

**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Gabriel Amorim Barbosa

***GEOS CUT – Desenvolvimento de um sensor de  
sismos utilizando filmes piezoeléctricos.***

Tese submetida à Universidade do Minho para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica Industrial e Computadores.

Trabalho efectuado sob a orientação de

**Professor Doutor José Gerardo Vieira da Rocha**  
Departamento de Electrónica Industrial da Escola de Engenharia da Universidade do Minho

Novembro de 2008



"Não basta ensinar ao homem uma especialidade, porque se tornará assim uma máquina utilizável e não uma personalidade. É necessário que adquira um sentimento, senso prático daquilo que vale a pena ser empreendido, daquilo que é belo, do que é moralmente correcto."

Albert Einstein



# Agradecimentos

---

Durante a realização deste trabalho, várias foram as pessoas que colaboraram e me acompanharam na elaboração desta dissertação. A todos expresso os mais sinceros agradecimentos, não deixando de destacar algumas pessoas.

Ao meu orientador, Doutor José Gerardo Vieira da Rocha, agradeço as sugestões e esclarecimentos durante a realização do trabalho, a ajuda disponibilizada e o rigor científico demonstrado.

Ao Doutor Senentxu Lanceros-Mendez, do Departamento de Física da Universidade do Minho, agradeço o apoio científico e a disponibilidade que sempre demonstrou. Muito obrigado.

Aos colegas de curso e laboratório Vitor Correia e Marcos Martins pela ajuda e apoio demonstrado na realização deste trabalho e durante todo o percurso académico.

Aos meus colegas e amigos do curso pelo apoio, pela amizade e pelos momentos de alegria demonstrados durante a realização do trabalho e do curso. A todos muito obrigado.

Por último e não menos importante, queria agradecer a minha família, em especial aos meus pais por todo o apoio e força demonstrado não só na realização deste trabalho mas ao longo de todos estes anos como estudante.



# Resumo

---

Os terremotos são um dos fenómenos naturais que causam mais danos materiais e pessoais. Deste modo, é necessário construir sensores de ondas sísmicas mais sensíveis e precisos que permitam antecipar estes fenómenos.

Esta tese descreve um sensor de ondas sísmicas, utilizando electrónica e um sistema de aquisição de dados. Este sensor é baseado em materiais piezoeléctricos, que mostram a capacidade de transformar energia mecânica em sinais eléctricos. Em particular, o presente sensor é baseado num polímero piezoeléctrico, poly (fluoreto de vinilideno). As principais características deste polímero tornam-no adequado para utilização na detecção das amplitudes e frequências envolvidas em eventos sísmicos.

O trabalho consta em projectar um sensor de terremotos capaz de medir a amplitude e a frequência das ondas sísmicas, que acontecem no interior da terra e se propagam até a superfície. Este sensor deve efectuar leituras numa faixa de frequências desde vários Hz a 50 kHz.

Para construir este sensor foi realizado um estudo teórico acerca da propagação das ondas sísmicas, dos tradicionais sensores de terremotos e do transdutor utilizado, o filme piezoeléctrico.

Posteriormente foi desenvolvida a electrónica de leitura, assim como o software.

Foram realizados testes tanto em ambiente laboratorial com em ambiente real (pedreira com explosões controladas) e os resultados permitem concluir que o material e a electrónica de controlo desenvolvidos, assim como as geometrias utilizadas, viabilizam o fabrico de sensores de vibração a ser utilizados em aplicações de detecção de ondas sísmicas. No entanto, ainda deverão ser realizados testes em ambiente simulado de sismos e comparar os resultados com os de sismógrafos convencionais para avaliar o potencial efectivo do presente desenvolvimento.



# Abstract

---

Earthquakes are among the natural phenomena causing more personal injury and property damage. Thus it is necessary to build more sensitive and accurate sensors of seismic waves to anticipate this phenomenon.

This thesis describes a seismic wave sensor, its readout electronics and data acquisition system. The seismic sensor is based on piezoelectric materials, which show the ability of transforming mechanical into electrical signals. In particular, the present sensor is based on a piezoelectric polymer, poly (vinylidene fluoride) as the main characteristics of the polymer made it suitable for detecting the amplitude and frequencies involved in seismic events.

The work is to design an earthquakes sensor capable to measuring magnitude and frequency of the seismic waves, which occur inside the earth and spread to the surface. These sensor readings must carry out a range of frequencies from several Hz to 50 kHz.

To build this sensor, a theoretical study was prepared about the propagation of seismic waves, of traditional earthquakes sensors, and the transducer used: a piezoelectric polymer film.

It was subsequently developed the control and readout electronic as well as the display software.

Tests were conducted both in laboratory environment and in real environment (quarry with controlled explosions). The results indicate that the material and control electronic, as well as the used geometries, enable the manufacture of vibration sensors for use in applications for detection of seismic waves. The prototype is still to be tested in simulated environment of earthquakes and compare the results with those of conventional seismographs to assess the real potential of this development.



# Conteúdo

1 .....	1
Introdução .....	1
1.1 Tipos de sismos .....	2
1.1.1 Sismos de origem natural.....	2
1.1.2 Sismos induzidos .....	4
1.2 Fenómenos de reflexão e refacção .....	4
1.2.1 Fenómenos de reflexão .....	5
1.2.2 Fenómenos de refacção.....	7
1.3 Profundidade dos sismos .....	8
1.4 Distribuição geográfica dos sismos .....	9
1.5 Objectivos do trabalho .....	10
1.6 Organização da tese .....	10
Bibliografia .....	11
2 .....	13
Ondas sísmicas .....	13
2.1 Ondas sísmicas de corpo ou volúmicas .....	14
2.1.1 Ondas Primárias ou longitudinais.....	14
2.1.2 Ondas secundárias ou transversais.....	18
2.2 Ondas superficiais .....	21
2.2.1 Ondas R (Rayleigh) .....	21
2.2.2 Ondas L (Love).....	22
2.3 Comparação entre os vários tipos de ondas .....	22
2.4 Quantificação e qualificação dos sismos .....	24
2.4.1 Intensidade sísmica .....	24
2.4.2 Magnitude sísmica .....	27

Bibliografia .....	29
3 .....	31
Detecção de ondas sísmicas .....	31
3.1 Sismógrafos mecânicos.....	33
3.1.1 Movimento vertical.....	33
3.1.2 Movimento horizontal.....	34
3.2 Sismógrafos electromagnéticos.....	34
Curiosidade: .....	35
Bibliografia .....	36
4 .....	37
Materiais Piezoeléctricos .....	37
4.1 Teoria do sensor .....	39
4.1.1 Comportamento do sistema.....	41
4.1.2 Considerações no projecto do sensor sísmico .....	41
Bibliografia .....	42
5 .....	43
Construção do sensor.....	43
5.1 Fabrico do sensor sísmico .....	43
5.1.1 Preparação do polímero .....	43
5.1.2 Deposição do eléctrodo.....	44
5.2 Electrónica de interface .....	45
5.2.1 Filtro passa alto passivo .....	45
5.2.2 Amplificador de instrumentação .....	46
5.2.3 Diagrama esquemático da implementação.....	49
5.2.4 Gaiola de Faraday .....	51
5.2.5 Placa de aquisição.....	52
5.2.6 Construção final.....	54

5.3	Software desenvolvido.....	55
5.3.1	Programa de recepção de dados e armazenamento em ficheiro .....	56
5.3.2	Programa de leitura e análise dos dados .....	61
5.3.3	Programa que converte os dados recebidos em som .....	63
	Bibliografia .....	66
6	.....	67
	Resultados.....	67
6.1	Problemas encontrados e indicações para a sua solução .....	72
6.2	Novo modelo de sensor .....	73
6.3	Perspectivas do sensor como sensor de sismos .....	75
7	.....	77
	Conclusão.....	77
7.1	Trabalho futuro .....	78



# Lista de figuras

---

Figura 1-1: Localização de um sismo. O hipocentro é o local onde o sismo é gerado e o ponto da superfície da Terra acima do foco designa-se de epicentro [1].....	1
Figura 1-2: Mecanismo de transporte de placas. O calor radioactivo acumulado no interior da Terra, não sendo dissipado pelo vulcanismo é suficiente para aquecer camadas do manto e gerar correntes de convecção [2].....	2
Figura 1-3: Exemplos de sismos de origem natural [4]. .....	3
Figura 1-4: Exemplo de uma albufeira de uma barragem. A queda de água produz ondas sísmicas que podem ser detectadas nos sismógrafos [5].....	4
Figura 1-5: Reflexão sísmica. Numa determinada localização num instante de tempo conhecido, registam-se os ecos reflectidos pelas várias camadas rochosas [6]. .....	5
Figura 1-6: Secção sísmica. Apresenta os tempos de percurso e amplitudes dos sinais registados pelos receptores.....	6
Figura 1-7: Exemplo de um sismo e determinação dos tempos de chegada das ondas directa e reflectida.....	7
Figura 1-8: Exemplo do método de refacção sísmica. Baseia-se na geração de ondas sísmicas que se refractam em fronteiras de meios com velocidades de propagação crescentes em profundidade, e com características diferentes [7].....	8
Figura 1-9: Distribuição geográfica da sismicidade com magnitude superior a 5 para o período 1980-1999 ilustrando as zonas tectonicamente activas [8]. .....	10
Figura 2-1: Ondas sonoras. Provocam um estímulo no ouvido activando as células receptoras e em resposta às várias frequências activam o impulso nervoso. ....	13
Figura 2-2: Propagação de uma onda primária ou P. Resulta de um movimento vibratório que produz alternadamente uma compressão seguida de uma distensão [2].	15
Figura 2-3: Movimento de uma partícula numa onda P unidimensional onde o eixo dos x aponta na direcção de propagação e os eixos y e z representam o plano de frente de onda [3]. .....	15
Figura 2-4: Numa qualquer posição x, a passagem da onda produz um deslocamento u e uma força $F_x$ na direcção x. ....	16
Figura 2-5: Propagação de uma onda secundária ou S. Provoca um movimento do solo para cima e para baixo [2].....	18

Figura 2-6: Analogia da propagação de uma onda secundária: corda colocada a vibrar. .....	18
Figura 2-7: Deslocamentos e forças segundo a direcção z nas posições x e x + dx [3].	19
Figura 2-8: Ondas Rayleigh. Movem o solo em sentido contrário ao da propagação [2]. .....	21
Figura 2-9: Ondas Love. Provocam um movimento do solo transversal à direcção de propagação da onda [2].	22
Figura 2-10: Movimento que as ondas provocam nos humanos. ....	24
Figura 2-11: Linhas isossistas.....	25
Figura 2-12: Magnitude sísmica. Permite quantificar a energia libertada [7].....	27
Figura 3-1: Sismograma. Regista os movimentos de vibração do solo [2].....	32
Figura 3-2: Princípio de funcionamento de um sismógrafo de componente vertical [5]. .....	33
Figura 3-3: Diagrama esquemático de um sismógrafo de componente horizontal [5]..	34
Figura 3-4: Princípio de funcionamento de um sismógrafo de componente vertical electromagnético [5]. ....	35
Figura 3-5: Sismocópio, o primeiro sismógrafo. Este aparelho consistia numa bola em bronze sustentada por oito dragões que a seguravam com a boca [6]. ....	36
Figura 4-1: Efeito piezoeléctrico directo. Os piezoeléctricos quando sofrem uma força F, desenvolvem um potencial eléctrico ou uma diferença de tensão [4]. ....	38
Figura 4-2: Efeito piezoeléctrico inverso. Alterando a polaridade da tensão aplicada, o cristal fica mais curto ou mais largo [4].....	39
Figura 4-3: Estrutura mecânica do sensor. ....	39
Figura 5-1: Imagem do sensor obtido. ....	45
Figura 5-2: Circuito CR. É constituído por um condensador e uma resistência. ....	46
Figura 5-3: Amplificador de instrumentação INA114 da BURR-BROWN [1].....	48
Figura 5-4: Diagrama esquemático do circuito. ....	49
Figura 5-5: Placa do circuito. ....	50
Figura 5-6: Placa PCB com os componentes. ....	50
Figura 5-7: Gaiola de Faraday. Elimina grande parte do ruído existente no meio como perturbações produzidas por campos eléctricos e/ou electromagnéticos [3]. ....	51
Figura 5-8: Gaiola de Faraday construída. ....	52
Figura 5-9: Placa de aquisição da National Instruments NI USB-9201. ....	53
Figura 5-10: Protótipo construído.....	54

Figura 5-11: Visão geral de todo o trabalho.....	55
Figura 5-12: Interface gráfico entre o utilizador e o computador.....	57
Figura 5-13: Configuração do DAQ Assistant. ....	58
Figura 5-14: Programa de recepção do sinal pela placa de aquisição.....	59
Figura 5-15: Parte do programa dedicada a gravar em ficheiro. ....	60
Figura 5-16: Interface gráfico de leitura de ficheiro. ....	61
Figura 5-17: Programa de leitura de dados de um ficheiro. ....	62
Figura 5-18: Configuração do Spectral Measurements.....	63
Figura 5-19: Interface gráfico do programa converter ficheiro em som. ....	64
Figura 5-20: Programa que converte o ficheiro em som. ....	65
Figura 6-1: Testes em laboratório com e sem gaiola de Faraday. ....	67
Figura 6-2: Teste de deixar cair objecto sobre uma bancada das alturas de 20cm, 40cm, 60cm e novamente 40cm. ....	68
Figura 6-3: Teste realizado no sensor com uma pessoa a bater com o pé no chão a 3m, 2m, 1m 2,5m e 1.5m de distância do sensor.....	69
Figura 6-4: Primeira explosão de 2 tiros simultâneos.....	70
Figura 6-5: Segunda explosão. ....	70
Figura 6-6: Terceira explosão.....	71
Figura 6-7: Bloco solto.....	71
Figura 6-8: Visão geral do protótipo.....	73
Figura 6-9: Visão do topo superior e inferior do protótipo.....	74
Figura 6-10: Vista de dois cortes efectuados ao protótipo. ....	75



# Lista de tabelas

---

Tabela 1: Características das ondas sísmicas [4] .....	23
Tabela 2: Graus de intensidade sísmica de acordo com a escala de Mercalli Modificada [6] .....	26
Tabela 3: Escala de Magnitude [8] .....	28



# 1

## Introdução

Um sismo é um fenómeno de propagação de vibrações bruscas e passageiras através da superfície da terra. Este fenómeno resulta de movimentos subterrâneos de placas rochosas, de actividade vulcânica ou por deslocamento de gases no interior da terra como por exemplo, o metano. Este movimento está associado a uma rápida libertação de grandes quantidades de energia, sob a forma de ondas sísmicas.

As ondas sísmicas deslocam-se para longe da fonte do sismo ao longo da superfície e através do interior da Terra, em várias velocidades dependendo dos materiais através dos quais estas se deslocam.

O local onde o sismo é gerado designa-se de hipocentro ou foco e o ponto da superfície da Terra situado acima do foco designa-se de epicentro (Figura 1-1). A distância entre o foco e o epicentro chama-se de distância focal [1].

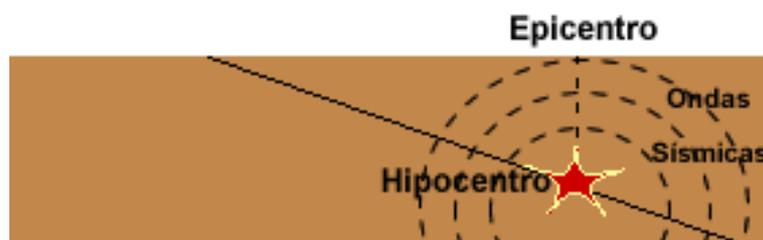


Figura 1-1: Localização de um sismo. O hipocentro é o local onde o sismo é gerado e o ponto da superfície da Terra acima do foco designa-se de epicentro [1].

Quando ocorre um sismo, são produzidos vários tipos de ondas com diferentes frequências e com diferentes velocidades de propagação, que dependem das propriedades de composição da terra num determinado ponto.

## 1.1 Tipos de sismos

Os sismos dependendo da sua origem podem ser classificados como sismos de origem natural ou induzidos.

### 1.1.1 Sismos de origem natural

A maioria dos sismos está relacionada com a natureza tectónica da terra, sendo designados de sismos tectónicos. A força das placas é aplicada na Litosfera (inclui a crosta e a zona solidificada na parte mais externa do manto), que tem um deslizamento lento mas constante sobre a Astenosfera (inclui a parte mais interior e viscosa do manto) devido as correntes de convecção com origem no manto e no núcleo.

A Figura 1-2 demonstra um mecanismo de transporte das placas. O calor radioactivo acumulado no interior da Terra, não sendo totalmente dissipado pelo vulcanismo, é suficiente para aquecer as camadas do manto e gerar correntes de convecção térmicas ascendentes, transportando as placas por arrastamento [2].



Figura 1-2: Mecanismo de transporte de placas. O calor radioactivo acumulado no interior da Terra, não sendo dissipado pelo vulcanismo é suficiente para aquecer camadas do manto e gerar correntes de convecção [2].

As placas podem afastar-se, colidir ou simplesmente deslizar uma sobre a outra. Com a aplicação destas forças, a rocha vai-se alterando até atingir o seu ponto de elasticidade, após o qual a matéria entra em ruptura e sofre uma libertação brusca de

energia acumulada durante a deformação elástica. Esta energia é libertada sob a forma de ondas sísmicas que se propagam à superfície e no interior da terra.

Aos sismos que ocorrem na fronteira de placas tectónicas dá-se o nome de sismos interplacas, sendo os mais frequentes, enquanto àqueles que ocorrem dentro da mesma placa litosférica dá-se o nome de sismos intraplacas e são menos frequentes.

Também podem ocorrer sismos de origem vulcânica, devendo-se a movimentações de magma dentro da câmara magmática ou devida à pressão causada por este quando ascende à superfície, permitindo assim prever as erupções vulcânicas [3]. A Figura 1-3 apresenta exemplos de sismos de origem natural.

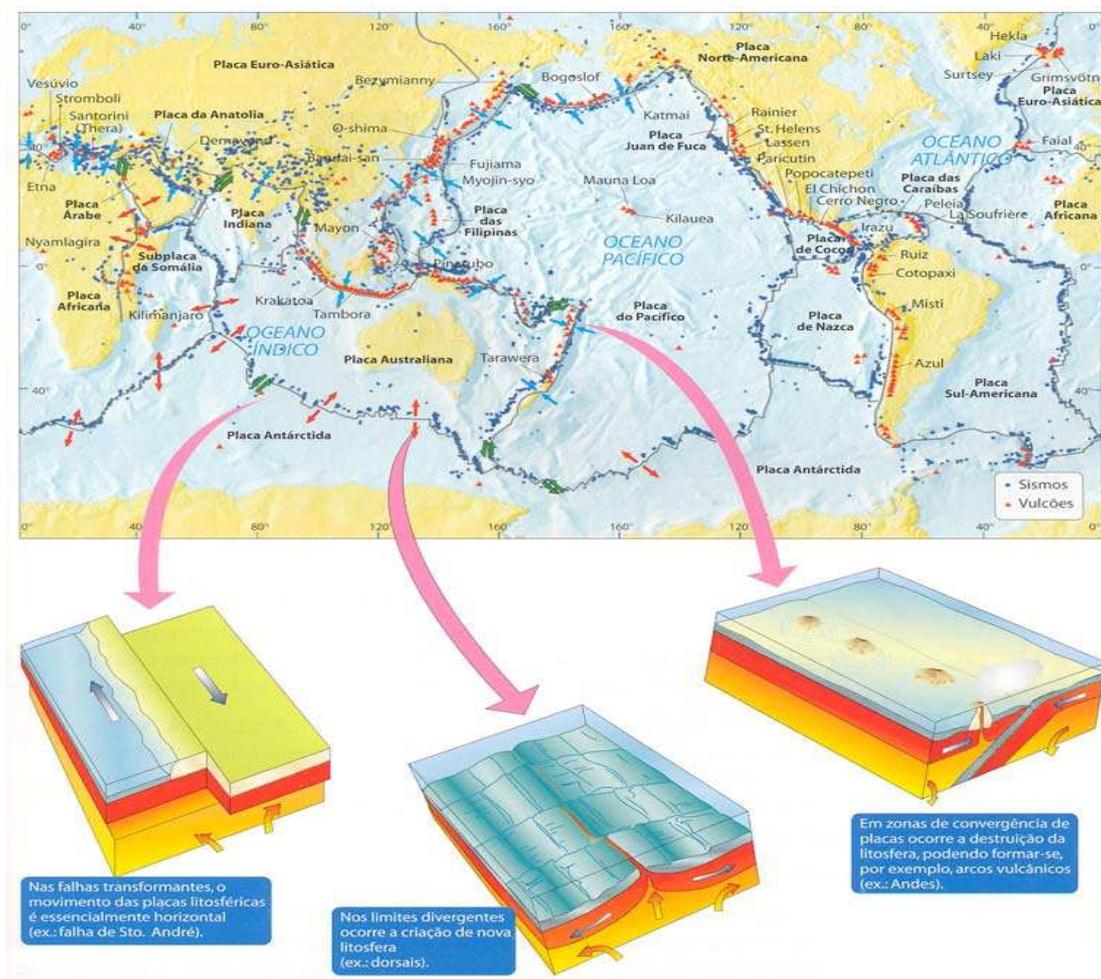


Figura 1-3: Exemplos de sismos de origem natural [4].

### ***1.1.2 Sismos induzidos***

Este tipo de sismos está associado directamente ou indirectamente à acção humana. Podem dever-se a várias razões, como extracção de minerais, águas dos aquíferos ou de combustíveis fósseis, devido à pressão das águas nas albufeiras das barragens (Figura 1-4), grandes explosões ou a queda de grandes edifícios. Apesar destas acções causarem vibrações na terra, não podem ser considerados sismos uma vez que geralmente dão origem a registos em sismogramas diferentes dos de terremotos de origem natural.



Figura 1-4: Exemplo de uma albufeira de uma barragem. A queda de água produz ondas sísmicas que podem ser detectadas nos sismógrafos [5].

## ***1.2 Fenómenos de reflexão e refacção***

As ondas que se espalham em diferentes tipos de rochas e na superfície terrestre estão sujeitas a fenómenos de reflexão e refacção. Estes fenómenos podem levar a uma breve amplificação e conseqüentemente a um aumento do poder de destruição.

A partir da libertação de energia sísmica num ponto e da observação dos tempos de chegada das ondas noutros pontos à superfície da terra, é possível determinar a

distribuição da velocidade e localizar interfaces subterrâneas onde as ondas são reflectidas ou refractadas.

### 1.2.1 Fenómenos de reflexão

A sismologia de reflexão é utilizada para determinar as profundidades a que se encontram as superfícies reflectoras, e determinar também as velocidades sísmicas nas rochas que compõe as várias camadas da terra. O princípio de funcionamento é simples: é produzido um sinal sísmico numa determinada localização num instante de tempo conhecido e registam-se os ecos reflectidos pelas várias interfaces entre as camadas rochosas. No interior da distância crítica, os únicos sinais recebidos são aqueles que viajam desde o ponto do sinal sísmico produzido até aos receptores (Figura 1-5).

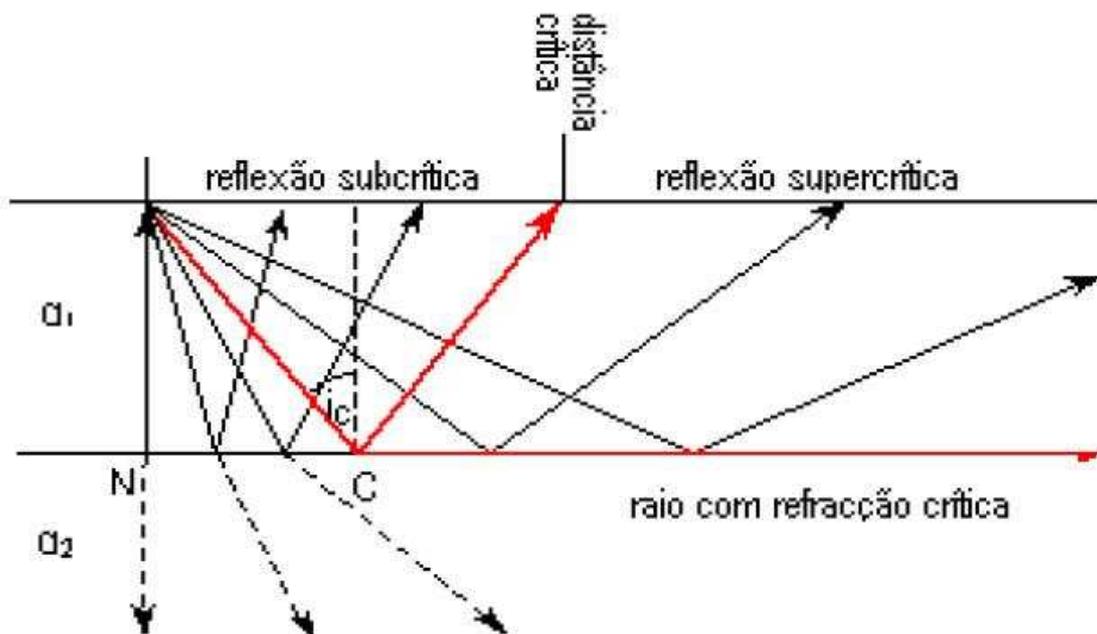


Figura 1-5: Reflexão sísmica. Numa determinada localização num instante de tempo conhecido, registam-se os ecos reflectidos pelas várias camadas rochosas [6].

Os tempos de percurso e amplitudes dos sinais registados pelos receptores são representados na forma de uma secção bidimensional conhecida pelo nome de secção sísmica (Figura 1-6).

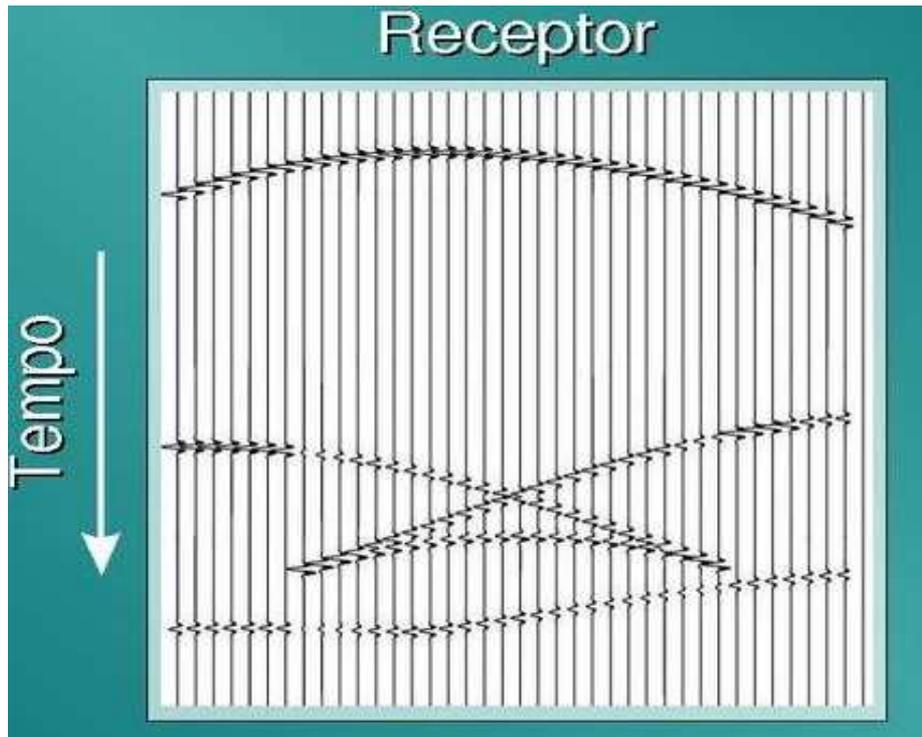


Figura 1-6: Secção sísmica. Apresenta os tempos de percurso e amplitudes dos sinais registados pelos receptores.

A secção sísmica é obtida colocando-se os sismogramas lado a lado após os mesmos passarem por uma série de correcções e de processamentos que visam melhorar as feições geológicas a serem estudadas. Este procedimento possibilita a identificação de uma série de feições estruturais.

Para um sismo próximo (Figura 1-7), como por exemplo para distâncias inferiores a 1000 km, as ondas que vão do foco sísmico (F) a uma estação (E) podem ser de vários tipos, de acordo com os incidentes de propagação. As ondas que chegam em primeiro lugar são as ondas directas, chamadas de  $P_g$  e em segundo lugar chegam as ondas reflectidas  $P_r$ .

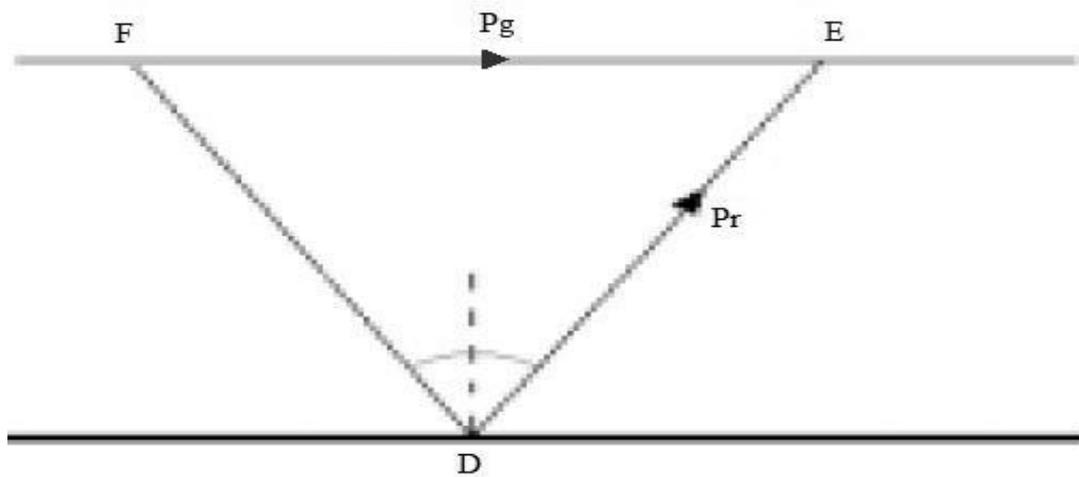


Figura 1-7: Exemplo de um sismo e determinação dos tempos de chegada das ondas directa e reflectida.

O tempo que as ondas demoram a chegar desde o foco (F) até à estação receptora (E), para a onda directa  $P_g$  é dado por:

$$t_g = \frac{FE}{v_c} = \frac{x}{v_c} \quad (1-1)$$

e para a onda reflectida por:

$$t_{Pr} = \frac{FD}{v_c} + \frac{DE}{v_c} = \frac{1}{v_c} \sqrt{\left(\frac{x}{2}\right)^2 + H^2} \quad (1-2)$$

em que  $v_c$  é a velocidade das ondas sísmicas P,  $x$  é a distância entre o foco e a estação e  $H$  é a profundidade da interface [6]. As ondas sísmicas P ou primárias são as que chegam em primeiro lugar aos sismógrafos, tal como será visto no capítulo seguinte.

## 1.2.2 Fenómenos de refacção

O método de refacção sísmica, baseia-se na geração de ondas sísmicas que se propagam no terreno e se refractam em fronteiras de meios com velocidades de propagação crescentes em profundidade e com características diferentes (Figura 1-8).

A aplicação deste método consiste em determinar diferentes refractores em profundidade e na determinação das suas velocidades de propagação, através da

obtenção dos tempos de percurso das ondas sísmicas refractadas, em interface com o contraste das respectivas velocidades de propagação.

Na superfície do terreno são colocados vários receptores de energia sísmica, designados de geofones, e afastados entre si de uma determinada distância constante ao longo de um alinhamento [7].

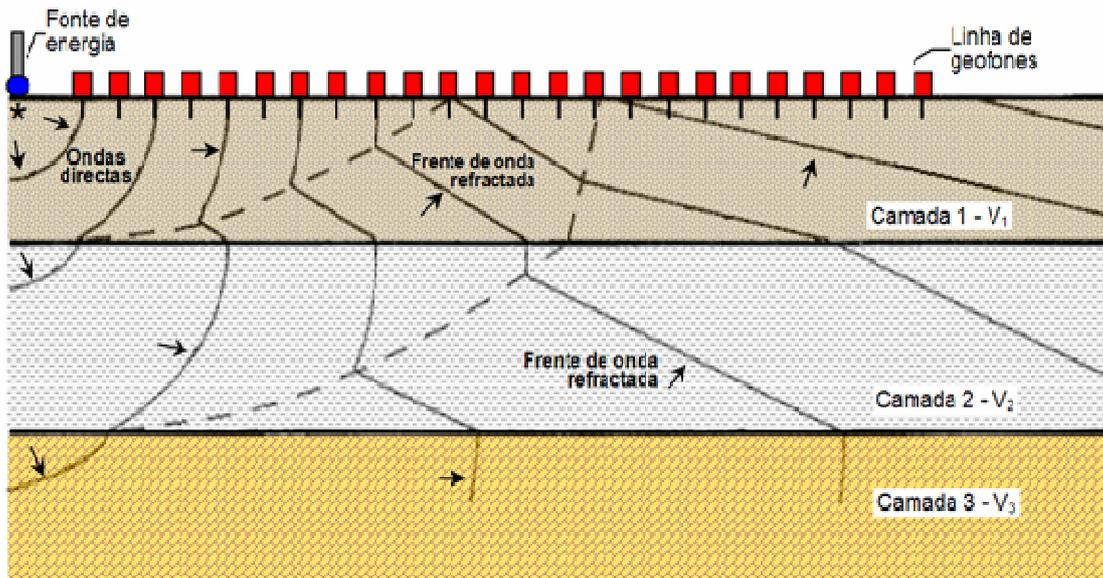


Figura 1-8: Exemplo do método de refração sísmica. Baseia-se na geração de ondas sísmicas que se refractam em fronteiras de meios com velocidades de propagação crescentes em profundidade, e com características diferentes [7].

### 1.3 Profundidade dos sismos

Os sismos, em relação à sua profundidade, podem ser classificados de três formas distintas: superficiais, intermédios e profundos.

- **Superficiais** – ocorrem entre a superfície e os 70 km de profundidade
- **Intermédios** – ocorrem entre os 70 e os 350 Km de profundidade
- **Profundos** – ocorrem entre os 350 e os 670 km de profundidade

Em profundidades superiores a 700 km os sismos são muito raros.

Na crosta continental, a maior parte dos sismos ocorre entre os 2 e os 20 km e são raros abaixo dos 20 km, uma vez que a temperaturas e pressão elevadas, a matéria tem mais elasticidade. Como a crosta oceânica é fria, os sismos podem ser mais profundos [3].

## ***1.4 Distribuição geográfica dos sismos***

Os epicentros dos sismos não se distribuem de forma uniforme na superfície terrestre, mas concentram-se principalmente ao longo de zonas de actividade sísmica interplacas (Figura 1-9).

Existem três zonas sísmicas:

- **Arco circum-Pacífico** sendo responsável por cerca de 75 - 80% da libertação anual de energia sísmica. É formado por uma cintura que envolve as montanhas da costa oeste americana e os arcos insulares que se dispõem ao longo das costas da Ásia e Austrália.
- **Zona mediterrânica-transasiática** que é responsável pela libertação de cerca de 15 - 20% da energia sísmica anual. Esta zona começa na junção tripla dos Açores, continua pela zona de fractura Açores - Gibraltar, pelo norte de África, encurva através da península itálica, passa pelos Alpes, Grécia, Turquia, Irão, Himalaias e termina finalmente nos arcos insulares do sudoeste da Ásia.
- **Sistema das cristas oceânicas** liberta cerca de 3-7% da energia sísmica anual.

Para além da sismicidade, também existe a libertação de energia devido a existência de vulcanismo activo.

A restante zona da terra onde não ocorre actividade sísmica nem vulcânica é considerada zona assísmica [8].

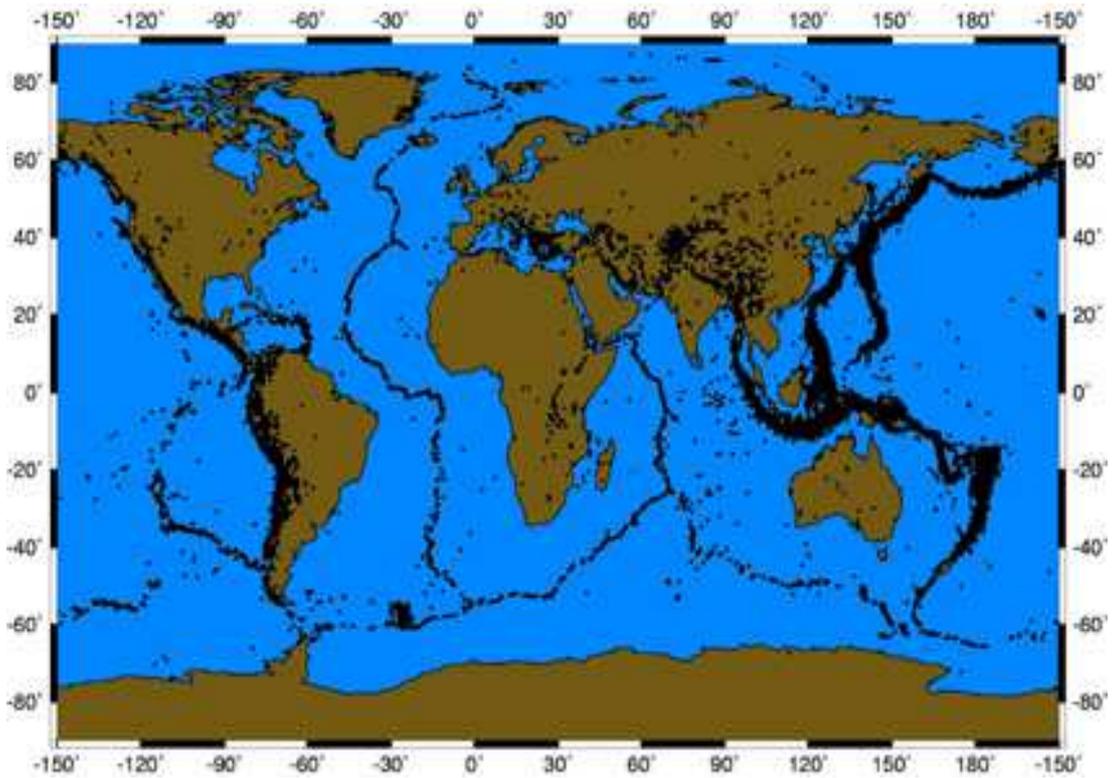


Figura 1-9: Distribuição geográfica da sismicidade com magnitude superior a 5 para o período 1980-1999 ilustrando as zonas tectonicamente activas [8].

## ***1.5 Objectivos do trabalho***

O principal objectivo deste trabalho é medir a amplitude e a frequência das ondas sísmicas causadas por acontecimentos que se propagam através da terra, em frequências mais altas do que as convencionais. Os sensores sísmicos convencionais normalmente cobrem uma gama de frequências de décimos de Hz a centenas de Hz. O principal objectivo deste trabalho é desenvolver um sensor com uma leitura capaz de operar na faixa de frequência de vários Hz a 50 kHz.

## ***1.6 Organização da tese***

Com o objectivo de descrever os aspectos teóricos, o projecto e construção de um sensor de terremotos utilizando um filme piezoeléctrico, esta tese organiza-se do seguinte modo:

No capítulo 2 é apresentado um estudo sobre as ondas sísmicas, os seus tipos, bem como os seus modos de propagação na terra. Serão apresentados também os métodos que existem para quantificar, bem como, qualificar os sismos.

No capítulo 3 serão apresentados detectores de ondas sísmicas. Estes podem ser de origem vertical ou horizontal.

No capítulo 4 será apresentado um estudo acerca dos filmes piezoeléctricos. Serão apresentadas as suas características bem como o efeito piezoeléctrico directo e inverso.

No capítulo 5 é apresentada a parte experimental deste trabalho que inclui uma secção dedicada ao fabrico do sensor, outra dedicada à electrónica utilizada e por fim uma dedicada ao software implementado em LabVIEW.

O capítulo 6 é dedicado à descrição dos testes e à apresentação dos resultados obtidos.

No capítulo 7 são tiradas algumas conclusões sobre o sensor criado e algumas propostas para trabalhos futuros.

## ***Bibliografia***

[1] Malhatlantica. Sismos. 16 Novembro 2007.

<<http://www.malhatlantica.pt/cnaturais/sismos.htm>>

[2] Terra Planeta “Vivo”. Tectónica de placas. 8 Outubro 2008.

<[http://domingos.home.sapo.pt/tect\\_placas\\_5.html](http://domingos.home.sapo.pt/tect_placas_5.html)>

[3] Wikipédia, a Enciclopédia Livre. Sismo. 10 Outubro 2008.

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Sismo>>

[4] Placas tectónicas. 30 Outubro 2008. <[http://formacao.es-](http://formacao.es-loule.edu.pt/biogeo/geo12/pre_requisitos/geo12_pre.htm)

[loule.edu.pt/biogeo/geo12/pre\\_requisitos/geo12\\_pre.htm](http://formacao.es-loule.edu.pt/biogeo/geo12/pre_requisitos/geo12_pre.htm)>

[5] Curiosidades. 30 Outubro 2008.

<<http://www.soumais.com.br/colunas/Curiosidades/curiosidades.htm>>

[6] J.M. Miranda, J. F Luís, P.T. Costa, F.M. Santos, *Fundamentos de geofísica*, capítulo 2. 20 Novembro 2007.

<<http://www.iag.usp.br/~marcelo/agg232/moddata//Apostilas%20do%20monitor/FundGeofisica4.pdf>>

[7] Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Refracção sísmica. 10 Outubro 2008.

<[http://www.lnec.pt/organizacao/dg/ngea/refraccao\\_sismica](http://www.lnec.pt/organizacao/dg/ngea/refraccao_sismica)>

[8] J. Alveirinho Dias. Distribuição Global da Sismicidade. 12 Outubro 2008.

<[http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA5\\_Sismos/52\\_Sismologia/5210\\_Distribuicao.html](http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA5_Sismos/52_Sismologia/5210_Distribuicao.html)>

## *Ondas sísmicas*

Uma onda é uma perturbação ou distúrbio transmitido através do vácuo ou de um meio gasoso, líquido ou sólido. Existe uma grande variedade de ondas e estas podem diferir em muitos aspectos, mas todas podem transmitir energia de um ponto para outro.

As ondas dependendo do meio de propagação podem ser classificadas como mecânicas e não-mecânicas [1].

No caso desta tese, apenas interessam as ondas mecânicas, pelo que as não mecânicas não serão abordadas. Assim sendo, as ondas mecânicas propagam-se em meios elásticos ou deformáveis. Tendo o meio propriedades elásticas, o distúrbio é transmitido sucessivamente de um ponto para outro vibrando somente em redor das suas posições de equilíbrio, por exemplo, ondas sonoras ou ondas sísmicas.

As ondas sonoras provocam um estímulo nos ouvidos activando as células receptoras, em resposta às várias frequências, activando o impulso nervoso, como se pode verificar na Figura 2-1:

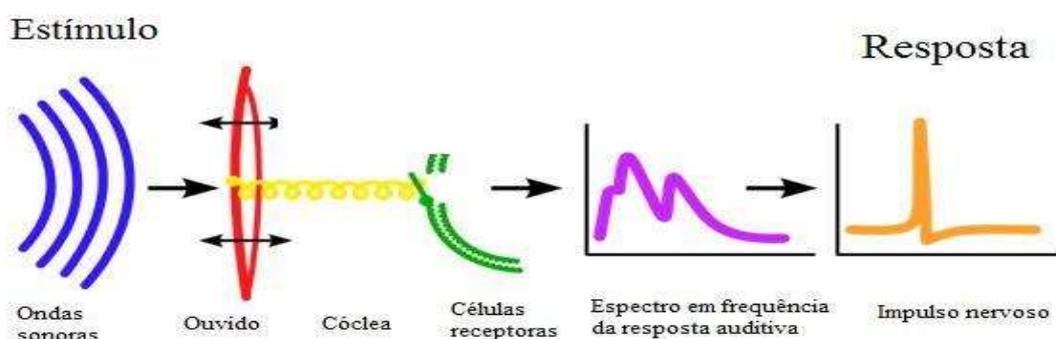


Figura 2-1: Ondas sonoras. Provocam um estímulo no ouvido activando as células receptoras e em resposta às várias frequências activam o impulso nervoso.

## ***2.1 Ondas sísmicas de corpo ou volúmicas***

As ondas sísmicas volúmicas são as que percorrem o interior da terra. Tal como qualquer tipo de onda que se propague através de um espaço tridimensional, com origem que possa ser considerada como fonte pontual, a sua amplitude diminui com o quadrado da distância à fonte. Para além disso, a superfície definida como aquela em que todos os pontos se encontram no mesmo estado de vibração, ou seja, em fase, designa-se por frente de onda. Para pequenas distâncias, a frente de onda tem uma forma esférica, mas com o aumento da distância à fonte, a frente de onda torna-se progressivamente mais plana [2].

Dependendo da relação entre a direcção da perturbação e de propagação, as ondas podem ser classificadas como longitudinais ou transversais.

### ***2.1.1 Ondas Primárias ou longitudinais***

As ondas primárias ou P são as mais rápidas de todas as ondas sísmicas. São do tipo compressivo, podendo propagar-se tanto em meios sólidos como em meios líquidos. No ar estas ondas tomam a forma de ondas sonoras e propagam-se à velocidade do som.

São também chamadas de ondas longitudinais, pois resultam de um movimento vibratório que produz alternadamente uma compressão seguida de uma distensão com amplitudes e períodos baixos ao longo de uma dada direcção denominada de direcção de propagação, como podemos verificar na Figura 2-2. Uma forma de se ter uma excelente analogia em relação a este tipo de ondas é imaginar uma onda a propagar-se ao longo de uma mola.

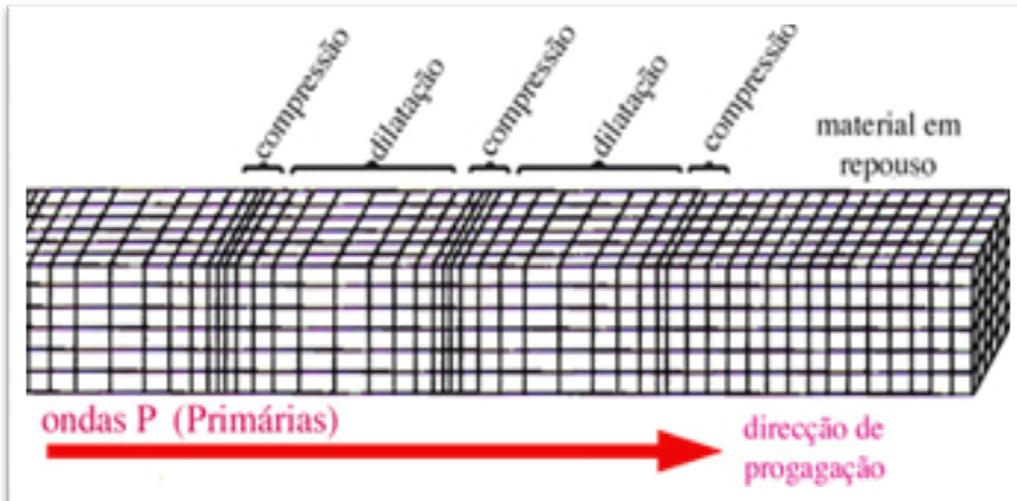


Figura 2-2: Propagação de uma onda primária ou P. Resulta de um movimento vibratório que produz alternadamente uma compressão seguida de uma distensão [2].

De modo a compreender os modos de propagação das ondas primárias, considere-se o caso de uma onda unidimensional e um sistema de eixos cartesianos, em que o eixo dos  $x$  aponta na direcção de propagação da onda e os eixos dos  $y$  e  $z$  representam o plano de frente de onda (Figura 2-3).

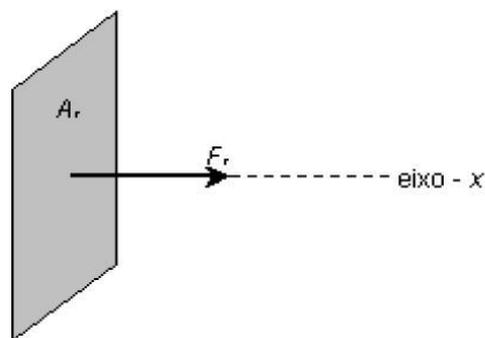


Figura 2-3: Movimento de uma partícula numa onda P unidimensional onde o eixo dos  $x$  aponta na direcção de propagação e os eixos  $y$  e  $z$  representam o plano de frente de onda [3].

Na Figura 2-3,  $A_x$  representa a área da frente de onda perpendicular à direcção de propagação e numa qualquer posição  $x$  (Figura 2-4), a passagem da onda produz um deslocamento  $u$  e uma força  $F_x$  na direcção  $x$ . Na posição  $x + dx$ , o deslocamento é de  $u + du$  e a força é de  $F_x + dF_x$ .

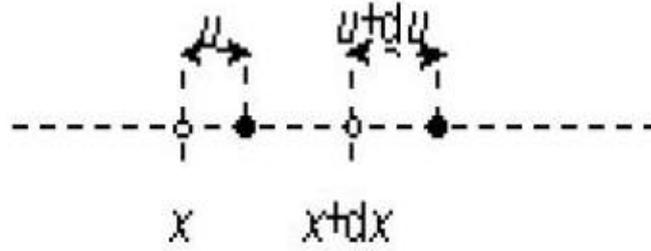


Figura 2-4: Numa qualquer posição  $x$ , a passagem da onda produz um deslocamento  $u$  e uma força  $F_x$  na direcção  $x$ .

Sendo assim,  $dx$  representa o comprimento infinitesimal de um pequeno elemento de volume cuja massa é  $\rho dx A_x$ . A força resultante que actua neste elemento de volume é dada por:

$$(F_x + dF_x) - F_x = dF_x = \frac{\partial F_x}{\partial x} dx \quad (2-1)$$

Esta força  $F_x$  é causada pela componente da tensão  $\sigma_{xx}$  que actua na área  $A_x$  e que é igual a  $\sigma_{xx} A_x$ . Pode escrever-se a equação do movimento unidimensional, usando para isso a 2ª lei de Newton:

$$(\rho dx A_x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = dx A_x \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \quad (2-2)$$

A definição do módulo de young,  $E$ , e da deformação normal  $\epsilon_{xx}$  permite escrever:

$$\sigma_{xx} = E \epsilon_{xx} = E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2-3)$$

substituindo este resultado nas equações anteriores obtém-se a equação da onda unidimensional:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2-4)$$

onde  $V$  representa a velocidade da onda e  $\rho$  representa a densidade material. A velocidade é dada por:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2-5)$$

O caso apresentado da onda unidimensional é na verdade bastante restritivo uma vez que não se considerou o que se passava nas direcções  $y$  e  $z$ . Sendo assim, a área  $A_x$  não poderia ter sido considerada constante. De um modo mais rigoroso, o que se deve fazer é olhar para o que acontece simultaneamente ao longo de cada uma das três direcções do espaço. Para isso, é necessário analisar as variações de volume de um elemento do meio, quando este é atravessado pela onda. Sendo assim, a equação da onda compressiva na direcção  $x$  é:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \alpha^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (2-6)$$

onde  $\alpha$  representa a velocidade de propagação da onda e  $\theta$  a dilatação. Usando a equação  $K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$  (onde  $\lambda$  e  $\mu$  são constantes de Lamé), é dada por:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (2-7)$$

A dilatação ( $\theta$ ) é definida como sendo a variação fraccional de volume de um elemento no limite em que a sua área tende para zero.

O módulo de volume ou incompressibilidade, ( $K$ ) define-se a partir da dilatação sofrida por um corpo quando sob o efeito de uma pressão hidrostática.

Como foi dito anteriormente, as ondas longitudinais são as mais rápidas de todas as ondas sísmicas, sendo as primeiras a chegar a um dado local e podem deslocar-se tanto em meios sólidos, como em meios líquidos e gases (conhecidas como ondas sonoras), pois todos eles são compressíveis ( $K \neq 0$ ). No entanto, os líquidos e os gases não suportam tensões de corte e por isso  $\mu = 0$ , sendo equivalente a dizer que eles não

têm rigidez (onde  $\mu$  é o módulo de rigidez) [3]. Portanto, a velocidade deste tipo de ondas nos fluidos é dada por:

$$\alpha = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2-8)$$

### 2.1.2 Ondas secundárias ou transversais

O movimento de vibração das ondas secundárias ou S dá-se num plano definido pela frente de onda, perpendicular à direcção de propagação, ou seja, provoca um movimento do solo para cima e para baixo como se pode verificar na Figura 2-5.

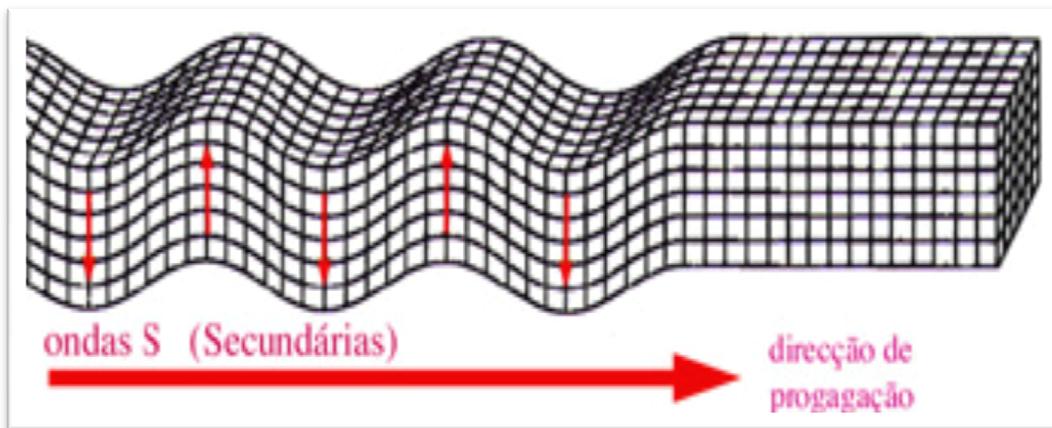


Figura 2-5: Propagação de uma onda secundária ou S. Provoca um movimento do solo para cima e para baixo [2].

Uma analogia que se pode considerar é o caso de uma corda bem esticada, presa num dos lados a uma parede e colocada a vibrar com uma perturbação exercida na vertical, como se pode verificar na Figura 2-6.

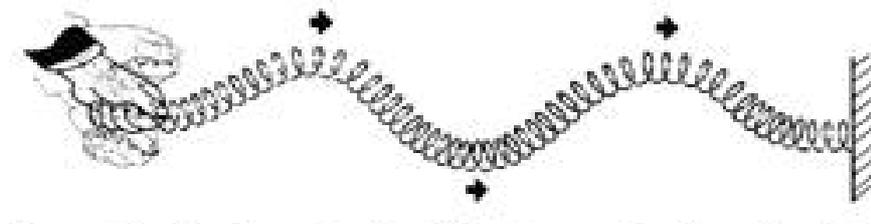


Figura 2-6: Analogia da propagação de uma onda secundária: corda colocada a vibrar.

Para fazer um estudo sobre este tipo de ondas apenas se irá considerar o que se passa no plano vertical definido pelos eixos  $x$  e  $z$ .

Este estudo centra-se apenas no que se sucede a um elemento de volume cujos planos verticais estão separados de  $dx$ , como mostra a Figura 2-7.

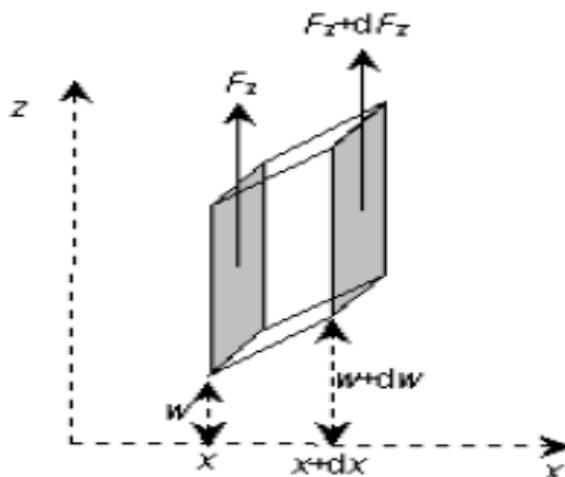


Figura 2-7: Deslocamentos e forças segundo a direcção  $z$  nas posições  $x$  e  $x + dx$  [3].

A passagem da onda ao longo da direcção  $x$  provoca um deslocamento  $w$  e uma força  $F_z$  na direcção do eixo dos  $zz$ . Na posição  $x + dx$ , o deslocamento é de  $w + dw$  e a força é de  $F_z + dF_z$ . A massa do pequeno elemento de volume ladeado por planos de área  $A_x$  é  $\rho dx A_x$  e a força resultante que nele actua, segundo a direcção  $z$  é dada por:

$$(F_z + dF_z) - F_z = dF_z = \frac{\partial F_z}{\partial x} dx \quad (2-9)$$

A força  $F_z$  resulta da aplicação da tensão de corte  $\sigma_{xz}$  na área  $A_x$  e é igual a  $\sigma_{xz} A_x$ . A equação do movimento é

$$(\rho dx A_x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = dx A_x \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} \quad (2-10)$$

Uma vez que a área dos paralelogramos entre os dois planos verticais adjacentes é igual, não existe variação de volume. Assim sendo, a dilatação  $\theta$  é zero e a lei de Hooke para um sólido elástico pode ser escrita como:

$$\sigma_{ij} = \lambda\theta\delta_{ij} + 2\mu\epsilon_{ij} \quad (2-11)$$

onde  $\delta_{ij}$  é chamado de símbolo de krönecker e  $\epsilon_{ij}$  a componente da deformação. Para a componente  $\sigma_{xz}$  dá:

$$\sigma_{xz} = 2\mu\epsilon_{xz} \quad (2-12)$$

A partir da definição das tensões de corte, obtém-se:

$$\epsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2-13)$$

Como para uma onda transversal unidimensional não há variação da distância horizontal  $dx$  entre os planos verticais, tem-se:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \beta^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (2-14)$$

onde  $\beta$  é a velocidade da onda transversal, dada por

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2-15)$$

Portanto, pode verificar-se que a única propriedade que condiciona a velocidade das ondas transversais é a rigidez  $\mu$ . Como nos líquidos e gases a componente  $\mu$  é zero, nestes meios não é possível propagarem-se ondas transversais.

Ao fazer uma comparação entre as velocidades nos sólidos das ondas longitudinais e transversais observa-se que:

$$\alpha^2 - \frac{4}{3}\beta^2 = \frac{K}{\rho} \quad (2-16)$$

o que significa que  $\alpha$  é sempre maior que  $\beta$ , ou seja, as ondas longitudinais deslocam-se mais rapidamente que as ondas transversais [3].

## 2.2 Ondas superficiais

As ondas sísmicas superficiais são ondas que se formam na superfície da terra, correspondem a uma perturbação exercida numa superfície livre e propagam-se a partir da fonte viajando pela superfície.

Estas ondas deslocam-se a uma velocidade menor do que as ondas volúmicas e distinguem-se entre si pelo tipo de movimento que as partículas descrevem na frente de onda [2]. Podem ser classificadas como ondas R ou L.

### 2.2.1 Ondas R (Rayleigh)

As ondas Rayleigh podem ser visualizadas como uma combinação de vibrações do tipo S e P, uma vez que o movimento das partículas na frente de onda está polarizado no plano vertical, descrevendo uma elipse retrógrada, ou seja, movem o solo em sentido contrário ao da propagação (Figura 2-8) [2].

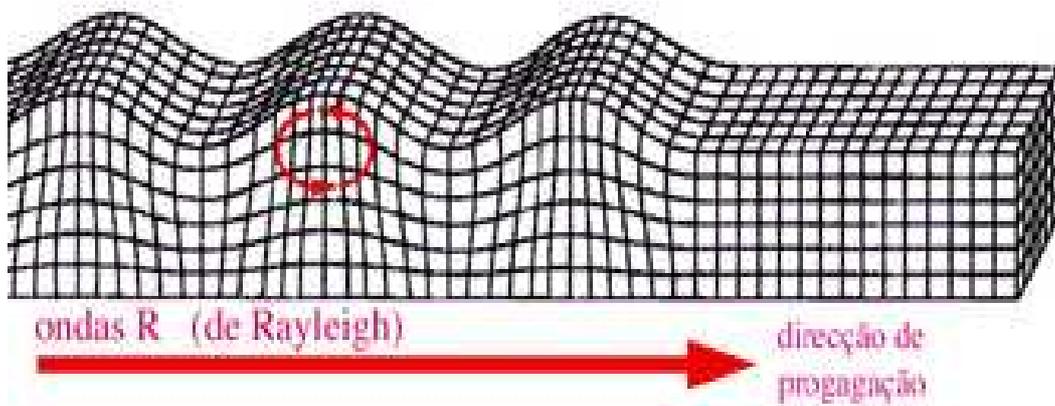


Figura 2-8: Ondas Rayleigh. Movem o solo em sentido contrário ao da propagação [2].

## 2.2.2 Ondas L (Love)

As ondas Love são o resultado da interferência de duas ondas S e são ligeiramente mais rápidas que as ondas Rayleigh.

Estas ondas provocam um movimento do solo transversal à direcção de propagação da onda (Figura 2-9).

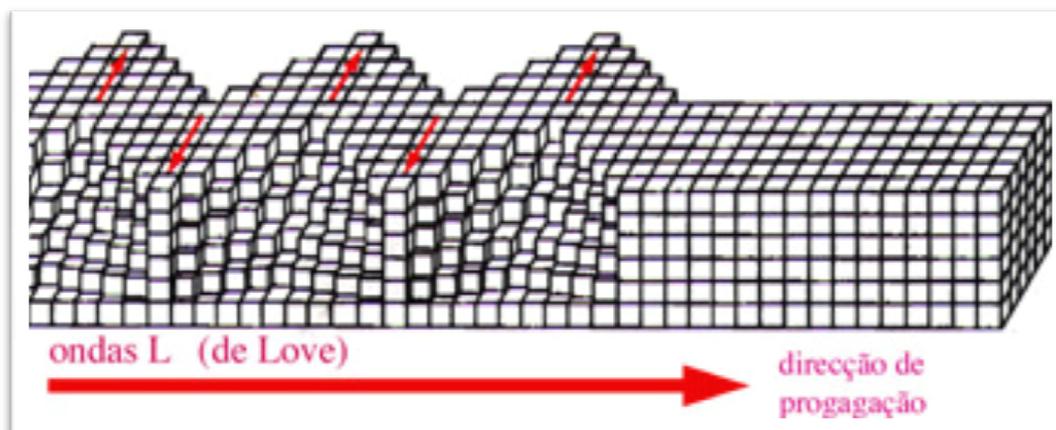


Figura 2-9: Ondas Love. Provocam um movimento do solo transversal à direcção de propagação da onda [2].

## 2.3 Comparação entre os vários tipos de ondas

Após uma breve descrição dos vários tipos de onda e de como estas se propagam na Terra, pode construir-se uma tabela contendo algumas características, velocidades típicas e o movimento das partículas de cada tipo de onda.

Tabela 1: Características das ondas sísmicas [4]

<b>Tipo de onda</b>	<b>Movimento das partículas</b>	<b>Velocidades típicas</b>	<b>Características</b>
<b>P (Primária)</b>	Alterna entre compressões e dilatações sendo estas na direcção de propagação da onda.	<p><math>V_p \sim 5 - 7</math> km/s na crosta terrestre;</p> <p><math>V_p &gt; 8</math> km/s no manto terrestre;</p> <p><math>V_p \sim 1.5</math> km/s na água;</p> <p><math>V_p \sim 0.3</math> km/s no ar.</p>	Ondas P são as mais rápidas a viajar, logo chegam primeiro aos sismógrafos. Geralmente mais pequenas e de maior frequência que as ondas S. Em líquidos e gases são ondas de pressão e ondas sonoras respectivamente.
<b>S (Secundária)</b>	Movimento perpendicular à direcção de propagação provocando alternância do solo para cima e para baixo.	<p><math>V_s \sim 3 - 4</math> km/s na crosta terrestre;</p> <p><math>V_s &gt; 4.5</math> km/s no manto terrestre.</p>	Ondas S não viajam em fluidos, logo não existem no núcleo terrestre, no ar, na água ou no magma. Ondas S são mais lentas que as ondas P.
<b>L (Love)</b>	Movimento horizontal e perpendicular à direcção de propagação.	$V_L \sim 2 - 4.5$ km/s na Terra dependendo da frequência de propagação.	Ondas Love existem devido às características da superfície terrestre. A sua velocidade depende da frequência, ou seja, com baixas frequências a velocidade de propagação é maior.
<b>R (Rayleigh)</b>	Movimento que junta as ondas S e P na direcção de propagação estando faseadas, fazendo um movimento geralmente elíptico.	$V_r \sim 2 - 4.5$ km/s na terra dependendo da frequência de propagação.	Ondas Rayleigh são dispersivas e a amplitude diminui com a profundidade na terra. O seu movimento é parecido com as ondas de água.

A partir das descrições anteriores é possível demonstrar o que estes tipos de ondas provocam nos humanos quando estes estão a andar. Isso pode-se verificar na Figura 2-10.

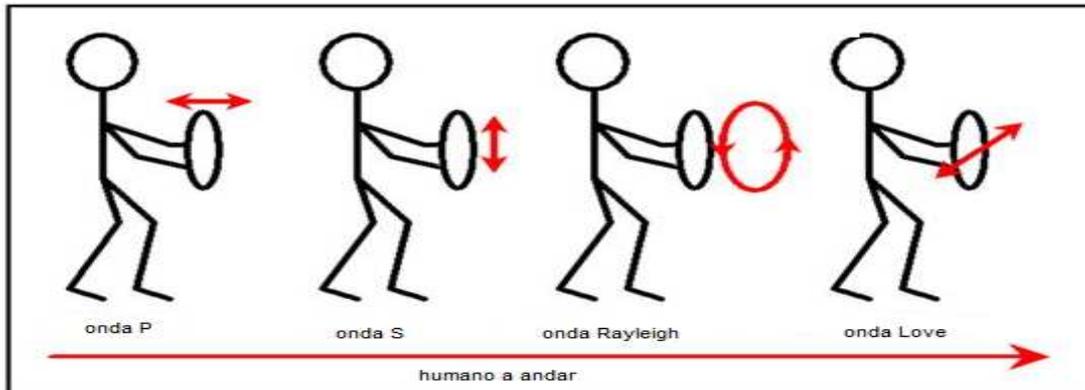


Figura 2-10: Movimento que as ondas provocam nos humanos.

Nas ondas P o humano faz deslocamentos para a frente e para trás, nas ondas S o humano desloca-se para cima e para baixo, nas ondas Rayleigh faz uma junção dos movimentos provocados pelas ondas S e P, fazendo um movimento circular. As ondas Love provocam um movimento transversal à direcção em que o humano se está a deslocar [5].

## 2.4 *Quantificação e qualificação dos sismos*

Quando ocorre um sismo, para além de todas as medidas que se devem tomar durante ou mesmo após a sua ocorrência, este normalmente é estudado. Ao efectuar esse estudo, existem duas formas para descrever a dimensão de um sismo.

### 2.4.1 *Intensidade sísmica*

A intensidade de um sismo é baseada nos efeitos que provoca na superfície terrestre, sendo avaliado pelas populações. É um parâmetro um pouco subjectivo uma vez que depende da precisão das observações.

Após a ocorrência de um sismo, são distribuídos inquéritos às populações afectadas, de modo a determinar a intensidade sísmica em cada local. A partir do estudo destes inquéritos, as intensidades são representadas em mapas com numeração romana de acordo com uma escala de I a XII, estando desenhadas isolinhas de intensidade ou também chamadas linhas isossistas (Figura 2-11). Estas linhas são curvas fechadas, irregulares e de igual intensidade, curvando em torno do epicentro e diminuindo de intensidade a medida que aumenta a distância do epicentro [6].

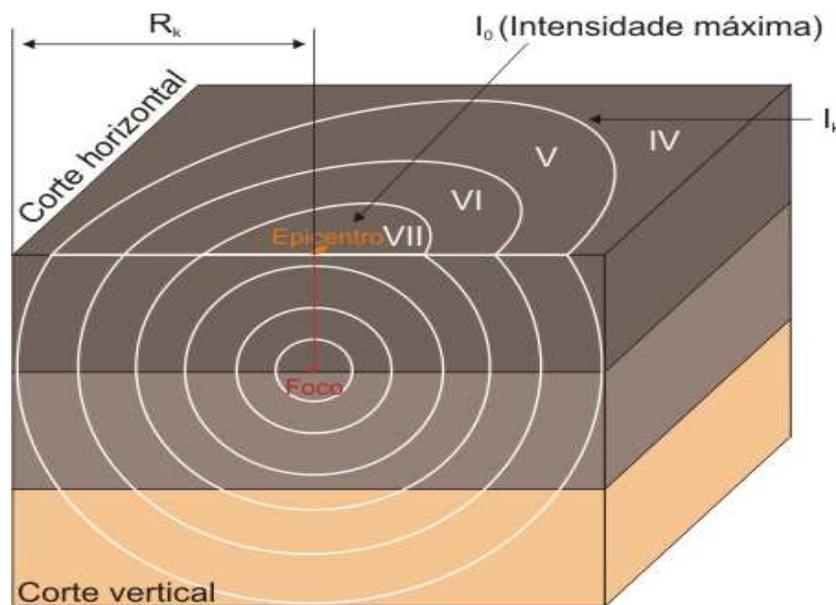


Figura 2-11: Linhas isossistas.

Para qualificar os sismos foi desenvolvida uma escala de intensidades por Giuseppe Mercalli no final do século XIX. Embora esta tenha sido modificada e adaptada, continua a chamar-se escala de intensidade Mercalli modificada.

Algumas limitações e inconvenientes da escala:

- É quantificada em escalas ordinais
- Depende da densidade populacional
- Depende das condições dos locais de construção
- É condicionada pela geologia e topologia local
- Avaliação subjectiva

Tabela 2: Graus de intensidade sísmica de acordo com a escala de Mercalli Modificada [6]

Grau	Designação	Efeitos
<b>I</b>	Imperceptível	Não sentido.
<b>II</b>	Muito fraco	Sentido pelas pessoas em repouso nos andares elevados dos edifícios.
<b>III</b>	Fraco	Sentido dentro de casa. Os objectos pendentes baloiçam. A vibração é semelhante à provocada pela passagem de veículos pesados. É possível estimar a duração mas não pode ser reconhecido como um sismo.
<b>IV</b>	Moderado	Os objectos suspensos baloiçam. A vibração é semelhante à provocada pela passagem de veículos pesados. Carros estacionados balançam. Janelas, portas e loiças tremem.
<b>V</b>	Forte	Sentido fora de casa. Pode avaliar-se a direcção do movimento. As pessoas são acordadas. Líquidos oscilam e alguns extravasam. Pequenos objectos em equilíbrio instável deslocam-se.
<b>VI</b>	Bastante forte	Sentido por todos. Muitos assustam-se e correm para a rua. As pessoas sentem a falta de segurança. Os quadros caem das paredes. As mobílias movem-se ou tombam. Pequenos sinos tocam (igrejas e escolas). As árvores e arbustos são visivelmente agitados ou ouve-se o respectivo ruído.
<b>VII</b>	Muito forte	É difícil permanecer de pé. É notado pelos condutores de automóveis. Os objectos pendurados tremem. Queda de reboco, tijolos soltos, pedras, telhas, cornijas, parapeitos soltos e ornamentos arquitectónicos. Ondas nos tanques. Pequenos desmoronamentos e abatimentos ao longo das margens de areia e de cascalho. Os grandes sinos tocam.
<b>VIII</b>	Ruinoso	Afecta a condução dos automóveis. Quedas de estuque e de algumas paredes de alvenaria. Torção e queda de chaminés, monumentos, torres e reservatórios elevados. Mudanças nos fluxos ou nas temperaturas das fontes e dos poços. Fracturas no chão húmido e nas vertentes escarpadas.
<b>IX</b>	Desastroso	Pânico geral. Danos gerais nas fundações. As estruturas são fortemente abanadas. Fracturas importantes no solo. Formam-se nascentes e crateras arenosas.
<b>X</b>	Destruidor	A maioria das alvenarias e das estruturas são destruídas com as suas fundações. Algumas estruturas de madeira bem construídas e pontes são destruídas. Danos sérios em barragens, diques e aterros. Grandes desmoronamentos de terrenos. As águas são arremessadas contra as muralhas que marginam os canais, rios, lagos, etc; Vias férreas levemente deformadas.
<b>XI</b>	Catastrófico	Vias férreas grandemente deformadas. Canalizações subterrâneas completamente avariadas.
<b>XII</b>	Danos quase totais	Grandes massas rochosas deslocadas. Conformação topográfica distorcida. Objectos atirados ao ar.

## 2.4.2 Magnitude sísmica

A magnitude de um sismo permite quantificar a energia libertada durante o evento. É fundamentada em medições precisas da amplitude das ondas sísmicas registadas nos sismógrafos, em distâncias conhecidas entre o epicentro e a estação sísmica.

Para quantificar a energia libertada foi desenvolvida uma escala de magnitudes em 1935, pelo sismólogo Charles Francis Richter.

A equação da Magnitude de Richter é a seguinte:

$$ML = \log_{10} A \text{ (mm)} + (\text{factor correctivo da distância}) \quad (2-17)$$

Na Figura 2-12, as escalas do diagrama formam um nomograma que permite estimar, rápida e facilmente, a magnitude de um sismo.

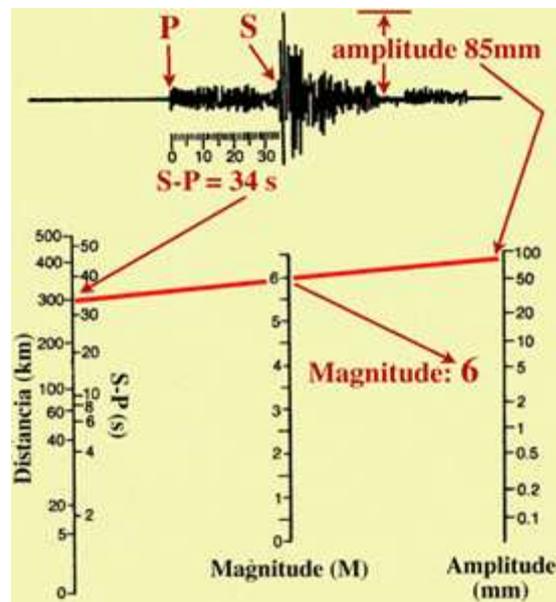


Figura 2-12: Magnitude sísmica. Permite quantificar a energia libertada [7].

A escala de magnitudes é expressa numa escala logarítmica, ou seja, o aumento de uma unidade da magnitude corresponde a um aumento de 10 na amplitude das ondas sísmicas. Esta escala não tem limites, nem superior nem inferior, sendo a magnitude máxima limitada pela resistência da crosta terrestre.

Foi também estabelecida uma relação entre a magnitude (M) e energia sísmica (ES) pelos sismólogos Charles Francis Richter e Beno Gutenberg.

$$\log_{10} ES = 11.8 + 1.5 M \quad (2-18)$$

Com esta relação verifica-se que, com um aumento de uma unidade na escala de magnitudes esta representa cerca de 31 vezes mais energia libertada, ou seja, à medida que aumenta uma unidade na escala de magnitudes, o sismo liberta cerca de 31 vezes mais energia [7].

Como cada sismo tem apenas um único valor de magnitude, os seus efeitos variam muito consoante a distância à zona epicentral, bem como, muitas outras características. Na tabela a seguir é mostrada uma primeira aproximação de uma escala de magnitude.

Tabela 3: Escala de Magnitude [8]

Descrição	Magnitude	Efeitos
<b>Micro</b>	<2,0	Micro tremor de terra, não se sente.
<b>Muito pequeno</b>	2,0 – 2,9	Geralmente não se sente mas é detectado/registado pelos sismógrafos.
<b>Pequeno</b>	3,0 – 3,9	Frequentemente sentido mas raramente causa danos
<b>Ligeiro</b>	4,0 – 4,9	Tremor notório em objectos no interior das habitações, ruídos de choque entre objectos. Danos importantes mas poucos comuns.
<b>Moderado</b>	5,0 – 5,9	Pode causar danos maiores em edifícios mal concebidos em zonas restritas. Provoca danos ligeiros nos edifícios bem construídos.
<b>Forte</b>	6,0 – 6,9	Pode ser destruidor em zonas num raio de até 180 quilómetros em áreas habitadas.
<b>Grande</b>	7,0 – 7,9	Pode provocar danos graves em zonas mais vastas.
<b>Importante</b>	8,0 – 8,9	Pode causar danos sérios em zonas num raio de centenas de quilómetros.
<b>Excepcional</b>	9,0 – 11,9	Devasta zonas num raio de milhares de quilómetros.
<b>Extremo</b>	>12,0	Poderia dividir a Terra ao meio.

## ***Bibliografia***

- [1] Pécora, Jesus Djalma. Guerisoli, Danilo M. Zanello. Ultra-Som. 8 Dezembro 2007.  
<<http://www.forp.usp.br/restauradora/us01.htm>>
- [2] J. Alveirinho Dias. Ondas sísmicas. 10 Dezembro 2007.  
<[http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA5\\_Sismos/52\\_Sismologia/5203\\_OndasSismicas.html](http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA5_Sismos/52_Sismologia/5203_OndasSismicas.html)>
- [3] J.M. Miranda, J. F Luís, P.T. Costa, F.M. Santos, *Fundamentos de Geofísica, capítulo 2*. 30 Setembro 2008.  
<<http://www.iag.usp.br/~marcelo/agg232/moddata//Apostilas%20do%20monitor/FundGeofisica4.pdf>>
- [4] Prof. Lawrence W. Braile, *Seismic Waves and The Slinky: A Guide For Teachers*. 15 Dezembro 2007. <<http://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/slinky/slinky.htm>>
- [5] L. Braile, Purdue University, *Seismic Wave Demonstrations And Animations*. 14 Outubro 2008. <<http://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/waves/WaveDemo.htm>>
- [6] J. Alveirinho Dias. Intensidade sísmica. 18 Dezembro 2007.  
<[http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA5\\_Sismos/52\\_Sismologia/5208\\_Intensidade.html](http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA5_Sismos/52_Sismologia/5208_Intensidade.html)>
- [7] J. Alveirinho Dias. Magnitude sísmica. 18 Dezembro 2007.  
<[http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA5\\_Sismos/index5.html](http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA5_Sismos/index5.html)>
- [8] Wikipédia, a enciclopédia livre. Escala de Richter. 14 Outubro 2008.  
<[http://pt.wikipedia.org/wiki/Escala\\_de\\_richter](http://pt.wikipedia.org/wiki/Escala_de_richter)>



# 3

## *Detecção de ondas sísmicas*

Já conhecendo as várias escalas que permitem quantificar, bem como, qualificar os sismos pode-se estudar a forma como estes sismos podem ser detectados, sendo utilizado um sensor, o sismógrafo.

De modo a descrever um sismógrafo e seguindo um esquema muito clássico, é possível distinguir neste três partes principais: o sensor, o amplificador e o registador.

O sensor, também chamado de sismómetro ou geofone, é o elemento que detecta o movimento do solo e o converte num sinal que se possa registar de forma conveniente. Nas ciências físicas chamam-se, de uma forma geral, transdutores a sistemas ou instrumentos que permitam converter uma grandeza (neste caso será o movimento do solo), em outra grandeza que de um modo geral permita tratar mais facilmente os resultados.

A parte amplificadora, como o nome indica, é a que amplifica o sinal registado pelo sensor, uma vez que, em geral a amplitude obtida é demasiado pequena para uma observação directa.

Finalmente, a parte registadora, permite construir um tipo de gráfico do registo obtido pelo sensor, chamado de sismograma. Nesta última parte, também se inclui um cronógrafo que permite introduzir uma referência temporal no gráfico e por conseguinte, é possível conhecer a hora em que foram registadas as diversas fases e ondas que compõe o registo [1].

O sismógrafo resume-se a um sensor que reage e amplifica o movimento do solo numa dada direcção, registando os movimentos de vibração num registador que produz um registo visível do movimento, chamado de sismograma (Figura 3-1).

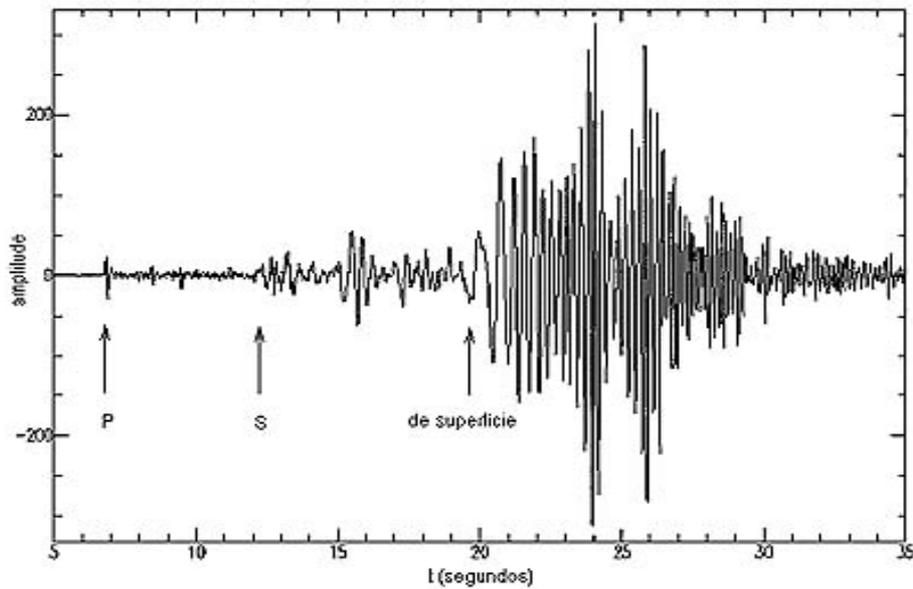


Figura 3-1: Sismograma. Regista os movimentos de vibração do solo [2].

Este sismograma serve para determinar a magnitude de um terremoto, sendo este determinado pela escala de Richter como foi descrito no capítulo anterior.

As ondas P propagam-se mais depressa que os outros tipos de ondas, logo estas são as primeiras a chegar, sendo as primeiras a ser registadas. Em seguida, chegam as ondas S, que habitualmente têm uma amplitude superior às ondas P. De seguida, chegam as perturbações associadas as ondas superficiais (ondas Rayleigh e ondas Love), ondas com um comprimento de onda muito superior e que se caracterizam por possuírem uma amplitude mais elevada do que as ondas volúmicas.

De entre as ondas longas, as ondas Love deslocam-se à superfície com quase a mesma velocidade que as ondas S e por isso chegam mais rapidamente que as ondas Rayleigh. As refacções trópicas das ondas também são registadas, uma vez, que as ondas reagem de forma distinta aos diferentes tipos de material, como mostra a Figura 3-1 [3].

As fases detectadas nos sismogramas dependem do tipo de sensor utilizado e da orientação deste relativamente à direcção de chegada das ondas sísmicas.

Os sismógrafos são projectados para reagir aos movimentos do solo numa dada direcção e dependendo do desenho, podem responder a movimentos verticais ou horizontais. A maioria dos sismógrafos assenta em variações da aplicação de pêndulos simples.

A sismometria considera dois tipos de sismógrafos: mecânicos e electromagnéticos.

### 3.1 Sismógrafos mecânicos

Estes sismógrafos são os mais simples e são constituídos por um elemento detector de movimentos (sismómetro) e um sistema de alavancas que amplifica o movimento. Os sismógrafos mecânicos podem ser de dois tipos: verticais ou horizontais.

#### 3.1.1 Movimento vertical

Um sismómetro de movimento vertical é um sensor sensível a movimentos verticais do terreno e pode ser visualizado como uma massa pesada suspensa a partir de uma mola que, por sua vez, estão suspensas sobre uma base que se move com o movimento da terra. O movimento relativo entre a massa pesada e a base dá uma medida do movimento vertical da terra. Este movimento é registado por um marcador ligado a um tambor que gira sobre a base (Figura 3-2).

Os sismógrafos operam com o princípio da inércia, em que um objecto fixo, como exemplo, a massa pesada que permanece sem se mover a menos que exista uma força aplicada sobre ela [4].

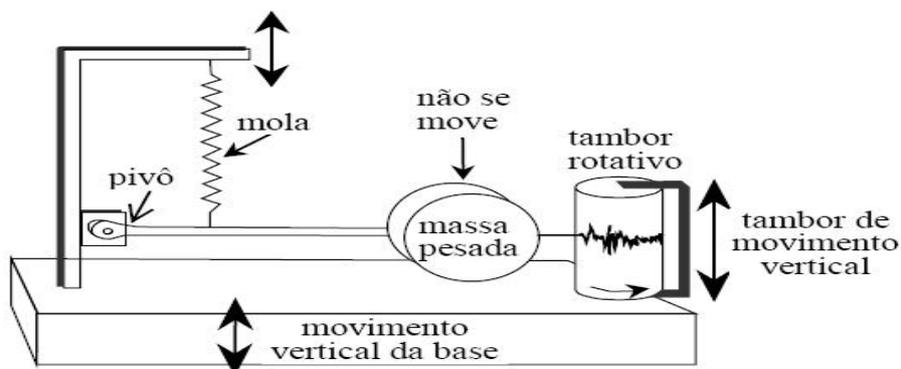


Figura 3-2: Princípio de funcionamento de um sismógrafo de componente vertical [5].

### 3.1.2 *Movimento horizontal*

O princípio de funcionamento de um sismógrafo horizontal é idêntico ao de um sismógrafo vertical. Uma massa inercial é colocada numa barra horizontal, mas a sua base está quase na vertical, de tal modo que a massa está confinada a mover-se apenas num plano horizontal. O comportamento deste sistema é semelhante ao de uma porta cujas dobradiças estão ligeiramente desalinhadas com a vertical, ou seja, está a “inclinarse para a frente”. A posição de equilíbrio para uma porta nestas condições, encontra-se onde o centro de massa estiver num ponto mais baixo e para qualquer movimento da porta, a força gravitacional tente fazê-la voltar à posição de equilíbrio. Este caso é o que se sucede com a massa inercial deste tipo de sismógrafo (Figura 3-3) [5].

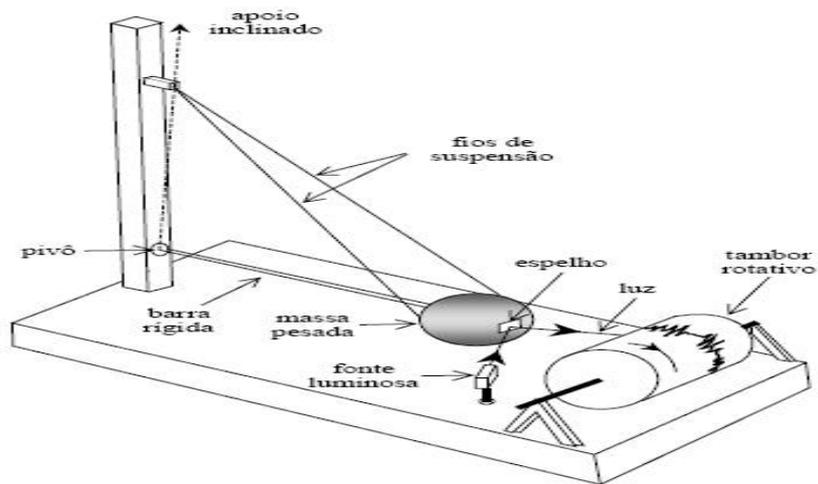


Figura 3-3: Diagrama esquemático de um sismógrafo de componente horizontal [5].

## 3.2 *Sismógrafos electromagnéticos*

Os sismógrafos modernos, em vez de serem mecânicos, são electromagnéticos pois, em vez de utilizarem um marcador e um tambor, respondem ao movimento relativo entre um íman, que está solidário com o solo, e uma bobine de fio condutor enrolada em torno de uma massa inercial, suspensa por uma pequena mola. Qualquer movimento da bobina no interior do campo magnético induz nesta uma tensão

proporcional à taxa de variação do fluxo magnético. Durante a passagem de uma onda sísmica, a variação do solo relativamente à bobina é transformada em sinais eléctricos que serão posteriormente amplificados e depois registados num computador (Figura 3-4) [5].

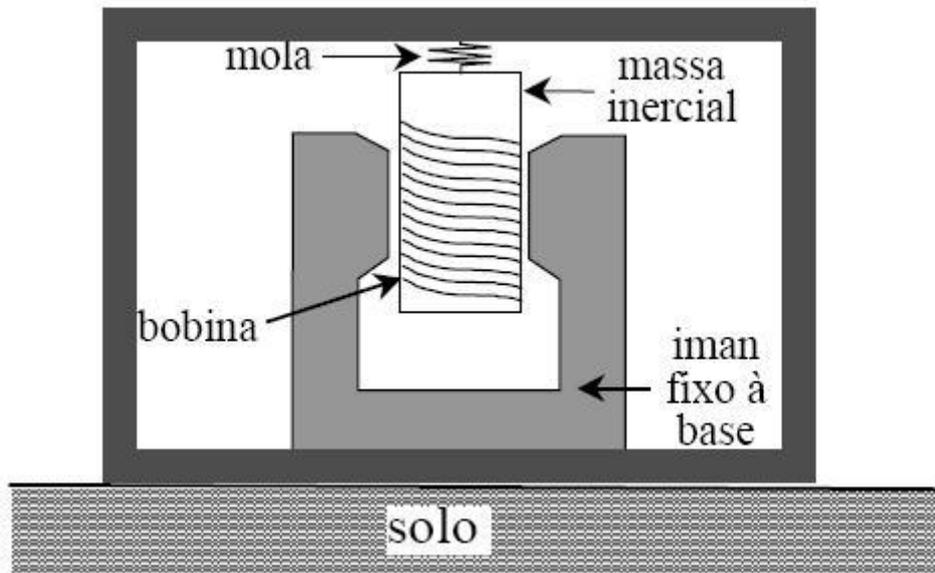


Figura 3-4: Princípio de funcionamento de um sismógrafo de componente vertical electromagnético [5].

### ***Curiosidade:***

No ano de 132, o chinês Chang Heng inventou o primeiro sismógrafo, o Sismocópio (Figura 3-5). Este aparelho consistia numa bola em bronze sustentada por oito dragões que a seguravam com a boca. Quando ocorria um tremor de terra, por menor que fosse, a boca do dragão abria e a bola caía na boca aberta de um dos oito sapos de metal que se encontrava por baixo do dragão. Este aparelho permitia deste modo determinar qual era a direcção do sismo [6].



Figura 3-5: Sismocópio, o primeiro sísmografo. Este aparelho consistia numa bola em bronze sustentada por oito dragões que a seguravam com a boca [6].

## ***Bibliografia***

[1] Ortiz, Josep Batlló; Los sísmógrafos del Observatorio de Cartuja; Departamento de matemática aplicada.

[2] Sismologia. 30 Outubro 2008. <[http://www1.ci.uc.pt/iguc/did\\_sismo.htm](http://www1.ci.uc.pt/iguc/did_sismo.htm)>

[3] Wikipédia, a enciclopédia livre. Sismograma. 16 Outubro 2008.

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Sismograma>>

[4] Iris, *Education and Outreach Series*. 17 Outubro 2008.

<[http://www.iris.edu/edu/onepagars/SP\\_1pager\\_7.pdf](http://www.iris.edu/edu/onepagars/SP_1pager_7.pdf)>

[5] J.M. Miranda, J. F Luís, P.T. Costa, F.M. Santos, *Fundamentos de geofísica*. 17 Outubro 2008.

<[http://www.iag.usp.br/~marcelo/agg232/moddata//Apostilas%20do%20monitor/Fund\\_Geofisica4.pdf](http://www.iag.usp.br/~marcelo/agg232/moddata//Apostilas%20do%20monitor/Fund_Geofisica4.pdf)>

[6] Wikipédia, a enciclopédia livre. Sísmografo. 16 Outubro 2008.

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Sísmografo>>

# 4

## *Materiais Piezoeléctricos*

Os transdutores de ondas mecânicas são dispositivos que transformam a energia das vibrações em energia eléctrica. Esta transformação pode ser classificada como electrostática, electromagnética ou piezoeléctrica. Na construção do sensor de sismos serão usados sensores piezoeléctricos. As principais razões desta escolha vão ser explicadas mais adiante.

Em 1880, Jacques e Pierre Curie descobriram uma característica incomum de certos minerais cristalinos, ou seja, quando estes eram submetidos a uma força mecânica, os cristais tornam-se electricamente polarizados. Este efeito é conhecido como piezoelectricidade. Actualmente, os materiais piezoeléctricos (cristais, cerâmicos e polímeros) são bem conhecidos e frequentemente utilizados em diversas aplicações [1].

A conversão dos impulsos eléctricos em vibrações mecânicas e a conversão das vibrações mecânicas em energia eléctrica é a base para os ensaios sobre as ondas mecânicas utilizando um elemento activo. Este consiste numa peça de material polarizado (ou seja, algumas partes da molécula estão carregados positivamente, enquanto outras partes da molécula são carregados negativamente), com eléctrodos ligados às suas duas faces opostas [2].

O elemento activo da maior parte dos transdutores utilizados hoje em dia é o tradicional piezoeléctrico cerâmico, que contém cristais de perovskite. Este consiste num pequeno ião metálico tetravalente, normalmente titânio ou zircónio, numa grade de maiores dimensões com iões metálicos bivalentes, geralmente chumbo ou bário e iões

$O_2$ - . Em condições que conferem uma simetria tetragonal ou romboedral sobre os cristais, cada cristal tem uma dinâmica dipolo [3].

A existência deste dipolo faz com que a estrutura cristalina se deforme na presença de um campo eléctrico e vice-versa, isto é, produz uma variação do campo eléctrico quando submetido a uma deformação mecânica.

O fenómeno do efeito piezoeléctrico descoberto pelos irmãos Curie é baseado na variação das dimensões físicas de certos materiais sujeitos a campos eléctricos, e vice-versa. Quando estes materiais sofrem uma força  $F$ , desenvolvem um potencial eléctrico ou uma diferença de tensão. Este fenómeno é chamado de efeito piezoeléctrico directo. A Figura 4-1 ilustra o efeito piezoeléctrico directo. Se não houver nenhuma força ou qualquer tipo de movimento, a tensão entre os eléctrodos do elemento piezoeléctrico é nula, mas se for aplicada uma pressão, as mudanças das dimensões do elemento piezoeléctrico traduzem-se em alterações da tensão eléctrica.

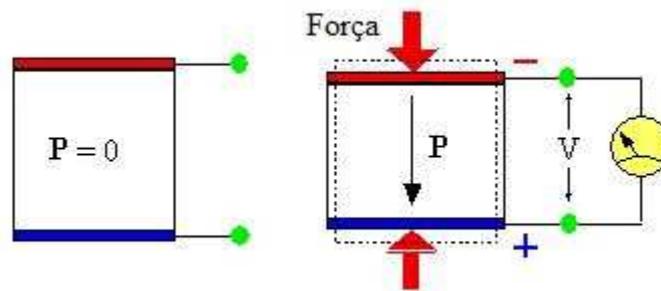


Figura 4-1: Efeito piezoeléctrico directo. Os piezoeléctricos quando sofrem uma força  $F$ , desenvolvem um potencial eléctrico ou uma diferença de tensão [4].

Quando uma variação de tensão eléctrica é aplicada a um material piezoeléctrico, ele apresenta uma deformação. Alterando a polaridade da tensão aplicada, o cristal fica mais curto ou mais largo. Este fenómeno é chamado de efeito piezoeléctrico inverso e está representado na Figura 4-2 [4], [5].

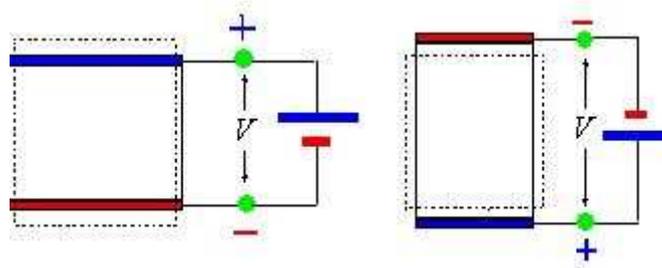


Figura 4-2: Efeito piezoelétrico inverso. Alterando a polaridade da tensão aplicada, o cristal fica mais curto ou mais largo [4].

De forma a se perceber melhor a teoria e o processo de fabrico do sensor, este vai ser explicado de seguida.

### 4.1 Teoria do sensor

Num sistema massa – mola – amortecedor (Figura 4-3) com massa  $m$ , constante de elasticidade  $k$  e coeficiente de amortecimento  $c$ , basicamente, existem duas forças agindo sobre a massa.

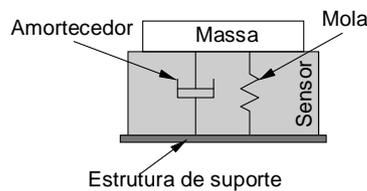


Figura 4-3: Estrutura mecânica do sensor.

A primeira força, proveniente da mola, é dada por:

$$F_s = -kx(t) \tag{4-1}$$

e a força do amortecimento é dada por:

$$F_d = -cv(t) = -c \frac{dx(t)}{dt} \tag{4-2}$$

onde  $v(t)$  é a velocidade da massa e  $x(t)$  o seu deslocamento em torno de uma posição de referência.

Tratando a massa como um corpo livre e aplicando a segunda lei de Newton, vem:

$$\sum F = ma(t) \Leftrightarrow -kx(t) - c \frac{dx(t)}{dt} = m \frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad (4-3)$$

onde  $a(t)$  é a aceleração da massa. As equações acima combinam-se para formar a equação do movimento, uma equação diferencial de segunda ordem para o deslocamento  $x(t)$ :

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + c \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = 0 \quad (4-4)$$

ou:

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \frac{c}{m} \frac{dx(t)}{dt} + \frac{k}{m} x(t) = 0. \quad (4-5)$$

Depois, podem definir-se os seguintes parâmetros:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4-6)$$

e:

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}. \quad (4-7)$$

O parâmetro  $\omega_0$  é a frequência natural do sistema e  $\zeta$  é a razão de amortecimento. A equação diferencial torna-se:

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + 2\zeta\omega_0 \frac{dx(t)}{dt} + \omega_0^2 x(t) = 0, \quad (4-8)$$

que pode ser resolvida assumindo a solução  $x(t)$  tal que:

$$x(t) = e^{rt} \quad (4-9)$$

onde o parâmetro  $\gamma$  é em geral um número complexo. Substituindo esta solução e voltando a equação diferencial obtém-se:

$$\gamma^2 + 2\zeta\omega_0\gamma + \omega_0^2 = 0 \quad (4-10)$$

Resolvendo em ordem a  $\gamma$  obtém-se:

$$\gamma = \omega_0 \left( -\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1} \right). \quad (4-11)$$

### ***4.1.1 Comportamento do sistema***

O comportamento do sistema depende dos valores relativos dos dois parâmetros fundamentais, a frequência natural  $\omega_0$  e a razão de amortecimento  $\zeta$ . Em particular, o comportamento qualitativo do sistema depende fundamentalmente do facto de a equação quadrática de  $\gamma$  ter uma solução real, duas soluções reais ou duas soluções complexas conjugadas. Quando  $\zeta = 1$ ,  $\gamma$  tem uma solução real e diz-se que o sistema é criticamente amortecido. Um sistema criticamente amortecido é aquele que após a aplicação de um estímulo externo converge mais rapidamente para a sua posição de repouso, sem oscilação. Quando  $\zeta > 1$ ,  $\gamma$  é real, o sistema diz-se sobre-amortecido. Este sistema não oscila mas a sua convergência é mais lenta que no caso anterior.

### ***4.1.2 Considerações no projecto do sensor sísmico***

De acordo com as considerações e equações apresentadas anteriormente, os sensores sísmicos devem ter uma frequência natural elevada e a razão de amortecimento deve ser elevada, mas próxima de 1. O único parâmetro que pode ser facilmente fixado pelo designer do sensor é a massa  $m$ , uma vez que a constante de elasticidade  $k$  e o coeficiente de amortecimento  $c$ , dependem das características dos materiais utilizados. No entanto, o coeficiente de amortecimento pode ser ajustado, alterando a impedância de entrada da electrónica de leitura do sensor. Se a impedância de entrada diminui, a

energia eléctrica fornecida pelo sensor irá aumentar. O coeficiente de amortecimento também aumenta (como acontece com todos os geradores de energia eléctrica).

Como foi referido anteriormente, os transdutores electrostáticos ou electromagnéticos também podiam ser usados. Foi escolhido o transdutor piezoeléctrico, devidas às desvantagens apresentadas pelas outras duas tecnologias: a sensibilidade teórica dos transdutores electrostáticos é de cerca de dez vezes menor que a dos piezoeléctricos e os transdutores electromagnéticos, devido à sua elevada massa, não alcançando a faixa de frequência operacional que se pretende com este trabalho.

## ***Bibliografia***

- [1] PC in control. Efeito piezoeléctrico. 25 Novembro 2007. <[http://www.pc-control.co.uk/piezoelectric\\_effect.htm](http://www.pc-control.co.uk/piezoelectric_effect.htm)>
- [2] NDT Resource Center. Transdutores piezoeléctricos. 25 Novembro 2007. <<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/piezotransducers.htm>>
- [3] Jaffe, E. and Cook, W.R. and Jaffe, H.; *Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications*; APC International Ltd; 2000.
- [4] Efeito piezoeléctrico. 25 Novembro 2007. <<http://www.arauto.uminho.pt/pessoas/lanceros/ProjectoPiezo/piezop.html>>
- [5] Castro, HF; *Sensores e actuadores baseados em polímeros piezoeléctricos*; 2007.

## *Construção do sensor*

Neste capítulo é apresentada a parte experimental deste trabalho, que inclui uma secção dedicada ao fabrico do sensor, outra dedicada à electrónica utilizada e uma dedicada ao software implementado.

### *5.1 Fabrico do sensor sísmico*

Para medir uma frequência de ondas sísmicas mais elevadas, a frequência natural da massa – mola – amortecedor do sistema deve ser elevada. Um material com constante elástica relativamente alta é usado como sensor: o polímero fluoreto de vinilideno na sua fase  $\beta$ , que é um material piezoeléctrico. Além disso, a massa (m) colocada em cima do sensor é mantida a mais pequena possível (é usada uma película de alumínio de 30 nm de espessura). As próximas subsecções descrevem os passos de fabricação do sensor.

#### *5.1.1 Preparação do polímero*

O filme usado como sensor piezoeléctrico é constituído por um material polimérico revestido em ambos os lados por um material condutor, que forma os eléctrodos. Os materiais poliméricos são baseados em fluoreto de vinilideno (PVDF) na sua fase electroactiva ( $\beta$ ). Este pode ser processado na forma de um filme por extrusão, injeção ou a partir de uma solução, geralmente na fase não electroactiva  $\alpha$ . A fim de

obter a fase  $\beta$ , os filmes na fase  $\alpha$  devem ser submetidos a um estiramento mecânico, a temperaturas inferiores a 100°C e com uma razão de estiramento (rácio entre os comprimentos final e inicial da amostra), de 4 a 7. Após os elementos electroactivos estarem na fase  $\beta$ , o material deve ser activado por poling. Isso é feito submetendo o filme a um campo eléctrico superior a 60 MV/m ao longo da direcção.

Estes filmes são utilizados exclusivamente na fase  $\beta$  e foram obtidos a partir da cristalização do PVDF com N, N-Dimetil formamida ou dimetil acetamida em temperaturas abaixo dos 70°C. As propriedades electromecânicas do filme foram melhoradas por um tratamento que consiste em pressionar, alongar e fazer o poling a altas temperaturas. A etapa final do processo de alongamento a uma temperatura de cerca de 80°C resulta em filmes orientados, o que aumenta ainda mais o desempenho do material. O filme final apresenta uma espessura de 20  $\mu\text{m}$  a 60  $\mu\text{m}$ .

### ***5.1.2 Deposição do eléctrodo***

Assim que o material é preparado, são depositados eléctrodos em ambos os lados. Podem ser usadas as técnicas de pulverização catódica de magnetrão ou de evaporação térmica. No presente trabalho, foi usada a técnica da evaporação térmica e o alumínio foi usado como eléctrodo.

A deposição térmica foi efectuada numa câmara de vácuo quando esta atinge  $10^{-6}$  mbar. O cadinho contém o material a ser evaporado no seu interior e é aquecido por meio de uma corrente eléctrica que varia entre os 100 A e os 200 A. No topo da câmara onde a deposição é executada, é colocado um sensor de massa. A fim de depositar o eléctrodo sobre o polímero  $\beta$ -PVDF, a energia eléctrica aplicada ao cadinho deve aumentar lentamente. Quando a temperatura de evaporação do alumínio é atingida, o sensor de massa vai indicar a variação de massa, proporcional à espessura do filme. Neste ponto, a energia eléctrica deve ser mantida constante. Quando o sensor de massa indica que a espessura do eléctrodo é igual a 30 nm, a fonte de alimentação é desligada e a deposição de eléctrodo está completa. O segundo eléctrodo é depositado virando o filme de  $\beta$ -PVDF com a parte de cima para baixo e repetindo o mesmo procedimento. A Figura 5-1 demonstra uma imagem do sensor obtido após a fabricação destas etapas.



Figura 5-1: Imagem do sensor obtido.

Nos capítulos anteriores foram realizados estudos teóricos acerca da propagação de ondas bem como a construção dos filmes piezoelétricos. Para complementar o estudo teórico, falta abordar a construção da electrónica de interface entre o sensor e o computador, bem como, a programação efectuada para receber e fazer o tratamento dos dados.

## ***5.2 Electrónica de interface***

Esta secção do capítulo será dedicada a construção da parte electrónica do sensor e de modo a compreender melhor a electrónica utilizada, esta será explicada pelas várias fases efectuadas. Depois será apresentada a versão final da construção.

### ***5.2.1 Filtro passa alto passivo***

Um dos objectivos da construção do sensor de terremotos é que este permita a leitura de frequências até 50kHz. De modo a permitir a passagem de altas frequências e atenuar a amplitude das frequências abaixo da frequência de corte, é usado um filtro passa alto passivo de primeira ordem constituído por um circuito CR.

Este filtro passa alto passivo é constituído por um condensador e uma resistência (Figura 5-2).

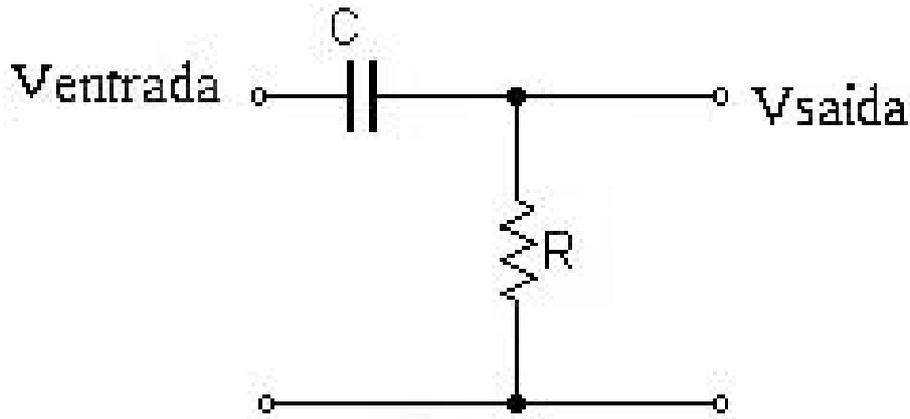


Figura 5-2: Circuito CR. É constituído por um condensador e uma resistência.

Como se pode ver pela Figura 5-2, em  $V_{entrada}$  aplica-se o sinal de entrada proveniente do filme piezoelétrico. O valor dos componentes é de 10nF e 10k $\Omega$ , dando uma frequência de corte de 1,6kHz.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5-1)$$

A saída  $V_{saída}$  será acoplada a um amplificador de instrumentação, pois as amplitudes de saída obtidas são muito baixas. O amplificador de instrumentação utilizado será explicado na fase seguinte.

### 5.2.2 Amplificador de instrumentação

Como a amplitude das tensões dos filmes piezoelétricos, movimentos ou forças são muito pequenas, estas requerem amplificação. De modo a aumentar pequenas amplitudes, é utilizado o amplificador de instrumentação INA114 da BURR-BROWN. Este amplificador apresenta um baixo custo, oferecendo uma elevada precisão [1].

O amplificador escolhido tem as seguintes características:

- Baixa tensão de offset: 50mV max
- Baixo *drift*: 0.25mV/°C max
- Corrente de polarização baixa: 2nA max
- CMRR elevado: 115dB min

- Protecção contra sobretensões de entrada:  $\pm 40V$
- Gama de tensões de alimentação:  $\pm 2.25$  to  $\pm 18V$
- Consumo de corrente baixo: 3mA max

Dá-se o nome de amplificador de instrumentação a um amplificador com as seguintes características:

- Tem uma impedância de entrada muito elevada.
- Possui uma impedância de entrada modo-diferencial entre as duas entradas e uma impedância de entrada modo-comum entre cada uma das entradas e a terra muito elevadas.
- Tem uma baixa impedância de saída, sendo a tensão de saída pouco sensível à carga a jusante.
- Rejeição do modo comum (CMRR) muito elevado, sendo a saída essencialmente proporcional à diferença entre as duas entradas.

Na Figura 5-3 é possível visualizar a estrutura interna do amplificador INA114. Este circuito é constituído por dois estágios: o primeiro formado pelos amplificadores operacionais  $A_1$  e  $A_2$ , e o segundo formado pelo amplificador operacional  $A_3$ .

Para fazer uma análise do circuito, os amplificadores operacionais são considerados como ideais. Devido aos curto-circuitos virtuais entre as entradas dos amplificadores operacionais  $A_1$  e  $A_2$ , a tensão aos terminais de  $R_G$  é  $v_2 - v_1$  e a sua corrente dada por:

$$i_G = \frac{v_2 - v_1}{R_G} \quad (5-2)$$

Devido à impedância dos amplificadores operacionais ser infinita, esta corrente circula pelas resistências denotadas de  $R_3$  de valor  $25K\Omega$ , o que dá:

$$v_{o2} - v_{o1} = (R_G + 2R_3)i_G = \left(1 + \frac{2R_3}{R_G}\right)(v_2 - v_1) \quad (5-3)$$

O segundo estágio, não é mais do que um circuito amplificador diferencial e para calcular o ganho deste amplificador, pode-se usar o princípio da sobreposição, uma vez que o circuito é linear [2]. O ganho deste amplificador diferencial é de  $R_2/R_1$ . Sendo assim, a saída do amplificador de instrumentação é dada por:

$$v_0 = \left( 1 + \frac{2R_3}{R_G} \right) \left( \frac{R_2}{R_1} \right) (v_2 - v_1) \quad (5-4)$$

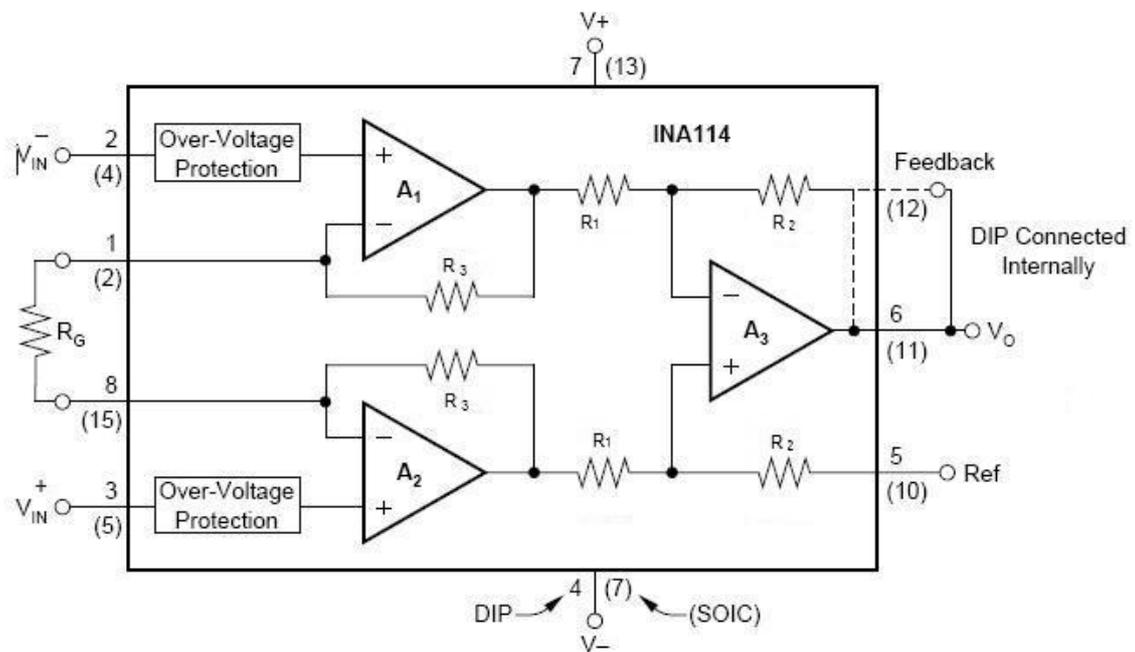


Figura 5-3: Amplificador de instrumentação INA114 da BURR-BROWN [1].

Os amplificadores de instrumentação têm um ganho finito, preciso e estável podendo ser ajustável através de potenciômetros, ou seja, variando a resistência ( $R_G$ ) é regulado o ganho.

$$G = 1 + \frac{2R_3}{R_G} \quad (5-5)$$

O amplificador de instrumentação utilizado na construção do sensor tem um ganho de 101, sendo assim, para  $R_3$  igual a 25k $\Omega$ , valor da resistência  $R_G$  é de 500 $\Omega$ .



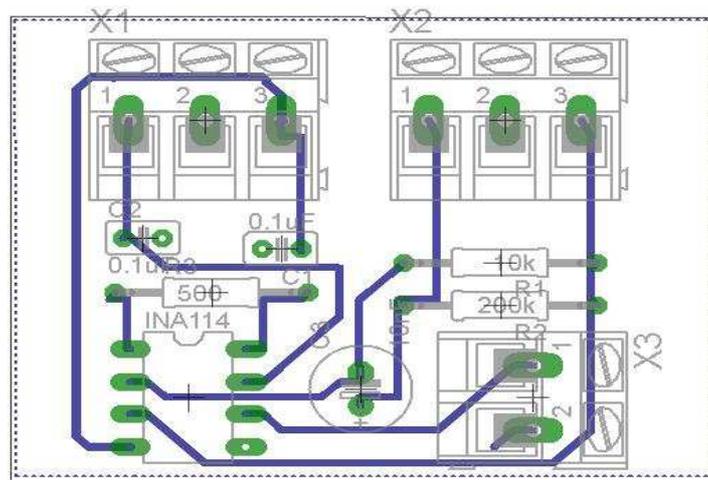


Figura 5-5: Placa do circuito.

Depois de apresentado o desenho efectuado no programa Eagle, a Figura 5-6 mostra uma fotografia da placa PCB com os componentes devidamente soldados.



Figura 5-6: Placa PCB com os componentes.

Na construção da placa foi criado um plano de massa em torno de todo o circuito de modo a diminuir os ruídos exteriores, impedindo que estes afectassem o circuito.

### 5.2.4 *Gaiola de Faraday*

Tanto o piezoeléctrico como o circuito de amplificação estão embutidos numa gaiola de Faraday, com o objectivo de eliminar grande parte dos ruídos provocados por radiações electromagnéticas. Este fenómeno foi descoberto por Michael Faraday. Este provou que uma superfície condutora eletrizada possui campo eléctrico nulo no seu interior, dado que as cargas se distribuem de forma homogénea na parte mais externa da superfície condutora (Figura 5-7) [3].

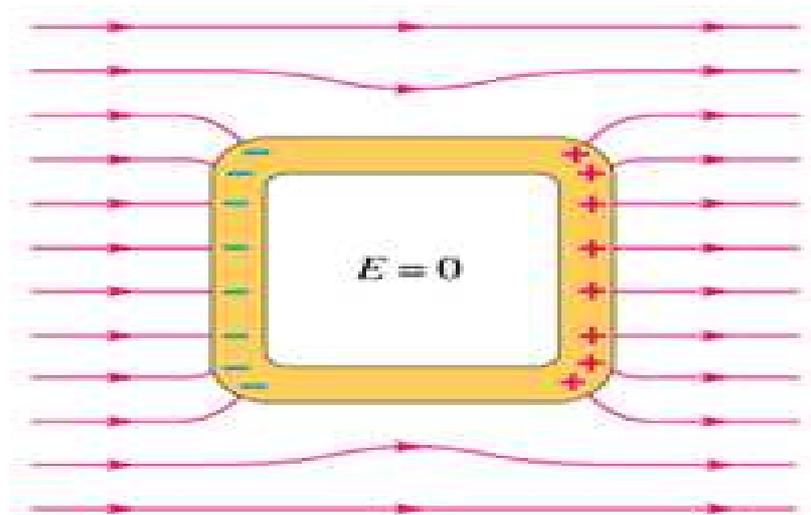


Figura 5-7: Gaiola de Faraday. Elimina grande parte do ruído existente no meio como perturbações produzidas por campos eléctricos e/ou electromagnéticos [3].

Ao utilizar uma blindagem eléctrica (gaiola de Faraday), esta permite eliminar grande parte do ruído existente no meio, como perturbações produzidas por campos eléctricos e/ou electromagnéticos. A gaiola de Faraday é de construção simples, uma vez que, apenas é constituída de uma superfície condutora (aço inoxidável) que envolve uma dada região do espaço. Na Figura 5-8 pode-se ver a gaiola de Faraday construída.

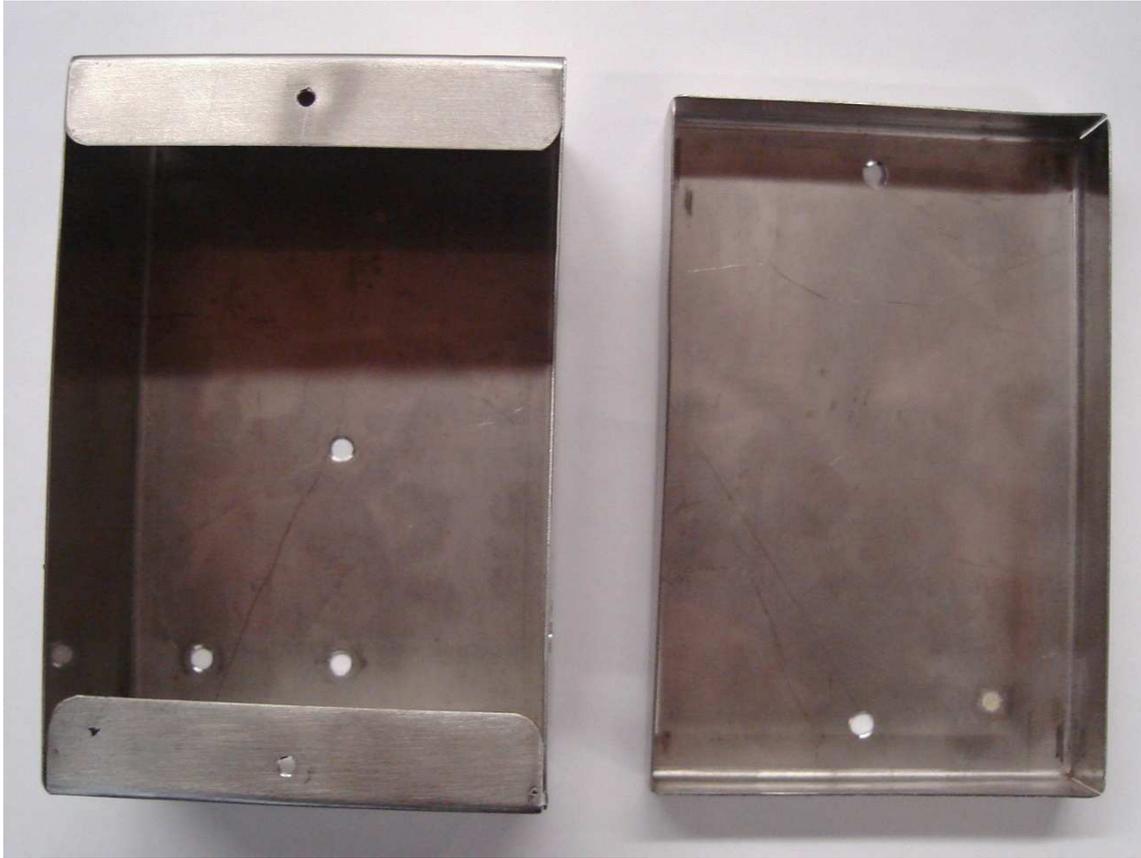


Figura 5-8: Gaiola de Faraday construída.

Para que a gaiola de Faraday funcione correctamente tem de ter a carcaça ligada à terra. Nos resultados obtidos será mostrado um exemplo em que se efectua a comparação do sinal recebido quando este usa ou não a gaiola de Faraday.

### ***5.2.5 Placa de aquisição***

Para receber os dados provenientes do sensor é utilizada uma placa de aquisição da National Instruments NI USB-9201 (Figura 5-9). Esta placa faz a interface entre o computador e o exterior. Recebe os sinais provenientes do sensor e disponibiliza a informação ao software. A placa de aquisição tem um protocolo de comunicação específico e o fabricante fornece o software necessário para utilizar a placa.



Figura 5-9: Placa de aquisição da National Instruments NI USB-9201.

A comunicação entre o computador e a placa de aquisição é efectuada via porta USB. A placa de aquisição tem uma taxa de transmissão de 500 kS/s (número de amostras por segundo) com uma precisão de 12 bits nos resultados, facilitando as medições.

A placa de aquisição escolhida tem as seguintes características:

Geral:

Tipo de barramento: USB

Sistema operativo suportado: Windows

Tipo de isolamento: *Bank Isolation*

Estrada analógica:

Número de canais: 8

Taxa de amostragem: 500 kS/s

Resolução: 12 bits

Valores de tensão máxima: -10...10 V

## 5.2.6 Construção final

Nesta parte do capítulo é mostrado o protótipo construído bem como todos os componentes utilizados na construção do sensor de terremotos.

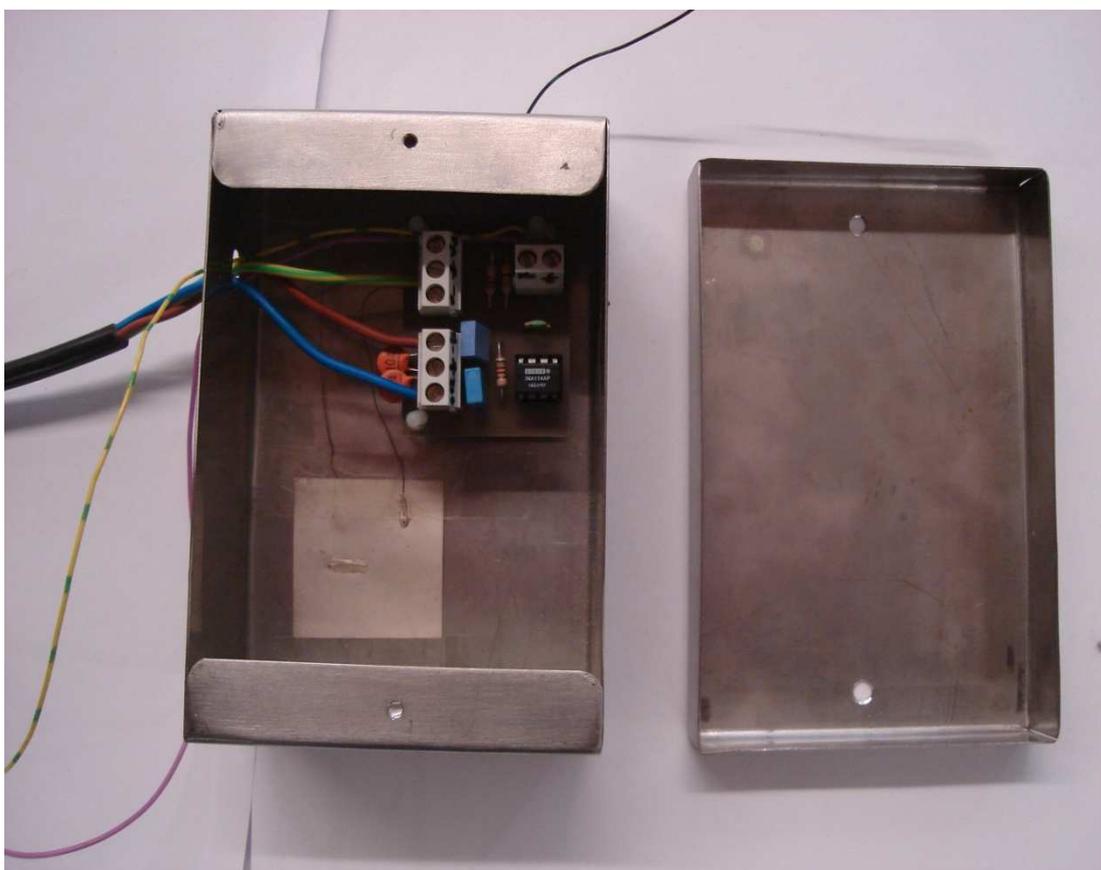


Figura 5-10: Protótipo construído.

Na Figura 5-10 é possível visualizar o protótipo construído com todas as ligações. A caixa metálica está ligada a massa, funcionando como uma gaiola de Faraday. Dentro dessa mesma caixa estão colocados o amplificador e o piezoelétrico.

Na Figura 5-11 é mostrada uma visão geral de todos os componentes utilizados para a construção do sensor de terremotos.

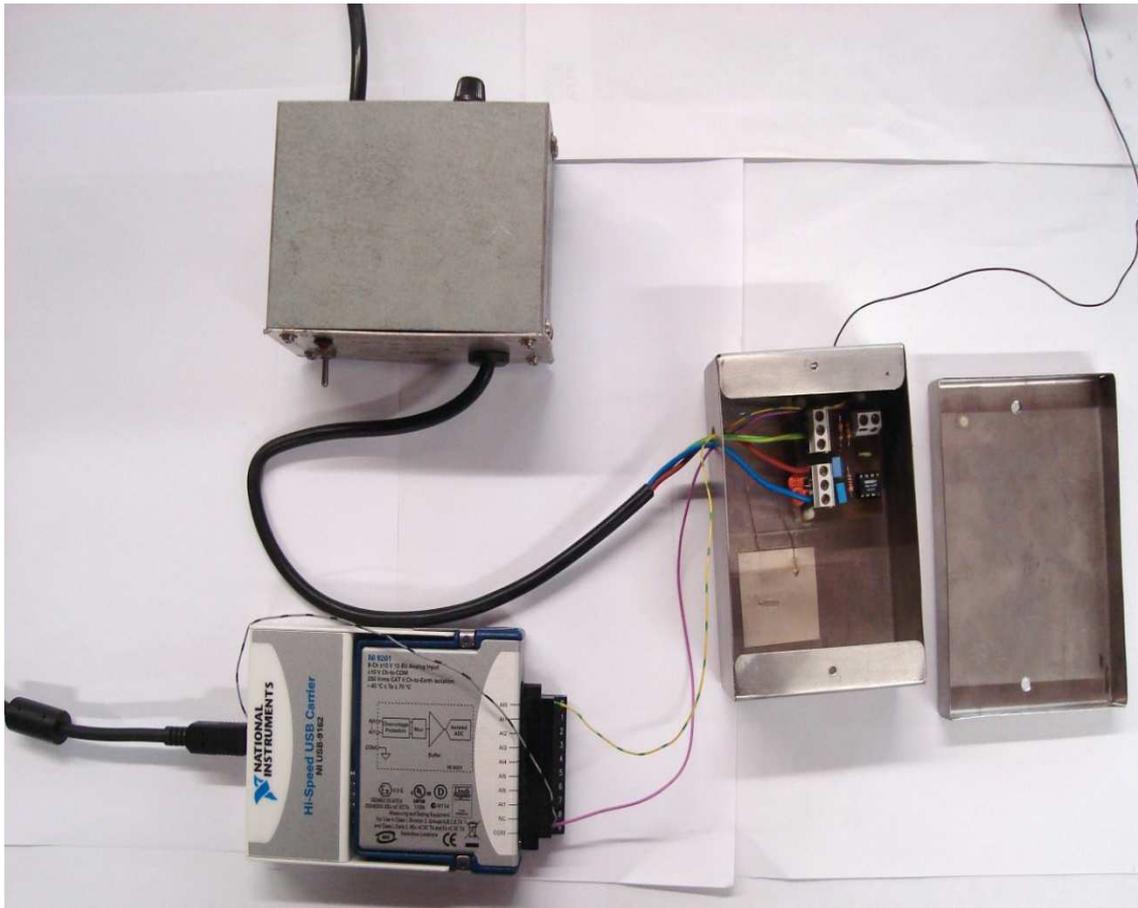


Figura 5-11: Visão geral de todo o trabalho.

Na Figura 5-11 pode visualizar-se o protótipo, a placa de aquisição e a fonte de alimentação de  $\pm 12V$  que fornece tensão ao amplificador de instrumentação.

### 5.3 *Software desenvolvido*

Para visualizar os dados e posteriormente efectuar a análise dos dados recolhidos foram criados alguns programas utilizando o LabVIEW.

O LabVIEW é uma linguagem de programação gráfica originária da National Instruments. A programação é feita de acordo com o modelo de fluxo de dados, o que oferece a esta linguagem vantagens para a aquisição de dados e para a sua manipulação. Os programas em LabVIEW são chamados de instrumentos virtuais. São compostos pelo painel frontal, que contém a interface, e pelo diagrama de blocos, que contém o código gráfico do programa [4].

Em primeiro lugar, será apresentado um programa que efectua a recepção dos dados provenientes da placa de aquisição e os guarda em ficheiro.

Em seguida, será apresentado um programa que efectua a leitura dos dados provenientes de um ficheiro guardado pelo programa anterior. A partir desta leitura é possível efectuar uma pequena análise dos dados.

Posteriormente, será apresentado um outro programa que converte os dados recebidos em som. Estes dados estão numa versão áudio permitindo ouvir o que acontece durante a recepção dos dados, como se o sensor funcionasse como um microfone.

### ***5.3.1 Programa de recepção de dados e armazenamento em ficheiro***

Nesta parte é apresentada a recepção dos dados que posteriormente serão guardados em ficheiro. Será apresentada a interface gráfica gráfico e depois a programação efectuada.

Na Figura 5-12 é possível visualizar a interface gráfico produzido. Esta interface indica qual o valor do pico positivo e negativo e o valor RMS. Também permite ao utilizador escolher a duração da fase de recolha de dados.

Para armazenar os dados em ficheiro, é utilizado um valor de comparação como se pode visualizar na Figura 5-12. Esta comparação será apresentada mais à frente quando for apresentado o programa efectuado.



Figura 5-12: Interface gráfica entre o utilizador e o computador.

Após a descrição da interface gráfico, será apresentada a programação em LabVIEW de modo a possibilitar ao utilizador receber e visualizar os dados num gráfico e posteriormente armazenar em ficheiro.

Para receber os dados é utilizada a ferramenta *DAQ Assistant* do LabVIEW que possibilita criar uma tarefa no *NI-DAQmx*. O *NI-DAQmx* permite a comunicação com a placa de aquisição, utilizando um protocolo de comunicação específico fornecido pelo fabricante.

Para criar esta tarefa é necessário configurar algumas propriedades. O *NI-DAQmx* recebe dados de um ou mais canais, possibilita o triggering do sinal, permite calibrar a placa de aquisição, dá a possibilidade de configurar o número de amostras que se pretende receber, bem como, a taxa de amostragem desses mesmos dados. Os dados que se podem receber na placa de aquisição podem ser, por exemplo, em tensão, em temperatura, etc.

Neste caso em particular, a tarefa criada no *NI-DAQmx* foi configurada para receber dados em tensão de apenas um canal. Os valores máximos e mínimos de tensão são de 10V e -10V respectivamente, recebe 500 mil amostras a uma taxa de amostragem de 500kHz. Esta configuração foi utilizada nos primeiros testes e pode ser visualizada na Figura 5-13.

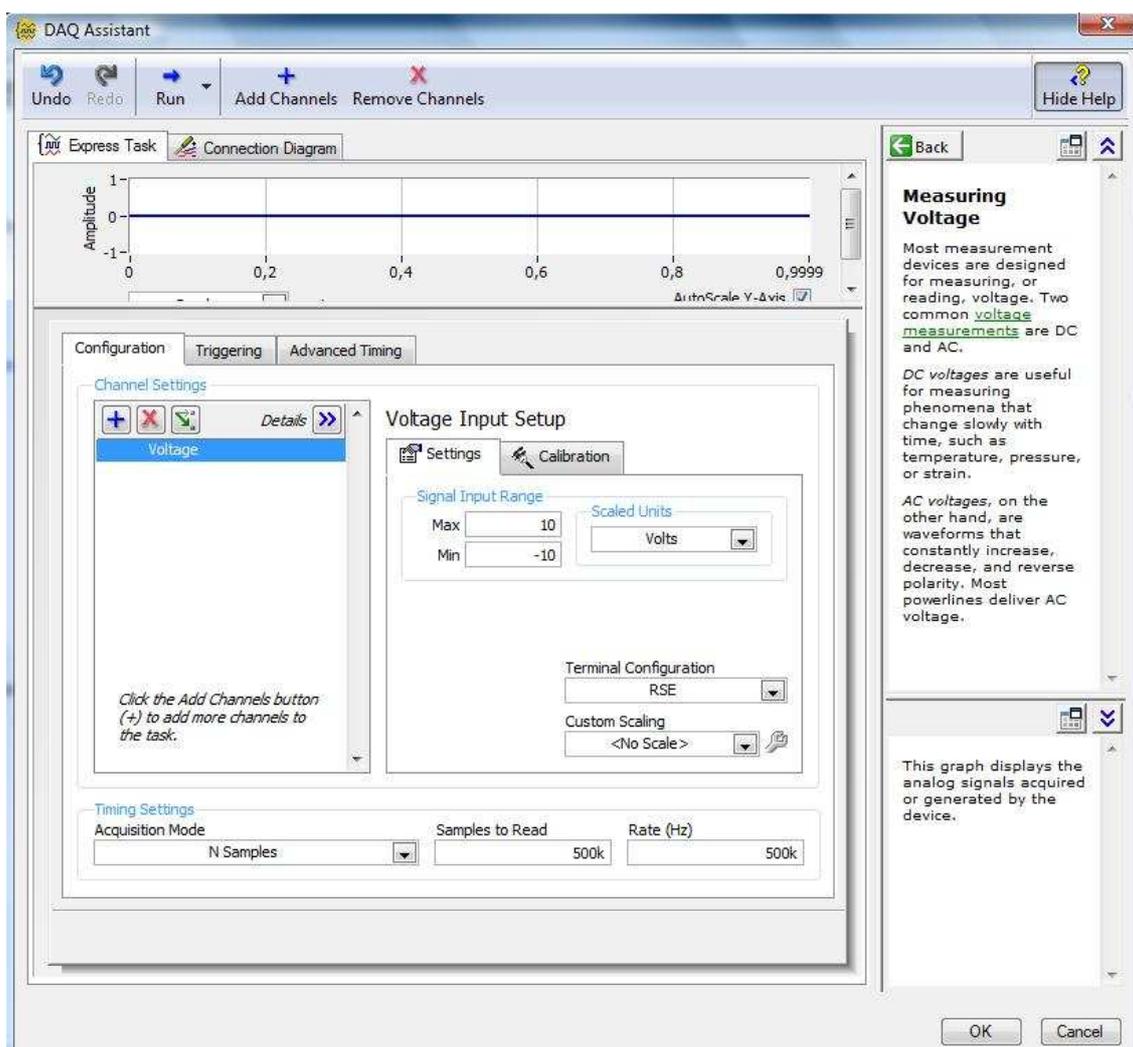


Figura 5-13: Configuração do DAQ Assistant.

Após a configuração do *DAQ Assistant*, os dados são enviados para um vector onde são guardados. Estes dados serão mostrados no gráfico “propagação das ondas” usando um *Waveform graph*, que está configurado numa escala automática. O software criado permite que seja possível visualizar todos os dados recebidos, isto é, à medida que chegam novos dados, o gráfico vai encolhendo, permitindo ao utilizador visualizar todos os dados recebidos.

É utilizado o bloco *Elapsed Time* pois possibilita ao utilizador saber qual o tempo decorrido desde o início do programa até ao final deste. O contador de tempo é inicializado quando a placa de aquisição começa a receber os dados, possibilitando ao utilizador controlar este tempo. Como foi visto na interface, o utilizador tem a possibilidade de introduzir um valor em segundos e após este tempo o programa termina

e o *DAQ Assistant* pára de receber os dados pois tem a opção de stop, terminando também o ciclo *while*.

Estes blocos de programação estão embutidos num ciclo *while* possibilitando ao *DAQ Assistant* efectuar várias iterações. O ciclo *while* termina quando a bloco *Elapsed Time* chega ao fim da contagem, isto é, quando o tempo introduzido pelo utilizador acabou (Figura 5-14).

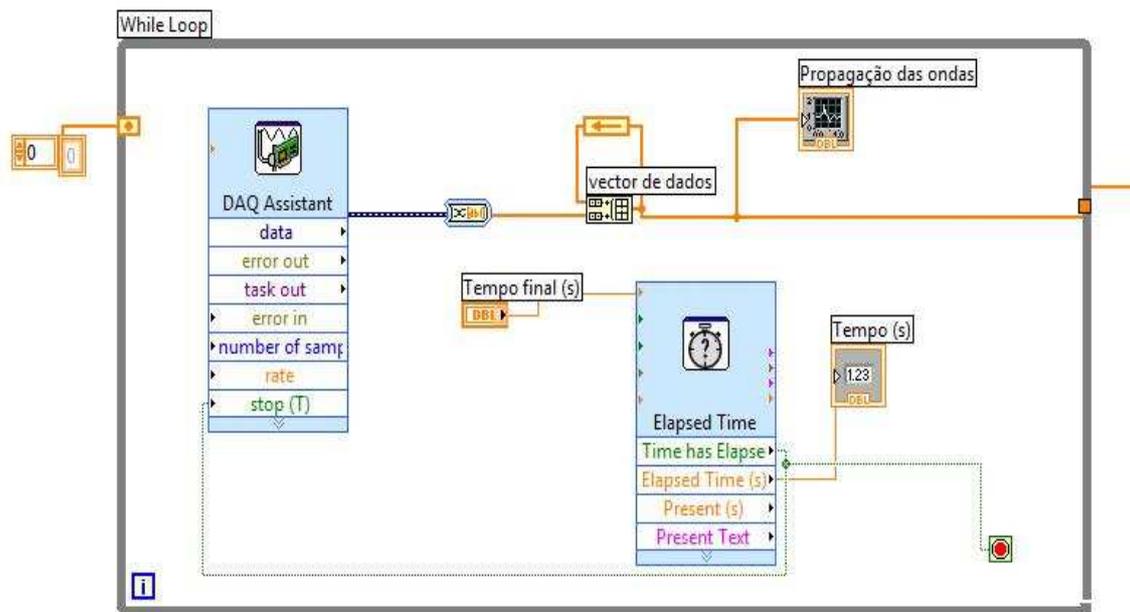


Figura 5-14: Programa de recepção do sinal pela placa de aquisição.

Ao terminar o ciclo *while*, passa-se para a parte seguinte da construção dos blocos. Esta parte corresponde à programação efectuada para guardar os valores em ficheiro (Figura 5-15).

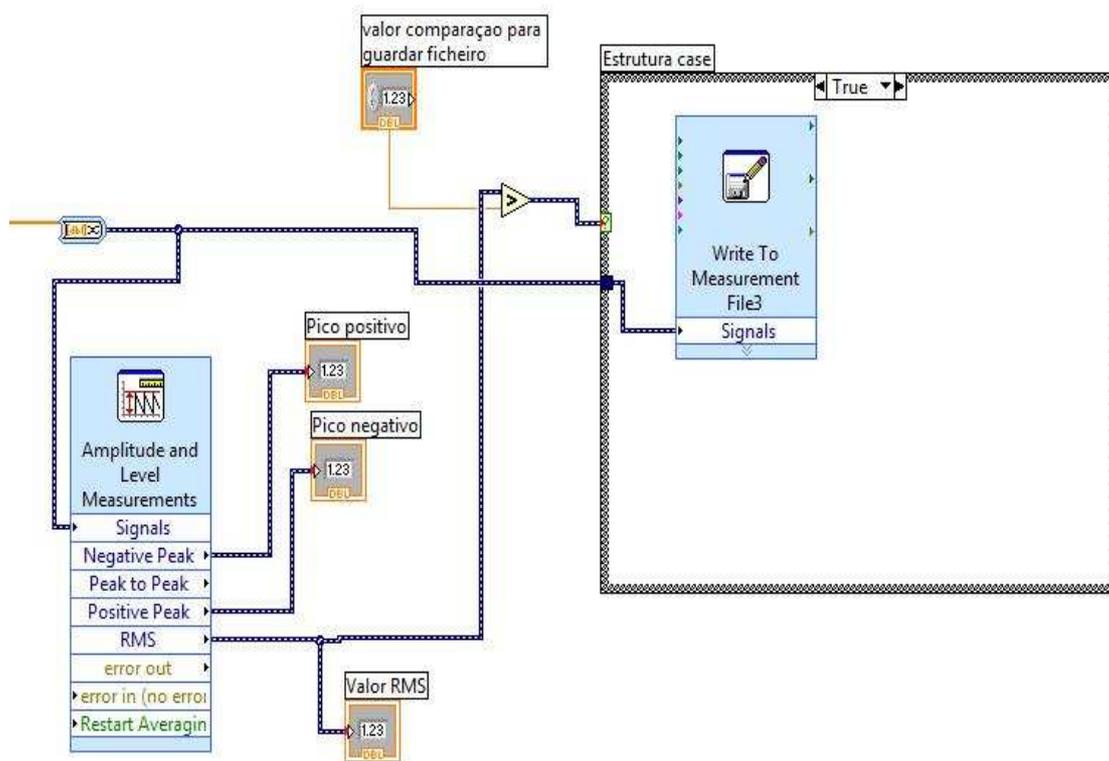


Figura 5-15: Parte do programa dedicada a gravar em ficheiro.

Como se pode visualizar na Figura 5-15, é utilizado o bloco *Amplitude and Level Measurements*. Este bloco permite determinar qual o valor RMS (valor médio quadrático), valor de pico positivo e negativo. É a partir do valor RMS obtido pelo bloco *Amplitude and Level Measurements*, que é realizada uma comparação, possibilitando gravar ou então reescrever os dados no ficheiro. Esta comparação é efectuada com o valor introduzido pelo utilizador na interface gráfico.

Para efectuar a comparação é utilizado um comparador de sinal onde à saída resulta numa acção verdadeira ou falsa. O resultado desta acção controla uma estrutura *case*. O comparador ao verificar que está a realizar uma comparação verdadeira, ou seja, quando o valor introduzido pelo utilizador é menor que o valor RMS do sinal obtido. Este comparador vai efectuar uma acção verdadeira na estrutura *case* permitindo gravar os dados em ficheiro. Para guardar os dados em ficheiro é utilizado o bloco *write to measurement file*. Este está previamente configurado de forma a mostrar a data e hora em que ocorreu o evento. Sempre que chegam novos dados, este escreve em ficheiros separados. Caso o comparador verifique que está a realizar uma comparação falsa, então produz uma acção falsa na estrutura *case*. Neste caso, existe outro bloco *write to*

*measurement file* que está configurado para guardar os dados num único ficheiro e irá reescrever os dados sempre que efectuar uma acção falsa.

### 5.3.2 Programa de leitura e análise dos dados

Nesta secção é apresentado o programa que realiza a leitura do ficheiro, de modo a efectuarem-se as primeiras análises dos dados recebidos. Na Figura 5-16 é mostrado a interface gráfica. O gráfico “sinal original” mostra os dados recebidos pela placa de aquisição e guardados em ficheiro pelo programa anterior. A partir deste gráfico é mostrado o pico máximo e mínimo, o valor RMS, e é calculada a transformada de Fourier do sinal. Esta transformada é mostrada no gráfico “cálculo da FFT”.

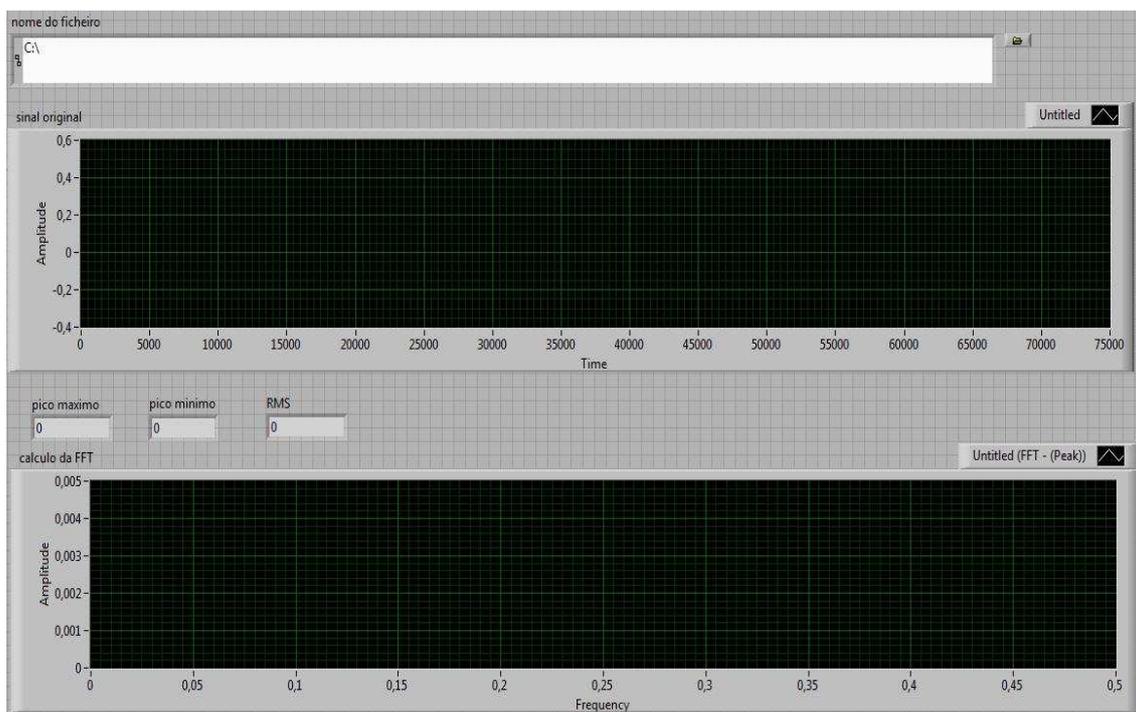


Figura 5-16: Interface gráfica de leitura de ficheiro.

Após a apresentação da interface será apresentado o programa que permite uma análise pormenorizada do sinal (Figura 5-17).

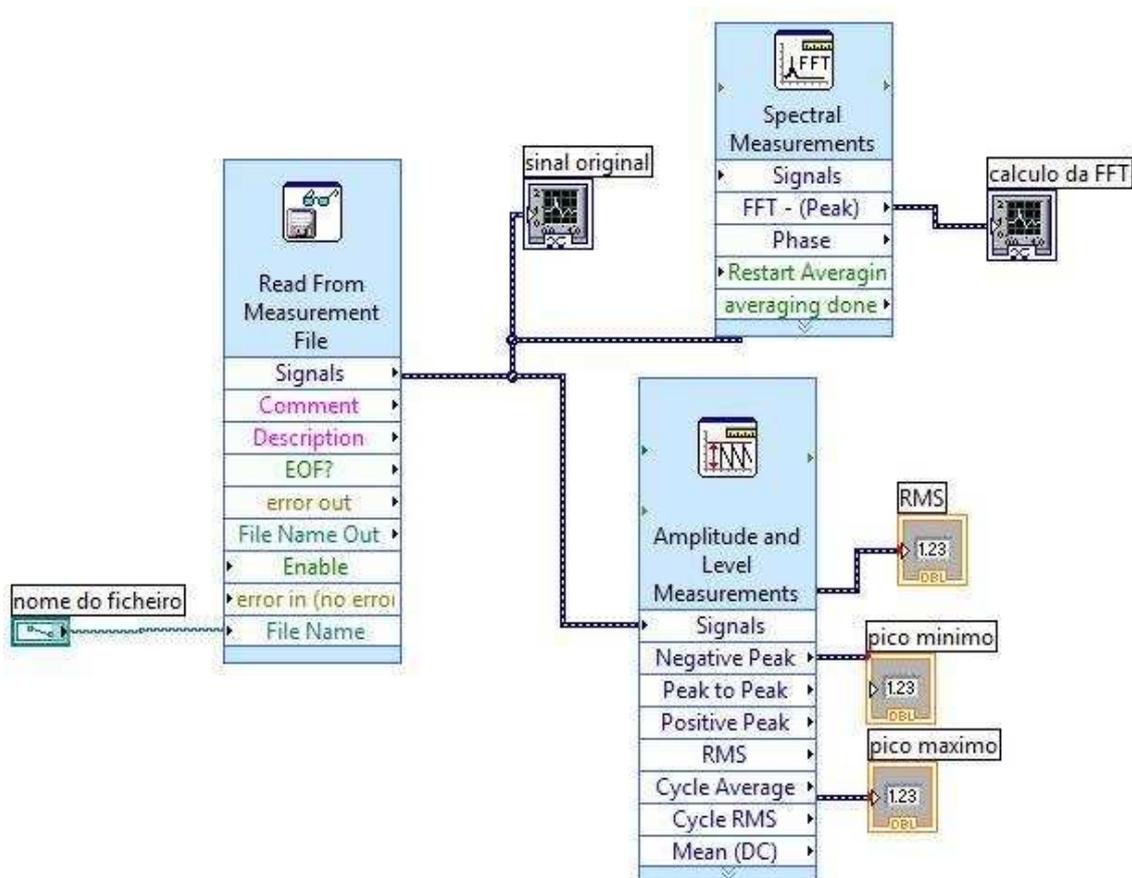


Figura 5-17: Programa de leitura de dados de um ficheiro.

Para ler os dados do ficheiro de uma localização do computador é utilizado o bloco *read to measurement file*. Este bloco lê os dados do ficheiro e em seguida apresenta no gráfico “sinal original” usando um *Waveform graph*. A partir da análise deste gráfico, podem efectuar-se zooms sucessivos a várias zonas específicas do gráfico, de modo a compreender melhor o que aconteceu durante algum terramoto ou evento sísmico. Também possibilita a visualização do valor RMS, o valor máximo e mínimo de pico utilizando para isso o bloco *Amplitude and Level Measurements*.

Para calcular a transformada de Fourier é utilizado o bloco *Spectral Measurements*. Este bloco calcula a transformada utilizando as várias janelas que existem, como por exemplo: Hanning, Hamming, Blackman, etc. (Figura 5-18).

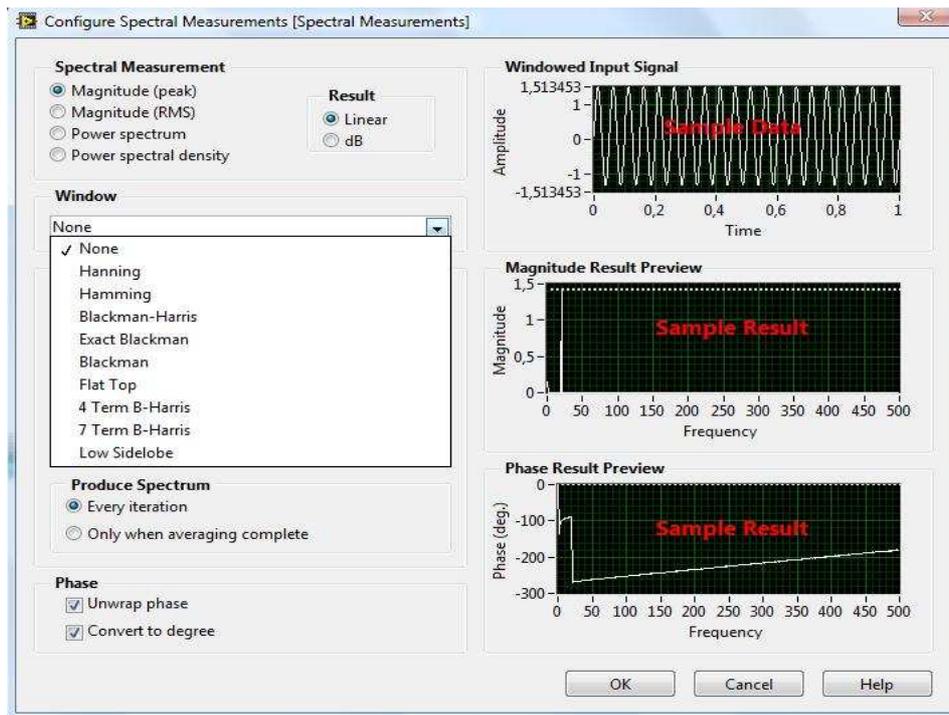


Figura 5-18: Configuração do Spectral Measurements.

### 5.3.3 Programa que converte os dados recebidos em som

Após uma visualização pormenorizada dos sinais obtidos, a próxima fase é converter os ficheiros em som. Estes ficheiros estarão numa forma audível tornando possível uma análise dos dados com maior rigor. Através desta análise pode descobrir-se o que aconteceu durante os terremotos.

A partir dos dados audíveis obtidos por este programa, pensa-se que seja possível determinar se as vibrações produzidas chegam a partir do solo seguidas das que vêm pelo ar ou vice-versa.

Na Figura 5-19 é apresentado a interface gráfico efectuado.

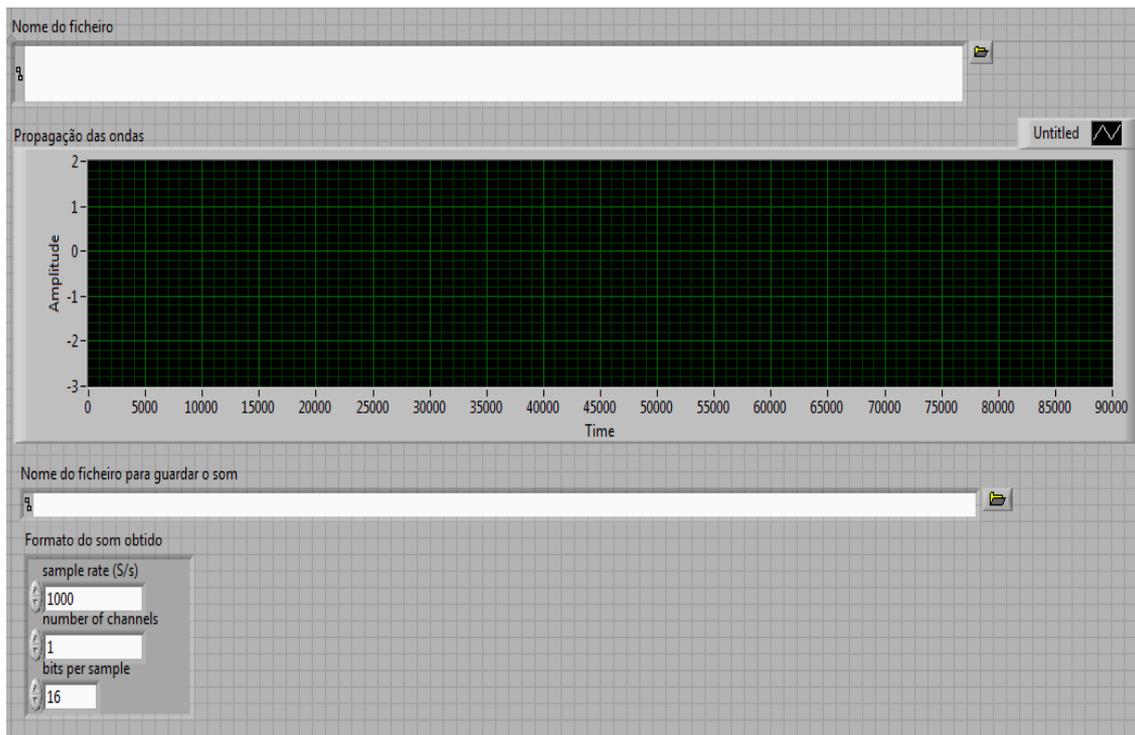


Figura 5-19: Interface gráfica do programa converter ficheiro em som.

A partir desta interface, o utilizador pode localizar o ficheiro que pretende converter numa directoria do computador. Após localizar esse ficheiro, os dados serão mostrados no gráfico “propagação de ondas”. É pedido ao utilizador para introduzir uma localização para o ficheiro áudio devendo este ter uma extensão .wav.

Este programa possibilita criar vários ficheiros áudio a partir do mesmo ficheiro de dados. Para isso, é necessário configurar o número de amostras por segundo que se pretendem converter para ficar no ficheiro áudio, ou seja, é possível alterar a frequência do sinal original para que esta fique na faixa audível, agrupando ou não várias amostras numa só.

Após a apresentação da interface gráfica, é apresentado o programa que permite converter os ficheiros em som. Esse programa pode ser visualizado na Figura 5-20.



Error.vi indica onde ocorrem os erros, caso tenha ocorrido algum. Se ocorrer um erro, este bloco retorna uma caixa de diálogo com a descrição do erro.

## ***Bibliografia***

[1] Datasheet do amplificador. 5 Janeiro 2008.

<<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ina114.pdf>>

[2] Rocha, José Gerardo Vieira; *Mosfets e Amplificadores Operacionais, Teoria e Aplicações*; Netmove Comunicação Global, Lda; Porto; 2005.

[3] Wikipédia, a enciclopédia livre. Gaiola de Faraday. 23 Outubro 2008.

<[http://pt.wikipedia.org/wiki/Gaiola\\_de\\_Faraday](http://pt.wikipedia.org/wiki/Gaiola_de_Faraday)>

[4] Wikipédia, a enciclopédia livre. LabVIEW. 21 Outubro 2008.

<<http://pt.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>>

# 6

## *Resultados*

Neste capítulo serão apresentados alguns testes em laboratório, bem como, os primeiros resultados obtidos pelo sensor num ambiente real, isto é, os resultados obtidos em explosões provocadas numa pedreira. Serão apresentados os gráficos dos resultados obtidos, assim como, as quantidades de pólvora e profundidade a que esta se encontrava na altura.

Nos primeiros testes realizados em laboratório reparou-se que existia bastante ruído no sinal detectado pelo sensor, podendo este ruído dever-se a radiações electromagnéticas existentes no meio em redor. Para retirar este ruído decidiu introduzir-se o sensor dentro de uma caixa metálica com a carcaça ligada à terra, funcionando como uma gaiola de Faraday, como foi explicado anteriormente. Ao colocar o sensor nesta caixa verificou-se que o ruído que estava na ordem dos 380mV de amplitude ficou reduzido a cerca de 40mV como se pode verificar na Figura 6-1.

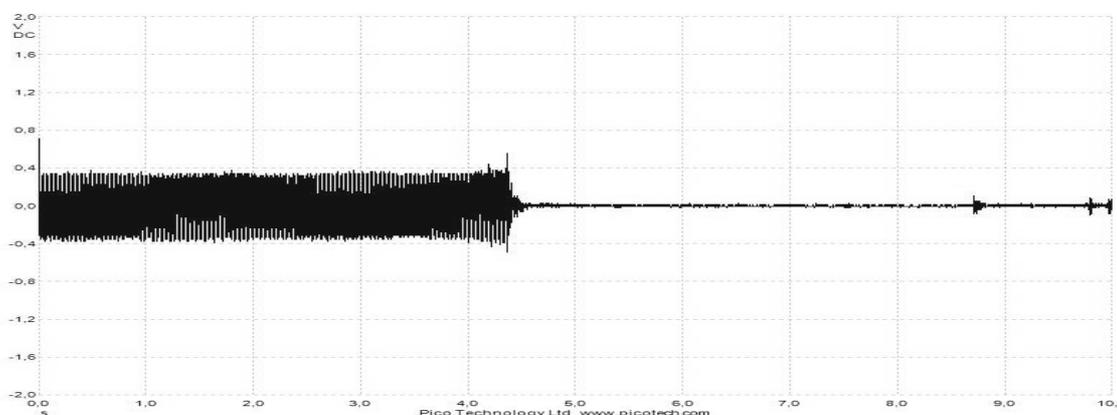


Figura 6-1: Testes em laboratório com e sem gaiola de Faraday.

Após ter-se removido grande parte deste ruído, o próximo passo seria colocar o sensor em cima de uma bancada e deixar cair um objecto, por exemplo uma caneta, em cima dessa mesma bancada, de diferentes alturas de modo a determinar a sensibilidade bem como as diferenças produzidas. Os dados obtidos podem ser visualizados na Figura 6-2.

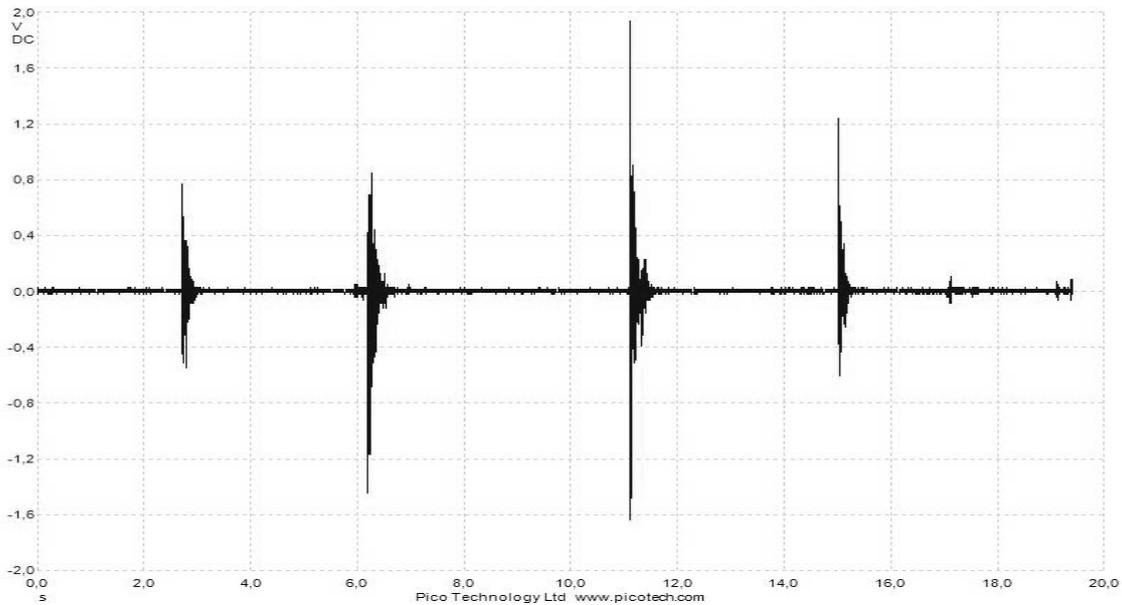


Figura 6-2: Teste de deixar cair objecto sobre uma bancada das alturas de 20cm, 40cm, 60cm e novamente 40cm.

Como se pode verificar pela Figura 6-2, à medida que se aumenta a altura com que se deixa cair a caneta, a amplitude do sinal também aumenta. Pode-se concluir que à medida que a velocidade da caneta aumenta, as vibrações produzidas aumentam e a amplitude do sinal registado também aumenta.

Uma outra experiência realizada consistiu na colocação do sensor no chão, enquanto uma pessoa batia com o pé. Essa pessoa estaria a uma distância de cerca de 3m e aproximava-se do sensor batendo com o pé no chão. Os dados obtidos podem ser visualizados na Figura 6-3

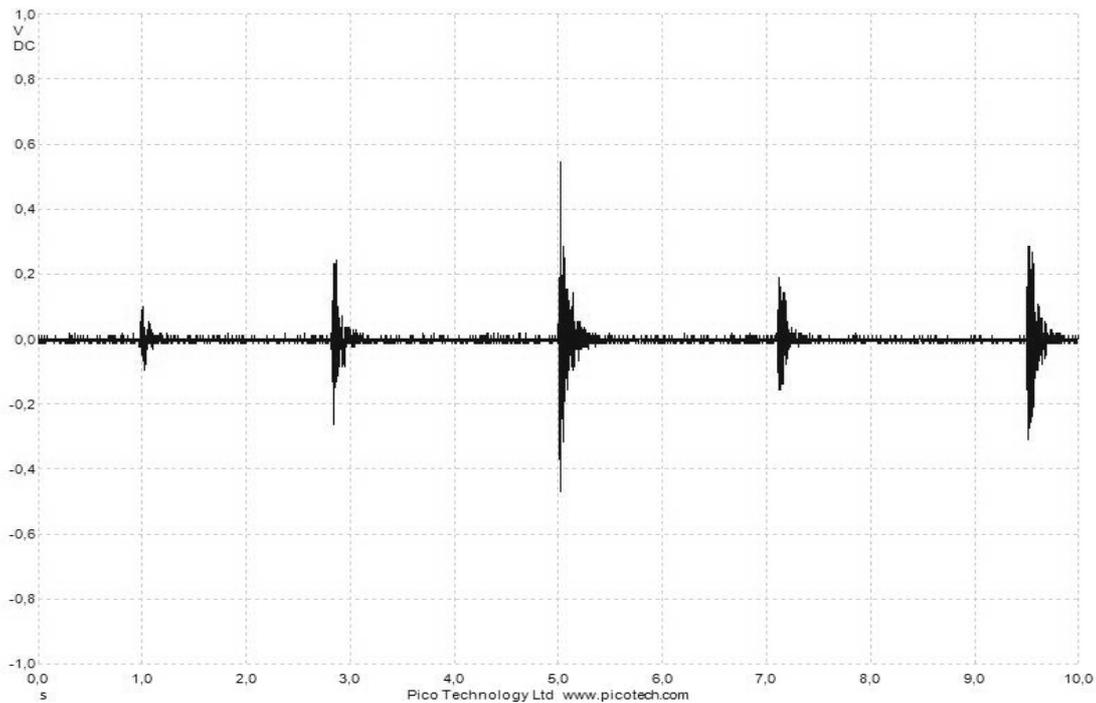


Figura 6-3: Teste realizado no sensor com uma pessoa a bater com o pé no chão a 3m, 2m, 1m 2,5m e 1.5m de distância do sensor.

Após apresentar alguns dos resultados obtidos em laboratório, o sensor foi levado para um ambiente real, isto é, uma pedreira onde foram provocadas várias explosões. Nesta situação, o sensor estava colocado a cerca de 50m do centro de cada uma das explosões.

Na primeira explosão ocorreram dois tiros simultâneos e nas restantes três explosões apenas ocorreram tiros simples.

Para receber os dados nesta primeira experiência em ambiente real, foi necessário configurar a placa de aquisição, para determinar qual a quantidade de dados a receber. Esta foi configurada para receber 1000 amostras por segundo.

Na primeira explosão, onde ocorreram dois tiros em simultâneo, cada um deles tinha uma quantidade de pólvora e uma profundidade do furo na pedra diferente. Sendo assim, o primeiro tiro estaria a uma profundidade de 3,10m com uma carga de 2kg de pólvora. O segundo tiro estaria a uma profundidade de 2,40m com uma carga de 1,125Kg de pólvora. O resultado obtido nesta explosão está na Figura 6-4 onde se obteve um nível máximo de amplitude de 1,85134 Volts e um valor mínimo de amplitude de -2,0774 Volts.

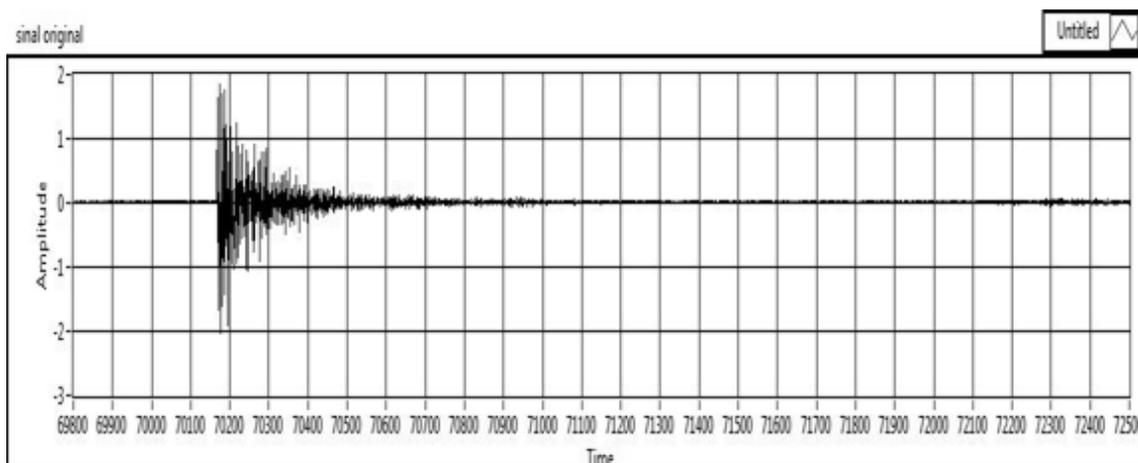


Figura 6-4: Primeira explosão de 2 tiros simultâneos.

Como se pode ver pela Figura 6-4 é bastante difícil identificar de entre os dois disparos simultâneos, qual deles chegou primeiro ou então verificar dois picos correspondentes a cada um dos disparos. Em vez disso, apenas se verifica um pico com uma réplica cerca de 40ms depois, podendo indicar que os dois tiros chegaram quase simultaneamente. Uma das principais razões que podem levar a que seja difícil identificar estes dois disparos, pode ser por causa do número de amostras e da taxa de amostragem escolhida não ser a ideal.

Na segunda explosão ocorreu um tiro simples, a uma profundidade de 1,6m, com uma carga de 0,44Kg de pólvora. O resultado obtido está na Figura 6-5, onde se obteve um nível máximo de amplitude de 0,216079 Volts e um valor mínimo de amplitude de -0,267301 Volts.

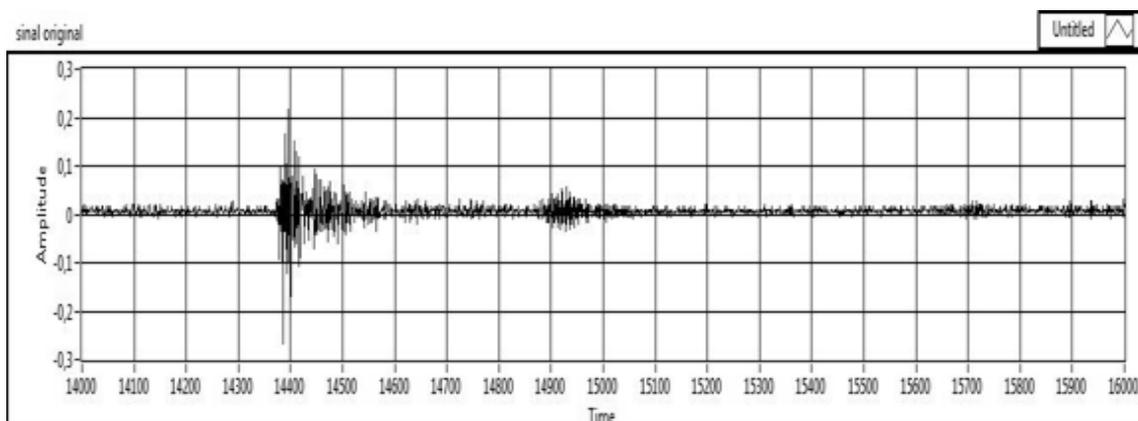


Figura 6-5: Segunda explosão.

A terceira explosão, de tiro simples, tinha uma carga de pólvora de 0,352Kg a uma profundidade de 1,6m. Os resultados obtidos estão no gráfico da Figura 6-6 onde se obteve um nível máximo de amplitude de 0,442342 Volts e um valor mínimo de amplitude de -0,344436 Volts

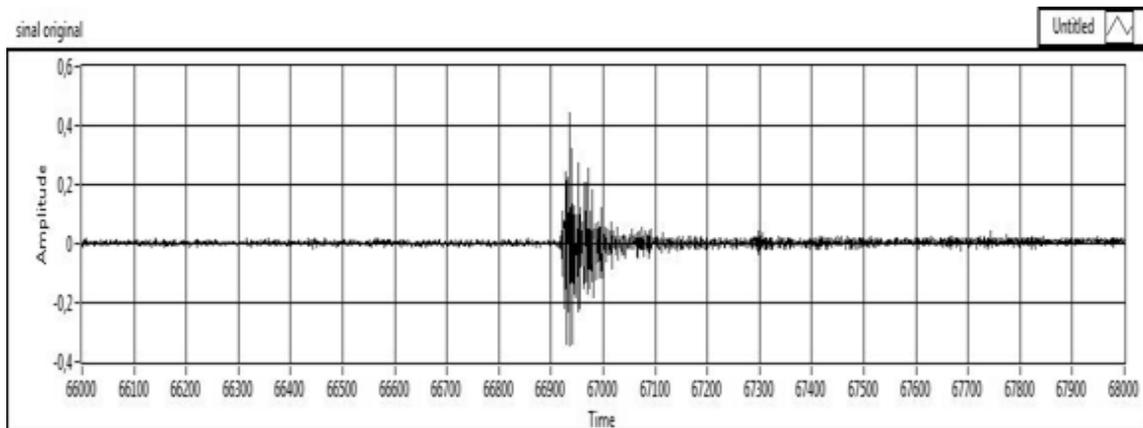


Figura 6-6: Terceira explosão.

Na quarta e última explosão também de tiro simples foi efectuada em um bloco de pedra solta a uma profundidade de 0,7m com uma carga de 88g de pólvora. Os resultados obtidos podem-se verificar na Figura 6-7 onde se obteve um nível máximo de amplitude de 0,370349Volts e um valor mínimo de amplitude de -0,313582 Volts.

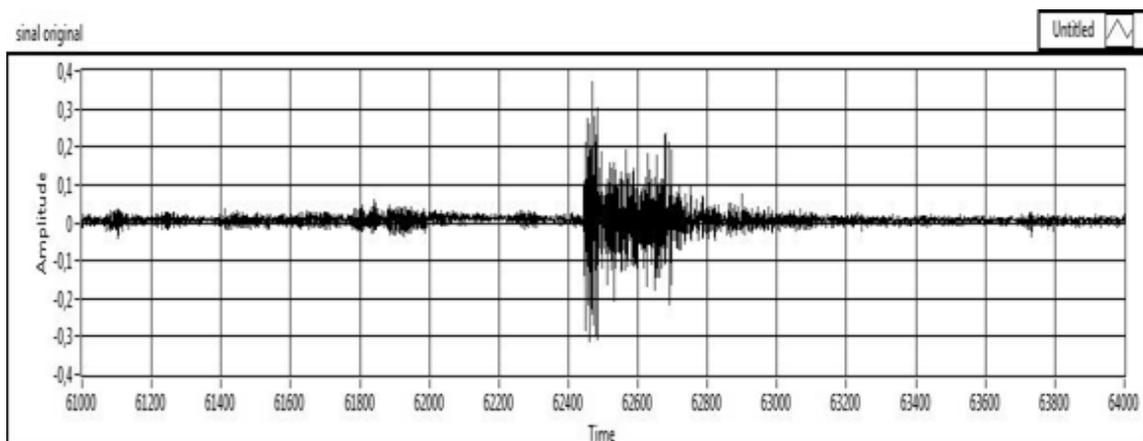


Figura 6-7: Bloco solto.

Após a observação dos sinais é possível verificar que existem diferenças nos sinais provocados pelas explosões em blocos fixos e no sinal provocado pelo bloco solto. O sinal provocado pelas explosões em bloco fixo é bastante idêntico em todos os gráficos apresentados. O sinal provocado pelo bloco solto apresenta no entanto, algumas diferenças. A amplitude do sinal obtido na explosão em bloco solto, não é elevada e tem uma duração de cerca de 350ms. Durante este tempo o valor da amplitude não varia de forma significativa, enquanto no sinal provocado pelas explosões em blocos fixos obtinha-se um valor elevado de amplitude e este decrescia exponencialmente durante cerca de 100ms.

Os ficheiros áudio obtidos a partir dos ficheiros obtidos nas pedreiras são bastantes satisfatórios, uma vez que, em cada rebentamento ouve-se um eco. Neste caso, ainda é complicado identificar se as vibrações produzidas chegam pelo solo seguidas das vibrações do ar correspondentes a este eco. Como ainda só houve uma experiência em ambiente real é complicado tirar muitas conclusões satisfatórias. Espera-se que com um maior número de experiências seja possível identificar os vários tipos de ondas.

### ***6.1 Problemas encontrados e indicações para a sua solução***

Um dos objectivos é calcular a transformada de Fourier dos sinais obtidos, mas como o número de amostras obtido nas explosões não foi significativo, ou seja, 1000 amostras por segundo, as transformadas de Fourier obtidas para cada um dos sinais não permitem identificar correctamente quais as maiores amplitudes obtidas de modo a determinar as frequências existentes nos sinais. Este foi um problema meramente técnico tendo sido ultrapassado através de uma reprogramação do software de controlo.

Deste modo, nas próximas experiências é necessário aumentar ao número de amostras bem como a taxa de amostragem para assim se poder identificar de melhor forma as amplitudes em frequência existentes.

Um outro problema detectado foi a impossibilidade de identificar se os sinais obtidos correspondem a vibrações do solo ou então a vibrações sonoras propagadas pelo ar. Como já foi identificado anteriormente o número de amostras e a taxa de amostragem utilizada não foi o ideal e sendo assim, os resultados obtidos não são satisfatórios. Este problema comprometeu os resultados, uma vez que, não é possível

identificar de forma correcta as duas amplitudes diferentes nos sinais, correspondentes a vibração do solo e a vibração do ar.

Uma forma encontrada para resolver este problema é utilizar um microfone. Ao utilizar o microfone, pensa-se que será a melhor forma de perceber se os dados realmente obtidos são simplesmente só sonoros ou se também são provocados pelas vibrações da terra.

Como a vibração das ondas no solo viaja a uma velocidade maior, esta seria a primeira a ser identificada e de seguida chegaria a vibração sonora. A velocidade do som no ar é de 340m/s a 20°C. O sensor estava colocado a cerca de 50m do local da explosão então o sinal sonoro chegaria ao sensor em cerca de 147ms. Como se pode verificar pelas figuras é bastante difícil identificar isso nos sinais visto que ainda não é possível distinguir estas amplitudes.

## ***6.2 Novo modelo de sensor***

Este novo modelo terá uma forma cilíndrica e será construído em aço inoxidável, de forma a funcionar como uma gaiola de Faraday.

Nas figuras seguintes serão mostradas algumas imagens do possível protótipo que poderá ser utilizado em novas experiências.



Figura 6-8: Visão geral do protótipo.

Como foi dito anteriormente, o protótipo terá a forma cilíndrica. Na Figura 6-8 pode ser visualizada a sua forma final.



Figura 6-9: Visão do topo superior e inferior do protótipo.

Na Figura 6-9, é possível visualizar o topo superior e inferior do protótipo. No topo superior, como se pode visualizar pela figura este tem dois lados opostos. Num dos lados será colocado o amplificador e no lado oposto será colocado o piezoelétrico.

Na Figura 6-10 será apresentada uma outra imagem onde é efectuado um corte no protótipo de modo a se poder visualizar melhor a sua construção.

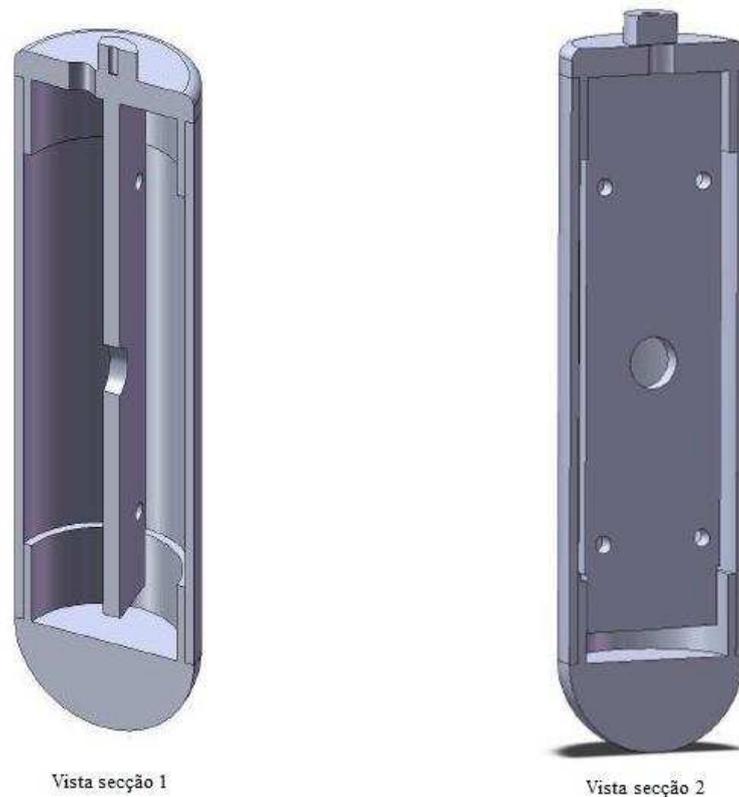


Figura 6-10: Vista de dois cortes efectuados ao protótipo.

### ***6.3 Perspectivas do sensor como sensor de sismos***

O sensor construído viabiliza o fabrico de sensores de vibração uma vez que detecta vibrações de diferentes amplitudes e frequências. Os resultados obtidos permitem utilizar este sensor em desmoronamentos, podendo ser colocados vários sensores em redor da área dos desmoronamentos, de modo a avaliar a evolução das vibrações produzidas e actuar igualmente como elemento para a previsão dos mesmos.

De modo a construir o sensor de terremotos mais sensível e preciso, que receba amplitudes e frequências elevadas em relação aos sismógrafos convencionais, será necessário realizar mais testes em ambiente simulado de sismos, onde se possa simular os vários tipos de ondas (ondas P, S e ondas superficiais), e comparar os resultados obtidos com os sismógrafos convencionais, de modo a avaliar o potencial efectivo deste novo sensor de terremotos.



## *Conclusão*

A etapa de fabrico do sensor sísmico baseado em polímeros piezoelétricos (fluoreto de vinilideno) foi apresentada. A leveza, a sensibilidade, a resposta do piezoelétrico a grandes e pequenas frequências e as características mecânicas deste material que permitem a detecção das amplitudes e frequências características dos eventos sísmicos.

O sensor construído é de baixo custo e fácil de fabricar. A electrónica e o software de leitura utilizando a placa de aquisição permitiu a utilização deste sensor em ambientes reais, onde as vibrações sísmicas podem ter lugar ou podem ser simuladas.

Os resultados obtidos em ambiente laboratorial foram satisfatórios com respeito a resposta do sensor na detecção de vibrações de diferentes amplitudes. Ao realizar o teste da caneta, de bater o pé no chão bem como outros testes não referenciados é possível verificar que o sensor detecta as vibrações produzidas.

Os resultados obtidos em ambiente real, explosões controladas em pedreiras, foram igualmente satisfatórios, encontrando-se não entanto, algumas limitações na interpretação dos dados. Neste sentido, o sensor foi capaz de detectar vibrações no solo a distâncias de 50 m do local da explosão. Por outro lado, o número de amostras e a taxa de amostragem escolhidos não foram os apropriados, devido a meramente a um problema técnico actualmente ultrapassado. Este problema leva a obter resultados pouco conclusivos em relação às frequências existentes, assim como, identificar se as ondas produzidas correspondiam a vibrações do solo ou vibrações do ar. Mesmo assim, ao utilizar o programa que converte os ficheiros obtidos na pedreira em som, é possível

identificar que existe um eco, podendo corresponder a vibrações do solo seguidas das vibrações do ar.

Em definitivo, os testes efectuados permitem concluir que o material e a electrónica de controlo desenvolvidos, assim como as geometrias utilizadas, viabilizam o fabrico de sensores de vibração a ser utilizados em aplicações de detecção de ondas sísmicas. No entanto, ainda deverão ser realizados testes em ambiente simulado de sismos e comparar os resultados com os de sismógrafos convencionais para avaliar o potencial efectivo do presente desenvolvimento.

## ***7.1 Trabalho futuro***

O trabalho futuro consiste em efectuar novas experiências em pedreiras ou em ambientes que simulem as vibrações produzidas pelos sismos. Será utilizado o novo modelo de sensor para realizar os testes nas pedreiras.

O novo modelo será colocado num buraco efectuado numa pedra. Este buraco é realizado pelos pedreiros e tem o diâmetro das brocas utilizadas para furar as pedras que estes utilizam para introduzir a pólvora. A localização deste buraco será desviado do local da explosão, de modo a se identificar melhor se as ondas produzidas são só ondas sonoras ou terrestres, ou então se é possível identificar as duas formas de onda, sonoras e terrestre.

Após a descrição da localização do modelo, numa próxima deslocação a uma pedreira, também será efectuado um programa que fará a aquisição do som e é utilizado um microfone para receber os dados. Os dados recebidos pelo microfone serão importantes para perceber os sinais recebidos pelo sensor de terremotos.

Depois de ter os dados todos recebidos, tanto do sensor de terremotos como os dados recebidos pelo microfone, pensa-se que esta será a melhor forma de perceber se os dados realmente obtidos são simplesmente só sonoros ou se também são provocados pelas vibrações da terra.