27:05	SCR	0,0609	0,0586	0,0598
14	2001-10-03	18:53:14	SCR	0,0586	0,0586	0,0586
15	2001-10-12	02:36:19	VEL	0,1140	0,1309	0,1224
16	2001-12-23	19:24:50	PVI	0,0849	0,0457	0,0653
17a	2002-02-13	08:31:47	VEL	0,0729	0,0766	0,0747
17b		08:31:47	SCR	0,0746	0,0749	0,0748
18	2002-02-13	08:42:45	SCR	0,0611	0,0835	0,0723
19	2002-02-13	09:04:32	SCR	0,0644	0,0735	0,0690
20	2002-02-13	11:30:05	SCR	0,0701	0,0718	0,0709
21	2002-03-11	01:44:46	PVI	0,0702	0,0782	0,0742
22	2002-06-10	14:33:12	PVI	0,0706	0,0724	0,0715
23a	2002-11-30	22:53:12	TOP	0,1048	0,0706	0,0877
23b		22:53:12	SCR	0,0869		0,0869
23c		22:53:12	VEL	0,1003	0,0962	0,0983
24a	1998-07-09	05:19:07	PVI			
24b		05:19:07	MOS			
25	1998-07-10	11:49:00	MOS			
26	1998-07-18	08:55:00	HSC	0,0506	0,0695	0,0601
27	1998-07-18	11:06:00	HSC	0,0778	0,0962	0,0870
28	1998-07-20	06:14:00	HSC	0,0737	0,0811	0,0774
29	1998-08-31	08:45:00	HHT	0,0397	0,0948	0,0673
30	1997-07-14	02:24:02	MOS			

31	2002-11-30	22:53:12	SMJ	0,0829	0,0871	0,0850
32	2003-11-05	04:43:51	SCR			
33	2003-12-23	09:03:23	SCR			
34	2004-01-01	18:26:57	SCR	0,0660	0,0547	0,0603
35	2004-01-17	20:28:45	SCR	0,0319	0,0355	0,0337
36	2004-01-18	03:55:53	SCR	0,0556	0,0638	0,0597
37	2004-01-27	02:10:25	SCR	0,0711	0,0742	0,0727
38	2004-01-28	15:47:44	SCR	0,0855	0,0657	0,0756
39	2004-01-28	15:48:41	SCR	0,0913	0,0670	0,0791
40	2004-01-28	20:23:40	SCR	0,0733	0,0602	0,0667
41	2004-01-31	19:58:00	SCR	0,0673	0,0578	0,0625
42	2004-02-03	19:33:49	SCR	0,0670	0,0723	0,0696
43	2004-02-07	19:31:48	SCR	0,0778	0,0827	0,0802
44	2004-04-25	09:30:03	SCR	0,0986	0,0836	0,0911
45	2005-01-01	20:04:20	SCR	0,0745	0,0583	0,0664
46	2005-01-05	20:00:31	SOL			
47a	2005-05-05	20:15:50	VEL	0,0435	0,0554	0,0495
47b		20:15:50	SMJ	0,0467	0,0869	0,0668
48	2005-12-13	20:19:59	VEL	0,0778	0,0880	0,0829
49a	2006-10-05	02:25:40	VEL	0,0462	0,0504	0,0483
49b		02:25:40	HPT	0,0836	0,0902	0,0869
50	1997-06-27	04:39:53	LR1			
51	1997-08-27	18:50:11	LR1			
Média				0,0743	0,0756	0,0750

De referir que, para conferir credibilidade ao resultado obtido, a contribuição das estações implementadas na região central do arquipélago dos Açores, foi sujeita a uma análise de coerência de valores onde se compara o valor médio de k do registo com o valor médio de k da estação, considerando os vários registos obtidos nesta estação, para diferentes eventos, por forma a anular eventuais contribuições de valores com elevado desvio-padrão da média de resultados obtidos. De acordo com o apresentado na Tabela 3.7, as estações não apresentam significativas discrepâncias de valores registados médios para determinação do k , pelo que foram validadas todas as contribuições das diversas estações. A Figura 3.8 apresenta, graficamente, a variação de valores de k determinado pelas estações do grupo central dos Açores, para reforçar a coerência dos valores obtidos.

Tabela 3.7 – Verificação de conformidade de valores obtidos pelas estações da rede acelerográfica do Grupo Central do Arquipélago dos Açores

Estação	Lat. [°N]	Long [°W]	K médio
SCR	39,0859	-28,0091	0,068942
HHT	38,5357	-28,6297	0,067283
HSC	38,5352	-28,6289	0,074821
HPT	38,5379	-28,6264	0,086853
SRO	38,5244	-28,3209	0,099936
SMJ	38,4342	-28,4589	0,075914
VEL	38,6831	-28,2122	0,075167
TOP	38,5500	-27,7560	0,091186
PVI	38,7321	-27,0599	0,072634

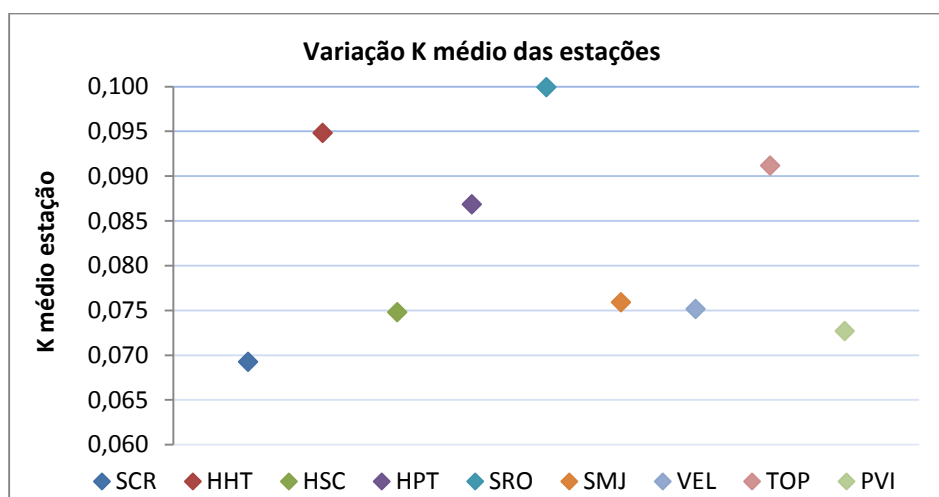


Figura 3.8 – Variação dos valores médios de k determinados a partir das diversas estações implementadas no grupo central dos Açores

Foi também estipulada a variação individual do parâmetro de decaimento para cada registo do grupo central do arquipélago dos Açores, verificando-se relativa coerência da generalidade dos valores obtidos, conforme ilustrado na Figura 3.9 a traduzir os resultados:

- para valores de $k < 0,04$, 1 registo, o que equivale a 2,17% da amostragem de 46 registos;
- para valores de k entre $0,04 < k < 0,1$, 41 registos, o que equivale a 89,13% da amostragem de 46 registos;
- para valores de $k > 0,2$, 5 registos, o que equivale a 8,70% da amostragem de 46 registos.

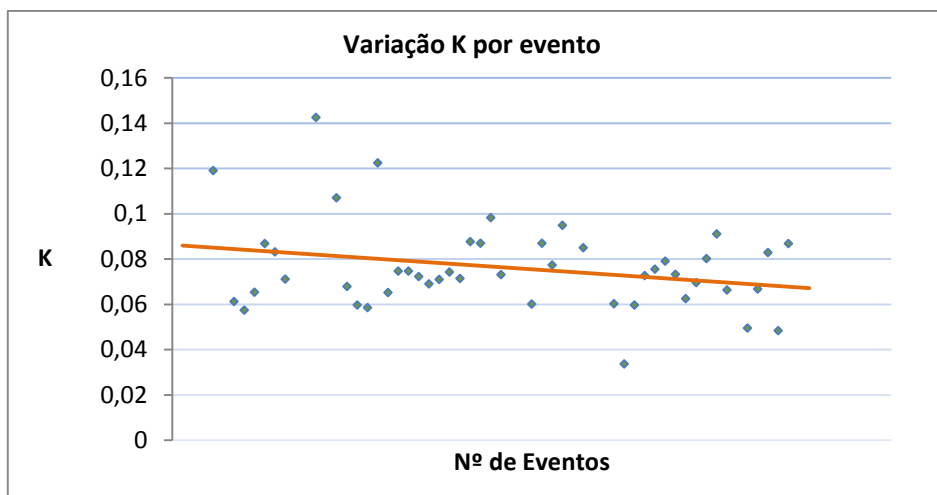


Figura 3.9 – Variação de k para a região do grupo central do arquipélago dos Açores

A hipótese de correlacionar a dispersão dos valores de k com a magnitude e com a distância hipocentral de cada evento não revela padrão de variação, à semelhança das conclusões retiradas em análise equivalente em Portugal continental (Carvalho A. , 2007) e conforme ilustrado na Figura 3.10.

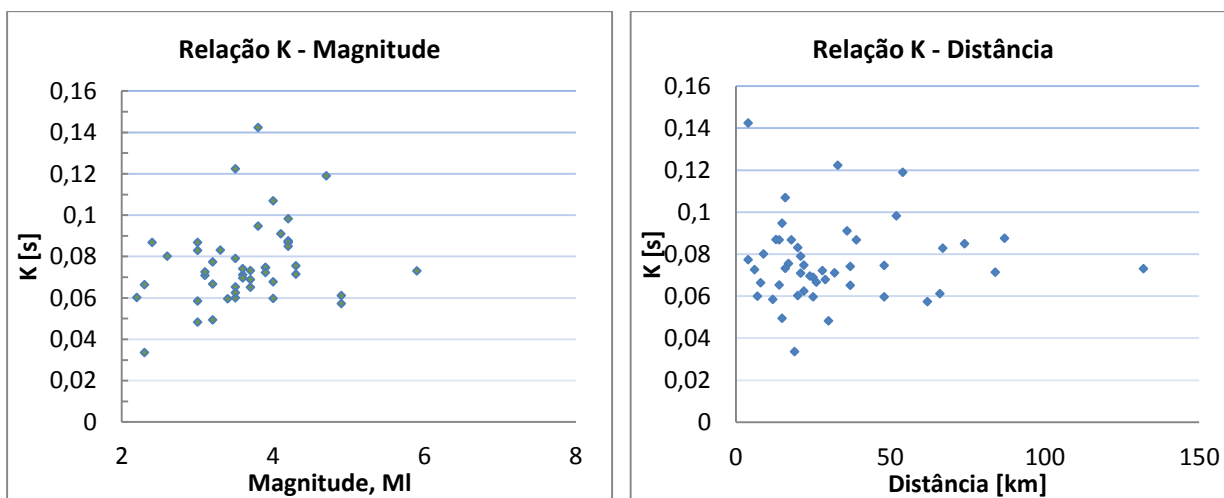


Figura 3.10 – Valores de k em função da magnitude e da distância hipocentral dos registos da região do grupo central do arquipélago dos Açores (respetivamente à esquerda e à direita)

Assim, demonstrada a coerência de valores de eventos e a operacionalidade das estações que os registaram, a determinação do parâmetro de decaimento k , para a região do grupo central do arquipélago dos Açores, toma um valor médio de $k = 0,0750$, permitindo ainda denotar a independência deste valor relativamente à magnitude e à distância hipocentral dos eventos.

3.6. Espectro de Amplitude de Fourier em Deslocamento

A conversão do espectro de amplitude de Fourier em aceleração para deslocamento, para determinação dos parâmetros regionais (frequência-esquina, queda de tensão e momento sísmico), obedece à relação (Mercer, 2006):

$$\ddot{X}(f) = -(2\pi f)^2 \cdot X(f) \quad (3.6)$$

A forma da expressão geral da amplitude do espectro de Fourier em deslocamento, $U(f, M_0, R)$, é composta pelo termo do espectro de deslocamento da fonte, $S(f, M_0)$, pelo termo referente à atenuação geométrica, $G(R)$, ao da atenuação inelástica, $An(f, R)$, ao da atenuação superficial, $P(f)$, e ao termo referente à função de amplificação, $F_z(f)$:

$$U(f, M_0, R) = S(f, M_0) \cdot G(R) \cdot An(f, R) \cdot P(f) \cdot F_z(f) \quad (3.7)$$

Assim, torna-se evidente que a segunda etapa de preparação do processo de determinação dos parâmetros regionais é a desconvolução das influências do meio no espectro de amplitude de Fourier em deslocamentos, para que se obtenha o espectro de deslocamento na fonte, sem as influências de $G(R)$, $An(f, R)$, $P(f)$ e $F_z(f)$.

Novamente, à semelhança da organização para determinação do parâmetro de decaimento espectral, cada registo constitui uma folha de cálculo, com indicação de informação para a identificação do evento e todos os valores necessários à determinação do momento sísmico (métodos empírico, teórico e gráfico), da frequência de esquina (métodos teórico e gráfico) e da queda de tensão (métodos teórico e gráfico), nomeadamente:

- data e hora do evento;
- localização do epicentro (latitude e longitude);
- estação que registou o evento;
- raio (medido do epicentro à estação que registou o evento);
- magnitude do evento;
- fator de qualidade do meio, Q , calibrado para cada região, foi determinado com um valor constante de $Q = 76$ (Vales, 2013);
- o fator η , igualmente calibrado regionalmente, determinado com o valor $\eta = 0,6$ (Vales, 2013);
- velocidade das ondas S, β , que é determinado através do conhecimento da localização da estação e da respetiva profundidade, remetendo para o quadro de velocidades das ondas P (Tabela 3.1), afetadas de uma relação $V_p = 1,75 V_s$ (equação 3.1);
- indicação do valor de decaimento espectral médio do registo, k , calculado;

- densidade, a depender da profundidade e da região, calculada com base na Tabela 3.4, donde se obtém, para a região do grupo central do arquipélago dos Açores (em análise):

Tabela 3.8 - Densidades para a região do grupo central do arquipélago dos Açores, a depender da profundidade

Prof (km)	V(m/s)	Vs(m/s)	Densidade
0	5,5	3,142857143	2,664648453
2,5	6,4	3,657142857	2,767542136
8	7,2	4,114285714	2,850246181
14	8	4,571428571	2,926319525

- parâmetro de atenuação geométrica, considerando a espessura crustal, $D = 12\text{Km}$ (Dias et al., 2007)

Após a obtenção do espectro de amplitude de Fourier em deslocamento na fonte, é possível determinar os parâmetros de caracterização da fonte sísmica, nomeadamente o momento sísmico, a frequência-esquina e a queda de tensão através de técnicas gráficas ou analíticas ou de ajuste.

3.6.1. Método Empírico (M_0)

Após a obtenção do espectro na fonte, a primeira abordagem para determinação do momento sísmico correlaciona o momento sísmico com a magnitude do momento através de uma relação empírica, e desempenha uma função indicativa da grandeza de valor de M_0 :

$$\log M_0 = 1.5 M + 16.05 \quad (3.12)$$

$$M_0 = 10^{1.5 M + 16.05} \quad (3.12a)$$

Por uma questão de acerto de unidades, o M_0 deve ser afetado de um fator minorativo com valor de 10^{-7} .

3.6.2. Método Gráfico (f_c e $\Delta\sigma$)

A técnica gráfica permite o cálculo simultâneo do momento sísmico, M_0 , e da frequência-esquina, f_c , através da envolvente das assíntotas de baixa e de alta frequência do espectro de amplitude de Fourier em deslocamento da fonte sísmica.

Sendo Ω_0 a amplitude do espectro nas baixas frequências (assíntota horizontal), o momento sísmico, M_0 , pode ser determinado a partir de uma relação com a constante C :

$$M_0 = \Omega_0 / C \quad (3.13)$$

onde:

$$C = \frac{\Re.V.C_F}{4\pi\rho\beta^3} \quad (3.14)$$

A frequência-esquina, f_c , é obtida pela interseção das assíntotas de baixa e de alta frequência, em concordância com a teoria de ómega quadrado enunciada anteriormente, ou seja, com a assíntota horizontal a constituir o patamar das baixas frequência e a assíntota de declive com valor -2 a constituir a reta envolvente do decaimento das altas frequências.

Consequentemente, o parâmetro de queda de tensão, $\Delta\sigma$, é obtido pela expressão:

$$f_c = 4.9 \cdot 10^6 \cdot \beta \cdot \sqrt[3]{\Delta\sigma/M_0} \quad (3.15)$$

A Figura 3.11 exemplifica a determinação gráfica dos parâmetros de caracterização da fonte sísmica, designadamente o M_0 e a f_c , para o evento de 04 de março de 2000, com o número de registo 4a. O Anexo D (D.2 Espectros de Amplitude de Fourier em Deslocamento pelo Método Gráfico), é constituído pela análise gráfica dos 46 registos validados para o grupo central dos Açores, para determinação dos parâmetros da fonte sísmica.

Dos 46 registos, existem anulações totais do evento (em ambas as direções) ou parciais (apenas uma das direções ortogonais tem critério para validação), associadas à incompatibilidade entre a forma do gráfico apresentada e a forma que o gráfico deveria de tomar para a aplicação da teoria.

Também para a determinação dos parâmetros da fonte se anulou o registo 24 referente ao sismo de 09 de Julho de 1998 dos Açores, por apresentar magnitude acima de 5,5, sendo processado individualmente no Capítulo 4.

Os registos invalidados são representados por células vazias e coloridas na Tabela 3.9

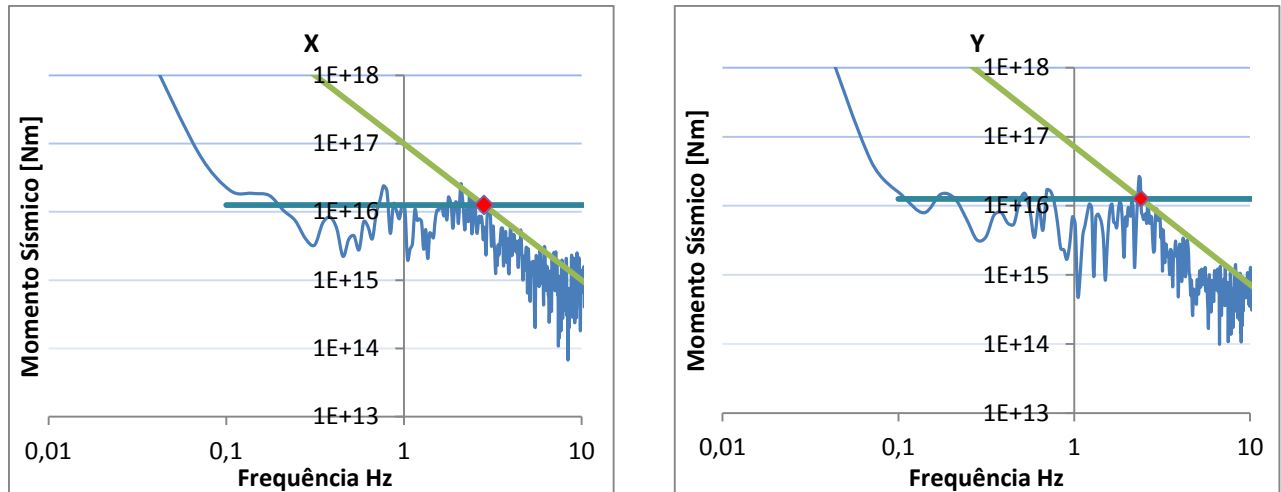


Figura 3.11 – Exemplo de espectro de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 04 de Março de 2000, em ambas as componentes horizontais X e Y, com origem no registo da estação PVI, a constituir o evento 4a.

Não obstante, os valores obtidos têm a desvantagem da subjetividade no traçado das envolventes, incorrendo no risco descrito por Rovelli *et al.*, 1991, que o método gráfico, utilizado para a determinação simultânea do momento sísmico e da frequência de esquina, não permite o controlo das incertezas na determinação de ambos os parâmetros dada a sua interdependência analítica.

No sentido de colmatar essas incertezas, Cranswick *et al.*, 1985, e Andrews, 1986, defendem a determinação independente da frequência de esquina através do método analítico, para que seja eliminado o processo de análise visual que origina incertezas e dispersões relacionadas com a presença frequente de picos de ressonância nos espectros, resultantes de causas exteriores à fonte sísmica (efeitos locais, por exemplo) mas que dificultam/impossibilitam a observação do início do decaimento espectral no espectro da fonte.

Neste estudo não foi realizada uma abordagem analítica, todavia, como breve referência, introduz-se a expressão da frequência-esquina de Andrews:

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} V^2(f).df}{\int_{-\infty}^{+\infty} D^2(f).df}} \quad (3.16)$$

sendo $V(f)$ e $D(f)$ os espectros de amplitude de velocidade e deslocamento, respectivamente, corrigidos dos efeitos de atenuação geométrica, atenuação inelástica e atenuação crustal.

3.6.3. Método Teórico ou de Ajuste (M_0 , f_c e $\Delta\sigma$)

No sentido de otimizar e validar resultados, esta dissertação engloba a determinação dos parâmetros da fonte através de uma terceira e alternativa técnica que ajusta o espectro do modelo ω^2 ao espectro de deslocamento na fonte (média quadrática das componentes horizontais do espectro na fonte, corrigidos dos efeitos de atenuação geométrica, inelástica e atenuação crustal).

$$S(f, M_0) = C \cdot M_0 \cdot \frac{1}{1 + (f/f_c)^2} \quad (3.17)$$

A técnica pressupõe a utilização da melhor relação entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para determinar a frequência-esquina que se adapta ao espectro e que se relaciona através da expressão (2.10 a):

$$f_c = 0.49 \cdot \beta \cdot \sqrt[3]{\Delta\sigma/M_0} \quad (3.18)$$

A Figura 3.12 ilustra um exemplo da técnica aplicada ao espectro de amplitude de Fourier em deslocamentos do evento. No Anexo D (D.2 Espectros de Amplitude de Fourier em Deslocamento pelo Método de Ajuste) constam todos os ajustes da totalidade de eventos.

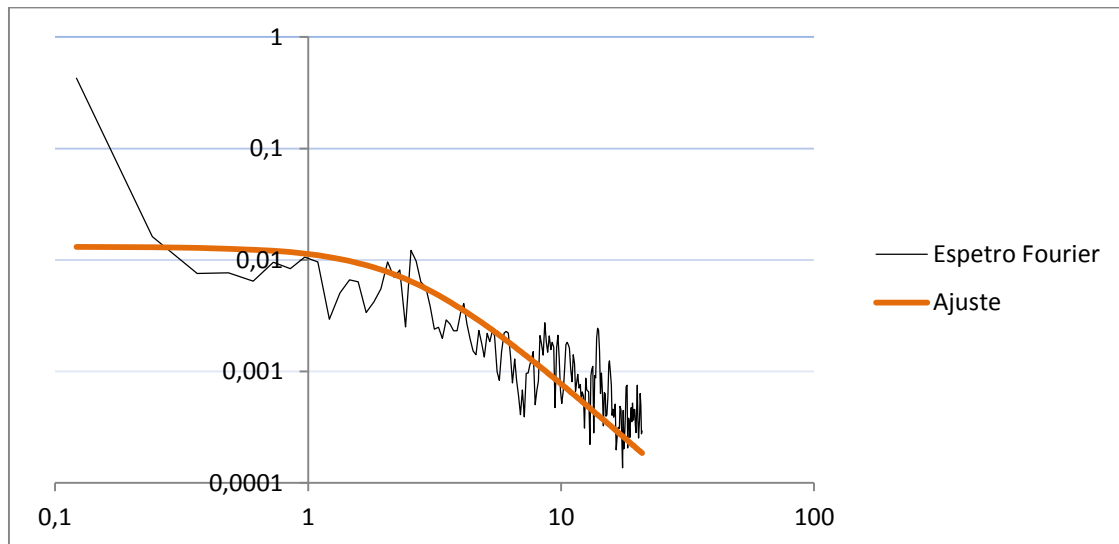


Figura 3.12 - Espectro de amplitude de Fourier em deslocamento da fonte sísmica para o evento 13 com respetivo ajuste do espectro teórico do modelo ómega quadrado

A Tabela 3.9 dispõe os valores obtidos através de cada uma das técnicas propostas, para a totalidade dos eventos analisados.

Tabela 3.9 - Valores da frequência-esquina e da queda de tensão obtidos pelos diversos métodos

Evento	Est	Mag	Beta	R	F-esq grafica			Stress drop grafica			F-esq teórica	Stress drop teórica	F-esq media	Stressdrop médio
					X	Y	Média	X	Y	Média				
#04 2000.03.04.1842 a	PVI	4,70	3,66	54,00	2,82	2,40	2,61	489,73	301,57	395,65	2,50	434,44	2,55	415,04
#05 2000.08.01.0435 a	VEL	4,90	3,66	66,00	2,11	1,55	1,83	489,73	195,36	342,54	2,00	417,06	1,92	379,80
#05 2000.08.01.0435 b	SRO	4,90	3,66	62,00	2,11	1,55	1,83	489,73	195,36	342,54	1,70	256,13	1,77	299,33
#06 2000.09.03.1924	PVI	3,50	3,14	14,00	2,37	2,37	2,37	72,68	72,27	72,47	1,70	53,81	2,03	63,14
#07 2000.11.10.2108	TOP	2,40	3,66	18,00	5,42	6,43	5,92	303,99	508,41	406,20	5,00	347,55	5,46	376,88
#08 2000.12.28.0522	TOP	3,30	3,66	20,00	4,35	4,54	4,45	429,63	488,58	459,10	4,50	475,06	4,47	467,08
#09 2001.01.29.2321	VEL	3,60	3,66	32,00							2,70	547,26	2,70	547,26
#12 2001.06.02.1213 a	SRO	3,80	4,11	4,00	1,97	1,90	1,93	27,91	24,97	26,44	2,00	29,29	1,97	27,86
#13 2001.07.06.0827 a	TOP	4,00	3,66	16,00	3,15	2,89	3,02	707,34	545,26	626,30	2,80	495,91	2,91	561,10
#13 2001.07.06.0827 b	VEL	4,00	3,66	29,00	4,69	7,30	5,99	200,88	758,29	479,59	1,60	7,99	3,80	243,79
#13 2001.07.06.0827 c	SCR	4,00	3,66	48,00	3,57	5,36	4,46	197,30	668,38	432,84	2,50	67,88	3,48	250,36
#14 2001.10.03.1853	SCR	3,00	3,14	12,00	4,35	4,32	4,33	112,45	110,35	111,40	3,20	44,86	3,77	78,13
#15 2001.10.12.0236	VEL	3,50	3,66	33,00										
#16 2001.12.23.1924	PVI	3,70	3,14	37,00	2,52	1,35	1,93	217,80	33,87	125,83	2,00	109,52	1,97	117,68
#17 2002.02.13.0831 a	VEL	3,90	3,14	48,00	2,84		2,84	250,55		250,55	2,50	171,13	2,67	210,84
#17 2002.02.13.0831 b	SCR	3,90	3,14	22,00	2,84		2,84	250,55		250,55	2,70	215,57	2,77	233,06
#18 2002.02.13.0842	SCR	3,90	3,14	28,00	2,23		2,23	121,03		121,03	2,00	87,62	2,11	104,32
#19 2002.02.13.0904	SCR	3,70	3,14	25,00	1,63	1,28	1,45	23,50	11,59	17,54	1,50	18,48	1,48	18,01
#20 2002.02.13.1130	SCR	3,10	3,14	21,00	4,84		4,84	217,54		217,54	4,00	122,66	4,42	170,10
#21 2002.03.11.0144	PVI	3,60	3,14	37,00	2,04	2,05	2,05	140,46	140,91	140,69	2,00	131,43	2,02	136,06
#22 2002.06.10.1433	PVI	4,30	3,14	84,00	2,23	2,23	2,23	453,97	453,87	453,92	2,10	380,35	2,16	417,13
#23 2002.11.30.2253 a	TOP	4,20	3,14	87,00		1,19	1,19		138,41	138,41	1,80	479,05	1,49	308,73
#23 2002.11.30.2253 b	SCR	4,20	3,14	39,00	1,35		1,35	134,73		134,73	1,00	54,76	1,18	94,75
#23 2002.11.30.2253 c	VEL	4,20	3,14	39,00	1,89	1,03	1,46	369,49	59,51	214,50	1,50	184,82	1,48	199,66
#26 1998.07.18.0855	HSC	3,50	4,57	7,00	3,88		3,88	31,27	191,93	111,60	4,20	39,55	4,04	75,58
#27 1998.07.18.1106	HSC	4,20	3,14	13,00	1,77	2,45	2,11	22,63	60,31	41,47	3,00	110,89	2,55	76,18
#28 1998.07.20.0614	HSC	3,20	4,57	4,00							2,20	33,16	2,20	33,16
#29 1998.08.31.0845	HHT	3,80	3,14	15,00							2,00	15,33	2,00	15,33
#31 2002.11.30.2253	SMJ	4,20	3,14	75,00	1,01	1,01	1,01	254,95	255,01	254,98	0,60	53,23	0,81	154,11
#34 2004.01.01.1826	SCR	2,20	4,57	20,00	1,59	1,22	1,41	36,09	16,35	26,22	1,00	13,35	1,20	19,78
#35 2004.01.17.2028	SCR	2,30	4,57	19,00	5,02	6,51	5,77	90,20	196,24	143,22	4,50	64,86	5,13	104,04
#36 2004.01.18.0355	SCR	3,40	3,66	25,00	2,26	2,69	2,48	30,05	50,92	40,48	2,00	20,85	2,24	30,67
#37 2004.01.27.0210	SCR	3,10	3,14	6,00	1,95	1,76	1,85	6,07	4,48	5,28	2,00	6,57	1,93	5,92
#38 2004.01.28.1547	SCR	4,30	3,66	17,00	1,55	1,17	1,36	51,35	22,21	36,78	1,50	46,92	1,43	41,85
#39 2004.01.28.1548	SCR	3,50	3,66	21,00	2,16	2,15	2,15	70,03	68,77	69,40	1,90	47,68	2,03	58,54
#40 2004.01.28.2023	SCR	3,70	3,66	16,00	1,13		1,13	9,89		9,89	1,20	12,01	1,16	10,95
#41 2004.01.31.1958	SCR	3,50	3,66	22,00	1,91	2,06	1,99	36,45	45,90	41,17	1,10	6,94	1,54	24,05
#42 2004.02.03.1933	SCR	3,60	3,66	24,00	1,08	0,93	1,00	7,73	4,84	6,29	0,70	2,09	0,85	4,19
#43 2004.02.07.1931	SCR	2,60	3,14	9,00							2,50	4,28	2,50	4,28
#44 2004.04.25.0930	SCR	4,10	3,14	36,00	0,89	0,82	0,86	29,32	22,88	26,10	0,60	8,87	0,73	17,49
#45 2005.01.01.2004	SCR	2,30	3,14	8,00	1,14	1,86	1,50	1,03	4,43	2,73	1,50	2,31	1,50	2,52

#47 2005.05.05.2015 a	VEL	3,20	3,66	15,00	5,18	6,11	5,64	168,83	277,40	223,12	2,50	19,01	4,07	121,06
#47 2005.05.05.2015 b	SMJ	3,20	3,66	26,00	3,76		3,76	65,24		65,24	3,40	47,81	3,58	56,53
#48 2005.12.13.2019	VEL	3,00	3,14	67,00	4,70		4,70	426,71		426,71	2,00	32,86	3,35	229,78
#49 2006.10.05.0225 a	VEL	3,00	3,66	30,00	4,21	5,55	4,88	232,95	535,36	384,16	3,00	84,45	3,94	234,31
#49 2006.10.05.0225 b	HPT	3,00	3,66	14,00							0,80	2,67	0,80	2,67
Valor médio							2,77			191,88	2,17	130,04483	2,4059	156,88862
Desvio padrão							1,546			170,18	1,06884	160,60952	1,2144	155,03225

Os parâmetros frequência-esquina (f_c) e queda de tensão ou stress-drop (σ) determinados pelos métodos gráfico e de ajuste, apresentam os valores médios:

- Para o método gráfico
 - $f_c = 2,77\text{Hz}$
 - $\sigma = 191,88\text{bar}$
- Para o método de ajuste
 - $f_c = 2,17\text{Hz}$
 - $\sigma = 130,04\text{bar}$

Calculou-se o valor médio dos parâmetros de caracterização dos movimentos intensos do solo para a região do grupo central do arquipélago dos Açores, estimado em:

- $f_c = 2,41\text{Hz}$
- $\sigma = 156,51\text{bar}$

A destacar a independência dos valores da frequência-esquina e da queda de tensão médias em função da magnitude do evento, conforme é demonstrado graficamente na Figura 3.13.

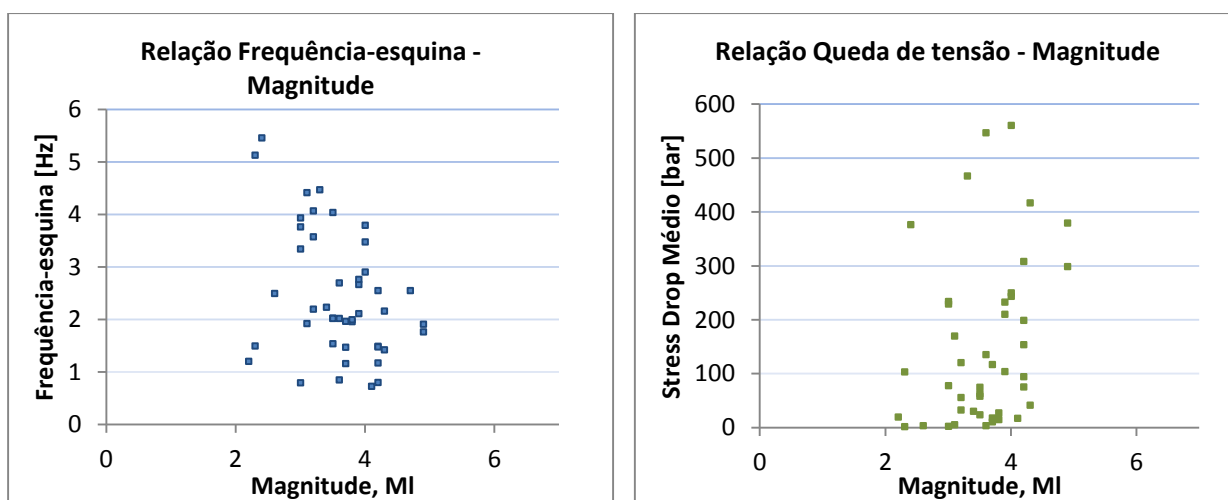


Figura 3.13 - Valores médios de f_c e σ em função da magnitude dos registos da região do grupo central do arquipélago dos Açores

Da comparação dos resultados obtidos pelos diferentes métodos, destaca-se, para a determinação da frequência-esquina, resultados tendencialmente sobrestimados pelo método teórico comparativamente com o método gráfico – (entre os 46 registos, 36 apresentavam valor de frequência-esquina determinado pelo método teórico maior que o valor determinado pelo método gráfico). Para a queda de tensão, através da metodologia gráfica são tendencialmente obtidos valores mais elevados pelo método gráfico (30 dos 46 registos apresentam valores de queda de tensão mais altos quando determinados graficamente).

A Figura 3.14 ilustra graficamente a comparação de resultados de f_c e σ obtidos pelos métodos gráfico e teórico, respetivamente e a Figura 3.15 mostra a ordem de grandeza de diferença dos valores obtidos, comparando os valores obtidos pelo método gráfico com os valores obtidos pelo método teórico. Como se pode constatar, a acentuada diferença de valores obtidos traduz a subjetividade do método.

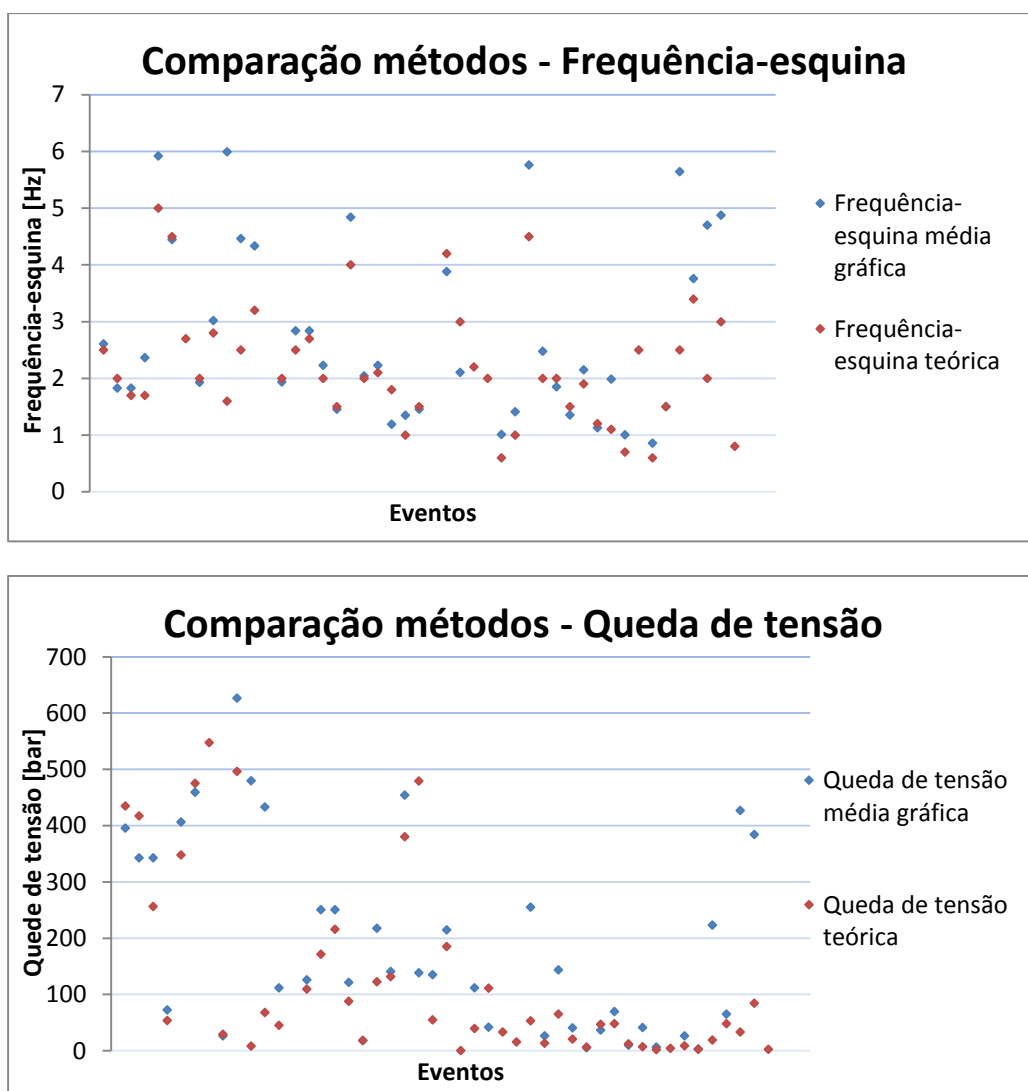


Figura 3.14 - Comparação dos resultados de frequência-esquina e queda de tensão obtidos pelos métodos gráfico e teórico, respetivamente

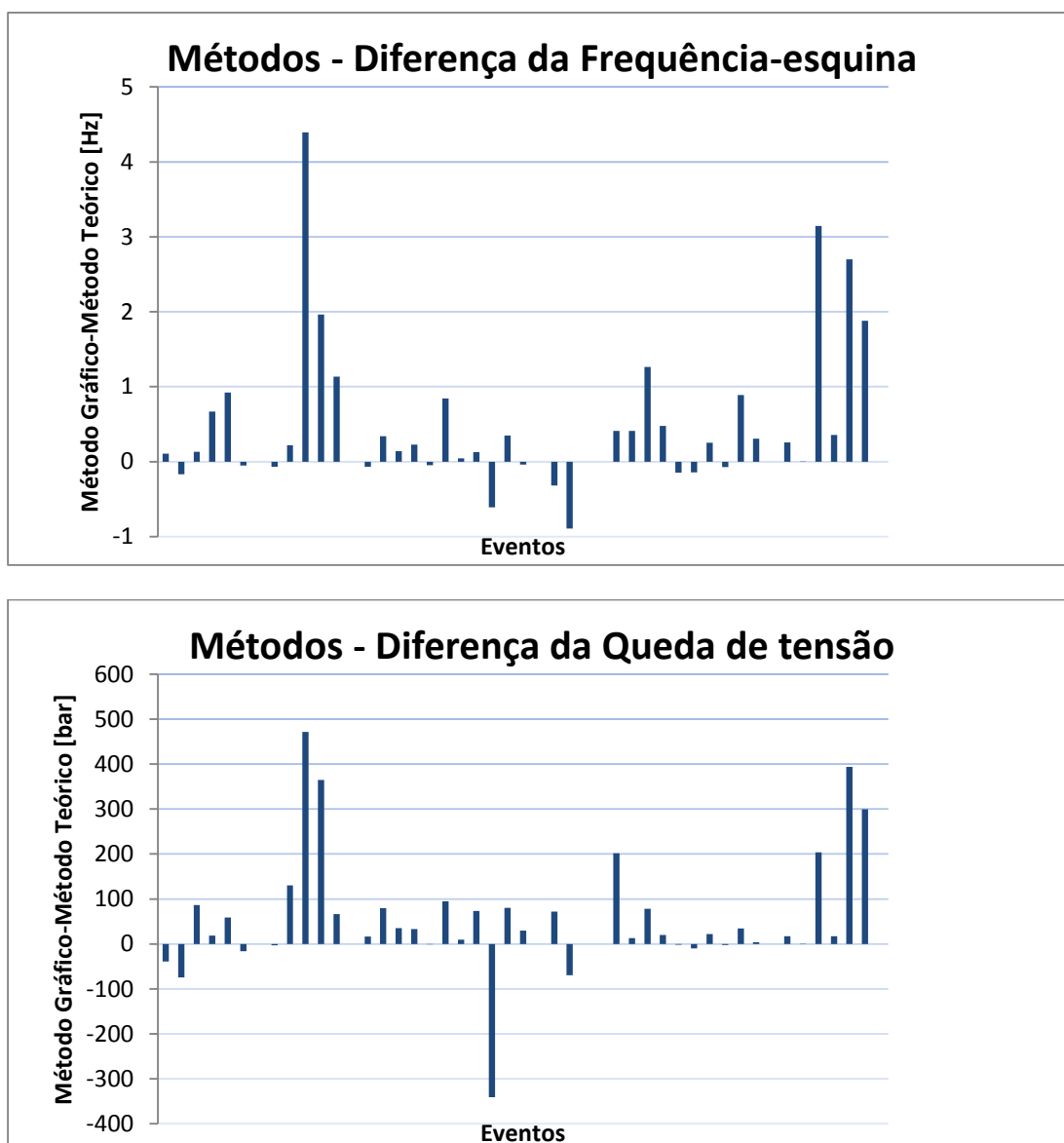


Figura 3.15 - Grandeza dos valores de diferença entre a determinação dos parâmetros da fonte através dos métodos gráfico e teórico

4. Simulação do Sismo de 09 de Julho de 1998 dos Açores

4.1. Enquadramento Geral

Nos capítulos anteriores são evidenciadas, simultaneamente, a necessidade de conhecer os movimentos intensos do solo, principalmente em regiões de considerável sismicidade e a respetiva complexidade de determinação dos parâmetros que os caracterizam. Nesse sentido, é adotada a metodologia estocástica aplicada à teoria ómega quadrado proposta por Brune, enunciada teoricamente¹⁰ no Capítulo 2.

No Capítulo 3 foi demonstrada a aplicabilidade do modelo pontual para sismos de magnitudes baixas a moderadas ($M_L < 5,5$), registados na rede acelerográfica nacional, em solos duros e piso térreo, no intervalo de tempo de 1969 a 2006, e foi quantificado e validado o conjunto dos parâmetros que descrevem os processos físicos.

Todavia, a aplicabilidade do modelo pontual de Brune é limitada a eventos de magnitudes até 5,5 e o sismo de 09 de Julho de 1998 dos Açores, igualmente registado pela rede acelerográfica no período de tempo considerado, registou uma magnitude de 5,9, pelo que têm de se considerar alternativas para o tratamento da informação para determinação dos parâmetros na fonte.

Neste capítulo proceder-se-á à apresentação de um caso prático, aplicado ao sismo de 09 de Julho de 1998 dos Açores, de magnitude $M_L = 5,9$, fora dos critérios de tratamento do modelo pontual, e, por isso, tratado como falha-finita. Basicamente, a metodologia estocástica modela um sismo de magnitude elevada através da consideração de um plano de falha dividido em elementos retangulares com dimensões que permitam que cada um seja passível de ser tratado como rotura pontual e homogénea, tendo em consideração os parâmetros regionais que descrevem os processos físicos na fonte e no meio atravessado pelas ondas sísmicas. As contribuições de cada subevento são sintetizadas no local recetor, mediante um atraso temporal atribuído a cada subevento, que resulta do tempo necessário para que a rotura na falha atinja o elemento correspondente, desde o hipocentro, e do tempo de propagação das ondas sísmicas desde o elemento até ao local.

¹⁰ A teoria ómega quadrado descreve a forma genérica dos espectros de amplitude de Fourier em deslocamentos sendo constituídos por uma parte plana, correspondente à amplitude espectral nas baixas frequências e diretamente proporcional ao momento sísmico escalar, e uma parte que decai de forma inversamente proporcional ao quadrado da frequência. Assim, a forma do espectro pode ser delineada a partir de uma assíntota plana que define a amplitude nas baixas frequências e uma assíntota associada ao decaimento da frequência.

Neste capítulo será modelada a falha para a simulação do sismo de 09 de julho de 1998 dos Açores.

De referir que a modelação não é objetivo último desta tese. No entanto, e uma vez que os resultados dos parâmetros determinados neste trabalho servirão de *input* para todas as modelações futuras dos movimentos sísmicos para o arquipélago dos Açores, era oportuno apresentar uma aplicação, embora esta não deva ser considerada produto final.

4.2. Caraterização Tectónica

A avaliação de danos sísmicos através da simulação estocástica dos movimentos do solo aplicada às ilhas dos Açores, da autoria de Gaetano Zonno, em 2009 (Zonno, et al., 2009), resume os aspetos inerentes à atividade sísmica de 1998 nos Açores necessários para a caraterização do sismo, nomeadamente da tectónica.

A localização do arquipélago e respetivo enquadramento geotectónico, na junção das placas Norte-Americana a oeste, Euro-Asiática a norte e Africana a sul, assim como no sistema de falhas, é propício à ocorrência de atividade sísmica da região, frequentemente sob a forma de microssismos, mas periodicamente sob a forma de eventos de magnitudes moderadas a fortes.

As ilhas do Grupo Central do Arquipélago dos Açores, nomeadamente a ilha do Faial, do Pico e de São Jorge, foram assoladas por um sismo de magnitude $M_L = 5,9$ ($M_V = 6,2$) da escala de Richter, onde se registaram danos de ordem VIII na escala de Mercalli Modificada, às 05:19 do dia 09 de Julho de 1998.

Borges et al. (2007) sugeriu a localização epicentral a nordeste da ilha do Faial, onde a sismicidade ocorre num alinhamento tendencialmente orientado a NNW-SSE, tendo por base informações de Senos et al. (1998) que sugere que o plano de falha apresenta rotura com um azimute de 156° , declive de 85° e um movimento de deslizamento lateral esquerdo.

Posteriormente, após a compilação de diversas leituras de fase oriundas de diversas redes acelerográficas, surgiram várias hipóteses para a localização epicentral e de profundidade do foco, uma vez que são utilizados modelos de velocidade ou procedimentos de localização inexatos para esta região.

A Figura 4.1 mostra um mapa com a tectónica simplificada da região central do arquipélago dos Açores, as localizações epicentrais da crise de 1998, e os dois modelos de falha apresentados em Zonno et al (2009).

As 2 localizações epicentrais do sismo principal baseiam-se em i) um modelo de velocidade 1D que sugere um epicentro a cerca de 8km nordeste da costa da ilha do Faial

(EPI 1 – Latitude 38.634°N; Longitude 28.523°W) e o hipocentro a uma profundidade entre 2 e 5km (Matias et al., 2007) e ii) uma análise tomográfica sísmica, proposta pela SIVISA, onde se evidencia uma intrusão de plutónio na costa, entre as ilhas do Faial e do Pico, a constituir o foco de sismicidade que originou o sismo de 1998 do Faial. O sismo teria ocorrido na lateral oeste da intrusão, com as coordenadas EPI 2 – Latitude 38.640°N; Longitude 28.590°W e profundidade do hipocentro de 4 a 6km.

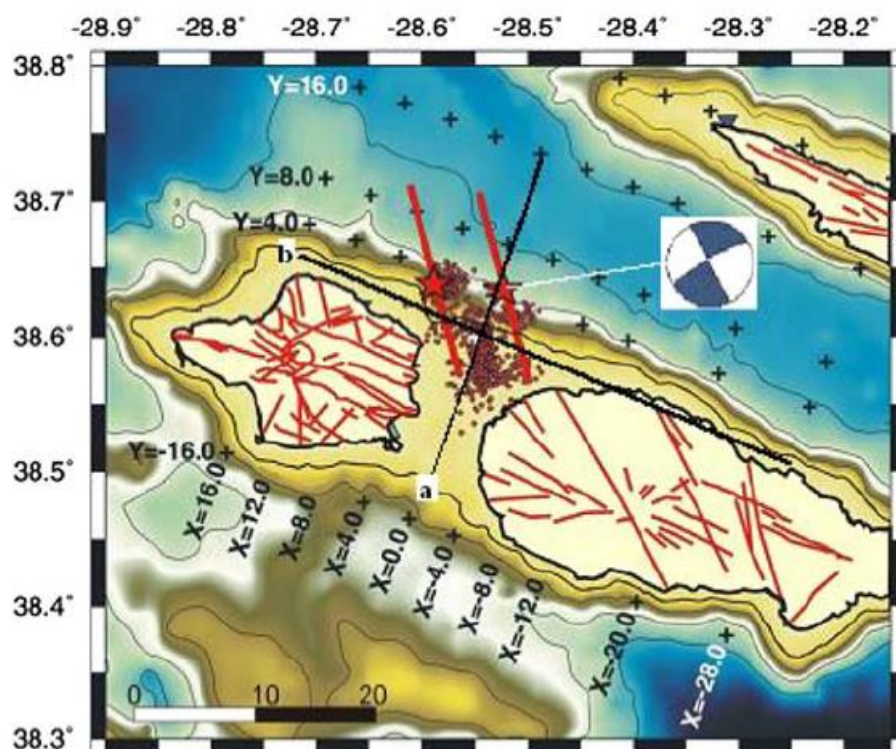


Figura 4.1 - Dispersão das localizações epicentrais propostas pelas variadas hipóteses, conjuntamente com o plano de falha (adaptado de Senos et al. 2008 in Zonno et al. 2009)

As linhas vermelhas representam falhas, os círculos vermelhos representam o epicentro da sequência sísmica despoletada pelo sismo de 1998 do Faial, as estrelas vermelhas representam o epicentro determinado a partir da solução dos planos de falha EPI1 e EPI2, X e Y representam a localização dos perfis para a tomografia 3D.

A Tabela 4.1 sumariza os dados epicentrais recolhidos pelas estações da rede acelerográfica nacional que registaram o evento.

Tabela 4.1 - Registos da rede acelerográfica nacional para o sismo de 1998 nos Açores (adaptado de Zonno et al. 2009)

Estação	Lat.	Long.	PGA (mg)	EPI 1* (km)	EPI 2* (km)
Horta (Faial)	38.529	-28.63	~327-400	14.88	12.77
GZC (Terceira)	38.657	-27.22	~12-14	113.25	119.05

SEB (Terceira)	38.668	-27-09	~9-23	124.68	130.47
PVI (Terceira)	38.732	-27.06	~5-10	127.52	133.25
MOS (S. Miguel)	37.890	-25.82	~3-5	248.99	254.68
* EPI 1 - Lat. 38.634; Long.-28.523 * EPI 2 - Lat. 38.640; Long. -28.590					

4.3. Quantificação dos Parâmetros de Caraterização dos Movimentos Intensos do Solo para o Sismo de 09 de Julho de 1998

A quantificação dos parâmetros utilizados para a caraterização dos movimentos intensos do solo são determinados através do procedimento utilizado no capítulo 3, assim, através do espectro de amplitude de Fourier em aceleração é determinado o parâmetro de decaimento espectral e através do espectro de amplitude de Fourier em deslocamentos são determinados o momento sísmico, a frequência-esquina e a queda de tensão do evento (pelos métodos complementares gráfico e teórico ou de ajuste).

4.3.1. Processamento da Informação

A informação do evento, registada pela rede acelerográfica nacional, é constituída pela contribuição de 5 estações com acelerómetros triaxiais, localizadas na ilha do Faial (1 – HRT), na Terceira (3 – GZC, SEB, PVI) e na ilha de S.Miguel (1 – MOS). Destes registos, para a determinação dos parâmetros de caraterização dos movimentos intensos do solo, apenas se consideram os que são implementados em solos duros e em pisos térreos, validando apenas a contribuição das estações PVI e MOS.

Os acelerogramas de PVI e MOS são submetidos a tratamentos de sinal no software LNEC-SPA, onde se geram os espectros de amplitude de Fourier em aceleração dos registos, considerando apenas a contribuição das ondas S¹¹.

A Figura 4.2 ilustra os espectros de amplitude de Fourier das ondas S, gerados pelo software de processamento de sinal LNEC-SPA, do evento de 09 de Julho de 1998, às 05:19, nas estações PVI e MOS, respetivamente, nas direções ortogonais X e Y.

¹¹ À semelhança do que acontecia no capítulo 3, com o tratamento dos restantes registos e pelos mesmos motivos enunciados, dos acelerogramas apenas se considera a contribuição das ondas S, obtida pela relação entre a velocidade das ondas P e S de 1,75.

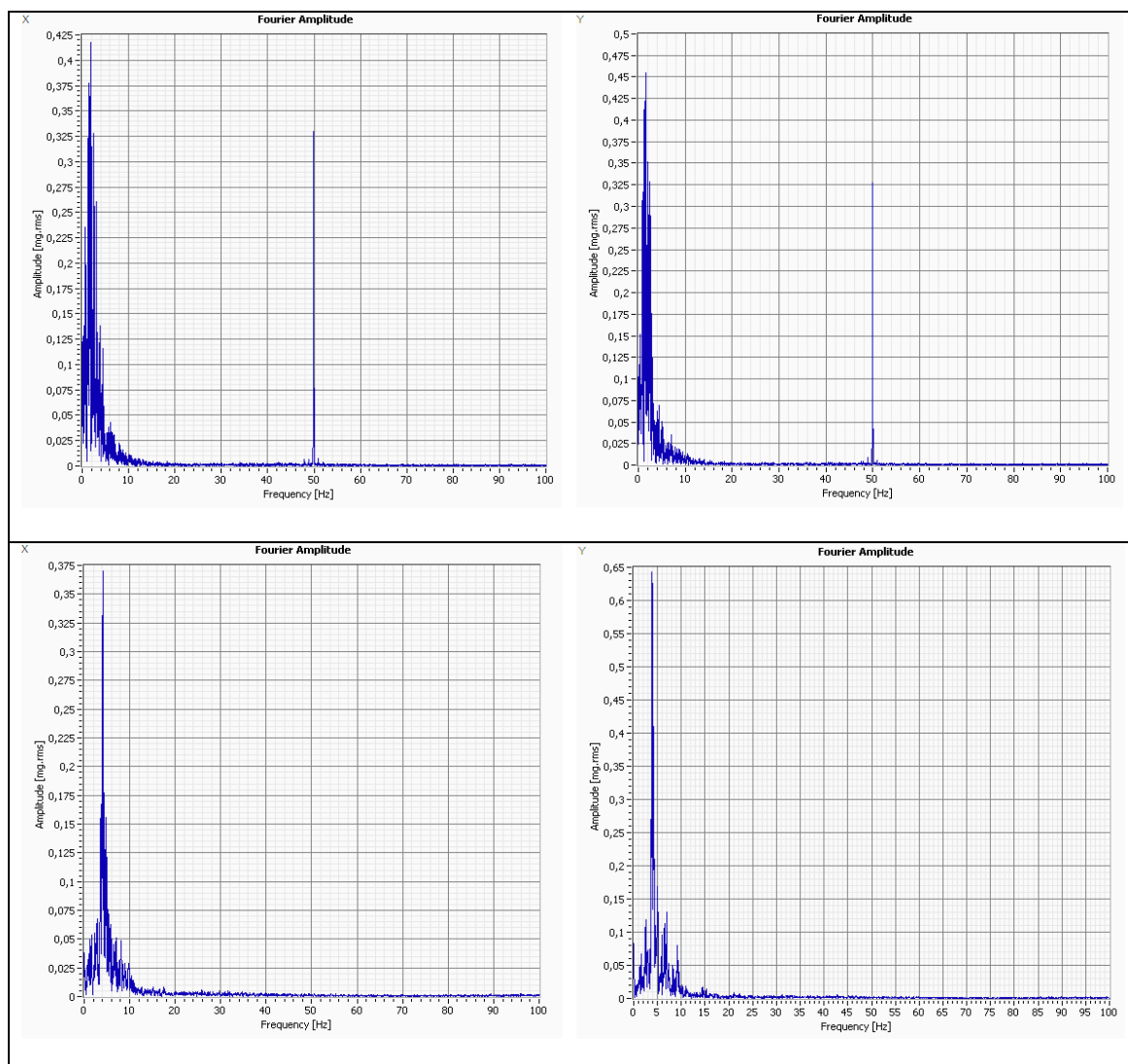


Figura 4.2 - Espectros de amplitude de Fourier para os registos das estações PVI (em cima) e MOS (em baixo) nas direções X e Y, respetivamente (gerados pelo LNEC-SPA)

4.3.2. Parâmetro de Decaimento, k

A partir do tratamento da informação no Lneec-Spa, os respetivos espectros lineares de amplitude de Fourier em amplitude, são transpostos para o Excel, onde são novamente gerados, mas em escala logarítmica e sem a influência dos parâmetros do meio, ou seja, é gerado o espectro logarítmico de amplitude de Fourier em aceleração na fonte, para as estações PVI e MOS, nas direções ortogonais do plano X-Y (Figura 4.3).

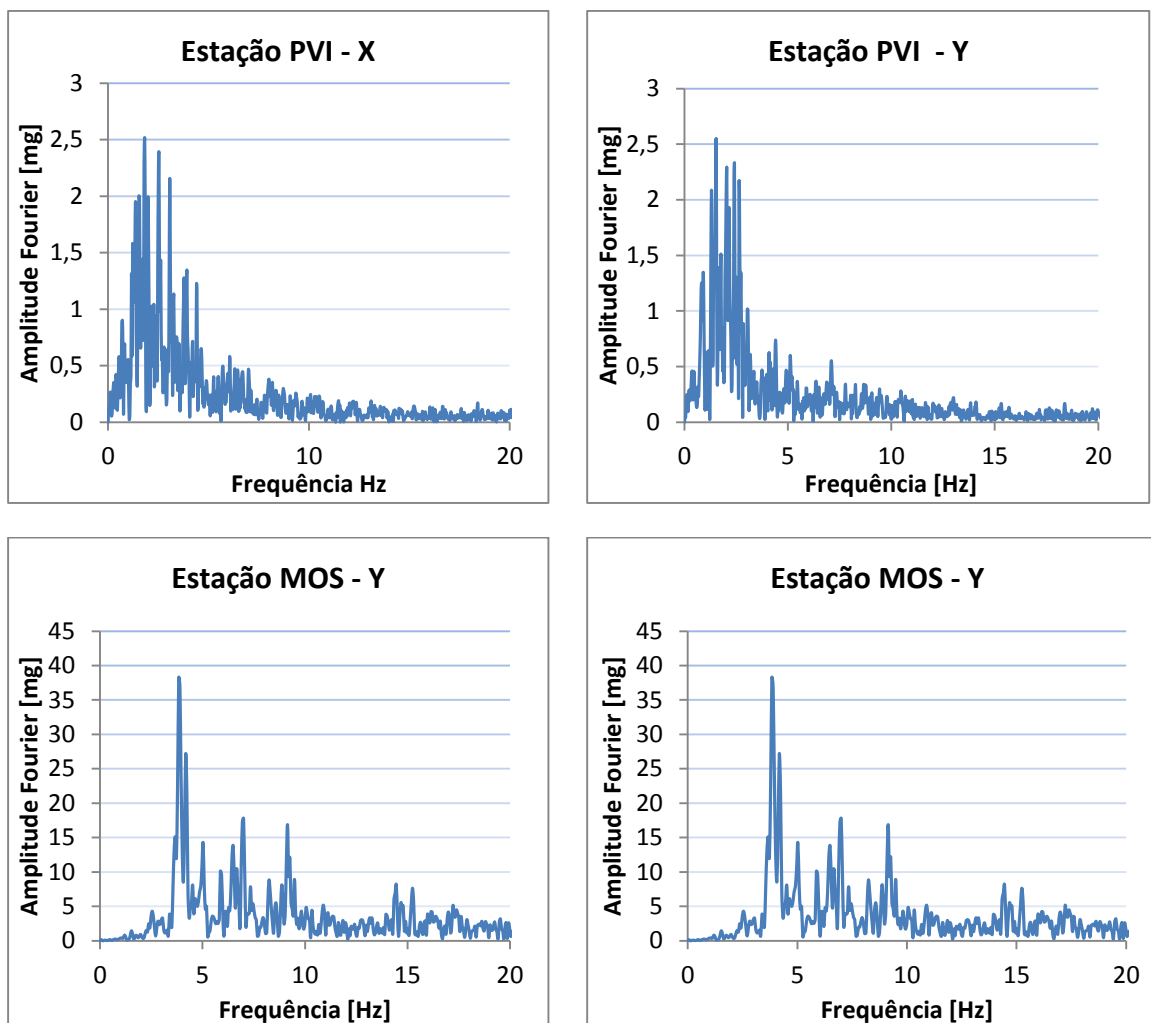


Figura 4.3 - Espectros logarítmicos de amplitude de Fourier, em aceleração, na fonte, do sismo de 09 de Julho de 1998, pelas estações PVI (em cima) e MOS (em baixo), nas direções ortogonais X e Y

Na aplicação da teoria de Brune para obtenção do parâmetro de decaimento, ilustrada na Figura 4.4, são definidas as retas de ajuste do espectro de cada registo, sendo a fórmula da reta dada pela expressão $y = km + k_0$.

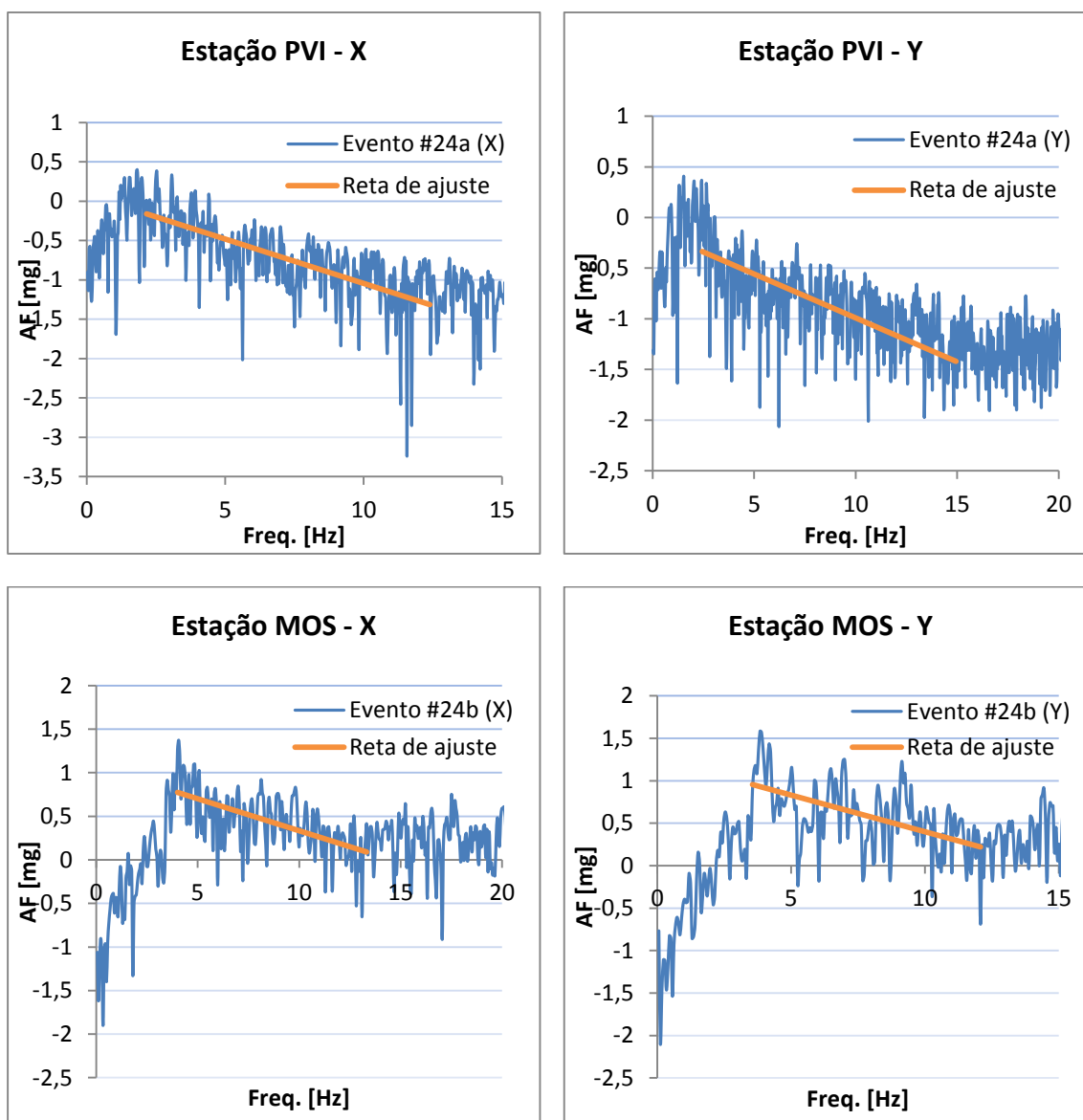


Figura 4.4 - Determinação do parâmetro de decaimento espectral, k , através da metodologia de Brune para o evento de 09 de Julho de 1998, pelas estações PVI (em cima) e MOS (em baixo), nas direções ortogonais X e Y, com indicação da reta de ajuste utilizada para determinar k

O parâmetro k , que traduz o decaimento, obtido através do declive da reta de ajuste do decaimento das altas frequências do espectro de amplitude de Fourier em aceleração, para a escala linear e logarítmica, do evento de 09 de Julho de 1998, foi determinado com os valores presentes na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Parâmetro de decaimento espectral estimado para o sismo de 09 de Julho de 1998 dos Açores

# Evento	Data	Hora	Código da estação	K_x	K_y	K_média
24a	1998-07-09	05:19:07	PVI	0,082602	0,063546	0,073074
24b		05:19:07	MOS	0,053797	0,063179	0,058488
				0,0682	0,063362	0,065781

Comparativamente, o valor médio estimado do parâmetro de decaimento para o sismo real de 09 de julho de 1998, $k = 0,065$, é ligeiramente menor, mas coerente com o valor médio do parâmetro de decaimento estimado para a região do grupo central do arquipélago dos Açores ($k = 0,075$).

4.3.3. Parâmetros da Fonte Sísmica

A partir do tratamento da informação no Lnec-Spa, os respetivos espectros lineares de amplitude de Fourier em aceleração, são transpostos para o Excel, onde são convertidos em espectros de amplitude de Fourier em deslocamentos na fonte (isentos das influências do meio e de propagação).

Relativamente à questão do modelo da fonte a utilizar, devido à magnitude ser considerada fora dos limites de aplicabilidade do modelo pontual, na análise do sismo de 12 de Fevereiro de 2007, de magnitude 5,9, Carvalho, A. (2007), verificou um padrão de semelhança dos espectros de Fourier nas estações que registaram o sismo, observando dois decaimentos distintos e, conseqüentemente, duas frequências-esquina, implicando uma rotura heterogénea no plano da falha em lugar de uma rotura circular e homogénea (como preconiza o modelo pontual de Brune, 1970).

As semelhanças com o sismo real de 09 de Julho de 1998 dos Açores, é observável no espectro de Fourier em deslocamento, concretamente a existência de duas frequências-esquina, destacando-se a impossibilidade de aplicar o modelo pontual de Brune, confirmado o processo de rotura heterogéneo no plano de falha. Destacada a ressalva de modelação alternativa por falha-finita, são utilizadas duas metodologias complementares de determinação dos parâmetros de caracterização da fonte sísmica – método gráfico e método teórico.

Para efetivar a aplicação dos métodos gráfico e teórico para obtenção dos parâmetros momento sísmico, frequência-esquina e queda de tensão, é prioritária a determinação do momento sísmico, estimado empiricamente, para servir de indicador da grandeza dos valores esperados.

A determinação empírica do momento sísmico, M_0 , É feita através da relação com a magnitude.

O evento registado nas estações PVI e MOS, a 09 de Julho de 1998, no arquipélago dos Açores, de magnitude $M = 5,90$, tem associado um momento sísmico indicativo de valor $M_0 = 7,94 \times 10^{24}$.

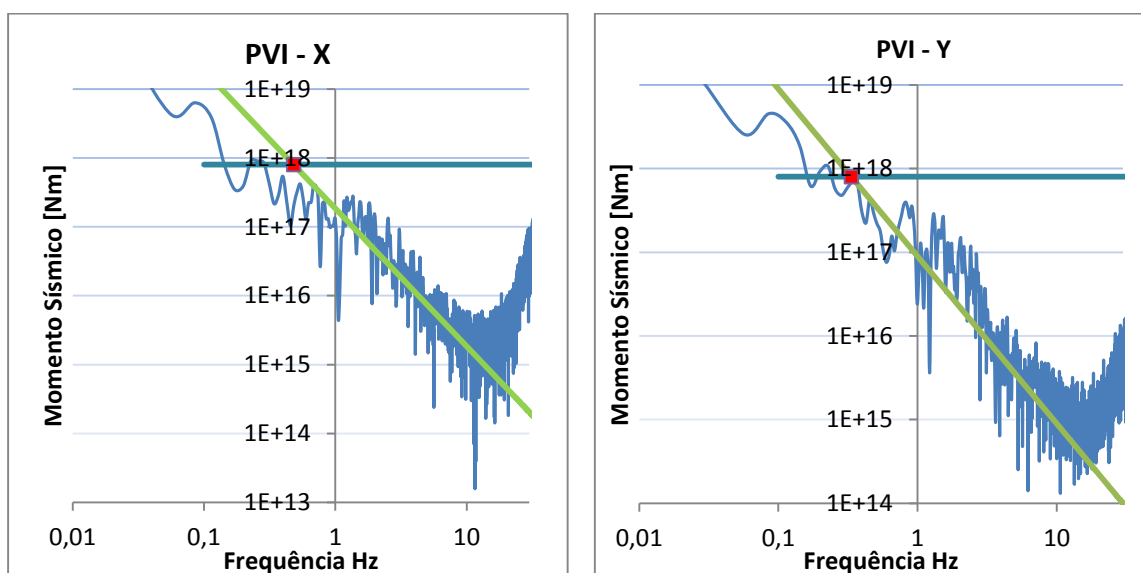
A determinação do momento sísmico pelo método gráfico, é através da definição da assíntota horizontal do espectro de amplitude de deslocamentos.

Sucessivamente, para a determinação gráfica da frequência-esquina é necessário definir as duas assíntotas características do modelo de falha, a horizontal, dada pelo momento sísmico e a de decaimento, dada pela reta envolvente ao espectro de Fourier em deslocamentos do registo.

O traçado da reta envolvente obedece à equação da reta por definição, ou seja:

$$y = mx + b \Leftrightarrow y = m \cdot \log f + b \Leftrightarrow b = y - m \cdot \log f \quad (4.1)$$

A Figura 4.5 ilustra a metodologia gráfica para determinação da frequência-esquina. Importa destacar a existência de diferentes progressos do decaimento, sustentando a hipótese de rotura heterogénea e, conseqüentemente a existência de duas frequências-esquina. Nesta situação, validou-se a frequência-esquina de valor mais baixo uma vez que o espectro do modelo de falha-finita adquire uma segunda frequência de valor mais baixo que origina a deflexão verificada nos espectros reais (Carvalho A. , 2007). Da análise da figura, destaca-se a falta de conteúdo nas altas frequências dos registos da estação MOS, nos eixos ortogonais X e Y, impossibilitando a correta determinação da primeira frequência-esquina através do decaimento original traçado a verde, uma vez que, se o registo se enquadrasse nos parâmetros de um registo completo, o verdadeiro decaimento teria uma localização próxima da assinalada a azul tracejado.



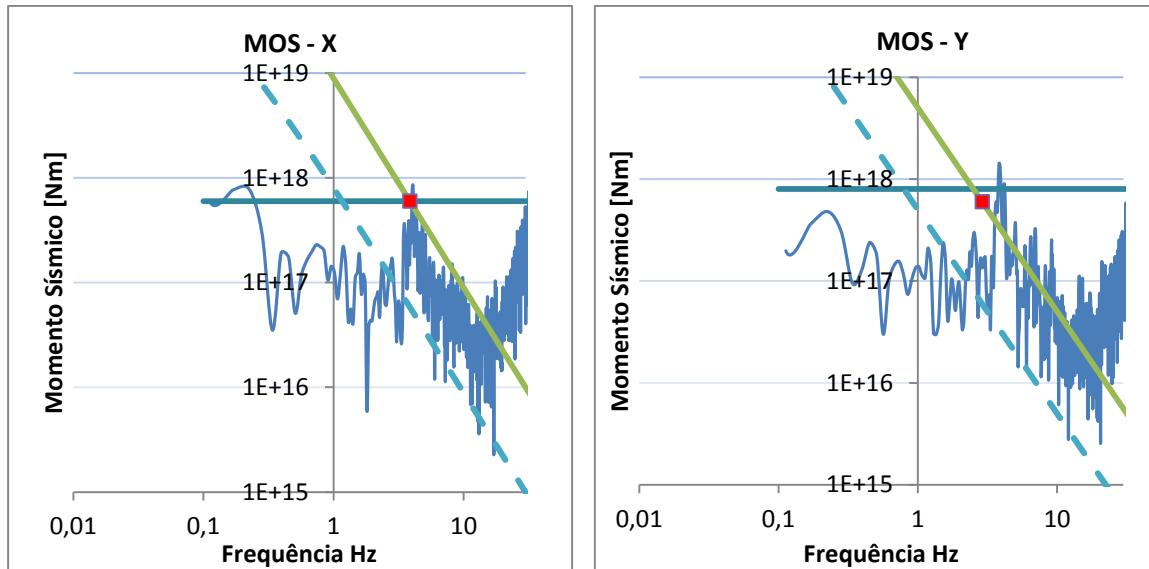
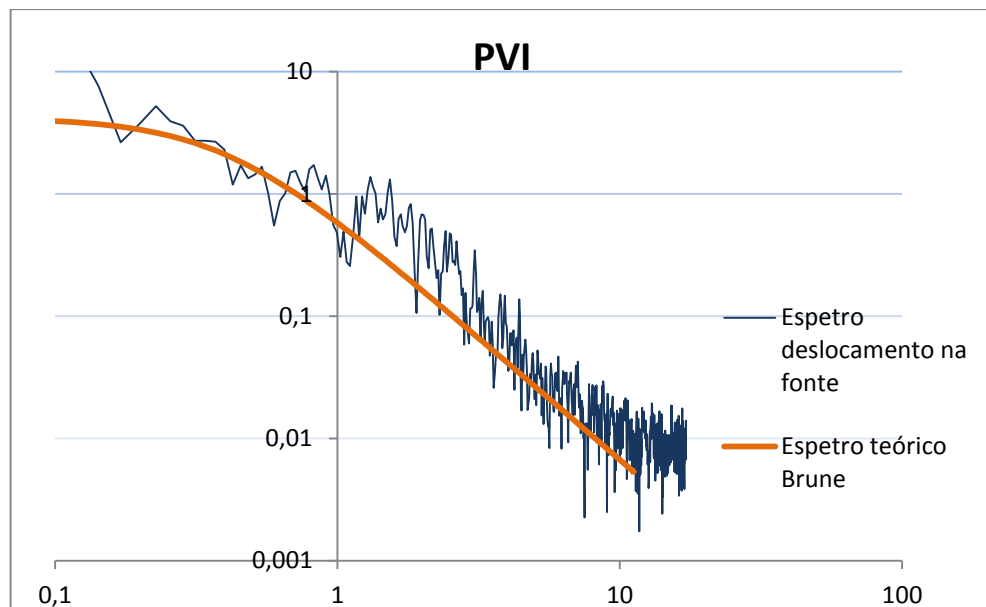


Figura 4.5 - Determinação dos parâmetros da fonte, através da metodologia gráfica, considerando a rotura heterogénea, para o evento de 09 de Julho de 1998, com contribuição das estações PVI (em cima) e MOS (em baixo), nas direções ortogonais X e Y, com indicação do momento sísmico (azul), da reta de decaimento (verde) e da f_c (vermelho). A reta a tracejado azul, no gráfico da estação MOS, simboliza a pressuposta localização da reta de decaimento para determinação da 1ª frequência-esquina, se não se verificasse a falta de conteúdo nas altas frequências

A determinação do momento sísmico pelo método teórico ou de ajuste implica o conhecimento prévio da frequência-esquina média (nas direções ortogonais) determinada graficamente, fazendo-se variar o valor do momento na expressão numérica 3.17, por forma a ajustar o espectro do modelo ómega quadrado ao espectro de deslocamentos na fonte.

A Figura 4.6 ilustra o ajuste do espectro teórico de Brune.



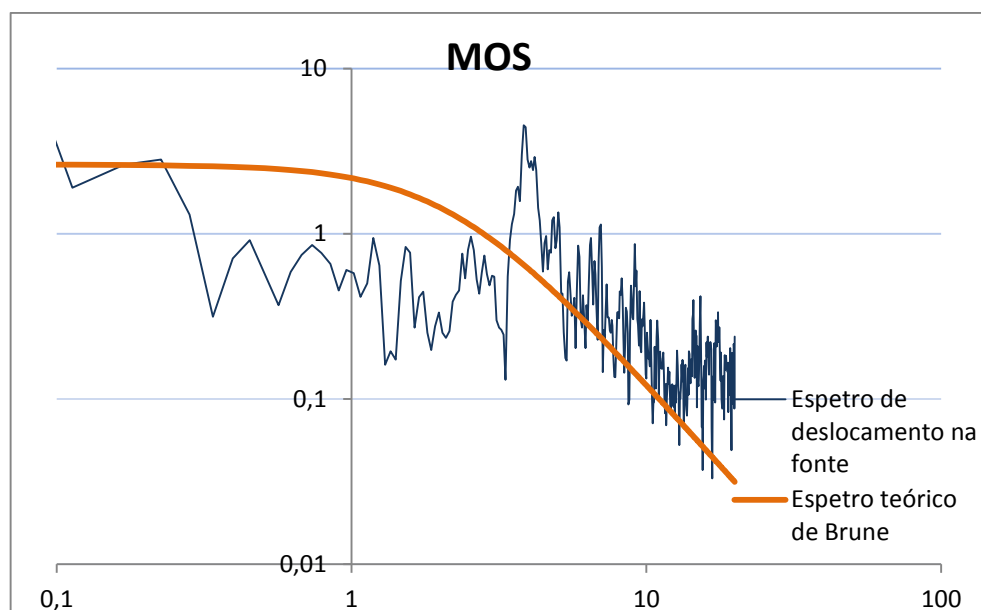


Figura 4.6 - Determinação dos parâmetros da fonte, através da metodologia teórica, considerando a rotura heterogénea, para o evento de 09 de Julho de 1998, com o contributo das estações PVI (em cima) e MOS (em baixo), nas direções ortogonais X e Y, com indicação do espectro de deslocamento na fonte e do espectro teórico

A determinação da queda de tensão, rege-se pela expressão 2.10a, tendo por base os valores do momento sísmico e da frequência-esquina determinados gráfica e teoricamente, respetivamente.

A Tabela 4.3 resume os valores dos parâmetros da fonte do sismo real de 09 de Julho de 1998, registado pelas estações PVI e MOS, determinados através das metodologias gráfica e teórica.

O registo da estação PVI tem aparência dentro dos critérios normais de apresentação, conforme por ser visualizado nos respetivos espectros de amplitude de Fourier, em aceleração e deslocamentos apresentados neste capítulo, constituindo um registo válido.

O registo da estação MOS, pelo contrário, apresenta falta de conteúdos nas baixas frequências, também visualizável nos espectros apresentados, não verificando a assíntota horizontal preconizada pela teoria e não contribuindo, assim, para determinação dos parâmetros.

Tabela 4.3 - Valores dos parâmetros da fonte (momento sísmico, frequência-esquina e queda de tensão) para o sismo real de 09 de julho de 1998 dos Açores, determinados por método gráfico e teórico

Estações	Momento sísmico	Método gráfico		Método teórico	
		Frequência-esquina média [Hz]	Queda tensão média [bar]	Frequência-esquina [Hz]	Queda tensão [bar]
PVI	8E+17	0,407057785	102,7066589	0,4	88,97253098
MOS	6E+17	-	-	-	-

Agrupada a determinação dos parâmetros da fonte do sismo real de 09 de julho de 1998, de magnitude 5,9, com base no registo único da estação PVI, pelos métodos gráfico e teórico, é demonstrada a coerência de valores entre si, sendo o valor da frequência-esquina de 0,41 Hz pelo método gráfico e 0,40 Hz pelo método teórico e o valor da queda de tensão pelo método gráfico é de 102,71 bar e 88,97 bar pelo método teórico (valores médios calculados $f_c = 0,41\text{Hz}$ e $\sigma = 95,84\text{bar}$).

Comparativamente com os valores determinados sinteticamente em capítulo prévio para a região do grupo central do arquipélago dos Açores, os valores da f_c do sismo real são significativamente subestimados, tendo um valor cerca de seis vezes menor. Os valores da σ , ainda que igualmente subestimados, são mais próximos dos determinados para a região, sendo a diferença de cerca de 1,87 vezes quando determinada pelo método gráfico e de 1,46 vezes quando determinada pelo método teórico. O gráfico da Figura 4.7 representa o produto da análise dos parâmetros da fonte, a queda de tensão, evidenciando a comparação de resultados entre metodologias utilizadas e entre valores sintéticos e reais.

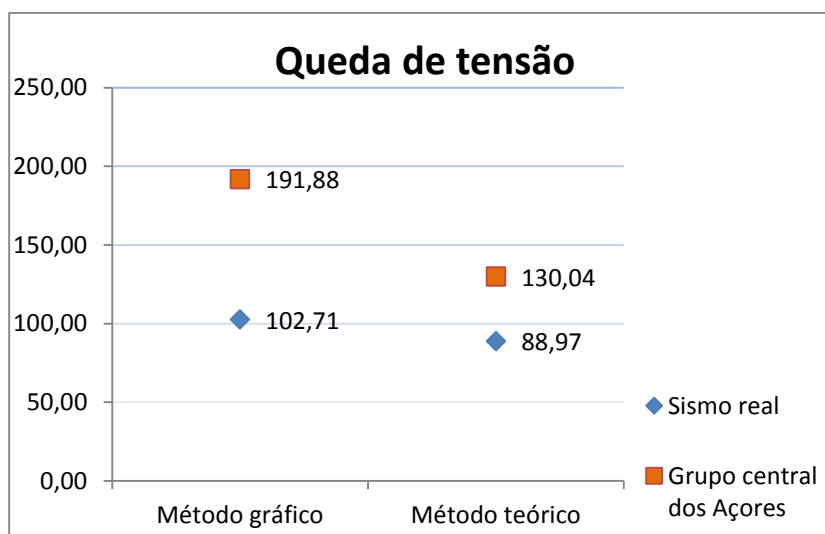


Figura 4.7 - Valores comparativos da queda de tensão (em bar), obtidos através da metodologia gráfica e teórica, para o sismo real de 09 de julho de 1998 nos Açores (azul) e comparação com os valores sintéticos da região do grupo central do arquipélago dos Açores

4.4. Simulação do Sismo

Como aplicação do modelo estocástico que será utilizado para a simulação dos movimentos intensos no arquipélago dos Açores, objetivo do projeto SIGMA, apresenta-se a simulação para o sismo de 09 de Junho de 1998.

Através do método estocástico da falha finita, assumindo a falha retangular dividida num número de sub-falhas modeladas como fontes pontuais, são gerados os respetivos espetros ω^2 e, consequentemente, o momento e a frequência de esquina. O número de sub-falhas considerado é ajustado à magnitude do sismo, de forma a que cada elemento tenha dimensões reduzidas o suficiente para serem consideradas roturas pontuais (aproximadamente 2km).

Os parâmetros de calibração do modelo da falha-finita necessitam de especificações ao nível da geometria do plano de falha (comprimento, largura e orientação), das características de rotura da fonte (distribuição de deslizamento, queda de tensão, ponto de início de rotura e velocidade de rotura) e das propriedades crustais da região (coeficiente de distribuição geométrica, qualidade do meio).

Assim, para os dois epicentros considerados, EPI1 e EPI2, com as características da Tabela 4.1, desprezando os efeitos da resposta do solo, são definidos os parâmetros utilizados para diferentes modelações do sismo de 09 de Julho de 1998 dos Açores, resumidos na Tabela 4.4, a constituírem o *input* do *software* aplicativo EXSIM, com indicação da magnitude do evento, orientação, profundidade e dimensões da falha, número de sub-falhas, velocidade das ondas S, densidade do meio, queda de tensão, velocidade de rotura, fator de qualidade do meio, fator de decaimento espectral, fator de atenuação geométrico e as características das estações, fazendo-se variar, concretamente através da combinações dos dados de *input*:

- utilização de parâmetros da fonte com ou sem a consideração dos do fator relativo aos efeitos geológicos (opção Fmax do EXSIM);
- parâmetros da fonte (queda de tensão e decaimento espectral) com variações em baixos, médios e altos valores, recorrendo à determinação do desvio padrão dos valores obtidos, respetivamente de 90 e 0,06; 120 e 0,07; 190 e 0,08;
- o fator de atenuação geométrico, recorrendo a hipóteses de valores de espessura da crosta apresentados por diferentes autores, nomeadamente de 12 e de 20km;
- a localização da rotura da falha, dividida em 9 subfalhas em comprimento e em 5 subfalhas na largura, considerando-se a rotura na primeira falha, com localização na 1ª sub-falha de comprimento e na 1ª sub-falha de largura, no meio, com localização 5ª e 3ª sub-falhas e com rotura no final da falha, 9ª e 5ª sub-falhas.

Tabela 4.4 – Combinações de parâmetros de modelação para a falha do sismo de 09 de julho de 1998 dos Açores

Parâmetro	Modelação
Magnitude, M	5,9 ou 6,2
Orientação da falha	Azimute 156°, Declive 85°
Profundidade	1,1km
Dimensões da falha	Comprimento 16,5km ; Largura 9,4km
Nº sub-falhas	Comprimento 9; Largura 5
Velocidade, β , das ondas S	3,5km/h
Densidade, ρ	$2,8g/cm^3$
Queda de tensão, σ	90 ou 120 ou 190 bar
Velocidade de rotura	0,8 x velocidade das ondas S
Fator de qualidade do meio, Q	$76 * f^{0,69}$
Fator de decaimento espectral, k	0,05 ou 0,06 ou 0,07s
Estações	PVI e MOS
Início de rotura	1,1 ou 5,3 ou 9,5
Espessura da crosta	12 ou 20 km

Consideradas as hipóteses de modelação apresentadas na Tabela 4.4 e representadas graficamente nas Figura 4.9, 4.11 e 4.12, é realizado um estudo que permite observar a influência das variações consideradas nas simulações e, simultaneamente, uma análise comparativa com o espectro de amplitude real registado pela rede acelerográfica, mais especificamente pelas estações PVI e MOS, de modo a que seja passível de identificar a modelação que mais se aproxima do espectro de amplitude real.

Embora a análise tenha sido efetuada para ambas as estações PVI e MOS, o exemplo é ilustrado com a estação PVI por se terem obtido melhores resultados devido à melhor qualidade dos registos acelerográficos.

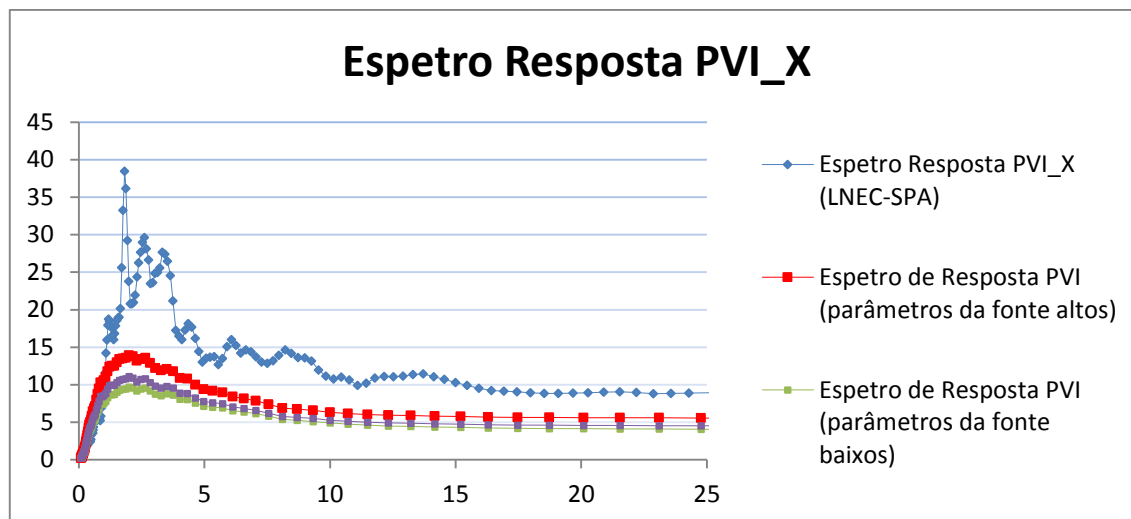


Figura 4.8 - Simulação com parâmetros da fonte altos, médios e baixos, com início de rotura na primeira falha e espessura da crosta de 12km, na estação PVI, na direção ortogonal X

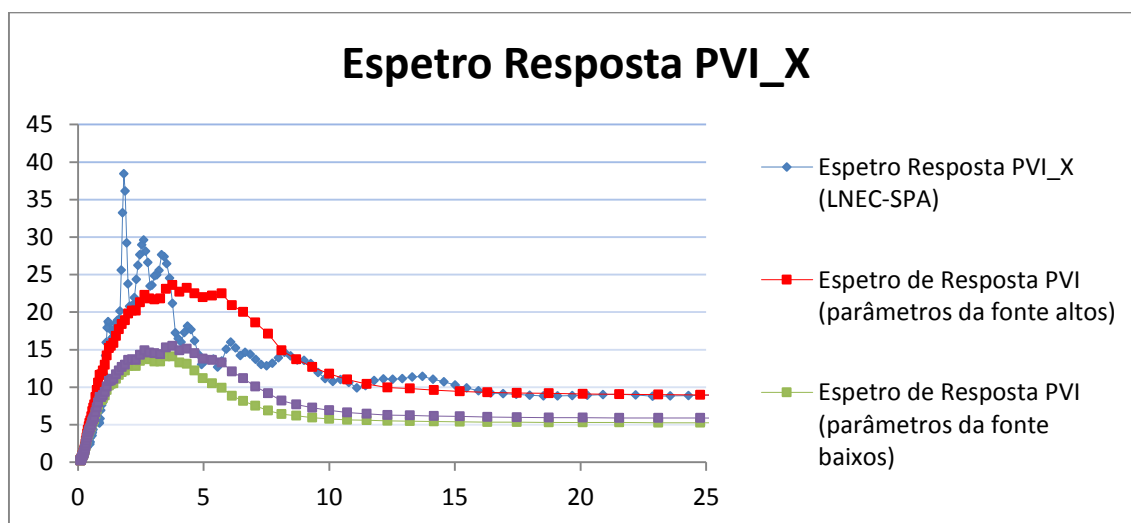


Figura 4.9 - Simulação com função Fmax e parâmetros da fonte altos, médios e baixos, com início de rotura na primeira falha e espessura da crosta de 12km, na estação PVI, na direção ortogonal X

A Figura 4.8 ilustra como os valores dos parâmetros da fonte influenciam a amplitude do espectro de resposta sintético.

A Figura 4.9 mostra, igualmente a influência da grandeza dos valores dos parâmetros da fonte, ainda que seja utilizada a função Fmax preconizada pelo EXSIM.

A comparação de ambas as figuras, permite ainda observar a maior proximidade do espectro de resposta sintético ao espectro de resposta real, quando se utiliza a função F_{max} , pelo que, o estudo da influência dos restantes parâmetros utiliza por base o espectro originado por esta função, com os parâmetros da fonte médios, determinados no capítulo anterior.

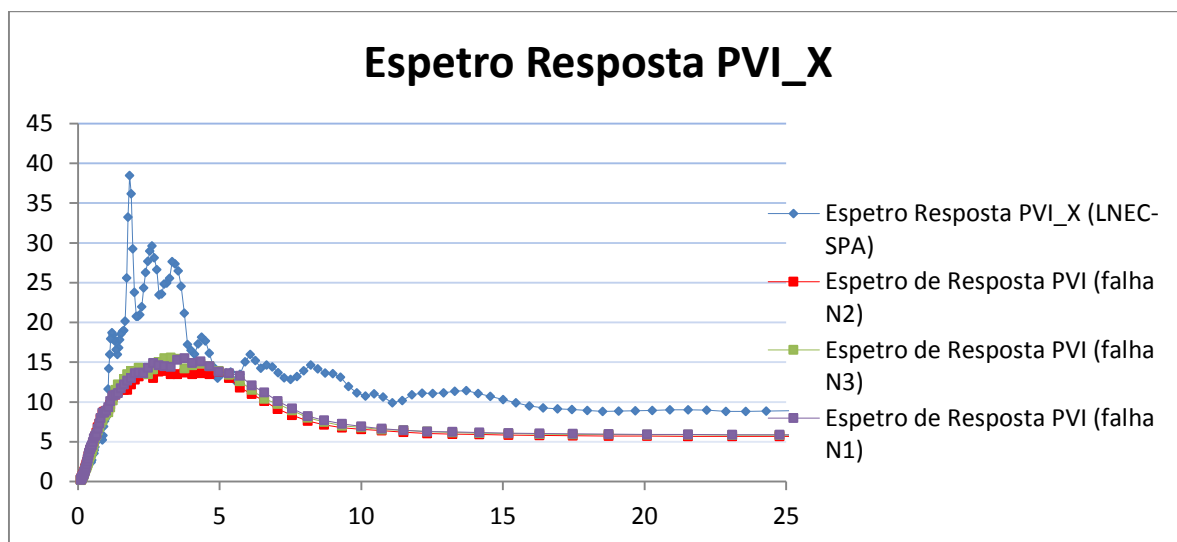


Figura 4.10 - Simulação com função F_{max} e parâmetros da fonte médios, com diferente localização do início de rotura da falha retangular, nomeadamente, com N1 a localizar-se no canto superior esquerdo, N2 a localizar-se centralmente e N3 com localização no canto inferior direito e espessura da crosta de 12km, na estação PVI, na direção ortogonal X

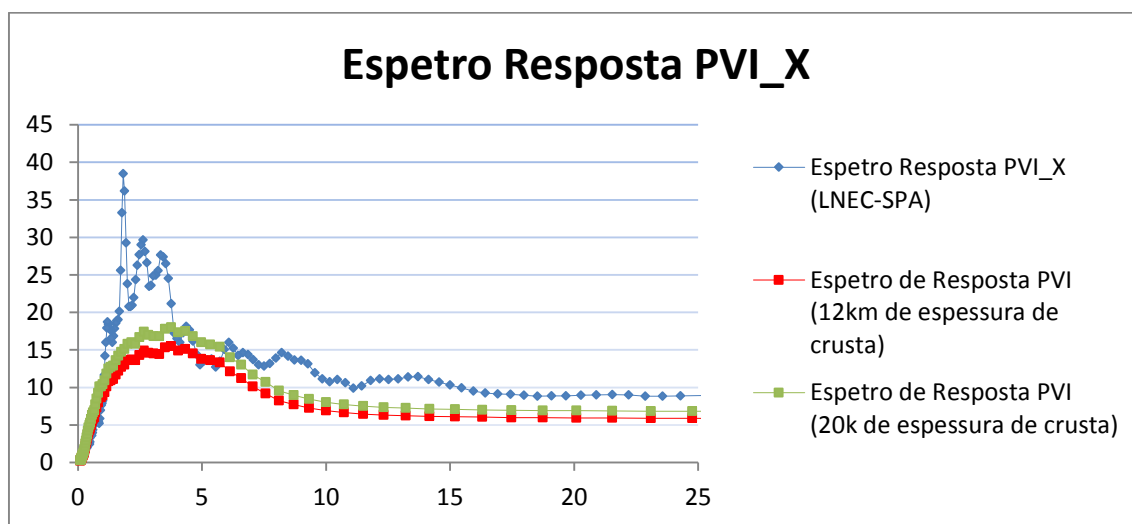


Figura 4.11 - Simulação com função F_{max} e parâmetros da fonte médios, com início de rotura na primeira falha e espessuras da crosta de 12km e de 20km, na estação PVI, na direção ortogonal X

A Figura 4.10 mostra como a localização do início de rotura da falha é semelhante quando se compara a primeira subfalha com a última subfalha. O espectro gerado quando se assume o início de rotura na falha mediana é o que apresenta menor amplitude.

Relativamente à comparação dos espectros quando se geram com diferentes espessuras da crosta, revela-se uma proporcionalidade direta entre a espessura da crosta e a amplitude do espectro, sendo evidente a superior proximidade entre o espectro sintético gerado com uma espessura de crosta de 20km e o espectro real.

Resumindo, da análise realizada, baseada nas combinações possíveis para gerar diversos modelos de falha, foram selecionados valores de parâmetros em detrimento de outros, sempre com o objetivo de aproximar o espectro sintético gerado ao espectro real registado pela estação.

A primeira seleção relacionou-se com o valor da magnitude e as opções variavam entre $M_l = 5,9$ ou $M_w = 6,2$. Foi selecionada a $M_l = 5,9$, com aplicação às modelações seguintes.

De seguida o teste aplicou-se à utilização da função de parâmetros da fonte ou à função Fmax do ESXIM, simultaneamente com a modelação através de parâmetros da fonte médios, baixos ou altos, respetivamente, os parâmetros da fonte estimados, com desvio padrão mínimo e desvio padrão máximo. Foi selecionada a opção de Fmax, com os parâmetros da fonte médios, com aplicação às modelações seguintes.

A localização do início de rotura na falha retangular constituía também uma variável para as combinações, fazendo-se a modelação com início de rotura de falha localizada no topo superior esquerdo do retângulo, ao centro do retângulo e no canto inferior direito do retângulo. Verificou-se maior semelhança com o espectro real a hipótese de início de rotura de falha nos extremos do retângulo (semelhantes entre si). Aplicação às hipóteses de modelação seguintes.

Por último verificou-se a variação da espessura da crosta, que assume valores distintos em estudos de autores distintos, nomeadamente 12km e 20km. A espessura da crosta que mais contribuiu para o espectro sintético se assemelhar ao real, foi a de maior espessura.

Assim, assumindo as variáveis possíveis e a seleção progressiva realizada, o espectro sintético que mais se ajusta ao espectro real, tem $M_l = 5,9$, utiliza Fmax e os parâmetros médios determinados anteriormente, considera o início de rotura de falha no topo superior esquerdo da falha e uma espessura crustal de 20km.

5. Conclusões

5.1. Geral

O trabalho realizado no âmbito do projeto designado por SIGMA teve por objetivo a determinação e quantificação dos parâmetros de caracterização da ação sísmica no arquipélago dos Açores através de metodologia estocástica (baseada em eventos aleatórios obtidos da rede acelerográfica nacional, numa determinada região, Açores, e num intervalo de tempo definido, de 1969 a 2006).

A determinação dos parâmetros permitem a calibração do modelo estocástico de simulação dos movimentos intensos do solo, a utilizar para obter a descrição do movimento do solo num determinado local (amplitude, direção e características espectrais), e a obtenção de uma base de dados sintéticos que complementará a base de dados reais e permitirá, entre outros estudos posteriores, a obtenção de leis de atenuação espectrais regionais, em desenvolvimentos futuros.

5.2. Aspetos de Caracterização da Ação Sísmica

O pressuposto base é o de que o movimento intenso do solo é composto pela integração de 3 processos distintos, nomeadamente:

1. Processo de geração de energia na fonte sísmica – geração das ondas sísmicas pela libertação energética resultante da rotura de uma falha geológica;
2. Processo de propagação da energia sísmica – propagação das ondas sísmicas no meio, desde a fonte até ao substrato rochoso;
3. Processo de alteração do conteúdo energético devido a efeitos locais – modificação das ondas sísmicas durante a propagação da camada superficial da crosta até à superfície.

O trabalho desenvolvido centra-se na modelação da fonte sísmica, a partir de registos obtidos pela rede nacional acelerográfica para a região dos Açores no período de tempo de 1969 a 2006, em solo duro e piso térreo, após eliminação dos efeitos de propagação (fator de atenuação geométrica, fator de atenuação inelástica) e efeitos locais (fator de atenuação na crosta superior, fator de amplificação na crosta superior).

Os registos, na sua maioria com magnitudes baixas a moderadas (até 5,5), contam também com a exceção do sismo de 1998 dos Açores, com magnitude 5,9.

Considerando o padrão de magnitudes, verificou-se a necessidade de utilizar duas técnicas de modelação da fonte sísmica, atendendo à respetiva geometria, heterogeneidade e efeitos de diretividade:

- Para sismos de pequena a moderada magnitude ($M < 5,5$) o modelo de Brune, designado por modelo pontual (simplificação do modelo ómega quadrado), com características de rotura circular, com representação da fonte sísmica como um ponto, sem dimensões apreciáveis;
- Para sismos de elevada magnitude ($M > 5,5$) o modelo de Brune não explica algumas características, como a diretividade, pelo que a fonte sísmica deverá ser descrita como uma falha extensa, retangular, heterogénea.

O modelo pontual ómega quadrado, aplicável à generalidade dos registos, propõe a definição dos espetros de amplitude de Fourier em aceleração e em deslocamento dos registos, delineado a partir de duas assíntotas, uma plana e horizontal que define a amplitude nas baixas frequências, e uma associada ao decaimento espectral, intersetando-se mutuamente num ponto, frequência-esquina. Os espetros constituem a base para a determinação dos parâmetros de caracterização dos movimentos intensos do solo, nomeadamente:

- O decaimento espectral, k , obtido do espetro de Fourier em aceleração do registo sísmico;
- O momento sísmico, M_0 , a frequência-esquina, f_c e a queda de tensão, σ , obtidos do espetro de amplitude de Fourier em deslocamento do registo sísmico.

Em contrapartida, o registo do sismo de 1998, de magnitude elevada, é tratado em capítulo próprio, através do modelo de falha-finita da teoria ómega quadrado, com rotura no plano da falha, heterogénea, implicando a existência de dois decaimentos e, consequentemente, dois valores para a frequência-esquina. O tratamento isolado serve também para não influenciar os resultados da quantificação dos parâmetros de caracterização da ação sísmica.

5.3. Quantificação dos Parâmetros de Caracterização da Ação Sísmica

A partir do espetro de amplitude de Fourier em aceleração de 46 registos com características de rotura pontual, obteve-se o parâmetro de decaimento, k , para o arquipélago dos Açores com o valor $k = 0,075s$.

A partir do gráfico da Figura 5.1, pode fazer-se a comparação dos valores médios do parâmetro de decaimento espectral para algumas regiões (alguns valores com informação disponível da respetiva dispersão), destacando-se o valor relativamente alto do arquipélago dos Açores.

Ainda referente ao parâmetro de decaimento espectral, de referir que se verificou a independência do valor obtido relativamente à magnitude e à distância hipocentral dos eventos.

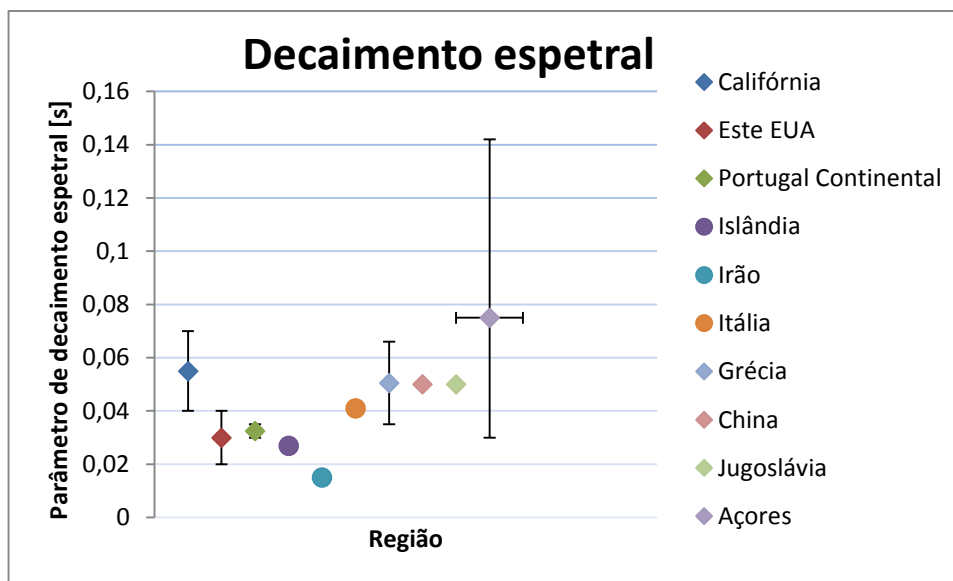


Figura 5.1 - Comparação dos valores médios de k de diferentes regiões

A partir do espectro de amplitude de Fourier em deslocamento de 46 registos, obtiveram-se, pelos métodos gráfico e teórico, os parâmetros referentes à frequência-esquina e à queda de tensão, com os valores respetivos de $f_c = 2,41\text{Hz}$ e $\sigma = 156,51\text{bar}$.

A Figura 5.2 mostra a comparação de valores médios da queda de tensão obtidos para diferentes regiões, observando-se, tendencialmente, a proximidade de valores a rondar o intervalo 100-200 bar, onde se encontra o valor da região dos Açores perfeitamente inserido.

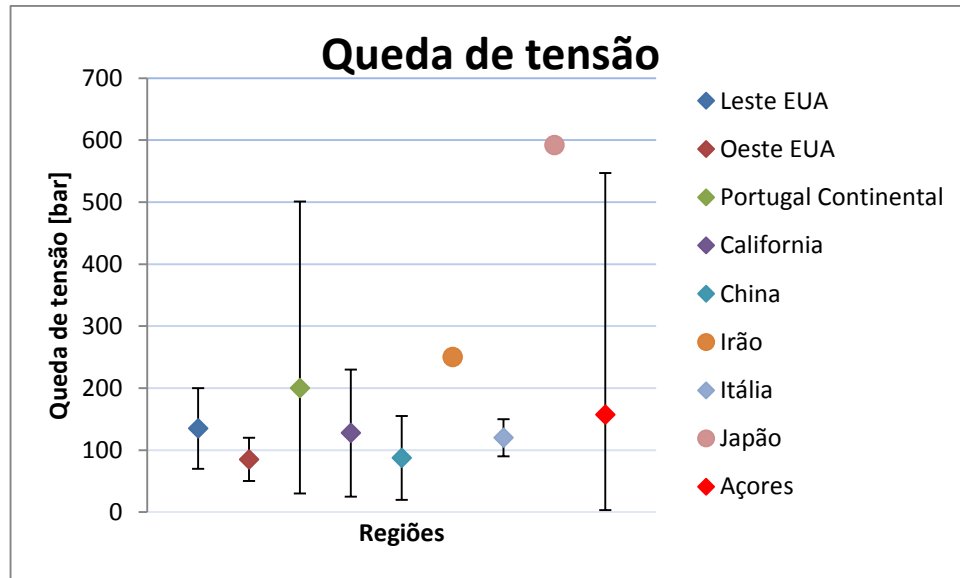
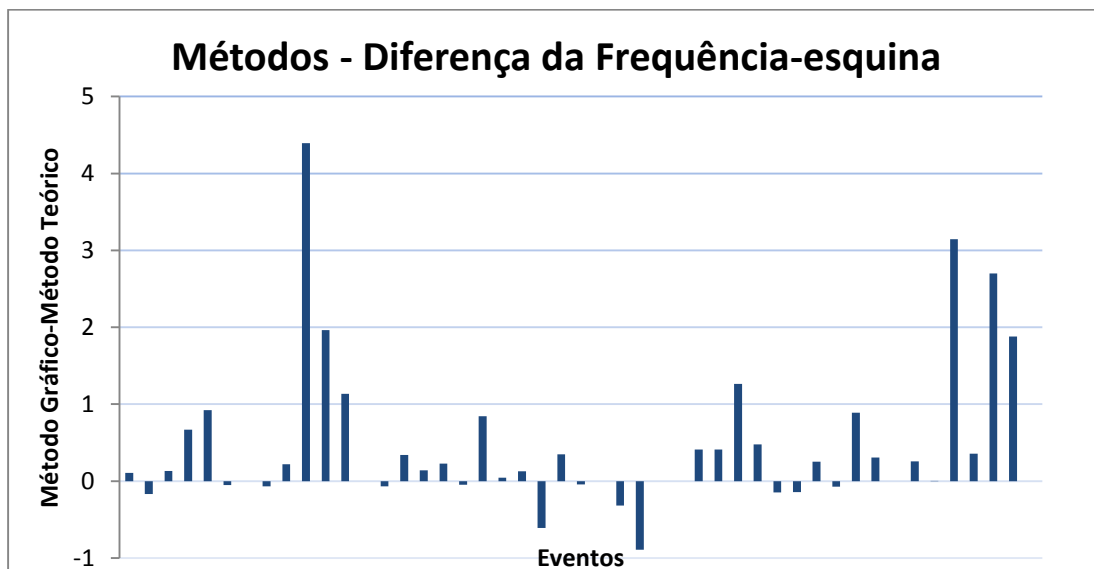


Figura 5.2 – Comparação dos valores médios da queda de tensão para algumas regiões

Relativamente às metodologias gráfica e teórica para determinar os parâmetros da fonte, para a frequência-esquina o método gráfico tem tendência a sobrestimar os valores e, para a queda de tensão, o inverso (o método gráfico subestima valores e o teórico sobrestima valores). A Figura 5.3 ilustra o descrito, e mostra a falta de coerência dos valores estimados pelos diferentes métodos.



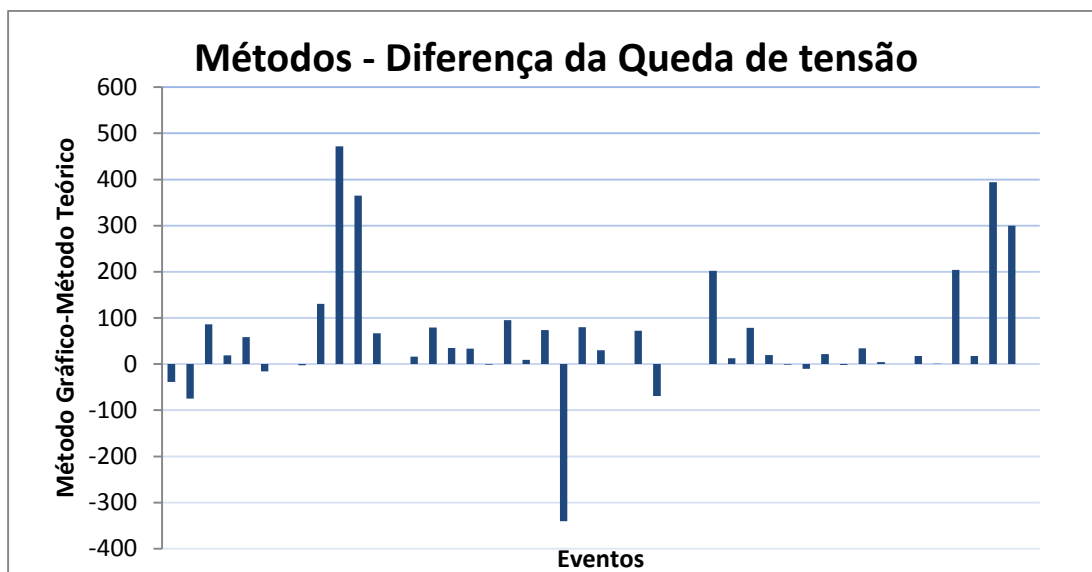


Figura 5.3 - Comparação dos valores dos parâmetros de fonte pelos métodos gráfico e teórico

5.4. Aplicabilidade Real

A comparação dos valores obtidos sinteticamente com os valores do sismo real de 09 de julho de 1998 dos Açores mostra:

- O valor determinado de decaimento espectral sintético para a região do arquipélago ($k = 0,075s$) dos Açores é ligeiramente superior mas coerente com o estimado através da aplicação do método ao sismo real de 09 de julho de 1998 ($k = 0,065s$);
- O valor da frequência-esquina sintética, determinada pelos métodos gráfico e teórico, $f_c = 2,77Hz$ e $f_c = 2,17HZ$, é significativamente mais alto em comparação com o valor da frequência-esquina determinada a partir do sismo de 1998 dos Açores, $f_c = 0,41Hz$ e $f_c = 0,40Hz$, respetivamente, cerca de 6 vezes maior;
- O valor da queda de tensão sintética, determinada pelos métodos gráfico e teórico, $\sigma = 192bar$ e $\sigma = 129bar$, é ligeiramente superior mas coerente com os valores estimados através do sismo de 1998 dos Açores, de respetivamente $\sigma = 103bar$ e $\sigma = 89bar$.

A Figura 5.4 apresenta a comparação dos valores sintéticos obtidos para a região dos Açores com os valores estimados a partir do sismo de 09 de julho de 1998 dos Açores, para os parâmetros de decaimento espectral, de frequência-esquina e de queda de tensão.

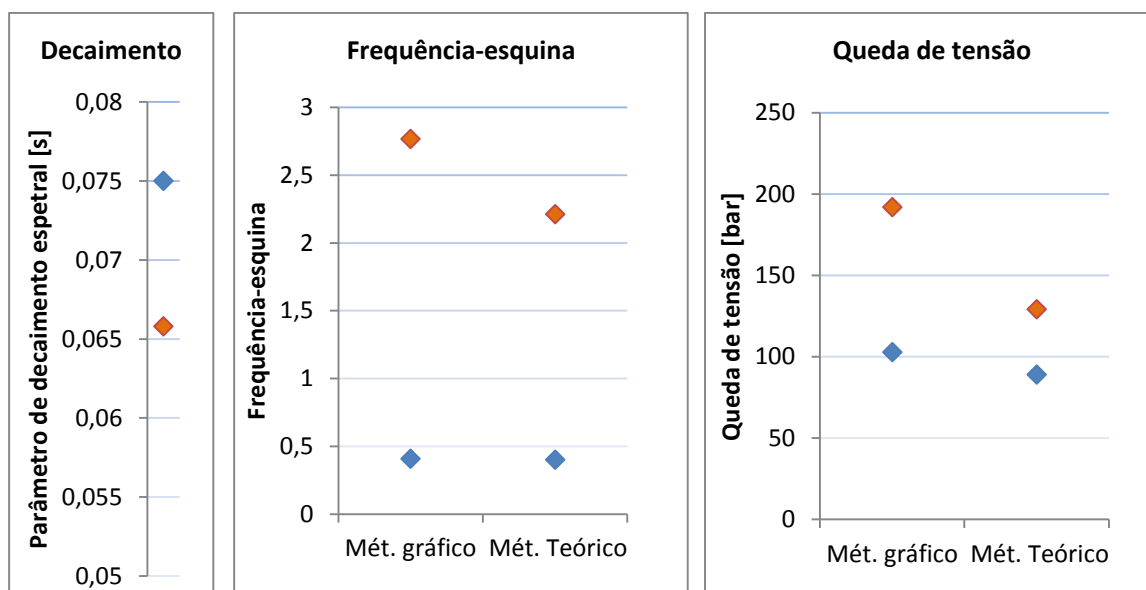


Figura 5.4 - Comparação dos valores estimados dos parâmetros de decaimento e da fonte para o do sismo sintético (a azul) e do sismo de 1998 (a vermelho)

Da simulação do sismo real de 09 de julho de 1998, foi ainda possível observar, através de comparação entre o espectro de resposta do sismo real e o espectro de resposta do sismo sintético, que a modelação que mais semelhanças apresentou com a realidade foi a que considerou os parâmetros da fonte estimados para a região dos Açores, o que permite assumir a aplicabilidade da metodologia estocástica para caracterização da ação sísmica.

5.5. Dificuldades

O desenvolvimento deste trabalho deparou-se com algumas dificuldades que condicionaram parcialmente a análise da aplicabilidade da metodologia estocástica de caracterização da região dos Açores, nomeadamente a falta de estações acelerográficas em rocha, o que limitou o número de registos a utilizar.

Devido à falta de dados do fator de qualidade do meio para a totalidade da região do arquipélago dos Açores, também os parâmetros da fonte sísmica se limitaram ao grupo central do arquipélago, o que implicou a redução dos registos utilizados, dos já poucos registos disponíveis.

Os *softwares* existentes que nos propusemos utilizar, nomeadamente o Seisan e o Sac, não desempenharam o papel de validação e comparação de resultados esperado por não terem as *features* necessárias para o desempenho dessa *task*.

5.6. Trabalhos Futuros

A determinação e conhecimento dos parâmetros da fonte sísmica constituem a base para a geração de séries temporais representativas da atividade tectónica da região dos Açores e leis de atenuação espectrais regionais, que, consequentemente, permitem a reavaliação da perigosidade sísmica para o arquipélago e a determinação de cenários sísmicos probabilísticos.

Para melhor caracterização da ação sísmica, seria pertinente o conhecimento geológico da região e a respetiva distinção dos valores de decaimento espectral para os vários tipos de solo, para analisar a influência que o tipo de solo pode ter no comportamento da ação sísmica.

A determinação do parâmetro de decaimento espectral e dos parâmetros da fonte sísmica, incidiu apenas no grupo central do arquipélago dos Açores devido a apenas existir a determinação do fator de qualidade do meio para esta região. Quando existir informação adicional de valores do fator de qualidade do meio para o restante arquipélago, pode ser alargada a abrangência deste estudo ao restante arquipélago, sendo para isso utilizados os restantes registos em rocha existentes, conferindo maior fiabilidade ao estudo.

6. Bibliografia

- Baltay, A., Ide, S., Prieto, G., & Beroza, G. (2011). Variability in Earthquake Stress Drop and Apparent Stress. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, L06303, doi:10.1029/2011GL046698, 2011 .
- Carvalho, A. (2007). *Modelação Estocástica da Acção Sísmica em Portugal Continental*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Carvalho, A., Sousa, M. L., Oliveira, C. S., Campos-Costa, A., Nunes, J. C., & Forjaz, V. H. (2001). Seismic Hazard for the Central Group of the Azores Islands. *Belletino di Geofisicza Teorica ed Applicata* , 89-105.
- Carvalho, A., Sousa, M. L., Oliveira, C. S., Nunes, J. C., Campos-Costa, A., & Forjaz, V. H. (s.d.). Casualidade Sísmica do Grupo Central do Arquipélago dos Açores.
- Dalguer, L. A. (2000). *Simulation of Seismic Motion Based in the Dynamic Rupture Mechanism of the Causative Fault of an Earthquake*. Porto Alegre: Federal University of Rio Grande do Sul.
- Dias, N. A.; Matias, L.; Lourenço, N.; Madeira, J.; Carrilho, A.; Gaspar, J. L.; (2007). Crustal seismic velocity structure near Faial and Pico Islands (Azores), from local earthquake tomography. *Science Direct* , 301-317.
- Estêvão, J. M. (2012). *Efeitos da Acção Sísmica no Comportamento de Edifícios de Betão Armado com Alvenarias de Enchimento*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Ferreira, B. A. (2005). Geodinâmica e Perigosidade Natural nas Ilhas dos Açores. *Finisterra* , 103-120.
- Havskov, J., & Ottemöller, L. (2001). *Seisan: The Earthquake Analysis Software*. Bergen - Norway: Institute of Solid Earth Physics.
- Mendes, L., & Campos-Costa, A. (2006). *LNEC-SPA, signal Processing and Analysis Tools for Civil Engineers*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Mercer, C. (2006). Acceleration, Velocity and Displacements Spectra - Omega Arithmetic. In C. Mercer, *Prosig Signal Processing Tutorials*. Prosig.
- Moghaddam, H., Fanaie, N., & Motazedian, D. (June 2010). Estimation of Stress Drop for Some Large Shallow Earthquakes Using Stochastic Point Source and Finite Fault Modeling. *Scientia Iranica; Transaction A: Civil Engineering*, Vol.17, No.3 , 217-235.
- Sousa, M. L., & Martins, A. (16 de 08 de 2006). http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/equipamentos/redeaceler_gsrs.html.
- Vales, D. (2013). *Comunicação pessoal*. Lisboa.
- Vilanova, S. P., Ferreira, M. A., & Oliveira, C. S. (2009). *PAD-1.0 Portuguese Accelerometer Database*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Zonno, G., Oliveira, C. S., Ferreira, M. A., Musacchio, G., Meroni, F., Mota-de-Sá, F., et al. (05 de December de 2009). Assessing Seismic Damage Through Stochastic Simulation of Ground Shaking: The Case of the 1998 Faial Earthquake (Azores Islands). *Surv Geophys* , pp. 361-381.

ANEXOS

ANEXO A

A. Relações de $Q(f)$ para algumas Regiões

O Anexo A apresenta valores de Q_0 estimados em estudos anteriores (Carvalho A. , 2007) para mostrar que Q_0 é geralmente maior para rochas mais duras/antigas que se encontram em zonas tectonicamente estáveis, e menor em zonas mais recentes e tectonicamente ativas. Em geral, Q_0 representa o grau de heterogeneidade e ν o nível de atividade tectónica da região.

A Tabela A1 e a Figura A1 ilustram a relação de Q_0 com ν para algumas regiões geográficas.

A Tabela A2 e a Figura A2 ilustram a relação de Q_0 com ν para Portugal continental.

Tabela A.1 - Relações de $Q(f) = Q_0 f^\nu$, para algumas regiões.

Região	Q_0	ν	Referência
<u>Regiões ativas:</u>			
Califórnia	204	0,56	[Atkinson & Silva, 1997]
Califórnia	180	0,45	[Raooof <i>et al.</i> , 1999]
Austrália	100	0,85	[Wilkie & Gibson, 1995]
Sul de Espanha	100	0,70	[Pujades <i>et al.</i> , 1990]
Sul de Espanha	155	0,89	[Ibanez <i>et al.</i> , 1990]
Himalaias	126	0,90	[Gupta <i>et al.</i> , 1995]
Himalaias	92	0,89	[Paul <i>et al.</i> , 2003]
Guerrero México	47	0,87	[Rodriguez <i>et al.</i> , 1983]
<u>Regiões estáveis:</u>			
Norte da Ibéria	600	0,45	[Pujades <i>et al.</i> , 1990]
Quebec (CENA)*	755	0,50	[Boore & Atkinson, 1992]
Canada (CENA)	680	0,36	[Atkinson & Mereu, 1992]
ENA**	$Q(f) = 228,615 \frac{1 + (f / 0,3)^{2,65}}{(f / 0,3)^2}$		[Dong, 1999]
Várias regiões intraplacas (CENA, Europa, China)	$Q(f) = 539 + 152f + 1,43f^2$		[Dahle <i>et al.</i> , 1990]
Portugal (norte)	239	0,79	[Vales <i>et al.</i> , 1998]
Portugal (norte)	500	0,60	[Pujades <i>et al.</i> , 1990]

Portugal (norte)	127	1,06	[Vales <i>et al.</i> , 1998]
Portugal (Vale do Tejo)	123	0,94	[Carvalho <i>et al.</i> , 1999]
Portugal (centro)	250	0,70	[Pujades <i>et al.</i> , 1990]
Portugal (centro)	138	0,96	[Vales <i>et al.</i> , 1998]
Portugal (sul)	70	0,90	[Fitas <i>et al.</i> , 2000]
Portugal (sul)	133	0,90	[Carrilho & Oliveira, 1997]

*CENA – Centro e Leste da América do Norte

** ENA –Leste da América do Norte

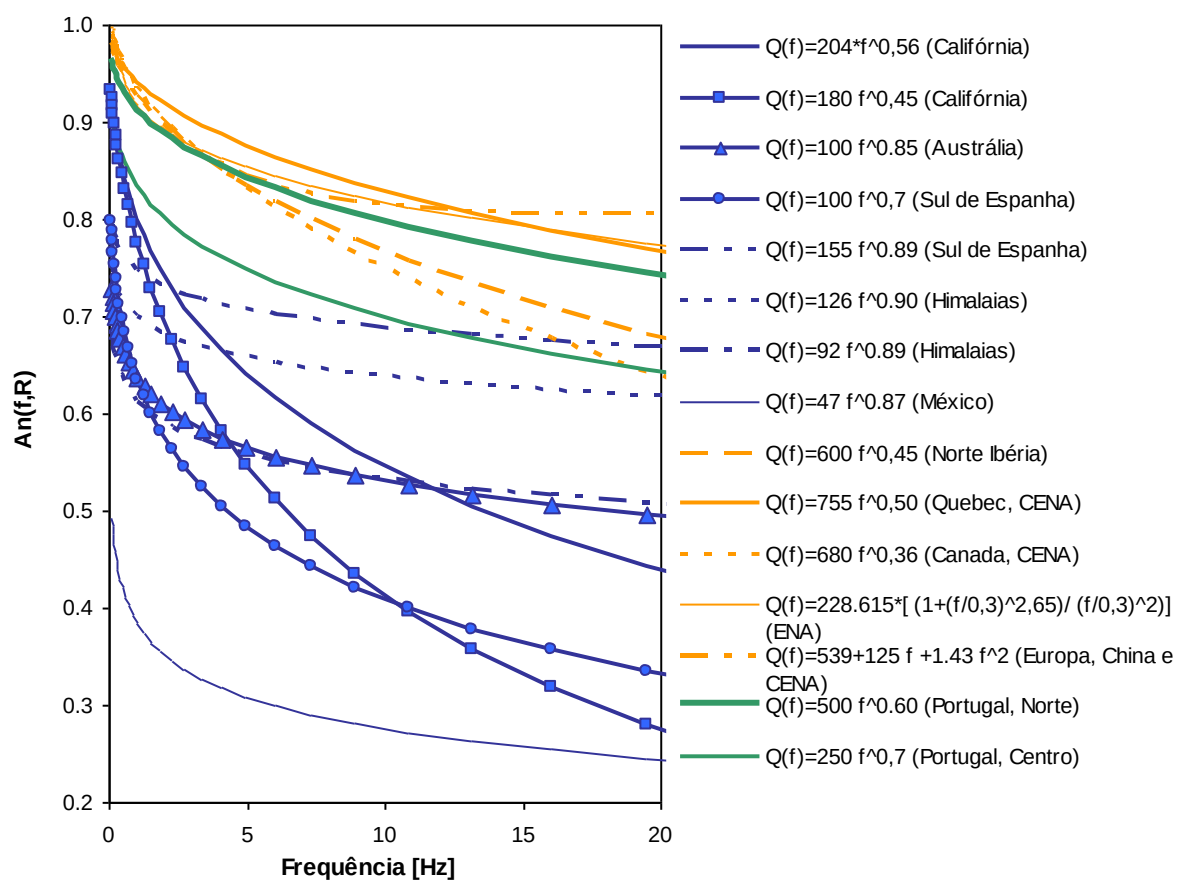
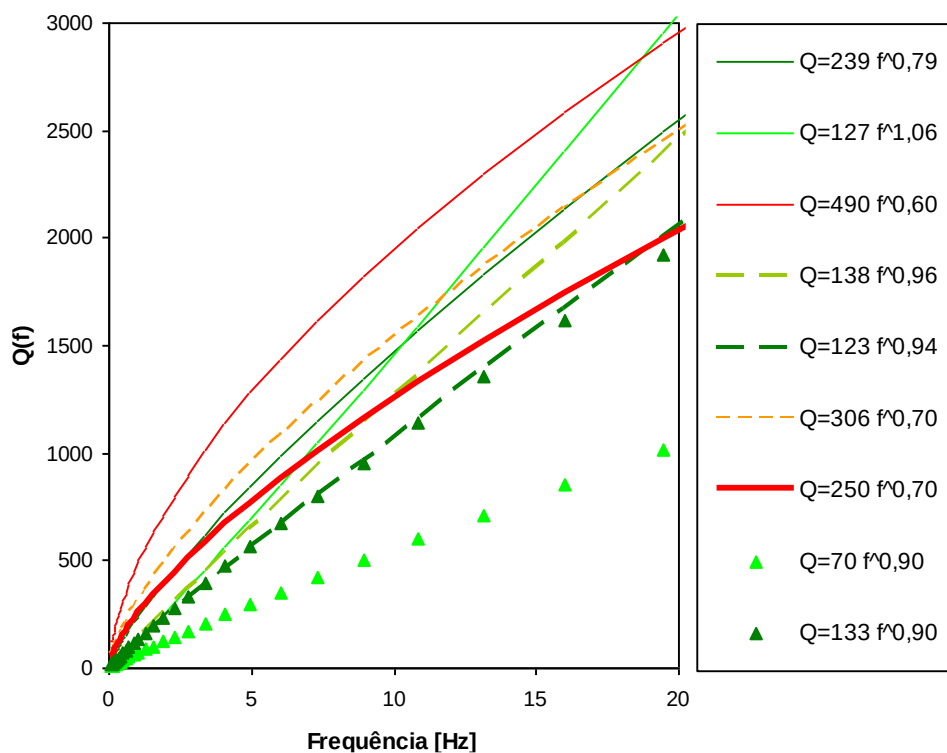


Figura A.1 - Gráfico com estudo do fator de atenuação inelástica para várias regiões, assumindo um valor de $\beta=3,5$ km/s e uma distância de 50 km.

Tabela A.2 Fator de qualidade, $Q(f) = Q_0 f^\nu$, para Portugal Continental

Região	Q_0	ν	Referência
Portugal (norte)	239	0,79	Vales <i>et al.</i> [1998]
Portugal (norte)	127	1,06	Vales <i>et al.</i> [1998]
Portugal (norte)	490	0,60	Pujades <i>et al.</i> [1990]
Portugal (centro)	138	0,96	Vales <i>et al.</i> [1998]
Portugal (Vale do Tejo)	123	0,94	Carvalho <i>et al.</i> [1999]
Portugal (centro)	306	0,70	Pujades <i>et al.</i> [1990]
Portugal (sul)	250	0,70	Pujades <i>et al.</i> [1990]
Portugal (sul)	70	0,90	Fitas <i>et al.</i> [2000]
Portugal (sul)	133	0,90	Carrilho & Oliveira [1997]



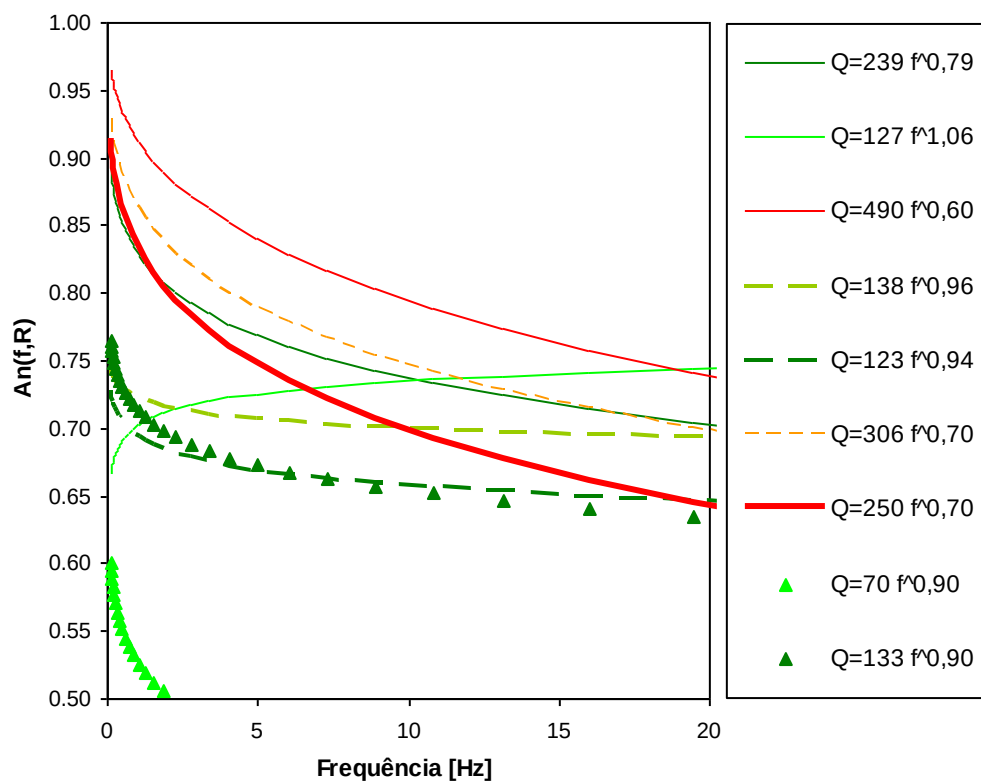


Figura A.2 - Gráfico com estudo do fator de atenuação inelástica, assumindo um valor de $\beta=3,5$ km/s e uma distância de 50 km.

ANEXO B

B. Software Utilizado

Durante a elaboração deste trabalho foram utilizados *softwares* com grande especificação de utilização sísmica, nomeadamente a aplicação de recolha e organização de informação designada PAD 1.0 e o processador de sinal LNEC-SPA.

Fez-se ainda uma incursão aos *softwares* Seisan e Sac com o intuito de analisar e processar os registos sísmicos da região dos Açores em rocha dura e, em último recurso, comparar e validar os resultados obtidos, tarefa em que ambos os programas se revelaram insuficientes para atingir o objetivo. Todavia, ainda que não tenham contribuído diretamente para este trabalho, foram estudados e concluiu-se a inadequação para o desempenho das tarefas propostas e, assim, julga-se útil a apresentação destes *softwares*, respetivas *features* e menção desta conclusão para futuras investigações.

B.1 PAD

A totalidade da informação relativa à sismicidade, no intervalo de tempo de 1969 a 2006, constitui a base de dados da rede acelerográfica nacional, associada a uma aplicação minimalista de consulta e aplicação de filtros de pesquisa, com a designação *PAD 1.0 . Portuguese Accelerometer Database 1969-2006* (Vilanova, Ferreira, & Oliveira, 2009).

A compilação da informação para o *PAD 1.0 – Portuguese Accelerometer Database 1969-2006* é da responsabilidade do Instituto Superior Técnico (IST). A informação é proveniente dos registos das redes de acelerógrafos de centros internacionais de sismologia, designadamente o Instituto Superior Técnico (IST, Lisboa, Portugal), Instituto de Meteorologia (IM, Lisboa, Portugal), o Instituto Geográfico Nacional (IGN, Madrid, Espanha), National Earthquake Information Center (NEIC, Denver, USA), Sistema de Vigilância Sismológica dos Açores (SIVISA, Ponta Delgada, Açores), Harvard University (HRVD, Harvard, USA) e o Swiss Seismological Service (ZUR_RMT, Zurich, Switzerland). Ainda como fonte secundária de informação sísmica, é utilizado o boletim preliminar anual e mensal do IM, o boletim preliminar do SIVISA, o boletim do IGN e o catálogo Nunes *et al.* (2004).

Basicamente, a cada uma das formas de onda registada pela rede, corresponde a informação de alguns dos mais relevantes parâmetros sísmicos, a informação das estações que gravaram e a informação dos instrumentos que gravaram. Detalhadamente, são ordenadamente disponibilizados, em forma de tabela, os dados: identificação de forma de onda, identificação do evento, identificação da estação, identificação do instrumento, região sísmica, país, nome do sismo, data, hora, latitude do epicentro [N], longitude do epicentro [E], profundidade [km], momento de magnitude (MW), magnitude com ondas de superfície (MS), magnitude com ondas de corpo (mb), magnitude de ondas de corpo de curta duração (mbLg), magnitude local ou de Richter (ml), intensidade máxima, máxima intensidade

local, mecanismo focal, referência sísmica, região da estação, nome da estação, código da estação, latitude da estação [N], longitude da estação [E], elevação acima do nível do mar [m], tipo de estrutura, piso, geologia local, distância epicentral [km], distância à falha [km], azimuth da estação-fonte, instrumento, nome do instrumento, dono do instrumento, pico de aceleração do solo (PGA) horizontal e vertical [mg] e ficheiro da forma de onda [.raw].

B.1 Lnec-Spa

O *software* Lnec-Spa, versão 1.0, desenvolvido pelo e para o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, consiste num conjunto de ferramentas aplicáveis à investigação em engenharia sísmica, organizadas em módulos (Mendes & Campos-Costa, 2006):

- *Viewer* – permite a visualização rápida de canais;
- *Time history generation* – permite a geração de series artificiais para *input* em sistemas de atuação;
- *Aquisition and output* – permite fazer aquisição e atuação de sinais;
- *Analysis* – permite efetuar análise de sinais recorrendo a técnicas de processamento de sinal (filtragem, janelas, análise no domínio da frequência, ...);
- *Math channels* – permite a criação em run-time de canais matemáticos;
- *Modal analysis-input-output* – permite identificar os parâmetros dinâmicos de sistemas *input-output*;
- *MDOF model* – permite estimar as forças globais em sistemas de massa concentrada;
- *2D visualization* – permite criar visualizações 2D com dados de ensaios;
- *Graph animation* – permite criar animações de gráficos XY (e.g. ciclos de histerese, ...);
- *Strong ground motion* – permite efetuar a análise de resultados de registos de aparelhos da rede de microsísmógrafos;
- *Web-shaker* – módulo didático de controlo e visualização remotos de uma mesa sísmica de pequenas dimensões com atuador eletromagnético.

O Lnec-Spa foi desenvolvido em ambiente Labview, com recurso a rotinas *dll* compiladas em Fortran para os cálculos mais intensos. O formato de ficheiro binário *standard* desenvolvido foi o *Lnec test file* – *ltf*, para armazenar informação.

B.2 Seisan

O sistema Seisan é um conjunto de programas e bases de dados *open-source*, para análise da atividade sísmica.

O Seisan processa, arquiva e organiza informação, de origem analógica ou digital, de eventos sísmicos globais ou locais.

Ao nível do processamento, o Seisan permite selecionar a leitura de fase pretendida para localizar e editar eventos, determinar parâmetros espetais, momento sísmico, azimuth de chegada de estações triaxiais e traçar mapa epicentral (Havskov & Ottemöller, 2001).

Ao nível dos processos de rotina, é possível processar e organizar a informação recebida graças à simplicidade da base de dados cronologicamente ordenada. Os dados estão organizados segundo uma estrutura de base de dados que utiliza o sistema de ficheiro. A unidade básica é um ficheiro que contém leituras de fases originais de um evento, com ou sem parâmetros de base (localização e magnitude). O nome desse ficheiro é a identificação do evento e a chave para aceder a toda a informação existente sobre o evento na base de dados. Cada evento é armazenado como um ficheiro único (ficheiro S - *single file*).

Os principais programas do Seisan para a interação com a base de dados do sistema de observação sísmica são o EEV e o MULPLT e o W-EMAP, que permitem:

- localizar eventos;
- editar eventos;
- determinar parâmetros espetais;
- determinar momento sísmico;
- determinar azimuth de chegada a partir de estações com 3 canais;
- marcar e visualizar epicentros;
- calcular magnitudes.

O Seisan opera em ambiente Windows, Solaris e Linux.

B.3 Sac

O *software* Seismic Analysis Code (SAC), da Iris, é um programa interativo para fins gerais, desenvolvido para o estudo de sinais sequenciais e séries temporais, nomeadamente de caráter sísmico.

As principais capacidades de análise incluem operações aritméticas, transformadas de Fourier, 3 técnicas de estimativa espetais, filtros IIR e FIR, sobreposição de sinal, dizimação, interpolação, correlação e seleção de fase. Também inclui capacidade de representação gráfica.

O SAC, desenvolvido em C, opera em diferentes sistemas operativos, nomeadamente:

- Linux 2.0 ou posterior
- Mac OS X 10.3 ou posterior
- Solaris 5.8 ou posterior
- Windows/Cygwin

ANEXO C

C. Espectros de Amplitude de Fourier em Aceleração

C.1 Gerados pelo LNEC-SPA

São apresentados os gráficos gerados pelo LNEC-SPA, para todos os registos da rede acelerográfica dos Açores, entre 1969-2006, em solos duros, registados em estações implementadas em piso térreo, para sismos com magnitudes entre 2,1 e 5,9, representando apenas o contributo das ondas S.

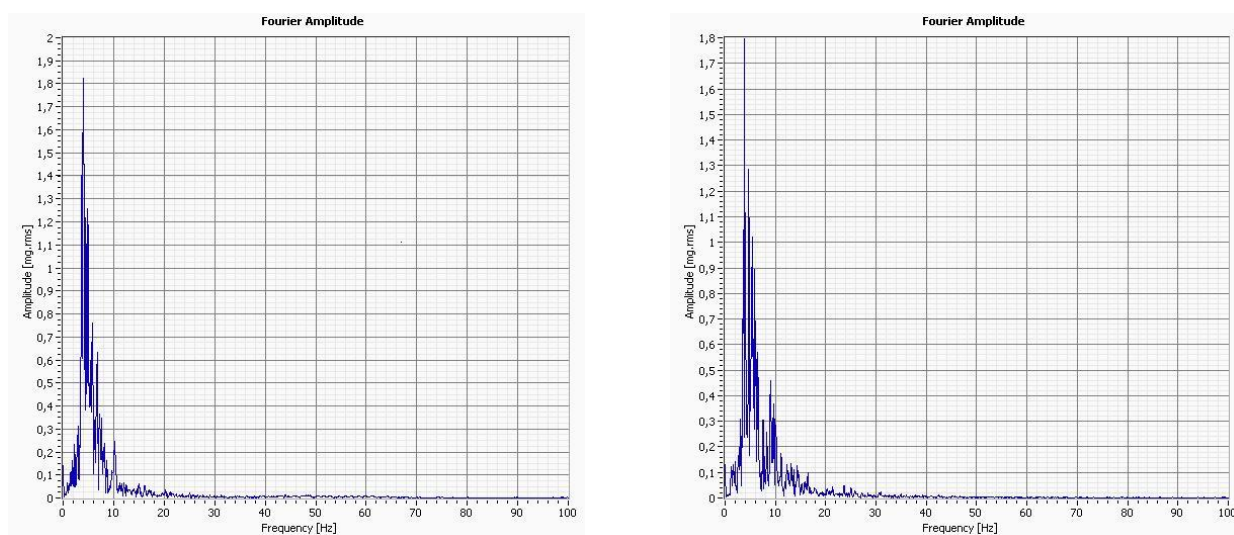


Figura C.1.1 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 21 de Julho de 1999, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação MOS, a constituir o evento 1.

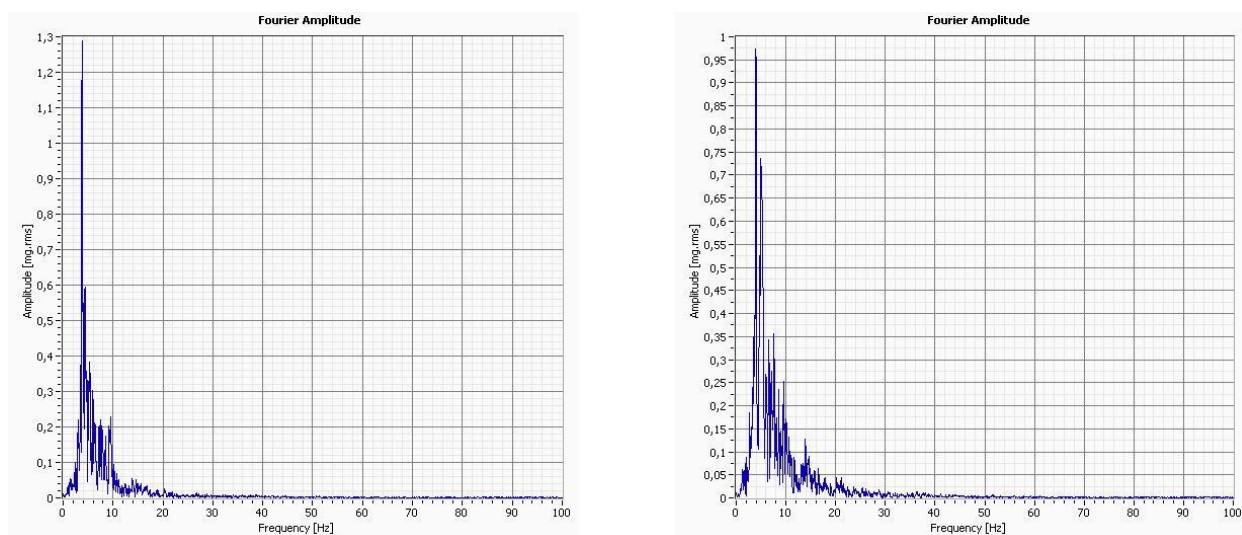


Figura C.1.2 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 21 de Julho de 1999, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação MOS, a constituir o evento 2.

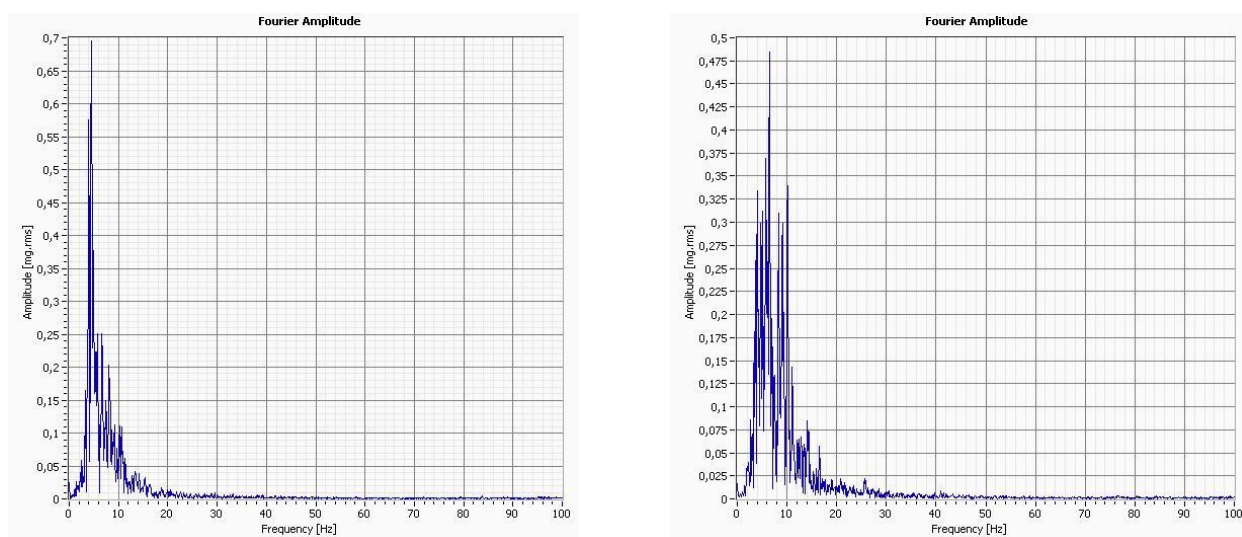


Figura C.1.3 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 21 de Julho de 1999, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação MOS, a constituir o evento 3.

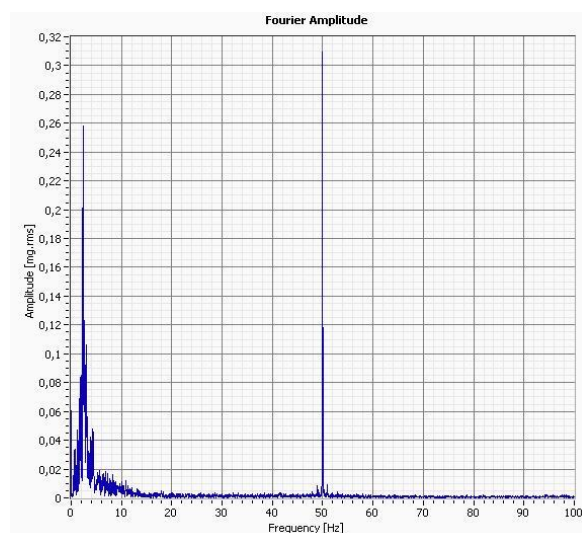
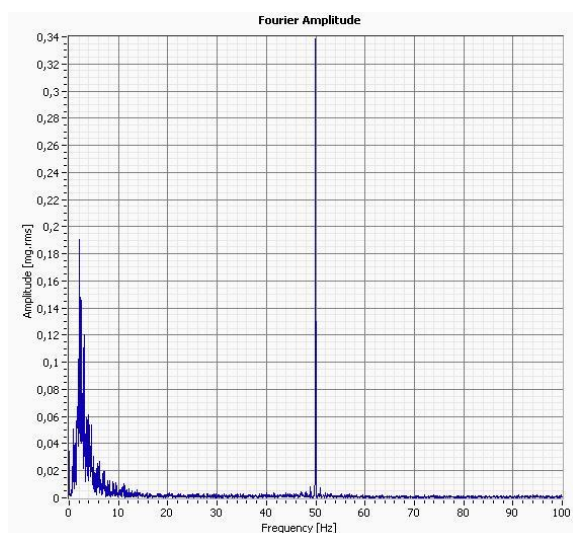


Figura C.1.4a – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 04 de Março de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação PVI, a constituir o evento 4a.

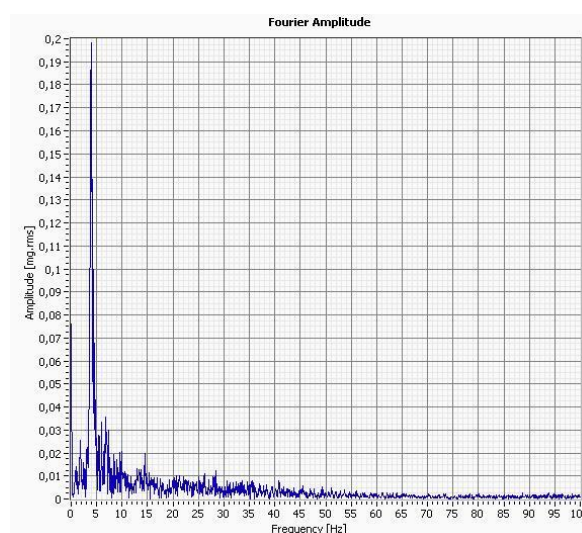
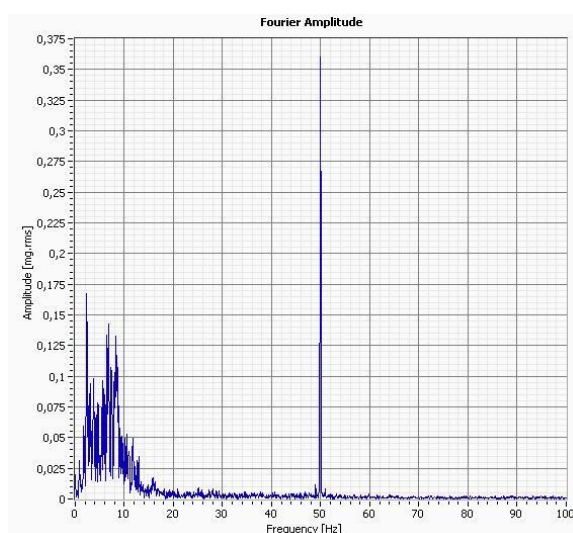


Figura C.1.4b – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 04 de Março de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação MOS, a constituir o evento 4b.

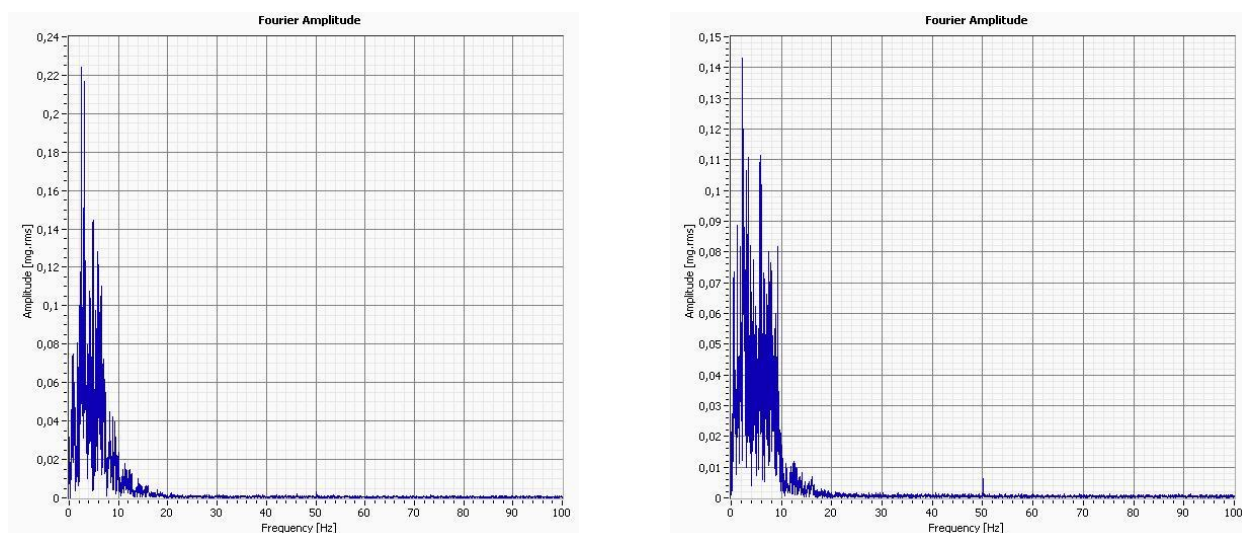


Figura C.1.5a – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 01 de Agosto de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 5a.

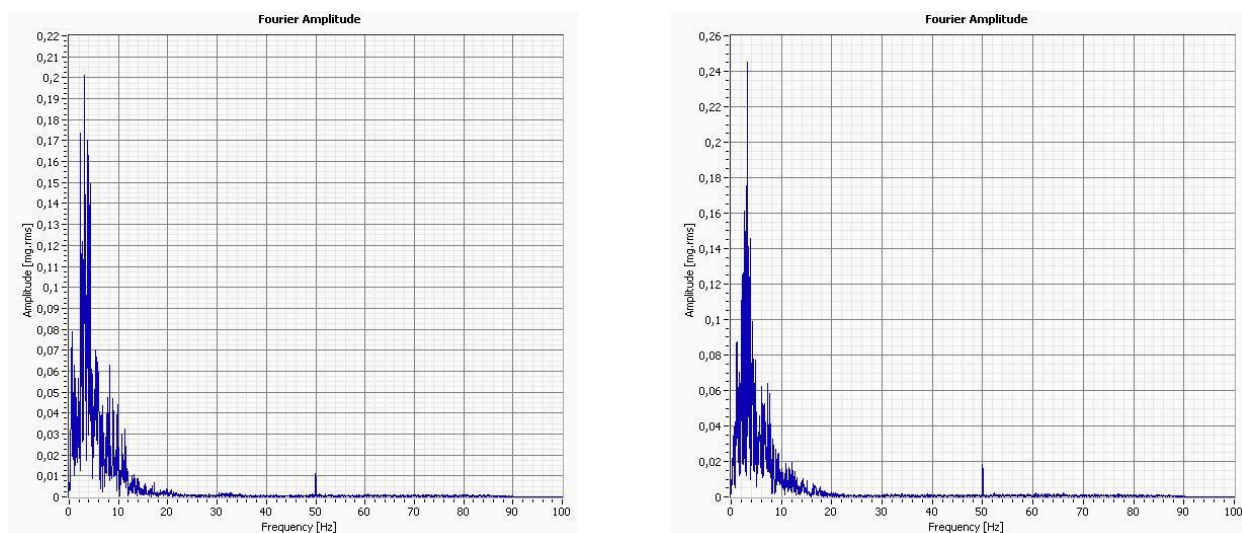


Figura C.1.5b – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 01 de Agosto de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SRO, a constituir o evento 5b.

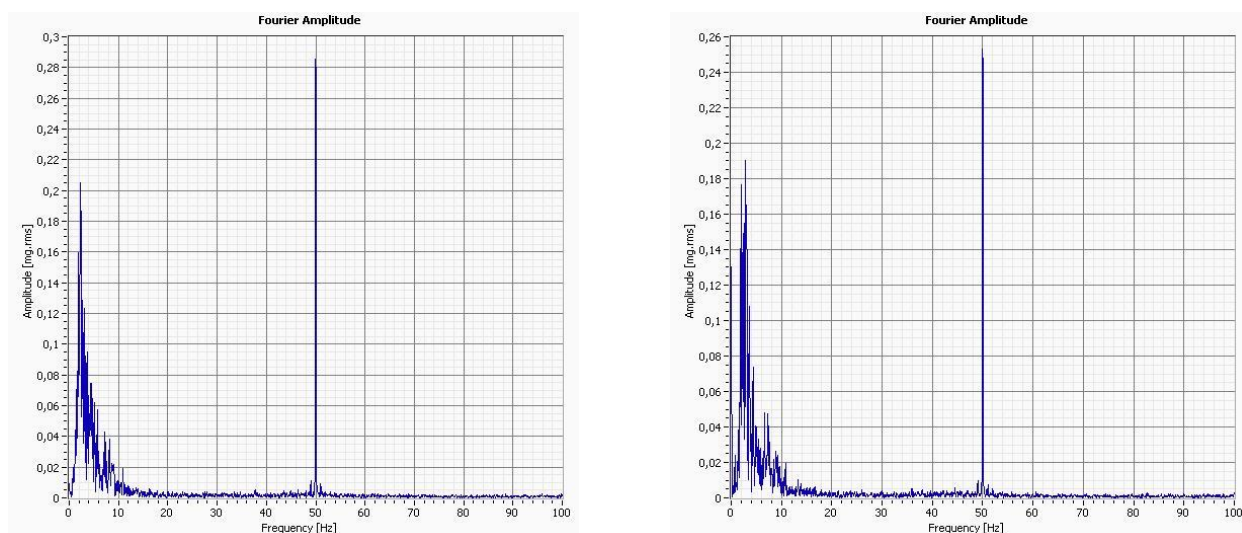


Figura C.1.6 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 03 de Setembro de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação PVI, a constituir o evento 6.

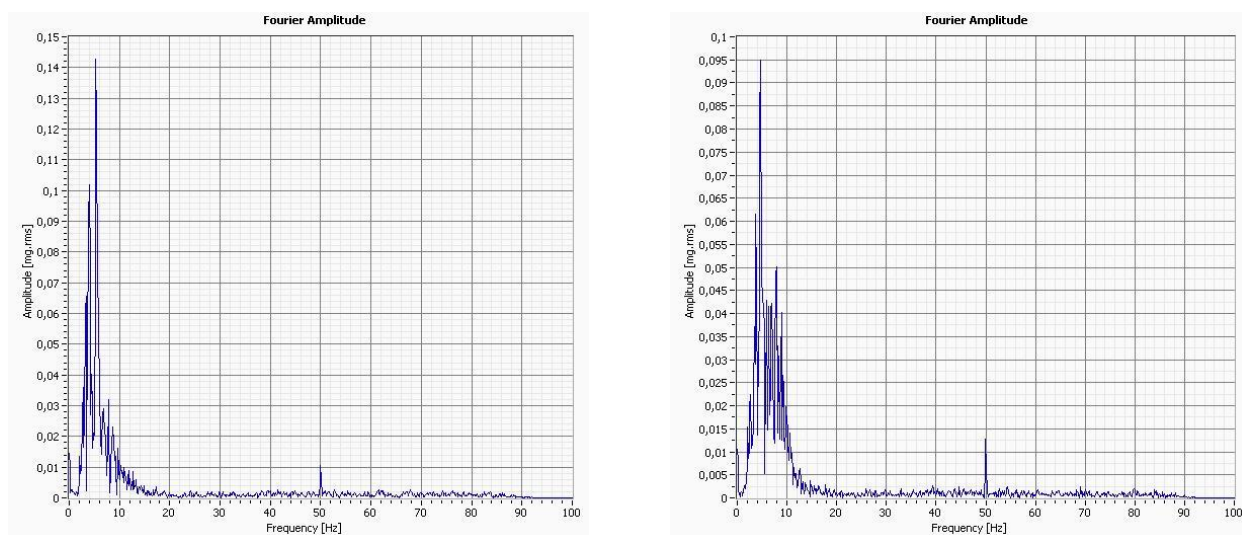


Figura C.1.7 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 10 de Novembro de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação TOP, a constituir o evento 7.

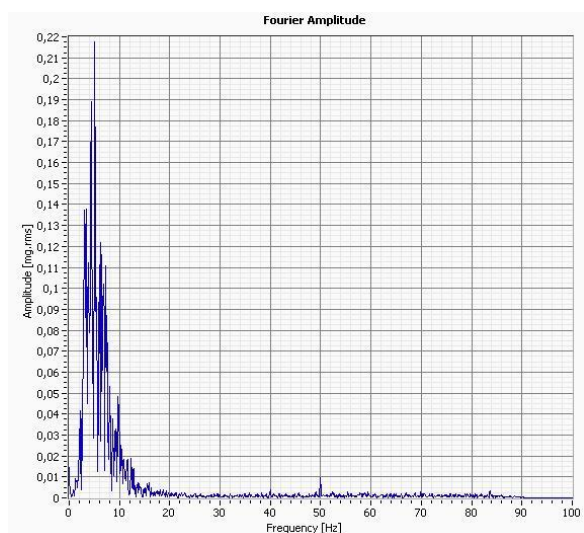


Figura C.1.8 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 28 de Dezembro de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação TOP, a constituir o evento 8.

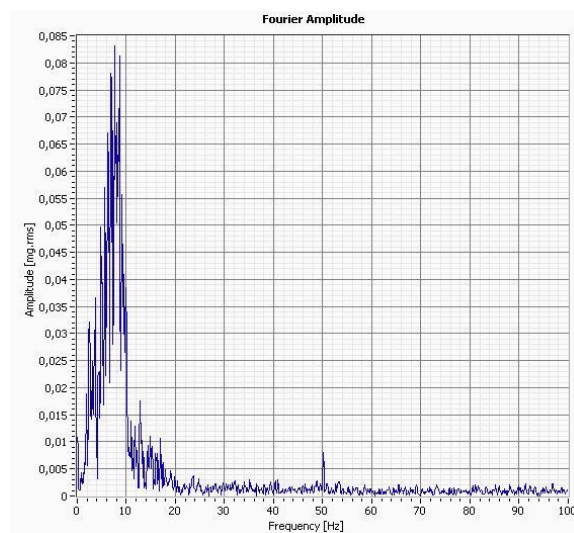
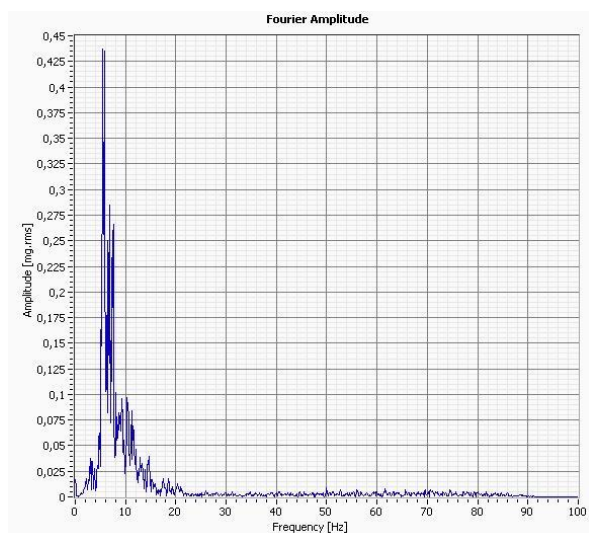


Figura C.1.9 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 29 de Janeiro de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 9.

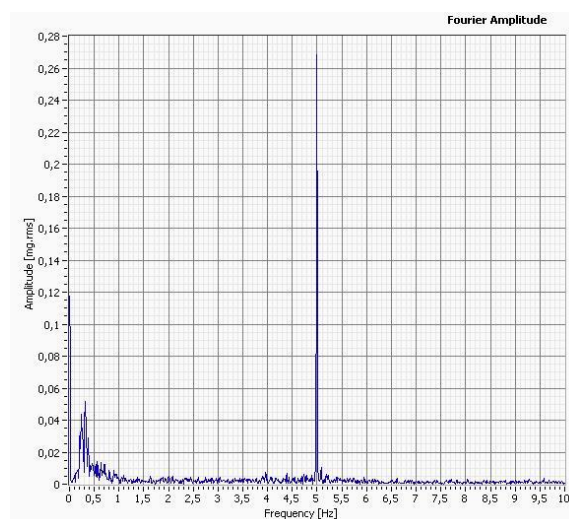
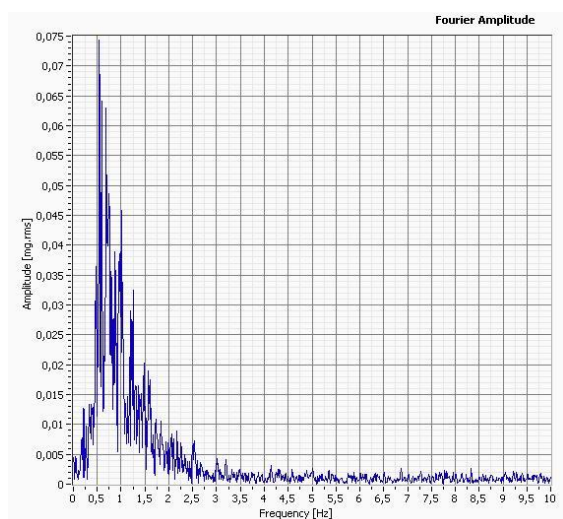


Figura C.1.10 – Espectros de aceleração para o sismo de 06 de Fevereiro de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação PVI, a constituir o evento 10.

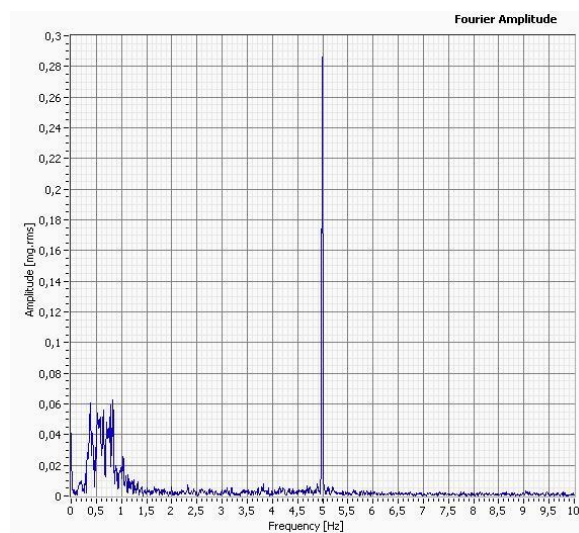
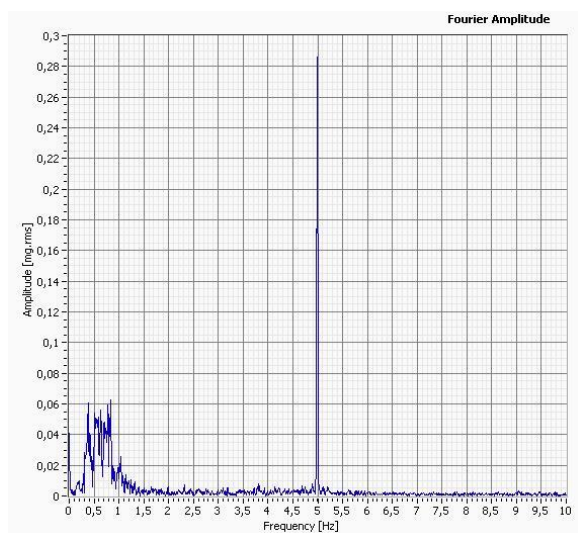


Figura C.1.11 – Espectros de aceleração para o sismo de 13 de Fevereiro de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SOL, a constituir o evento 11.

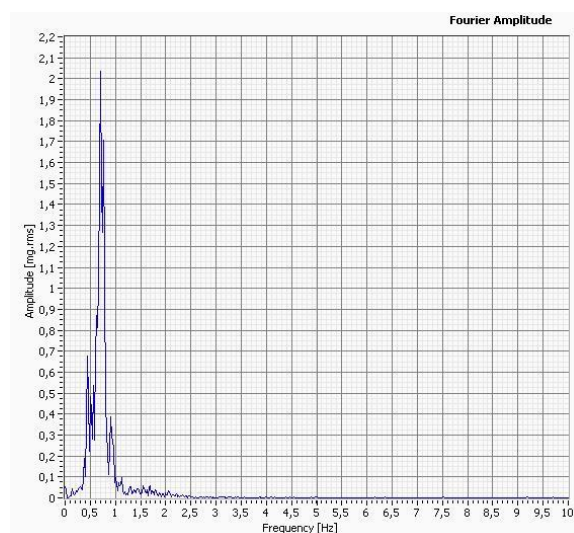
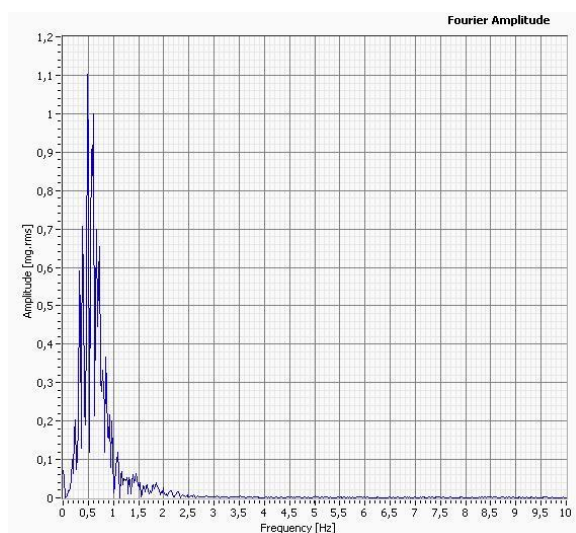


Figura C.1.12a – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 02 de Junho de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SRO, a constituir o evento 12a.

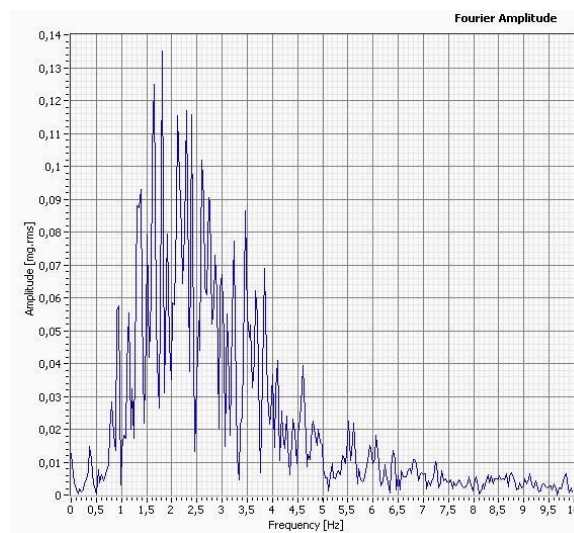
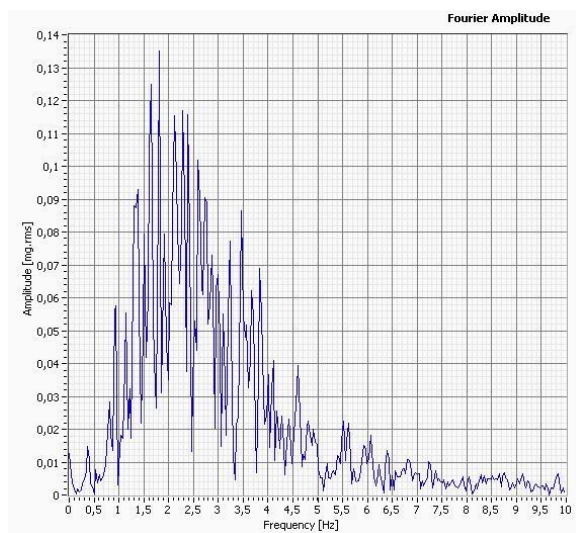


Figura C.1.12b – Espectros de aceleração para o sismo de 02 de Junho de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 12b.

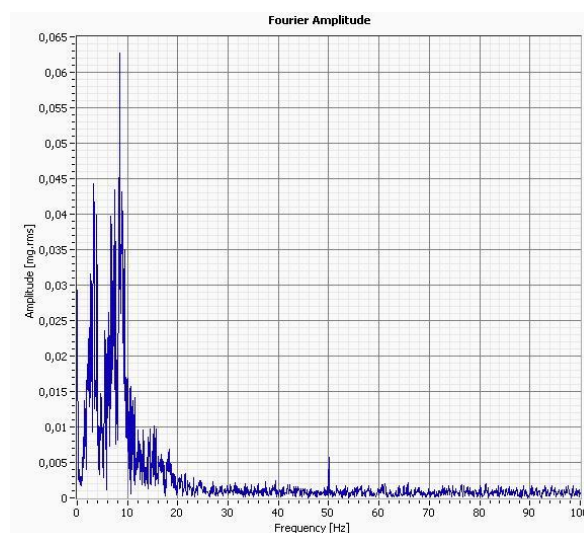
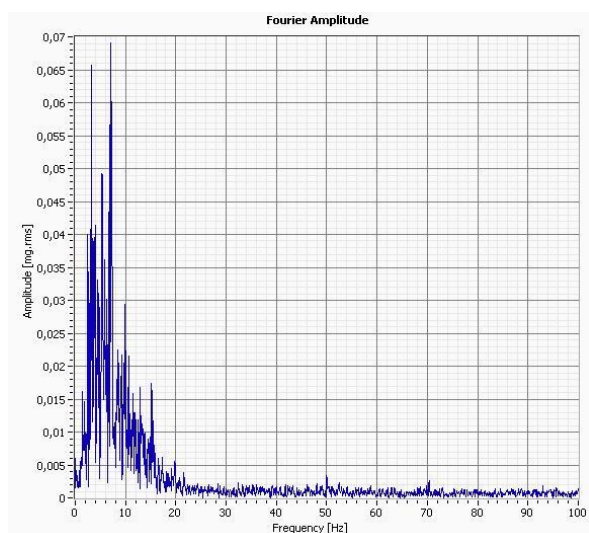


Figura C.1.13a – Espetros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 06 de Julho de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação TOP, a constituir o evento 13a.

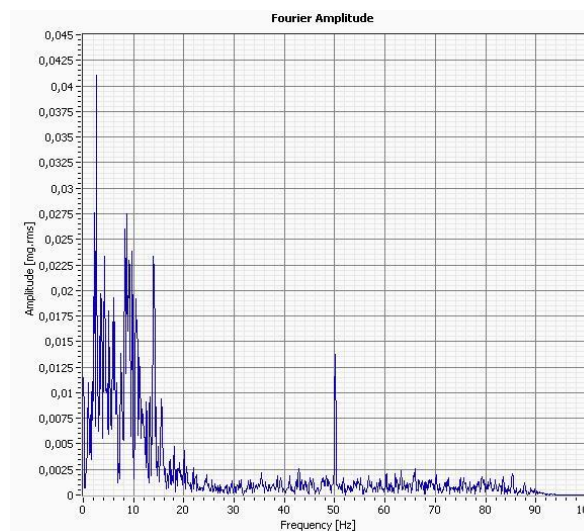
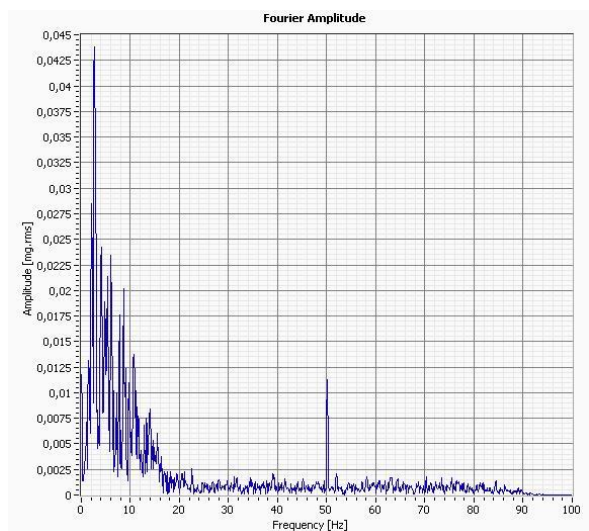


Figura C.1.13b – Espetros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 06 de Julho de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 13b.

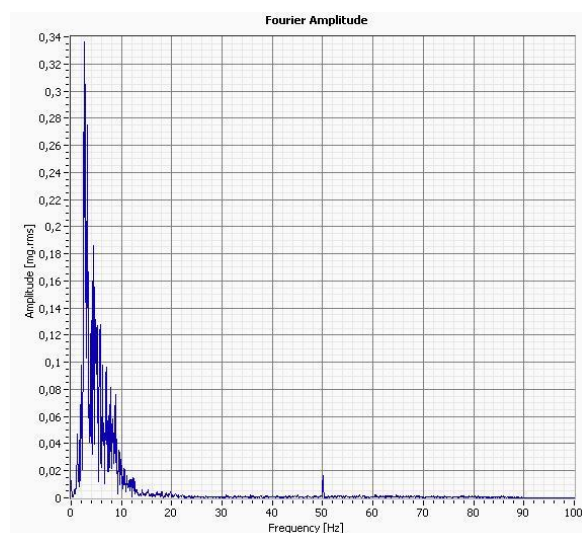
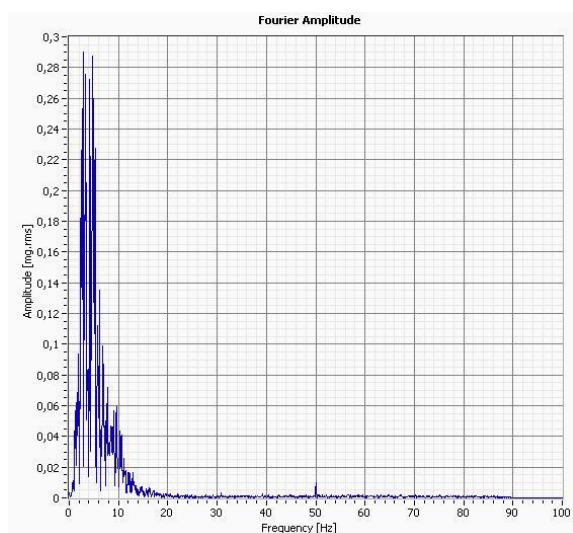


Figura C.1.13c – Espetros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 06 de Julho de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 13c.

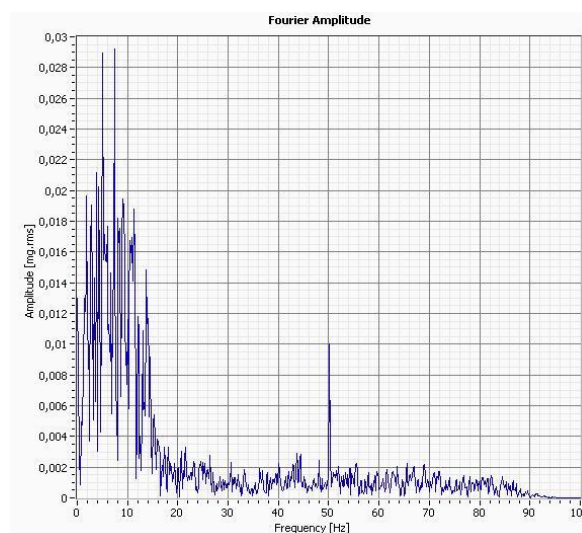
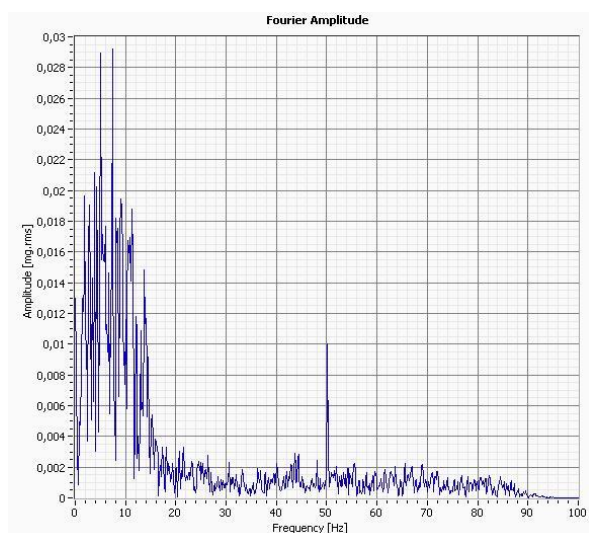


Figura C.1.14 – Espetros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 03 de Outubro de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 14.

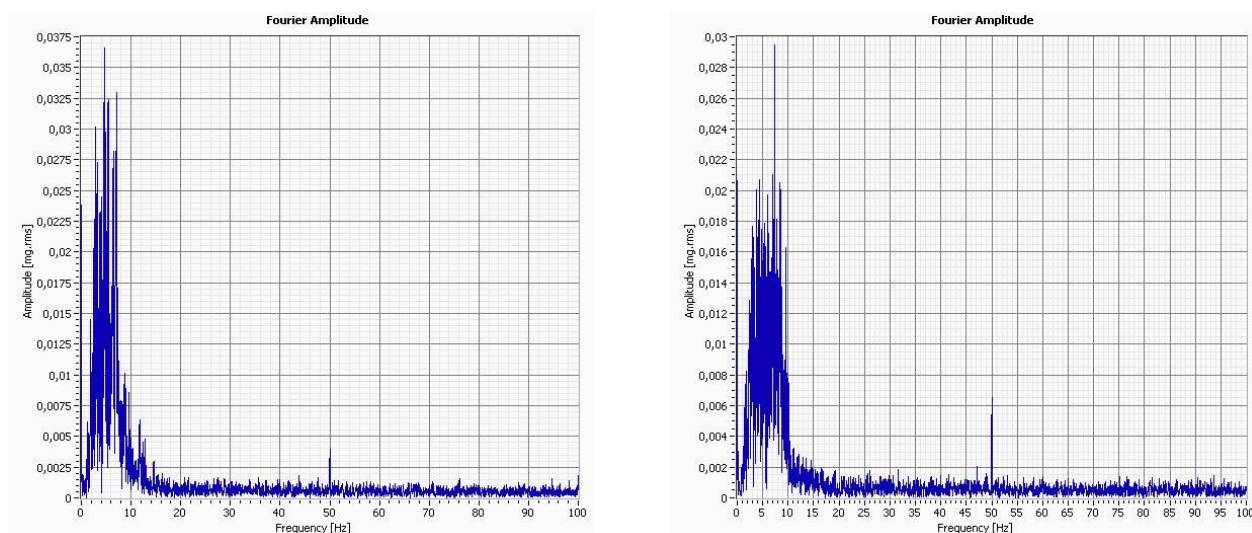


Figura C.1.15 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 12 de Outubro de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 15.

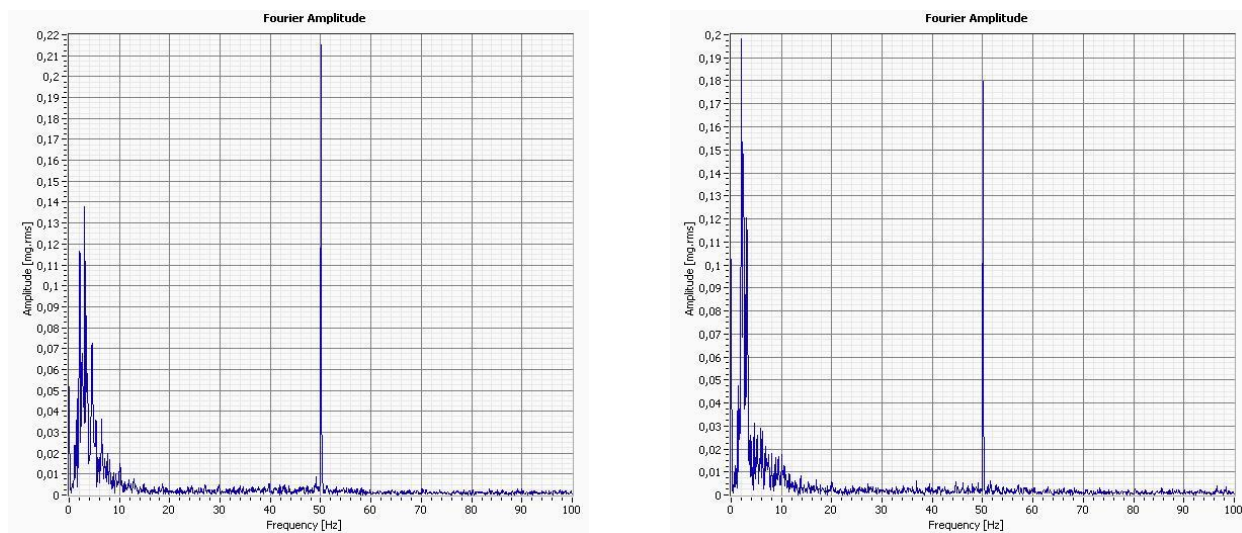


Figura C.1.16 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 23 de Dezembro de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação PVI, a constituir o evento 16.

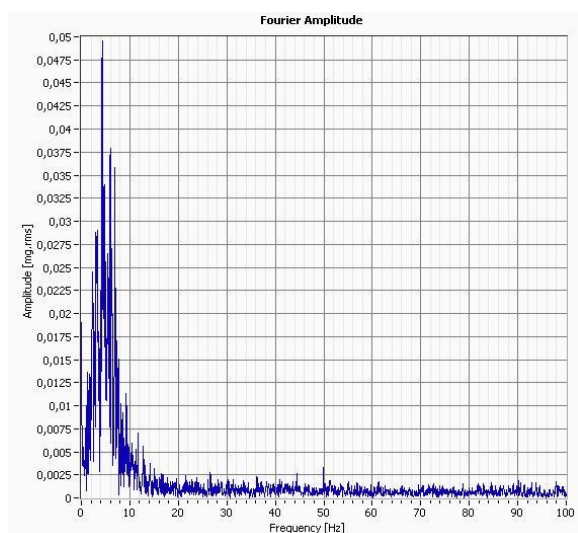


Figura C.1.17a – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 13 de Fevereiro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 17a.

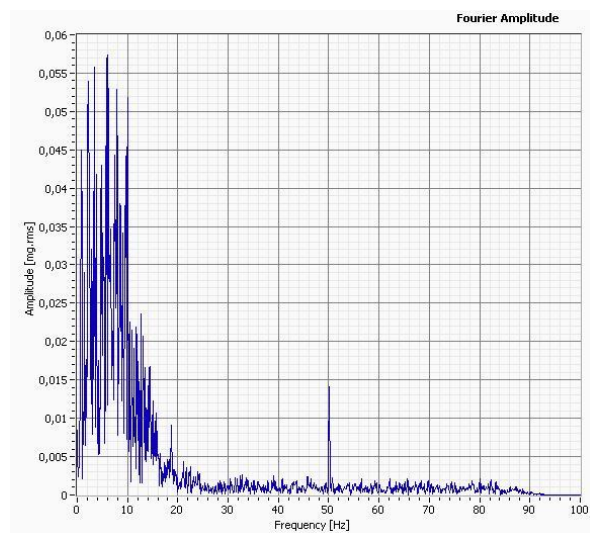
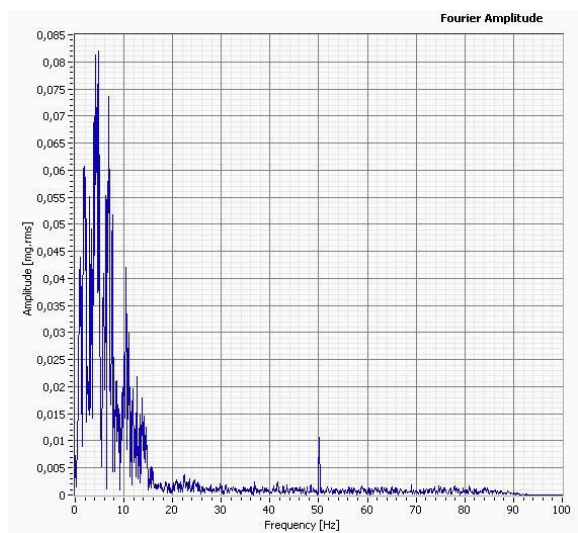


Figura C.1.17b – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 13 de Fevereiro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 17b.

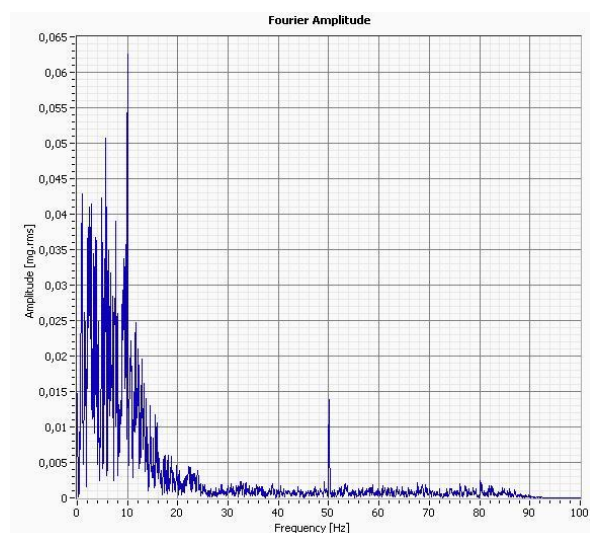
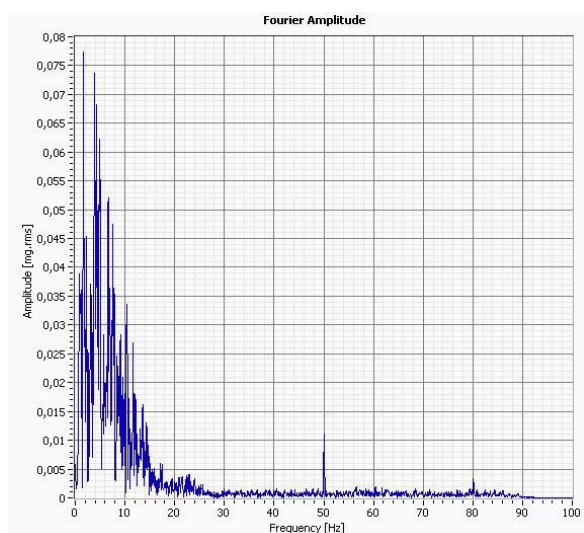


Figura C.1.18 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 13 de Fevereiro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 18.

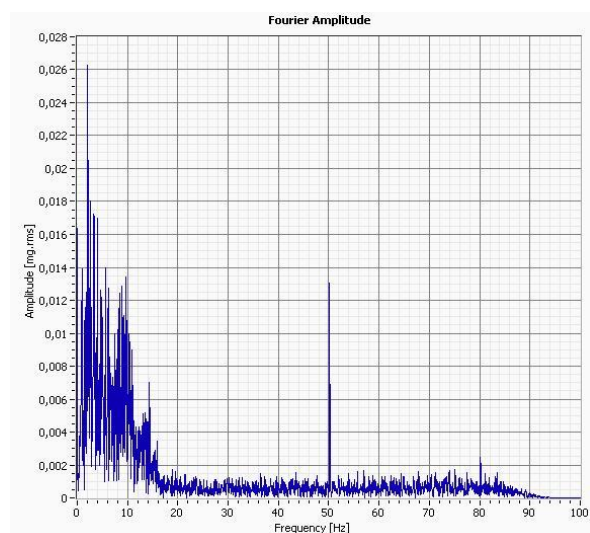
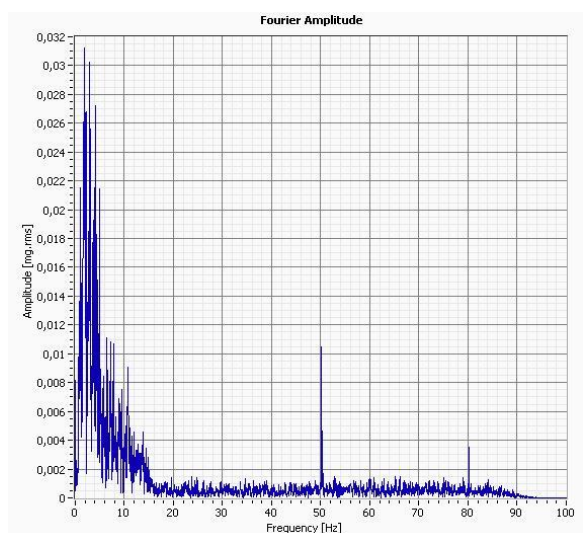


Figura C.1.19 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 13 de Fevereiro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 19.

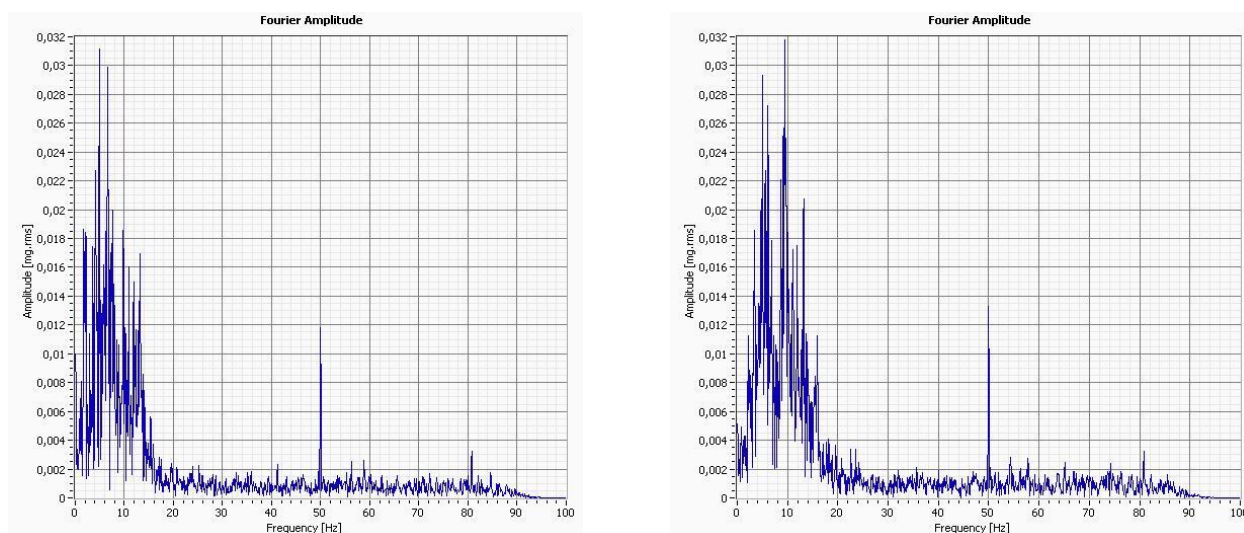


Figura C.1.20 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 13 de Fevereiro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 20.

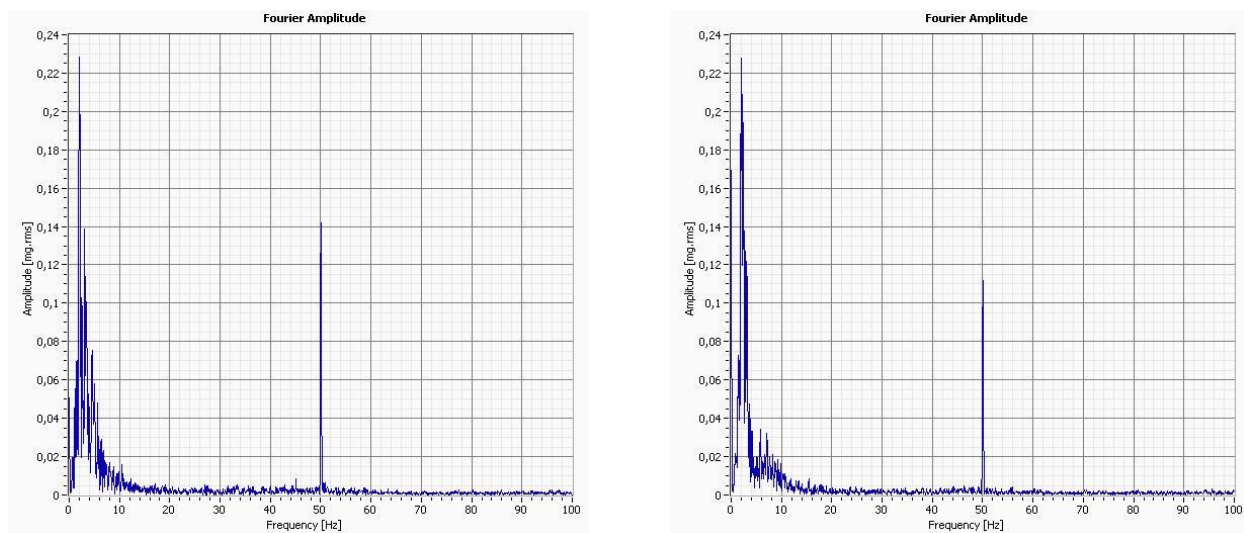


Figura C.1.21 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 11 de Março de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação PVI, a constituir o evento 21.

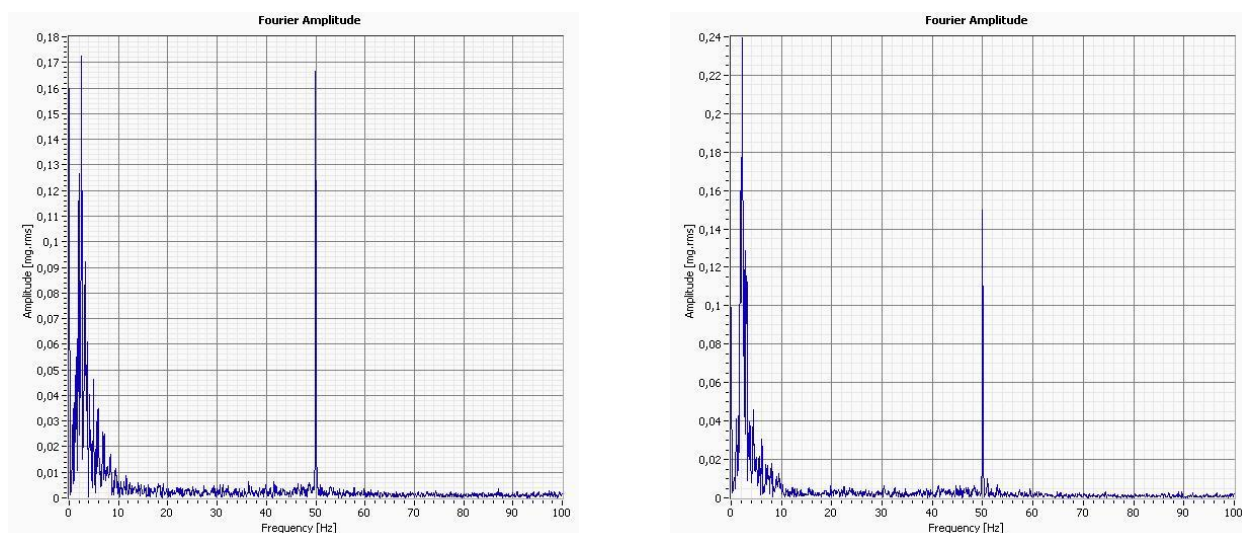


Figura C.1.22 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 10 de Junho de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação PVI, a constituir o evento 22.

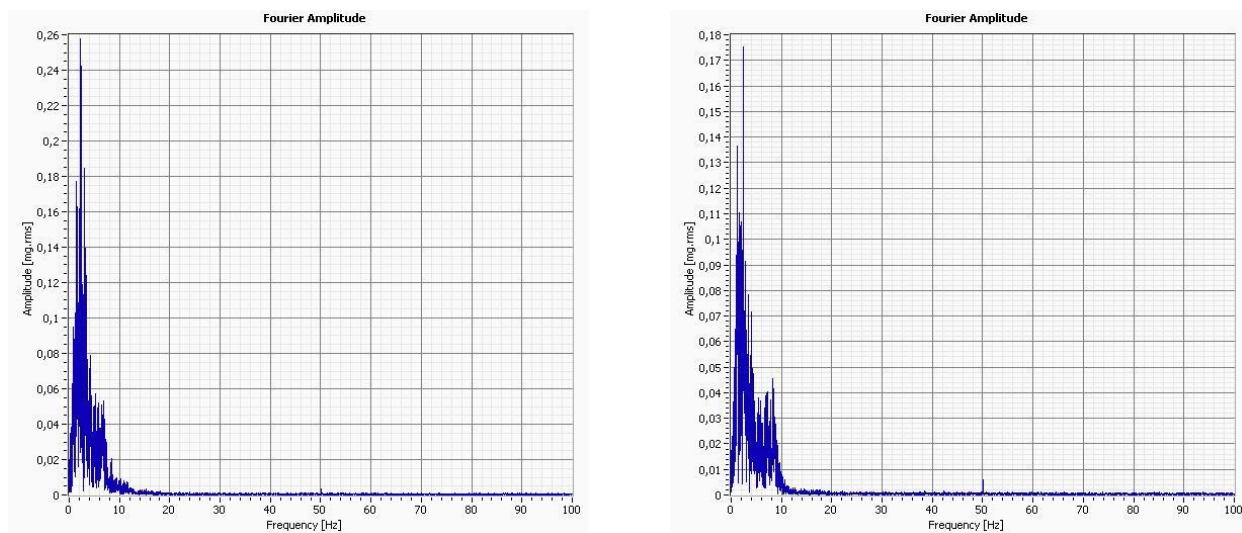


Figura C.1.23a – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 30 de Novembro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação TOP, a constituir o evento 23a.

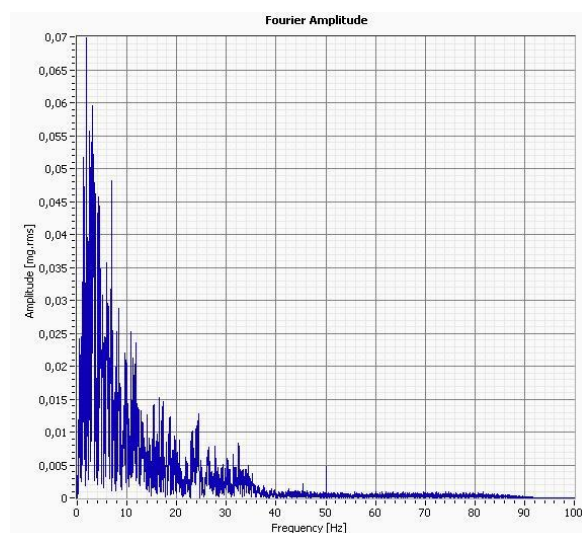
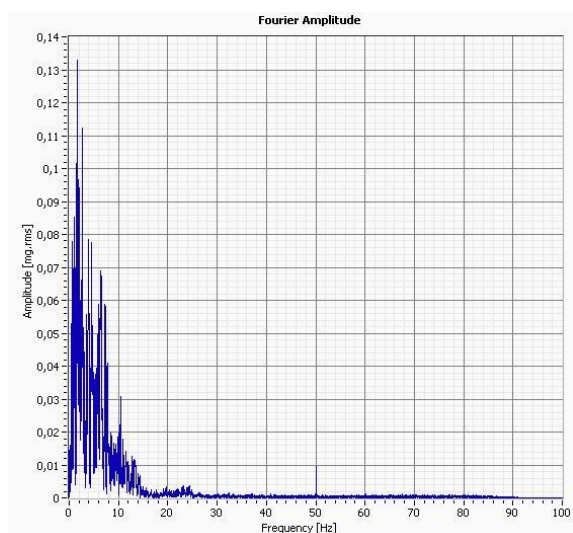


Figura C.1.23b – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 30 de Novembro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 23b.

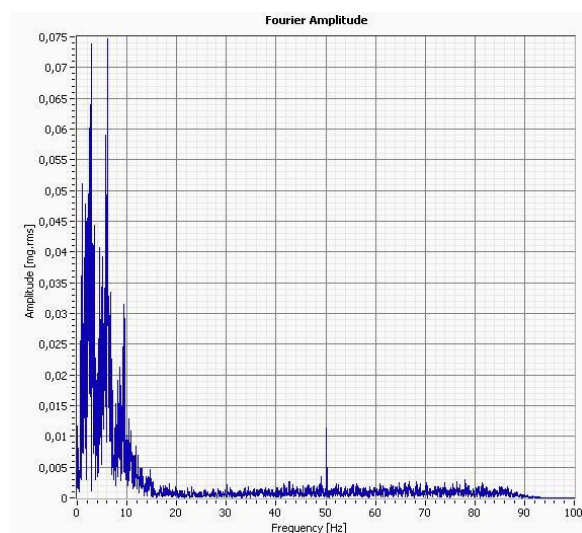
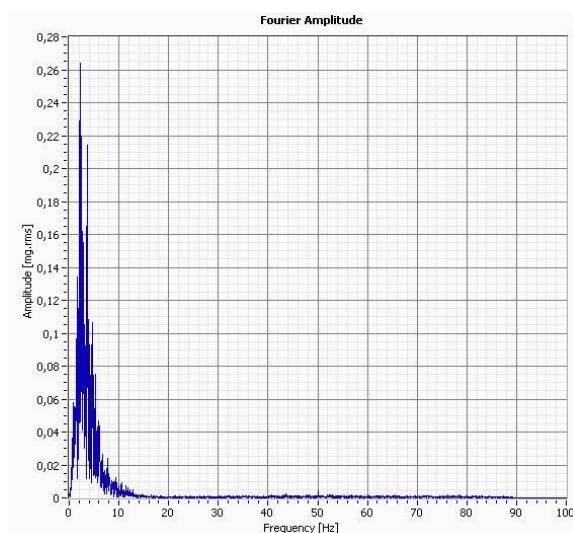


Figura C.1.23c – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 30 de Novembro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 23c.

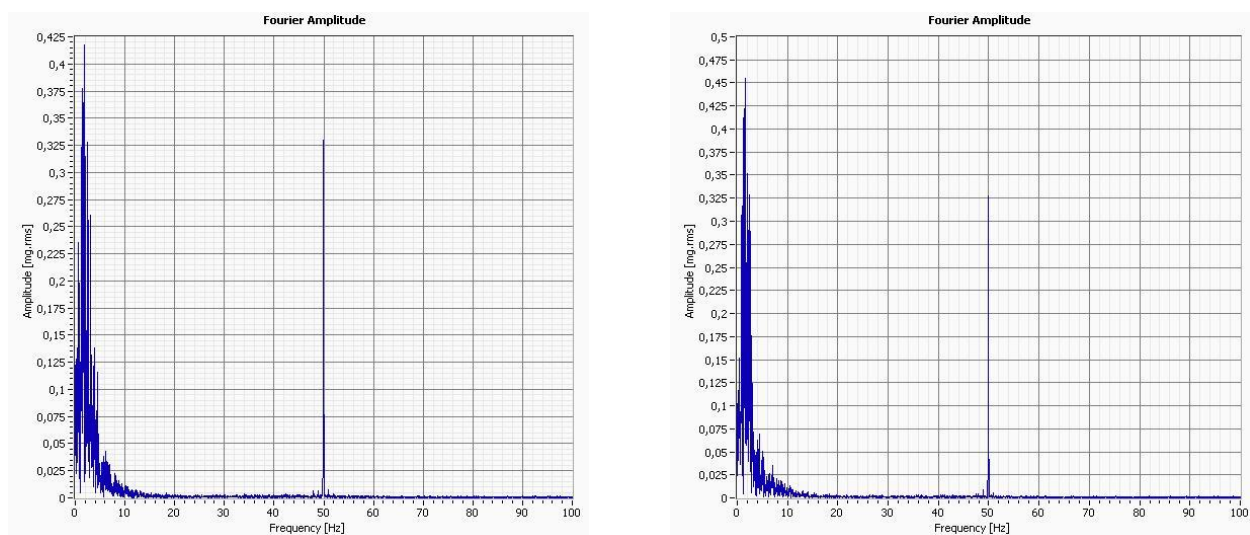


Figura C.1.24a – Espetros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 09 de Julho de 1998, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação PVI, a constituir o evento 24a.

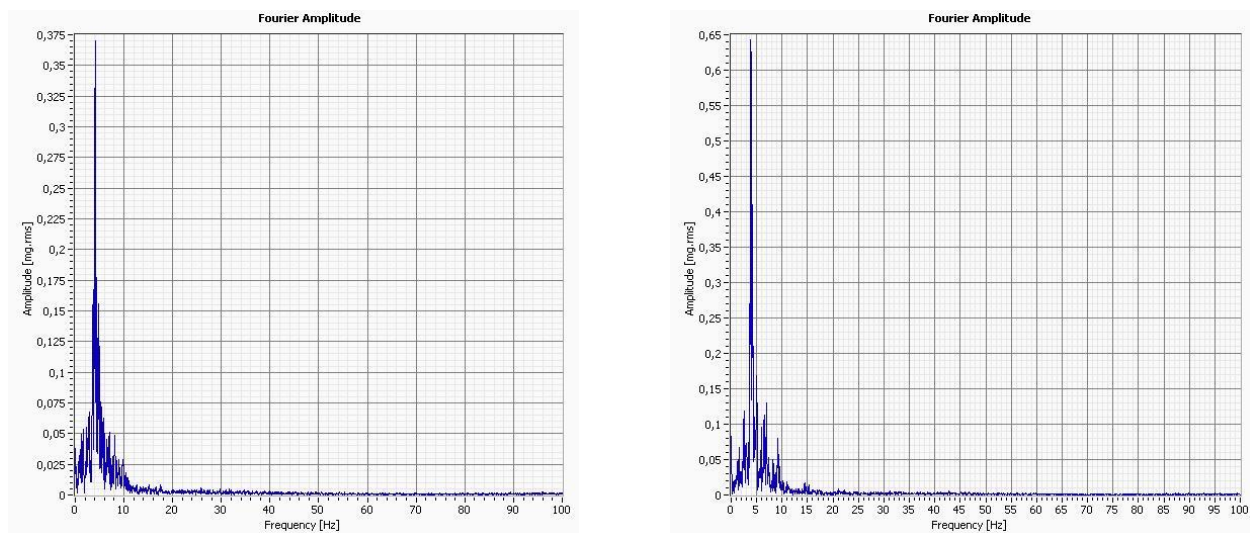


Figura C.1.24b – Espetros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 09 de Julho de 1998, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação MOS, a constituir o evento 24b.

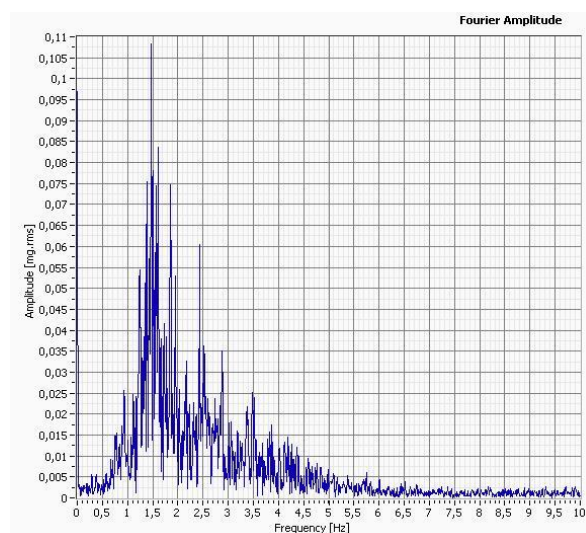
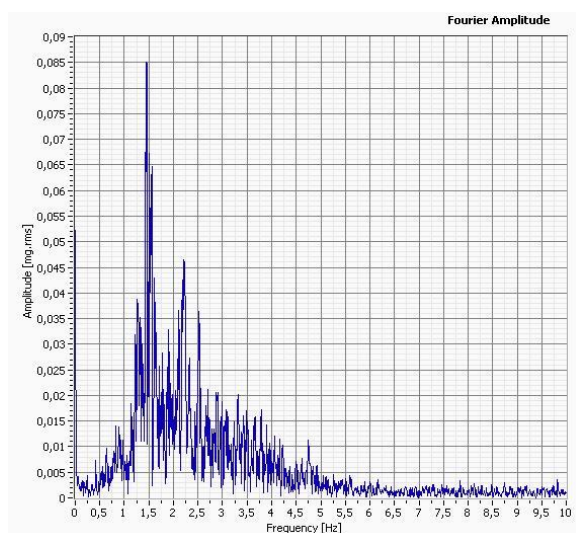


Figura C.1.25 – Espectros de aceleração para o sismo de 10 de Julho de 1998, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação MOS, a constituir o evento 25.

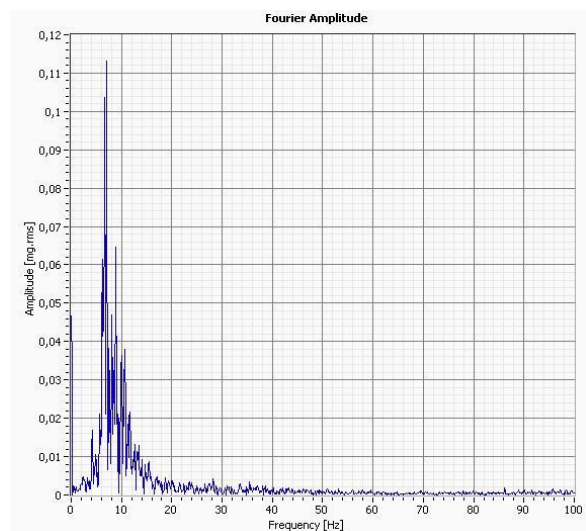
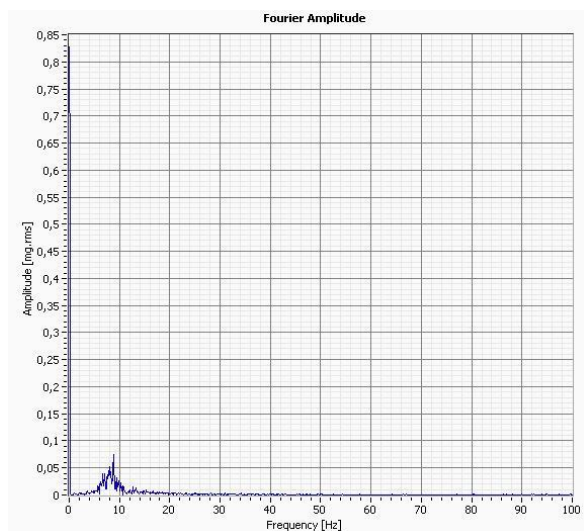


Figura C.1.26 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 18 de Julho de 1998, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação HSC, a constituir o evento 26.

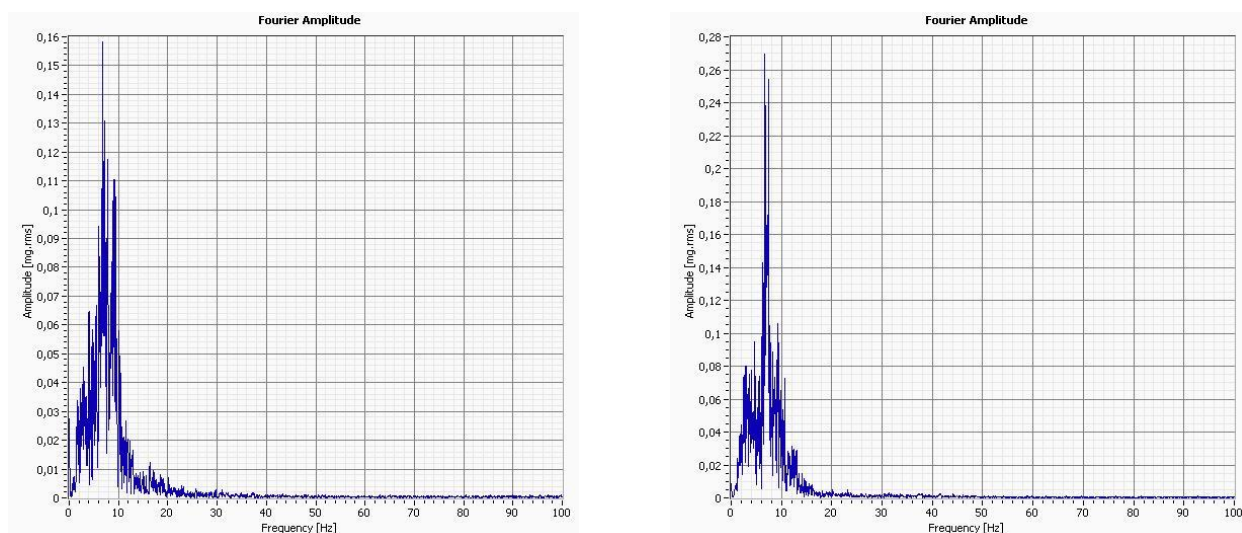


Figura C.1.27 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 18 de Julho de 1998, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação HSC, a constituir o evento 27.

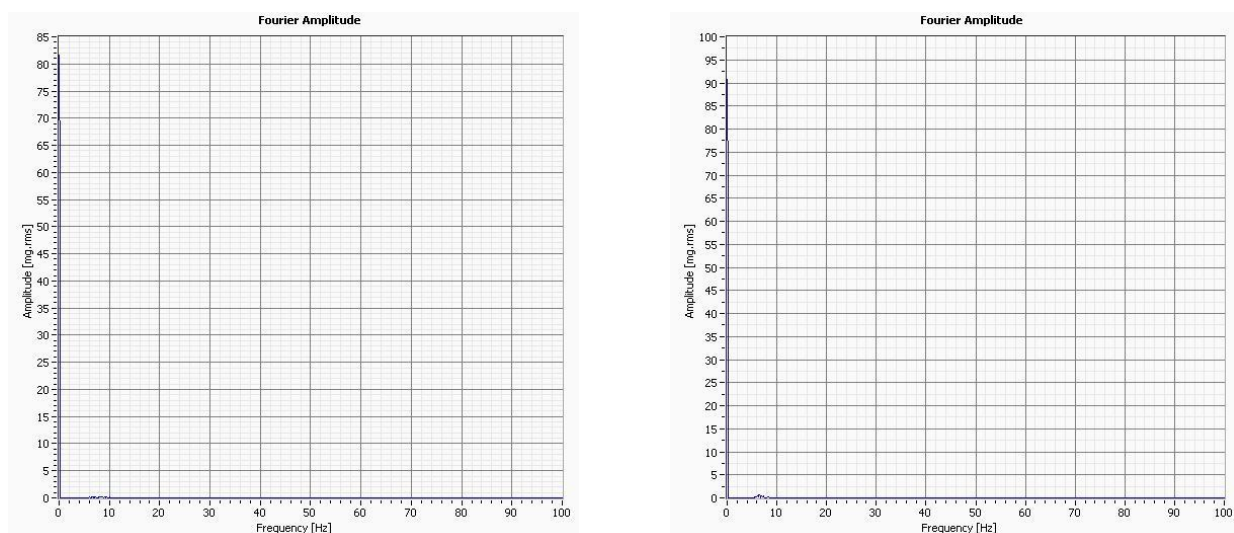


Figura C.1.28 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 20 de Julho de 1998, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação HSC, a constituir o evento 28.

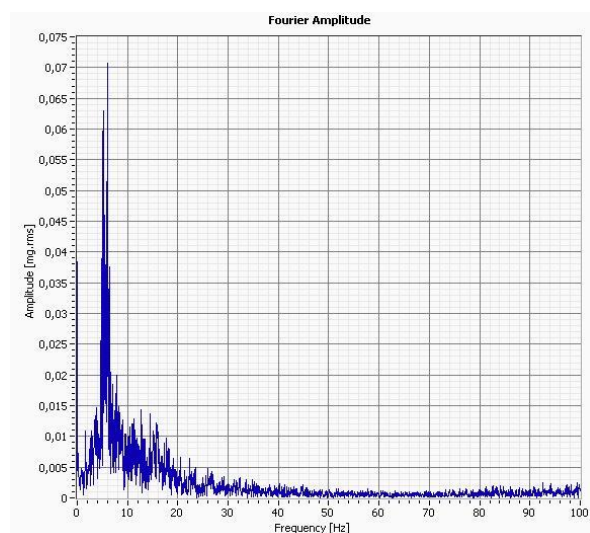
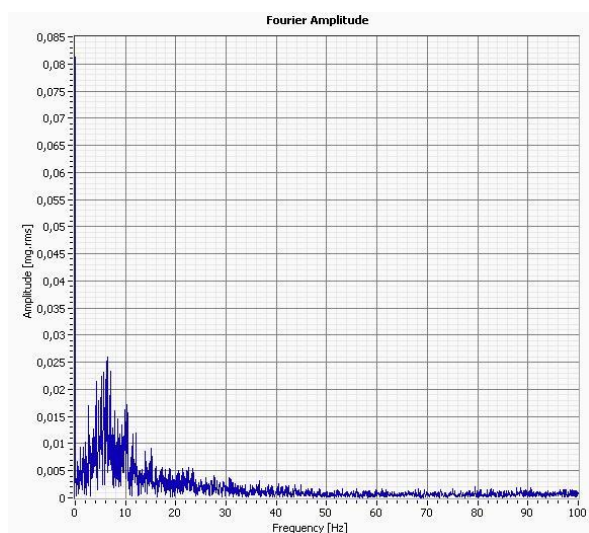


Figura C.1.29 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 31 de Agosto de 1998, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação HHT, a constituir o evento 29.

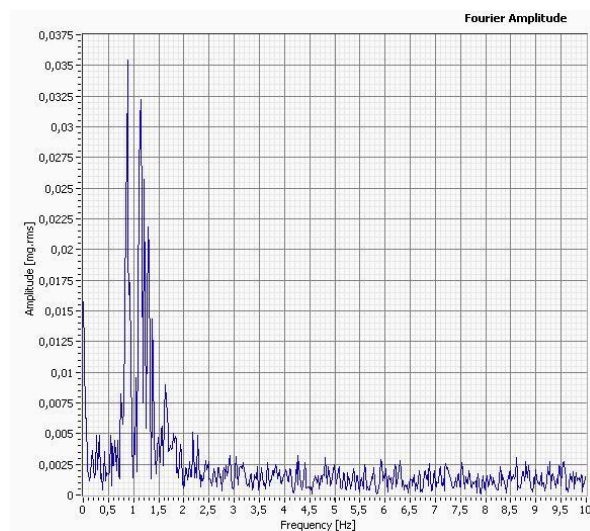
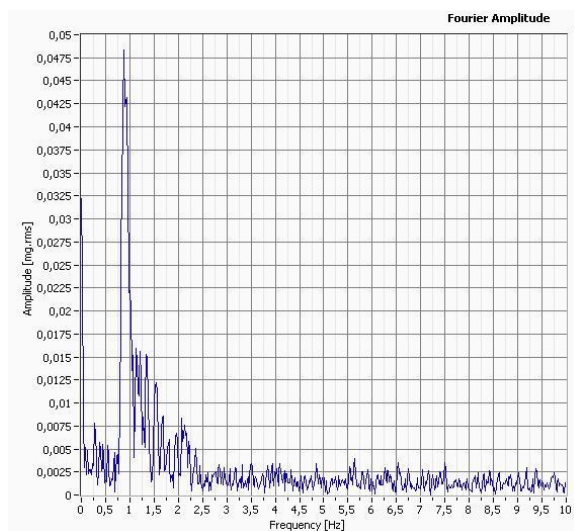


Figura C.1.30 – Espectros de aceleração para o sismo de 14 de Julho de 1997, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação MOS, a constituir o evento 30.

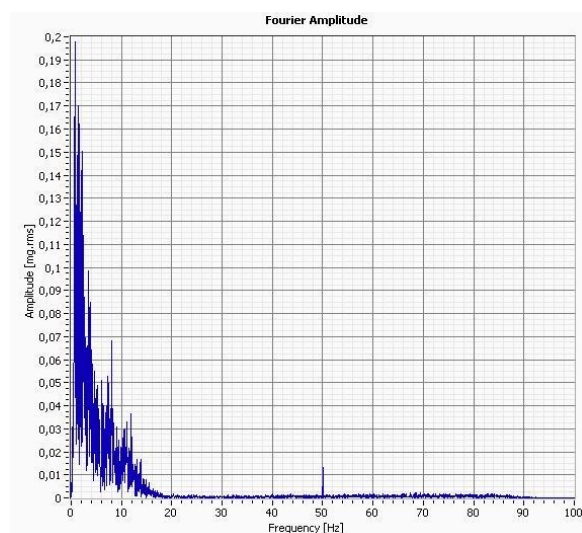
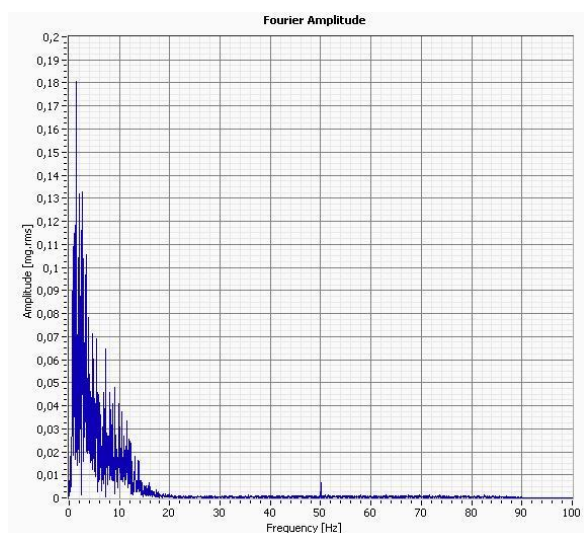


Figura C.1.31 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 30 de Novembro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SMJ, a constituir o evento 31.

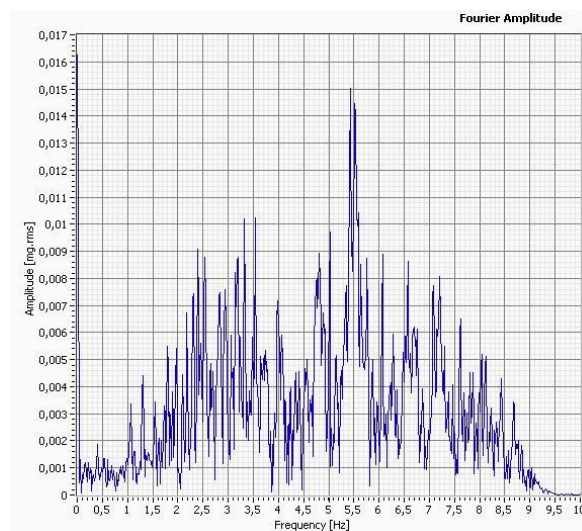
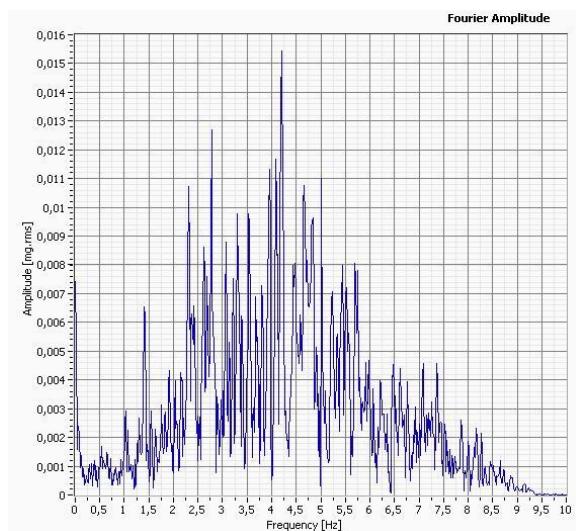


Figura C.1.32 – Espectros de aceleração para o sismo de 05 de Novembro de 2003, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 32.

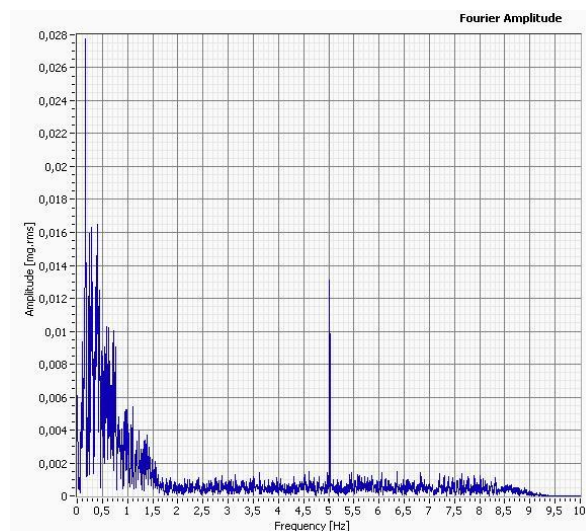
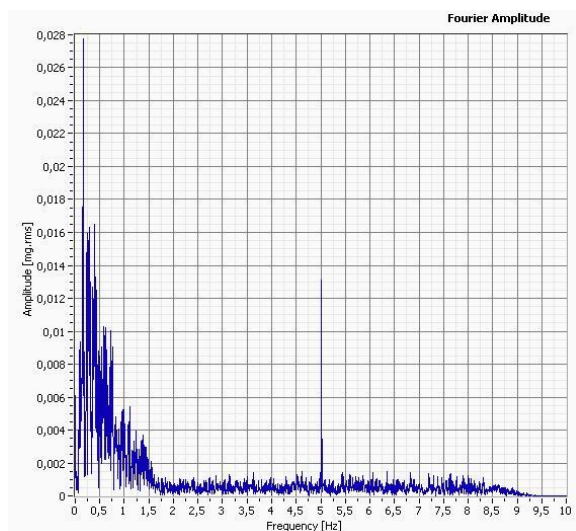


Figura C.1.33 – Espectros de aceleração para o sismo de 23 de Dezembro de 2003, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 33. Sem conteúdo nas altas frequências para ajuste linear.

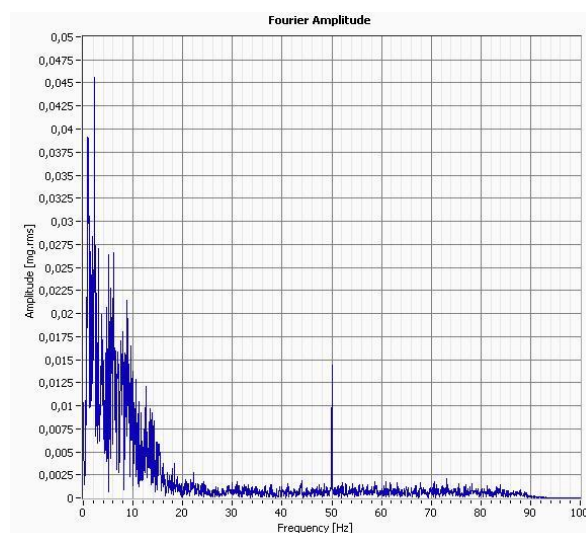
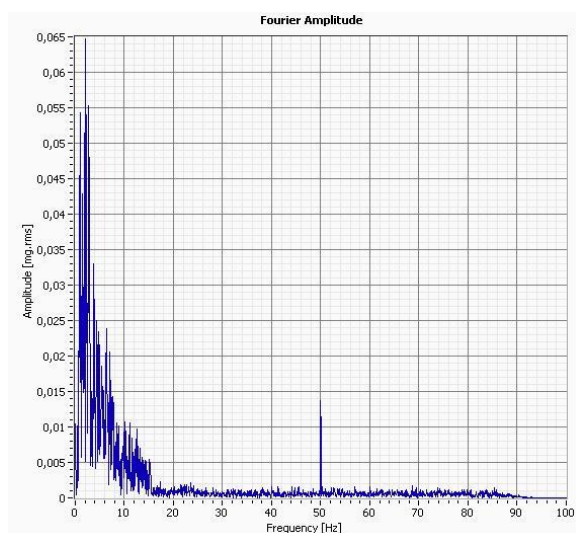


Figura C.1.34 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 01 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 34.

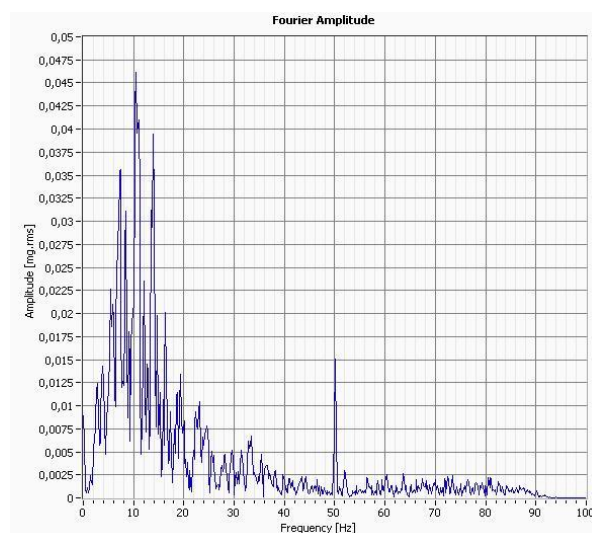
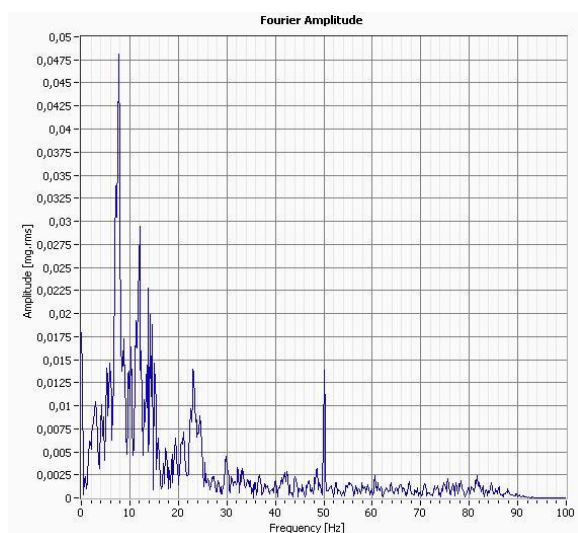


Figura C.1.35 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 17 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 35.

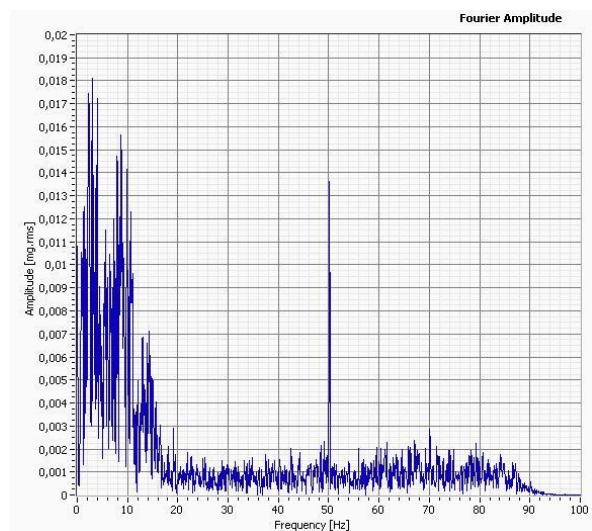
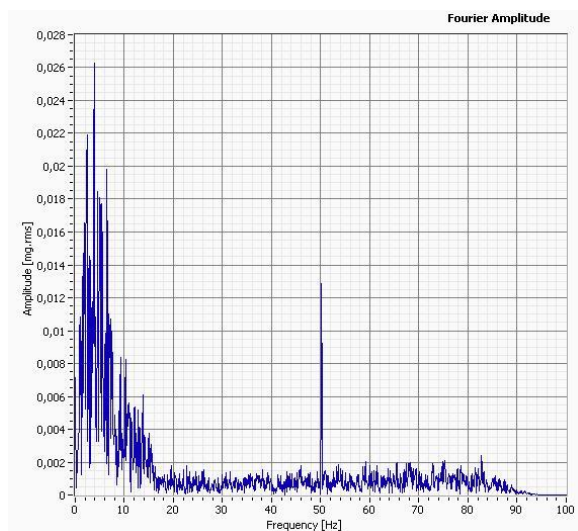


Figura C.1.36 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 18 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 36.

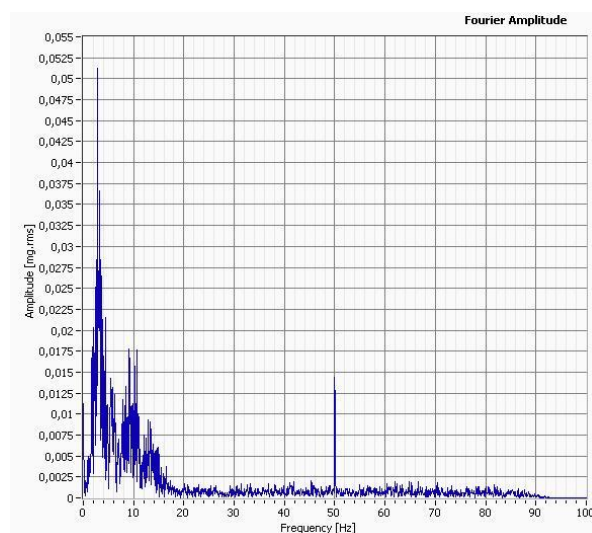
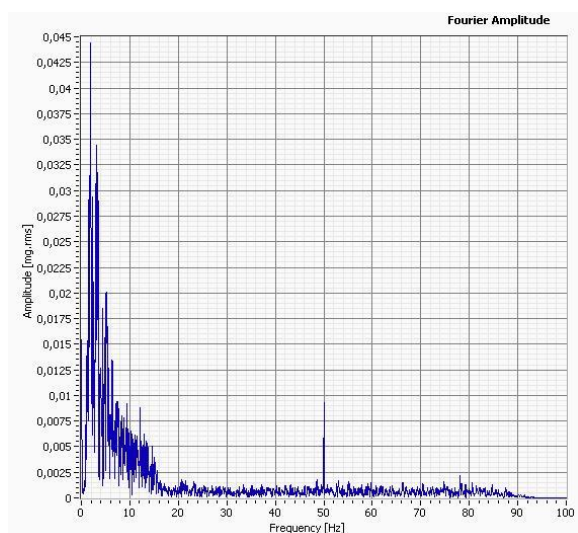


Figura C.1.37 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 27 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 37.

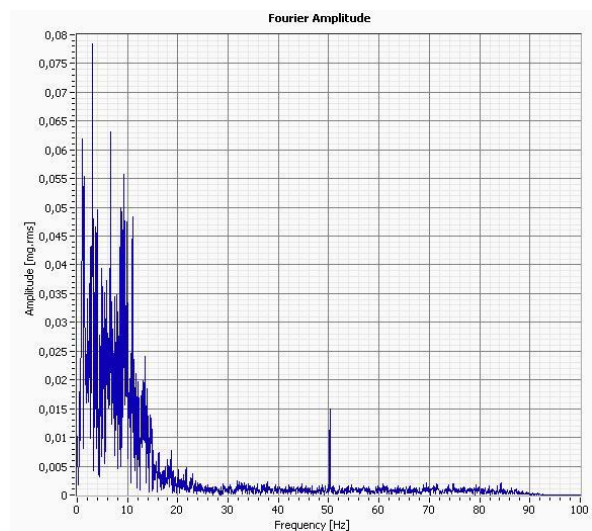
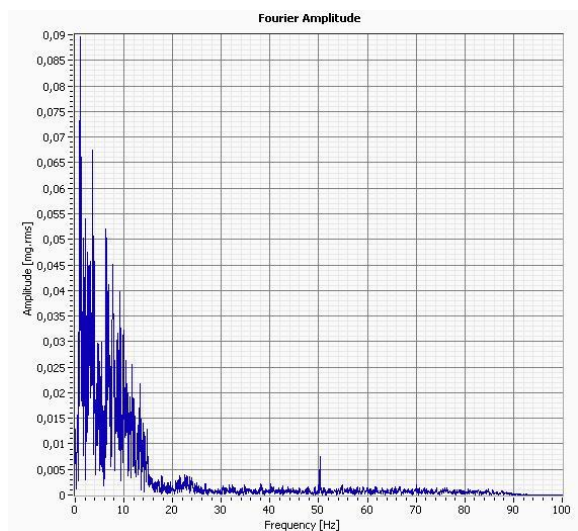


Figura C.1.38 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 28 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 38.

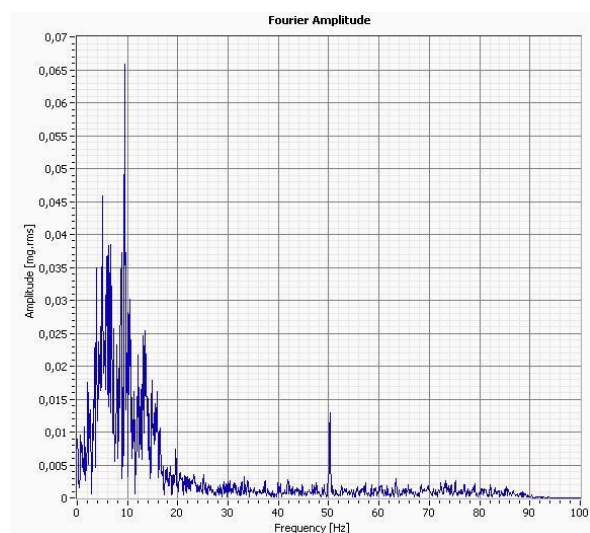
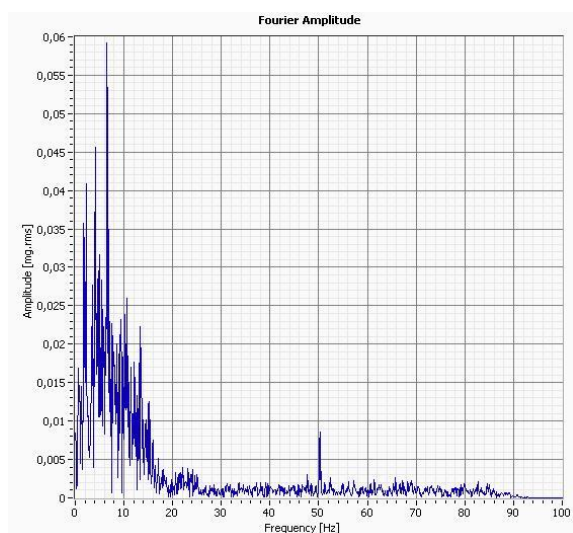


Figura C.1.39 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 28 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 39.

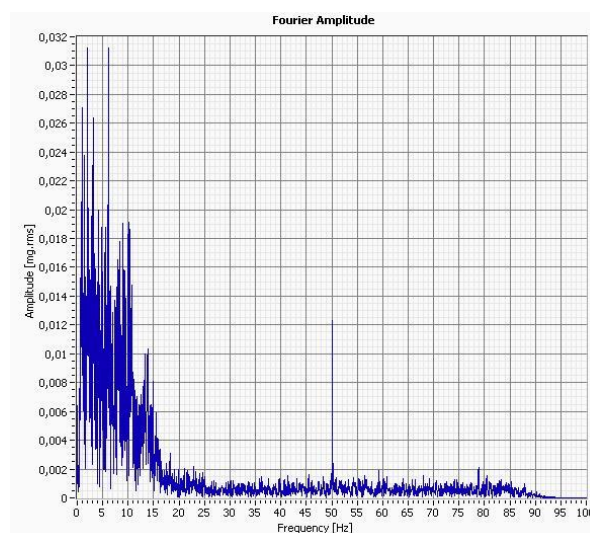
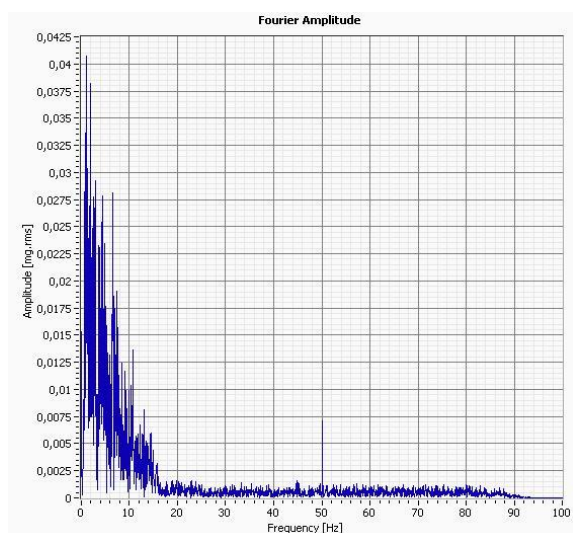


Figura C.1.40 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 28 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 40.

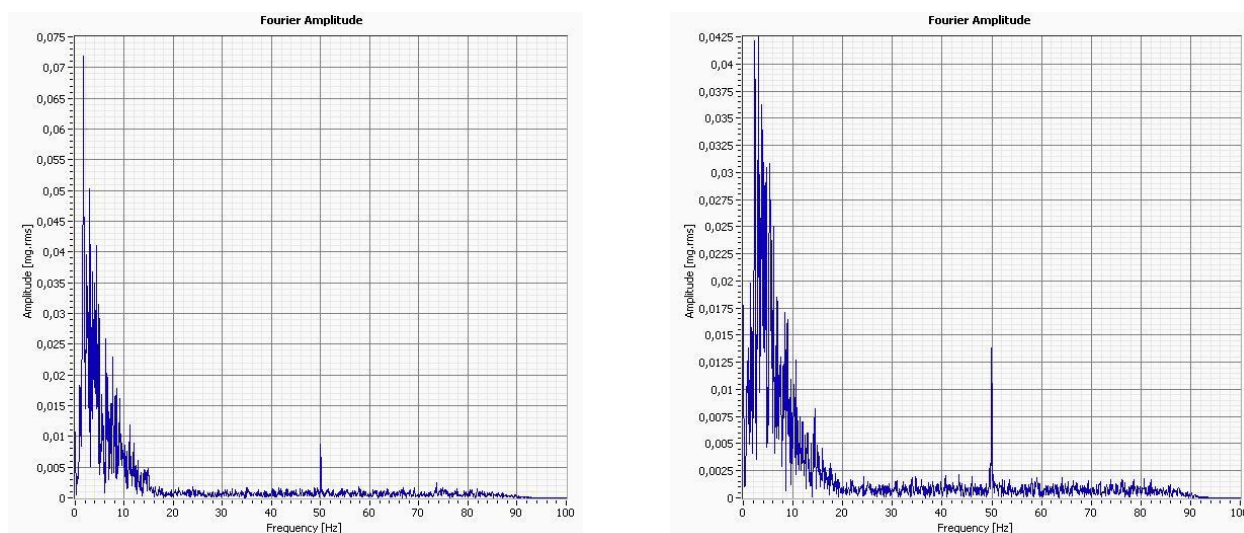


Figura C.1.41 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 31 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 41.

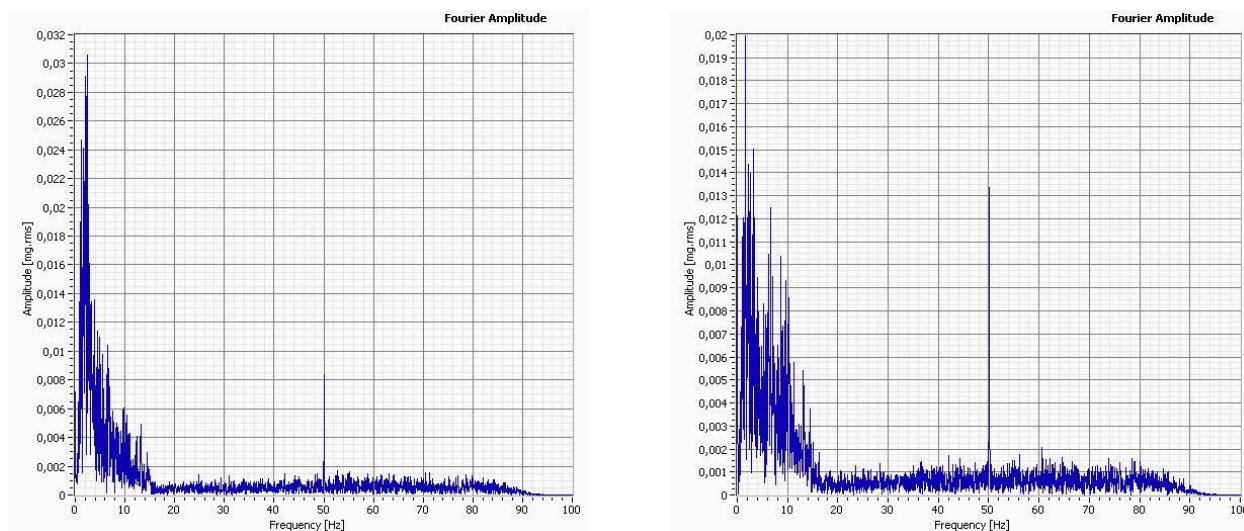


Figura C.1.42 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 03 de Fevereiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 42.

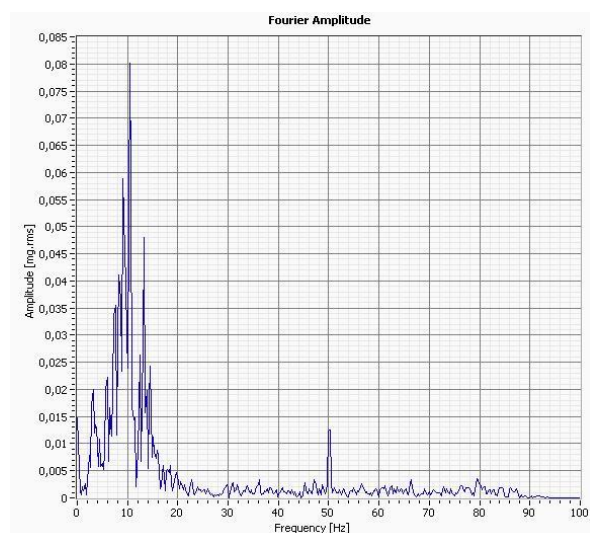
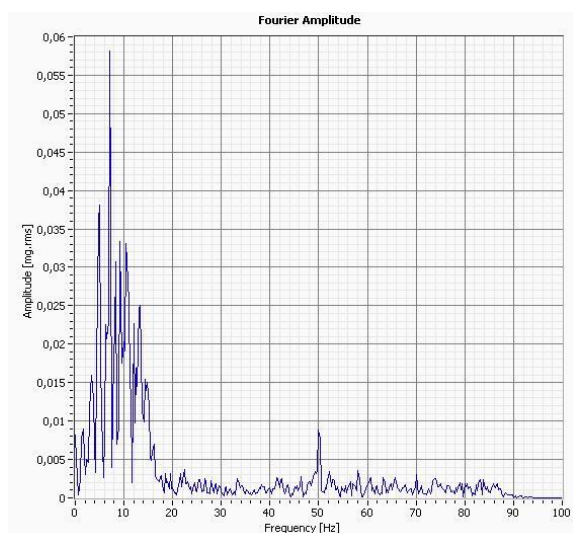


Figura C.1.43 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 07 de Fevereiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 43.

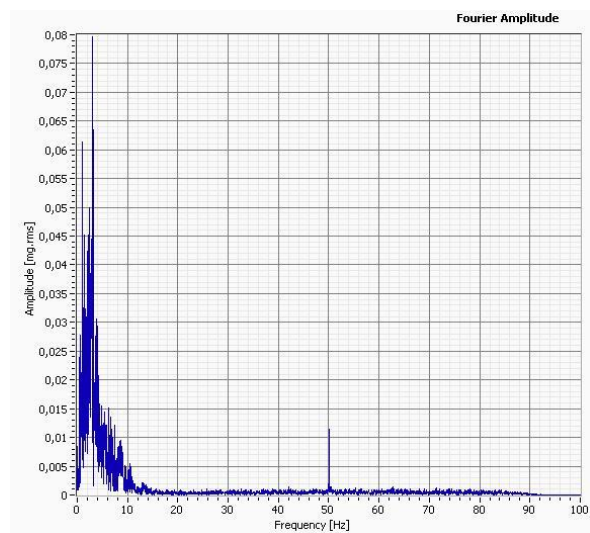
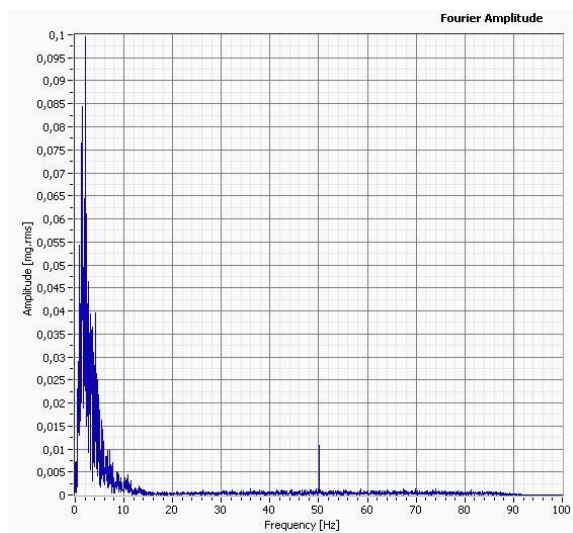


Figura C.1.44 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 25 de Abril de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 44.

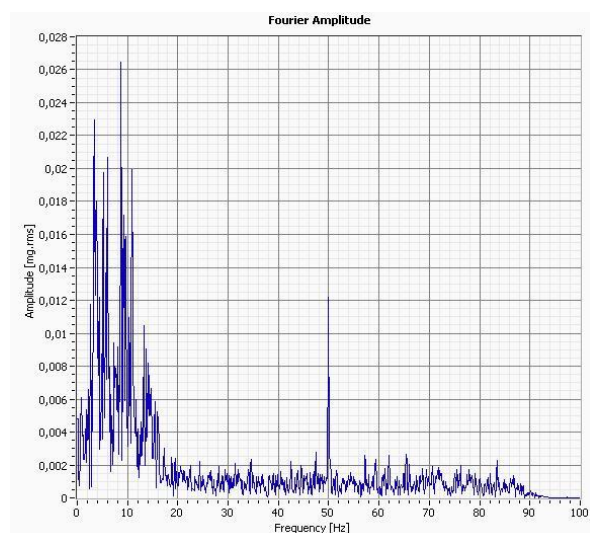
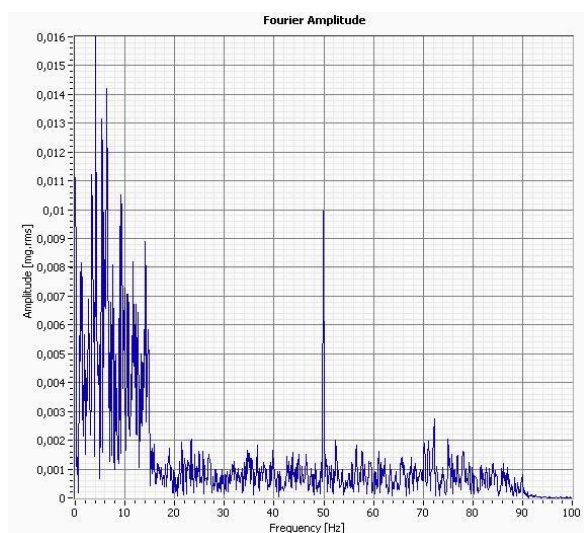


Figura C.1.45 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 01 de Janeiro de 2005, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 45.

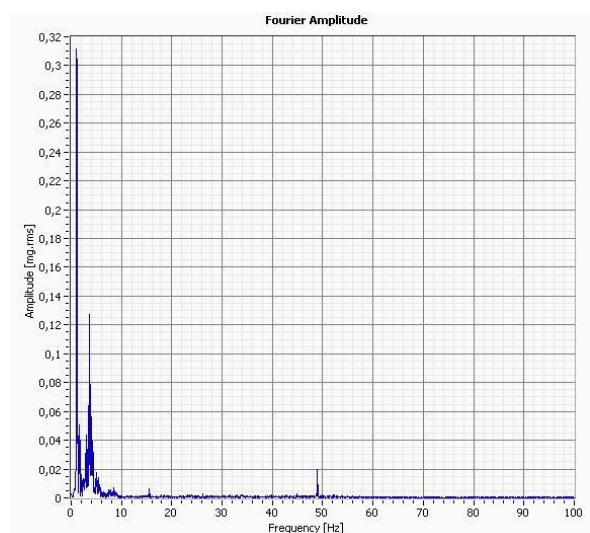
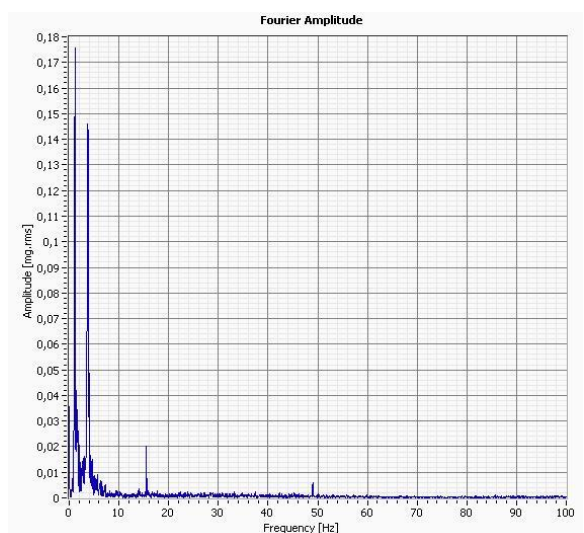


Figura C.1.46 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 05 de Janeiro de 2005, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SOL, a constituir o evento 46.

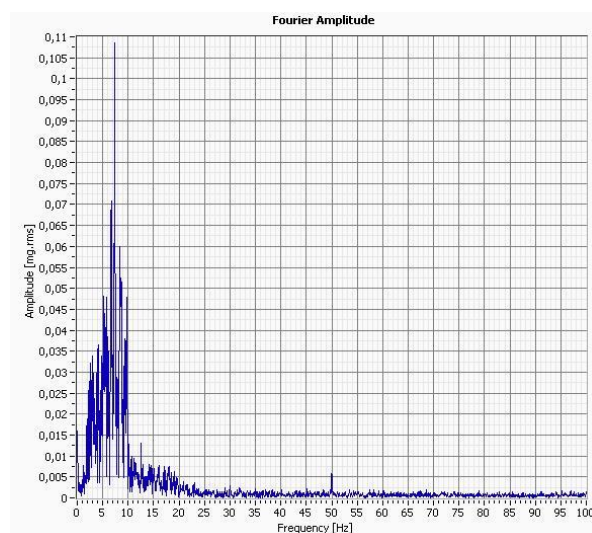
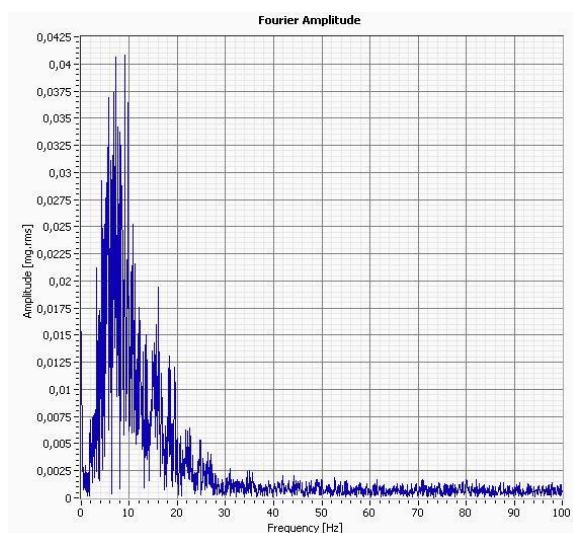


Figura C.1.47a – Espetros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 05 de Janeiro de 2005, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 47a.

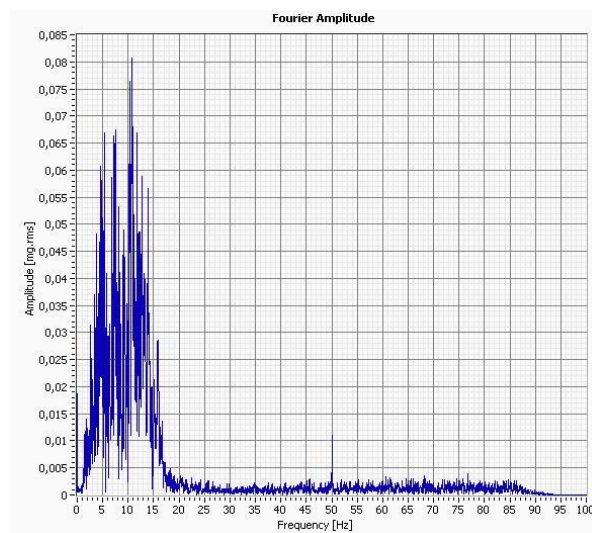
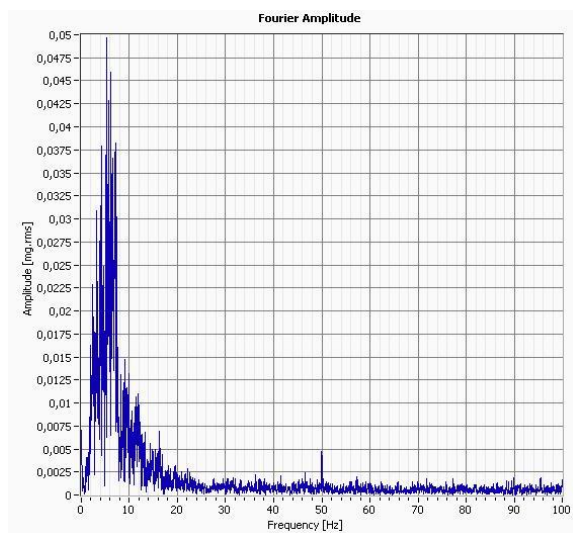


Figura C.1.47b – Espetros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 05 de Janeiro de 2005, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SMJ, a constituir o evento 47b.

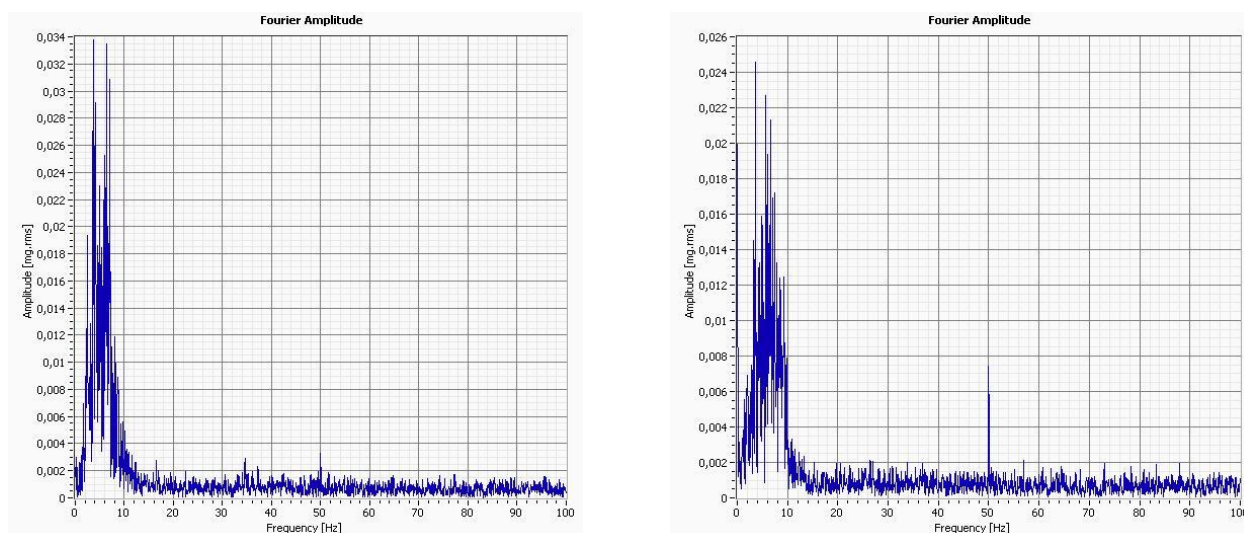


Figura C.1.48 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 13 de Dezembro de 2005, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 48.

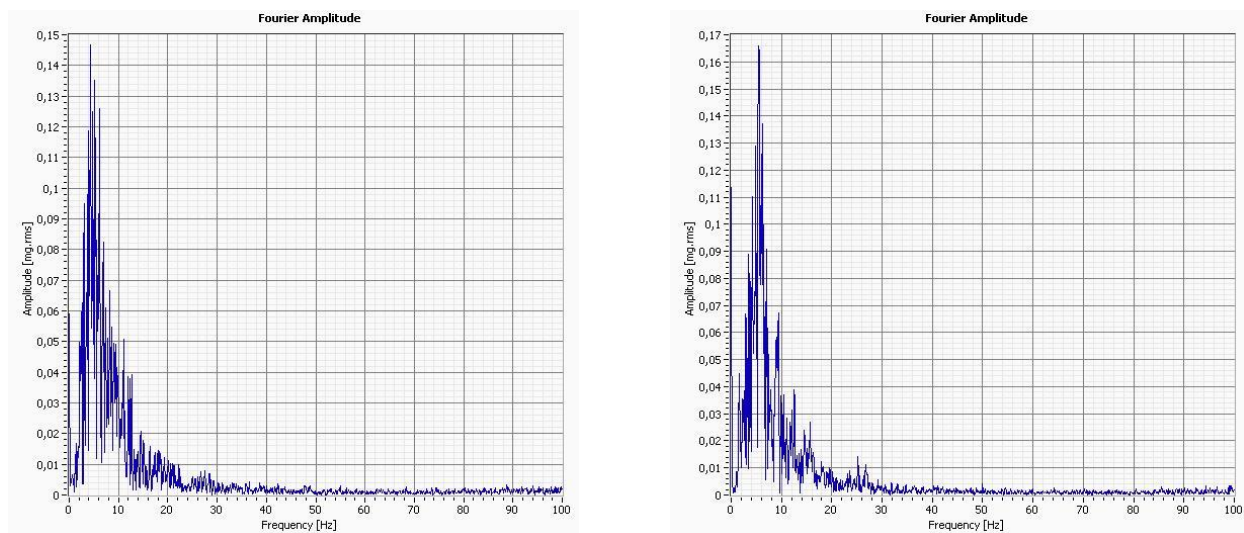


Figura C.1.49a – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 05 de Outubro de 2006, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 49a.

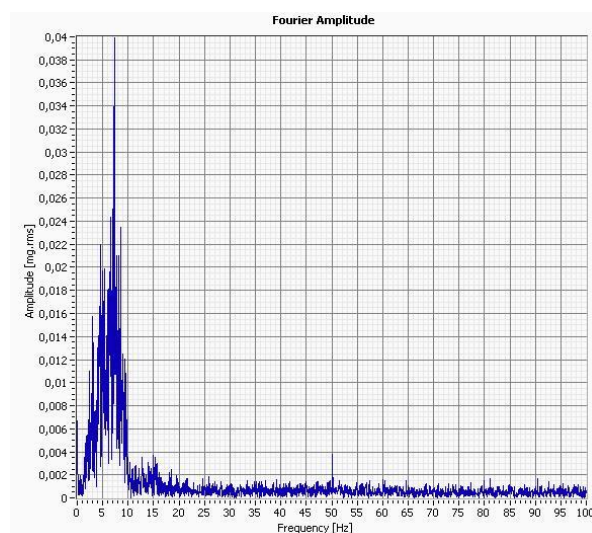
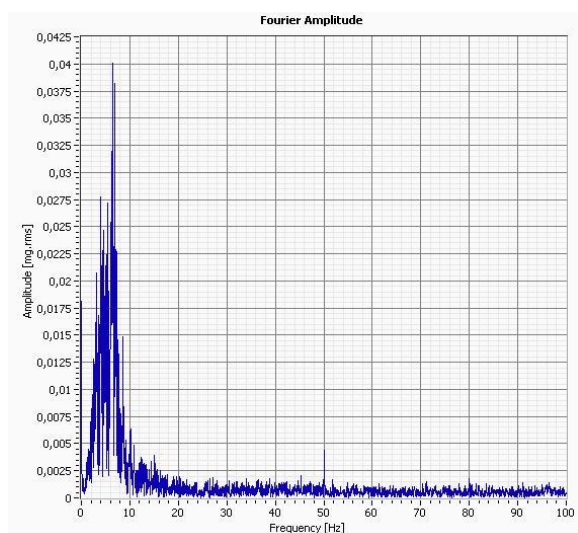


Figura C.1.49b – Espetros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 05 de Outubro de 2006, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação HPT, a constituir o evento 49b.

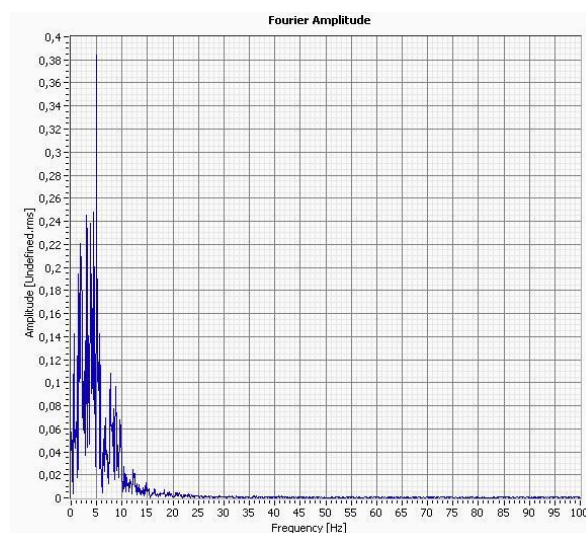
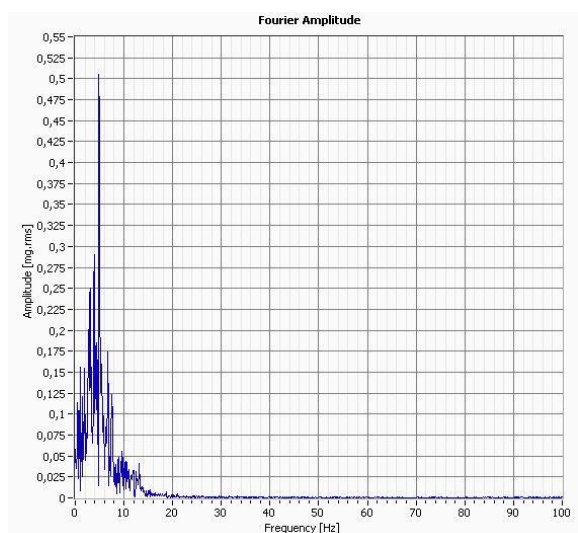


Figura C.1.50 – Espetros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 27 de Junho de 1997, para a componente horizontal X, da estação LR1, a constituir o evento 50.

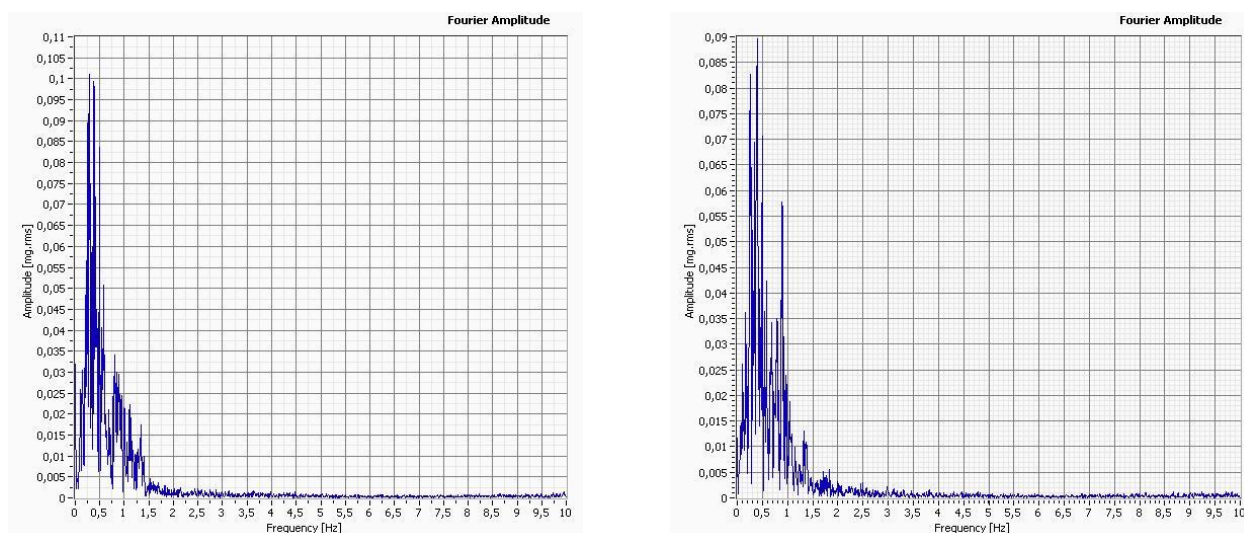


Figura C.1.51 – Espectros de aceleração para o sismo de 08 de Agosto de 1997, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação LR1, a constituir o evento 51.

C.2 Gerados pelo Excel

São apresentados os mesmos gráficos obtidos pelo LNEC-SPA transpostos para o Excel, da rede acelerográfica do arquipélago dos Açores, entre 1969-2006, em solos duros, registados em estações implementadas em piso térreo, para sismos com magnitudes entre 2,1 e 5,3, representando apenas o contributo das ondas S, com a respetiva seleção de conteúdos nas altas frequências e representação auxiliar gráfica do decaimento espectral.

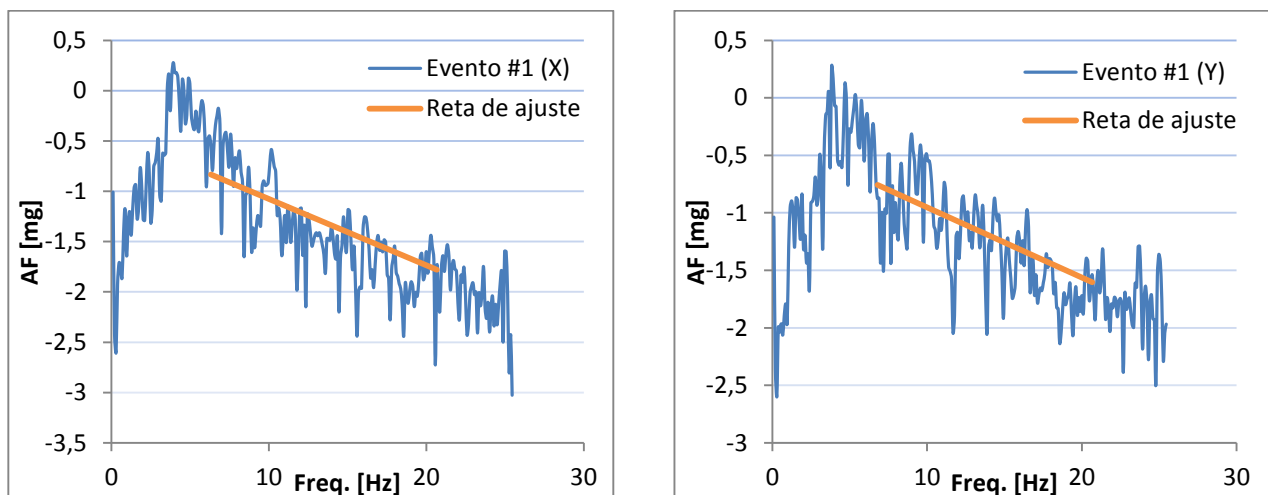


Figura C.2.1 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 21 de Julho de 1999, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação MOS, a constituir o evento 1.

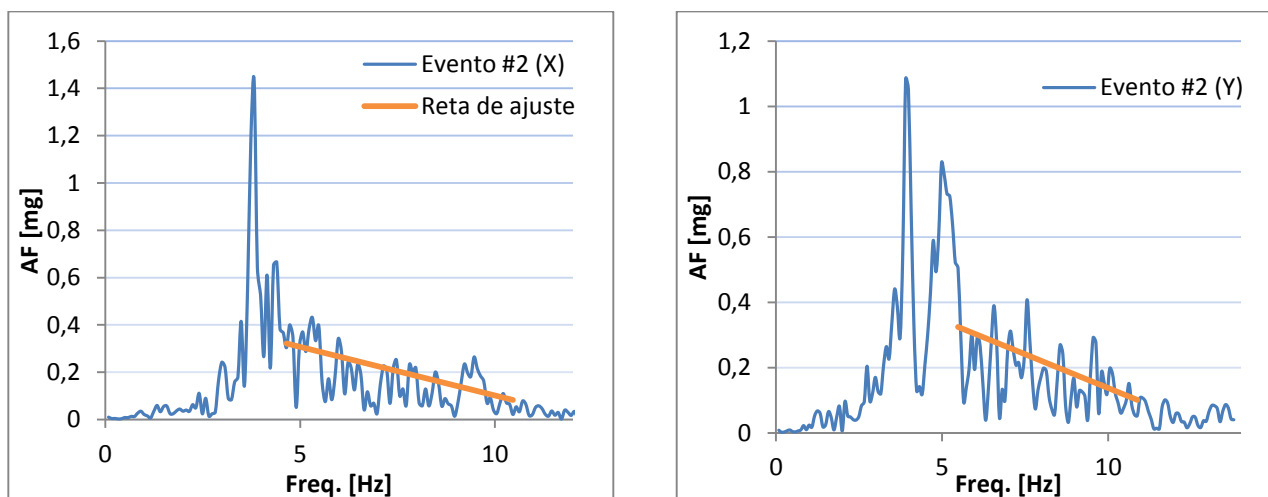


Figura C.2.2 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 21 de Julho de 1999, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação MOS, a constituir o evento 2.

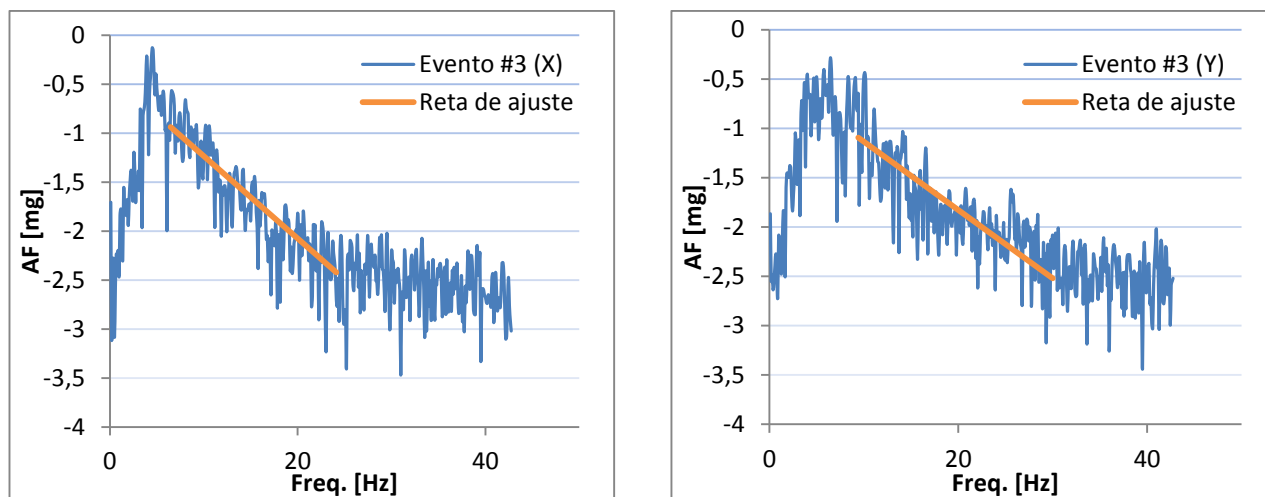


Figura C.2.3 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 21 de Julho de 1999, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação MOS, a constituir o evento 3.

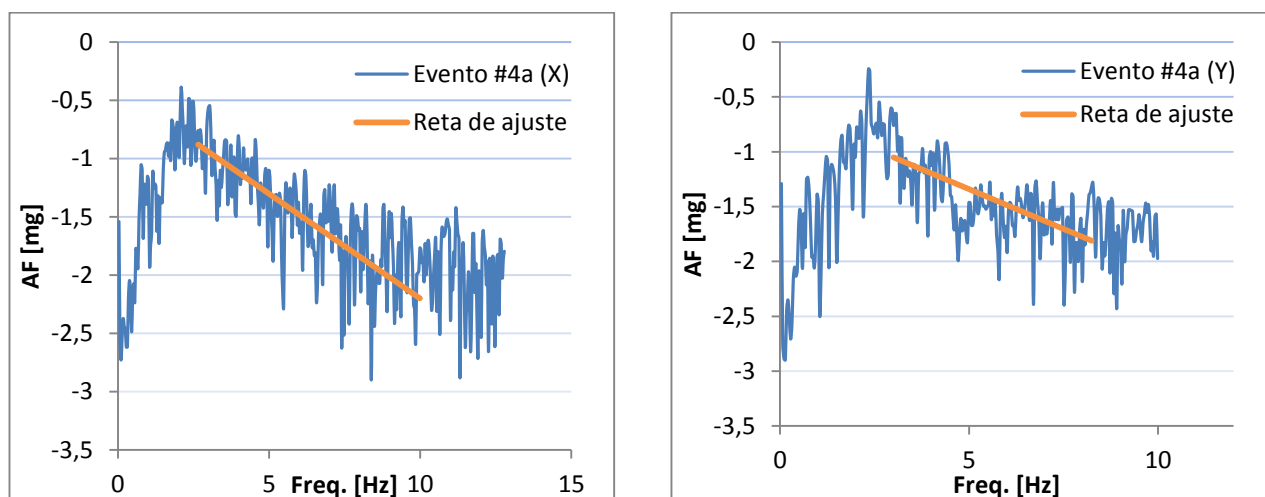


Figura C.2.4a – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 04 de Março de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação PVI, a constituir o evento 4a.

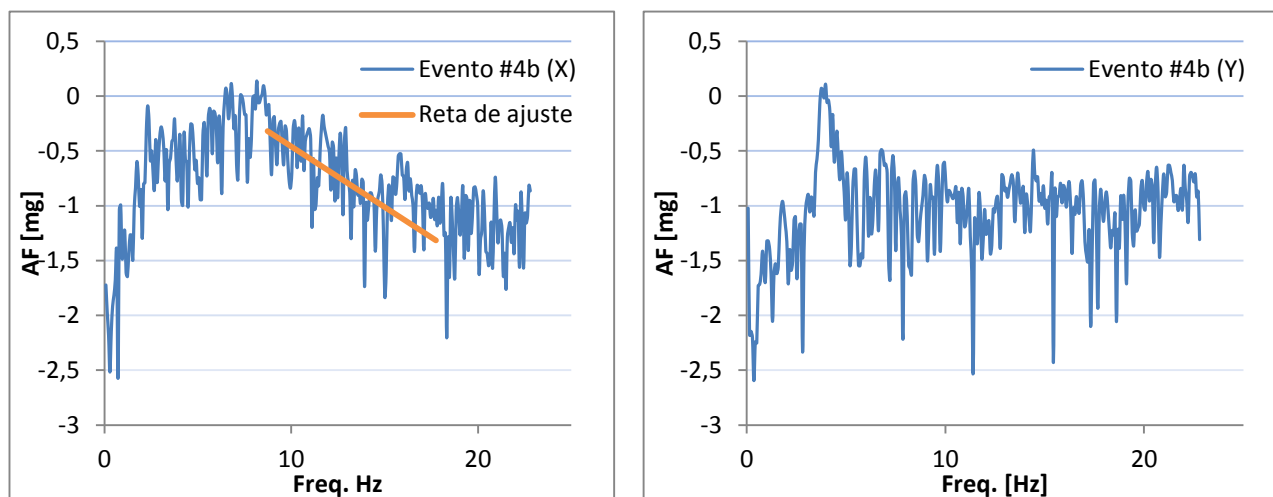


Figura C.2.4b – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 04 de Março de 2000, para a componente horizontal X, da estação MOS, a constituir o evento 4b. A componente horizontal na direção Y não consta do registo por apresentar uma relação $R^2 < 20\%$.

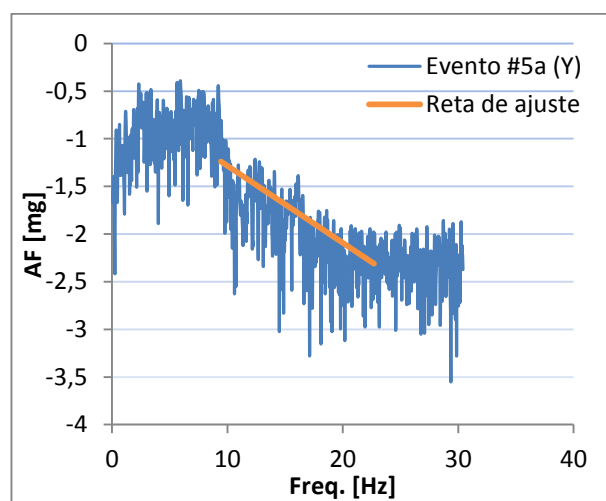
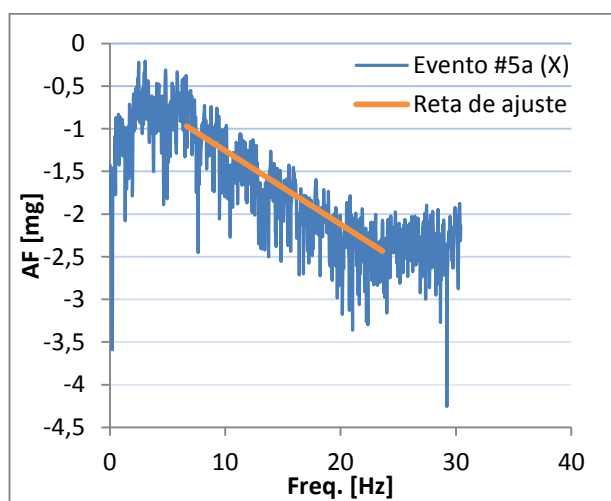
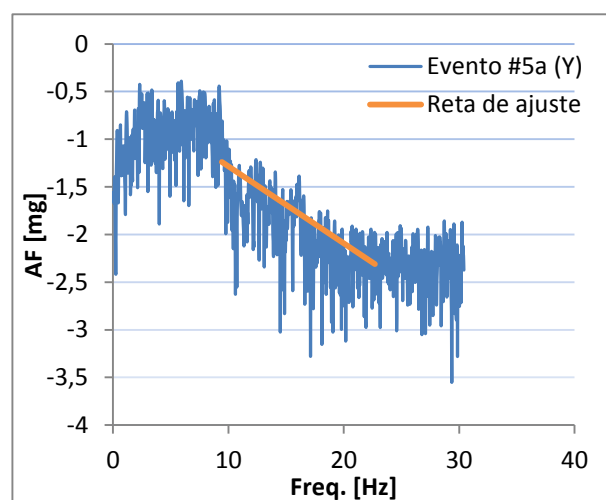
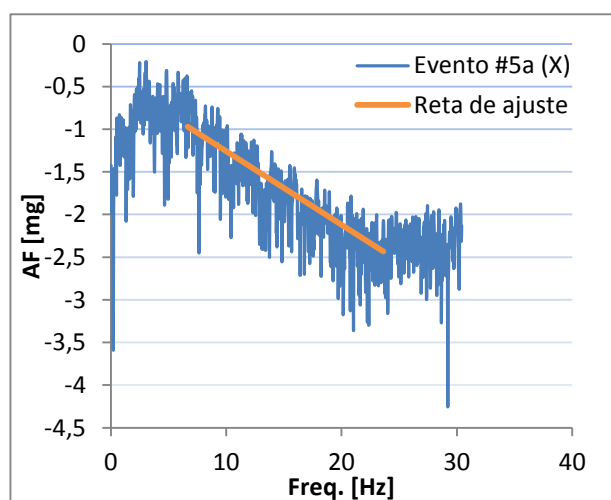


Figura C.2.5a – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 01 de Agosto de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 5a.

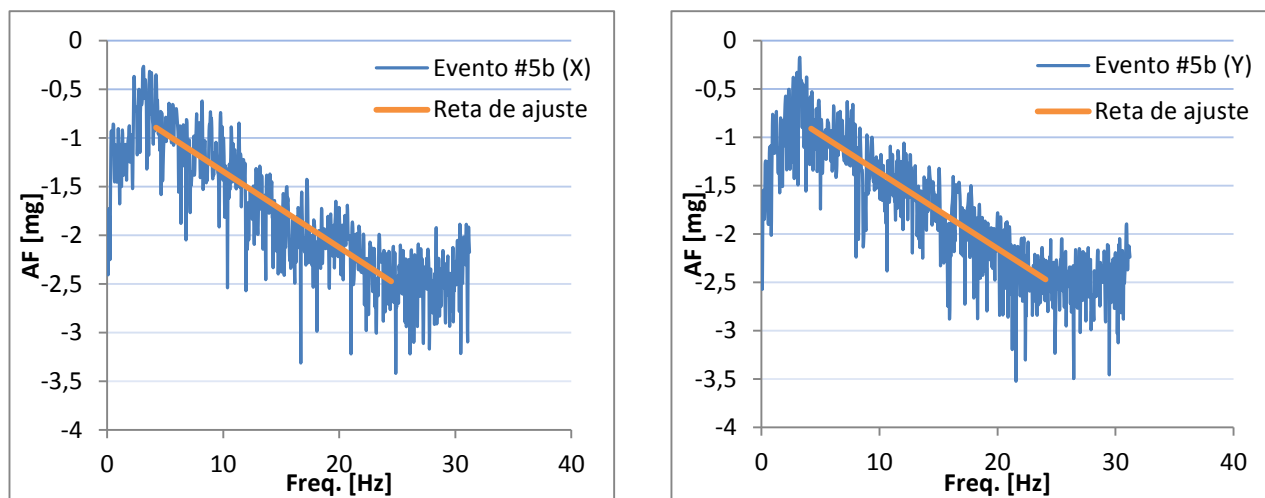


Figura C.2.5b – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 01 de Agosto de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SRO, a constituir o evento 5b.

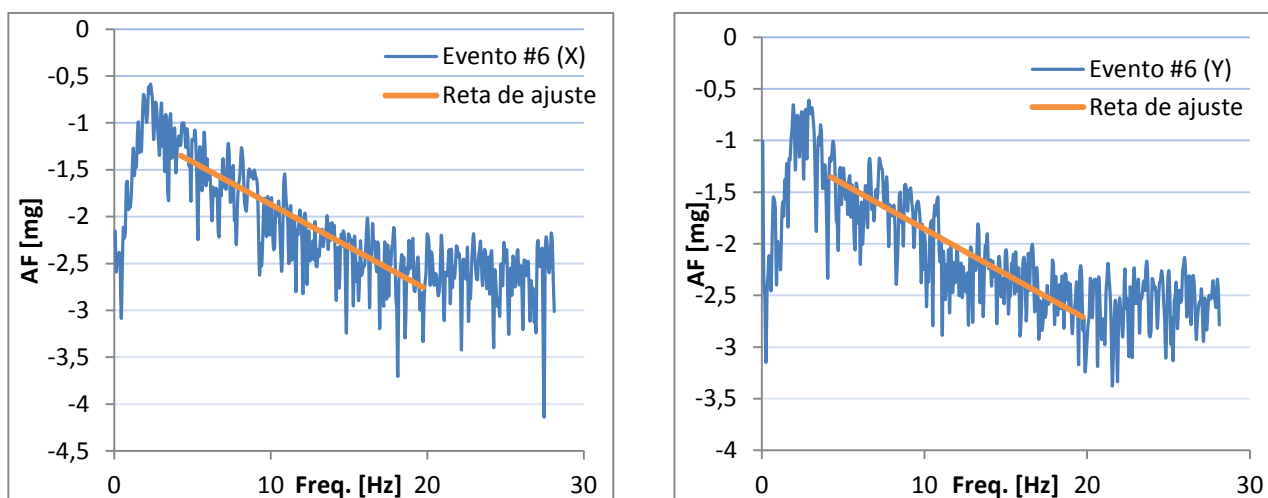


Figura C.2.6 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 03 de Setembro de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação PVI, a constituir o evento 6.

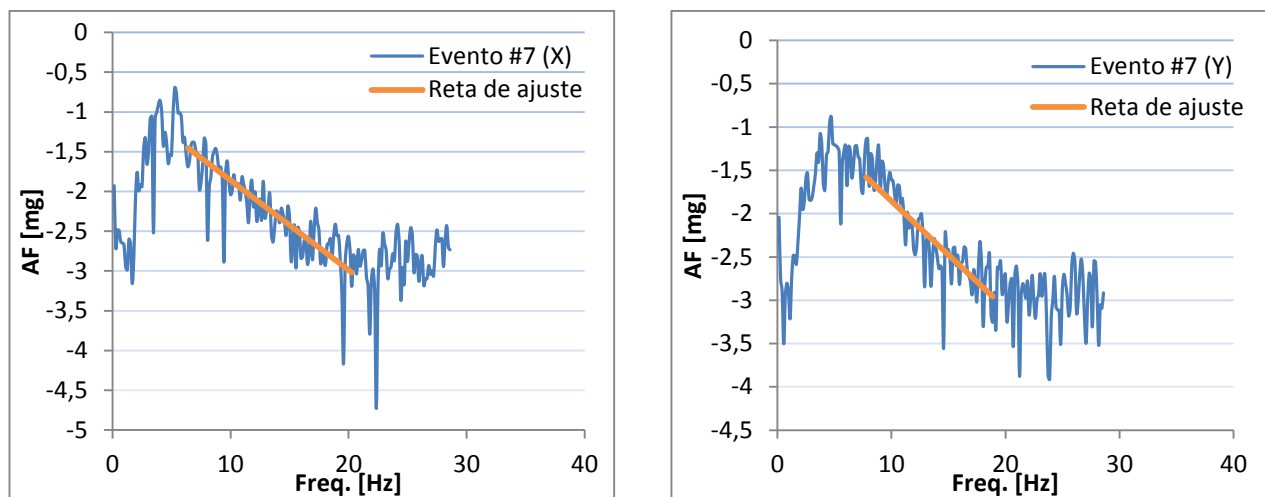


Figura C.2.7 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 10 de Novembro de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação TOP, a constituir o evento 7.

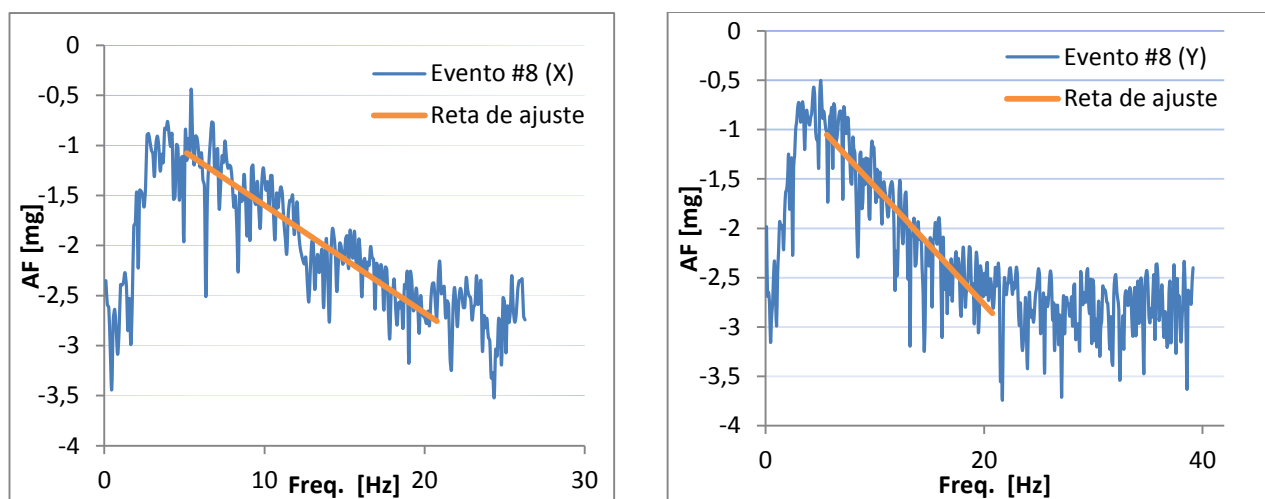


Figura C.2.8 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 28 de Dezembro de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação TOP, a constituir o evento 8.

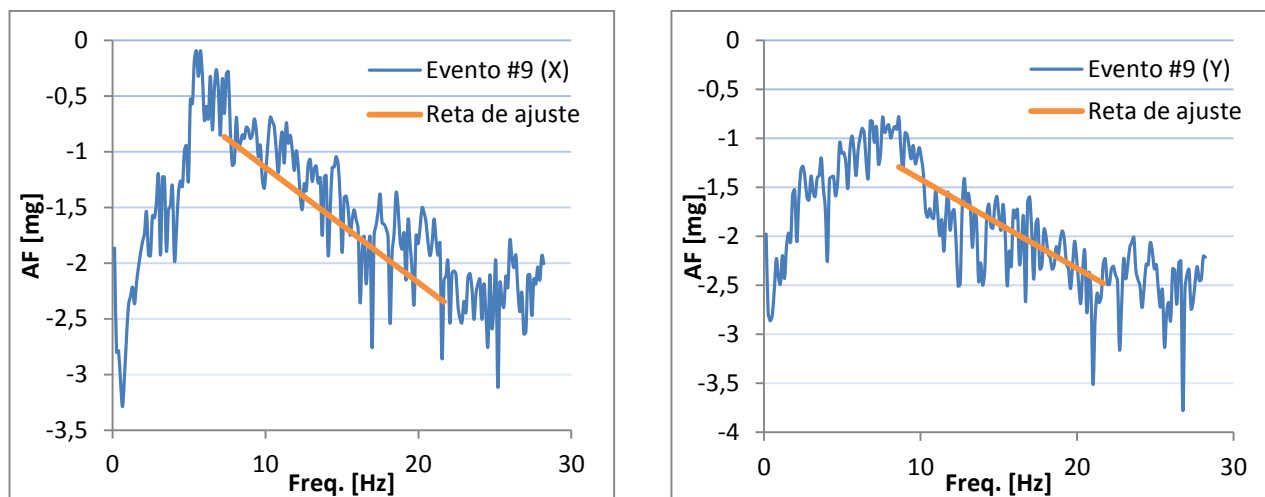


Figura C.2.9 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 29 de Janeiro de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 9.

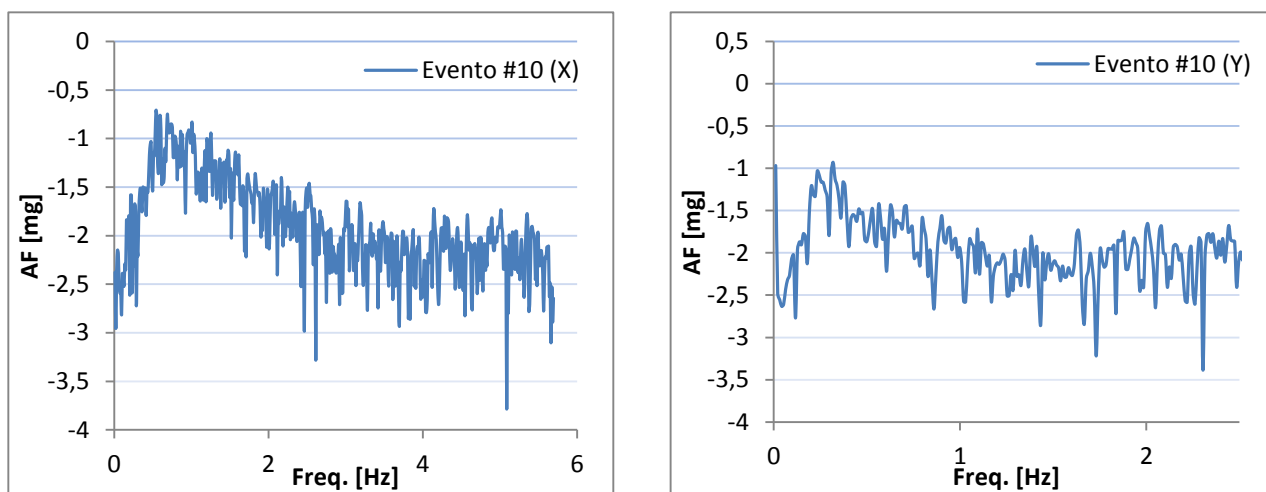


Figura C.2.10 – Espectros de aceleração para o sismo de 06 de Fevereiro de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação PVI, a constituir o evento 10. Sem conteúdo nas altas frequências para ajuste linear.

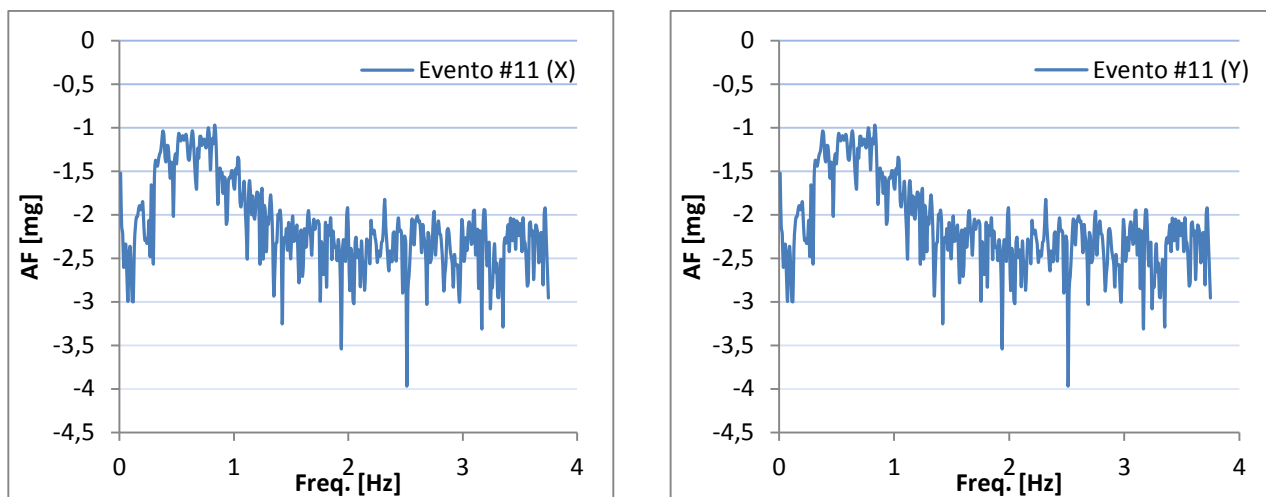


Figura C.2.11 – Espectros de aceleração para o sismo de 13 de Fevereiro de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SOL, a constituir o evento 11. Sem conteúdo nas altas frequências para ajuste linear.

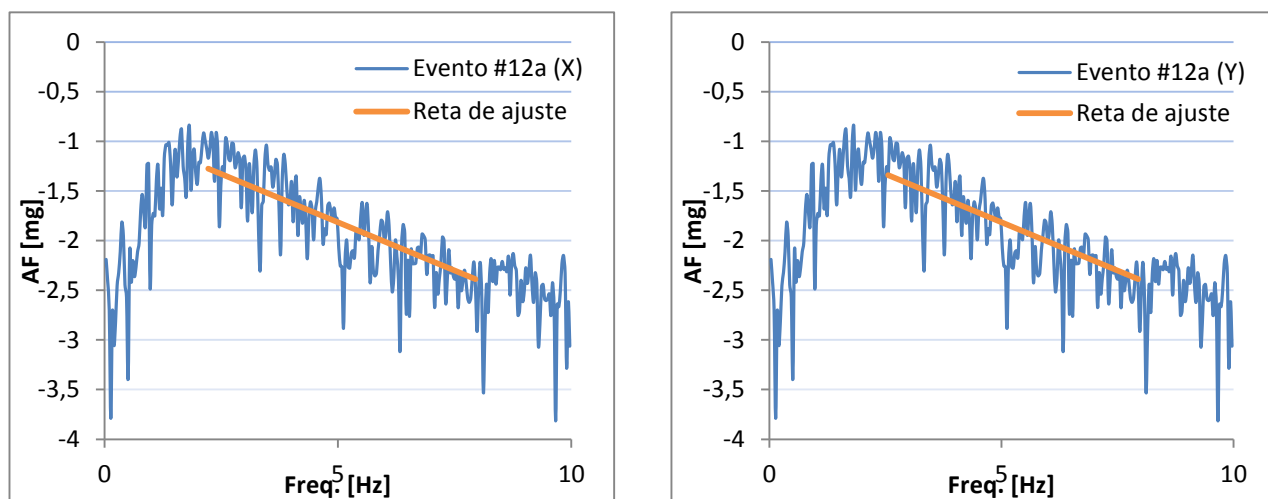


Figura C.2.12a – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 02 de Junho de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SRO, a constituir o evento 12a.

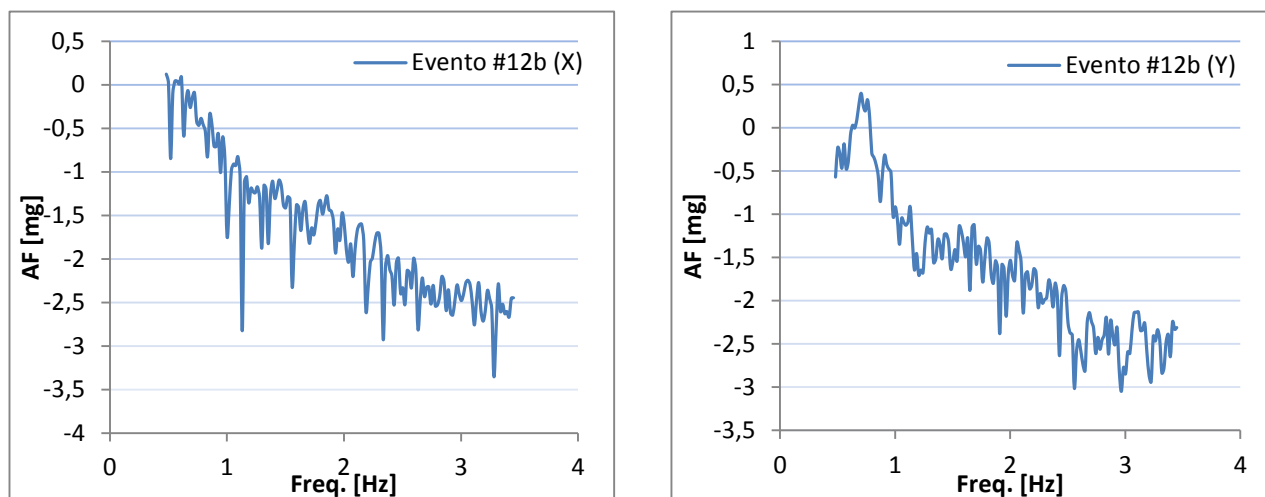


Figura C.2.12b – Espectros de aceleração para o sismo de 02 de Junho de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 12b. Sem conteúdo nas altas frequências para ajuste linear.

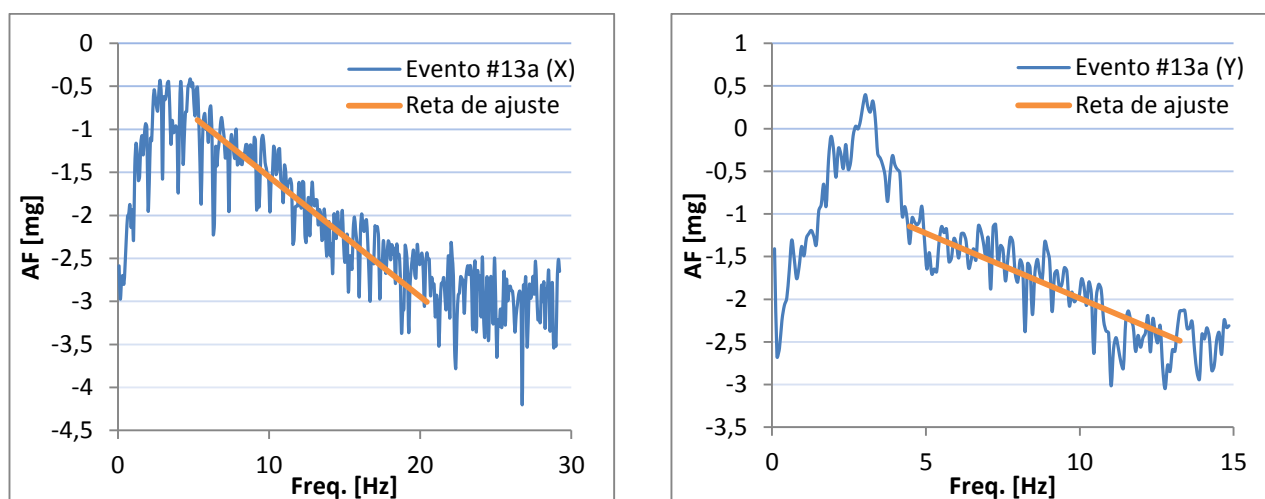


Figura C2.13a – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 06 de Julho de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação TOP, a constituir o evento 13a.

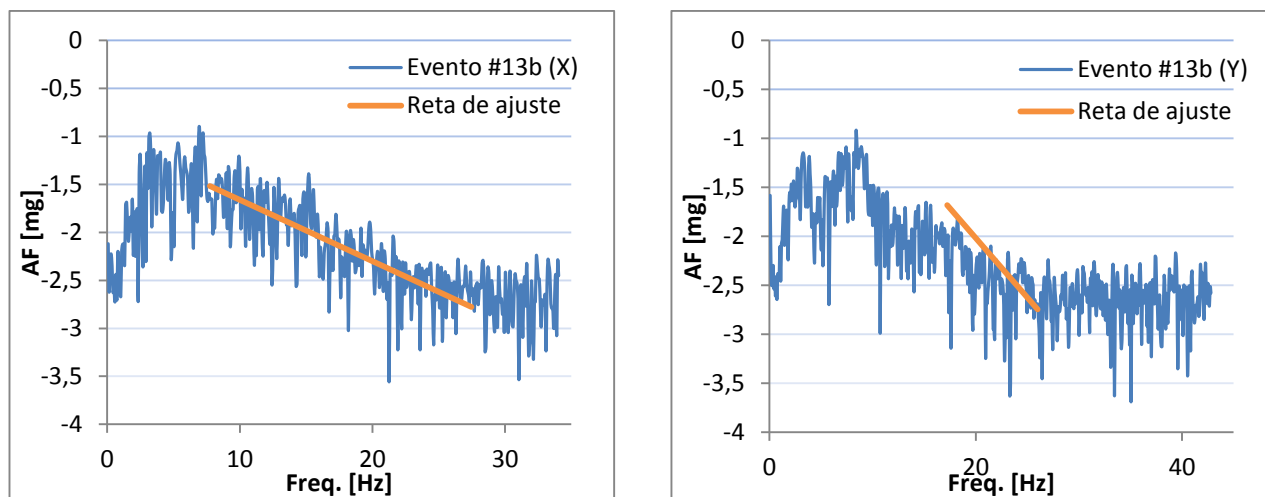


Figura C.2.13b – Espetros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 06 de Julho de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 13b.

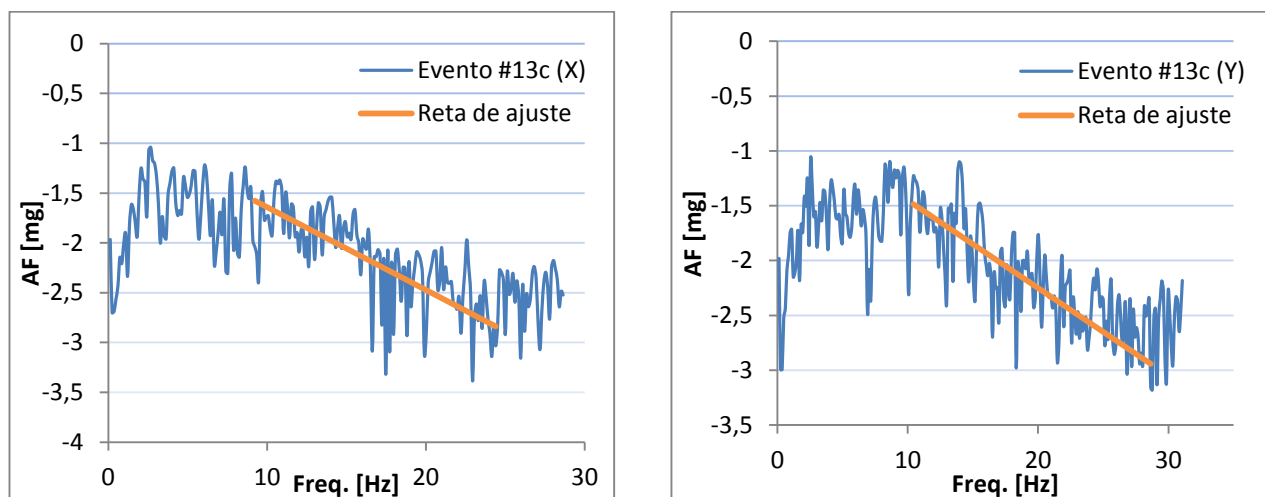


Figura C.2.13c – Espetros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 06 de Julho de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 13c.

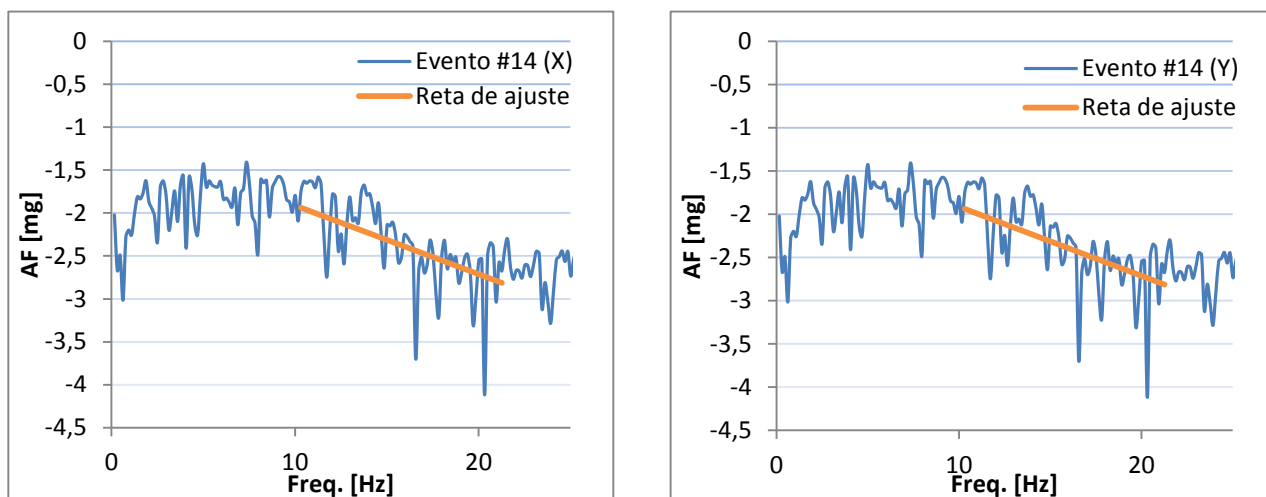


Figura C.2.14 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 03 de Outubro de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 14.

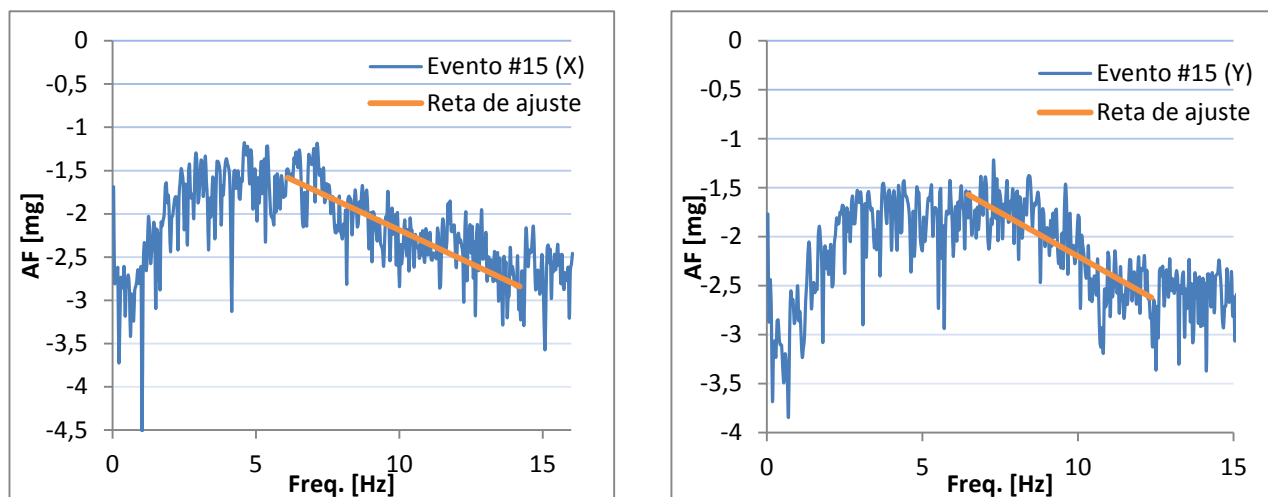


Figura C.2.15 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 12 de Outubro de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 15.

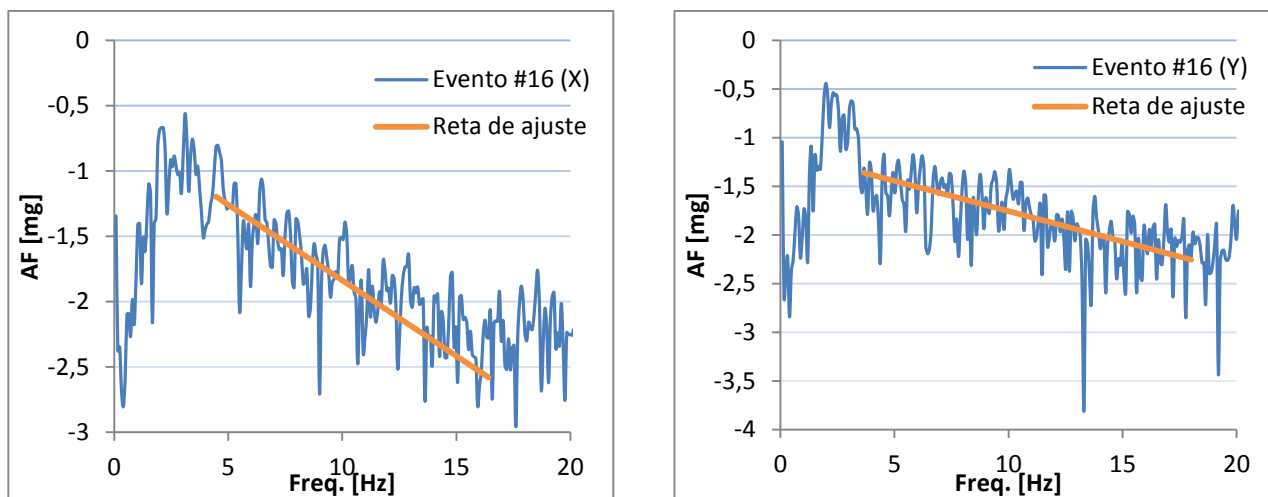


Figura C.2.16 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 23 de Dezembro de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação PVI, a constituir o evento 16.

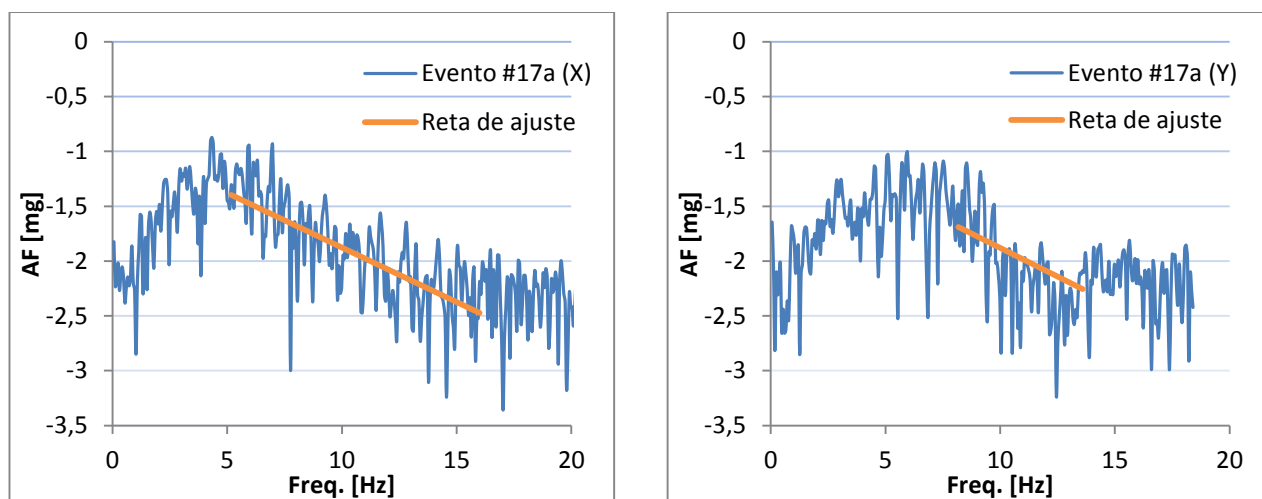


Figura C.2.17a – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 13 de Fevereiro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 17a.

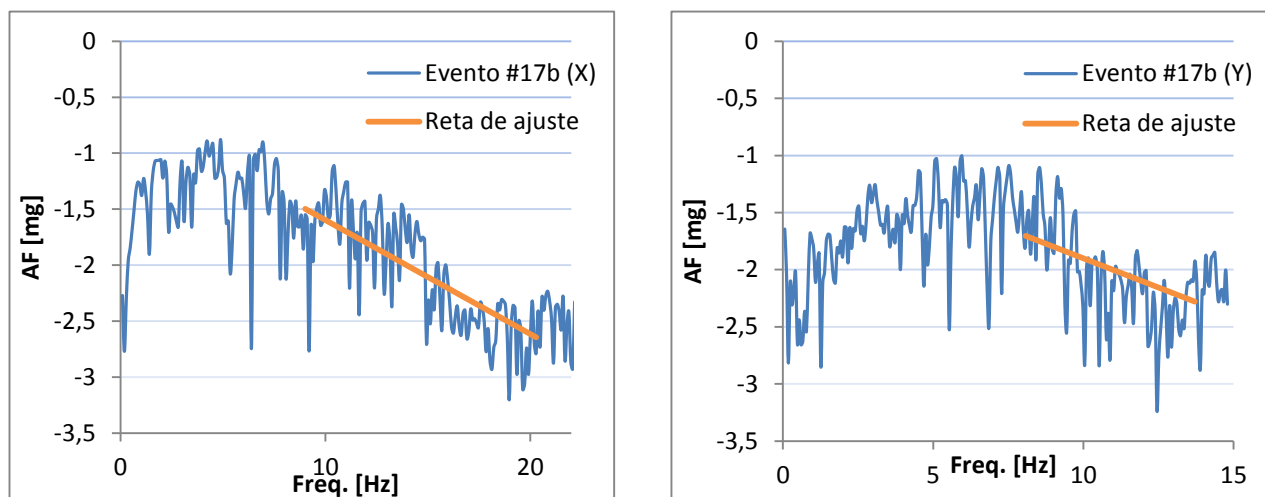


Figura C.2.17b – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 13 de Fevereiro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 17b.

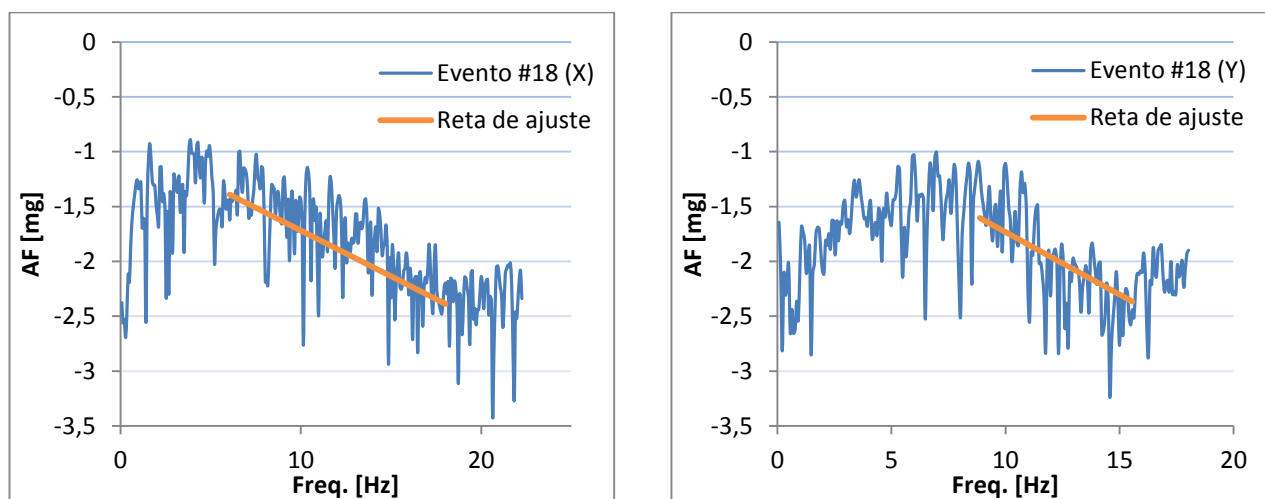


Figura C.2.18 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 13 de Fevereiro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 18.

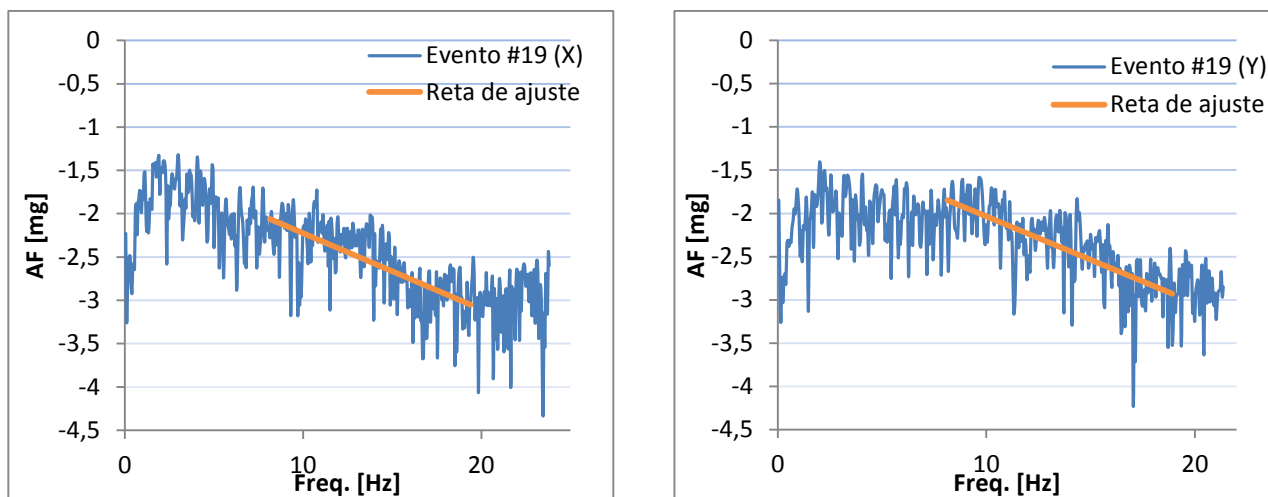


Figura C.2.19 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 13 de Fevereiro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 19.

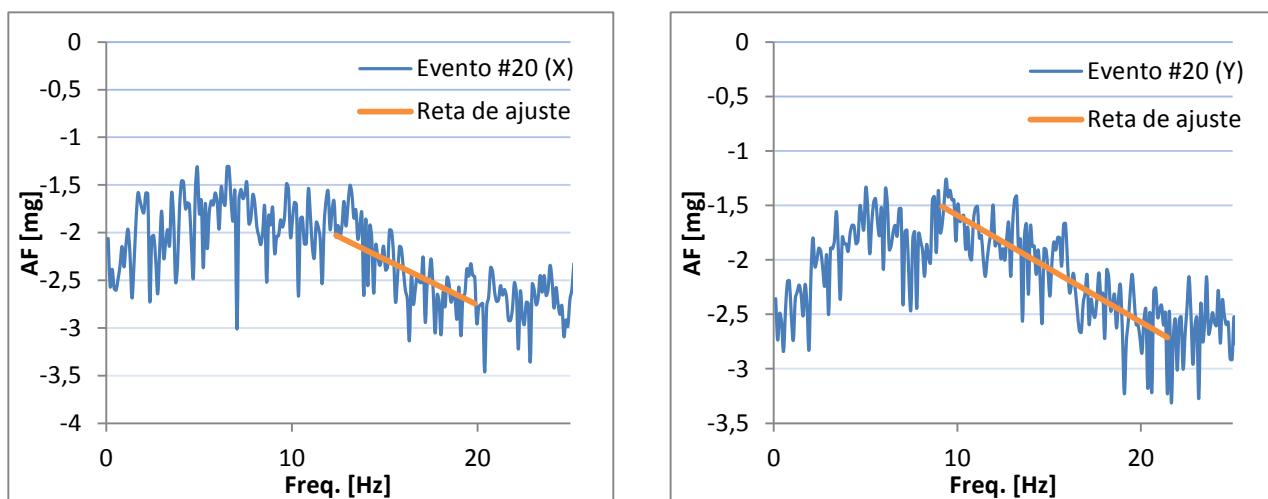


Figura C.2.20 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 13 de Fevereiro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 20.

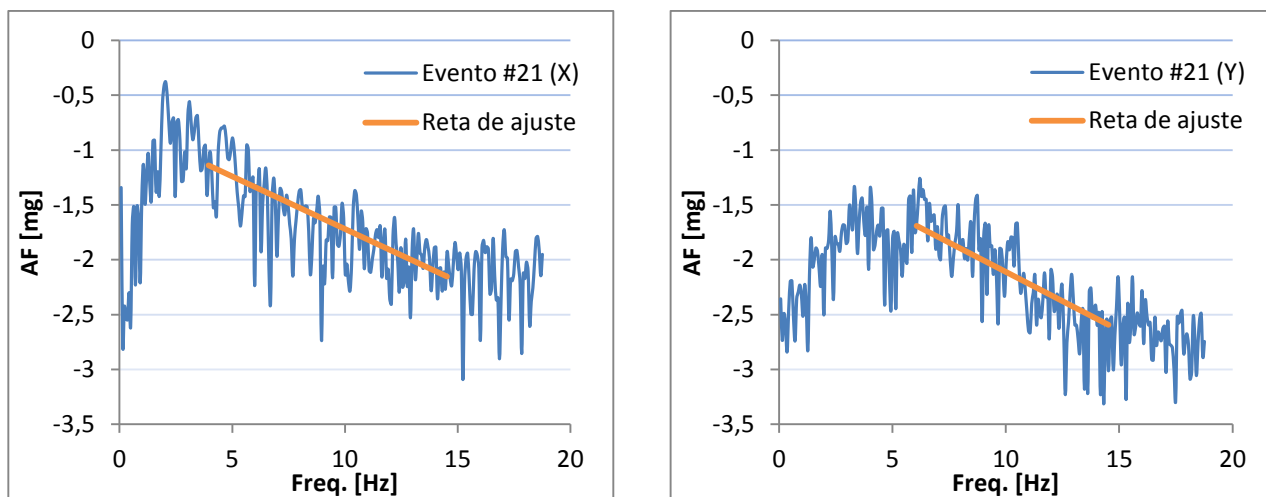


Figura C.2.21 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 11 de Março de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação PVI, a constituir o evento 21.

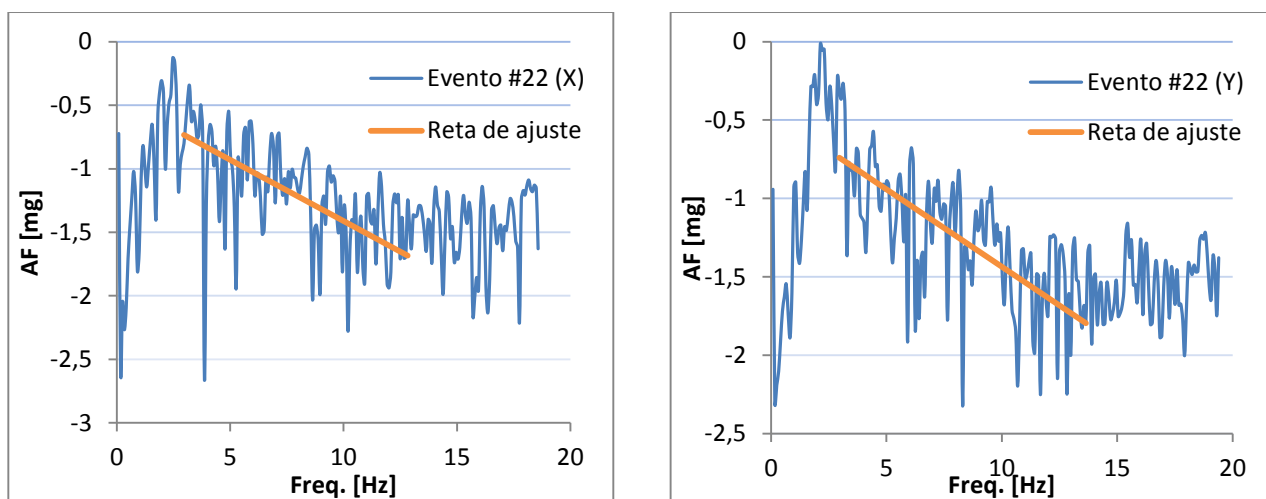


Figura C.2.22 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 10 de Junho de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação PVI, a constituir o evento 22.

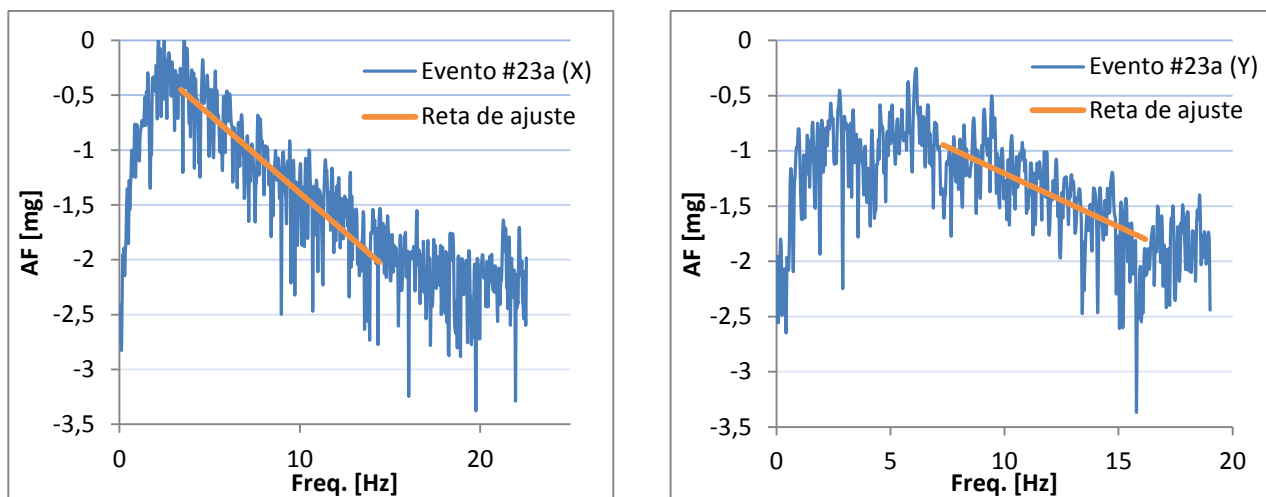


Figura C.2.23a – Espetros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 30 de Novembro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação TOP, a constituir o evento 23a.

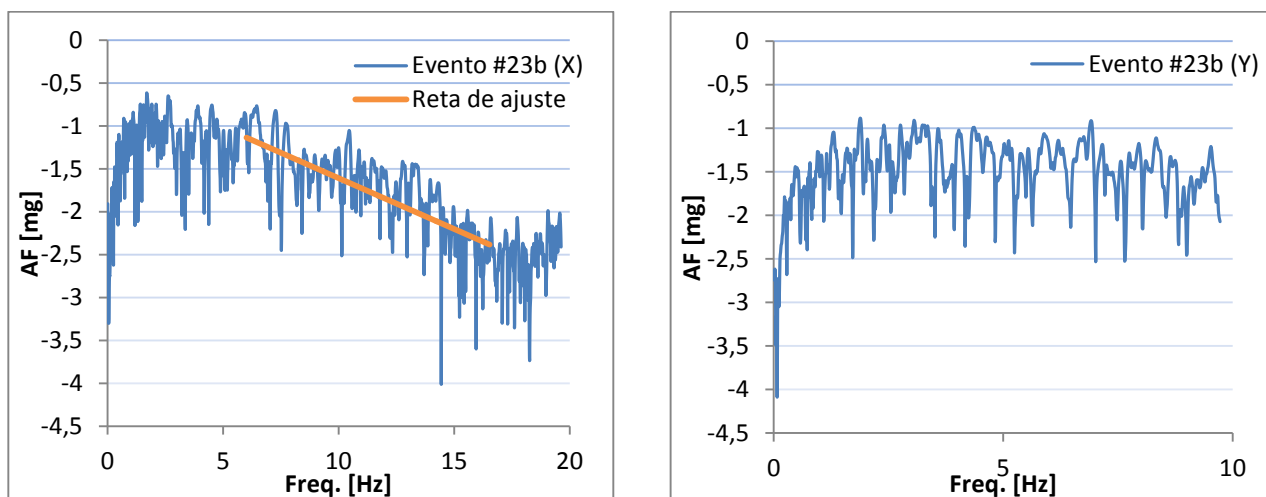


Figura C.2.23b – Espetros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 30 de Novembro de 2002, para a componente horizontal X, da estação SCR, a constituir o evento 23b. A componente horizontal na direção Y não consta do registo por apresentar uma relação $R^2 < 20\%$.

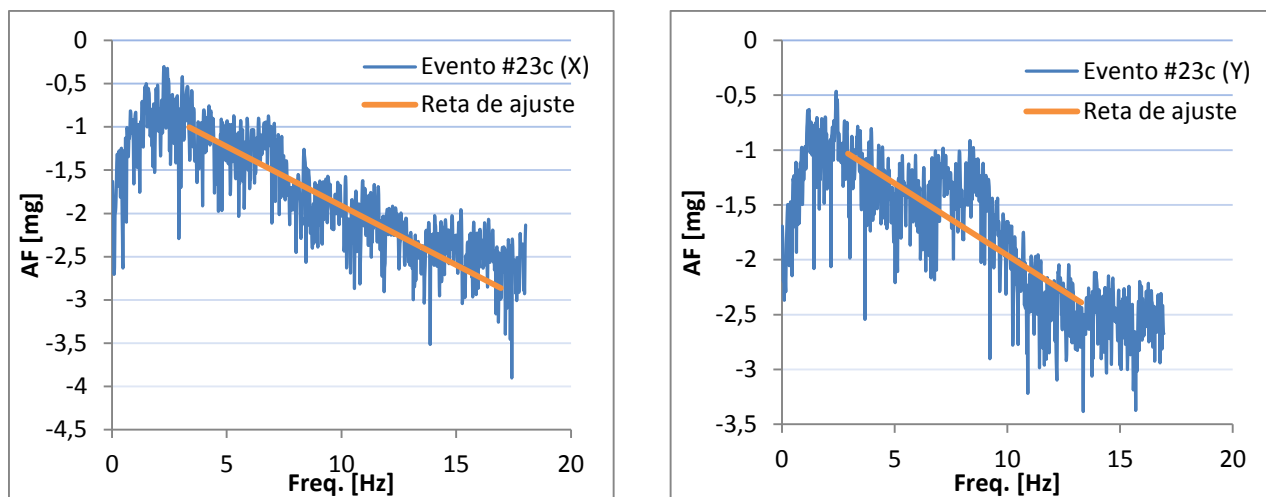


Figura C.2.23c – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 30 de Novembro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 23c.

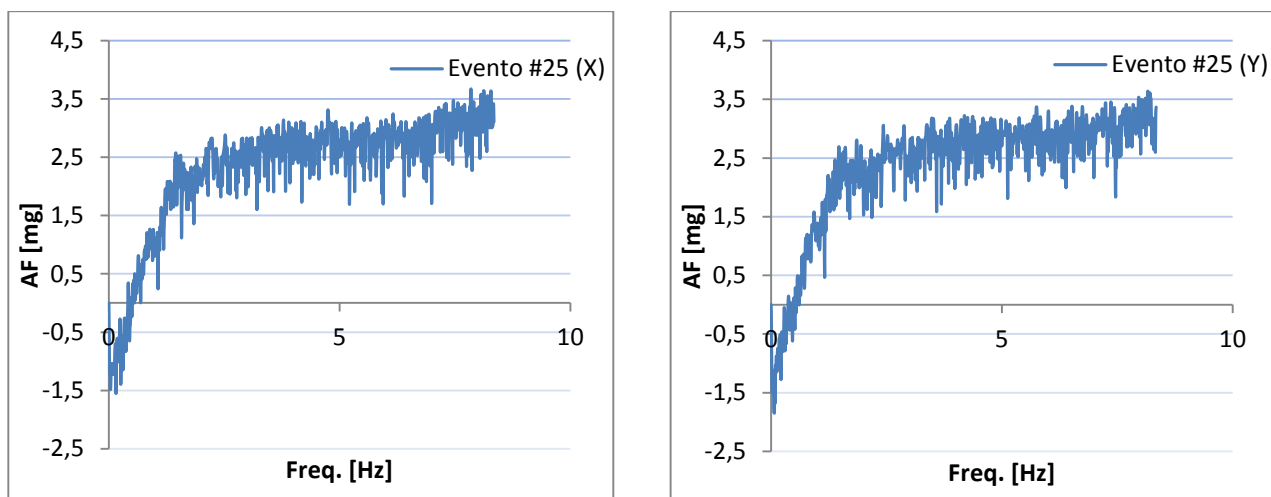


Figura C.2.25 – Espectros de aceleração para o sismo de 10 de Julho de 1998, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação MOS, a constituir o evento 25. Sem conteúdo nas altas frequências para ajuste linear.

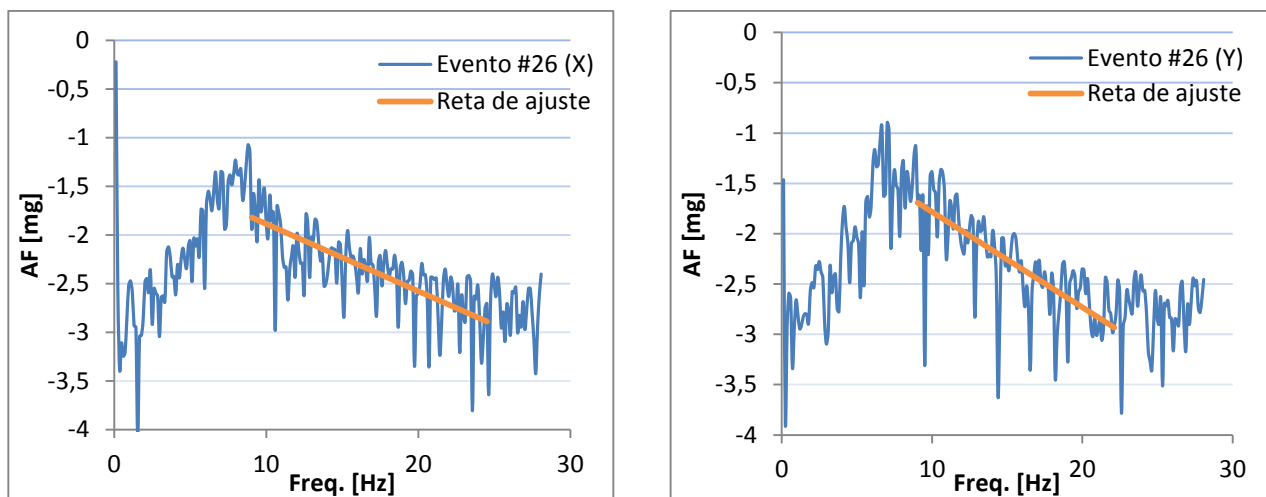


Figura C.2.26 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 18 de Julho de 1998, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação HSC, a constituir o evento 26.

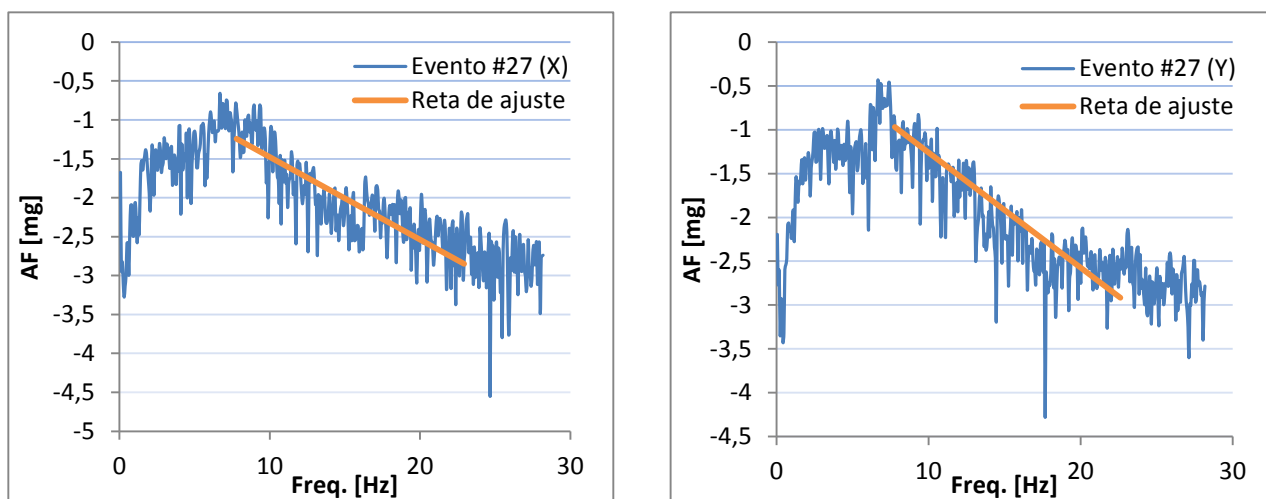


Figura C.2.27 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 18 de Julho de 1998, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação HSC, a constituir o evento 27.

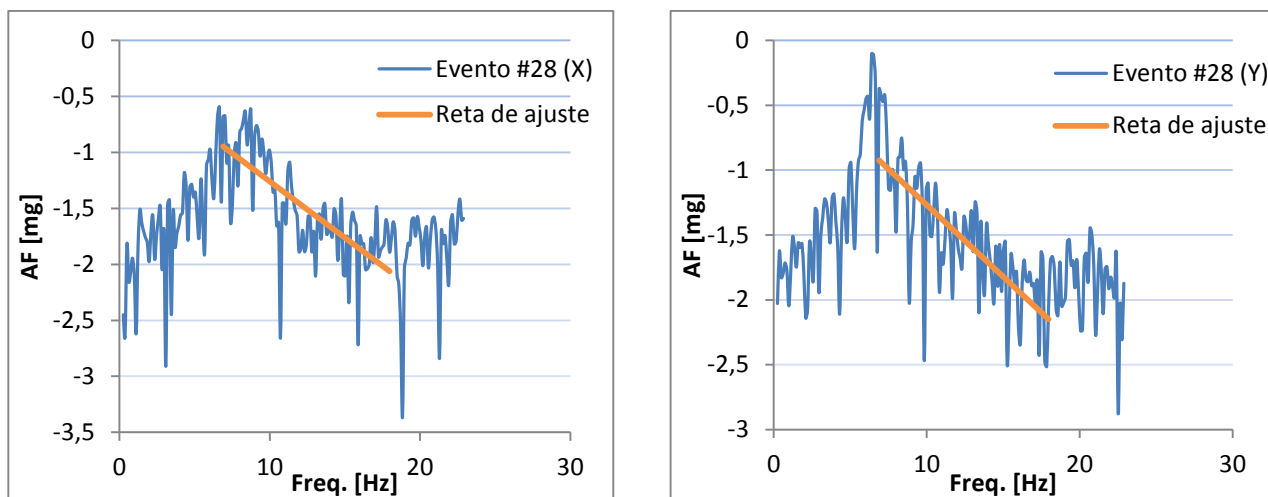


Figura C.2.28 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 20 de Julho de 1998, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação HSC, a constituir o evento 28.

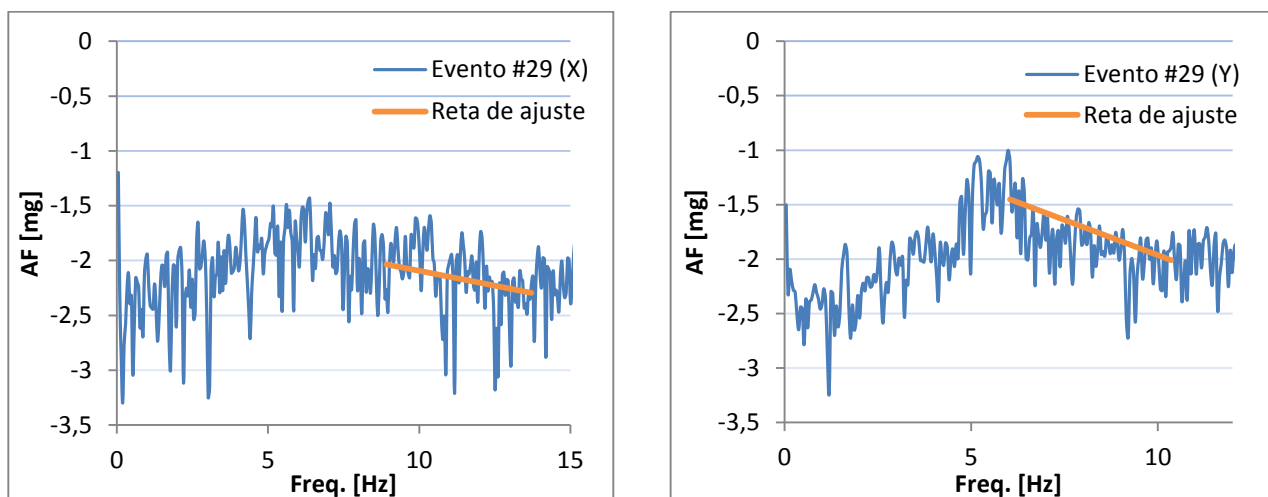


Figura C.2.29 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 31 de Agosto de 1998, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação HHT, a constituir o evento 29.

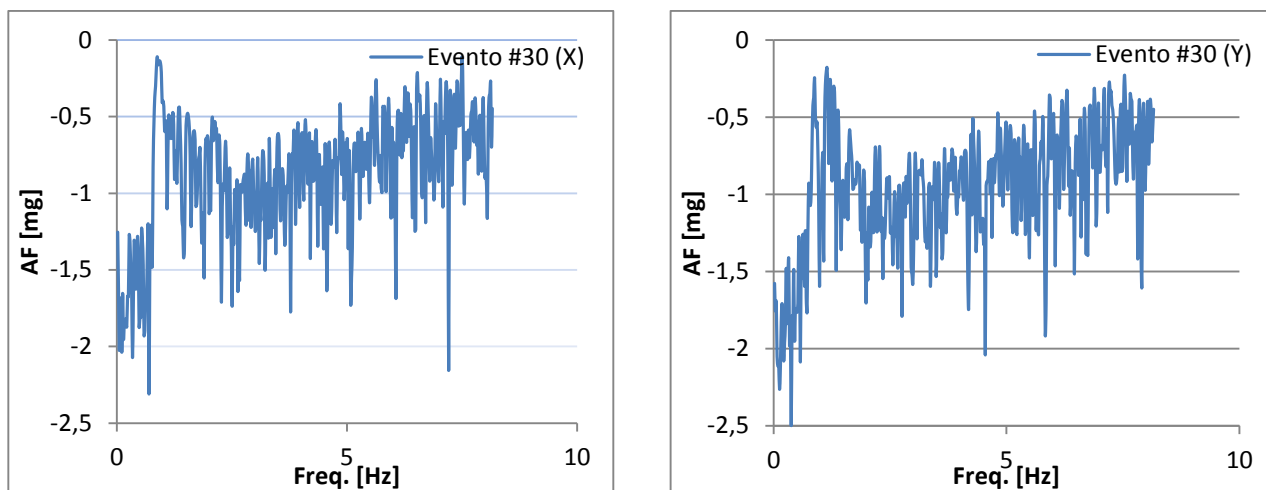


Figura C.2.30 – Espectros de aceleração para o sismo de 14 de Julho de 1997, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação MOS, a constituir o evento 30. Sem conteúdo nas altas frequências para ajuste linear.

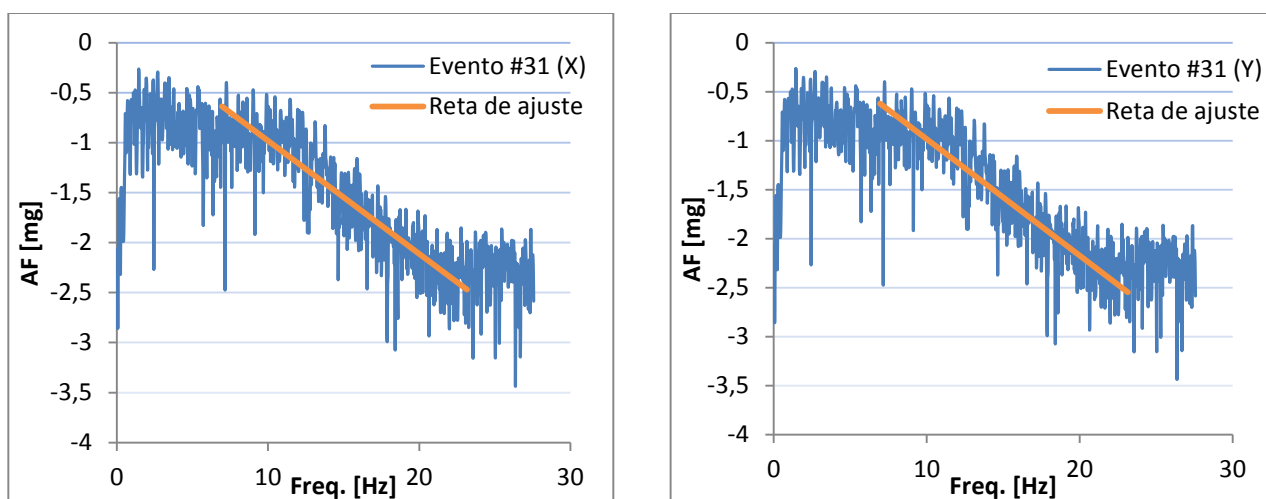


Figura C.2.31 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 30 de Novembro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SMJ, a constituir o evento 31.

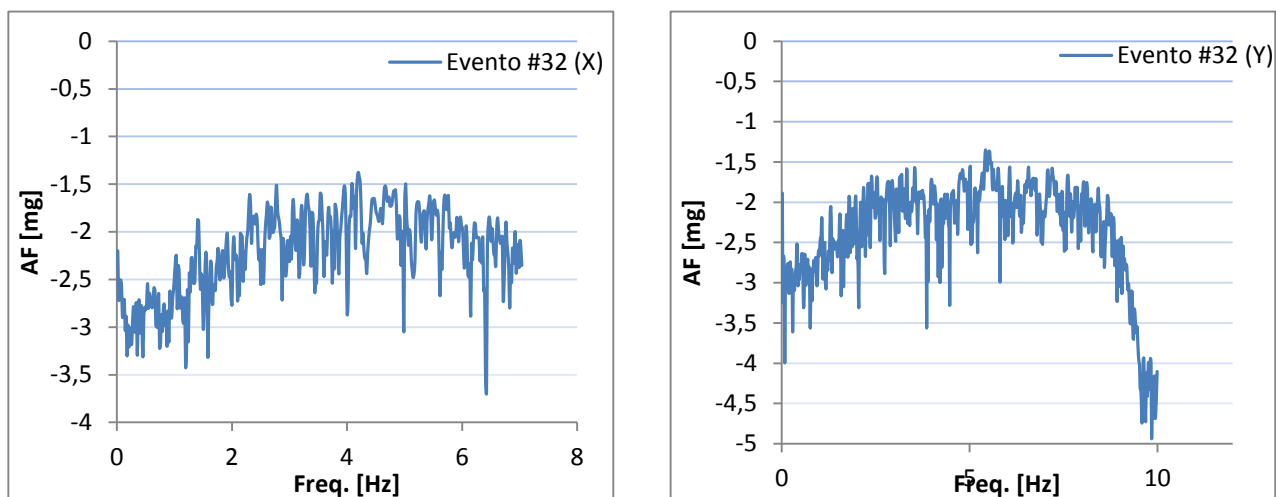


Figura C.2.32 – Espectros de aceleração para o sismo de 05 de Novembro de 2003, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 32. Sem conteúdo nas altas frequências para ajuste linear.

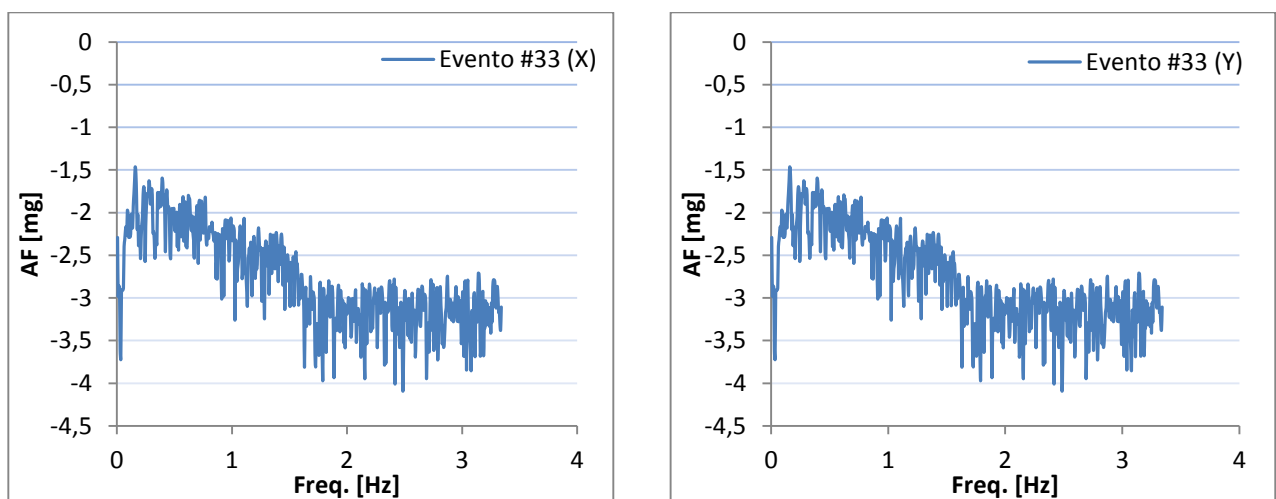


Figura C.2.33 – Espectros de aceleração para o sismo de 23 de Dezembro de 2003, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 33. Sem conteúdo nas altas frequências para ajuste linear.

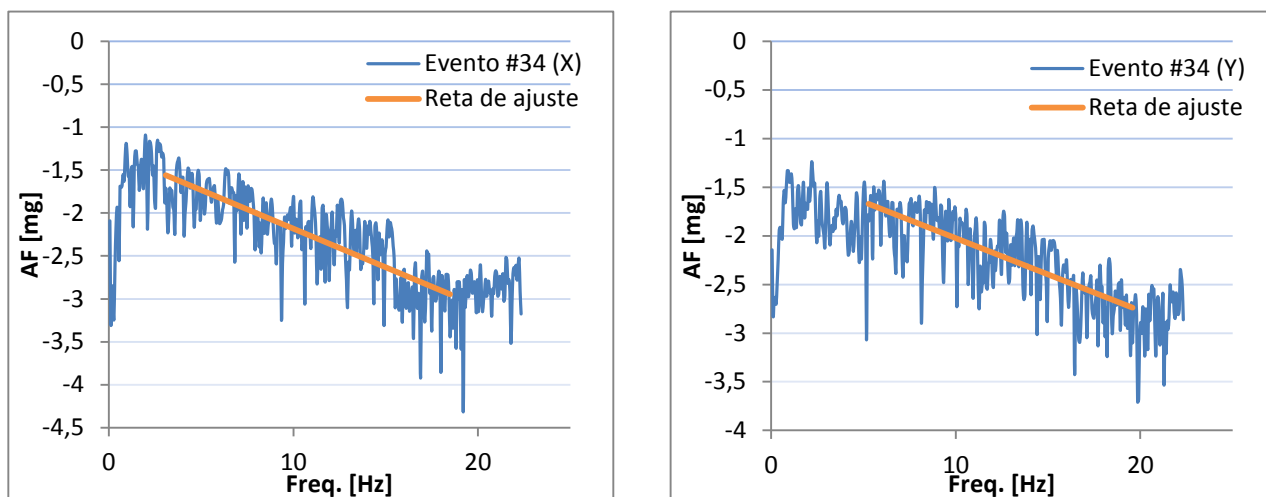


Figura C.2.34 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 01 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 34.

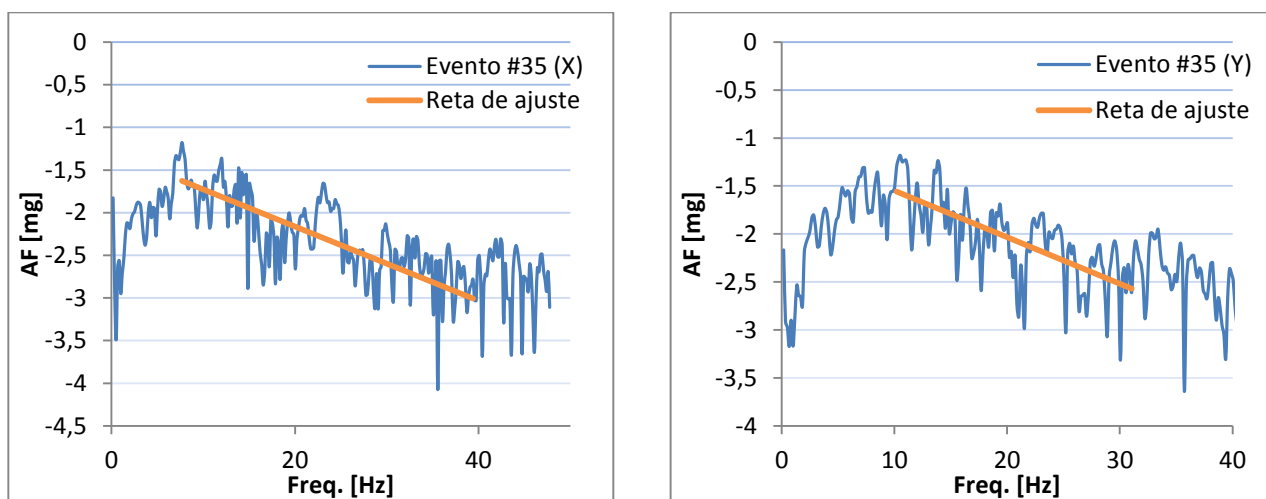


Figura C.2.35 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 17 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 35.

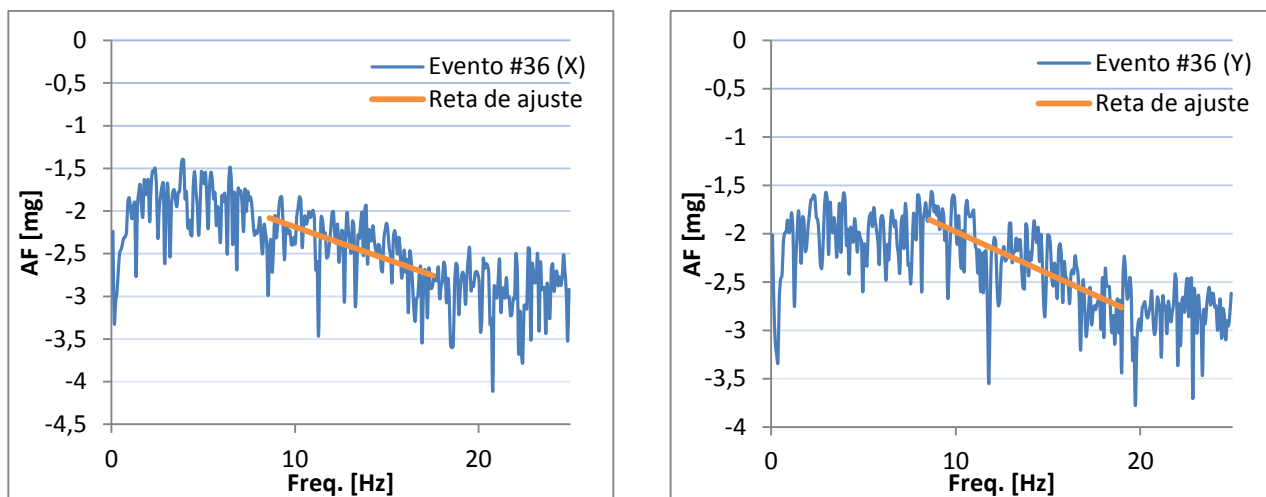


Figura C.2.36 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 18 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 36.

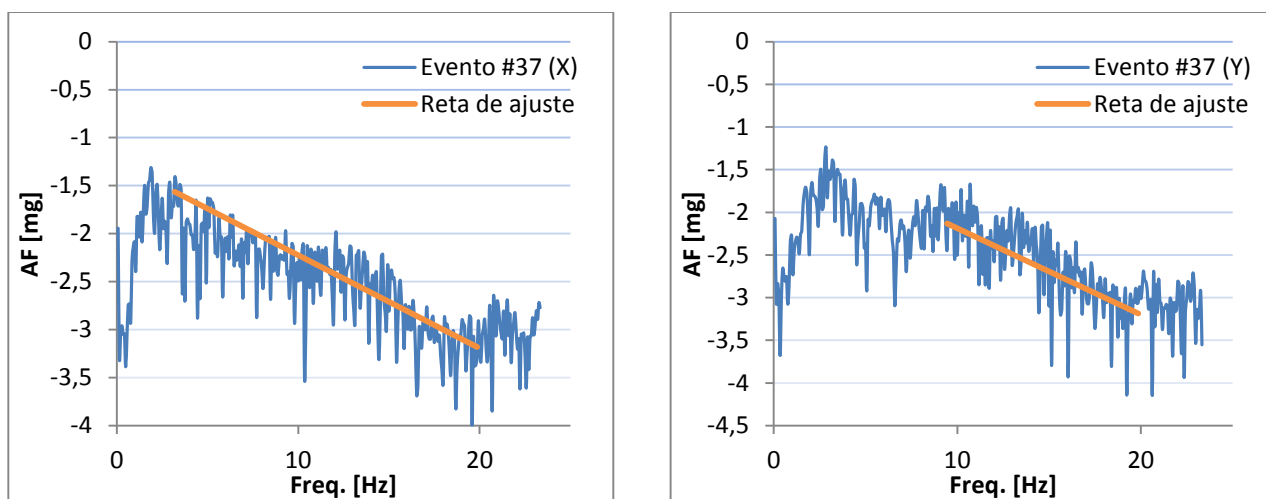


Figura C.2.37 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 27 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 37.

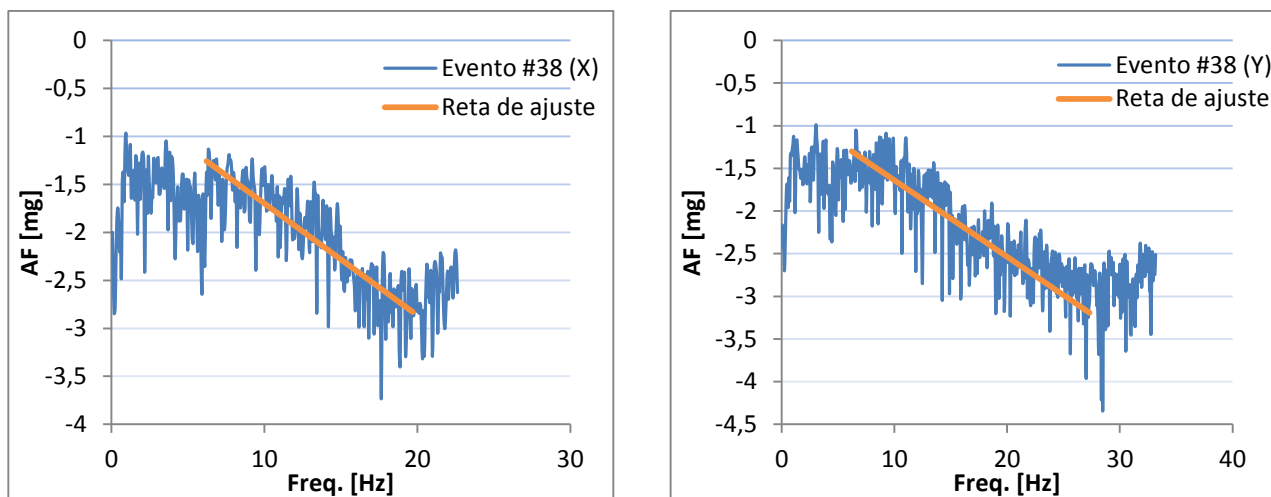


Figura C.2.38 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 28 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 38.

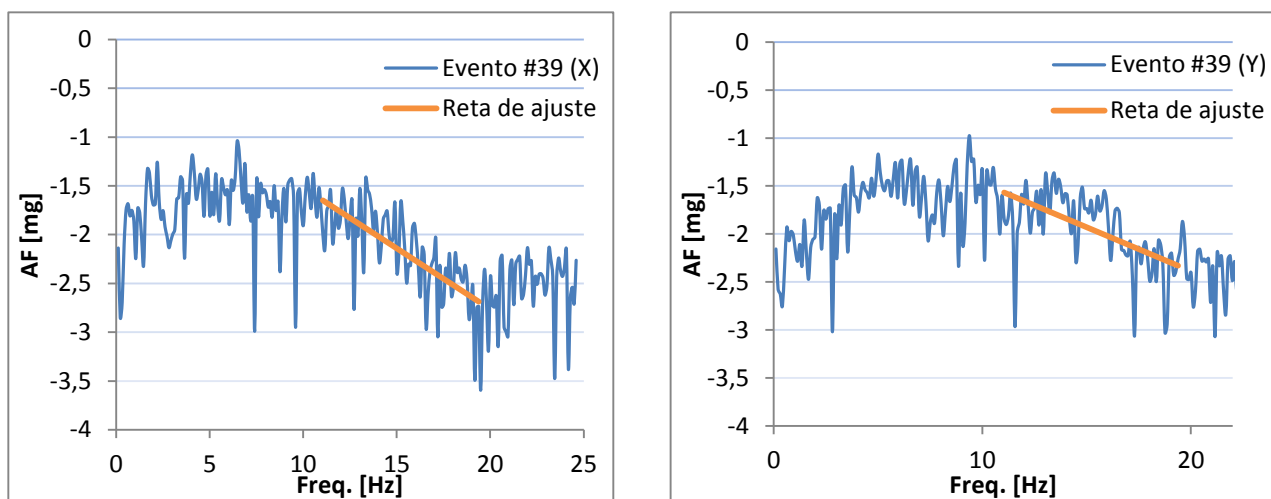


Figura C.2.39 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 28 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 39.

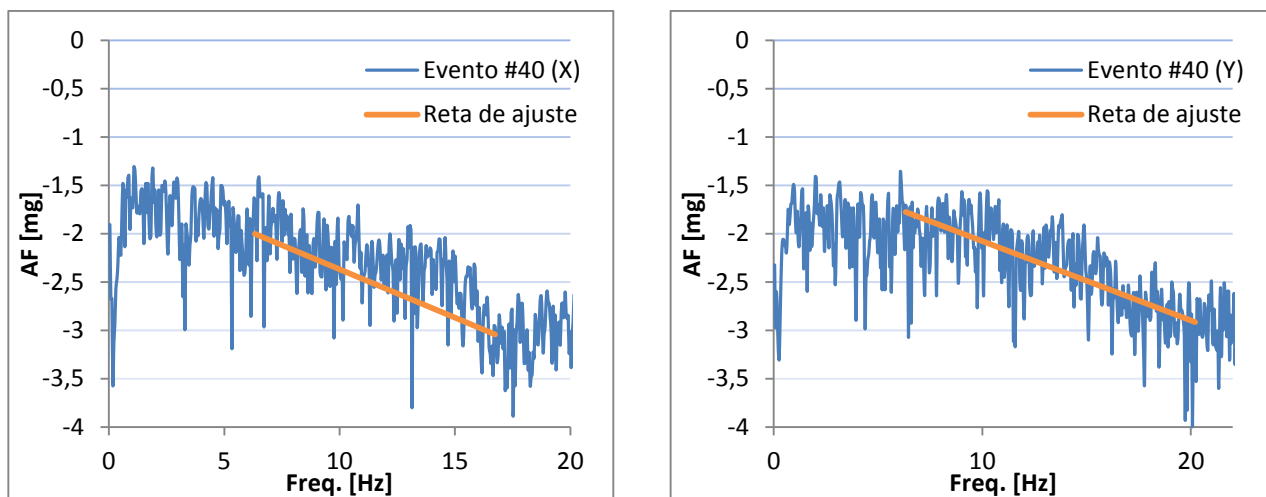


Figura C.2.40 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 28 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 40.

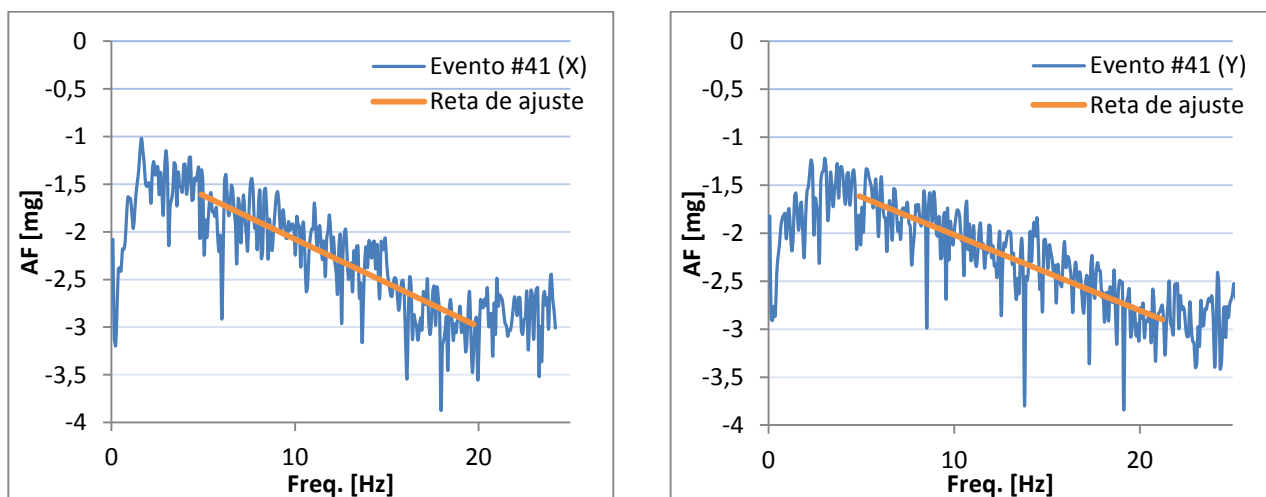


Figura C.2.41 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 31 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 41.

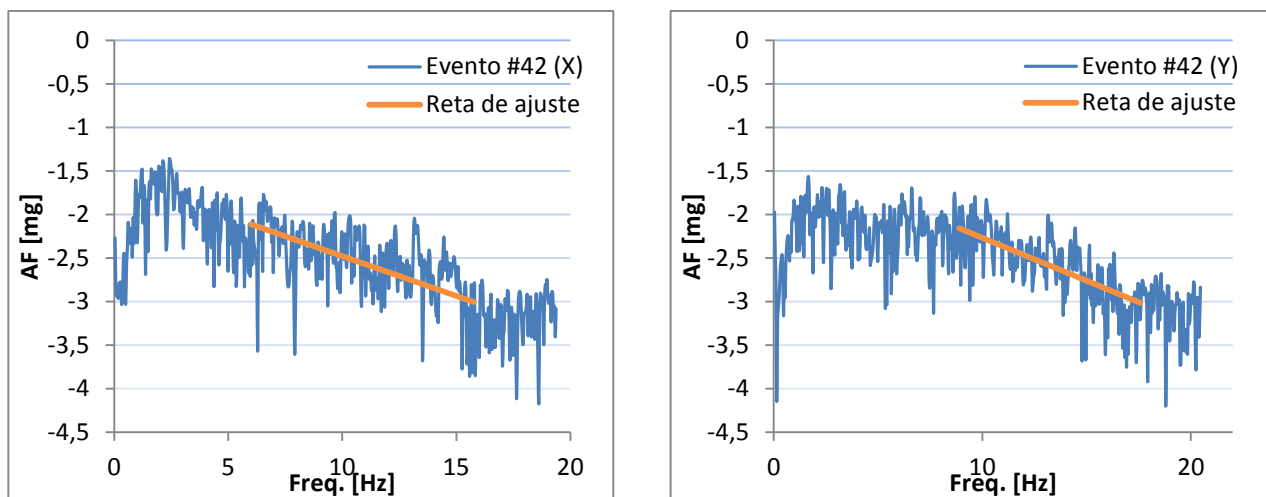


Figura C.2.42 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 03 de Fevereiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 42.

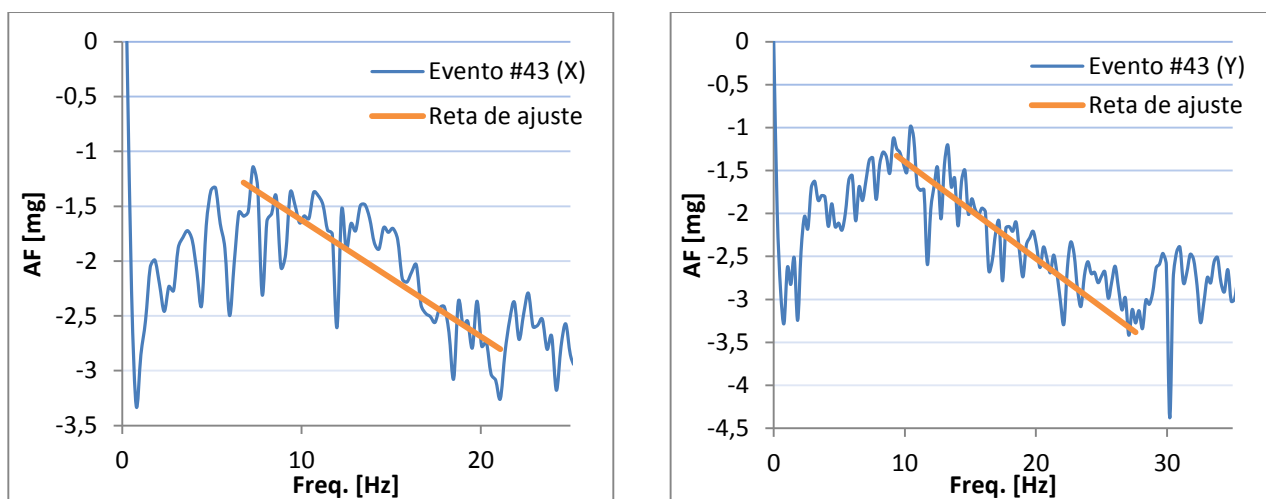


Figura C.2.43 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 07 de Fevereiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 43.

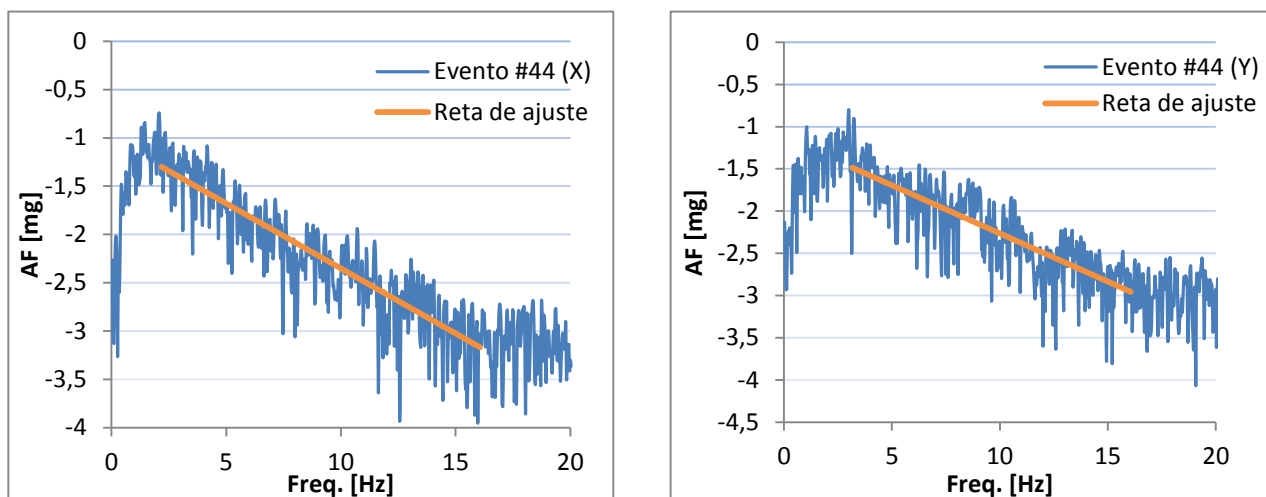


Figura C.2.44 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 25 de Abril de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 44.

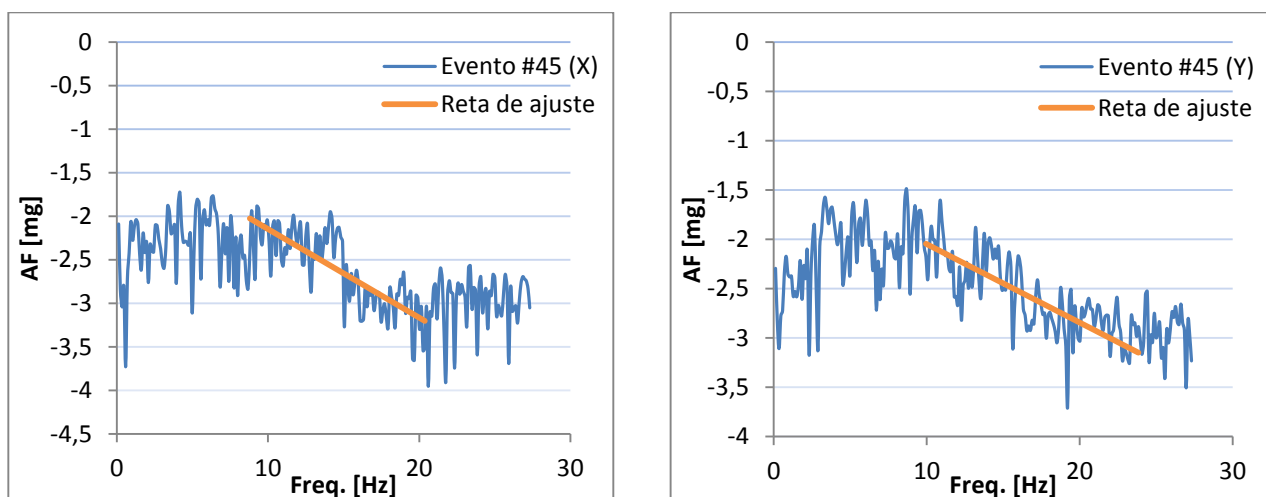


Figura C.2.45– Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 01 de Janeiro de 2005, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 45.

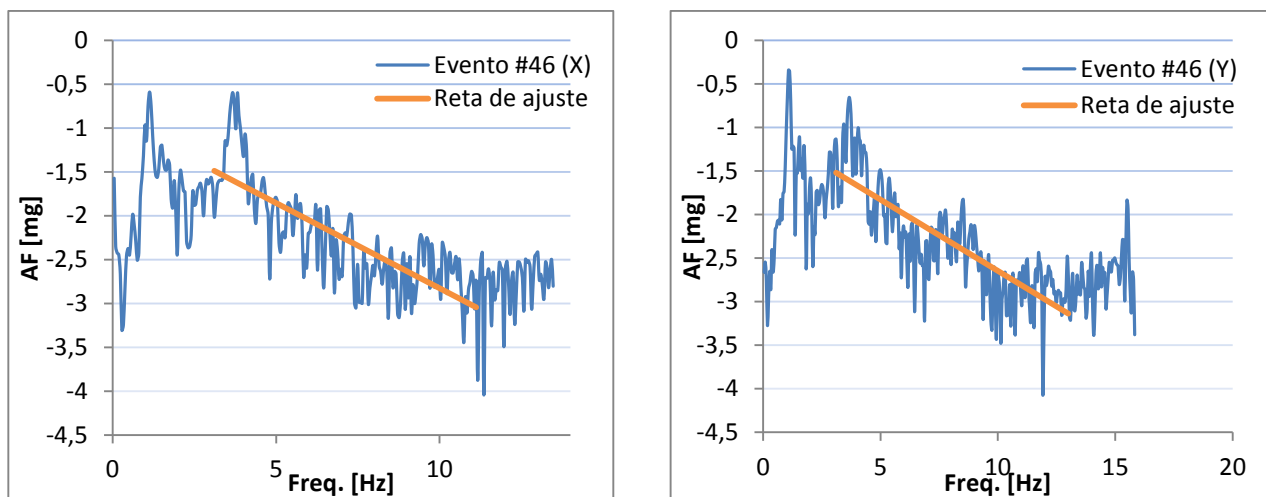


Figura C.2.46 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 05 de Janeiro de 2005, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SOL, a constituir o evento 46.

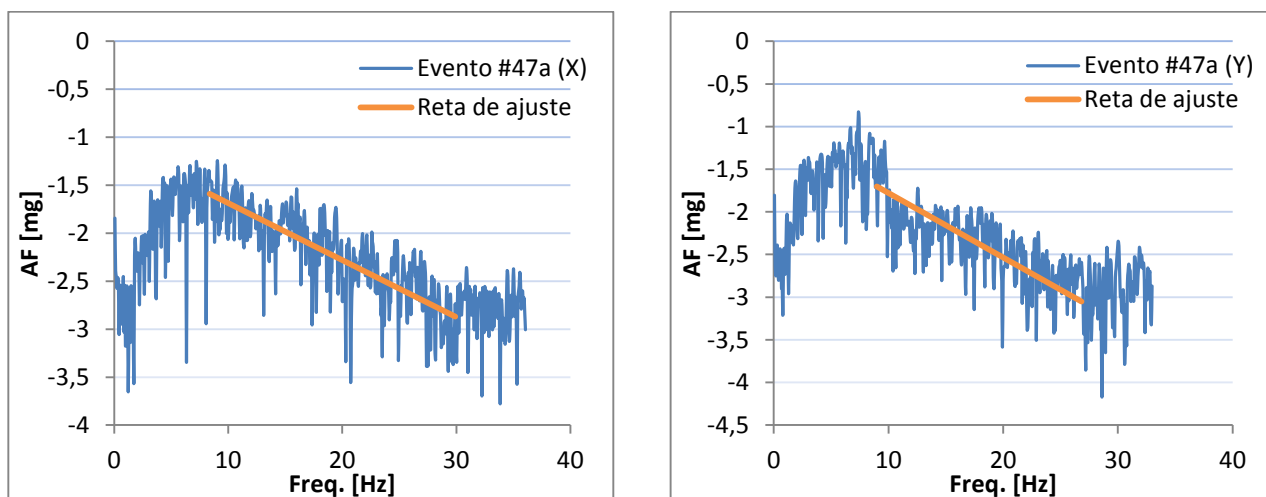


Figura C.2.47a – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 05 de Janeiro de 2005, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 47a.

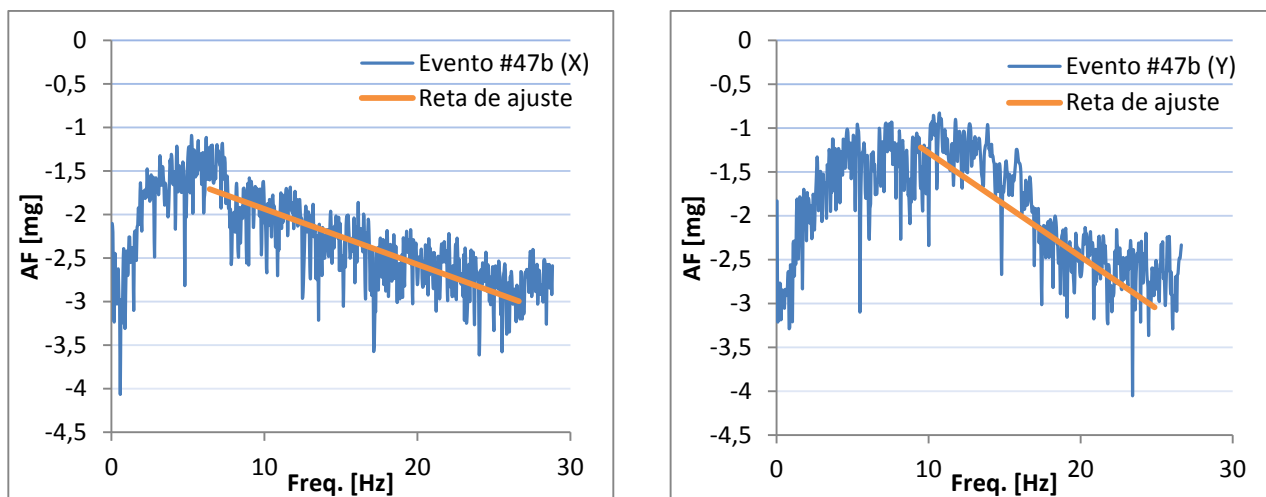


Figura C.2.47b – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 05 de Janeiro de 2005, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SMJ, a constituir o evento 47b.

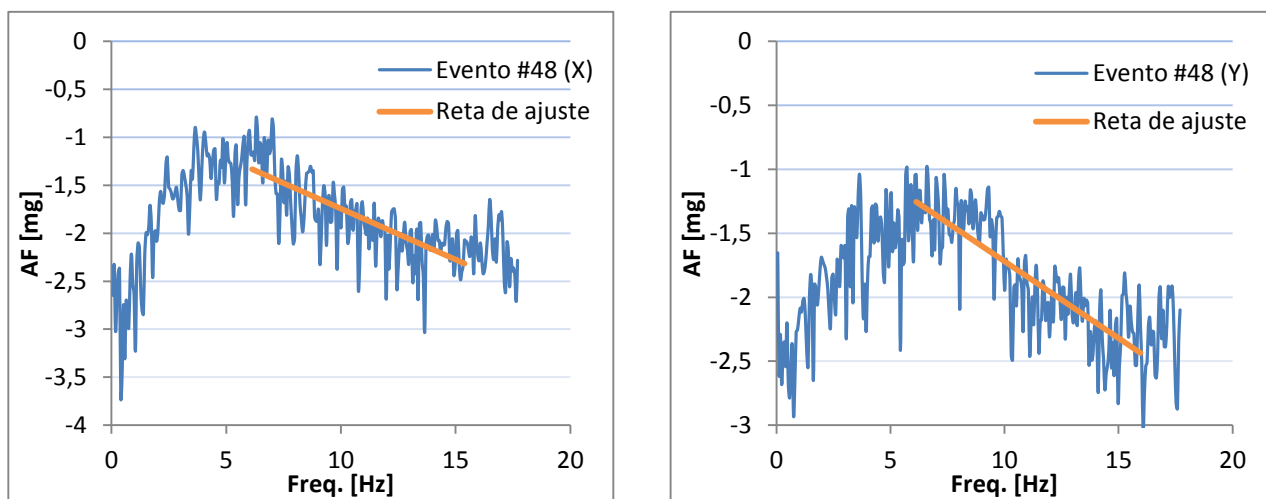


Figura C.2.48 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 13 de Dezembro de 2005, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 48.

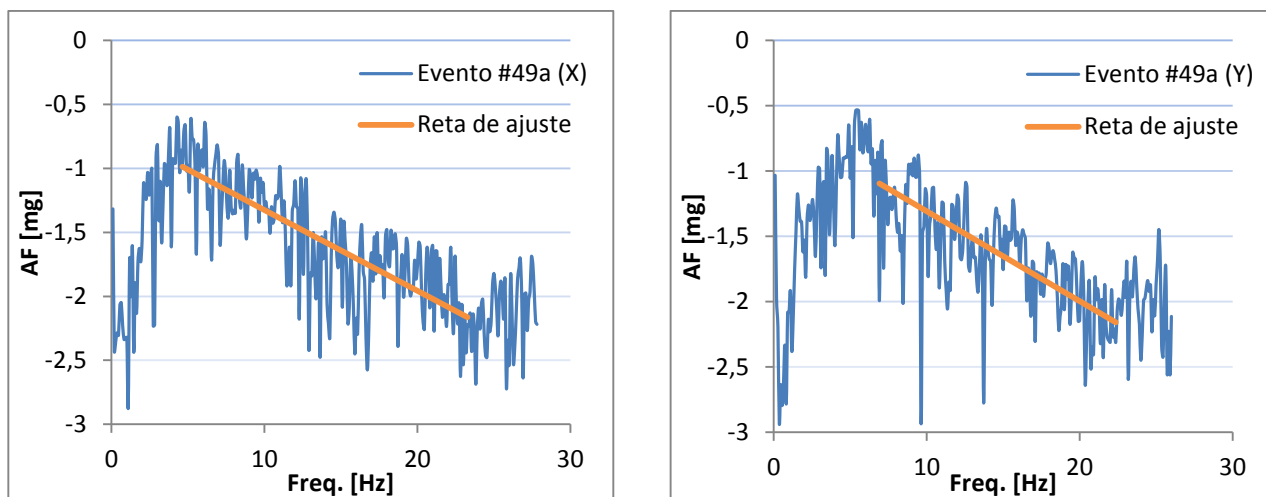


Figura C.2.49a – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 05 de Outubro de 2006, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 49a.

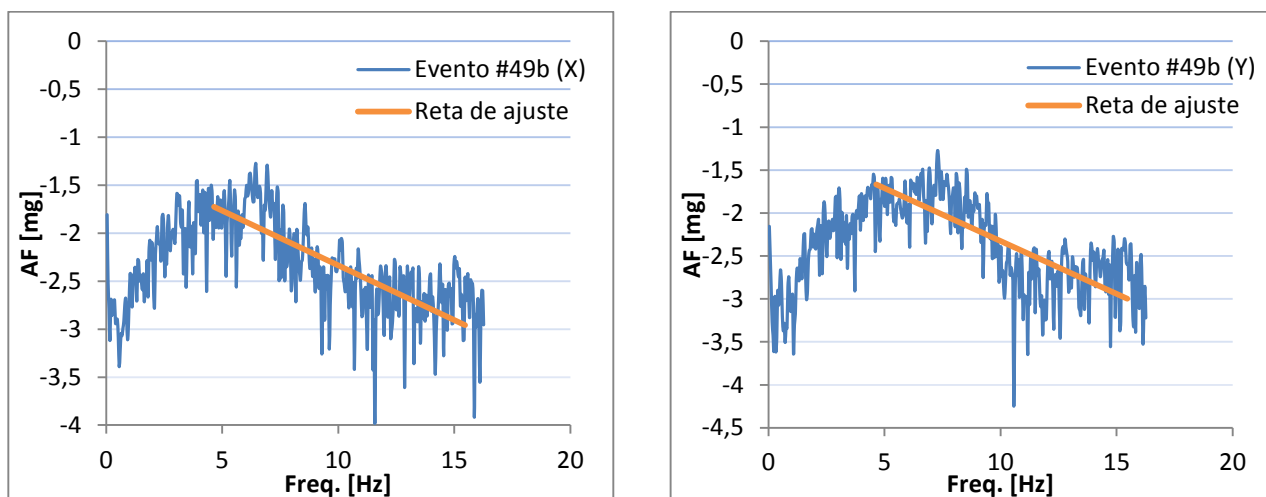


Figura C.2.49b – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 05 de Outubro de 2006, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação HPT, a constituir o evento 49b.

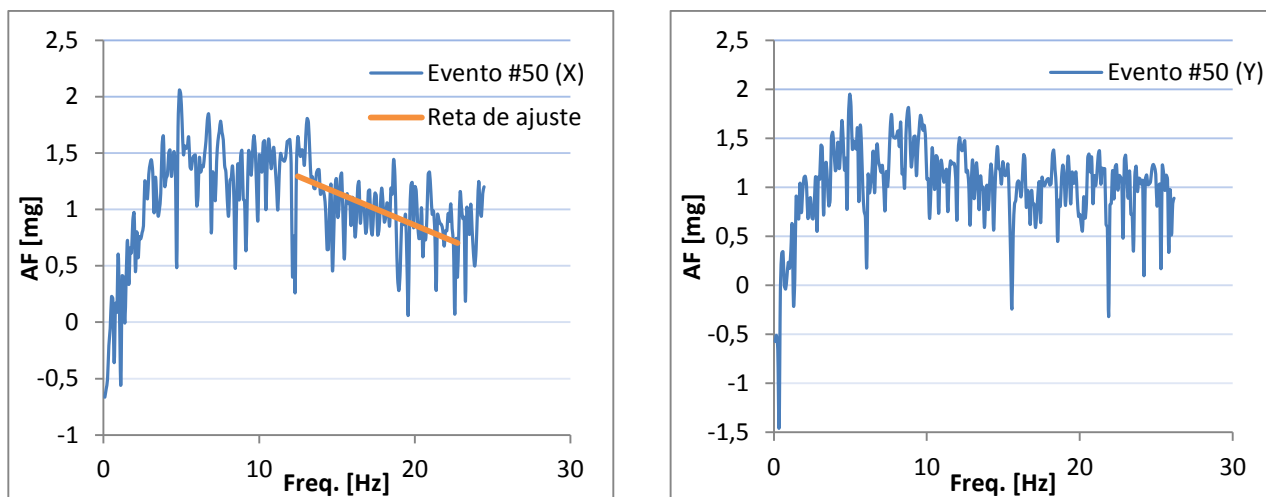


Figura C.2.50 – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 27 de Junho de 1997, para a componente horizontal X, da estação LR1, a constituir o evento 50. A componente horizontal na direção Y não consta do registo por apresentar uma relação $R^2 < 20\%$.

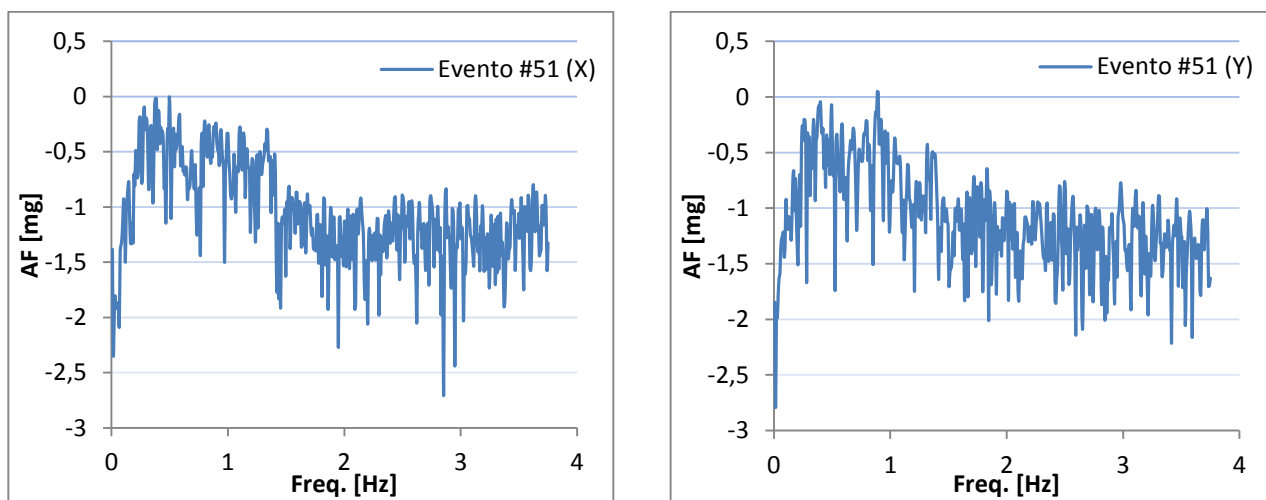


Figura C.2.51 – Espectros de aceleração para o sismo de 08 de Agosto de 1997, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação LR1, a constituir o evento 51. Sem conteúdo nas altas frequências para ajuste linear.

ANEXO D

D. Espectros de Amplitude de Fourier em Deslocamento

D.1 Tratamento Gráfico

São apresentados os 46 registos validados, provenientes da rede acelerográfica dos Açores, entre 1969-2006, em solos duros, registados em estações implementadas em piso térreo, para sismos com magnitudes entre 2,1 e 5,1, representando apenas o contributo das ondas S, submetidos a análise gráfica, para determinação dos parâmetros da fonte sísmica.

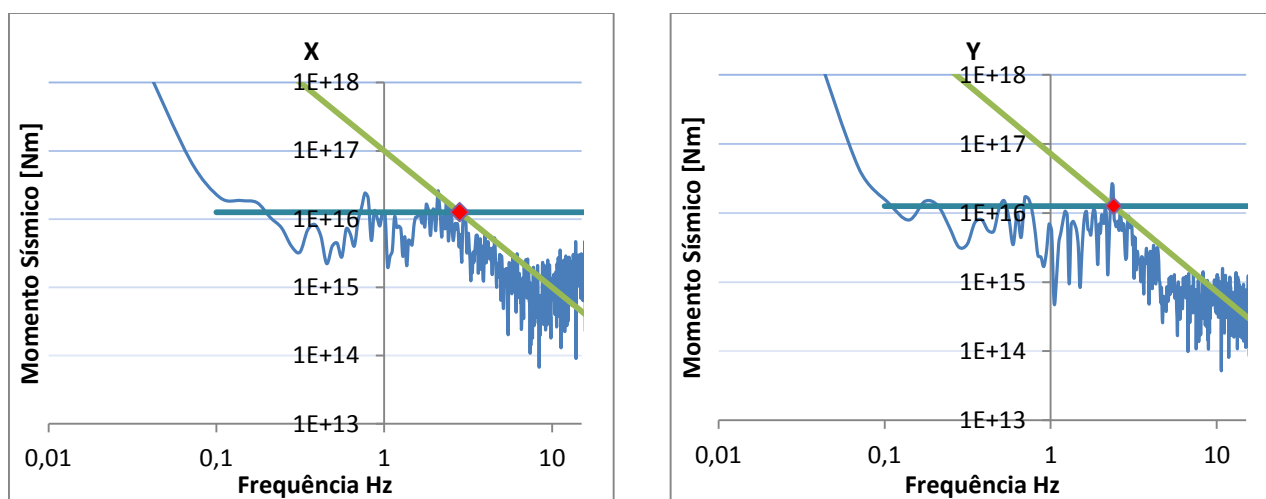


Figura D.1.4a – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espetro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 04 de Março de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, com origem no registo da estação PVI, a constituir o evento 4a.

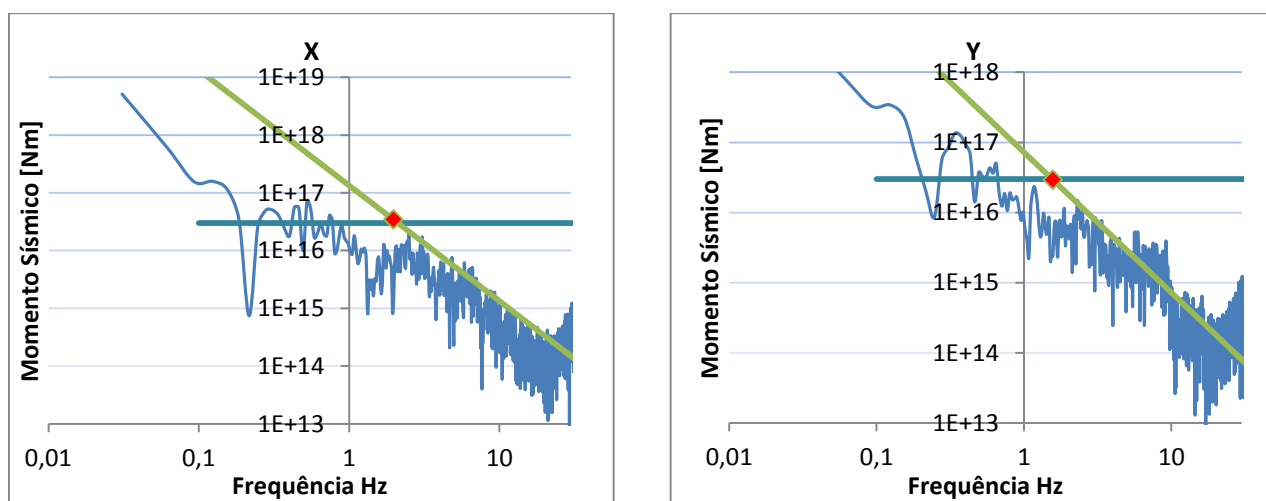


Figura D.1.5a – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 01 de Agosto de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 5a.

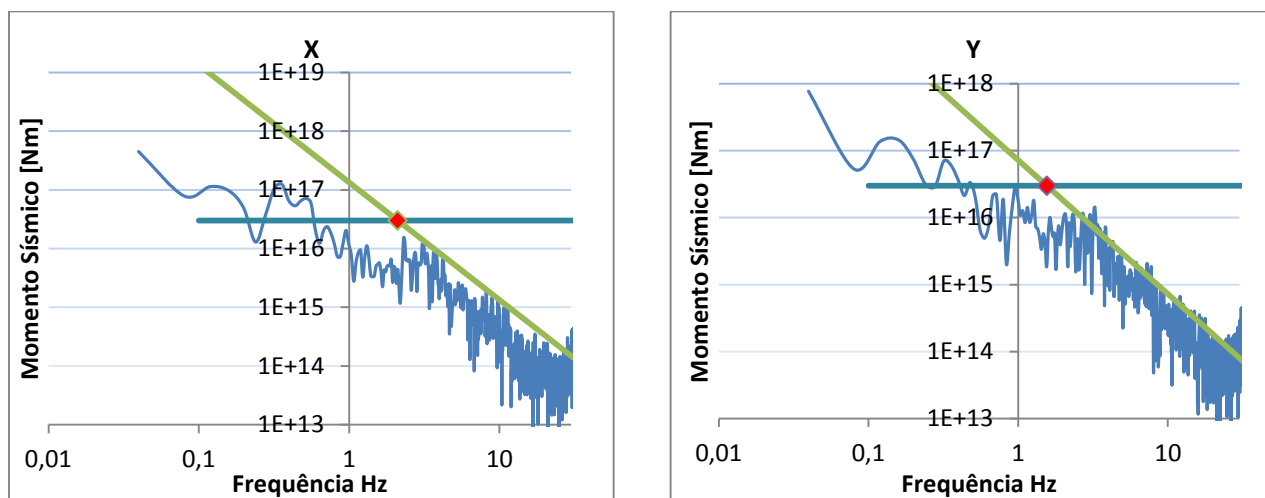


Figura D.1.5b – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 01 de Agosto de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SRO, a constituir o evento 5b.

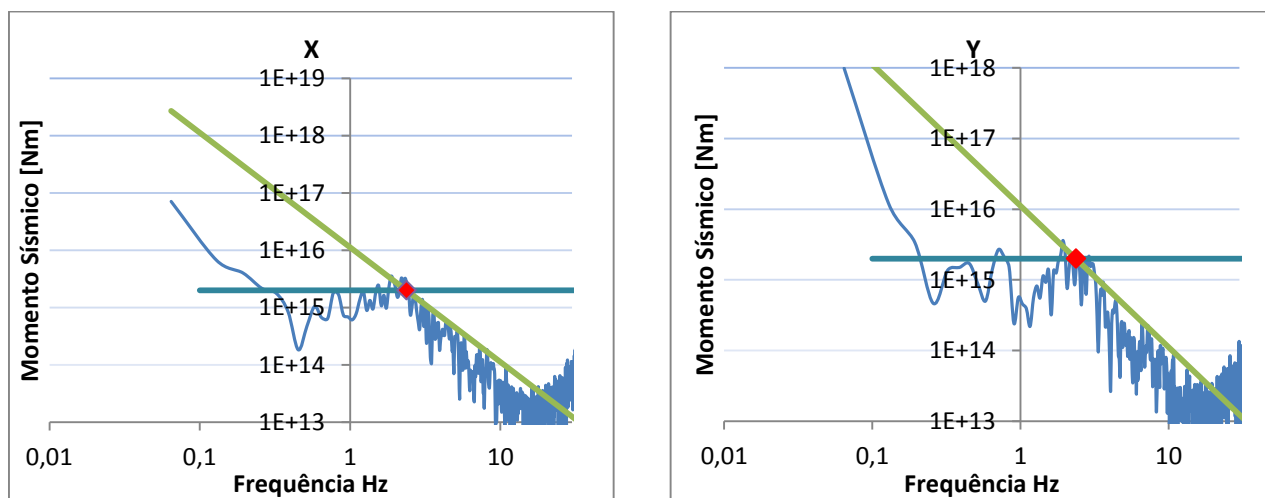


Figura D.1.6 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 03 de Setembro de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação PVI, a constituir o evento 6.

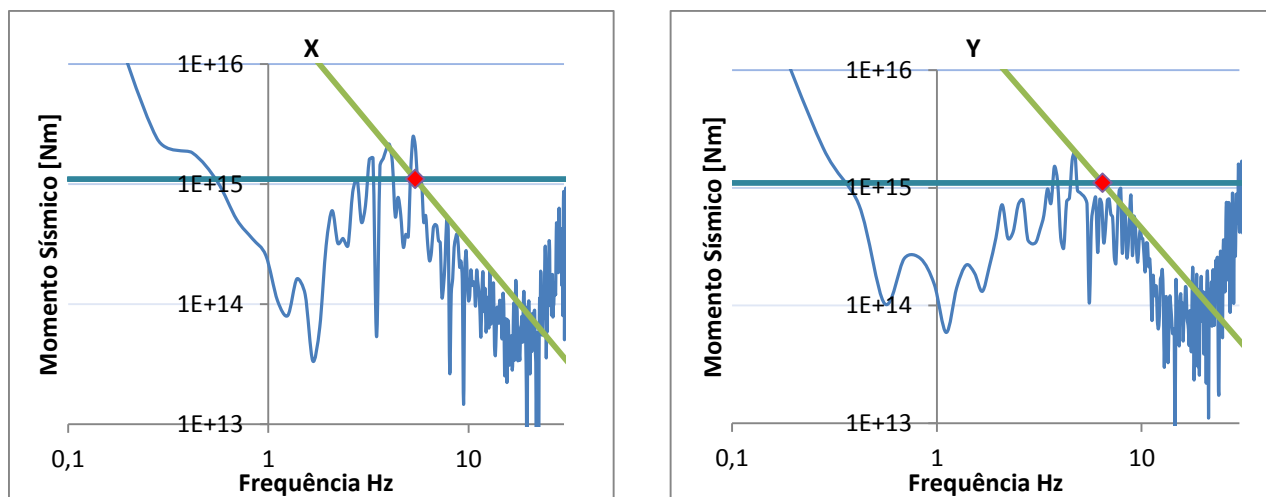


Figura D.1.7 – Espetros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espetro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de Novembro de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação TOP, a constituir o evento 7.

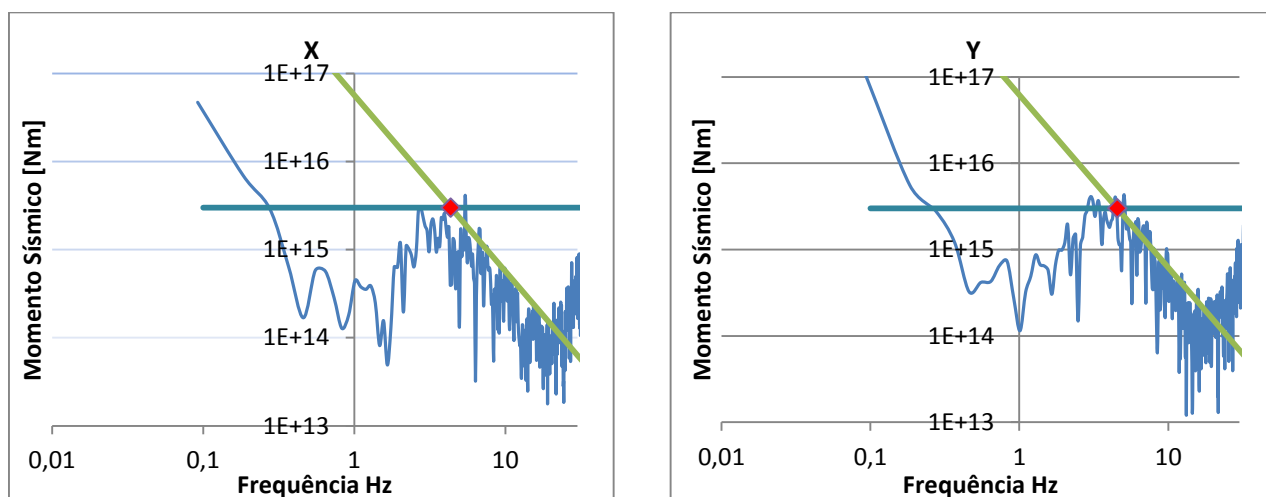


Figura D.1.8 – Espetros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espetro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de Dezembro de 2000, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação TOP, a constituir o evento 8.

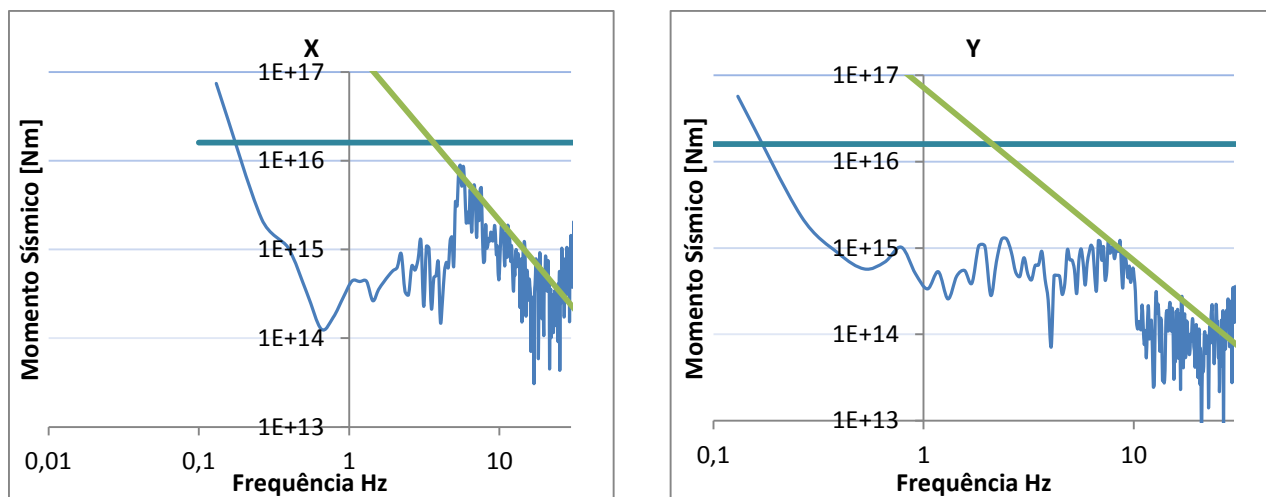


Figura D.1.9 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde) e do momento sísmico (reta a azul) do sismo de 29 de Janeiro de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 9. O decréscimo energético no registo em X e a incompatibilidade do momento sísmico entre as componentes, impossibilitam a determinação da frequência-esquina.

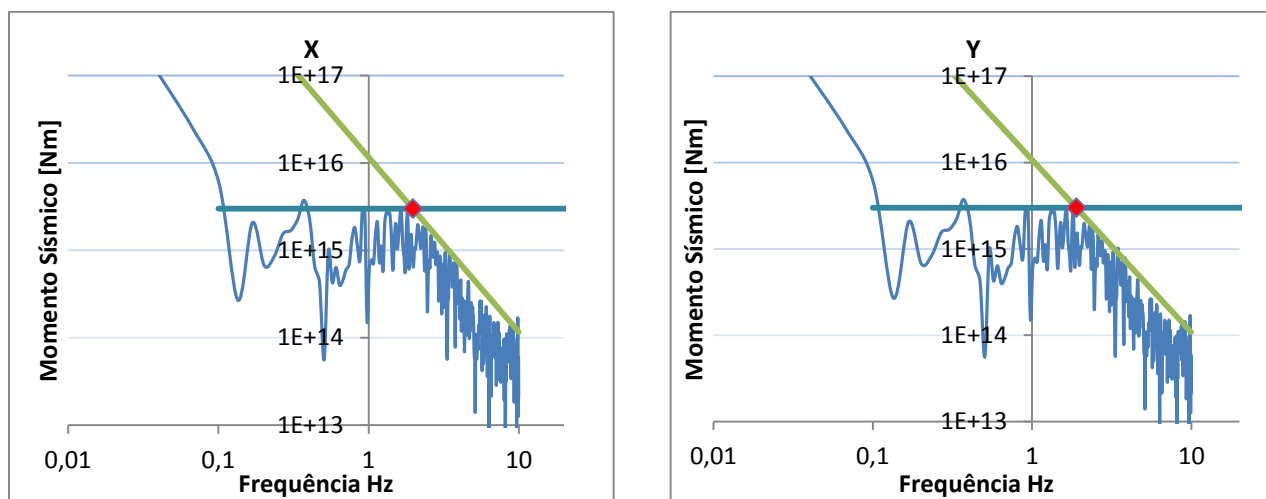


Figura D.1.12a – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 02 de Junho de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SRO, a constituir o evento 12a.

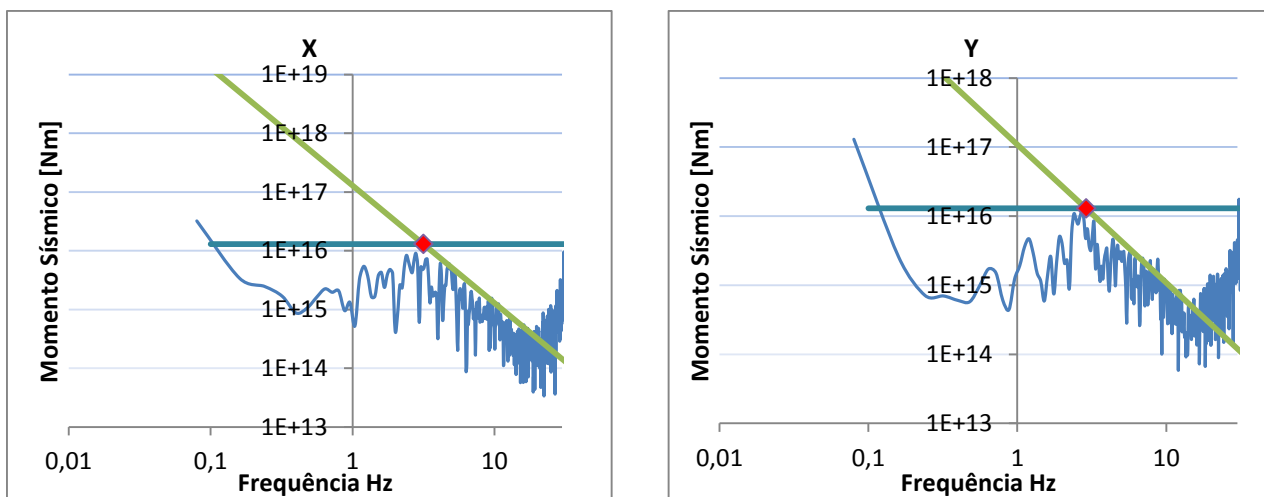


Figura D.1.13a – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 06 de Julho de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação TOP, a constituir o evento 13a.

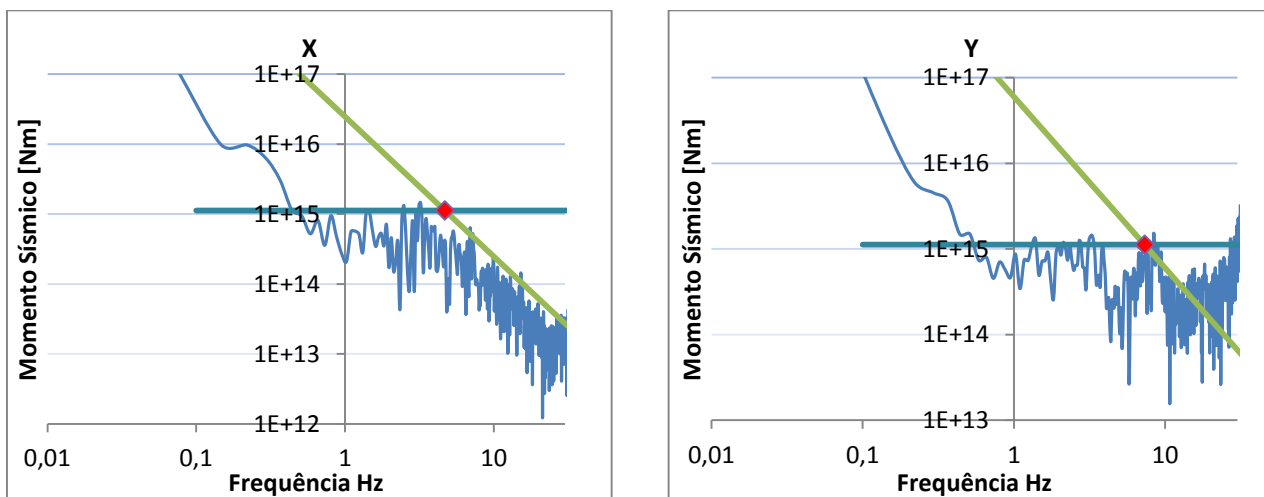


Figura D.1.13b – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 06 de Julho de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 13b.

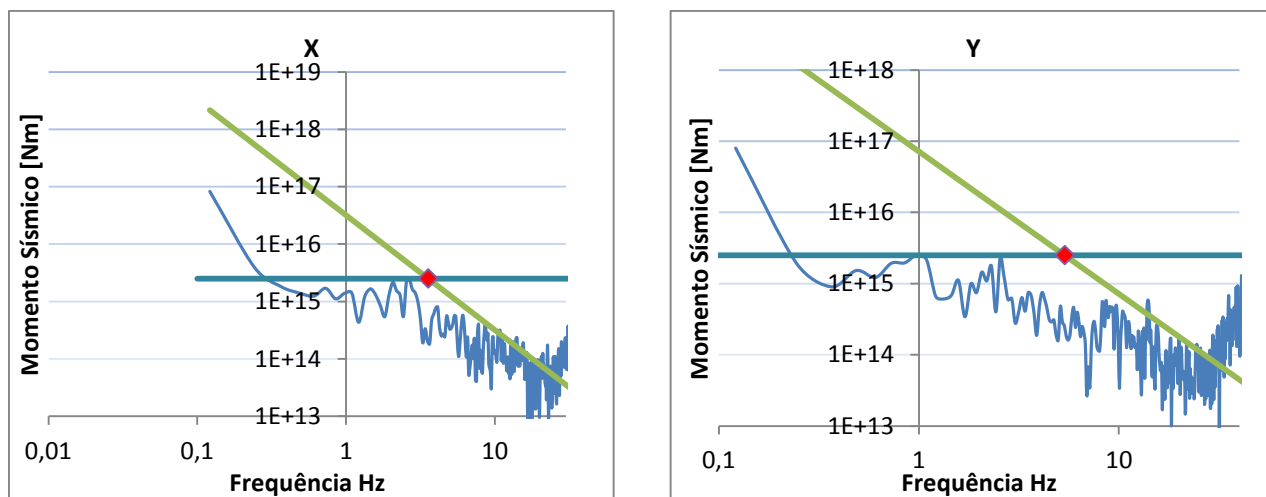


Figura D.1.13c – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 06 de Julho de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 13c.

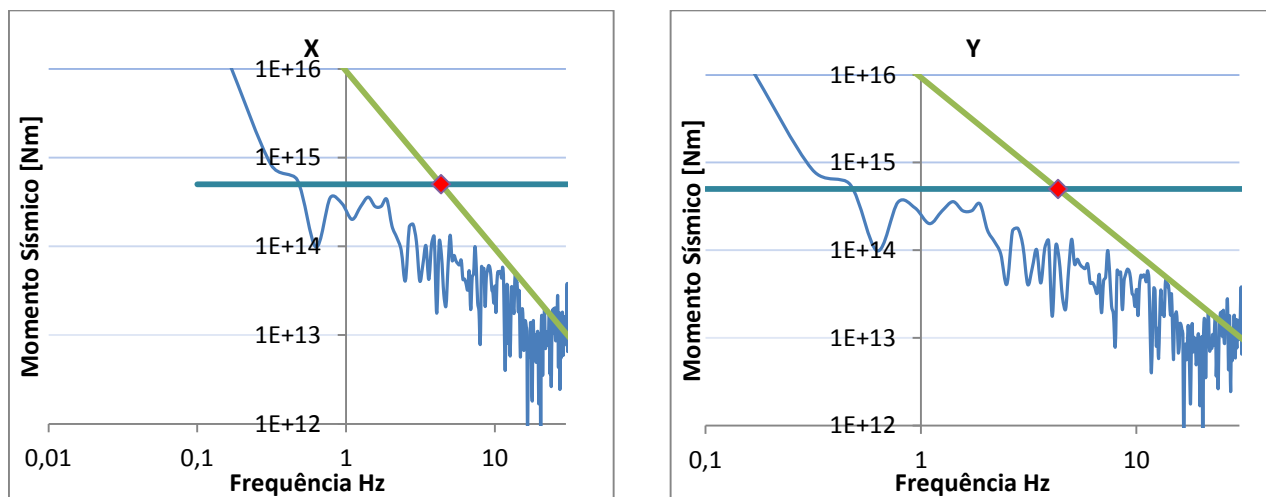


Figura D.1.14 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 03 de Outubro de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 14.

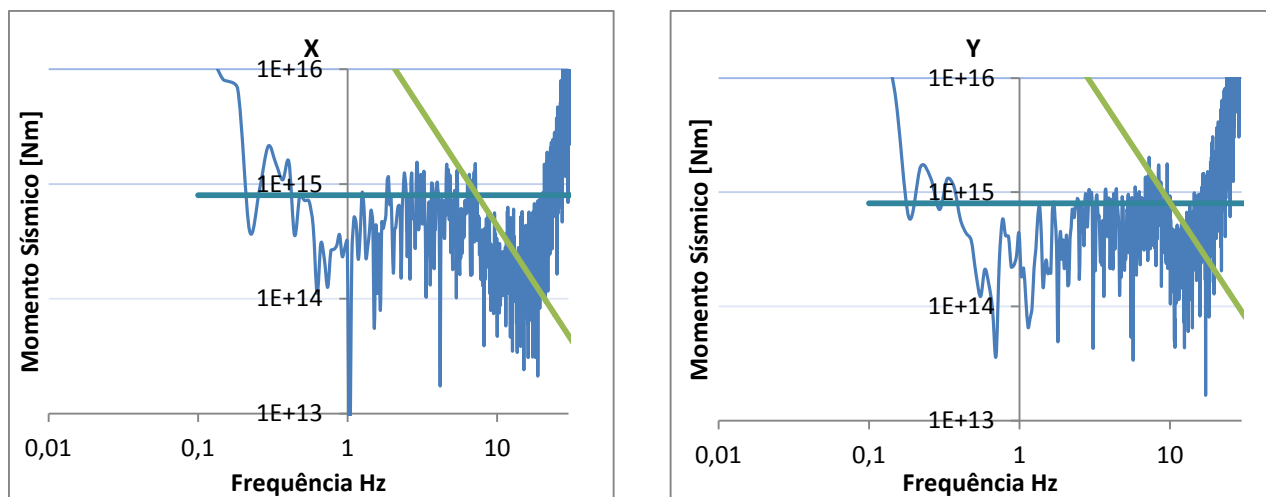


Figura D.1.15 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde) e do momento sísmico (reta a azul) do sismo de 12 de Outubro de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 15, sem conteúdo nas altas frequências a impossibilitar a determinação da frequência-esquima.

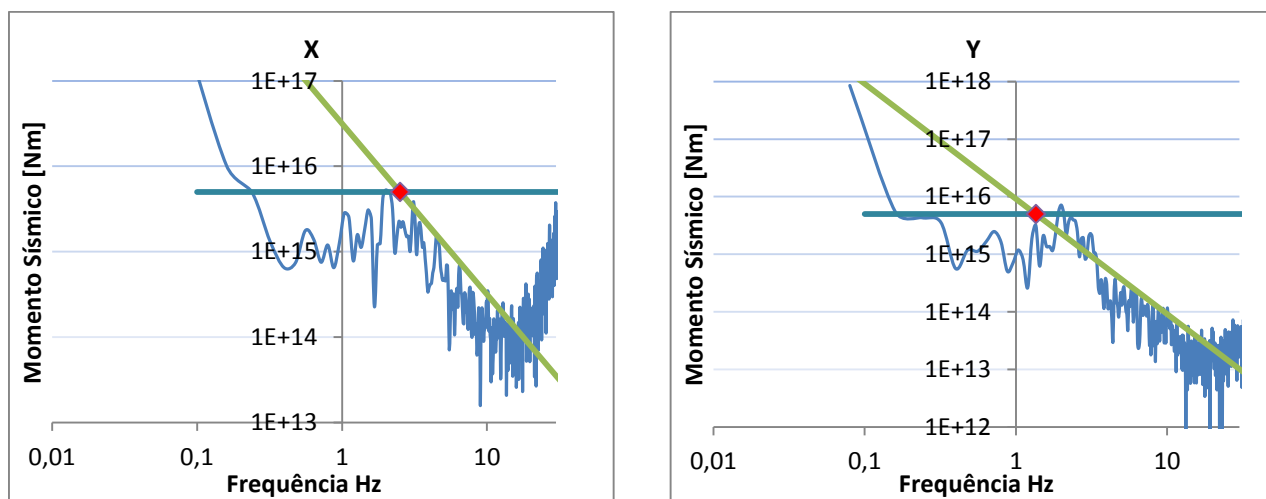


Figura D.1.16 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 23 de Dezembro de 2001, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação PVI, a constituir o evento 16.

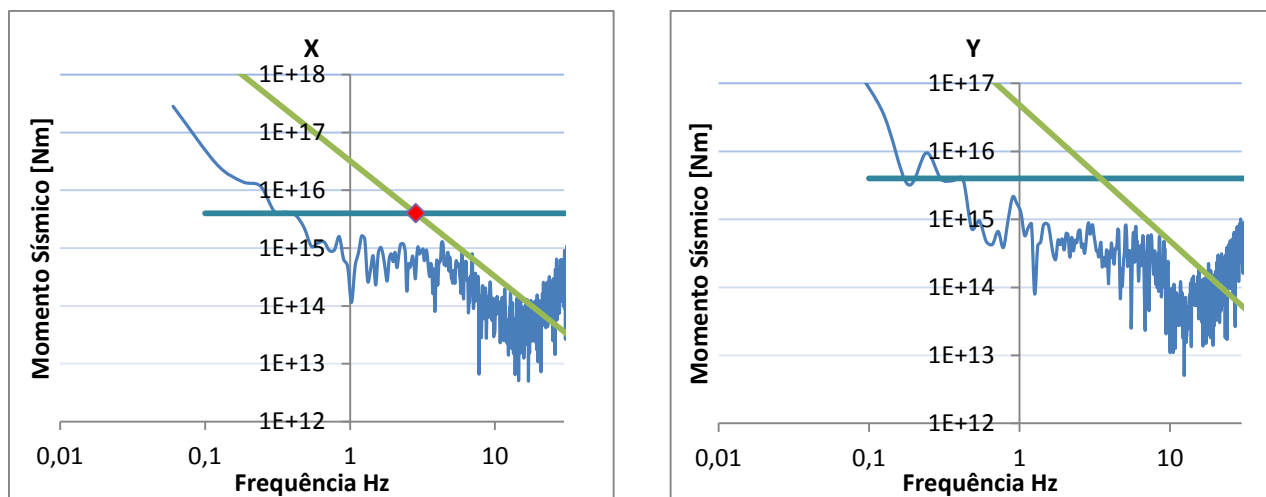


Figura D.1.17a – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde) e do momento sísmico (reta a azul) do sismo de 13 de Fevereiro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 17a. Apenas na componente X foi concretizada a determinação da frequência de esquina (ponto vermelho); na componente Y, o gráfico não assume a forma típica no decaimento.

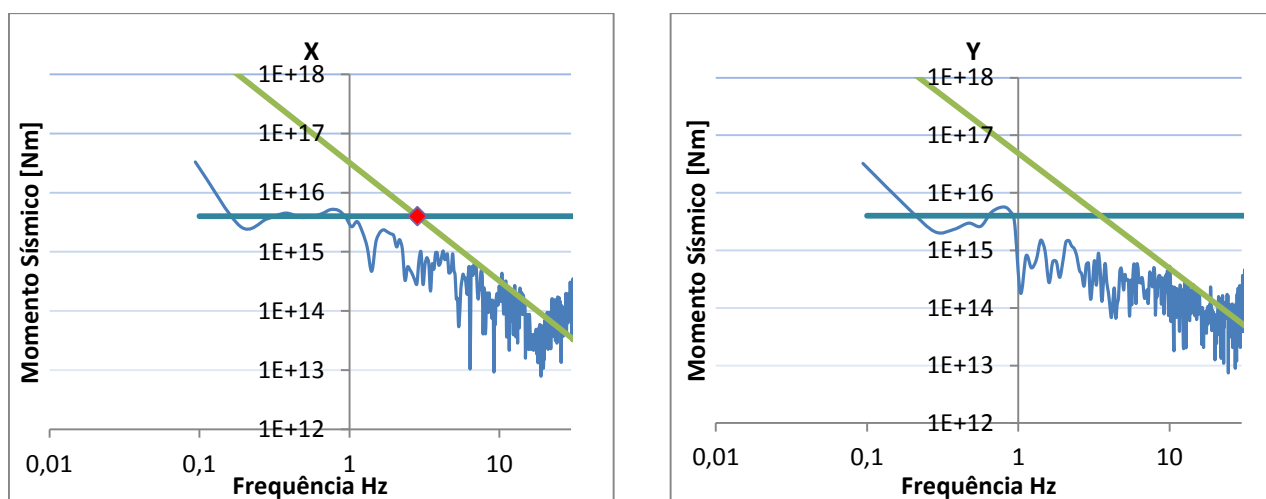


Figura D.1.17b – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde) e do momento sísmico (reta a azul) do sismo de 13 de Fevereiro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 17b. Apenas na componente X foi concretizada a determinação da frequência de esquina (ponto vermelho); na componente Y, o gráfico não assume a forma típica no decaimento.

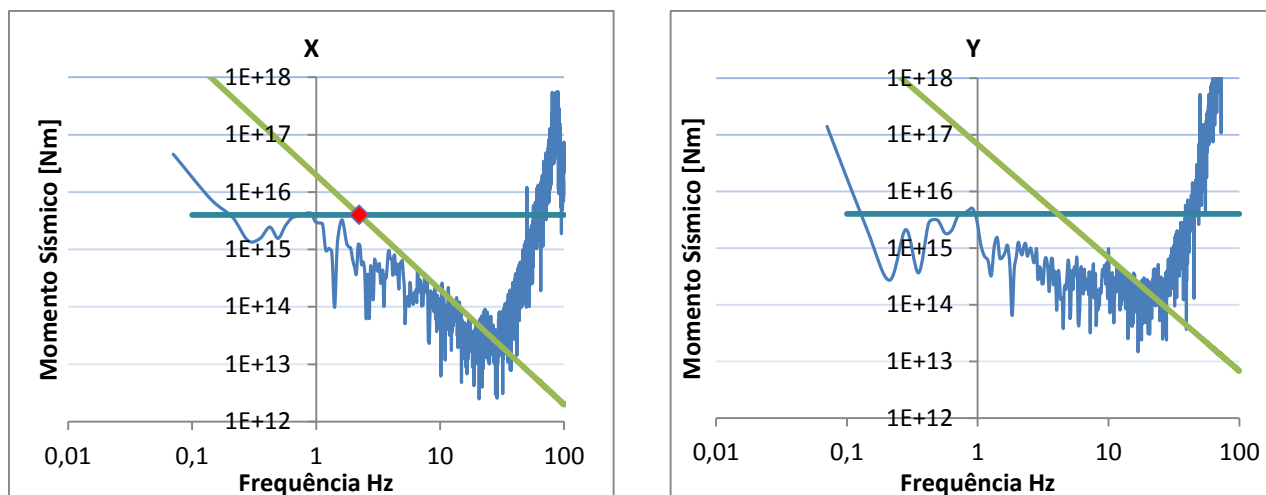


Figura D.1.18 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde) e do momento sísmico (reta a azul) do sismo de 13 de Fevereiro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 18. Apenas na componente X foi concretizada a determinação da frequência de esquina (ponto vermelho); na componente Y, o gráfico não assume a forma típica no decaimento.

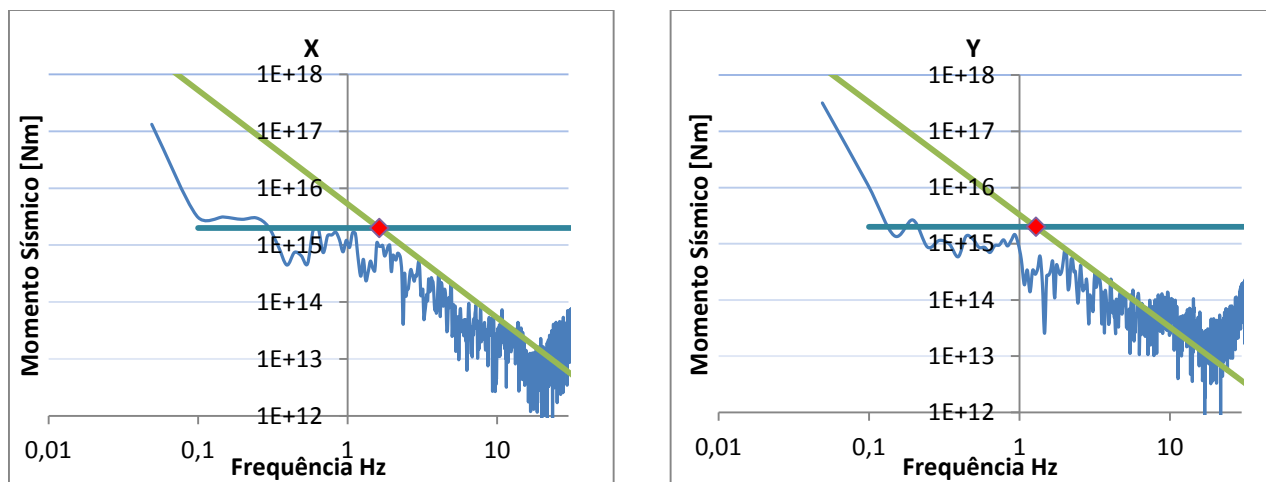


Figura D.1.19 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 13 de Fevereiro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 19.

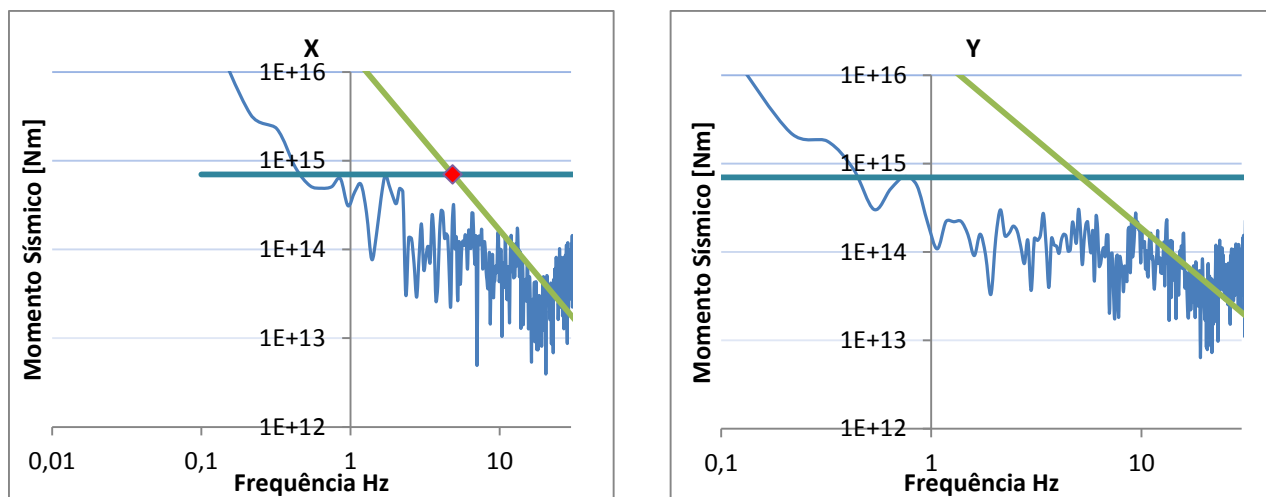


Figura D.1.20 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde) e do momento sísmico (reta a azul) do sismo de 13 de Fevereiro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 20. Apenas na componente X foi concretizada a determinação da frequência de esquina (ponto vermelho); na componente Y, o gráfico não assume a forma típica no decaimento.

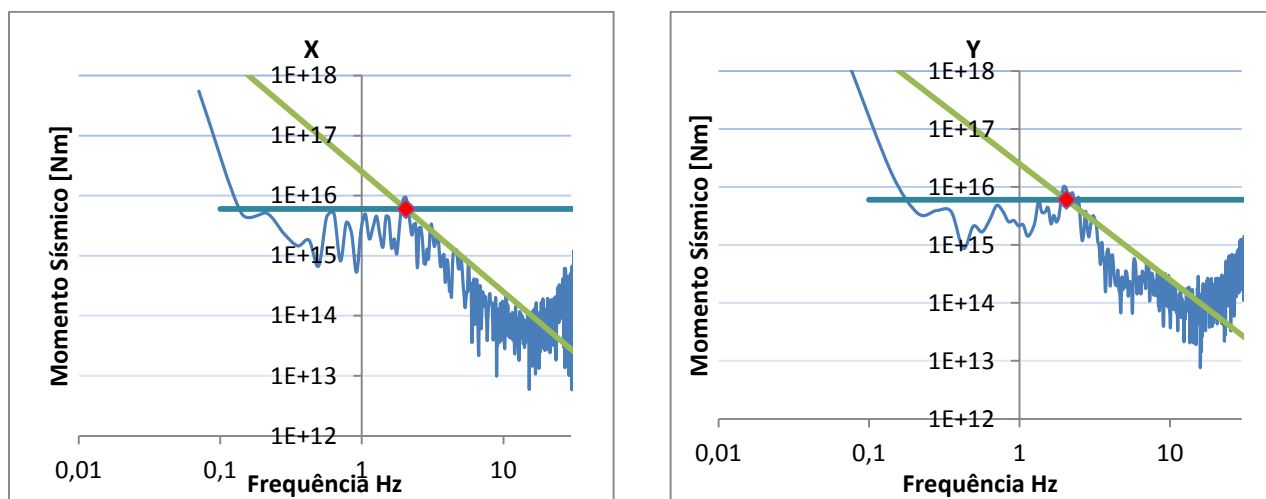


Figura D.1.21 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 11 de Março de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação PVI, a constituir o evento 21.

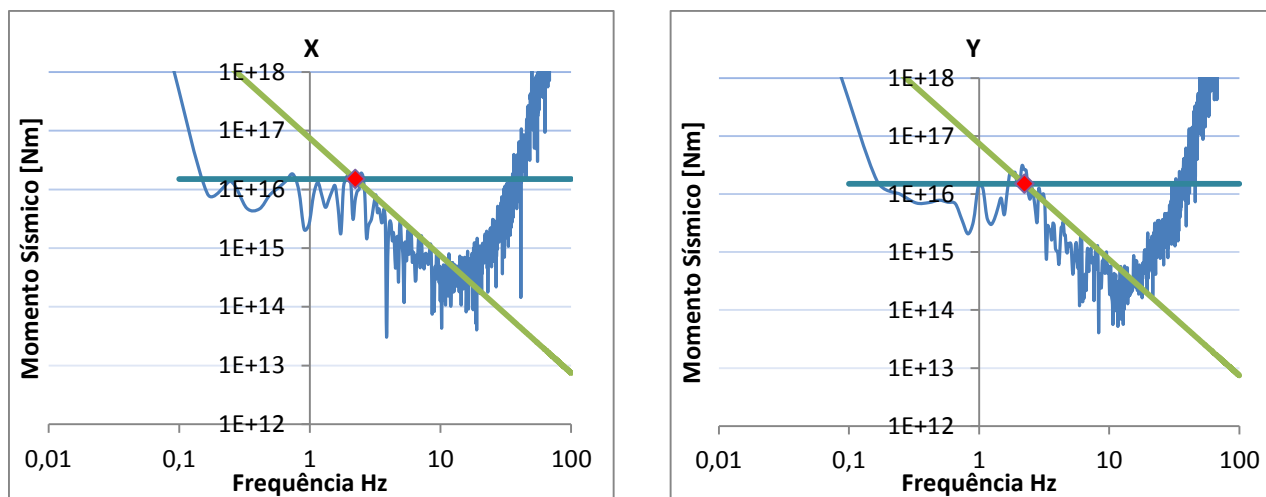


Figura D.1.22 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 10 de Junho de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação PVI, a constituir o evento 22.

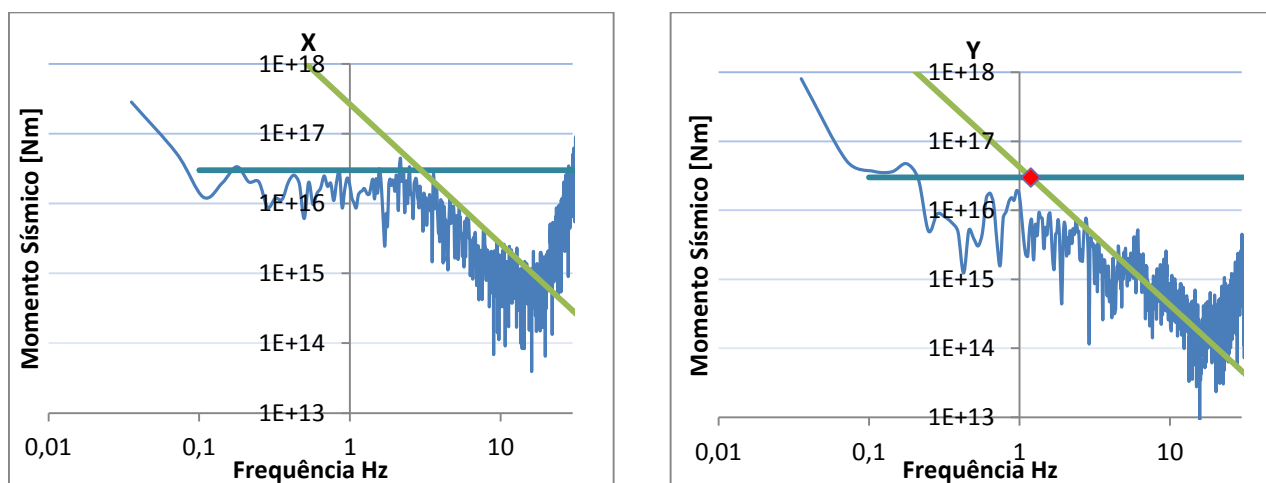


Figura D.1.23a – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde) e do momento sísmico (reta a azul) do sismo de 30 de Novembro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação TOP, a constituir o evento 23a. Apenas na componente Y foi concretizada a determinação da frequência de esquina (ponto vermelho); na componente X, o cálculo da queda de tensão atinge um valor muito acima do limite da normalidade, pelo que se anula a contribuição da componente.

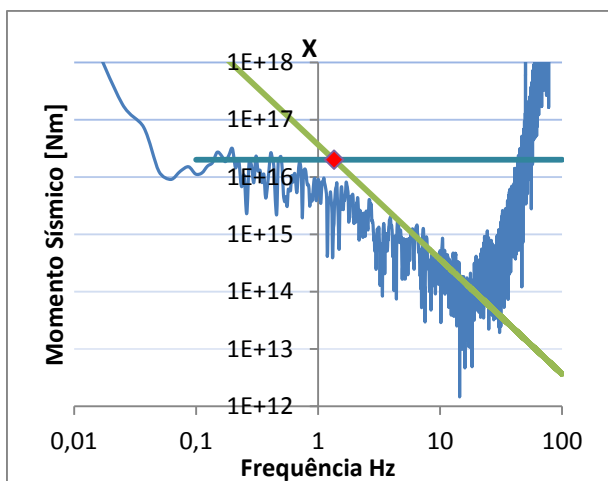


Figura D.1.23b – Espectro de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde) e do momento sísmico (reta a azul) do sismo de 30 de Novembro de 2002, para a componente horizontal X, da estação SCR, a constituir o evento 23b. A componente horizontal na direção Y não consta do registo por apresentar uma relação $R^2 < 20\%$ na determinação do decaimento espectral, o que invalidou o registo.

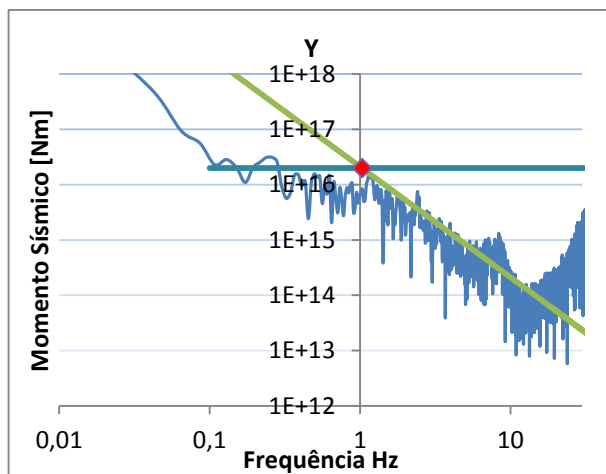
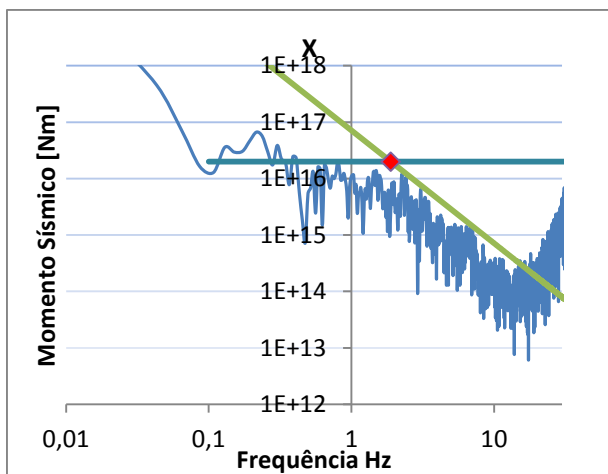


Figura D.1.23c – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de Novembro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 23c.

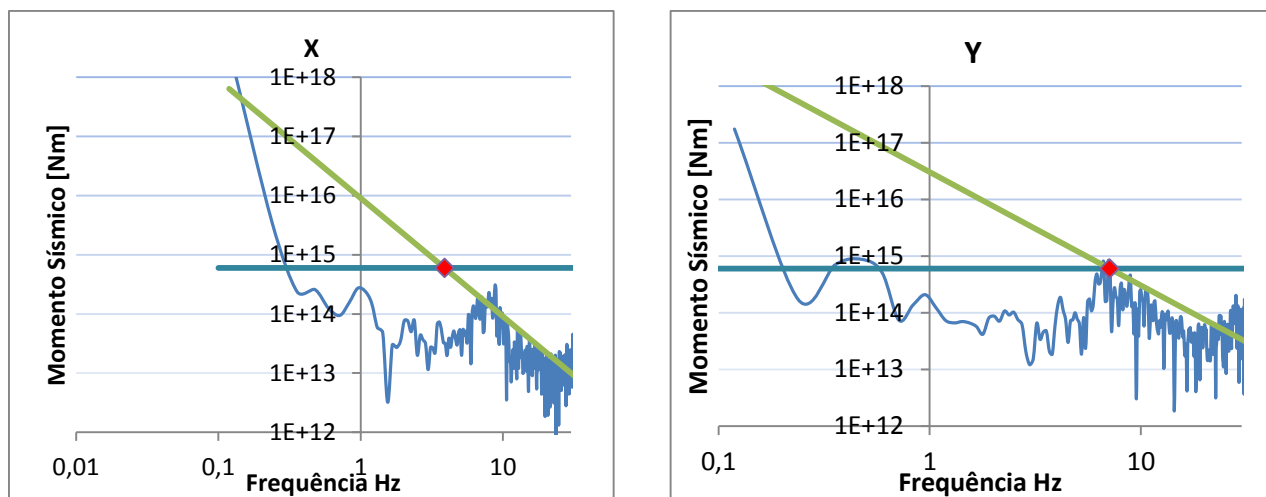


Figura D.1.26 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 18 de Julho de 1998, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação HSC, a constituir o evento 26.

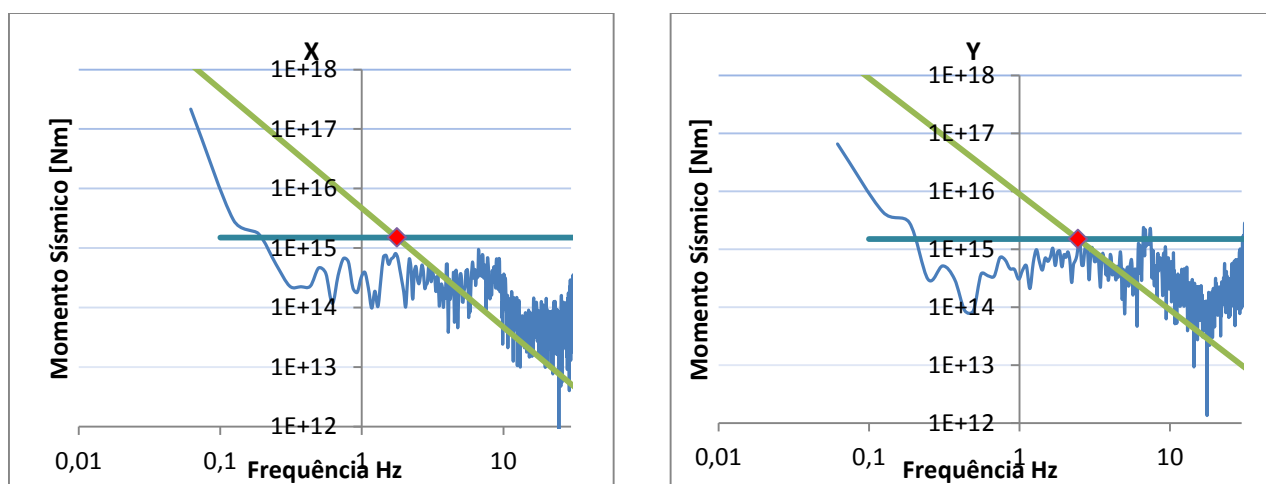


Figura D.1.27 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 18 de Julho de 1998, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação HSC, a constituir o evento 27.

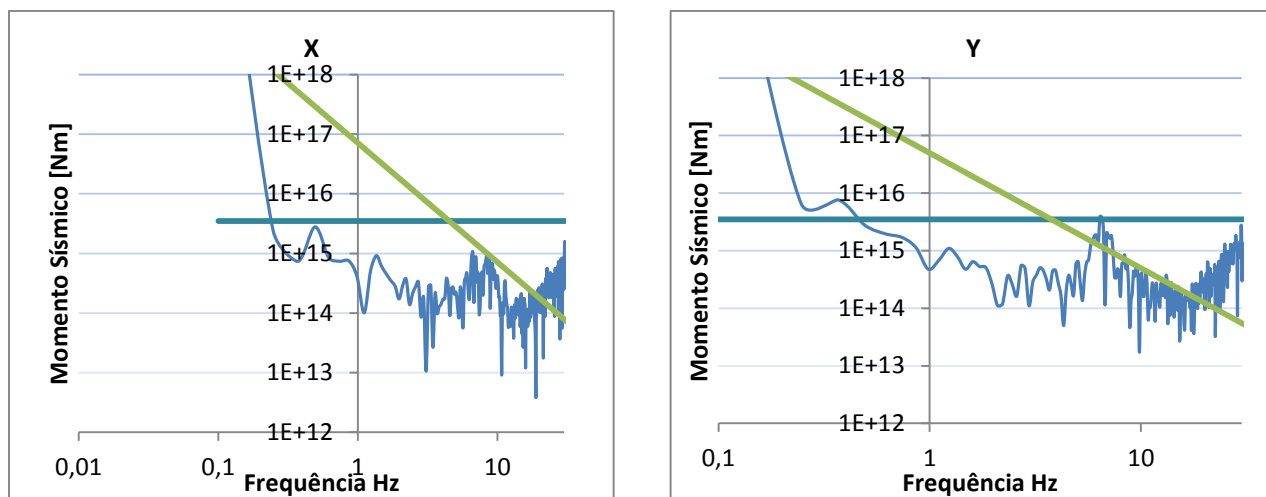


Figura D.1.28 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde) e do momento sísmico (reta a azul) do sismo de 20 de Julho de 1998, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação HSC, a constituir o evento 28. O decréscimo energético nos registos X e Y impossibilitam a determinação da frequência-esquina.

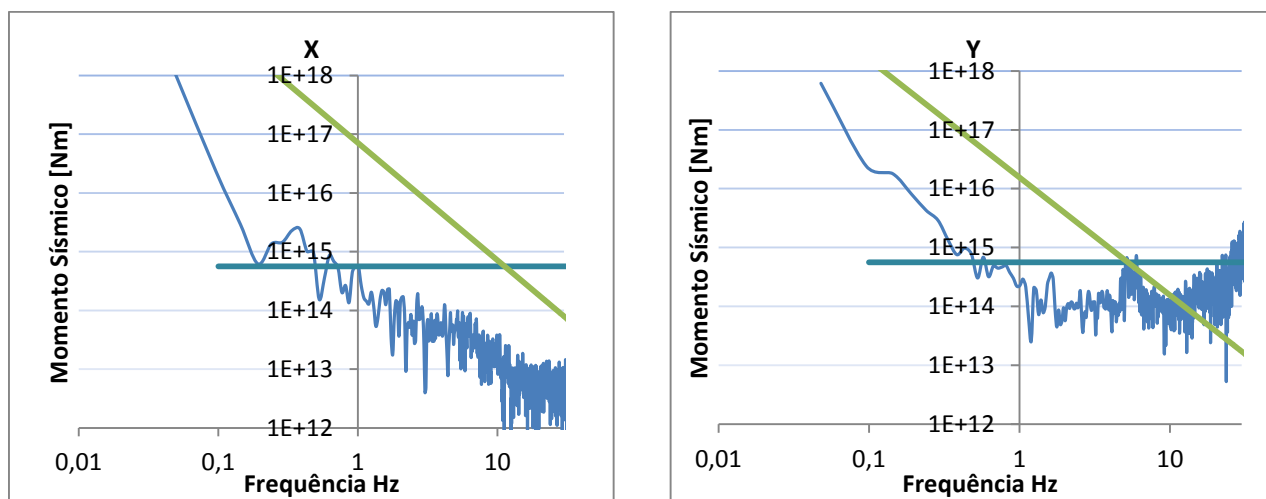


Figura D.1.29 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde) e do momento sísmico (reta a azul) do sismo de 31 de Agosto de 1998, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação HHT, a constituir o evento 29. Na componente X, o gráfico não assume a forma típica no decaimento. Em Y, o decréscimo energético nos registos impossibilita a determinação da frequência-esquina.

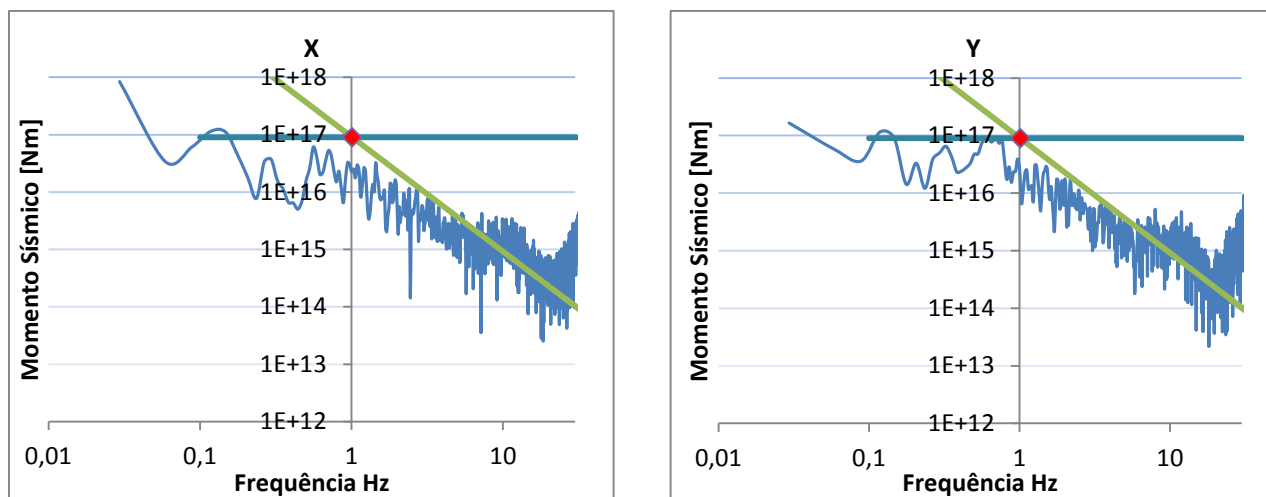


Figura D.1.31 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 30 de Novembro de 2002, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SMJ, a constituir o evento 31.

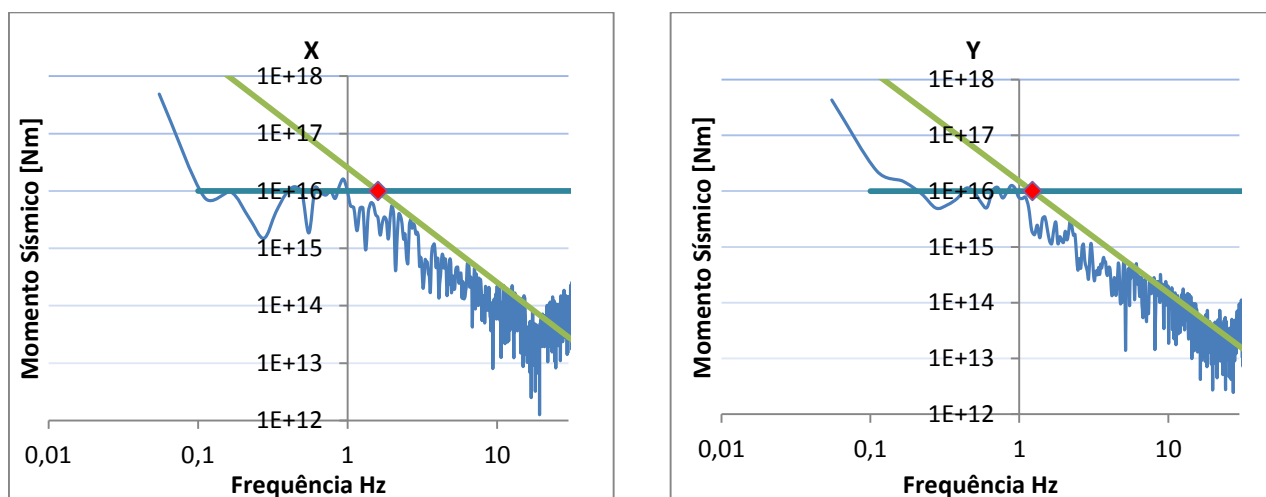


Figura D.1.34 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 01 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 34.

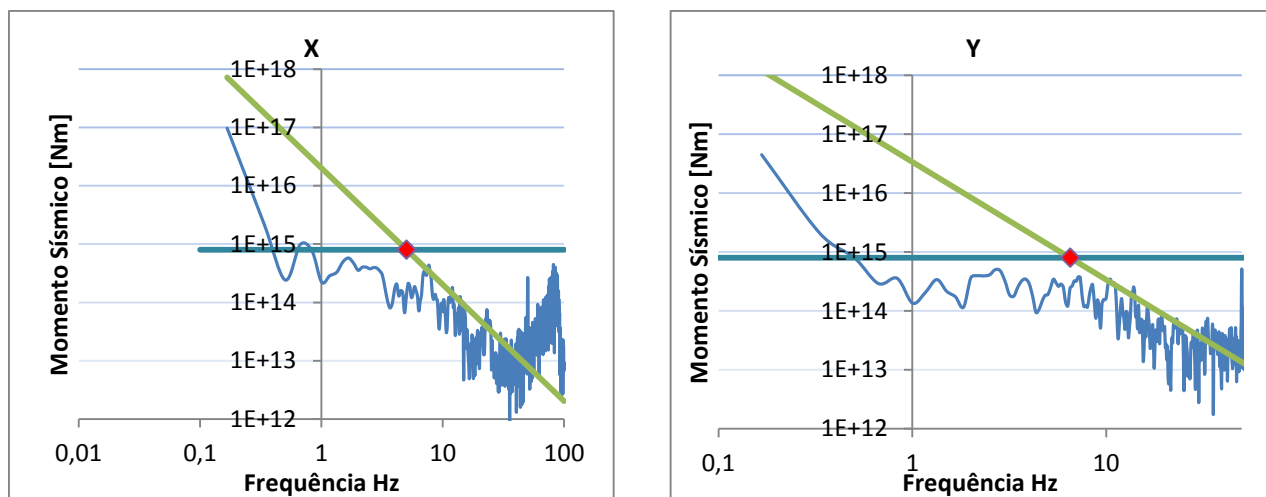


Figura D.1.35 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 17 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 35.

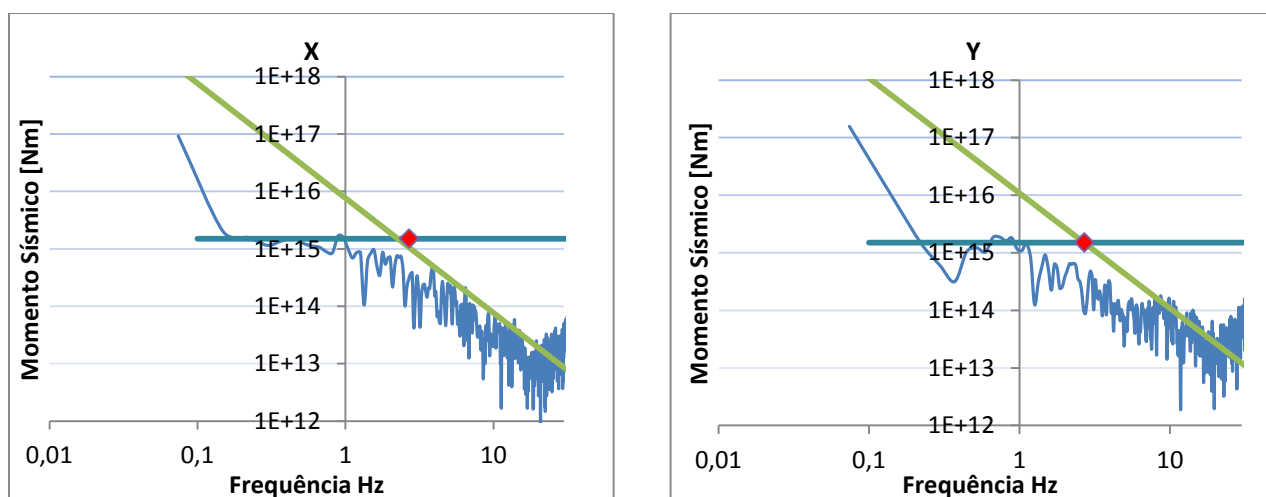


Figura D.1.36 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 18 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 36.

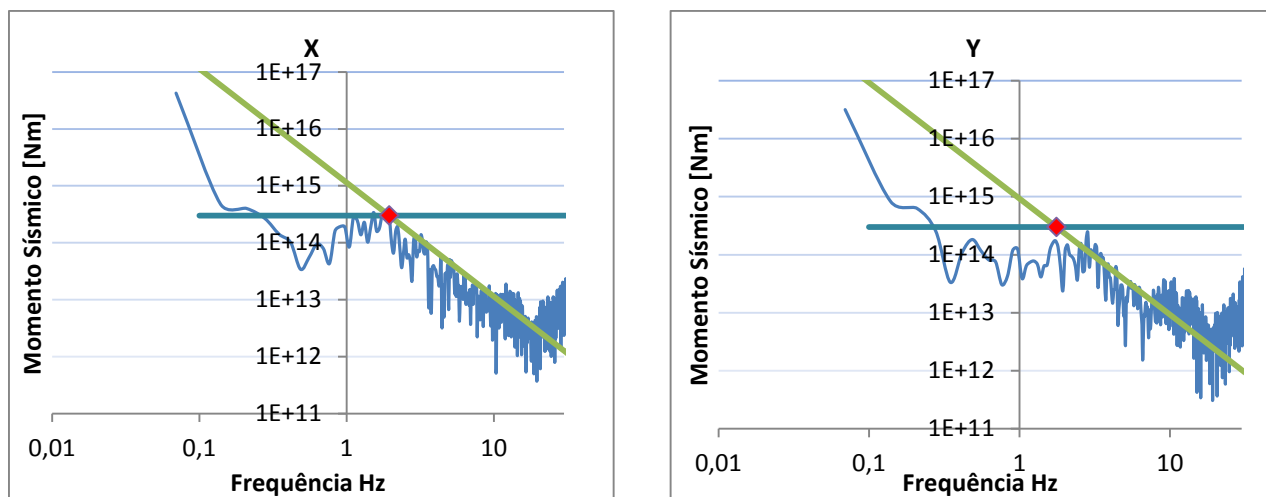


Figura D.1.37 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 27 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 37.

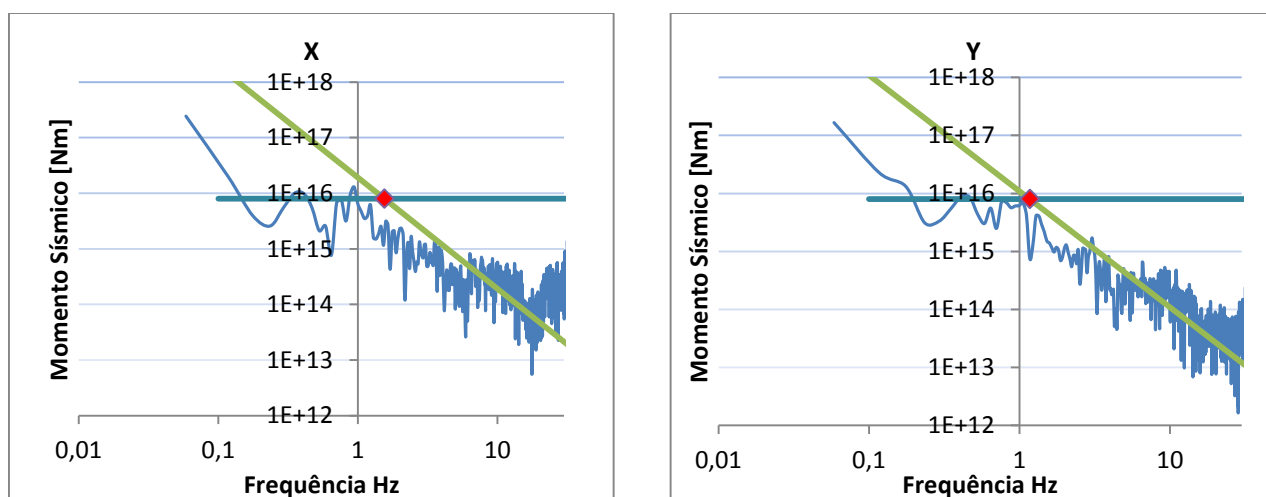


Figura D.1.38 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 28 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 38.

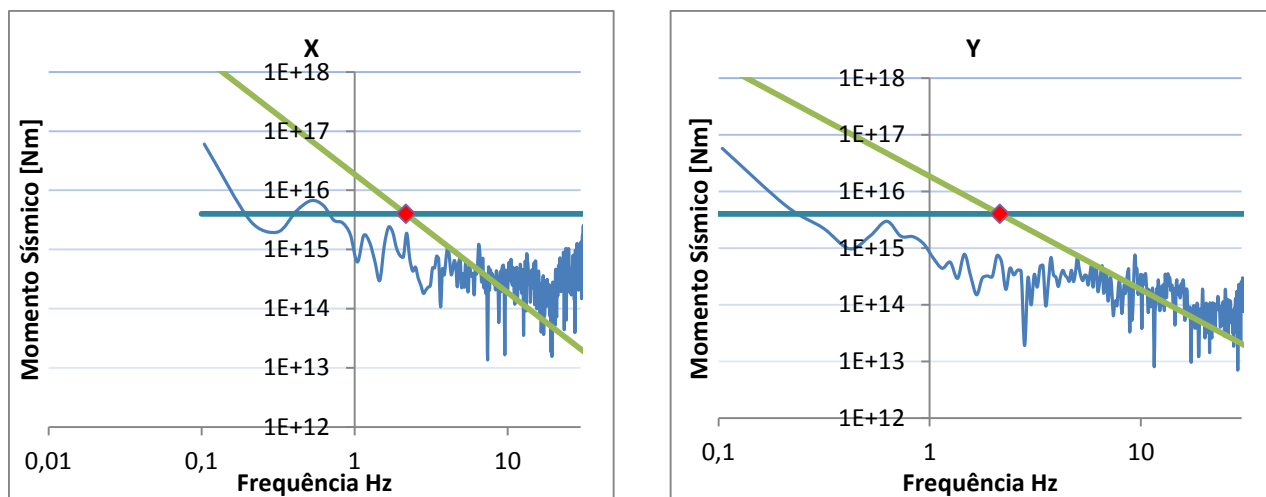


Figura D.1.39 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 28 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 39.

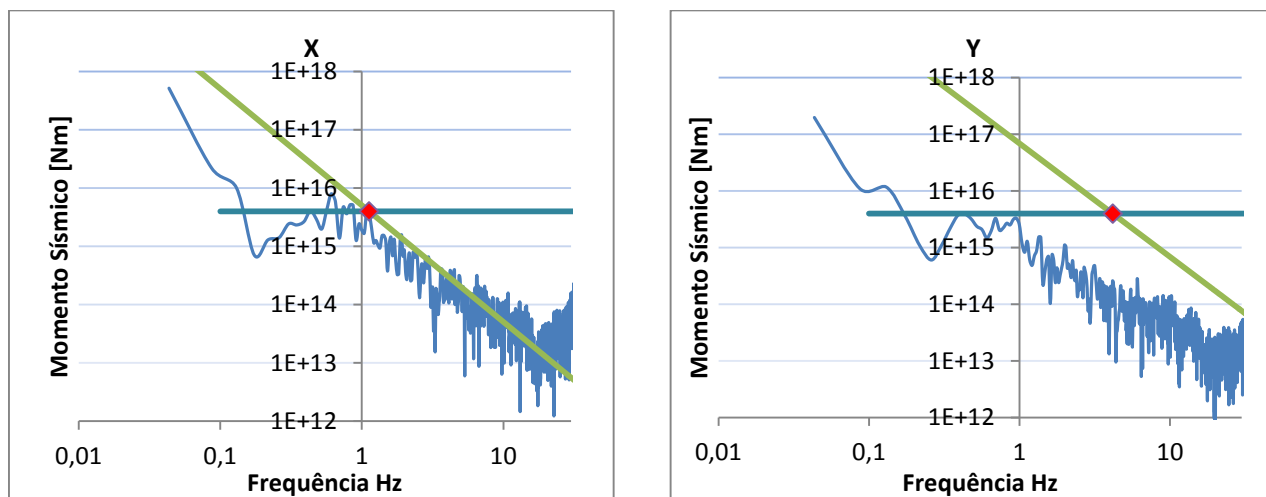


Figura D.1.40 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 28 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 40.

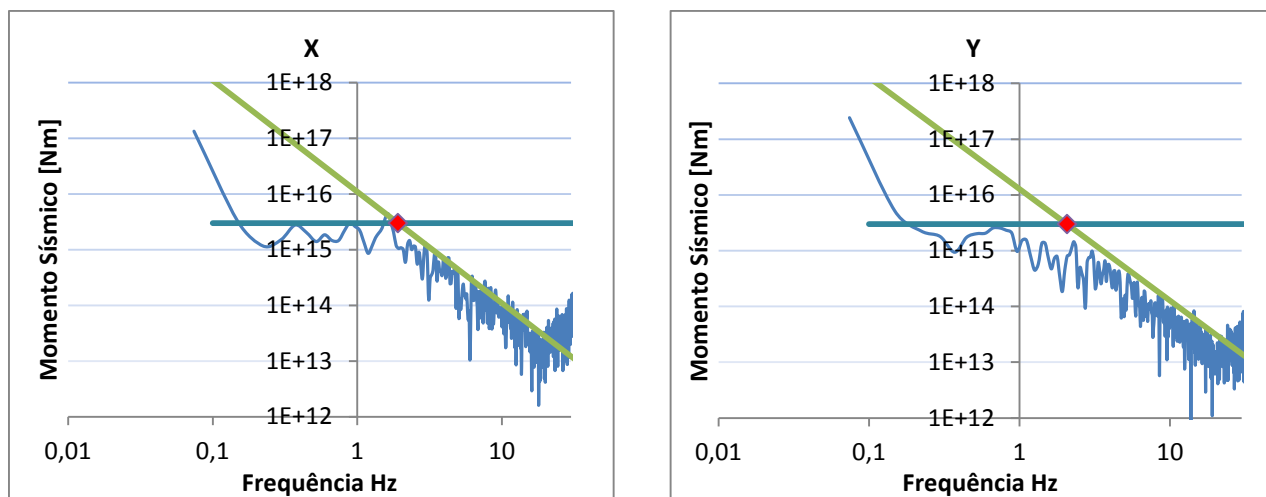


Figura D.1.41 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 31 de Janeiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 41.

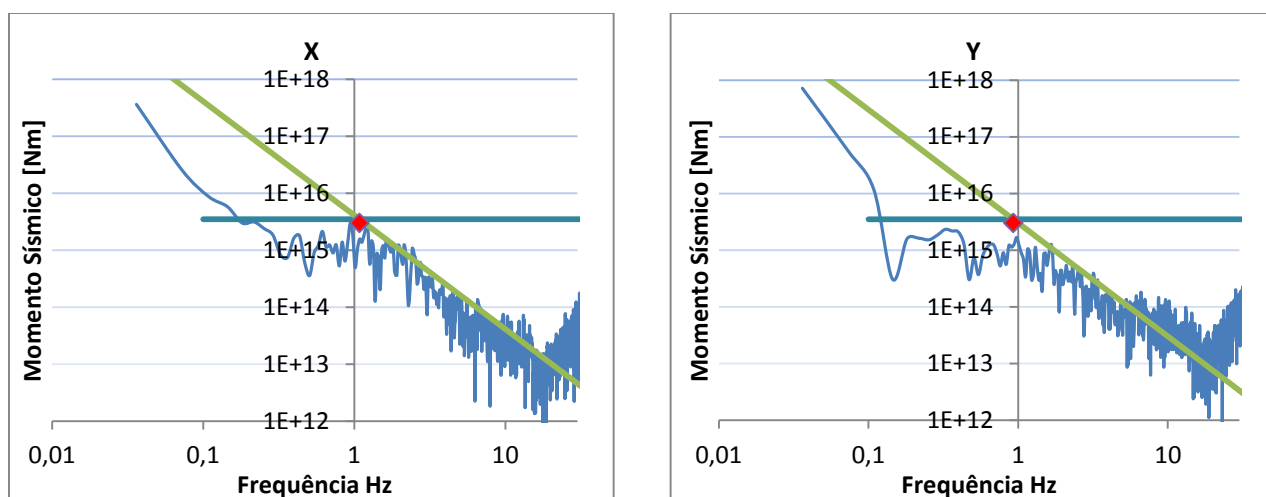


Figura D.1.42 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 03 de Fevereiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 42.

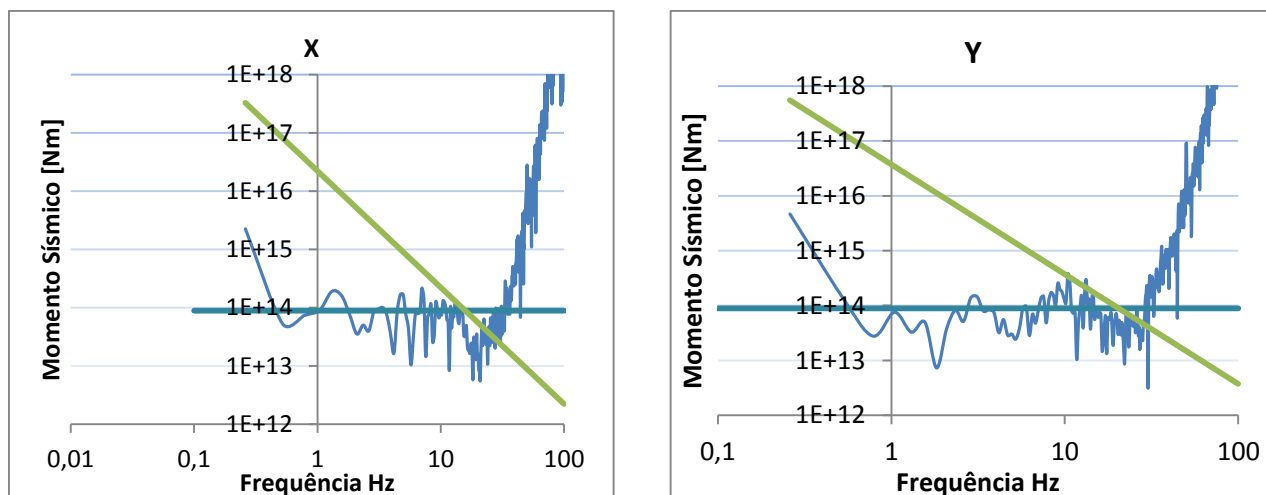


Figura D.1.43 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde) e do momento sísmico (reta a azul) do sismo de 07 de Fevereiro de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 43. Os gráficos não assumem a forma típica no decaimento, o que impossibilitou a determinação da frequência-esquina.

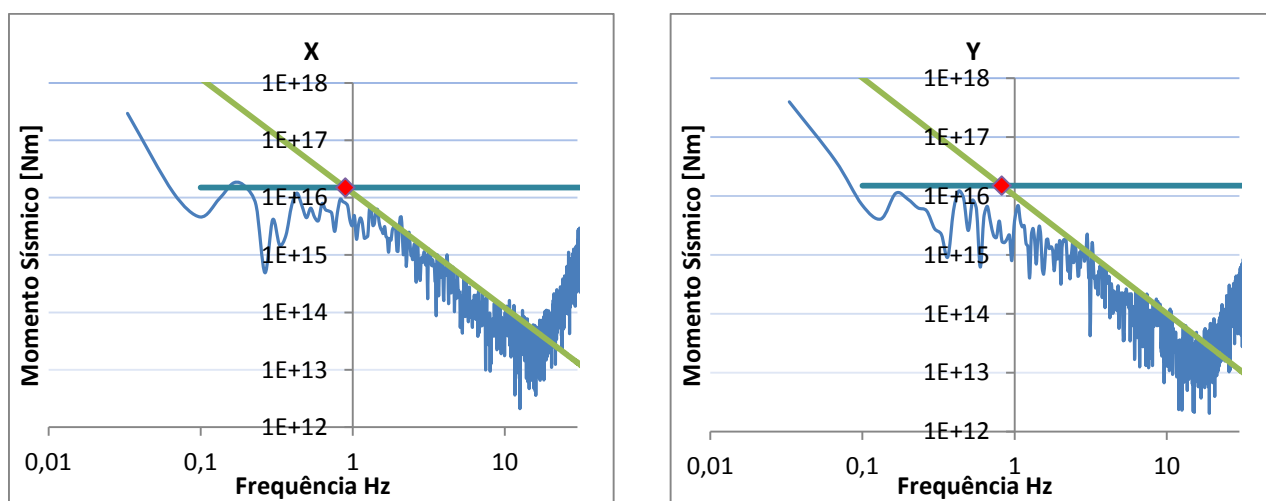


Figura D.1.44 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 25 de Abril de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 44.

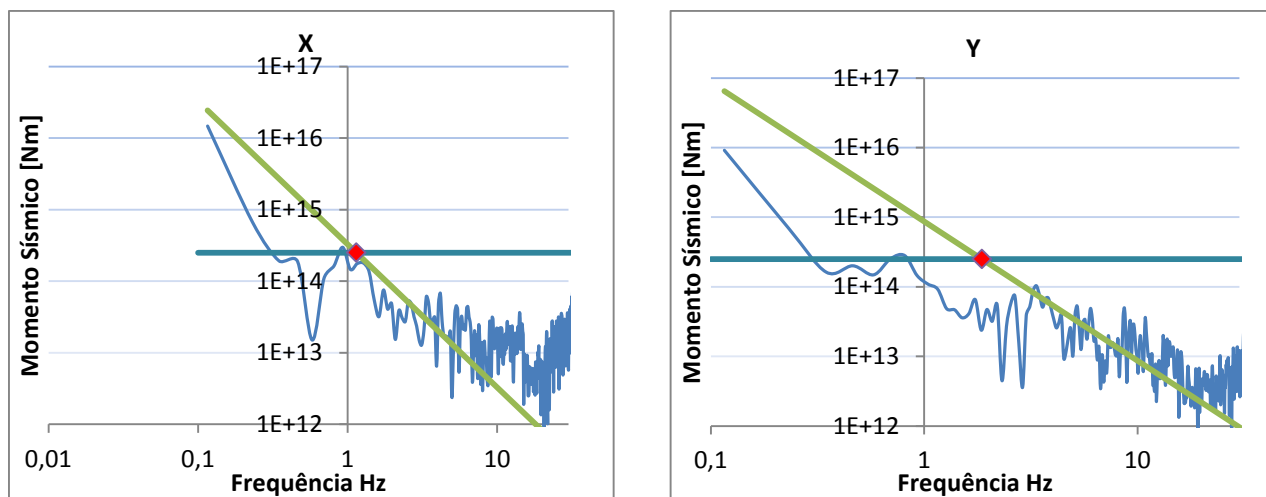


Figura D.1.45– Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 01 de Janeiro de 2005, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 45.

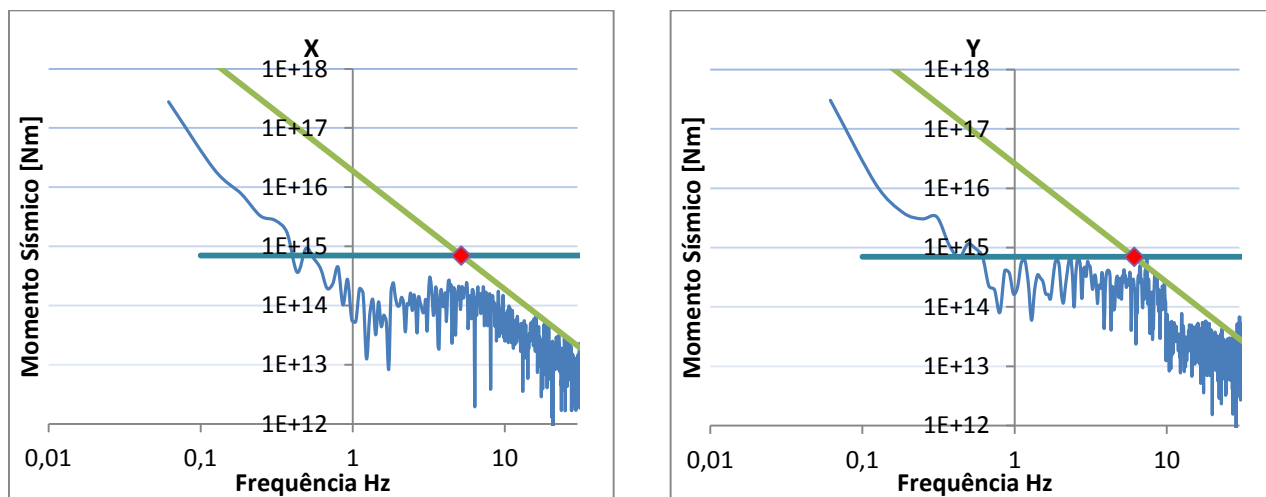


Figura D.1.47a – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 05 de Janeiro de 2005, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 47a.

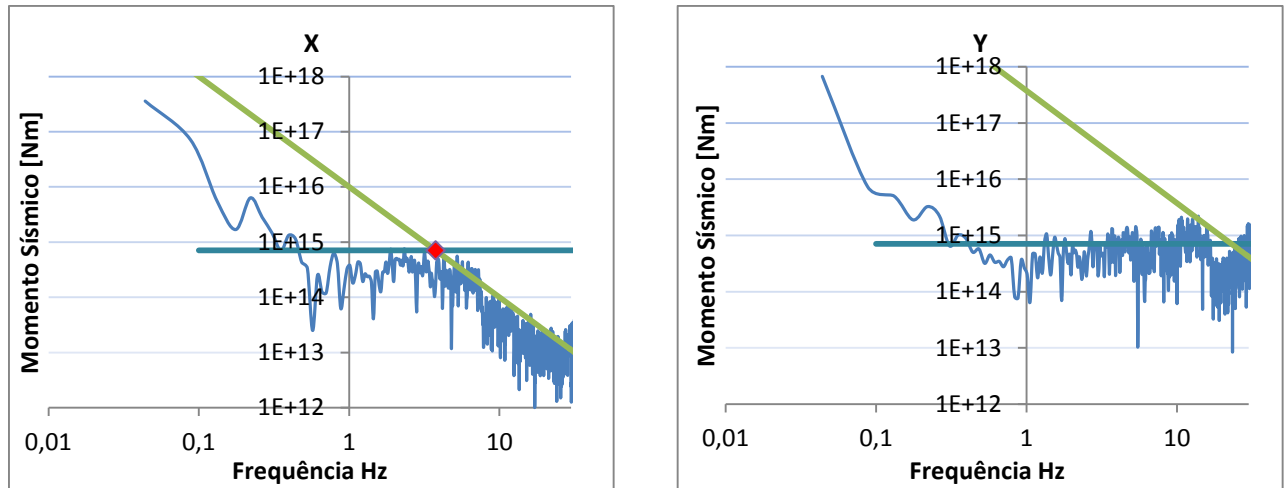


Figura D.1.47b – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde) e do momento sísmico (reta a azul) do sismo de 05 de Janeiro de 2005, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SMJ, a constituir o evento 47b. Apenas na componente X foi concretizada a determinação da frequência de esquina (ponto vermelho); na componente Y, o gráfico não assume a forma típica no decaimento.

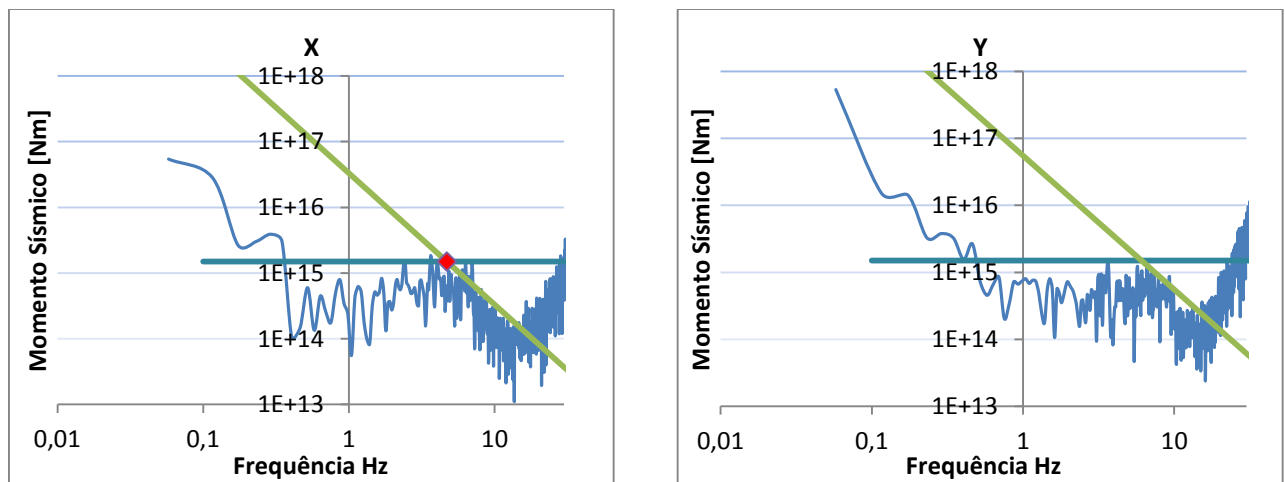


Figura D.1.48 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde) e do momento sísmico (reta a azul) do sismo de 13 de Dezembro de 2005, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 48. Apenas na componente X foi concretizada a determinação da frequência de esquina (ponto vermelho); na componente Y, o gráfico não assume a forma típica no decaimento.

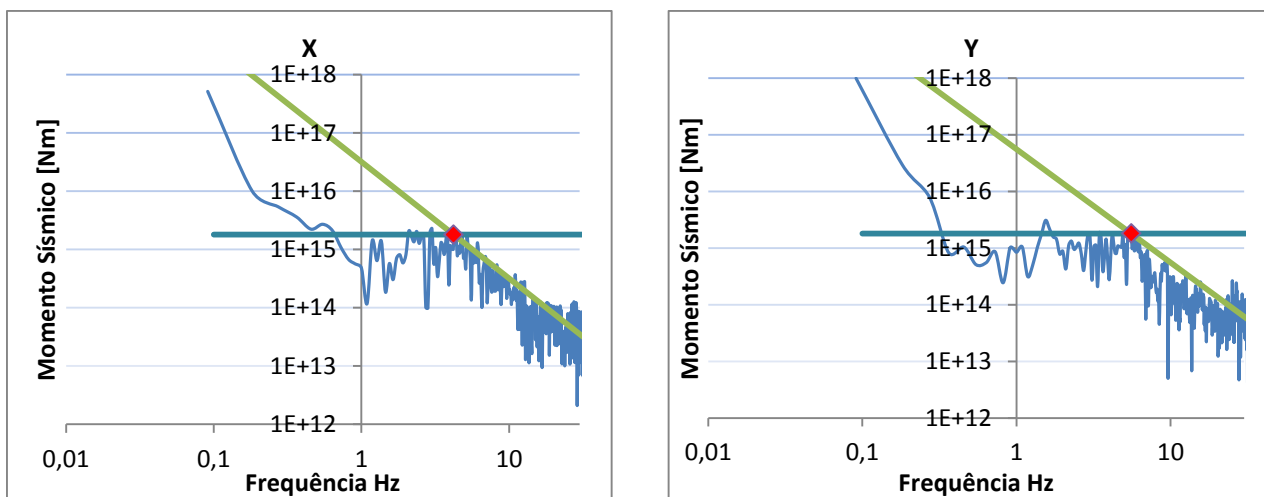


Figura D.1.49a – Espectros de deslocamento da fonte sísmica e respetiva determinação gráfica da reta envolvente do espectro (a verde), do momento sísmico (reta a azul) e da frequência-esquina (ponto vermelho) do sismo de 05 de Outubro de 2006, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação VEL, a constituir o evento 49a.

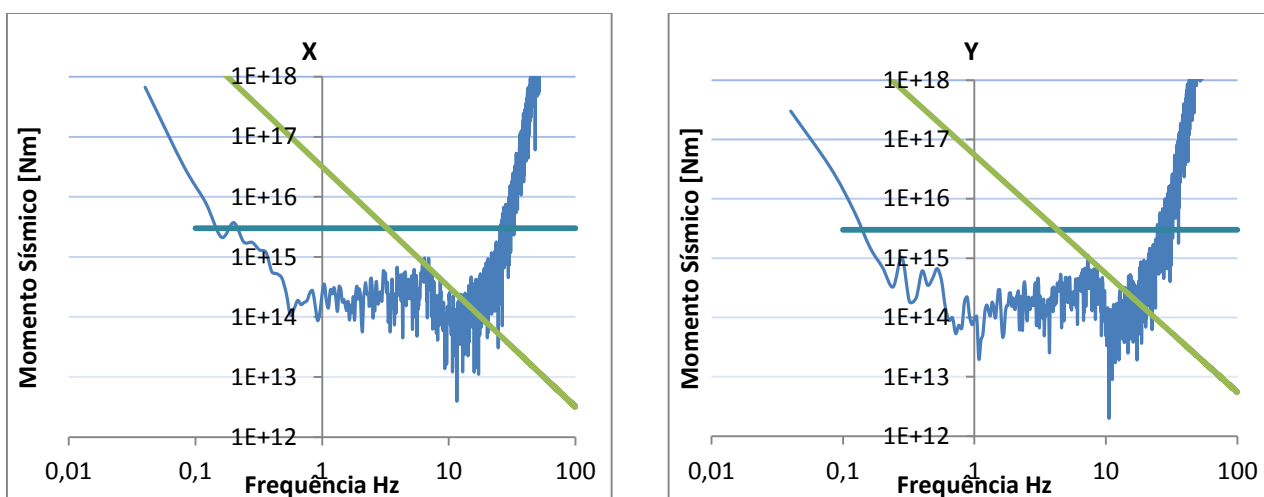


Figura C.2.49b – Espectros de aceleração e respetivo ajuste linear para o sismo de 05 de Outubro de 2006, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação HPT, a constituir o evento 49b. O decréscimo energético nos registos impossibilitam a determinação da frequência-esquina.

D.2 Tratamento por Ajuste

São submetidos à metodologia de ajuste, onde se relaciona o momento sísmico do evento, ajustado nas baixas frequências, com a queda de tensão, ajustada nas altas frequências ao espectro de amplitude de Fourier em deslocamento, todos os eventos provenientes da rede acelerográfica do arquipélago dos Açores, entre 1969-2006, em solos duros, registados em estações implementadas em piso térreo, para sismos com magnitudes entre 2,1 e 5,1, representando apenas o contributo das ondas S.

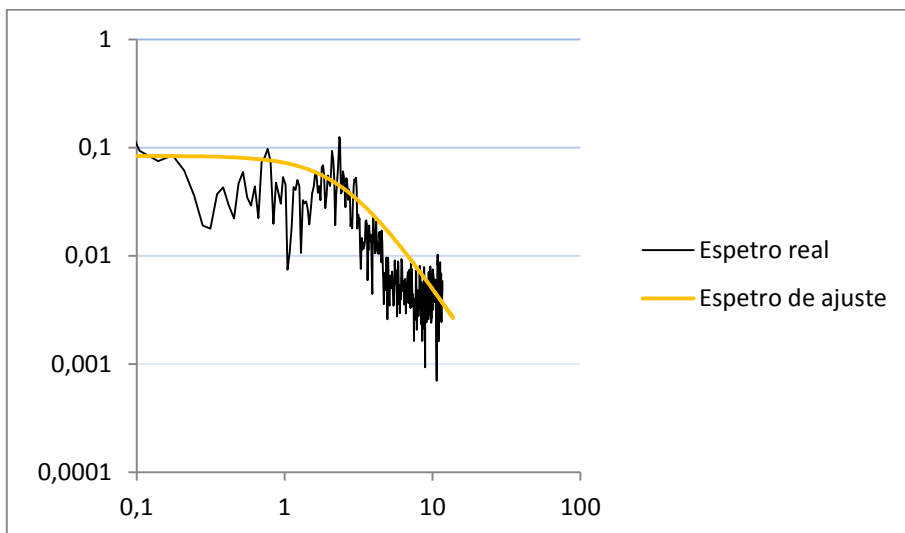


Figura D.2.4a – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 04 de Março de 2000, com origem no registo da estação PVI, a constituir o evento 4a.

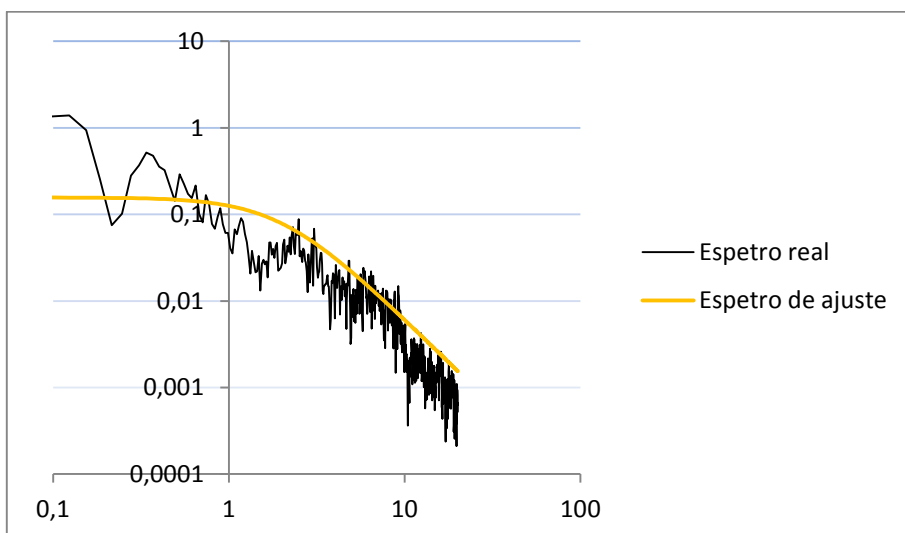


Figura D.2.5a – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 01 de Agosto de 2000, da estação VEL, a constituir o evento 5a.

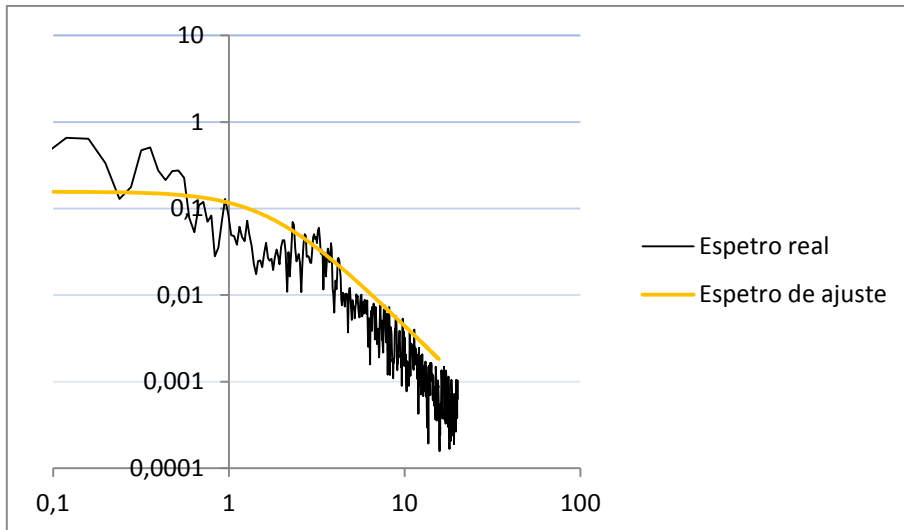


Figura D.2.5b – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 01 de Agosto de 2000, da estação VEL, a constituir o evento 5b.

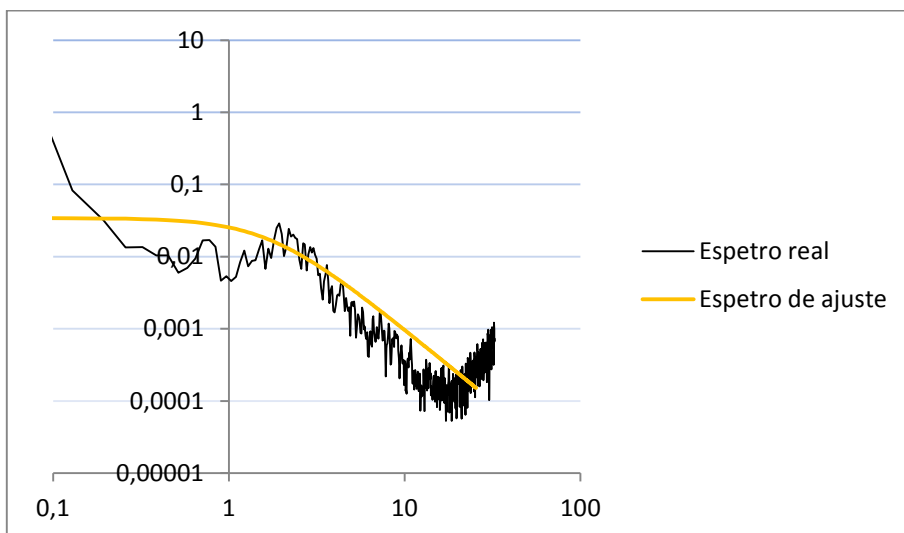


Figura D.2.6 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 03 de Setembro de 2000, da estação PVI, a constituir o evento 6.

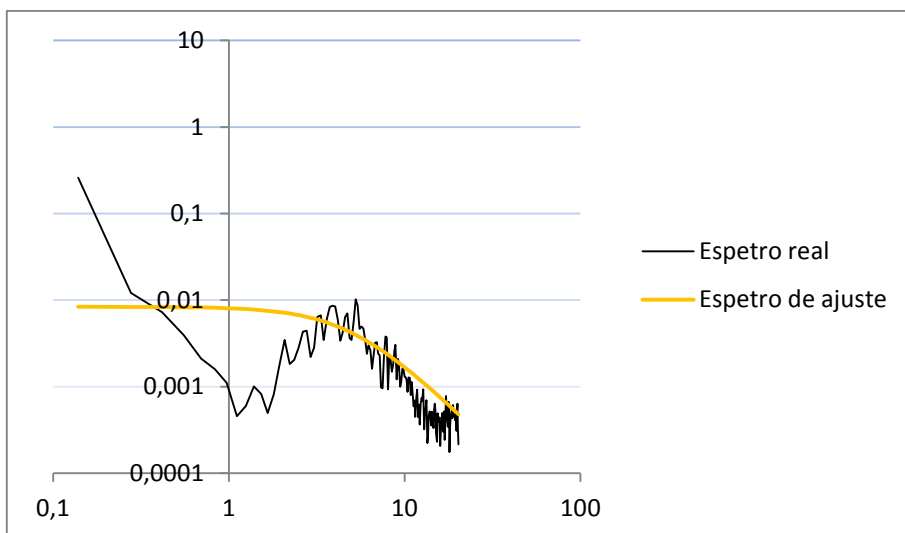


Figura D.2.7 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 10 Novembro de 2000, da estação TOP, a constituir o evento 7.

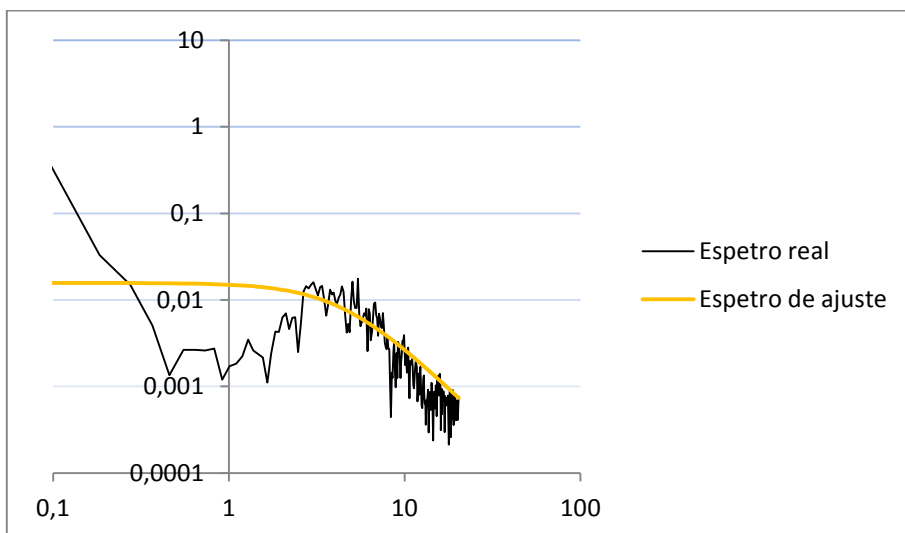


Figura D.2.8 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 10 Novembro de 2000, da estação TOP, a constituir o evento 7.

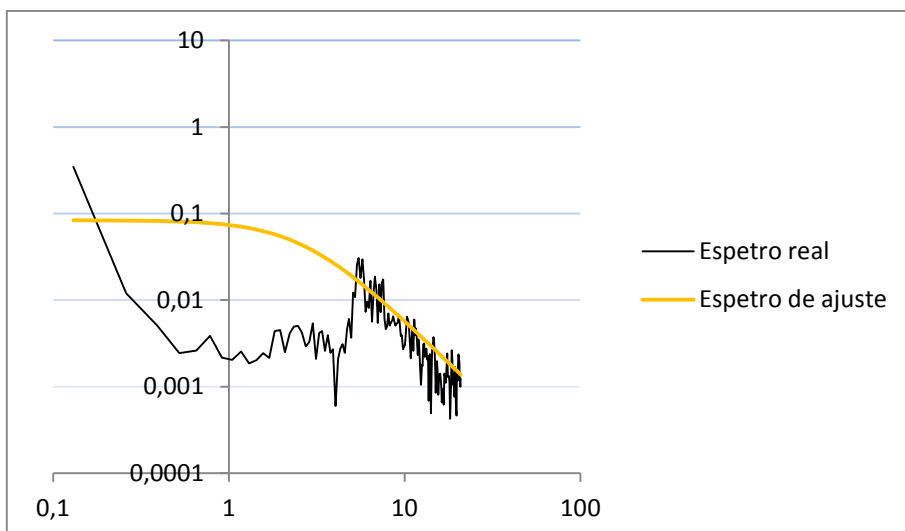


Figura D.2.9 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 29 de Janeiro de 2001, da estação VEL, a constituir o evento 9. O decréscimo energético no registo e a incompatibilidade do momento sísmico entre as componentes, impossibilitam a determinação da frequência-esquina.

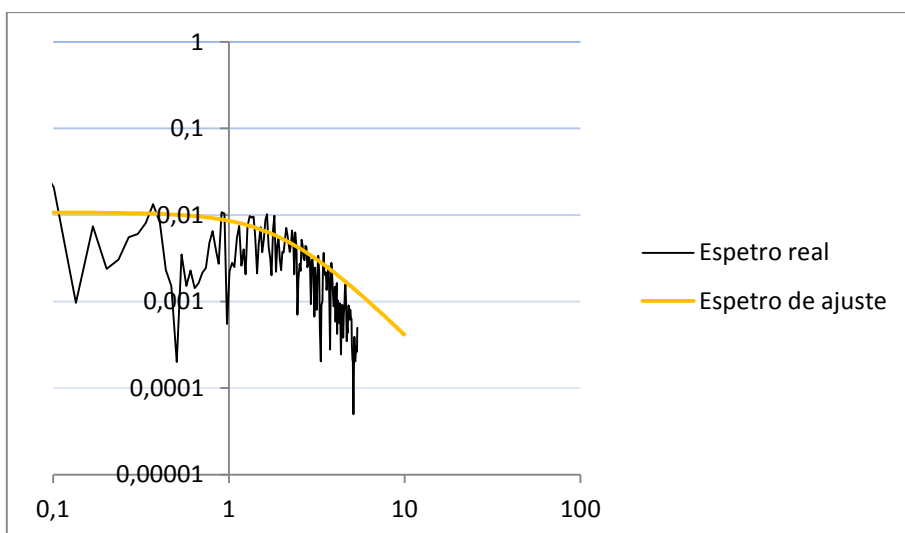


Figura D.2.12 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 29 de Janeiro de 2001, da estação VEL, a constituir o evento 12.

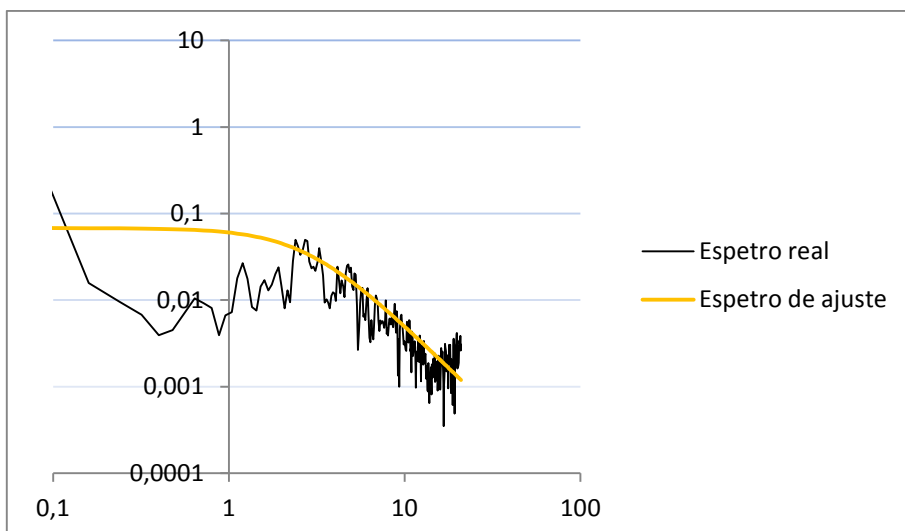


Figura D.2.13a – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 06 de Julho de 2001, da estação TOP, a constituir o evento 13a.

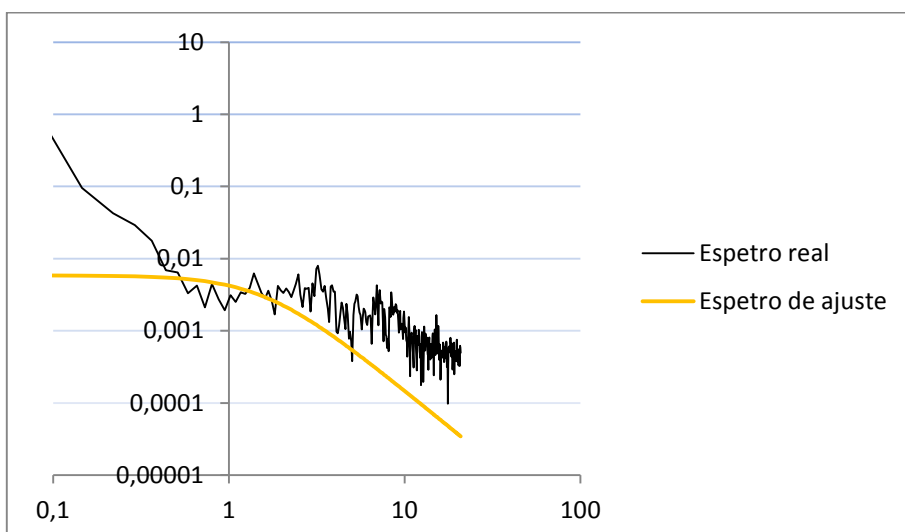


Figura D.2.13b – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 06 de Julho de 2001, da estação VEL, a constituir o evento 13b.

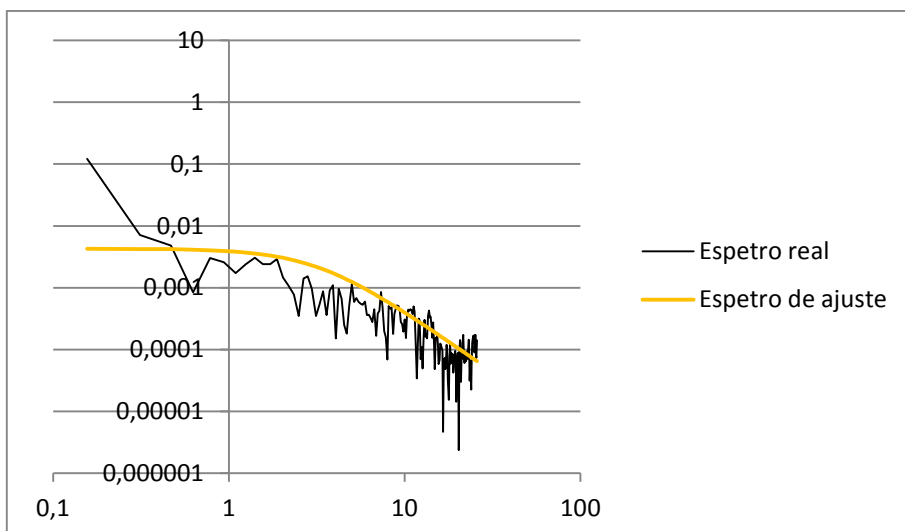


Figura D.2.14 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 03 de Outubro de 2001, da estação SCR, a constituir o evento 14.

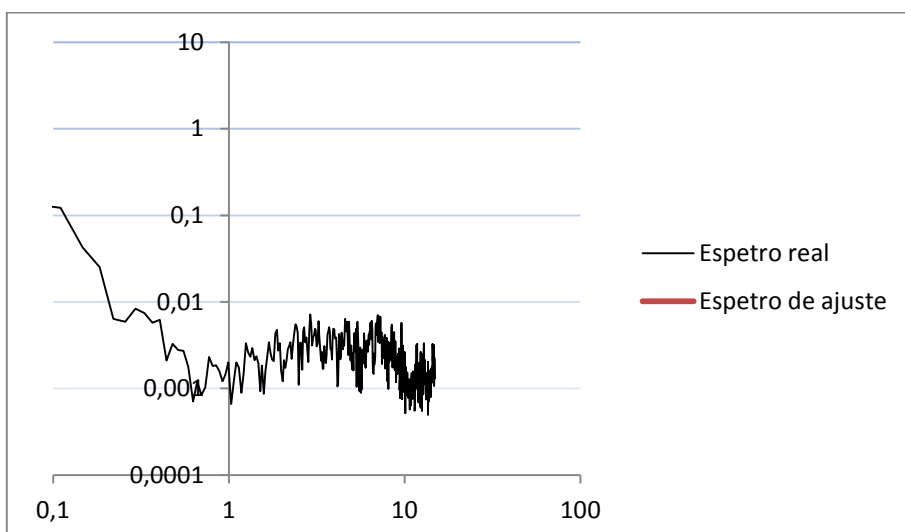


Figura D.2.15 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 12 de Outubro de 2001, da estação VEL, a constituir o evento 15. O decréscimo energético no registo e a incompatibilidade do momento sísmico entre as componentes, impossibilitam a determinação da frequência-esquina.

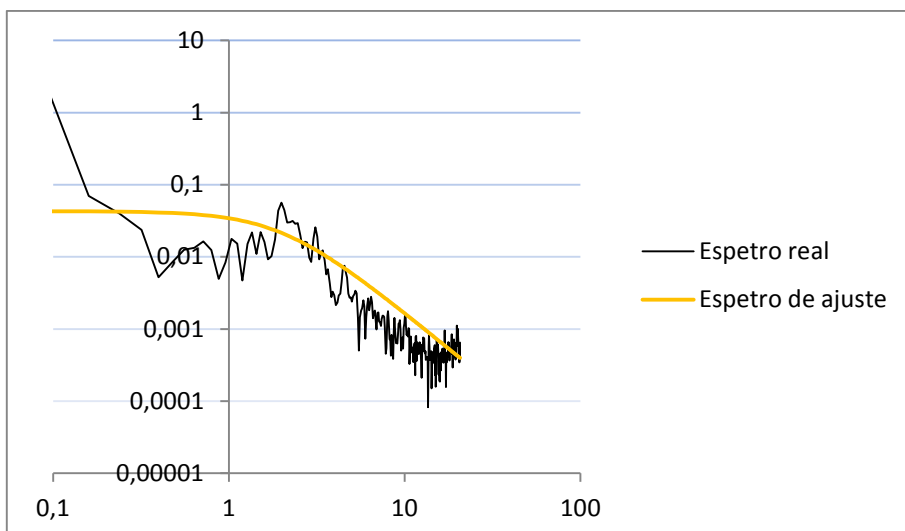


Figura D.2.16 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 23 de Dezembro de 2001, da estação PVI, a constituir o evento 16.

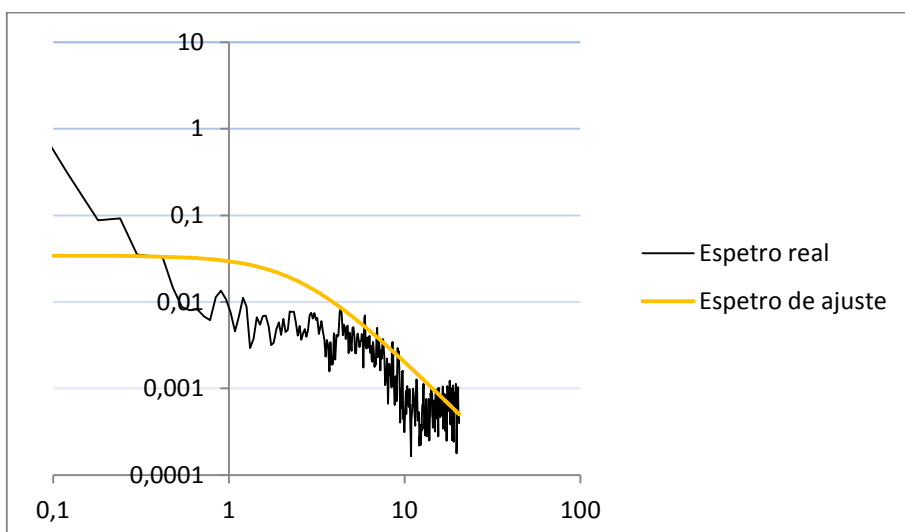


Figura D.2.17a – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 13 de Fevereiro de 2002, apenas com contribuição da componentes horizontal X, da estação VEL, a constituir o evento 17a.

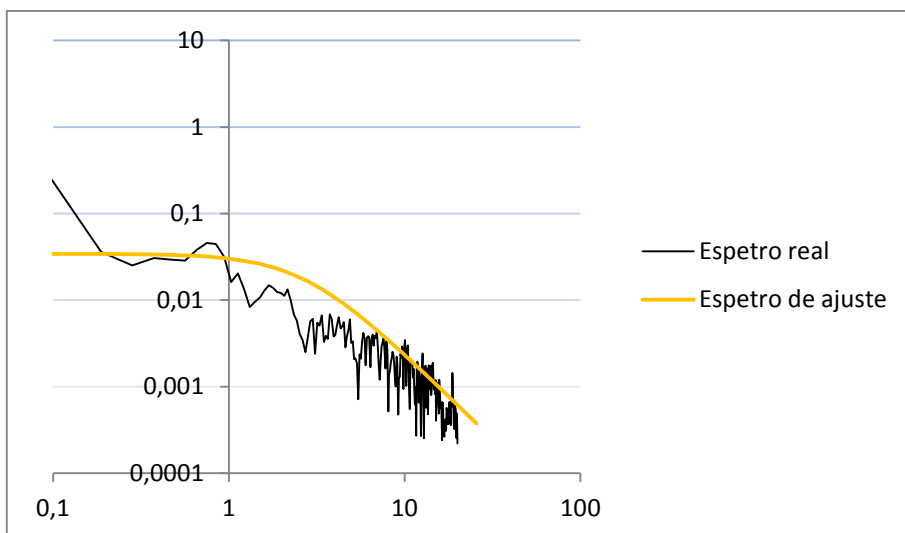


Figura D.2.17b – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 13 de Fevereiro de 2002, da estação SCR, a constituir o evento 17b.

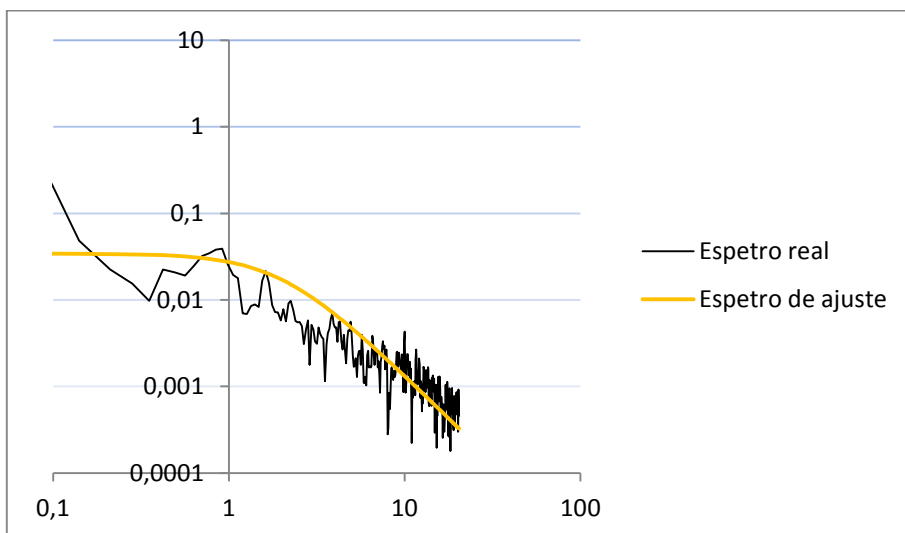


Figura D.2.18 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 13 de Fevereiro de 2002, da estação SCR, a constituir o evento 18.

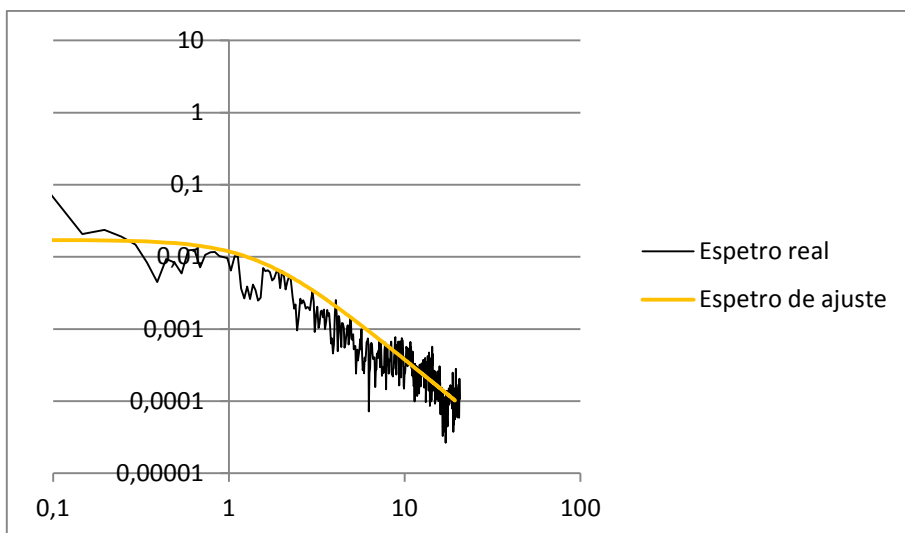


Figura D.2.19 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 13 de Fevereiro de 2002, da estação SCR, a constituir o evento 19.

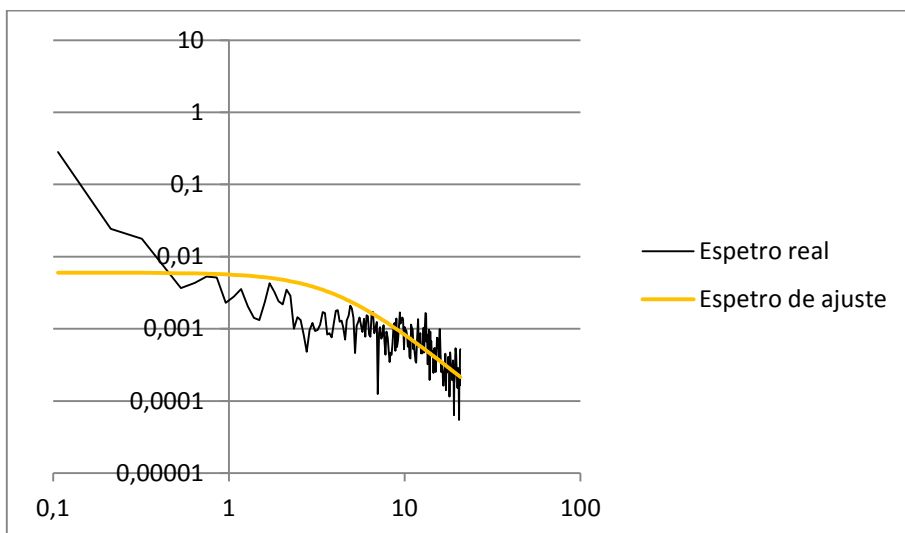


Figura D.2.20 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 13 de Fevereiro de 2002, apenas com contribuição da componentes horizontal X, da estação SCR, a constituir o evento 20.

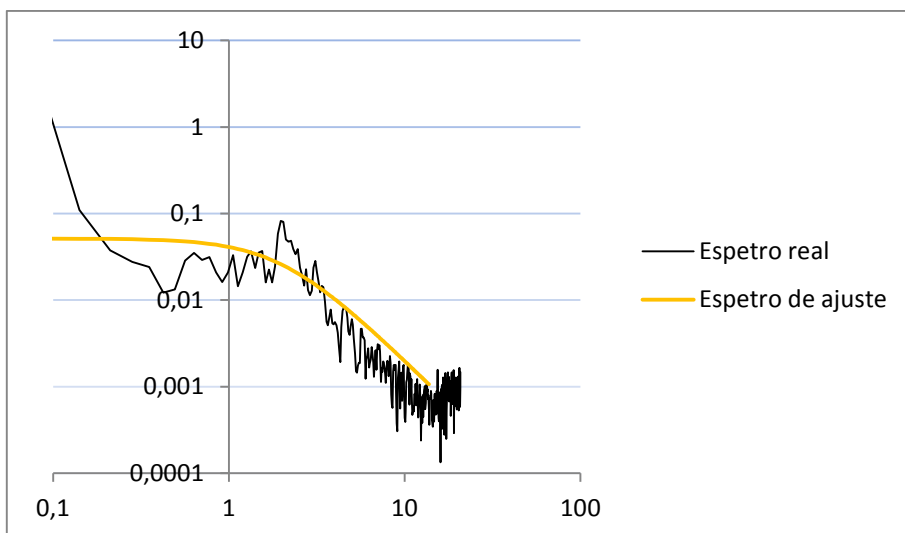


Figura D.2.21 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina do sismo de 11 de Março de 2002, da estação PVI, a constituir o evento 21.

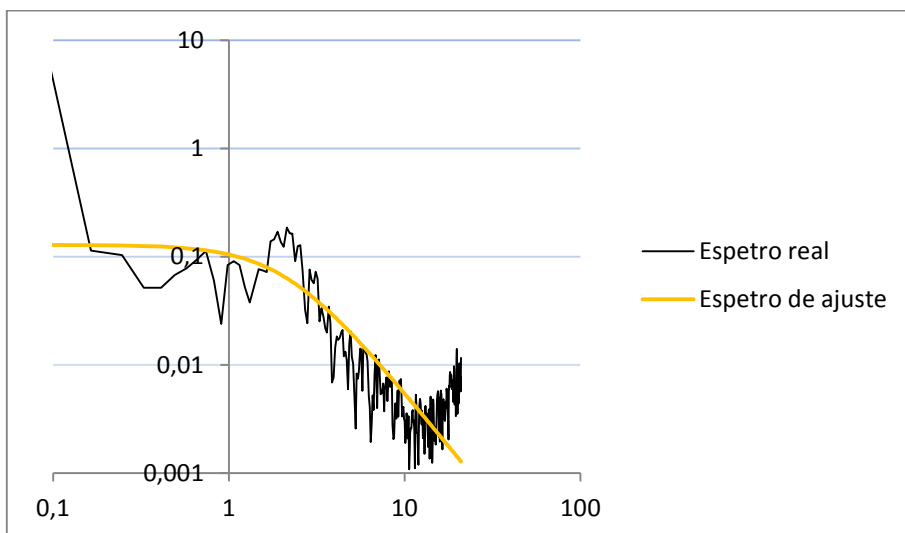


Figura D.2.22 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 10 de Junho de 2002, da estação PVI, a constituir o evento 22.

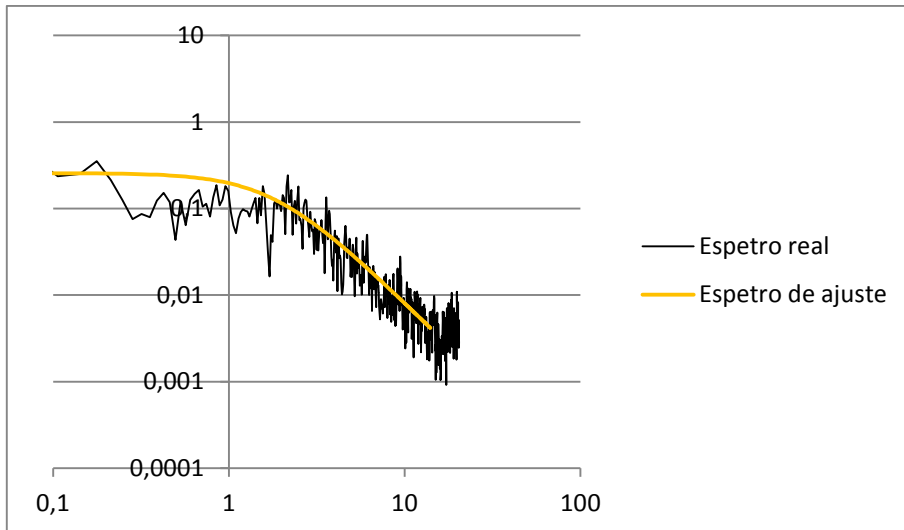


Figura D.2.23a – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 30 de Novembro de 2002, apenas com contribuição da componente Y, da estação TOP, a constituir o evento 23a.

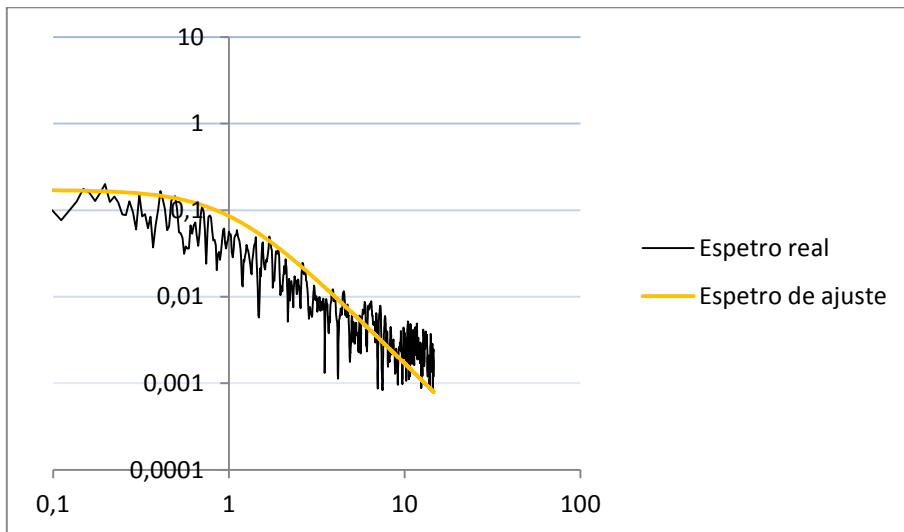


Figura D.2.23b – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 30 de Novembro de 2002, apenas com contribuição da componente X, da estação TOP, a constituir o evento 23b.

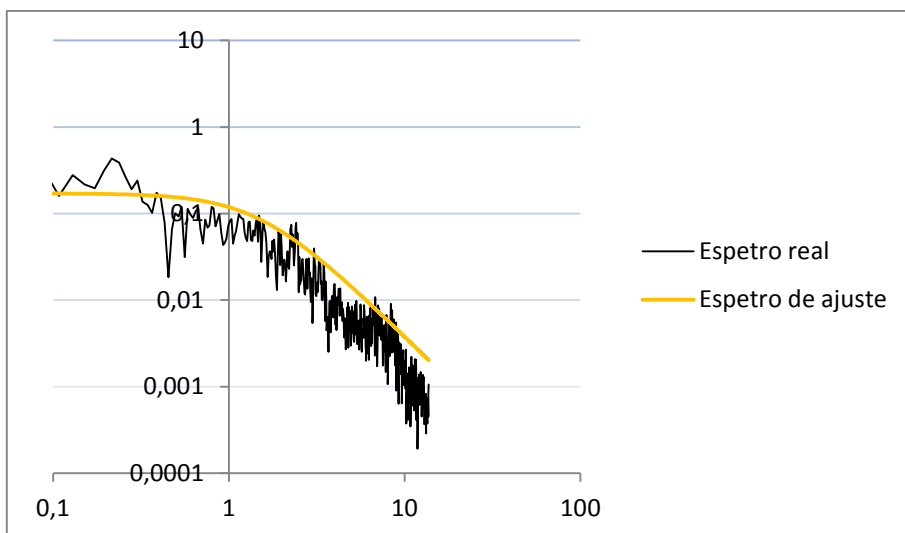


Figura D.2.23c– Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 30 de Novembro de 2002, da estação VEL, a constituir o evento 23c.

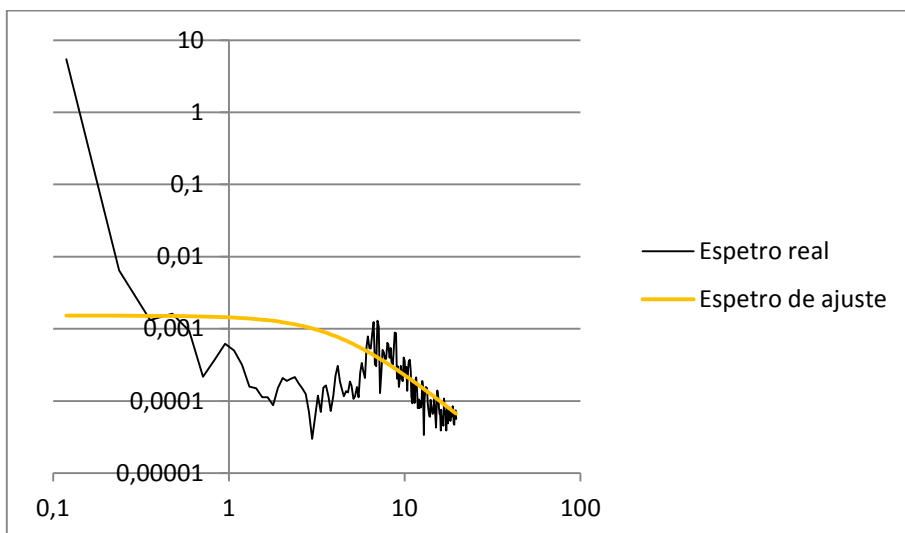


Figura D.2.26– Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 18 de Julho de 1998, da estação HSC, a constituir o evento 26.

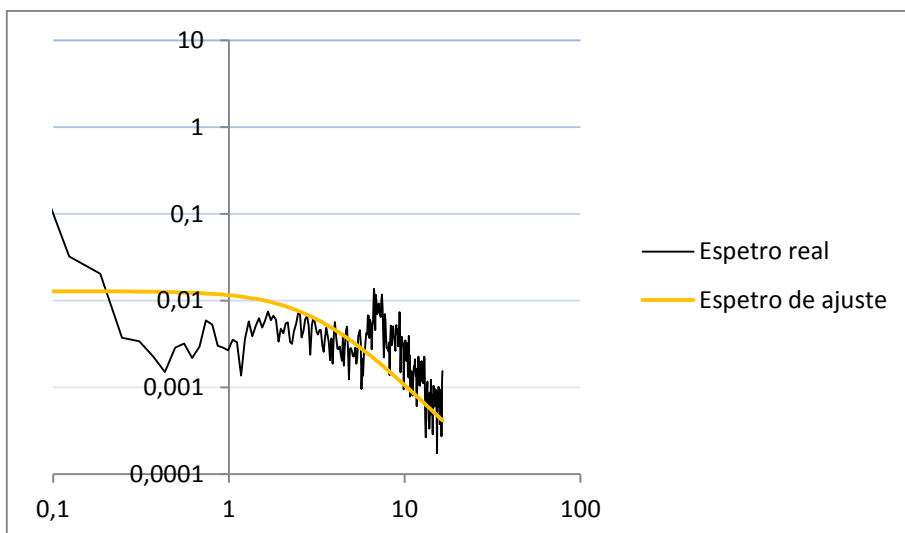


Figura D.2.27– Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 18 de Julho de 1998, da estação HSC, a constituir o evento 27.

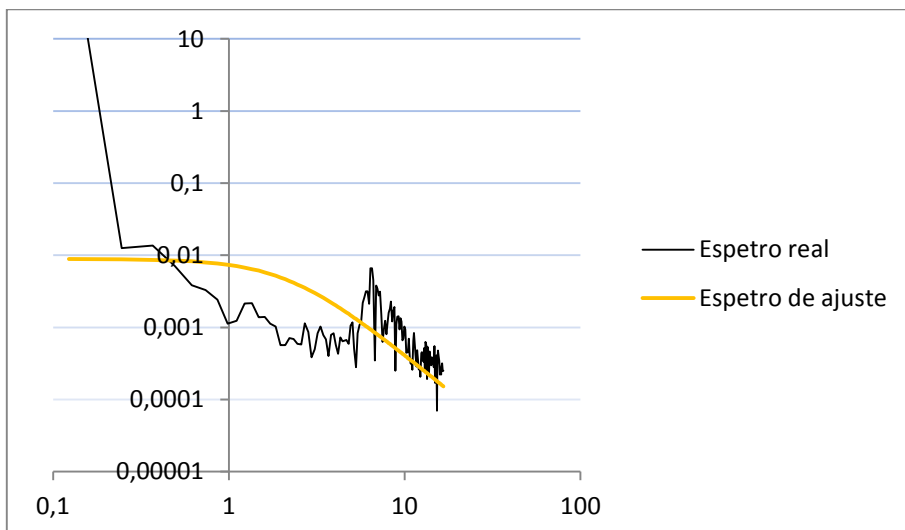


Figura D.2.28– Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 18 de Julho de 1998, da estação HSC, a constituir o evento 28.

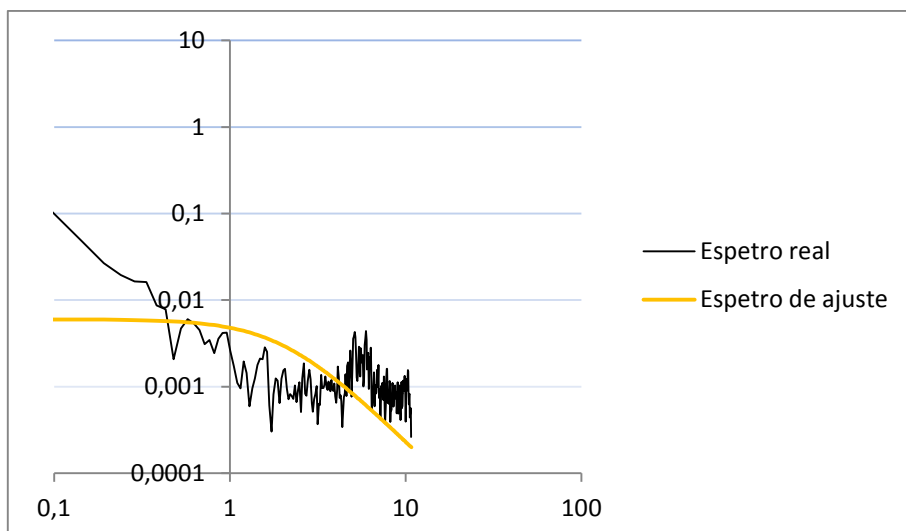


Figura D.2.29– Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 31 de Agosto de 1998, da estação HHT, a constituir o evento 29. De referir que, na componente X, o gráfico não assume a forma típica no decaimento e em Y, o decréscimo energético nos registos impossibilitou a determinação da frequência-esquina.

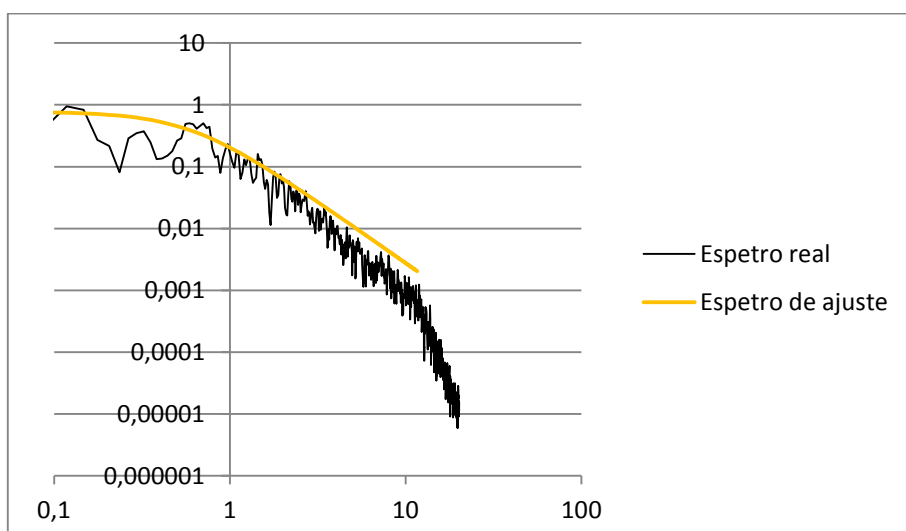


Figura D.2.31– Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 30 de Novembro de 2002, da estação SMJ, a constituir o evento 31.

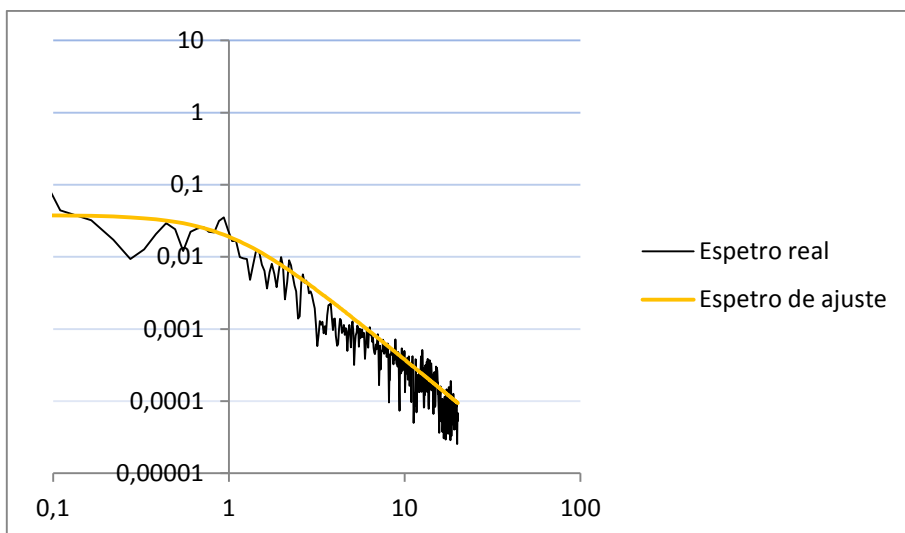


Figura D.2.34 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 01 de Janeiro de 2004, da estação SCR, a constituir o evento 34.

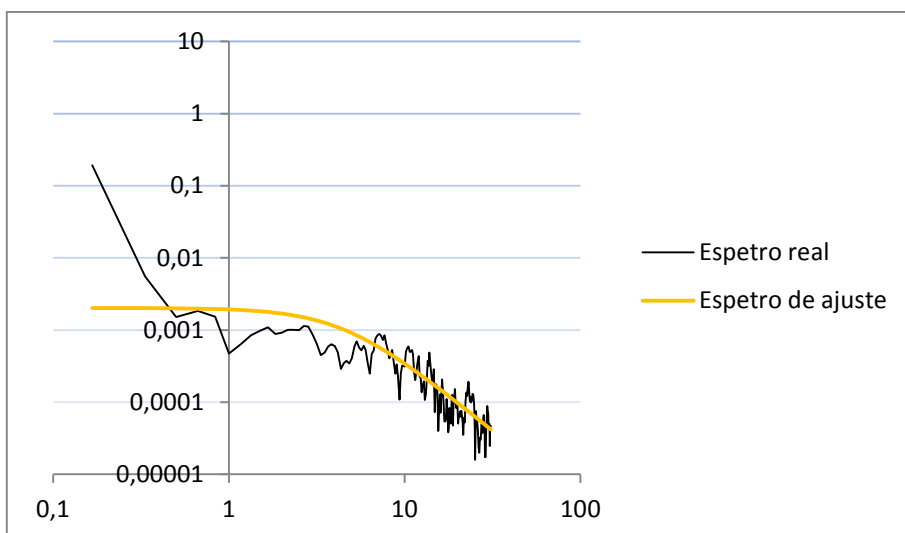


Figura D.2.35 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 17 de Janeiro de 2004, da estação SCR, a constituir o evento 35.

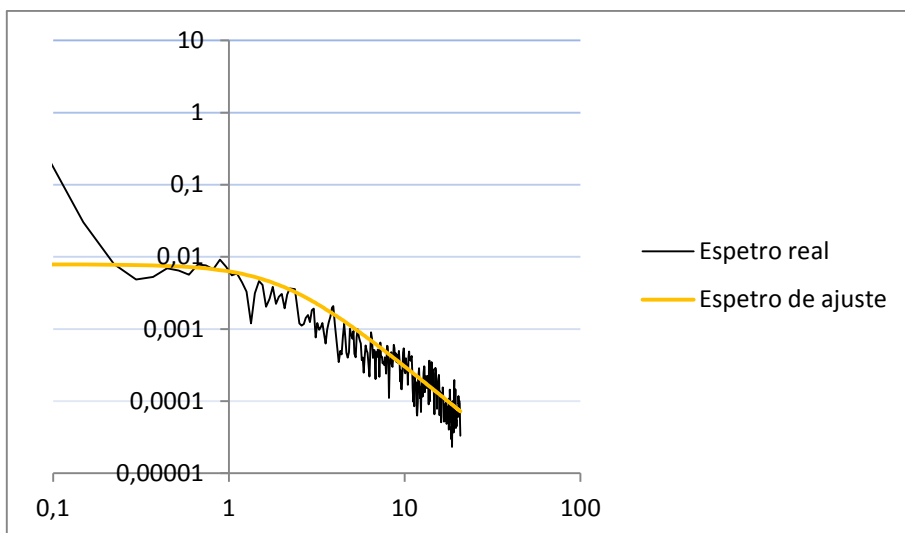


Figura D.2.36 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 18 de Janeiro de 2004, da estação SCR, a constituir o evento 36.

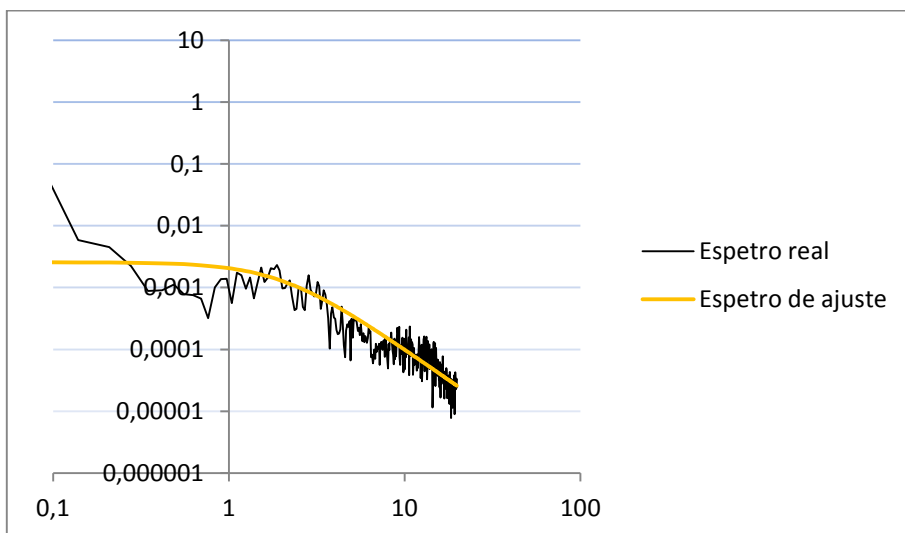


Figura D.2.37 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 27 de Janeiro de 2004, da estação SCR, a constituir o evento 37.

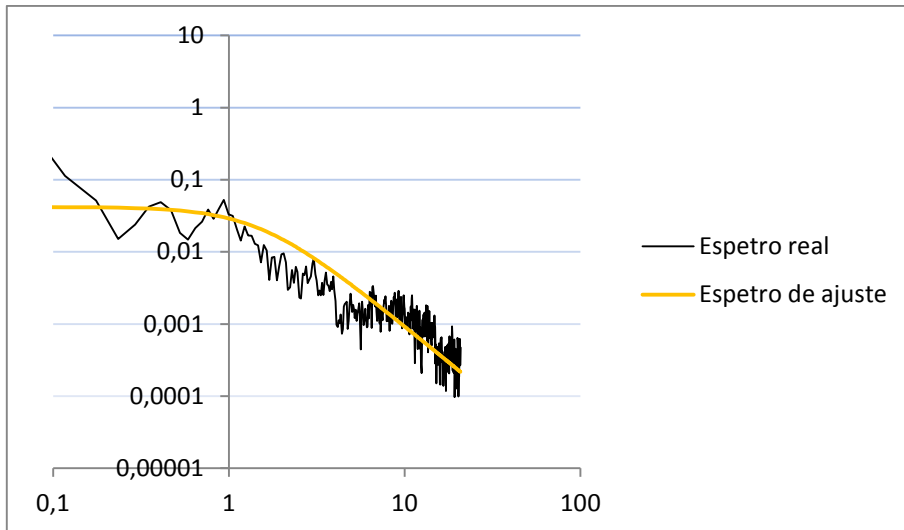


Figura D.2.38 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 28 de Janeiro de 2004, da estação SCR, a constituir o evento 38.

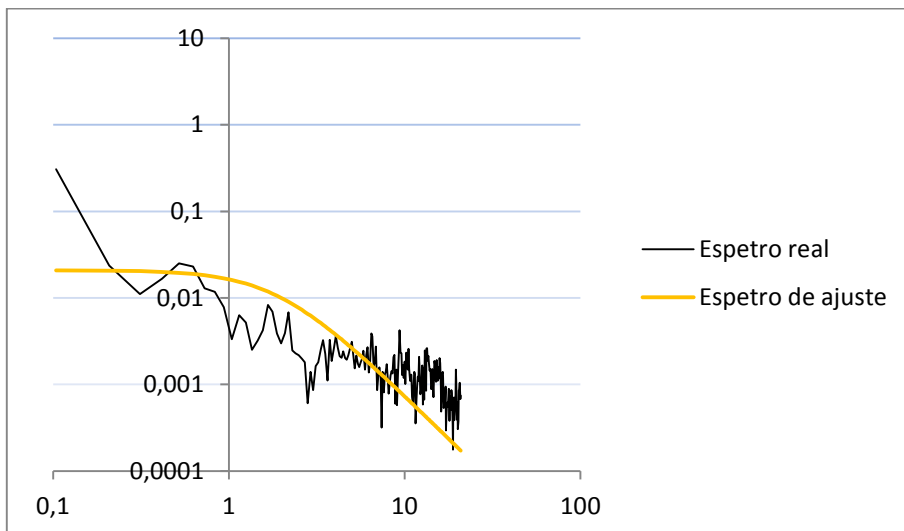


Figura D.2.39 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 28 de Janeiro de 2004, da estação SCR, a constituir o evento 39.

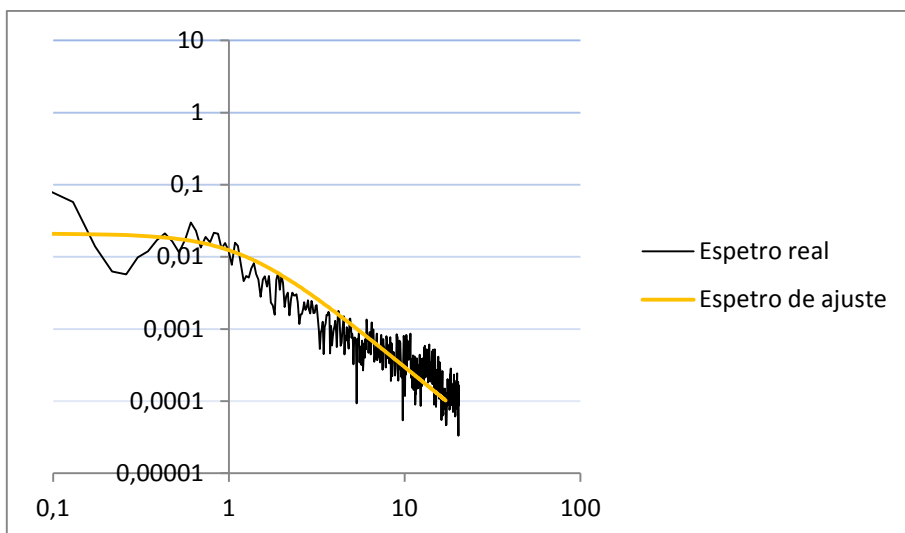


Figura D.2.40 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 28 de Janeiro de 2004, da estação SCR, a constituir o evento 40.

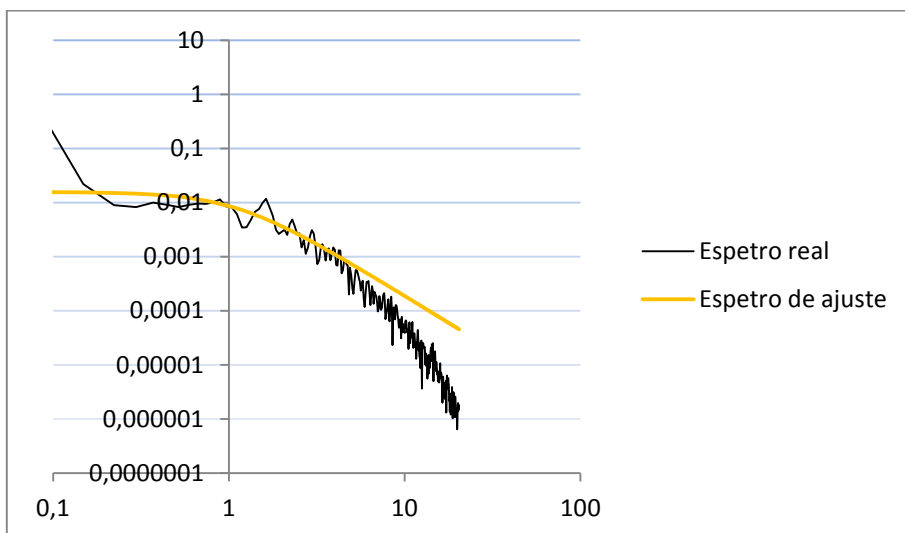


Figura D.2.41 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 31 de Janeiro de 2004, da estação SCR, a constituir o evento 41.

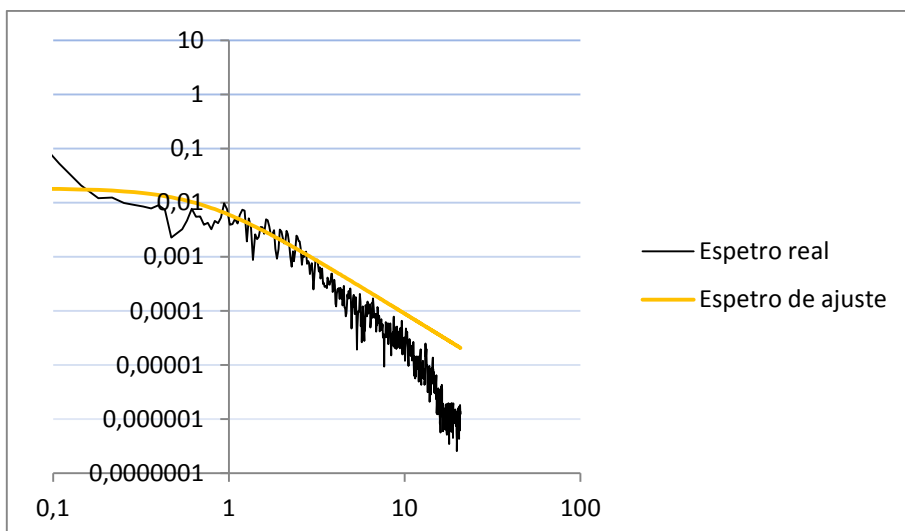


Figura D.2.42 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 03 de Fevereiro de 2004, da estação SCR, a constituir o evento 42.

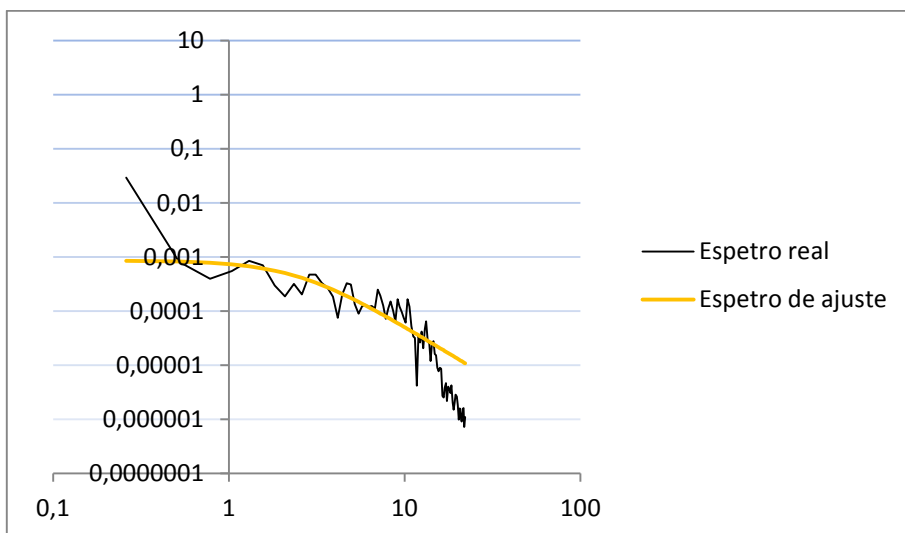


Figura D.2.43 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 07 de Fevereiro de 2004, da estação SCR, a constituir o evento 43. Os gráficos não assumem a forma típica no decaimento, o que impossibilitou a determinação da frequência-esquina.

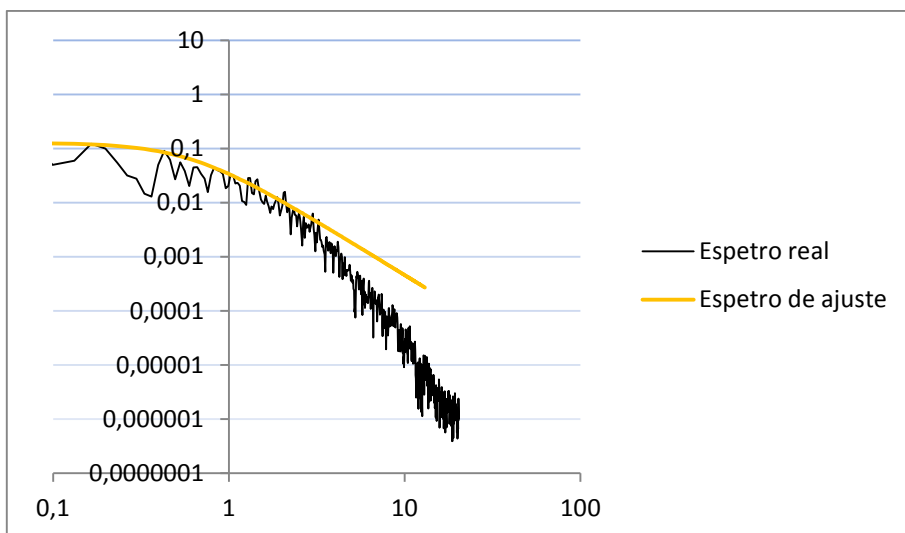


Figura D.2.44 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 25 de Abril de 2004, para ambas as componentes horizontais X e Y, da estação SCR, a constituir o evento 44.

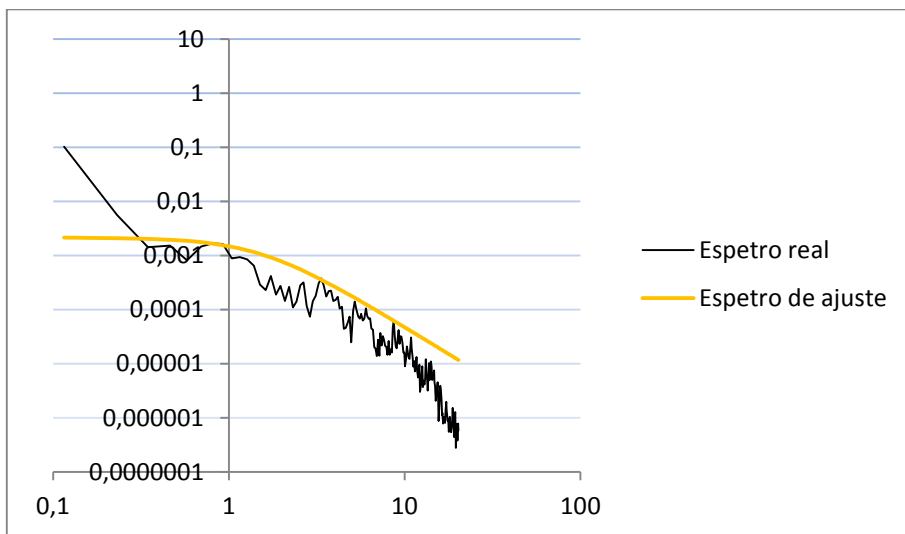


Figura D.2.45 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 25 de Abril de 2004, da estação SCR, a constituir o evento 45.

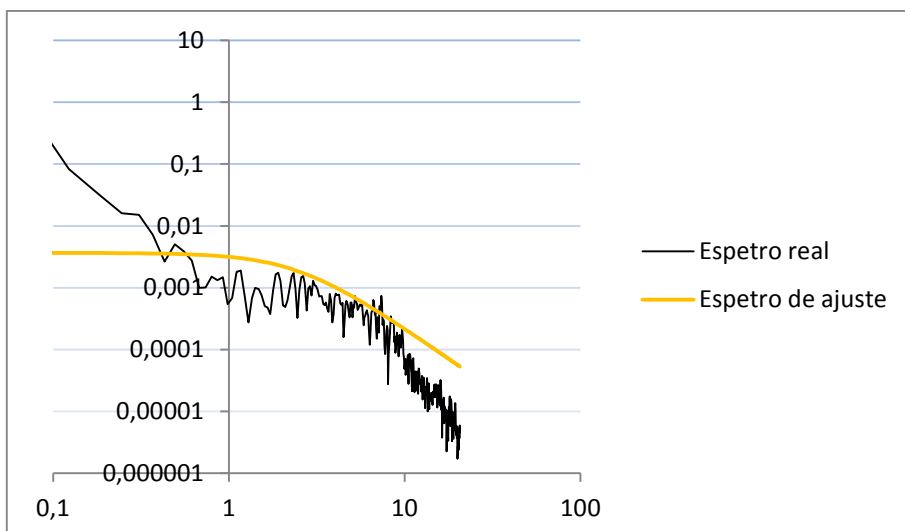


Figura D.2.47a – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 05 de Janeiro de 2005, para, da estação VEL, a constituir o evento 47a.

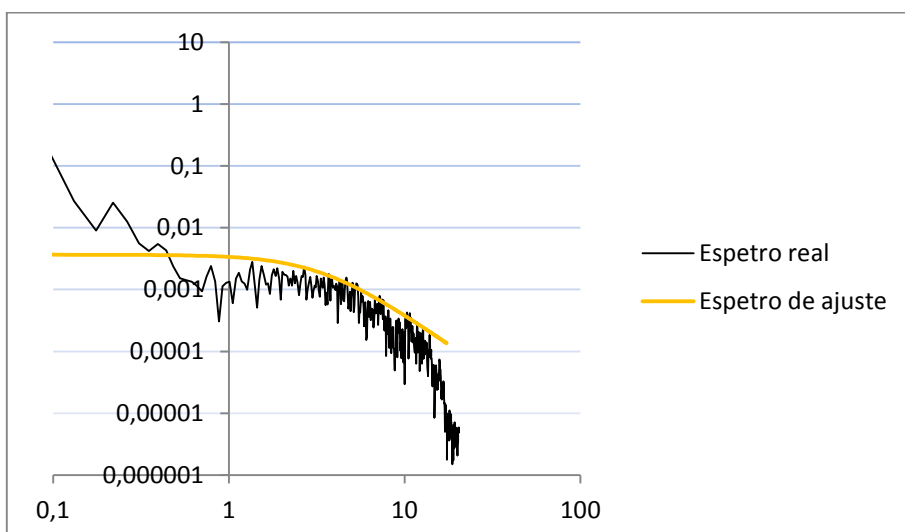


Figura D.2.47b – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 05 de Janeiro de 2005, da estação SMJ, a constituir o evento 47b.

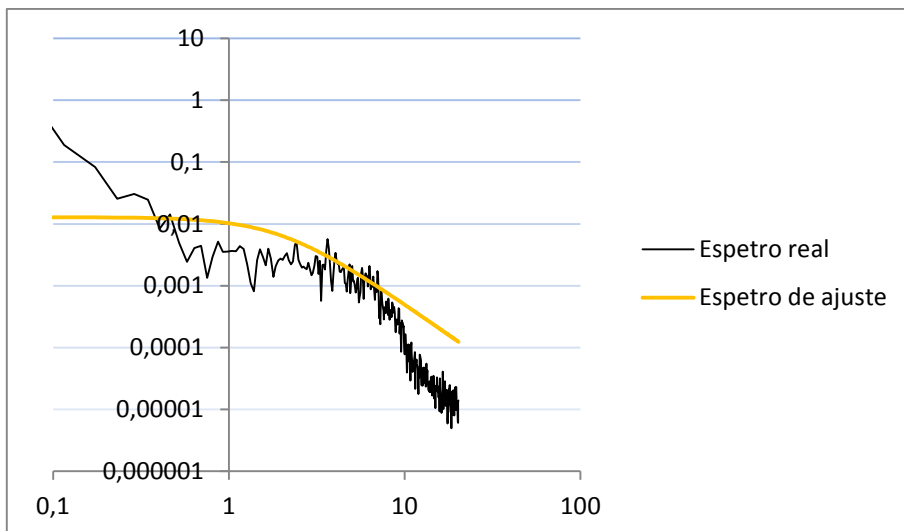


Figura D.2.48 – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) de 13 de Dezembro de 2005, da estação VEL, a constituir o evento 48.

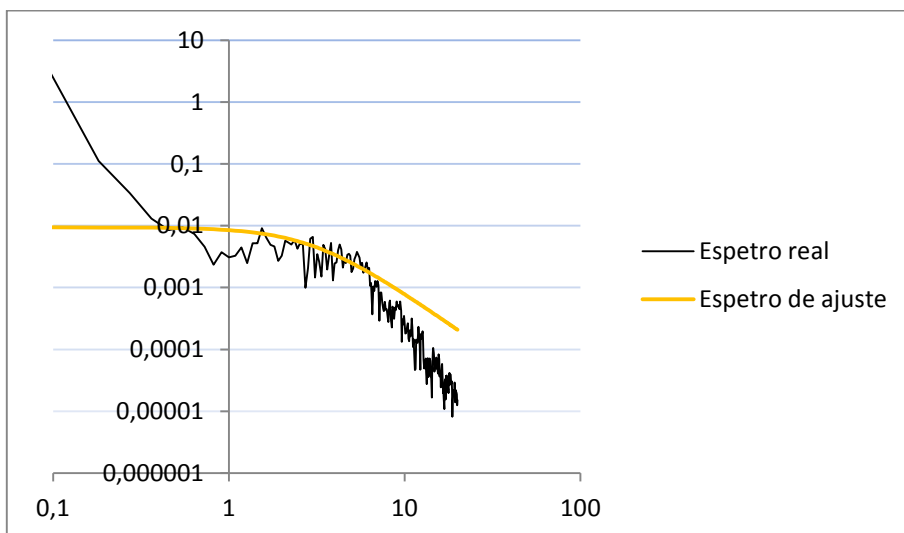


Figura D.2.49a – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 05 de Outubro de 2006, da estação VEL, a constituir o evento 49a.

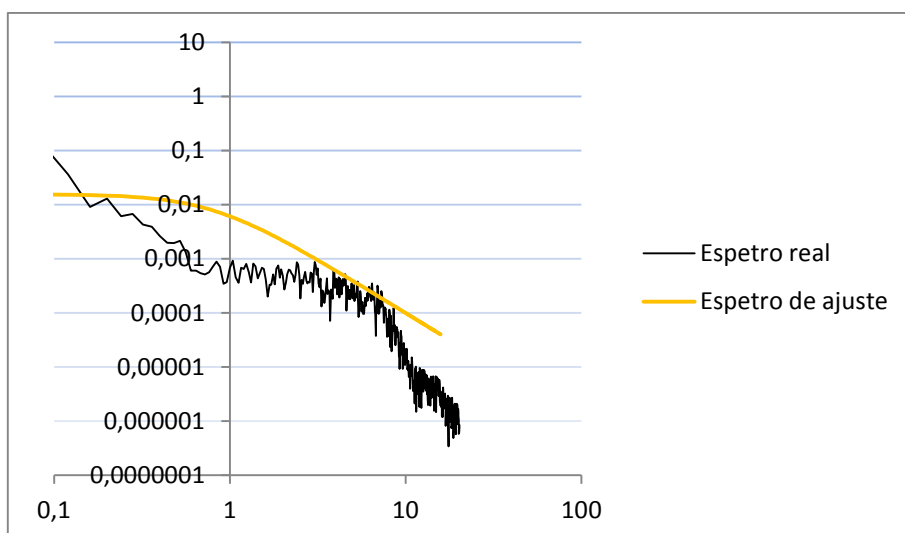


Figura D.2.49b – Espectros de deslocamento da fonte sísmica (a preto) e respetivo ajuste (a laranja) entre o momento sísmico (ajuste nas baixas frequências) e a queda de tensão (ajuste nas altas frequências) para a determinação da frequência-esquina) do sismo de 05 de Outubro de 2006, da estação HPT, a constituir o evento 49b. O decréscimo energético nos registos impossibilita a determinação da frequência-esquina.