

Universidade do Minho

Carlos Alberto Oliveira Fernandes Palha

**Desempenho de materiais piezoelétricos
para aplicações rodoviárias**

**Performance of piezoelectric materials for
road applications**

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Jorge Carvalho Pais
e co-orientação do
Professor Doutor Senentxu Lanceros-Mendez

Outubro de 2012

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu orientador Professor Jorge Carvalho Pais e ao meu co-orientador Professor Senentxu Lanceros-Mendez por todo apoio prestado em todas as horas que necessitei e pelo encorajamento e ensinamentos dados no decorrer de todo o trabalho.

Queria agradecer à Câmara Municipal de Guimarães pela disponibilização de uma estrada para instalação dos sensores, fator de elevada importância que contribuiu em muito para o enriquecimento do trabalho

Ao Engenheiro Vitor Correia agradeço toda a transmissão de conhecimento que me deu e pela ajuda na execução dos sensores usados neste trabalho.

Agradeço ao meu amigo Professor Nuno Araújo pelo desafio dado no início da tese bem como na ajuda sempre pronta para me esclarece as dúvidas que ocasionalmente surgiam.

Ao meu colega de trabalho Hélder Torres agradeço a sua disponibilidade e prontidão que sempre demonstrou durante a realização da tese.

Aos meus amigos que muitas vezes me deram moral e força no decorrer do projeto.

Aos meus colegas de trabalho do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, agradeço o apoio dado no trabalho sempre nas horas mais complicadas.

A todos que diretamente ou indiretamente ajudaram.

Queria agradecer à minha esposa Graça todo o apoio e encorajamento dado, principalmente pela calma que me transmitiu nas horas mais difíceis deste trabalho.

Ao meu filho José

RESUMO

Com o desenvolvimento da tecnologia assiste-se hoje em dia ao aparecimento de máquinas inteligentes nas mais diversas áreas sendo exemplo no ramo automóvel as viaturas com sensores de forma a facilitar a vida ao condutor e ao mesmo tempo proporcionar conforto, segurança e poupança de energia.

Também os pavimentos rodoviários não são exceção e cada vez mais as novas estradas são equipadas com sensores que permitem a sua constante monitorização para fins de conservação e segurança, como por exemplo as balanças para pesagem dos veículos e sensores de nevoeiro que alertam os condutores para condições deficientes de visibilidade.

Deste modo, o objetivo essencial deste trabalho consiste na validação e aplicação de sensores que possam ser incorporados num pavimento de modo a conseguir aproveitar energia resultante da oscilação do pavimento aquando da passagem dos veículos assim como monitorizar variáveis relacionadas com a passagem de veículos pelas estradas. Para o efeito pretendeu-se: (1) estudar as características do pavimento, a nível de composição, construção e comportamento mecânico para que desta forma se consiga desenvolver um sensor que reúna características compatíveis com as do pavimento; (2) validar o comportamento em laboratório num equipamento que simula o comportamento mecânico de um pavimento quando solicitado por uma carga sinusoidal correspondente à sucessiva passagem dos veículos; (3) aplicar os sensores num pavimento rodoviário de uma estrada nacional com a necessária instrumentação auxiliar de modo a monitorizar a resposta do sensor durante a passagem do tráfego em condições reais.

Na campanha experimental usaram-se dois tipos de materiais piezoelétricos, nomeadamente materiais de origem cerâmica e materiais de origem polimérica. Verificou-se que os materiais de origem cerâmica apresentam resposta superior quando comparados com os sensores de origem polimérica. No entanto, ambos são sensíveis: (1) à variação de temperatura; (2) às deformações impostas nos ensaios laboratoriais; (3) às frequências impostas. Na aplicação dos materiais em condições reais de tráfego verificou-se que estes foram sensíveis à passagem dos veículos sobre o pavimento na zona de aplicação dos sensores. Para além disso verificou-se a sua sensibilidade ao tipo de eixo dos veículos.

ABSTRACT

With the development of technology smart materials and intelligent machines and sensors have been developed in several fields namely in the car industry with increasing quality on the monitoring to make the user conditions better and contribute for the improvement of comfort, safety and reduce energy costs.

The highways are not an exception and roads have been increasingly monitored by using sensors aiming at reaching better condition of safety and conservation. Innovative weighing systems of vehicles have been studied and novel fog sensors have been developed to enhance visibility conditions.

Therefore, the main aim of this work is the validation and application of piezoelectric sensors that can be incorporated in pavement roads and evaluate their capacity to take advantage of the pavement vibration for energy harvesting as well as road monitoring. Thus, this work intended to: (1) study the characteristics of a pavement at the level of composition, construction and mechanical behavior so that it is possible to install in it piezoelectric sensors; (2) evaluate the laboratory mechanical behavior in an equipment that simulates the mechanical behavior of a pavement when subjected to a sinusoidal action corresponding to the successive traffic; (3) apply the sensors in real conditions with auxiliary monitoring equipment to record the behavior of the sensor with the traffic.

For the laboratory tests, two types of sensors were used, namely ceramic and polymeric piezoelectric sensors.

During the experimental campaign it was possible to verify that ceramic sensors present a superior performance when compared to polymeric sensors. However, both types of sensors were sensitive to (1) temperature variations, (2) imposed deformations and (3) different levels of frequencies.

In real conditions of a pavement road and traffic, it was possible to assess its sensitiveness to the traffic over the pavement in the application zone of the sensors. Besides, the sensors were sensitive to the axle load of vehicles.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Introdução	3
1.2 Motivação	3
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Organização da tese.....	4
2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	7
2.1 Materiais Inteligentes	9
2.2 Materiais piezoelétricos	11
2.2.1 Características	11
2.2.2 Propriedades físicas	12
2.3 Aplicações	14
2.4 Aplicações rodoviárias.....	17
3. AVALIAÇÃO PRELIMINAR DOS MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS.....	21
3.1 Introdução	23
3.2 Caracterização física dos materiais piezoelétricos	23
3.3 Resistência à fadiga dos materiais piezoelétricos	25
3.3.1 Comportamento à fadiga dos materiais piezoelétricos PVDF aplicados na viga V1	28
3.3.2 Comportamento à fadiga do material piezoelétrico PZT S3 aplicado na viga V2	32
3.4 Efeito da temperatura	35
3.4.1 Ensaios na viga V1 equipada com material PVDF S1 e S2.....	35
3.4.2 Ensaios na viga V2 equipada com o material PZT S3	36
3.5 Ensaios para determinação da sensibilidade mínima dos materiais piezoelétricos	36
3.5.1 Ensaios à frequência de 1Hz e extensão variada	37

3.5.2	Ensaio a amplitude constante igual a 25 μ strain e frequência variada...	38
3.6	Simulação de aplicação de deslocamentos correspondentes a 1 eixo e 3 eixos	40
4.	APLICAÇÃO DOS MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS NUMA MISTURA BETUMINOSA	48
4.1	Introdução	50
4.2	Avaliação da resposta dos materiais piezoelétricos instalados nas vigas	55
4.2.1	Ensaio das vigas com os materiais piezoelétricos PVDF S4 e S6	57
4.2.2	Ensaio das vigas com material piezoelétrico PZT S5 e S7	59
5.	INSTALAÇÃO DOS MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS NUM TRECHO EXPERIMENTAL	66
5.1	Instalação dos materiais piezoelétricos	68
5.2	Avaliação da resposta dos materiais piezoelétricos instalados na estrada	73
5.3	Avaliação do comportamento dos materiais piezoelétricos como sensores a diferentes velocidades e profundidades	80
5.4	Avaliação do comportamento dos materiais piezoelétricos como geradores de energia eléctrica	81
6.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	86
6.1	Conclusões	88
6.2	Trabalhos futuros	89
	REFERÊNCIAS	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ilustração gráfica do (a) comportamento não piezoelétrico e (b) comportamento piezoelétrico.....	12
Figura 2.2 - Efeito piezoelétrico direto mediante ação mecânica	13
Figura 2.3 - Efeito piezoelétrico inverso	13
Figura 2.4 - Esquema de medição da velocidade de propagação de ultrassons	14
Figura 3.1 - Materiais piezoelétricos: polimérico (esquerda) e cerâmico (direita).....	23
Figura 3.2 – Esquema de ensaio por flexão em 4 pontos.....	25
Figura 3.3 – Equipamento servo-hidráulico para realização de ensaios de fadiga	26
Figura 3.4 – Viga V1 equipada com os materiais S1 e S2 fabricados à base de material polimérico.....	27
Figura 3.5 – Viga V2 equipada com material piezoelétrico S3 fabricado com material cerâmico	27
Figura 3.6 – Sinusoidal tipo com amplitude de 100 μ strain utilizada nos ensaios de fadiga.....	28
Figura 3.7 – Ensaio de fadiga na viga V1 com material PVDF a 30 Hz e 100 μ strain.....	29
Figura 3.8 – Resposta dos materiais PVDF S1 e S2 durante o ensaio de fadiga	30
Figura 3.9 - Resposta filtrada dos materiais PVDF S1 e S2 durante o ensaio de fadiga	30
Figura 3.10 – Comportamento dos materiais PVDF S1 e S2 no ensaio de fadiga a 50 μ strain..	31
Figura 3.11 – Sinusoidal apresentada pelos dois materiais PVDF sem aplicação de filtro	32
Figura 3.12 – Sinusoidal apresentada pelos dois materiais PVDF com aplicação de filtro	32
Figura 3.13 – Comportamento do material PZT S3 ao ensaio de fadiga à extensão de 100 μ strain.....	33
Figura 3.14 – Resposta do material PZT S3 com e sem filtro.....	33
Figura 3.15 – Comportamento à fadiga do material PZT S3 a uma extensão de 50 μ strain	34
Figura 3.16 – Resposta do material PZT S3 com filtro e sem filtro no ensaio a 50 μ strain.....	34
Figura 3.17 – Variação do sinal entre picos do material PVDF S1 e S2 com a variação da temperatura.....	35
Figura 3.18 – Variação do sinal entre picos do material PZT S3 com a variação da temperatura	36
Figura 3.19 – Resposta dos materiais PVDF S1 e S2 com a variação da amplitude.....	37

Figura 3.20 – Resposta do material PZT S3 quando sujeito a carregamentos de diferentes amplitudes.....	38
Figura 3.21 – Resposta dos materiais PVDF S1 e S2 a uma amplitude de 25 μ strain e frequência variada	39
Figura 3.22 - Resposta do material PZT S3 a uma amplitude de 25 μ strain e frequência variada	39
Figura 3.23 – Representação esquemática da deformação do pavimento quando sujeito a uma carga (Gillespie et al. 1992)	40
Figura 3.24 – Deformação do pavimento quando solicitado por um veículo com 3 eixos (Gillespie et al. 1992)	41
Figura 3.25 – Modelação da curva de deformação correspondente a um eixo.....	41
Figura 3.26 - Modelação da curva de deformação correspondente a 3 eixos	42
Figura 3.27 - Resposta filtrada dos materiais PVDF S1 e S2 à solicitação de 1 eixo a 50 μ strain	42
Figura 3.28 - Resposta filtrada dos materiais PVDF S1 e S2 à solicitação de 1 eixo a 100 μ strain	43
Figura 3.29 - Resposta filtrada dos materiais PVDF S1 e S2 à solicitação de 3 eixos a 50 μ strain	44
Figura 3.30 - Resposta filtrada dos materiais PVDF S1 e S2 à solicitação de 3 eixos a 100 μ strain	44
Figura 3.31 – Resposta original e filtrada do material PZT S3 à extensão de 50 μ strain e 1 eixo	45
Figura 3.32 - Resposta original e filtrada do material PZT S3 à extensão de 100 μ strain e 1 eixo	45
Figura 3.33 - Resposta original e filtrada do material PZT S3 à extensão de 50 μ strain e 3 eixos	45
Figura 3.34 - Resposta original e filtrada do material PZT S3 à extensão de 100 μ strain e 3 eixos	46
Figura 4.1 – Aquecimento em estufa dos agregados para a mistura	50
Figura 4.2 – Temperatura da mistura antes da compactação	51
Figura 4.3 – Adição do betume aos agregados na misturadora.....	51

Figura 4.4 – Temperatura da mistura antes da compactação	52
Figura 4.5 – Molde para compactação de lajes	52
Figura 4.6 – Materiais piezoelétricos a instalar na mistura	53
Figura 4.7 – Disposição do material piezoelétrico na mistura.....	53
Figura 4.8 – Laje compactada no molde	54
Figura 4.9 – Provetes prismáticos (vigas) com materiais piezoelétricos incorporados	55
Figura 4.10 – Dispositivo de flexão em 4 pontos	56
Figura 4.11 – Resposta do material PVDF S4 à extensão de 100 μ strain e 30 Hz.....	57
Figura 4.12 - Resposta do material PVDF S4 à extensão de 700 μ strain e 10Hz	58
Figura 4.13 – Resposta do material PVDF S6 à extensão de 100 μ strain e 30Hz	58
Figura 4.14 – Resposta do material PVDF S6 à extensão de 700 μ strain e 10Hz	59
Figura 4.15 – Resposta do material PZT S5 à extensão de 100 μ strain e 30 Hz	60
Figura 4.16 – Resposta do material PZT S5 após estabilização do sinal.....	60
Figura 4.17 – Resposta do material PZT S5 à extensão de 700 μ strain e 10 Hz	61
Figura 4.18 – Resposta do material PZT S5 após estabilização do sinal a 700 μ strain	61
Figura 4.19 – Resposta do material PZT S7 à extensão de 100 μ strain e 30Hz	62
Figura 4.20 – Resposta do material PZT S7 à extensão de 700 μ strain e 10Hz	62
Figura 4.21 – Aspeto dos materiais poliméricos (PVDF) depois de retirados das vigas.....	63
Figura 4.22 – Aspeto danificado dos materiais cerâmicos (PZT) (cabo soltou-se do material) ...	63
Figura 5.1 – Aspeto geral do local escolhido para instalação dos materiais piezoelétricos (EN206)	68
Figura 5.2 – Materiais piezoelétricos instalados no pavimento da estrada às várias profundidades	69
Figura 5.3 – Caroteadora, equipamento usado para extração de tarolos do pavimento.....	69
Figura 5.4 – Abertura de rasgo entre os dois furos para colocação dos cabos dos materiais piezoelétricos.....	70
Figura 5.5 – Materiais piezoelétricos 1 e 3 na base do furo (10 cm de profundidade)	71
Figura 5.6 – Colocação de mistura sobre os materiais piezoelétricos	71
Figura 5.7 – Colocação dos materiais piezoelétricos 3 e 6 a 1cm de profundidade	72
Figura 5.8 – Colocação dos cabos no rasgo e selagem do rasgo com betume asfáltico	72
Figura 5.9 – Aspeto final depois da instalação dos materiais PVDF e PZT na estrada	73

Figura 5.10 – Equipamento usado na aquisição de dados no trecho.....	73
Figura 5.11 – Veículo usado em alguns ensaios	74
Figura 5.12 – Painel frontal do software de aquisição de dados usado nos ensaios.....	75
Figura 5.13 – Painel de configuração para aquisição de dados.....	76
Figura 5.14 – Resposta dos materiais 1 (PVDF) e 4 (PZT) a 10 cm de profundidade.....	77
Figura 5.15 – Resposta dos materiais 2 (PVDF) e 5 (PZT) a 5 cm de profundidade.....	77
Figura 5.16 – Resposta dos materiais 3 (PVDF) e 6 (PZT) a 1 cm de profundidade.....	78
Figura 5.17 – Resposta dos materiais PVDF e PZT nas diferentes profundidades à passagem de um veículo pesado de mercadorias	79
Figura 5.18 – Resposta dos materiais PVDF e PZT à passagem de um veículo pesado com semi- reboque.....	80

1. Introdução

1.1 Introdução

O interesse em energias renováveis tem crescido consideravelmente nos últimos anos como forma de produzir a energia necessária às pessoas e ao sector produtivo de forma mais sustentável do ponto de vista do meio ambiente. Muita tecnologia que tem aparecido assenta sobretudo em aproveitamentos energéticos de fontes mais limpas e outras em diminuição da poluição provocada pela fonte de energia proveniente do petróleo. Os carros híbridos, por exemplo, têm a possibilidade de funcionar com eletricidade e com gasolina, reduzindo desta forma parte das emissões de gases poluentes. Os carros elétricos são outro exemplo de tecnologia que já não emite qualquer tipo de gás poluente, ainda que com um custo inicial considerável. A sua entrada no mercado já começou a dar os primeiros passos. Se as vendas aumentarem também aumenta o investimento no desenvolvimento de carros mais eficientes em termos de autonomia, baterias menos volumosas e mais potentes.

A energia eólica, solar e das ondas são exemplos que demonstram a necessidade de rapidamente se encontrar outras formas de produzir e transformar energia.

Enquadrado numa perspetiva de obtenção de energia a partir de outras fontes, este trabalho assenta essencialmente na possibilidade de desenvolvimento de um sistema de transformação de parte da energia que o motor do carro necessita para o deslocar em energia elétrica. Uma parte dessa energia vai para os pneus, mais concretamente para vencer o atrito existente entre o pneu e o piso da estrada. A outra parte da energia até então usada apenas na deformação do pavimento, poderá vir a ser reutilizada através da aplicação de materiais piezoelétricos no pavimento. Embora não se tenha perceção, o pneu do carro ao rolar sobre um pavimento deforma-se e deforma também o pavimento, sendo a deformação do pavimento quase elástica. Se se extrapolar para o grande número de carros que circulam na estrada sobre a qual circulam estará constantemente a deformar e a vibrar devido as sucessivas passagens dos veículos. Se nessa estrada se aplicar um material que transforme essa oscilação em energia elétrica, possivelmente pode conseguir-se ter não uma fonte de energia, mas uma transformação de energia.

1.2 Motivação

O interesse do estudo efetuado neste trabalho surgiu na sequência de um concurso de ideias em que foi apresentada uma descrição do possível projeto estradas geradores de energia. A ideia

seria aproveitar o movimento de veículos para gerar energia para postes de eletricidade ou iluminação nas passarelas.

Após o aprofundamento dos conhecimentos na área dos pavimentos rodoviários, associado a alguns conhecimentos de física e eletrônica, aparece então a possibilidade de conjugar conhecimentos de diferentes áreas e desta forma desenvolver um sistema que poderá vir a ser capaz de recuperar parte da energia que atualmente é desperdiçada.

Este tema assenta num grande desafio que atualmente a sociedade tem e que consiste no desenvolvimento de novas formas de produção de energia de modo a conseguir-se uma forma vida mais sustentável.

1.3 Objetivos

O objetivo essencial deste trabalho consiste na validação de um processo de aplicação de um material piezoelétrico que possa ser incorporado num pavimento e desta forma conseguir aproveitar energia resultante da oscilação desse pavimento aquando da passagem dos veículos. Para o efeito pretende-se:

1. Validar em laboratório num equipamento que simula o comportamento mecânico de um pavimento quando solicitado por uma carga sinusoidal correspondente à sucessiva passagem dos veículos.
2. Aplicar o material piezoelétrico num pavimento rodoviário de uma estrada nacional com a necessária instrumentação auxiliar por forma a que seja possível a transformação de energia e ainda monitorizar a passagem do tráfego.

1.4 Organização da tese

Para melhor compreensão do conteúdo da tese, dividiu-se a mesma em cinco capítulos: (1) Introdução; (2) Revisão do estado da arte; (3) Avaliação preliminar dos materiais piezoelétricos; (4) Instalação dos materiais piezoelétricos numa mistura betuminosa; (5) Instalação dos materiais num trecho experimental; (6) Conclusões.

Capítulo 1: apresenta uma pequena introdução ao tema que motivou a tese, ou seja, a transformação da energia proveniente da deformação mecânica em estradas feita pelos veículos que sobre ela circulam em energia elétrica.

Capítulo 2: apresenta uma breve revisão do estado da arte, em termos de materiais inteligentes, materiais inteligentes piezoelétricos, transformação e armazenamento de energia e sensores para aplicações rodoviárias.

Capítulo 3: descreve o programa experimental para avaliação de algumas características dos materiais piezoelétricos em estudo. Foi verificado o seu comportamento à fadiga pois em estrada será uma das características a que os materiais terão de resistir. Foi ainda estudado o efeito da temperatura nos mesmos uma vez que durante a instalação e período de funcionamento, os materiais piezoelétricos serão afetados por variações térmicas.

Capítulo 4: apresenta o procedimento de instalação dos materiais piezoelétricos numa mistura betuminosa a quente, fazendo ainda a verificação do bom estado de funcionamento após contacto com altas temperaturas através de ensaios sinusoidais cíclicos.

Capítulo 5: apresenta a metodologia usada para instalação dos materiais piezoelétricos numa estrada e descrevem-se os vários ensaios efectuados com um veículo de testes que passou várias vezes sobre os mesmos bem como apresentação e discussão dos resultados obtidos.

Capítulo 6: apresenta as principais conclusões do trabalho e são fornecidas ideias para trabalhos futuros.

2. Revisão do estado da arte

2.1 Materiais Inteligentes

Os materiais inteligentes são materiais com capacidades de adaptação e resposta controlada nas mais diversas aplicações, nomeadamente ambientais, na construção, medicina, engenharia têxtil, engenharia aeroespacial, etc. Assim, se um material for capaz de se adaptar ou responder em função do meio em que está inserido e para o qual foi estudado e produzido, é denominado inteligente. Deste modo, o material inteligente pode proporcionar maior conforto e segurança ao Homem, nos mais diversos locais.

Em geral, há materiais que têm a capacidade de agir como sensores e o seu sinal poderá ser processado por computadores para que a estrutura tenha uma melhor resposta ao meio onde se encontra inserido.

Tendo em conta o material e as propriedades, estes podem ter diversas aplicações como pigmentos que mudam de cor função da luminosidade ou temperatura, emitem luz quando eletricamente estimulados e produzem eletricidade quando deformados mecanicamente.

A corrosão é um dos maiores fatores de destruição de material, essencialmente o material exposto em ambientes agressivos, como por exemplo estruturas perto da costa marítima.

Andreeva e Shchukin (2008) desenvolveram um revestimento anticorrosivo inteligente. Este tipo de material quando atacado pelos agentes corrosivos, como por exemplo sais, pode regenerar-se em menos de 24 horas, ou seja, pequenos focos de corrosão são eliminados com a restituição da película protetora e desta forma consegue-se um prolongamento muito maior da durabilidade das estruturas sem intervenções de manutenção intermédias.

Segundo Newnham (1992), os materiais inteligentes integram sistemas inteligentes para aplicações nas diferentes áreas de engenharia, de que são exemplo os medicamentos inteligentes capazes de tratar a diabetes, integrando no sangue sensores de açúcar ou microbombas para distribuição de insulina no sangue.

Na indústria aeronáutica os aviões poderiam poupar muito combustível durante o voo se por exemplo nas asas fosse aplicado material inteligente, ou seja, com capacidade de alterar a forma da asa em função da pressão do ar e da velocidade a que voa.

Na engenharia civil a concepção das famosas casas inteligentes, com janelas controladas eletronicamente, fabricadas de material que se adapte face às condições climáticas e na presença do homem, no controlo da temperatura, ventilação e luz natural são exemplos de aplicação de materiais inteligentes.

Com o desenvolvimento destes materiais inteligentes, a ciência consegue ir mais além na concepção de novos projetos cada vez mais autónomos e auto regenerativos (Penrod et al., 2002).

Materiais multifuncionais como as ligas recuperadoras de forma, que depois de deformadas devido a uma ação, por exemplo um efeito térmico, recuperam a sua forma quando esse efeito acaba, materiais piezoelétricos que ao serem deformados por efeito de uma solicitação externa, produzem um sinal elétrico. Da mesma forma este material se sofrer a ação de um sinal elétrico, a sua forma será alterada, mas quando este sinal cessar, ele recupera a sua forma inicial.

Há diversos materiais que podem funcionar como sensores e simultaneamente como atuadores (Gupta et al., 2006), podendo desta forma dar uma melhor resposta no meio onde estão inseridos. Além disso, estes materiais podem alterar as suas propriedades em resposta à alteração do meio envolvente e com estas alterações os sensores podem até “aprender” a agir conforme as necessidades do meio onde estão inseridos. Por exemplo, os vidros de uma sala ampla na presença de pessoas podem escurecer ou tornarem-se opacos.

Com o intuito de melhorar as condições de humidade relativa do ar em museus, Yang et al. (2010) desenvolveu material inteligente que fosse capaz de fazer essa tarefa autonomamente. Estudos demonstraram que valores de humidade relativa em museus superior a 65% facilitam o aparecimento de microrganismos e valores de humidade relativa inferiores a 25% conduzem à secagem excessiva que pode conduzir fendilhamento das obras de arte por retração. Uma das formas atualmente usadas para tentar controlar as variações de humidade, é o recurso a equipamentos eletrónicos. Assim, se no museu fosse integrado um material inteligente, ou seja, capaz de regular a humidade relativa sem recurso a equipamentos eletrónicos, isto seria uma medida esteticamente e economicamente mais eficaz. O principio de funcionamento deste material baseia-se na tensão intersticial que possui e assim permite um equilibrio da humidade relativa do ar entre 57% e 60%, (Yang et al., 2010). Para humidades relativas do ar superiores a

60%, este material adsorve a humidade em excesso. Do mesmo modo, se a humidade relativa do ar baixar, esse material com baixa pressão intersticial, liberta parte da água adsorvida para o meio ambiente. Assim já é possível um melhor controlo da humidade do ar, sem sensores, eletrónica ou outro dispositivo consumidor de energia.

Um outro material onde são aplicados materiais inteligentes, são os vidros, quer por razões de proteção solar, painéis informativos, quer por privacidade, etc, (Seeboth et al., 2000). Os materiais mais utilizados são os eletrocromios e termotrópicos. O primeiro material quando energizado eletricamente muda as suas características, podendo mudar de cor. Como exemplos referem-se envidraçados que por alguma necessidade ou privacidade mudam de cor, painéis informativos de vidro e até pára-brisas dos carros que funcionam como display. O segundo material possui as características idênticas, mudando de cor mas na presença de variações térmicas e aplica-se em zonas onde nem sempre se pretende a transparência dos vidros.

Uma estrutura inteligente tem a capacidade de reagir às alterações do meio que a envolve, como o caso das cargas, alterações de temperatura e forma. Este tipo de tecnologia inteligente tem muitas aplicações em construção civil, como o controlo de vibrações e varejamento em edifícios, deteção de danos em estruturas, controlo de ruído, etc. Estruturas inteligentes estão a aparecer cada vez mais no mercado da engenharia civil, monitorizando e adaptando-se em função das necessidades de conforto e requisitos estruturais, como a medição de temperatura e deslocamentos na mesma.

2.2 Materiais piezoelétricos

2.2.1 Características

O efeito da piezoelectricidade foi descoberto em 1880 por Jacques e Pierre Curie (Castro 2006, Vaziri, 2011). A palavra piezoelectricidade provém da união de duas palavras: a palavra piezo significa pressão e a segunda electricidade.

Alguns cristais, como o quartzo, quando deformados mecanicamente ficam polarizados eletricamente, ou seja cargas elétricas formam-se nas superfícies do cristal originado desta forma uma diferença de potencial entre as superfícies (Kasap, 2000). Por outro lado, este tipo

de cristais pode exibir deformações mecânicas quando sujeito a uma diferença de potencial. Esta dupla característica observada em alguns cristais denomina-se piezoelectricidade. A razão de apenas alguns cristais apresentarem estas características tem a ver com a estrutura cristalina. Estruturas cristalinas que apresentam simetria, ver Figura 2.1a) não possuem características piezoelétricas, uma vez que após sofrerem deformação mecânica, a sua estrutura permanece simétrica. Por outro lado, cristais com estrutura não-centrosimétrica (Figura 2.1b) quando deformadas podem desenvolver uma variação da polarização eléctrica. No processo inverso estes materiais quando sujeitos a uma diferença de potencial sofrem uma deformação.

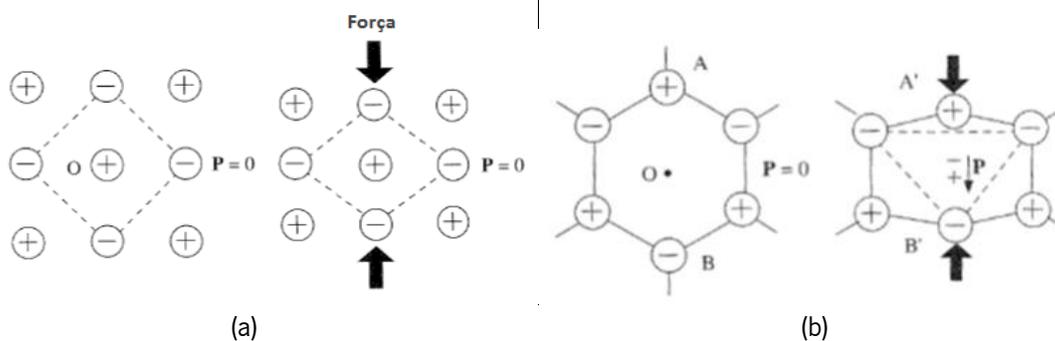


Figura 2.1 - Ilustração gráfica do (a) comportamento não piezoelétrico e (b) comportamento piezoelétrico (Kasap, 2000).

2.2.2 Propriedades físicas

O efeito piezoelétrico é mais facilmente visível num corpo sólido (transdutor) construído com materiais piezoelétricos em que são aplicados nas suas extremidades dois terminais eléctricos (elétrodos). Este corpo não deverá apresentar uma diferença de potencial, mas se sobre ele for aplicada uma tensão de compressão (efeito mecânico), será desenvolvida uma diferença de potencial entre os dois elétrodos (efeito piezoelétrico direto). Por outro lado, se for aplicada uma tensão de tração o potencial exibido também será diferente de zero, mas de sinal contrário ao primeiro caso, efeito ilustrado na Figura 2.2.

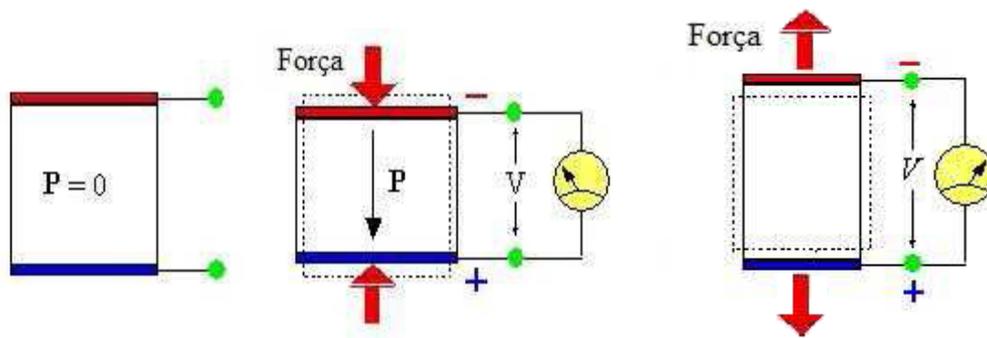


Figura 2.2 - Efeito piezoelétrico direto mediante ação mecânica

Se em vez de se aplicar tensões que deformam o corpo piezoelétrico mecanicamente, se aplicar tensões elétricas, serão induzidas deformações mecânicas no corpo (efeito indireto) (Figura 2.3). Esta característica a que se dá o nome de piezoelectricidade veio permitir à ciência o desenvolvimento de sensores com base nestes efeitos direto e inverso para as mais diversas aplicações.

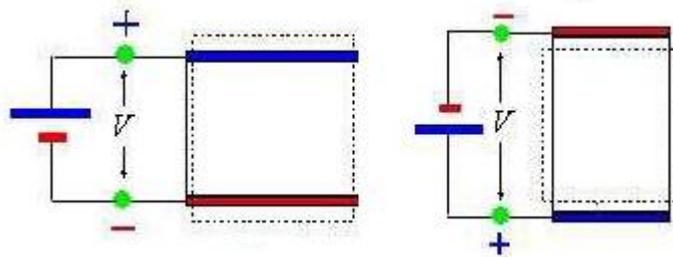


Figura 2.3 - Efeito piezoelétrico inverso

Uma das aplicações muito frequentes com base no princípio acima descrito é o ensaio de medição de ondas ultrassônicas. Este ensaio é muito usado na área de engenharia civil para medição da velocidade de propagação das ondas num corpo e prever o módulo de elasticidade dinâmico (Malhotra e Carino, 1991). Como se verifica na Figura 2.4, o sistema é composto por um gerador de sinais que envia um sinal elétrico a um dos sensores piezoelétricos. Este ao receber o sinal deforma-se mecanicamente a uma determinada frequência. Esta vibração é transmitida através do provete de ensaio até chegar ao outro sensor piezoelétrico (recetor). Este por sua vez ao deformar-se mecanicamente devido às vibrações que recebe emite um sinal elétrico que é detetado pelo osciloscópio para posterior análise.

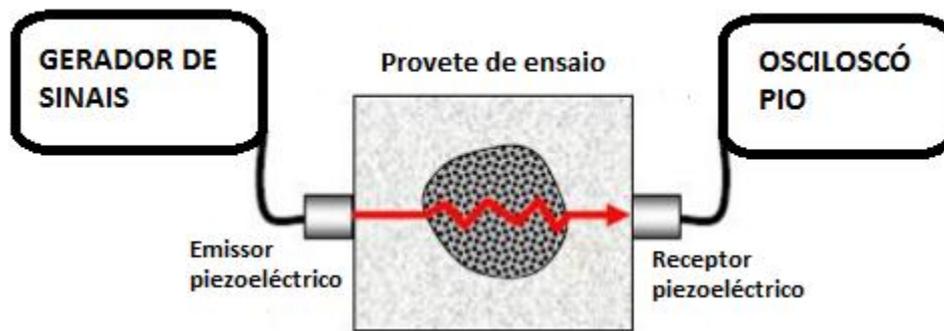


Figura 2.4 - Esquema de medição da velocidade de propagação de ultrassons

2.3 Aplicações

Os materiais piezoelétricos podem ser aplicados nas mais diversas situações em que a solicitação mecânica esteja sempre associada (Anton e Sodano 2007, Minazara et al. 2006, Howells 2009). Podem ser constituídos por diferentes materiais, geometrias e configurações (Anton e Sodano 2007). Um exemplo é a possibilidade de implantação no corpo humano que ao movimentar-se pode fazer com que estes materiais transformem energia proveniente do movimento do corpo humano em energia elétrica necessária para auxiliar na alimentação de por exemplo um pacemaker. Desta forma, a duração da bateria que este equipamento tem incorporado pode apresentar maior durabilidade não submetendo desta forma o portador deste aparelho a tantas intervenções para manutenção da bateria. Além disso, com o desenvolvimento da tecnologia, esta bateria poderá vir a ser substituída por apenas implantes de elementos piezoelétricos que se encarregarão de alimentar o pacemaker (Anton e Sodano 2007).

Na área da engenharia também se tem verificado uma evolução no desenvolvimento de materiais mais eficazes para aplicações de monitorização. Normalmente para monitorização é necessário o recurso a um sensor e uma eletrônica envolvente com a finalidade de dar alimentação ao sensor e ao mesmo tempo processar o sinal recebido do sensor. Este tipo de configuração tem sido usado ao longo de décadas na engenharia e na indústria. Nos últimos 20 anos este tipo de configuração tem sido muito investigado essencialmente por questões de tamanho. Assim, com o desenvolvimento da tecnologia e com o aparecimento das nanotecnologias, foi possível reduzir os sensores para uma escala micrométrica, hoje denominados MEMS (micro electro-mechanical systems). Este equipamento, do tamanho de um

micro-chip, incorpora a parte mecânica de um sensor, a sua electrónica para processamento e envio do mesmo através de um sistema de rede sem fios.

Um dos factores importantes para estes MEMS é a sua alimentação de energia para funcionamento. Normalmente recorrem-se a baterias para alimentar estes sensores, mas têm uma duração limitada no tempo.

Jian-Hui *et al.* (2009) desenvolveram um protótipo para produção de energia com vista à alimentação de sensores *wireless* ou ao seu auxílio quando estes têm uma bateria, recarregando neste caso a bateria, uma vez que o uso de baterias tem sempre o inconveniente associado de terem que ser substituídas ou recarregadas periodicamente. Este protótipo feito com material piezoelétrico, e que associado a um movimento de vibração, transforma esta vibração em energia eléctrica. Esta vibração, para a produção de energia, seria facilmente encontrada nas estruturas onde os MEMS seriam instalados, como por exemplo, pontes, edifícios, veículos, pessoas a caminhar.

Estes autores estudaram ainda que antes de se desenvolver um sistema de transformação e armazenamento de energia, é necessário conhecer determinados factores como o intervalo de tempo entre necessidades energéticas dos sensores e características piezoeléctricas do gerador. Normalmente estes sistemas necessitam de alimentação de uma forma descontínua, ou seja, usam mais durante as comunicações *wireless*, principalmente para envio de informação, ocorrendo estas espaçadas no tempo. Assim, a forma mais fácil de armazenar a energia proveniente do gerador piezoeléctrico é a utilização de um condensador. Concluíram ainda no seu trabalho que foi possível encontrar uma optimização entre o intervalo de tempo em que a voltagem é necessária e o valor de armazenamento do condensador para desta forma reduzir o tempo entre cargas e descargas do condensador que posteriormente alimenta um sistema de sensores ou MEMS.

Outra forma de aproveitamento para produção de energia eléctrica com recurso à tecnologia de materiais piezoelétricos é o caminhar dos peões. Uma expressão muito usada na literatura estrangeira, *energy harvesting*, significa a forma de extrair energia do meio que nos rodeia, convertê-la e armazená-la (Swallow et al., 2008). Estes autores realizaram um estudo onde desenvolveram microfibras piezoeléctricas, com um diâmetro de 90 a 250 μm para utilização em

peças de vestuário nomeadamente em luvas. Para o efeito, desenvolveram duas configurações de ensaio com vista à determinação da dimensão que melhor transforma energia proveniente do movimento do corpo humano. Assim, utilizaram um sistema de viga em consola assente numa base vibratória equipada com fibras piezoelétricas e desta forma simularam a vibração. Um outro sistema que desenvolveram consistiu numa simulação de impacto, ou seja, usaram esferas de diferentes massas que ao serem largadas de uma altura de 7 cm caíam sobre o material piezoelétrico e desta forma transformando a energia do choque em energia elétrica. Com estes dois sistemas pretenderam simular as vibrações que a luva poderia sofrer na mão e além destas, poderia ainda sofrer choques por exemplo ao agarrar objetos.

Se as zonas de passagem dos transeuntes, como passeios, tapetes, alcatifas ou mesmo solas de calçado forem instrumentadas com estes materiais, pode assim aproveitar-se parte da energia mecânica despendida para caminhar e utilizá-la depois de convertida em energia elétrica pelos materiais piezoelétricos em iluminação pública, sinalética, etc.

Ainda através da locomoção das pessoas é possível a transformação de energia através da utilização de solas do calçado equipado com material piezoelétrico e desta forma converter o movimento proveniente do caminhar em energia elétrica. Howells (2009) desenvolveu quatro tipos de tacões de calçado equipados com diferentes mecanismos geradores de energia, com o intuito de conseguir uma potência energética de 0.5 Watt. Durante a experiência utilizou diferentes pressões nos tacões, desde 25% a 75% da pressão máxima para avaliar o valor gerado de energia. Os resultados obtidos foram mais baixos do que o esperado, cerca de 0.09 Watt, em vez dos 0.5 Watt. Esta diferença, segundo o autor, poderá estar relacionada com diferentes fatores que não foram tidos em conta inicialmente, mas sem dúvida que é um contributo importantíssimo para futuros desenvolvimentos nesta área.

Uma outra forma de geração de energia através de materiais piezoelétricos e novamente com aplicações em pessoas, é o caso de uma mochila em que Feenstra *et al.* (2008) desenvolveram um novo sistema de transformação de energia proveniente da geração de esforços entre a mochila e o portador da mesma. Assim, desenvolveram um equipamento para aplicação nos cintos da mochila e que produziriam energia durante o caminhar da pessoa que a transporta associado ao peso da mochila que provocaria movimentos oscilatórios no sensor e além disso. Segundo os autores este seria um sistema que não interfere diretamente com atividade normal

da pessoa que usa a mochila. Por fim, concluíram que este sistema pode produzir uma potência elétrica média de 0.4 mWatt, o que em primeira análise parece uma potência muito reduzida, mas a electrónica também está a caminhar neste sentido ,ou seja, produção de sistemas cujo o consumo energético seja da mesma ordem..

O movimento das ondas marítimas já é atualmente muito aproveitado para produção de energia. Assim, com a utilização de bandas flutuantes equipadas com sensores piezoelétricos, estes com a constante movimentação das ondas produzem energia elétrica para os mais diversos usos.

Na área dos transportes terrestres também se aplica bastante esta tecnologia de materiais piezoelétricos para transformar a solicitação que um meio de transporte terrestre aplica à superfície por onde se desloca em energia elétrica. No caso dos meios de transporte ferroviário, estes materiais podem ser aplicados nos carris, mais concretamente nas travessas. O comboio ao circular sobre os carris provoca deformações e vibrações que por sua vez serão transformadas em energia elétrica.

Além do aproveitamento energético, pode ainda utilizar-se estes sinais eléctricos e usar estes materiais como sensores e desta forma ajudar na monitorização das vias, principalmente para contagem e pesagem dos veículos.

Sensores piezoelétricos foram também usados para monitorizar o endurecimento do betão e o ganho de resistência no betão (Shin et al., 2008).

2.4 Aplicações rodoviárias

Com o desenvolvimento da tecnologia, os pavimentos rodoviários e ferroviários têm vindo a ser instrumentados cada vez mais. Esta instrumentação tem por finalidade essencialmente monitorizar o desempenho mecânico dos mesmos e além disso medir fatores climáticos que poderão influenciar o desempenho destes pavimentos.

Os principais sensores que se utilizam nos pavimentos são sensores medidores de pressão para quantificar de que forma as tensões são aplicadas no pavimento pelos veículos. Existem ainda extensómetros que medem as deformações verticais e horizontais sofridas pelas diferentes camadas que constituem um pavimento. Os acelerómetros também são usados especialmente

em vias férreas para monitorizar as acelerações que os comboios incutem aos pavimentos. Por último é sempre importante monitorizar fatores climáticos que poderão influenciar na durabilidade e desempenho dos pavimentos, sendo os mais usuais, sensores de humidade, sondas de temperatura, medição da radiação solar, velocidade do vento e pluviosidade.

Em Portugal a aplicação de materiais piezoelétricos é essencialmente direcionada para a pesagem de veículos. A pesagem de veículos em movimento (WIM - Weight In Motion) pode fazer-se com recurso a sensores das mais diversas formas. Usam-se barras equipadas com extensómetros que quando colocadas no pavimento pesam os veículos por flexão destas quando solicitadas pelas cargas dos mesmos. Uma outra forma de pesar em movimento é a instalação de células de carga no pavimento. Além destes sensores usa-se com alguma frequência barras equipadas com sensores piezoelétricos (Zhang et al. 2008, Jiang et al. 2009, Vaziri 2011).

Com a instalação dos sensores no pavimento é possível monitorizar a presença de veículos e se forem instalados mais do que um sensor é possível ainda a monitorização da velocidade do tráfego.

A pesagem dos veículos pode ser diferenciada seja por eixo e total seja por veículo. Por último ainda é possível a determinação da distância entre eixos, fator bastante importante para a monitorização dos veículos pesados (Innowattech).

A nível internacional já existem algumas empresas no mercado que comercializam sensores piezoelétricos para monitorização do tráfego. Algumas destas empresas dedicam-se apenas ao fabrico de sensores para pesagem de veículos, enquanto que outras conseguem determinar mais características do tráfego como se referiu acima. De notar que a maioria destes sensores são de difícil instalação e quase sempre obrigam a uma intervenção no pavimento e que por vezes resulta a médio prazo num dano causado à estrutura do pavimento.

Zhang et al. (2008) estudou uma nova forma de pesagem em movimento baseada na extensão de tração na base do pavimento. Dos vários sensores usados na experiência, usou também sensores piezoelétricos em parte para aferir outros sensores não tão usuais neste tipo de aplicações. Para verificação do sistema, instalou todos os sensores num trecho experimental e procedeu à avaliação da resposta dos mesmos. Para isso programou uma série de ensaios com

diferentes veículos, diferentes velocidades, diferentes cargas e diferente número de eixos. As maiores dificuldades detetadas e que conduziram a uma grande parte dos erros nas medições foi a resposta não linear do pavimento, a velocidade a que os veículos passaram e ainda a posição de passagem dos rodados sobre os sensores. Um das conclusões desta investigação foi conseguir medir os pesos relativos a cada eixo dos veículos de teste usados.

O desempenho dos equipamentos para pesagem em movimento ao longo da sua vida útil é um dos fatores que determina em parte o custo inicial e de manutenção em sistemas de pesagem. Vaziri (2011) fez um estudo económico de diversos sistemas de pesagem em movimento. Os tipos de sistemas de pesagem em movimento são basicamente o sistema de flexão de uma barra, sistema com célula de carga e sistema com piezoelétricos. Relativamente ao custo económico, o sistema com piezoelétricos foi o considerado mais económico. Além disso, verificou que em termos de viabilidade os sistemas com sensores piezoelétricos ficam ligeiramente abaixo em termos de precisão que os outros sistemas referenciados.

Papagiannakis et al. (2001) fizeram um estudo de fadiga a dois sistemas de pesagem em movimento de fabricantes diferentes equipados com sensores piezoelétricos. Um dos sistemas usa os sensores piezoelétricos desprotegidos e no outro sistema, os sensores estão encapsulados. Estes sensores depois de instalados em lajes de betão foram sujeitos a cargas sinusoidais aplicadas por uma máquina servo-hidráulica a uma frequência de 4 Hz, concluindo que a tensão de contacto aplicada aos sistemas influencia de forma significativa o desempenho à fadiga, ou seja, o output de voltagem em função do número de ciclos. Concluíram ainda que nas condições de ensaio de fadiga associadas a humidade, o sistema com sensores encapsulados teve melhor desempenho.

Recentemente têm surgido vários trabalhos relacionados com a utilização de geradores piezoelétricos para transformação e armazenamento de energia em pavimentos rodoviários (Yao et al., 2011, Xiong et al., 2012), com base no conceito de vibração e deformação dos pavimentos durante a passagem de veículos o que de acordo com os objetivos do presente trabalho pode conduzir a avanços significativos no modo como as estradas podem constituir meios de obtenção de energia.

Neste âmbito destaca-se a Innowattech, que é uma empresa israelita que se dedica à investigação e desenvolvimento essencialmente de geradores piezoelétricos. Os sistemas desenvolvidos transformam a energia mecânica que solicita os pavimentos ferroviários, rodoviários e pedonais durante a passagem dos veículos e pessoas. Normalmente esta energia é desperdiçada através da dissipação em calor. A aplicação principal destes geradores restringe-se a zonas onde não há distribuição de energia elétrica da rede.

Nas ferrovias, a solução da Innowattech é essencialmente gerar energia para zonas onde não há energia da rede pública para alimentar sinalização de travessias da linha, manutenção de engrenagens da linha e monitorização das ferrovias.

Nas estradas, este sistema aplica-se no pavimento para diversos fins, como sinalização de tráfego à base de leds cujo consumo de energia é baixo. Além disso, também aplicam a sua tecnologia na pesagem em movimento, onde conseguem a classificação do tráfego, monitorização da velocidade e sentido. Além disso, o factor mais relevante é a pesagem dos veículos em movimento para limitação em tempo real de excessos de carga em vias, pontes ou limitação de acesso em zonas industriais.

Relativamente às zonas pedonais, aplicaram geradores piezoelétricos essencialmente voltados para alimentar painéis de informação com tecnologia (Innowattech).

Esta empresa desenvolveu ainda um sistema inovador de armazenamento de energia proveniente dos geradores elétricos para baterias. O tipo de transformação de energia apresenta vantagens porque se trata essencialmente de aproveitamento de energia desperdiçada, funciona independentemente das condições climáticas, permite a obtenção de energia eléctrica para onde a rede pública não chega e além disso permite a monitorização de sistemas nesses mesmos locais.

3. Avaliação preliminar dos materiais piezoelétricos

3.1 Introdução

Para melhor se perceber o funcionamento dos materiais piezoelétricos no meio rodoviário foi necessário proceder a alguns ensaios que em parte simulassem algumas das condições reais em estrada. Assim, foi realizada uma série de ensaios para avaliar estes materiais em termos de resistência à fadiga, uma vez que em estrada é um factor importante para determinar a durabilidade dos mesmos. O efeito da temperatura, ou seja, verificar se os materiais resistem às altas temperaturas de fabrico das misturas betuminosas e além disso verificar o seu comportamento às variações térmicas, porque quando instalados no pavimento irão sofrer variações térmicas diariamente. Além disso, verificou-se também a sensibilidade destes materiais a pequenas e altas frequências bem como a pequenos e grandes deslocamentos.

3.2 Caracterização física dos materiais piezoelétricos

Os materiais usados neste trabalho foram de dois tipos: materiais piezoelétricos à base de polímero (PVDF - Poli(flúoreto de vinilideno)) e materiais piezoelétricos à base de cerâmica (PZT - Titanato Zirconato de Chumbo) (Castro, 2006). Na Figura 3.1 ilustra-se um material piezoelétrico de cada tipo usado, à esquerda está o material de origem polimérica e à direita o material de origem cerâmica. Os fios foram fixos nos dois materiais, um em cada face, por colagem com fita adesiva de alumínio.

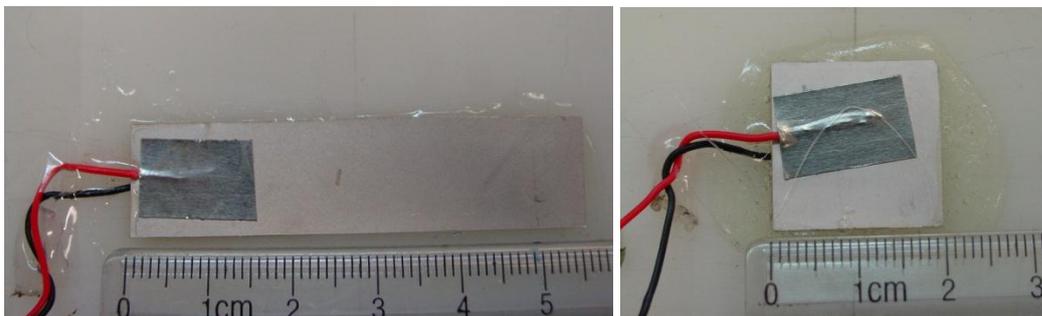


Figura 3.1 - Materiais piezoelétricos: polimérico (esquerda) e cerâmico (direita)

Na Tabela 3.1, apresentam-se as principais características dos dois materiais em estudo.

Tabela 3.1 – Resumo das características dos materiais PVDF e PZT

Material	ρ (g.cm ⁻³)	ϵ (1kHz)	d_{31} (pC.N ⁻¹)	ρ (mC.m ⁻² .K ⁻¹)	k (%)
PVDF	1,76	≈10	20	40	6
PZT	7,75	≈800	171	60-500	34

De acordo com a tabela acima, pode verificar-se que em termos de densidade (ρ), o material PVDF é muito menos denso do que o material PZT. A constante dielétrica (ϵ) é uma característica que todos os materiais possuem e está relacionada com a maior ou menor facilidade que um determinado material tem em poder ser polarizado. O parâmetro d_{31} é o coeficiente piezoelétrico e relaciona-se com a direcção de aplicação da força nos materiais. O coeficiente ρ é o coeficiente piroelétrico e k é um parâmetro que mede a percentagem de energia convertida, para um dado trabalho mecânico que no caso do material PVDF, só 6% é que é convertido em energia elétrica.

O Fluoreto de Polivinilideno (PVDF) é um material piezoelétrico à base de polímero semicristalino que tem vindo a ser desenvolvido ao longo dos últimos anos que tem permitido o desenvolvimento considerável deste material. A utilização deste material é diversa devido às suas características mecânicas, química e devido essencialmente à sua flexibilidade (Costa, 2007).

Este material quando comparado com outros materiais, nomeadamente o cerâmico, é bastante mais flexível, é de menor densidade, e também a sua produção em filmes é mais fácil. Devido à sua flexibilidade o PVDF é muito utilizado como sensor.

O PVDF pode ser cristalizado em diversas fases, nomeadamente α , β , γ e a δ . As mais conhecidas são a fase α , que é a mais fácil de obter industrialmente, e a fase β , a que confere propriedades piroelétricas e piezoelétricas. Este material é normalmente comercializado na fase

α . Assim, torna-se necessário cristaliza-lo para a fase β , para ser usado como material piezoelétrico. Actualmente já existem processos para esta transformação, mas o mais comum consiste na deformação mecânica da fase α a temperaturas inferiores a 80 °C.

O titanato zirconato de chumbo (PZT) é um material piezoelétrico à base de cerâmica sendo um dos piezoelétricos mais utilizados e conhecidos em todo o mundo. Este tipo de material tem na sua composição cristais de *perovskite*, possuindo uma forma molecular cúbica que permite que haja uma deformação molecular quando submetido a um campo eléctrico e o oposto, ou seja, ao ser deformado mecanicamente, gera um campo eléctrico.

O PZT é um dos materiais mais utilizados porque permite assumir várias formas e além disso também são bastante utilizados na função de atuadores quando sujeitos a um campo eléctrico.

3.3 Resistência à fadiga dos materiais piezoelétricos

Com o objetivo de caracterizar o comportamento do material piezoelétrico quando instalado no pavimento foi necessário efetuar alguns ensaios que usualmente se realizam em misturas betuminosas a provetes equipados com os materiais piezoelétricos em estudo. Para simular o efeito das sucessivas passagens dos veículos foi efetuado o ensaio de fadiga por flexão em 4 pontos (Figura 3.2). Este ensaio é o mais adequado à caracterização das misturas betuminosas em termos de resistência à fadiga.

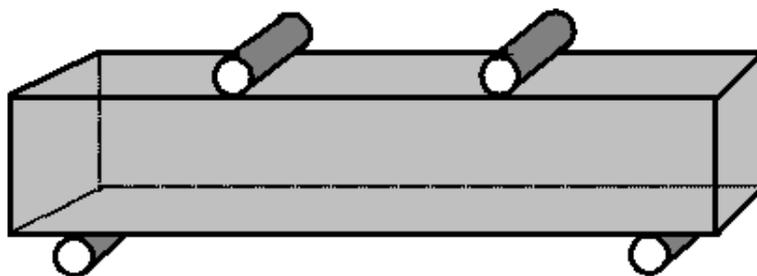


Figura 3.2 – Esquema de ensaio por flexão em 4 pontos

No Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho existe uma máquina servo-hidráulica para ensaios de fadiga em misturas betuminosas da marca Cox and Sons, modelo

CS7800, permite a realização de ensaios de fadiga por flexão em 4 pontos e até uma frequência de 30 Hz. Este equipamento (Figura 3.3) além de poder realizar pequenos deslocamentos a altas frequências, pode ainda realizar variações de temperatura. Para o ensaio de fadiga em 4 pontos é imposto ao provete uma solicitação cíclica sinusoidal em controlo de força ou em controlo de deslocamento. Para o estudo foi utilizado o ensaio em controlo de deslocamento.



Figura 3.3 - Equipamento servo-hidráulico para realização de ensaios de fadiga

Para a realização dos ensaios foi definida uma temperatura de 20 °C, e uma frequência de 30 Hz, embora a maioria dos ensaios de fadiga em misturas betuminosas seja realizado a uma frequência de 10 Hz, foi escolhido o valor de 30 Hz por estar normalizado e também por uma questão de tempo de ensaio.

Numa primeira fase foram usadas duas vigas em material de comportamento quase elástico (DELRIN) para que desta foram se evitem fenómenos exteriores aos materiais piezoelétricos e que de alguma forma poderia colocar em causa os resultados obtidos que se esperam apenas digam respeito a estes materiais. Nestas duas vigas foram colocados os dois tipos de materiais, numa delas (viga V1) foi colocado na parte inferior e na parte superior dois materiais piezoelétricos de dimensões iguais, S1 e S2, fabricados com material polimérico (PVDF),

conforme se ilustra na Figura 3.4.

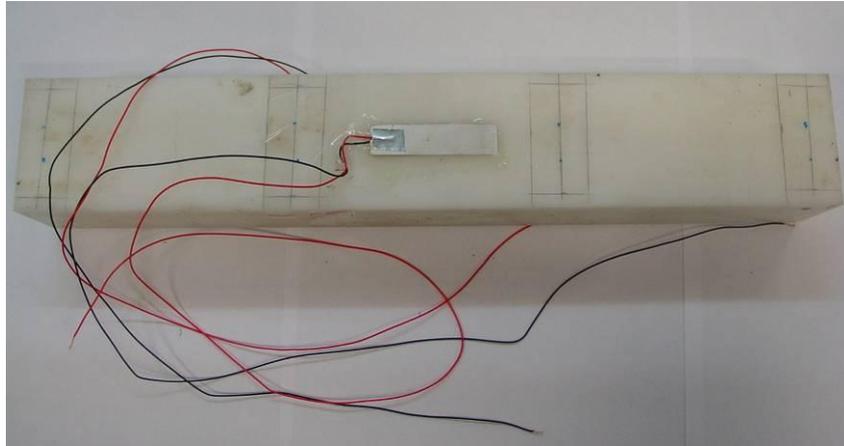


Figura 3.4 – Viga V1 equipada com os materiais S1 e S2 fabricados à base de material polimérico

Na segunda viga (viga V2), devido à falta de mais material, apenas se colocou um material piezoelétrico (S3) fabricado com material cerâmico (PZT) na face inferior da viga (Figura 3.5).

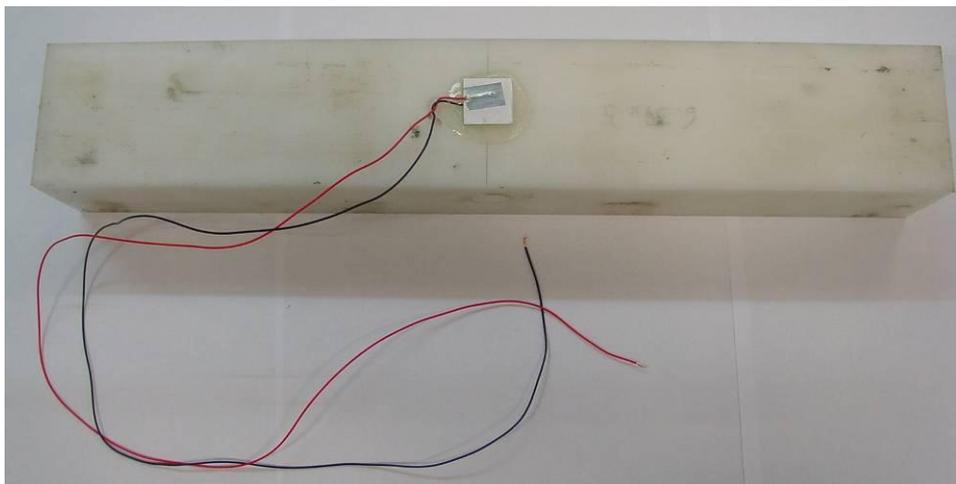


Figura 3.5 – Viga V2 equipada com material piezoelétrico S3 fabricado com material cerâmico

Além da avaliação da resistência à fadiga, também se optou por associar a este fenómeno, variações de temperatura. Os pavimentos durante a sua vida útil podem atingir temperaturas que variam entre 10°C negativos e 60°C positivos.

As baixas temperaturas no pavimento estão sempre associadas à temperatura do ar. Por outro lado, as temperaturas altas estão sobretudo relacionadas com o tempo de exposição solar. A cor

preta dada pelo betume asfáltico num pavimento é responsável pela absorção das radiações solares e desta forma atingir temperaturas superiores à temperatura ambiente.

A solicitação da viga foi feita através da aplicação de um deslocamento cíclico sinusoidal à frequência de 30 Hz, como já foi referido. Para a amplitude da sinusoidal, ou seja, a deformação a que a viga será sujeita, foram utilizados dois valores que correspondem a um nível de extensão em tração na base da viga que suporta os materiais piezoelétricos. Assim foi utilizado o valor de 100 μ strain (Figura 3.6) e metade deste valor, ou seja 50 μ strain. O valor de 100 μ strain corresponde ao valor da extensão por tração sofrida na parte inferior da camada betuminosa de um pavimento quando solicitado por uma carga padrão, ou seja, um veículo pesado que num eixo traseiro tenha uma carga de 130 kN, um dos rodados aplica uma carga de 65 kN num ponto do pavimento durante aproximadamente 0,1 segundo. Na viga, esta extensão de tração na fibra mais externa traduz-se numa deformação por flexão da viga em 0.053 mm.

A utilização da extensão de 50 μ strain ficou a dever-se à necessidade de simular carga de menor valor, representativas de veículos a circular com carga claramente inferiores ao máximo legal.

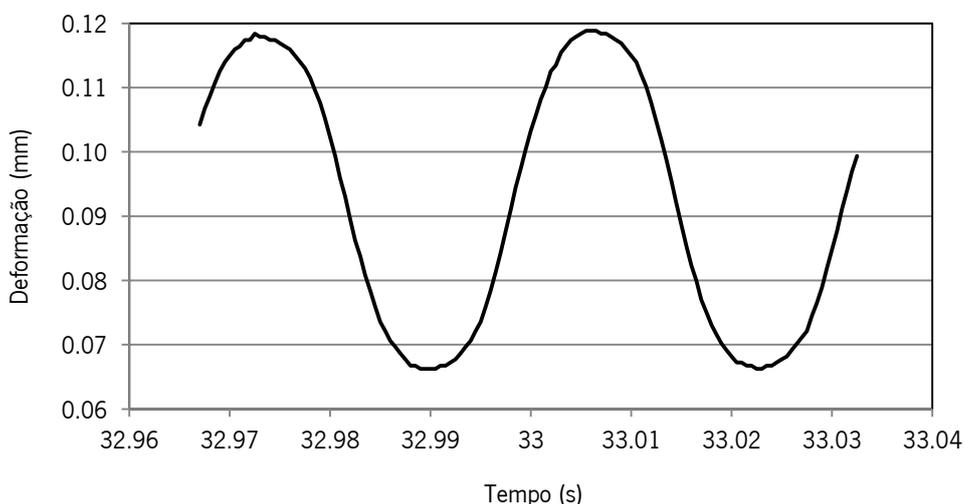


Figura 3.6 – Sinusoidal tipo com amplitude de 100 μ strain utilizada nos ensaios de fadiga

3.3.1 Comportamento à fadiga dos materiais piezoelétricos PVDF aplicados na viga V1

Como foi anteriormente descrito, a viga V1 foi instrumentada com dois materiais piezoelétricos de base polimérica.

O ensaio efetuado na viga V1, equipada com os materiais S1 e S2, um na face inferior e outro na face superior da viga, permitiu concluir que este material não apresentou variação do seu comportamento ao longo dos quase 3 milhões de ciclos de carga aplicados à viga como se pode verificar na Figura 3.7.

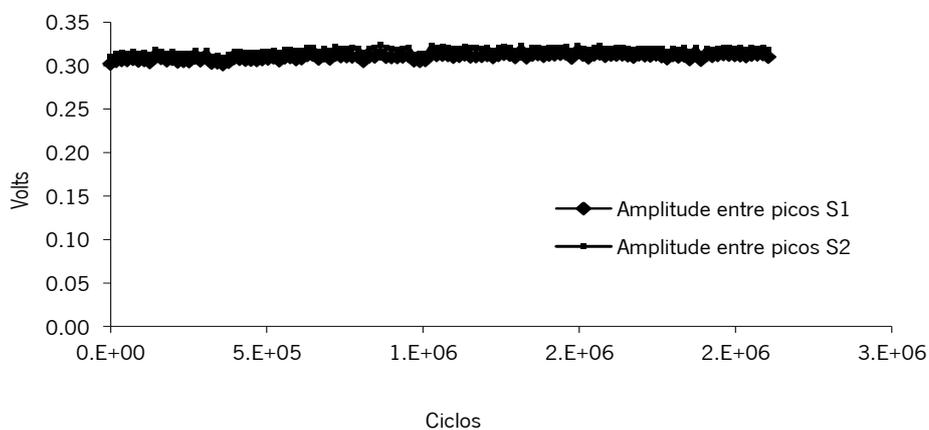


Figura 3.7 – Ensaio de fadiga na viga V1 com material PVDF a 30 Hz e 100 μ strain

Para que a sinusoidal apresentada pelos materiais piezoelétricos à base de polímero possa ser bem representada e usada em posteriores análises, o número de pontos a adquirir pela placa de aquisição de dados, deve ser no mínimo de 10 vezes superior ao valor da frequência de ensaio, para se obtenham pontos suficientes para desenhar a sinusoidal resultante do ensaio. Assim, nestes casos optou-se por apenas gravar alguns ciclos espaçados no tempo, para evitar no final de cada ensaio obter ficheiros de dados muito grandes.

Para melhor se perceber o tipo de onda que os materiais piezoelétricos devolvem durante o ensaio de fadiga, na Figura 3.8 pode observar-se que a onda apresenta bastantes picos o que pode numa primeira análise ser atribuído à presença de ruído elétrico. Assim, na Figura 3.9 apresenta-se de novo a resposta dos dois materiais PVDF mas com a aplicação de um filtro de passe baixo e como se pode verificar a sinusoidal resultante é idêntica à que a máquina de

fadiga apresenta. Uma vez que não havia certeza de qual o tipo de resposta dos materiais, optou-se por apresentar sempre o sinal original e o sinal filtrado dos materiais, além disso a aplicação de um filtro implica sempre a perda de parte do sinal e que neste caso pode ser importante uma vez que ainda não se conhece perfeitamente o comportamento dos materiais nestas condições.

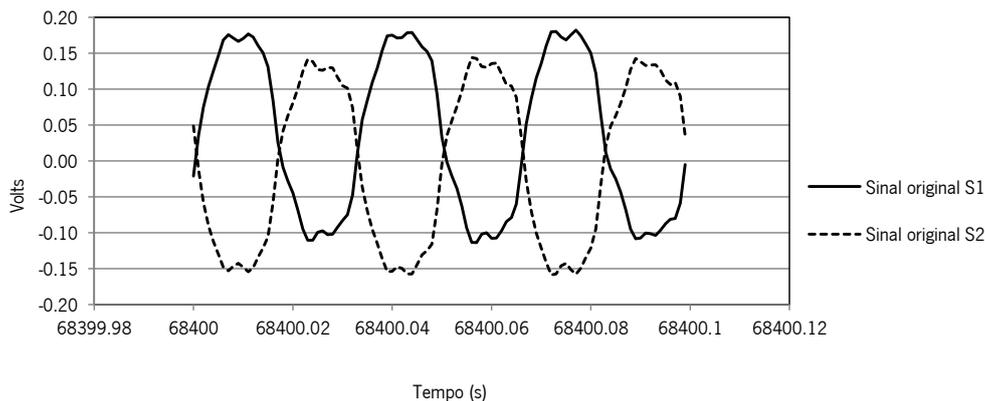


Figura 3.8 – Resposta dos materiais PVDF S1 e S2 durante o ensaio de fadiga

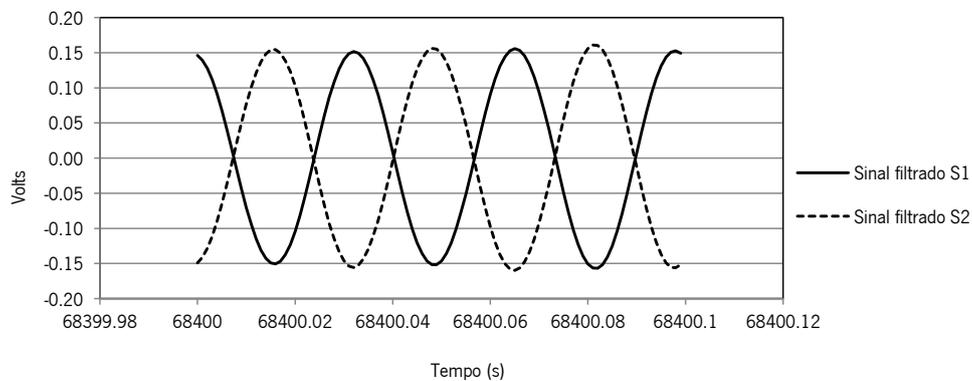


Figura 3.9 - Resposta filtrada dos materiais PVDF S1 e S2 durante o ensaio de fadiga

No ensaio realizado nas condições de frequência igual a 30 Hz e amplitude de 50 μ strain, conforme se apresenta na Figura 3.10, verifica-se um comportamento idêntico às condições de ensaio do ensaio anterior, exceto na amplitude da onda que acompanhou a redução da amplitude de ensaio para metade do seu valor. Aqui também se observa que após a aplicação dos vários ciclos de carga descarga à viga V1, os materiais PVDF não apresentaram qualquer

tipo de redução do sinal de saída, não indicando assim possível dano provocado pelo ensaio.

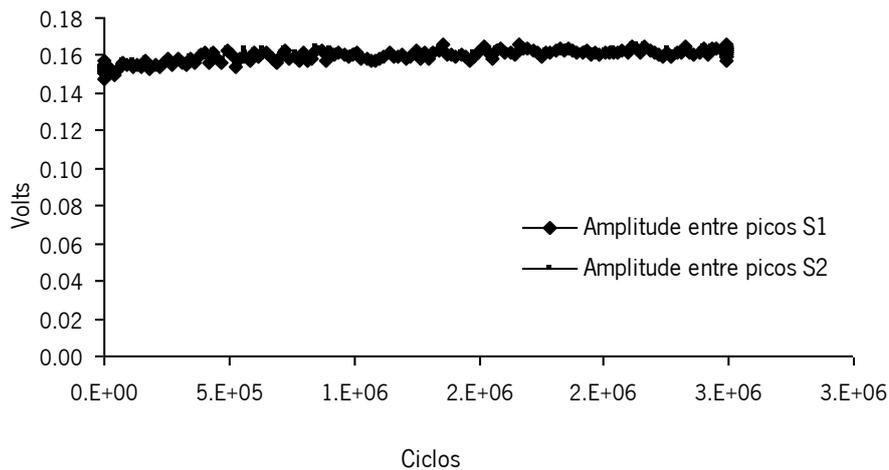


Figura 3.10 – Comportamento dos materiais PVDF S1 e S2 no ensaio de fadiga a 50 μ strain

Na Figura 3.11 e Figura 3.12 apresentam-se o tipo de resposta obtido pelos materiais piezoelétricos de base polimérica, S1 e S2 sem a aplicação de filtro e com a aplicação de filtro respetivamente. Se compararmos com a sinusoidal tipo do ensaio anterior, observa-se que neste caso a mesma apresenta um sinal mais irregular do que no ensaio anterior. Este facto poderá dever-se à amplitude da sinusoidal ser demasiadamente baixa e quer por limitações da máquina de ensaio em executar uma sinusoidal perfeita quer por falta de precisão da placa de aquisição ou poderá ser uma característica própria do material PVDF.

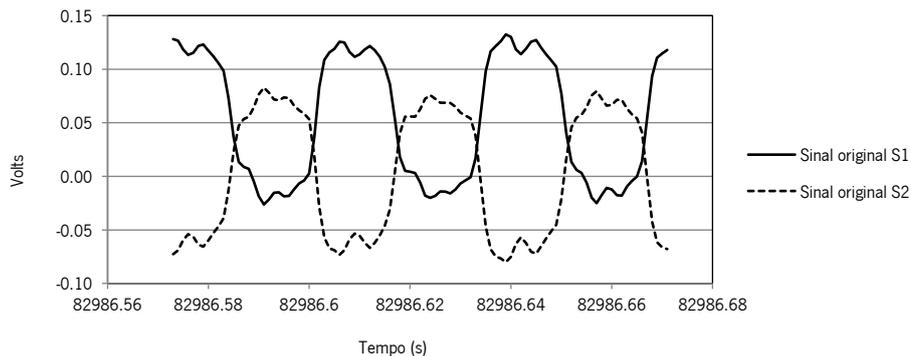


Figura 3.11 – Sinusoidal apresentada pelos dois materiais PVDF sem aplicação de filtro

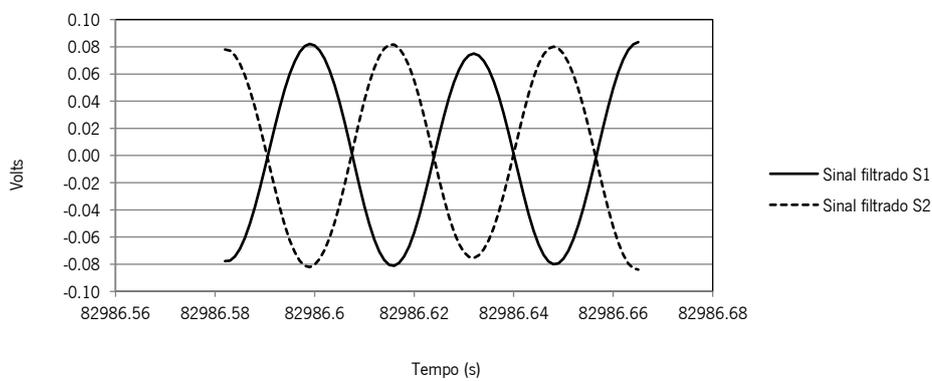


Figura 3.12 – Sinusoidal apresentada pelos dois materiais PVDF com aplicação de filtro

3.3.2 Comportamento à fadiga do material piezoelétrico PZT S3 aplicado na viga V2

Na viga V2, feita do mesmo material da viga V1, foi colocado apenas um material piezoelétrico (S3) à base de cerâmica, este material já facilmente encontrado no mercado. Este material tem a particularidade de nas mesmas condições emitir um sinal elétrico de maior valor quando comparado com o material usado na viga V1.

Como se verifica na Figura 3.13, este material apesar de apresentar um valor em termos de voltagem, medido entre picos da sinusoidal, bem maior tem um comportamento idêntico ao material instalado na viga V1, ou seja, existe um incremento do sinal nos primeiros ciclos e mantendo-se estável durante a realização de todo o ensaio. Pode também aqui concluir-se que este material não apresenta diminuição do sinal ao longo de todo o ensaio, o que pode indicar

um bom comportamento em termos de resistência à fadiga.

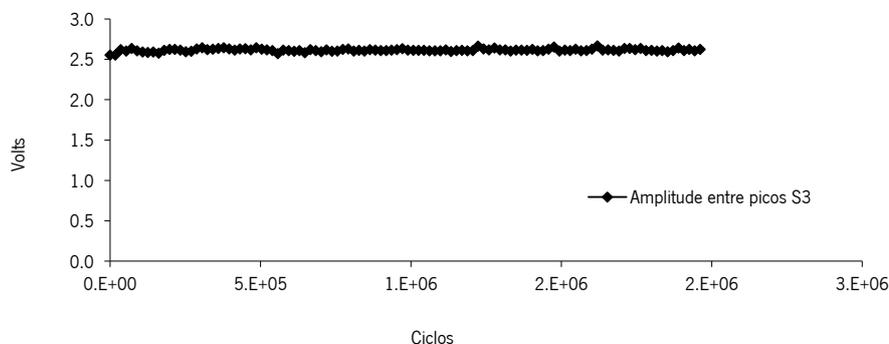


Figura 3.13 – Comportamento do material PZT S3 ao ensaio de fadiga à extensão de 100 μ strain

Na Figura 3.14 pode observar-se um extrato da sinusoidal apresentada pelo material PZT S3 e o sinal filtrado à frequência de 30Hz e amplitude de 100 μ strain. A forma da sinusoidal é também idêntica à apresentada pelos materiais PVDF S1 e S2 aplicados na viga V1 nestas condições de ensaio, apenas o valor da amplitude aumentar circunstancialmente em relação à viga V1.

Dadas as semelhanças do formato da onda apresentada pelos materiais de base polimérica S1 e S2 da viga V1 e tendo em conta a amplitude de sinal, parece assim indicar que este tipo de onda irregular é característico nos materiais piezoelétricos.

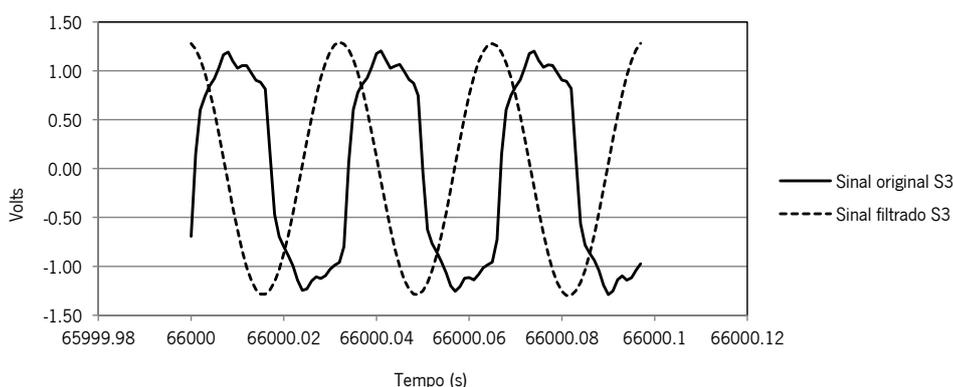


Figura 3.14 – Resposta do material PZT S3 com e sem filtro

No seguinte ensaio, idêntico ao anterior apenas se alterou a amplitude reduzindo o seu valor para metade. O comportamento do material piezoelétrico PZT S3 da viga V2 a esta amplitude

apresenta também um aumento inicial do sinal (Figura 3.15). Na mesma figura pode observar-se que o material não sofre decréscimo do sinal ao longo de todo o ensaio. Salienta-se ainda o facto do valor do sinal acompanhar a redução da amplitude, ou seja, como a amplitude imposta é metade, o sinal de saída apresentado pelo material PZT também reduziu o seu valor para cerca de metade.

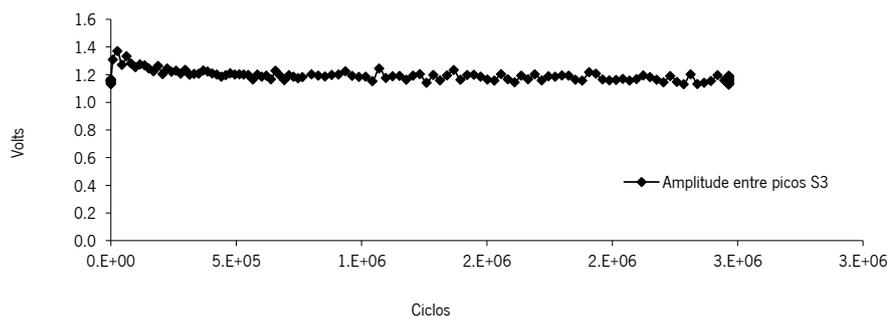


Figura 3.15 – Comportamento à fadiga do material PZT S3 a uma extensão de 50 μ strain

Do mesmo modo apresenta-se na Figura 3.16 a sinusoidal tipo observada ao longo de todo o ensaio de fadiga. Nesta sinusoidal não se deteta diferença quando comparada com a sinusoidal tipo observada no ensaios a 100 μ strain de amplitude.

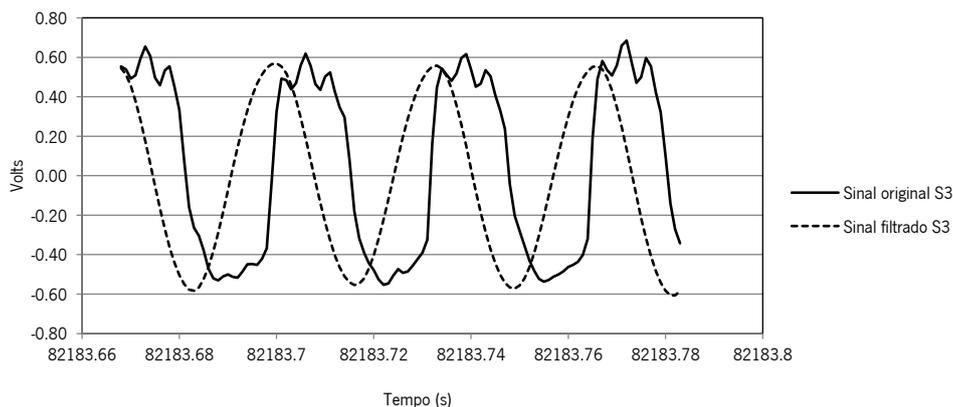


Figura 3.16 – Resposta do material PZT S3 com filtro e sem filtro no ensaio a 50 μ strain

3.4 Efeito da temperatura

Além da resistência à fadiga é importante também caracterizar estes materiais em termos de comportamento térmico. Assim, foram realizados ensaios nas vigas V1 e V2 equipadas com os mesmos materiais, PVDF e PZT, mas destas vez associando a um carregamento sinusoidal de amplitude igual a 100 μ strain à frequência de 30 Hz, para verificar o comportamento dos mesmos a diferentes amplitudes térmicas, fazendo variar apenas a temperatura na câmara de ensaio. As gamas de temperatura utilizadas variaram entre os 10 °C negativos e os 47 °C positivos.

3.4.1 Ensaios na viga V1 equipada com material PVDF S1 e S2

Na Figura 3.17 apresenta-se o valor entre picos medido nos materiais PVDF S1 e S2 ao longo de todo o ensaio, ou seja, desde os 47 °C positivos até aos 10 °C negativos. Neste ensaio foram efetuados patamares de temperatura de 10 °C em 10 °C, e com a duração de 2 horas entre patamares, para a homogeneização da temperatura e estabilização dos sinais. Estes parâmetros foram encontrados através da realização de pré-ensaios que ajudaram assim a definir os mesmos.

Pela análise da Figura 3.17 pode observar-se que os materiais piezoelétricos de base polimérica apresentam variação do seu sinal com a variação da temperatura, ou seja, à medida que a temperatura diminui, a amplitude da sinusoidal vai aumentando.

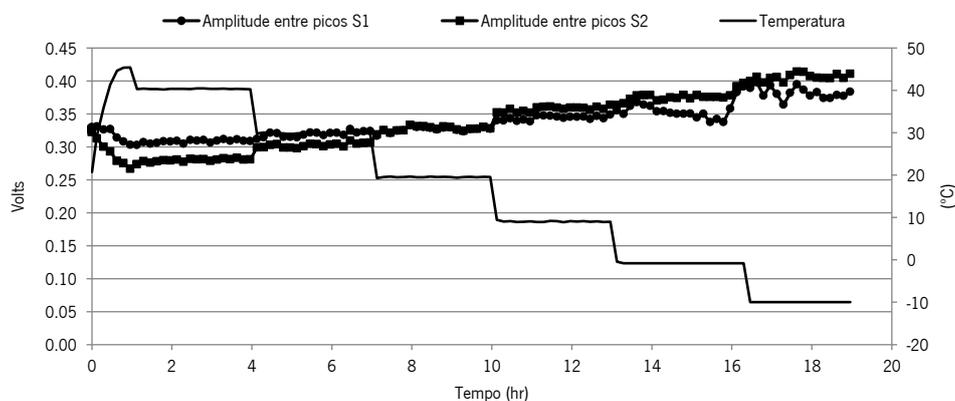


Figura 3.17 – Variação do sinal entre picos do material PVDF S1 e S2 com a variação da temperatura

3.4.2 Ensaios na viga V2 equipada com o material PZT S3

Do mesmo modo, na Figura 3.18 apresenta-se o comportamento do material PZT S3 de base cerâmica aplicado na viga V2. Este material apresenta uma sensibilidade à temperatura maior do que os materiais de base polimérica. Salienta-se ainda que este material apresenta um comportamento linear, ou seja, à medida que a temperatura diminui, a sinusoidal da onda aumenta. É possível, pela análise da resposta deste material, identificar claramente os inícios em que a temperatura muda de patamar.

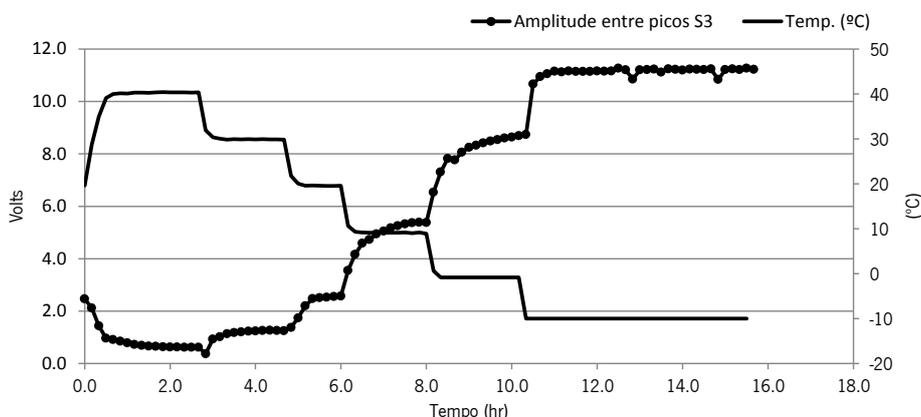


Figura 3.18 – Variação do sinal entre picos do material PZT S3 com a variação da temperatura

3.5 Ensaios para determinação da sensibilidade mínima dos materiais piezoelétricos

Com o objetivo de averiguar a sensibilidade mínima de cada material, ou seja, a partir da qual o material deixa de responder quando sujeito a uma solicitação muito pequena ou de baixa frequência, foi feita uma nova série de ensaios. Numa primeira série foi fixado o valor da frequência de ensaio igual a 1 Hz, valor considerado muito baixo quando comparado com a

velocidade de cargas aplicadas em pavimentos rodoviários (veículos em marcha muito lenta), e fez-se variar a amplitude da onda desde os 25 μ strain até aos 800 μ strain. Numa segunda série foi fixado o valor da extensão de 25 μ strain, também este valor considerado demasiado reduzido, em termos de deformação por flexão em pavimentos rodoviários, fazendo apenas variar os valores de frequência, que variou desde 1 Hz até 30 Hz. Nestes ensaios a temperatura foi mantida constante e igual a 20 °C.

3.5.1 Ensaios à frequência de 1Hz e extensão variada

Na Figura 3.19 pode observar-se que os materiais PVDF quando sujeitos a carregamentos desde os 25 μ strain até aos 800 μ strain de amplitude e a uma frequência de 1 Hz apresentam um comportamento quase linear, ou seja, à medida que a amplitude da onda imposta aumenta, a resposta dos materiais também aumenta. Assim pode concluir-se que os materiais de base polimérica S1 e S2 conseguem ser sensíveis a solicitações com frequência de 1 Hz.

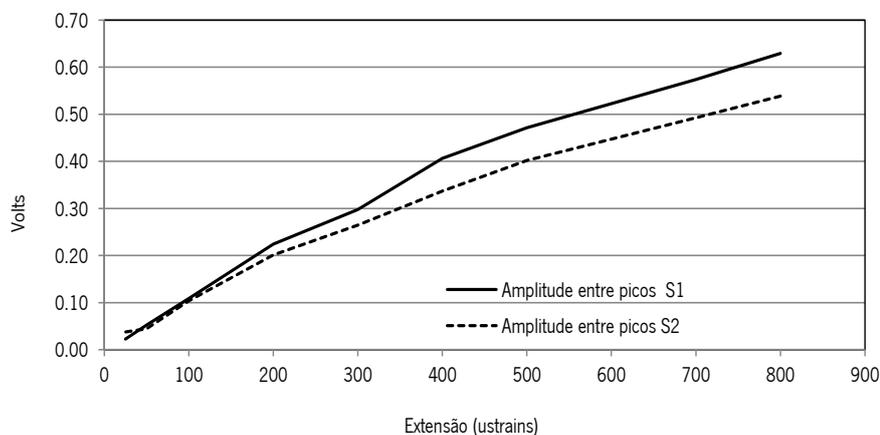


Figura 3.19 – Resposta dos materiais PVDF S1 e S2 com a variação da amplitude

Do mesmo modo que se efetuou na viga V1, a viga V2 também foi sujeita à mesma série de carregamentos com a mesma frequência de 1 Hz e amplitudes diferentes. A resposta apresentada pelo material piezoelétrico PZT S3 (Figura 3.20) é quase linear quando comparada com a variação da amplitude. Também neste material pode verificar-se que apresenta bom

comportamento a baixas frequências.

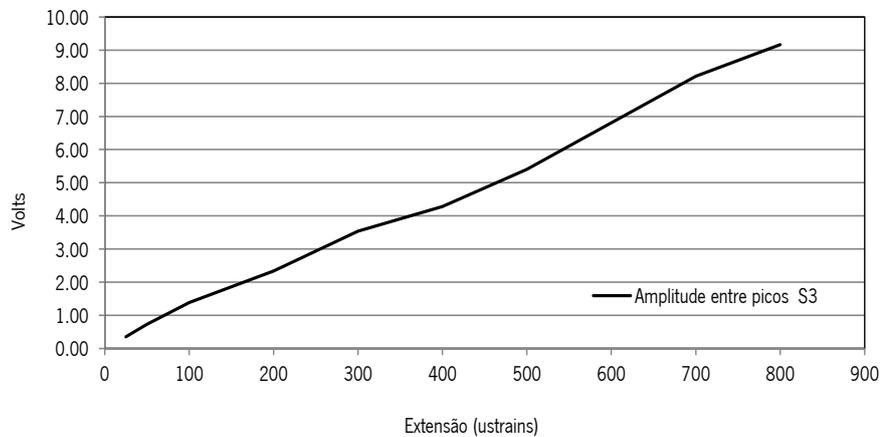


Figura 3.20 – Resposta do material PZT S3 quando sujeito a carregamentos de diferentes amplitudes

3.5.2 Ensaios a amplitude constante igual a 25 μ strain e frequência variada

Nesta série de ensaios foram realizados vários ensaios, todos com uma amplitude de 25 μ strain, a uma frequência que variou desde 1 Hz até 30 Hz. Na Figura 3.21 pode observar-se que os materiais PVDF S1 e S2 apresentam a mesma tendência o que pode indicar que ambos tiveram comportamento idêntico às solicitações. Desta forma, apesar de não se verificar linearidade, também não se conclui que este material não é sensível a amplitudes na ordem dos 25 μ strain.

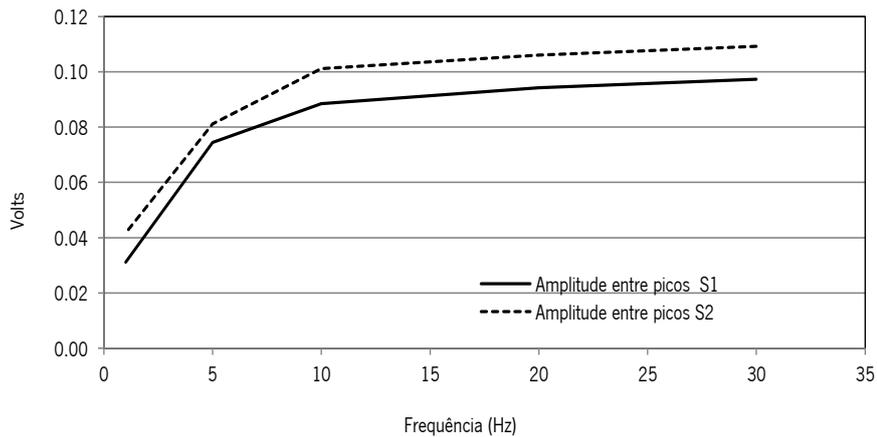


Figura 3.21 – Resposta dos materiais PVDF S1 e S2 a uma amplitude de 25 μ strain e frequência variada

Na viga V2 também foi realizada a mesma série de ensaios a que se sujeitou a viga V1 e o resultado pode ser observado na Figura 3.22. Também aqui não se verifica linearidade da resposta com a variação da frequência, mas pode concluir-se que em termos comparativos este material PZT apresentou um comportamento idêntico em termos de resposta, embora os valores do mesmo sejam maiores, isto devido ao tipo de material.

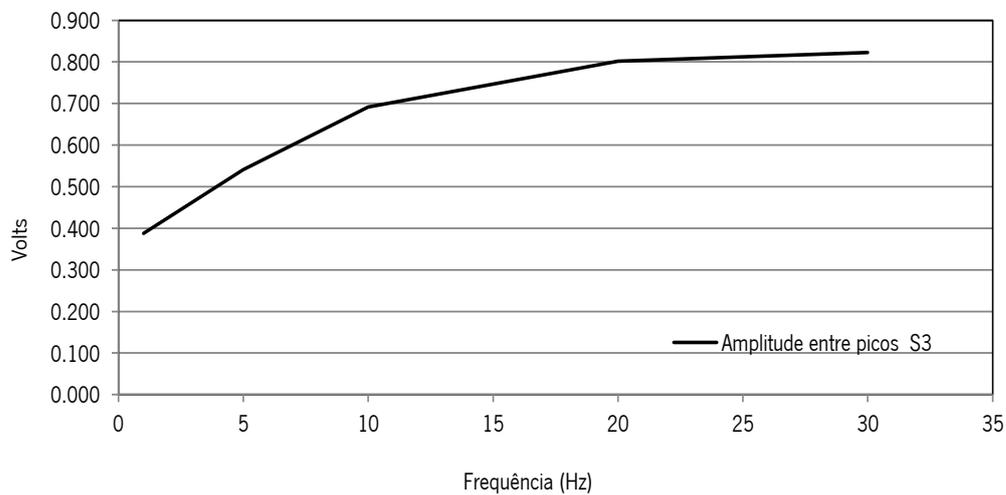


Figura 3.22 - Resposta do material PZT S3 a uma amplitude de 25 μ strain e frequência variada

A falta de linearidade apresentada pelos materiais poderá estar relacionada com o valor da amplitude de 25 μ strain ser muito baixa e poderá ser uma limitação da própria máquina de ensaios. Desta forma, o uso destes materiais poderá sair comprometido para valores iguais ou

inferiores a 25 μ strain.

Relativamente à sensibilidade dos materiais a frequências baixas (1 Hz), os materiais PVDF, S1 e S2 equipados na viga V1 e o material PZT S3 equipado na viga V2, apresentaram bom comportamento a esta frequência quando sujeitos a várias solicitações com diferentes amplitudes.

3.6 Simulação de aplicação de deslocamentos correspondentes a 1 eixo e 3 eixos

Quando um veículo pesado se desloca sobre um pavimento, este deforma-se fletindo e criando em torno de cada pneu uma bacia de deflexões. Esta deformação do pavimento de curta duração provoca zonas de tração e compressão no pavimento (Figura 3.23).

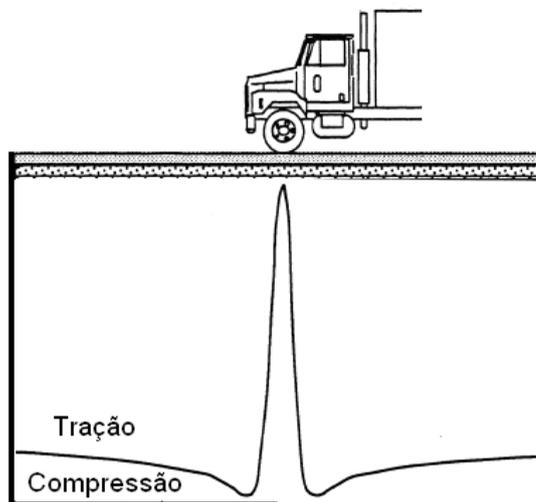


Figura 3.23 – Representação esquemática da deformação do pavimento quando sujeito a uma carga (Gillespie et al. 1992)

Na Figura 3.24 pode observar uma figura idêntica à anterior, mas nesta representa-se a deformação que um pavimento sofre quando solicitado por um veículo de 3 eixos. Nesta figura pode ver-se ainda que nos eixos traseiros, o pavimento não tem tempo de recuperar. Com esta informação foi possível programar estas curvas de deformação em computador (Figura 3.25 e Figura 3.26) e transpô-las para a máquina de ensaios.

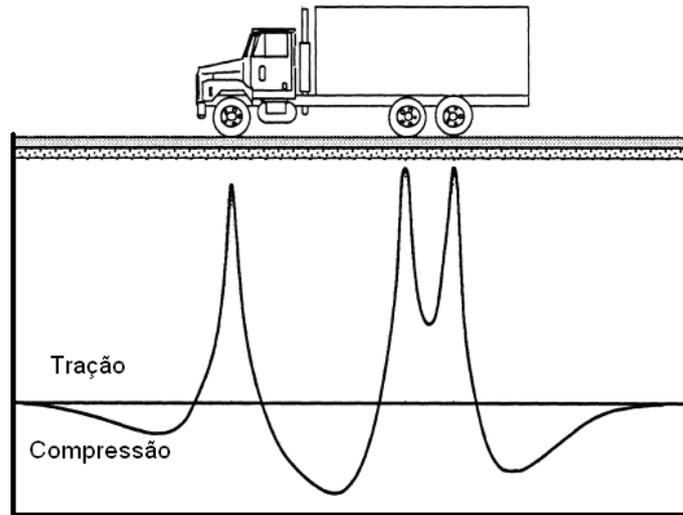


Figura 3.24 – Deformação do pavimento quando solicitado por um veículo com 3 eixos (Gillespie et al. 1992)

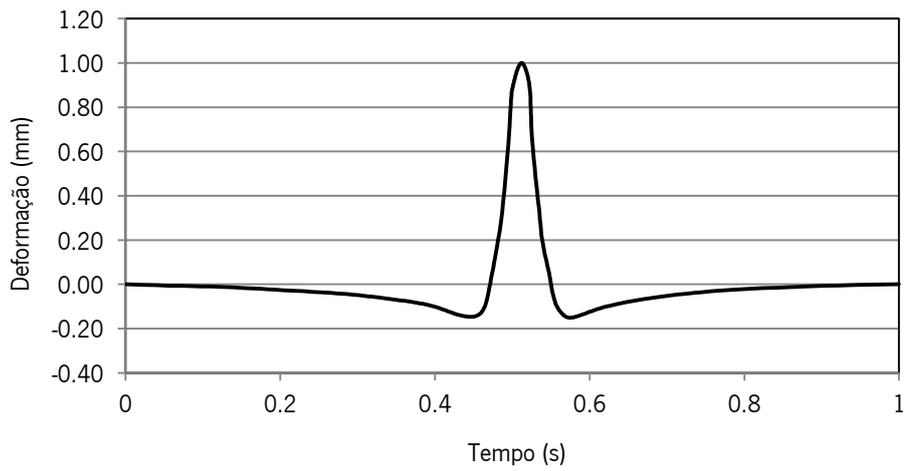


Figura 3.25 – Modelação da curva de deformação correspondente a um eixo

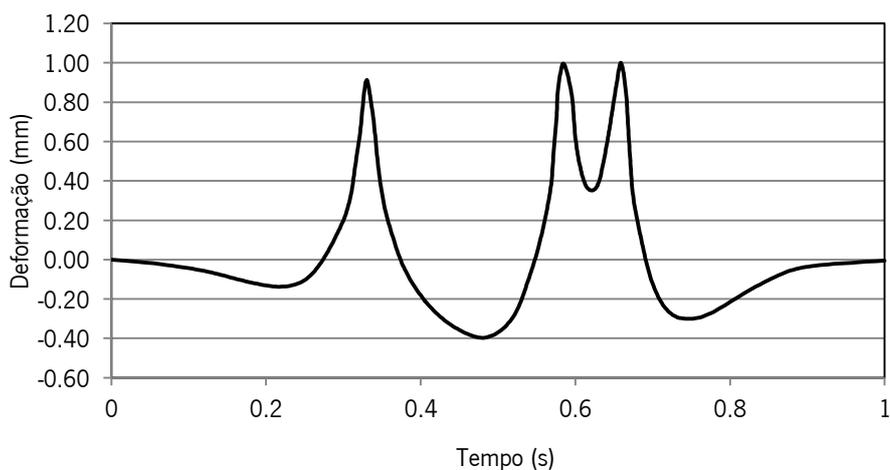
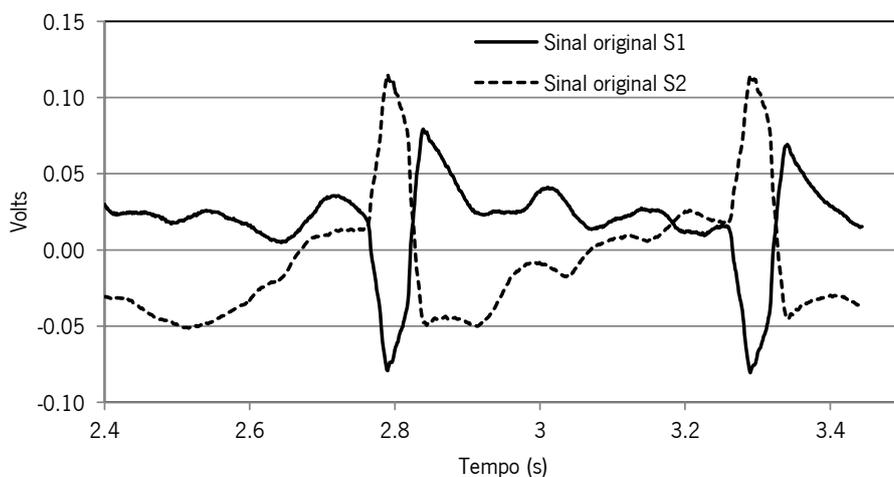


Figura 3.26 - Modelação da curva de deformação correspondente a 3 eixos

Deste modo tornou-se possível testar os materiais piezoelétricos a este tipo de solicitação em laboratório para assim verificar a sua resposta e deste modo antever o seu comportamento num pavimento em condições reais. Adotou-se um valor de deformação igual a 1mm por ser um valor medido à superfície do pavimento bastante elevado e desta forma ver se há resposta dos materiais.

A resposta obtida durante o ensaio em que se simulou a passagem de 1 eixo à extensão de 50 μ strain na viga V1 que contém o material PVDF S1 e S2 pode ser observada na Figura 3.27. Nesta figura apresentaram-se duas repetições para que desta forma fosse possível atestar a repetibilidade dos dois materiais PVDF. As ondas destes materiais estão opostas devido aos mesmos estarem colados na viga em faces opostas.

Figura 3.27 - Resposta dos materiais PVDF S1 e S2 à solicitação de 1 eixo a 50 μ strain

De seguida efetuou-se o mesmo ensaio, aumentando a amplitude da onda para 100 μ strain (Figura 3.28), verificando-se que a forma das ondas é mais bem definida do que no ensaio anterior e sendo aproximadamente o dobro do ensaio anterior. Este facto está relacionado com o aumento da amplitude da onda de 50 μ strain para 100 μ strain.

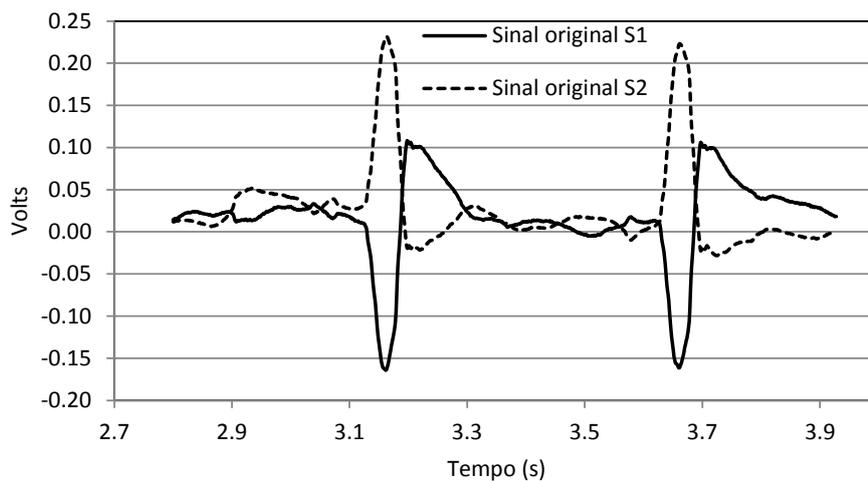
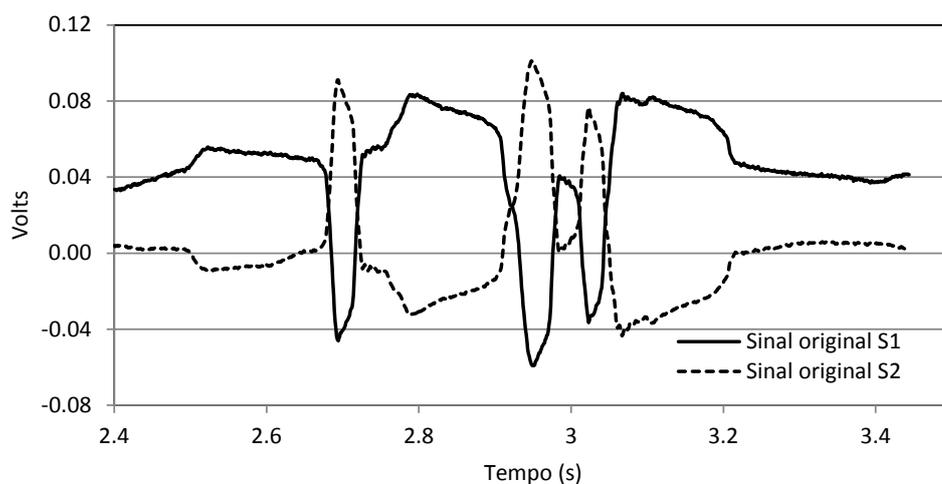
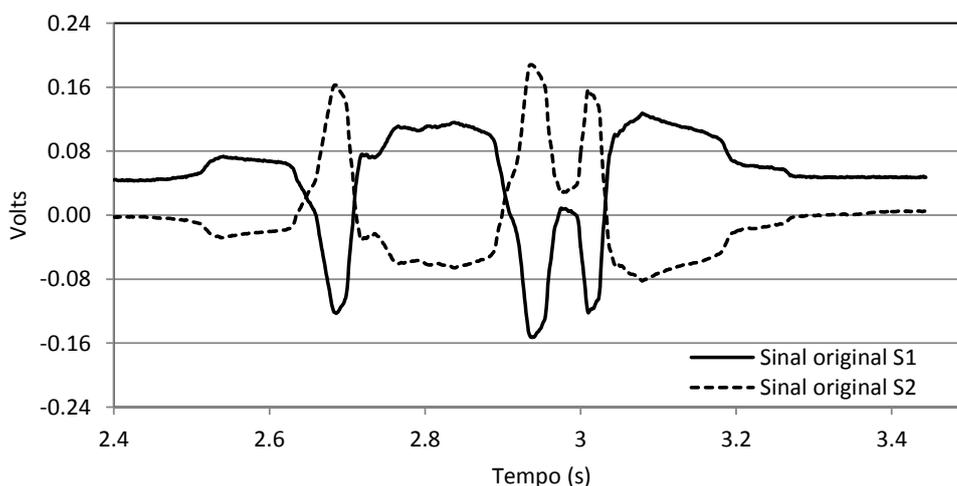


Figura 3.28 - Resposta dos materiais PVDF S1 e S2 à solicitação de 1 eixo a 100 μ strain

Do mesmo modo foi repetida a série de ensaios anterior relativa a 1 eixo, agora para 3 eixos, tendo-se realizado ensaios a 50 μ strain, cujos resultados originais se apresentam na Figura 3.29. Para 100 μ strain verifica-se que a forma das ondas melhorou e a amplitude é aproximadamente o dobro da verificada para 50 μ strain como se pode observar na Figura 3.30. estes resultados demonstram que a resposta é proporcional à extensão a que os materiais piezoelétricos estão sujeitos.

Figura 3.29 - Resposta dos materiais PVDF S1 e S2 à solicitação de 3 eixos a 50 μ strainFigura 3.30 - Resposta dos materiais PVDF S1 e S2 à solicitação de 3 eixos a 100 μ strain

Depois de realizados os ensaios na viga V1 equipada com os materiais PVDF S1 e S2 foram realizados os mesmos ensaios com a viga V2 equipada com matéria PZT S3, para da mesma forma se efetuarem os ensaios de 1 e 3 eixos às amplitudes de 50 e 100 μ strain. Os resultados obtidos encontram-se nas Figura 3.31 e Figura 3.32 respeitantes para os ensaios simulando 1 eixo às extensões de 50 e 100 μ strain, respetivamente. Do mesmo modo se observa nas Figura 3.33 e Figura 3.34 o ensaio às mesmas extensões referidas simulando 3 eixos.

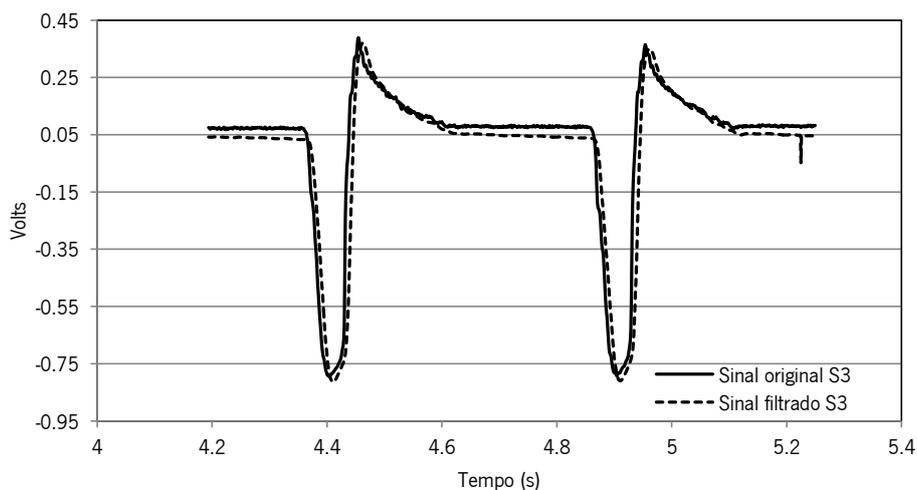


Figura 3.31 – Resposta original e filtrada do material PZT S3 à extensão de 50 μ strain e 1 eixo

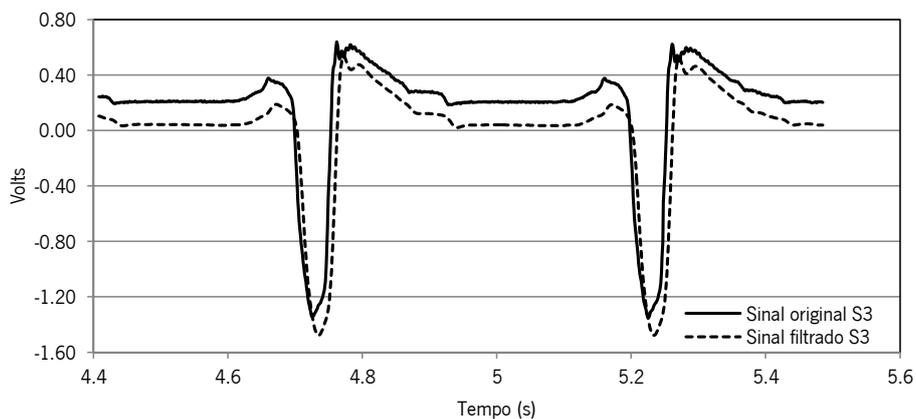


Figura 3.32 - Resposta original e filtrada do material PZT S3 à extensão de 100 μ strain e 1 eixo

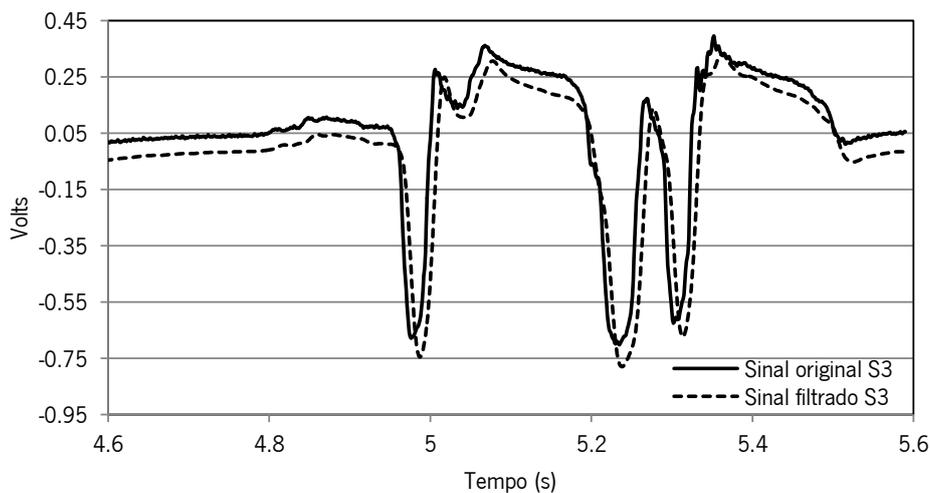


Figura 3.33 - Resposta original e filtrada do material PZT S3 à extensão de 50 μ strain e 3 eixos

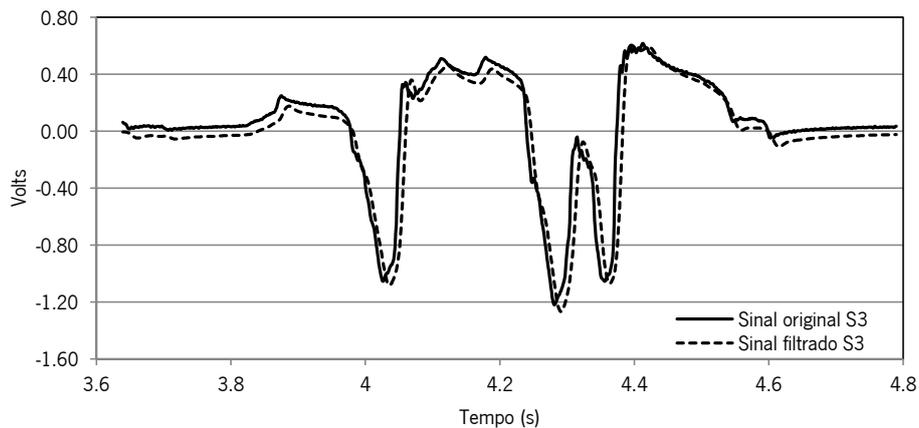


Figura 3.34 - Resposta original e filtrada do material PZT S3 à extensão de 100 μ strain e 3 eixos

Pela análise das figuras acima pode concluir-se que os materiais piezoelétricos aplicados na viga V1 e na viga V2 responderam de forma muito idêntica ao sinal imposto pela máquina de ensaios. Desta forma poder-se-á esperar um bom desempenho dos mesmos quando aplicados numa estrada, para deteção de eixos de veículos que sobre eles circularem.

Destes resultados também se constata que a resposta é proporcional à deformação do pavimento, abrindo possibilidade de utilização destes materiais como sensores na monitorização dos veículos.

**4. Aplicação dos materiais
piezoelétricos numa mistura
betuminosa**

4.1 Introdução

Para determinar a resistência térmica dos materiais piezoelétricos, ou seja, depois de aplicados numa mistura betuminosa quente, verificar se os mesmos continuam a funcionar, assim foi produzida uma mistura betuminosa AC14 em laboratório onde foram instalados os materiais piezoelétricos e ensaiada de modo a medir a resposta dos mesmos quando instalados no interior de uma mistura betuminosa.

A mistura betuminosa onde foram instalados os materiais piezoelétricos foi produzida em laboratório seguindo os procedimentos habituais realizados para este fim. Assim, os agregados para a mistura betuminosa são de origem granítica e foram previamente aquecidos a uma temperatura de 170°C numa estufa (Figura 4.1).



Figura 4.1 – Aquecimento em estufa dos agregados para a mistura

Depois de aquecidos, os agregados são colocados numa misturadora (Figura 4.2) para ai serem misturados com o betume, em média durante 2 minutos.



Figura 4.2 – Temperatura da mistura antes da compactação

Em seguida adiciona-se o betume asfáltico aos agregados (Figura 4.3). O betume usado foi o 50/70 e foi previamente aquecido cerca de 150°C para que desta forma o betume tenha uma determinada viscosidade que permita o envolvimento dos agregados pelo betume no menor tempo possível.



Figura 4.3 – Adição do betume aos agregados na misturadora

A temperatura mais elevada dos agregados é para compensar as perdas térmicas e para que no final da mistura a temperatura da mesma esteja entre os 130 a 140°C. Para temperaturas inferiores a 100°C, a mistura betuminosa já não está em condições de ser aplicada e compactada.

Depois produzida a mistura é medida a temperatura do material (Figura 4.4) de modo a verificar as condições de compactação da mistura betuminosa. No caso em estudo a compactação da mistura betuminosa foi realizada a uma temperatura próxima dos 150 °C de modo a simular as condições mais gravosas que se podem verificar com misturas betuminosas convencionais.



Figura 4.4 – Temperatura da mistura antes da compactação

A compactação da mistura betuminosa foi realizada dentro de um molde metálico com 75 cm de comprimento por 49 cm de largura e 8 cm de espessura (Figura 4.5) utilizando um cilindro de rolo metálico, durante um número de passagens que conduziu à obtenção da densidade definida para a mistura betuminosa.



Figura 4.5 – Molde para compactação de lajes

A instalação dos materiais piezoelétricos foi realizada colocando-os de modo a que ficassem a meio da espessura das vigas que serão serradas da laje de mistura betuminosa. Assim, foi adicionada alguma mistura de modo a que se tivesse cerca de 3 cm de altura de mistura betuminosa ao que se seguiu a colocação dos materiais piezoelétricos (Figura 4.6) sobre a mistura betuminosa, conforme mostra a Figura 4.7.

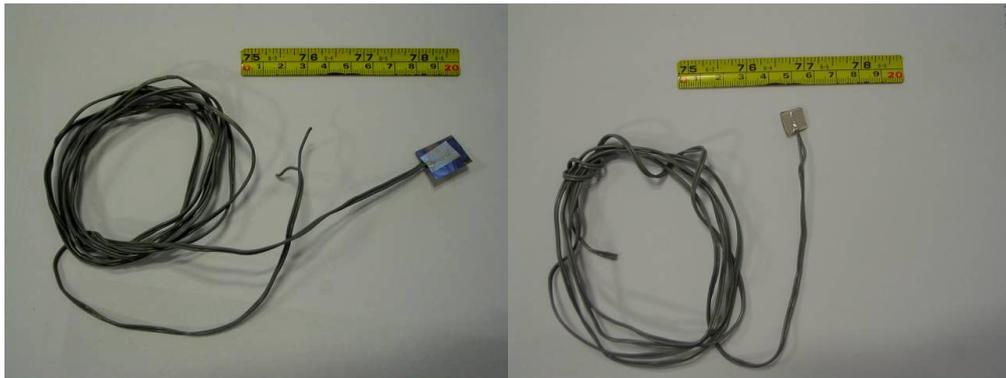


Figura 4.6 – Materiais piezoelétricos a instalar na mistura

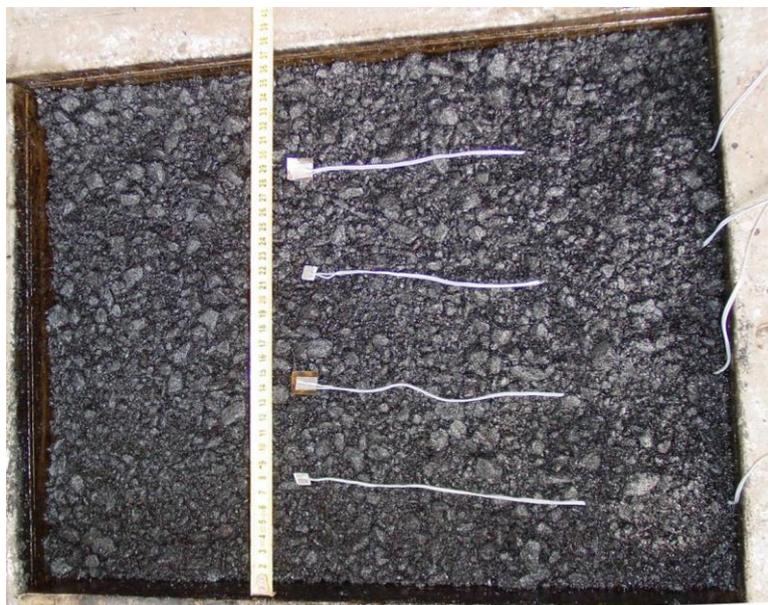


Figura 4.7 – Disposição do material piezoelétrico na mistura

Após a colocação dos materiais piezoelétricos, PVDF e PZT foi adicionado o resto da mistura com vista ao enchimento do molde. De seguida a mistura foi compactada com a ajuda de um cilindro de rasto liso para que toda a mistura fosse colocada dentro do molde de modo a obter a densidade desejada para a mistura betuminosa. Verifica-se ainda na Figura 4.8 os cabos de

cada material que servirão para ajudar a localizar cada um quando forem extraídos os provetes de ensaio por serragem.



Figura 4.8 – Laje compactada no molde

Após arrefecimento total da mistura, a laje foi desmoldada. Normalmente esta tarefa acontece no dia seguinte à execução da laje. Como foi referido anteriormente da laje foram extraídos por serragem provetes de ensaio. Os provetes são prismáticos (Figura 4.9) e com as mesmas dimensões dos anteriormente usados para testar os materiais piezoelétricos a outras solicitações ou seja, 38cm x 6.3cm x 5.1cm. Na mesma figura pode ver-se ainda que os cabos tiveram que ser emendados uma vez que para se serrar os topos das vigas os cabos tiveram que ser cortados.



Figura 4.9 – Provetes prismáticos (vigas) com materiais piezoelétricos incorporados

As vigas antes de ensaio foram numeradas da seguinte forma, as vigas Vb1 e Vb3 continham materiais do tipo polimérico (PVDF) referenciados com S4 e S6 respetivamente, enquanto que as vigas Vb2 e Vb4 continham materiais piezoelétricos do tipo PZT e referenciados como S5 e S7.

4.2 Avaliação da resposta dos materiais piezoelétricos instalados nas vigas

Para avaliação da resposta dos materiais piezoelétricos instalados nas vigas foi novamente utilizado a máquina servo hidráulica para ensaios de fadiga por flexão em 4 pontos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, da marca Cox and Sons, modelo CS7800, utilizada habitualmente para ensaios de fadiga cujo dispositivo de flexão em 4 pontos se apresenta na Figura 4.10.

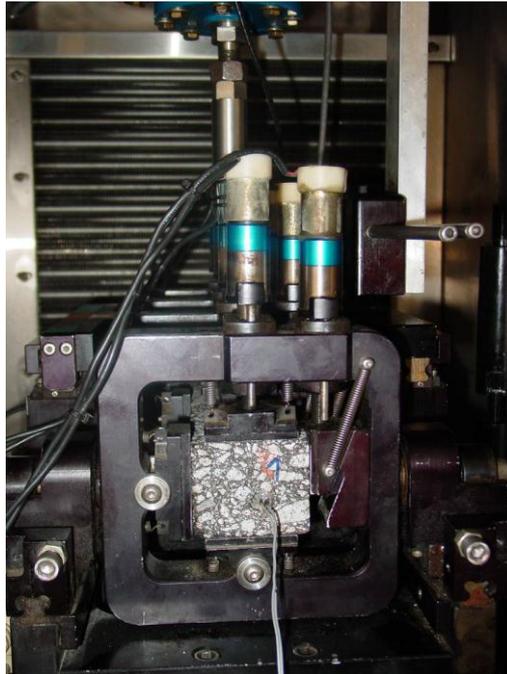


Figura 4.10 – Dispositivo de flexão em 4 pontos

Nesta série de ensaios apenas era importante averiguar a resposta de cada material depois de ter estado sujeito a elevadas temperaturas na altura da instalação e sujeito a elevados esforços de corte durante a compactação. Portanto, todos os ensaios foram realizados apenas a uma temperatura de 20 °C. Além disso foram usados dois níveis de extensão e duas frequências diferentes. Foi usada a extensão de 100 μ strain a uma frequência de 30 Hz e a extensão de 700 μ strain a uma frequência de 10 Hz.

Com estas duas configurações de ensaio pretende avaliar-se se os materiais piezoelétricos são capazes de detetar pequenos movimentos a altas frequências e no caso de não detetarem um outro ensaio é feito com maior amplitude (700 μ strain) em termos de extensão a uma frequência menor (10 Hz).

Pretende-se com estes dois esquemas de ensaios simular a passagem de um veículo ligeiro, baixa carga e elevada velocidade, a que corresponde um pequena extensão e elevada frequência, e a passagem de um veículo pesado, elevada carga e baixa velocidade, o qual simula o pavimento com uma elevada extensão e baixa frequência.

4.2.1 Ensaios das vigas com os materiais piezoelétricos PVDF S4 e S6

Na Figura 4.11 pode observar-se o tipo de sinal medido no material PVDF S4 instalado na viga Vb1. O ensaio foi efetuado à extensão de $100 \mu\text{strain}$ e à frequência de 30 Hz, verificando-se que o material respondeu de acordo com a frequência imposta.

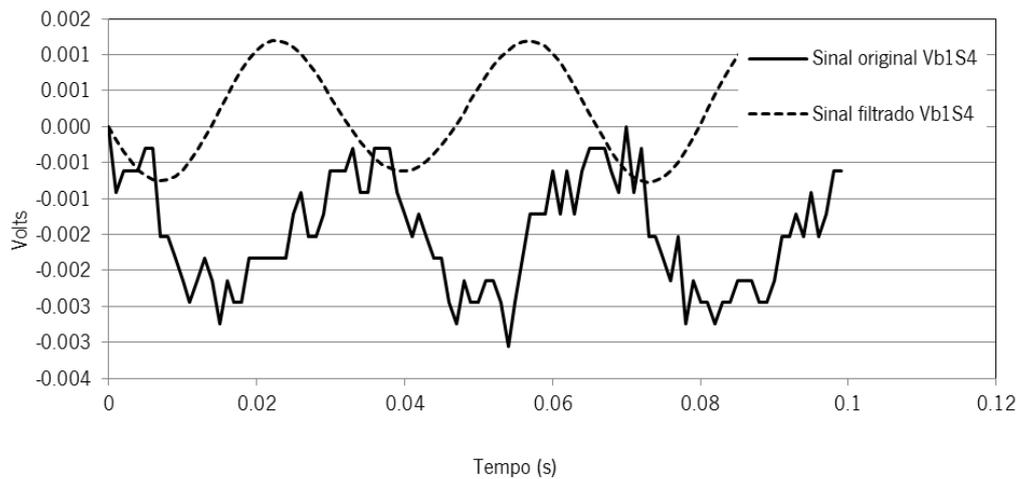


Figura 4.11 – Resposta do material PVDF S4 à extensão de $100 \mu\text{strain}$ e 30 Hz

Na mesma viga foi efetuado o ensaio à extensão maior ($700 \mu\text{strain}$) e à frequência de 10 Hz. Na Figura 4.12 observa-se que a resposta do mesmo material é agora maior e a forma da sinusoidal mais perfeita, devido à maior extensão, sendo que o material responde com um sinal de saída maior, aproximadamente proporcional à extensão aplicada.

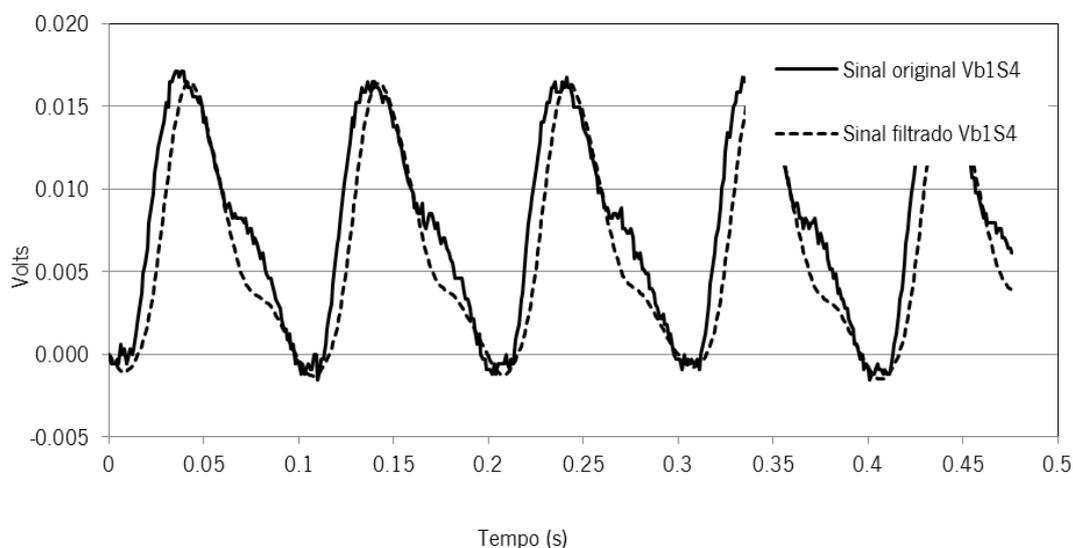


Figura 4.12 - Resposta do material PVDF S4 à extensão de 700 µstrain e 10Hz

De modo idêntico foram realizados os ensaios na segunda viga instrumentada com o mesmo tipo de material (PVDF), a viga Vb3S6. Na Figura 4.13 observa-se a resposta do material para um ensaio a 100 µstrain e na Figura 4.14 pode observar-se a resposta do mesmo material quanto sujeito a uma extensão de tração por flexão de 700 µstrain.

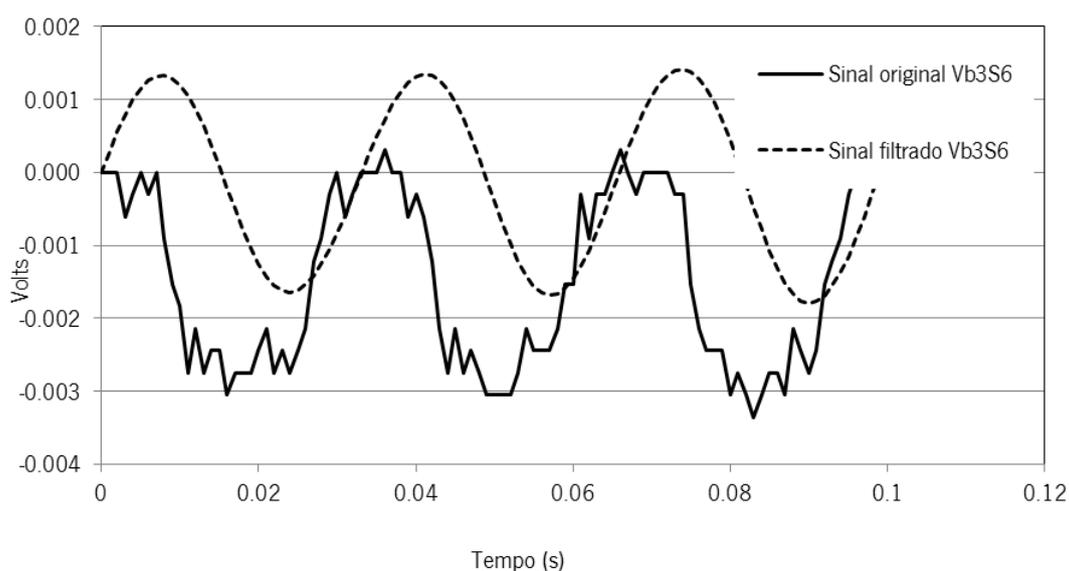


Figura 4.13 – Resposta do material PVDF S6 à extensão de 100 µstrain e 30Hz

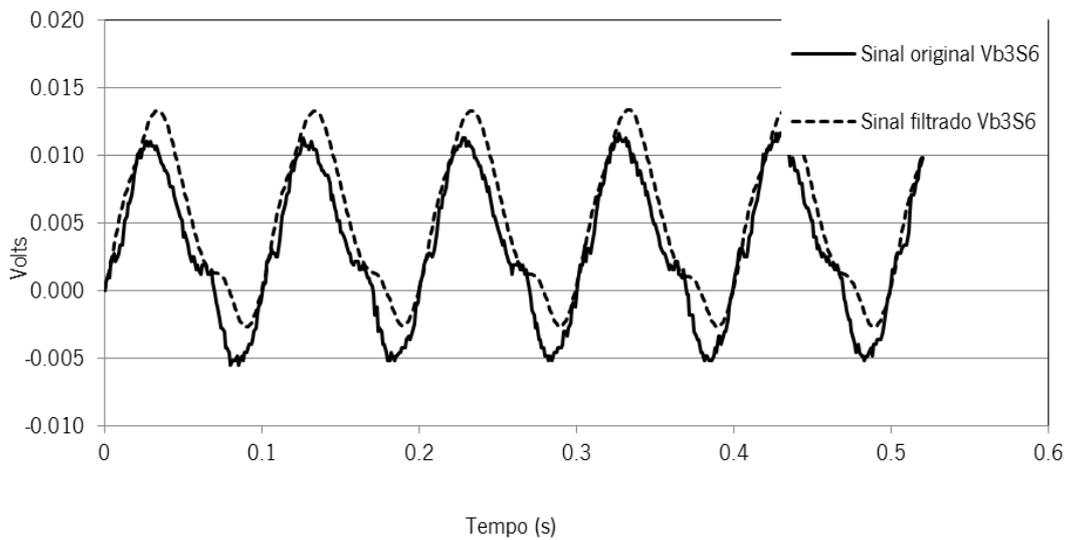


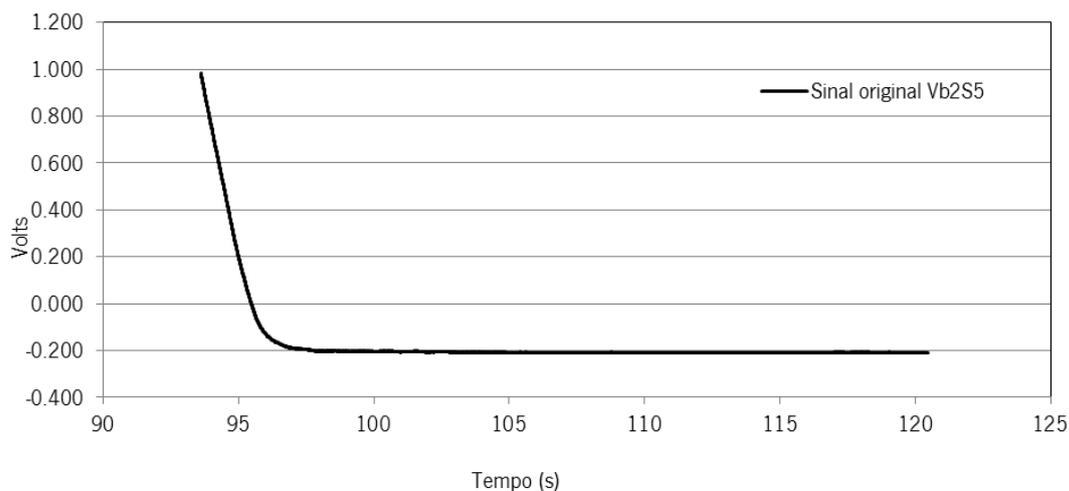
Figura 4.14 – Resposta do material PVDF S6 à extensão de 700 μ strain e 10Hz

Pelas respostas observadas em ambas as vigas, verifica-se que o material teve um comportamento idêntico e tudo indica que as elevadas temperaturas a que esteve sujeito não foi suficiente para danificar os mesmos nas diferentes vigas. Também se verifica que a resposta destes materiais continua a ser proporcional à extensão aplicada.

4.2.2 Ensaios das vigas com material piezoelétrico PZT S5 e S7

Os materiais cerâmicos foram instalados nas vigas Vb2 e Vb4 e também foram sujeitas a dois ensaios cada, como descrito anteriormente, um ensaio realizado à extensão de 100 μ strain e uma frequência de 30 Hz. O outro ensaio foi efetuado à extensão de 700 μ strain e à frequência de 10 Hz.

Na Figura 4.15 pode observar-se que a resposta do material PZT S5 é muito anormal e inconstante no tempo.

Figura 4.15 – Resposta do material PZT S5 à extensão de 100 μ strain e 30 Hz

Com o intuito de verificar com mais pormenor o sinal do material S5, foi feito um gráfico da zona mais estável da resposta do mesmo. Foi possível observar uma sinusoidal (Figura 4.16) mas com o sinal demasiadamente baixo do que o esperado para este material, isto tendo em conta em ensaios anteriores em que este tipo de material apresentou um sinal maior.

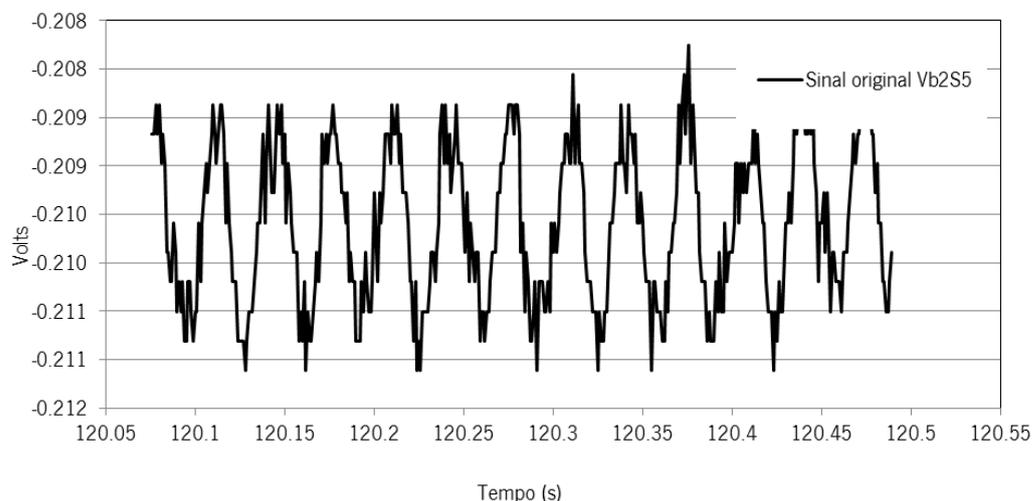


Figura 4.16 – Resposta do material PZT S5 após estabilização do sinal

Da mesma forma para o ensaio a 700 μ strain e 10 Hz o material apresentou o mesmo comportamento, o que indicia que o mesmo possa ter sido destruído durante o processo de

instalação na laje betuminosa (ver Figura 4.17 e Figura 4.18).

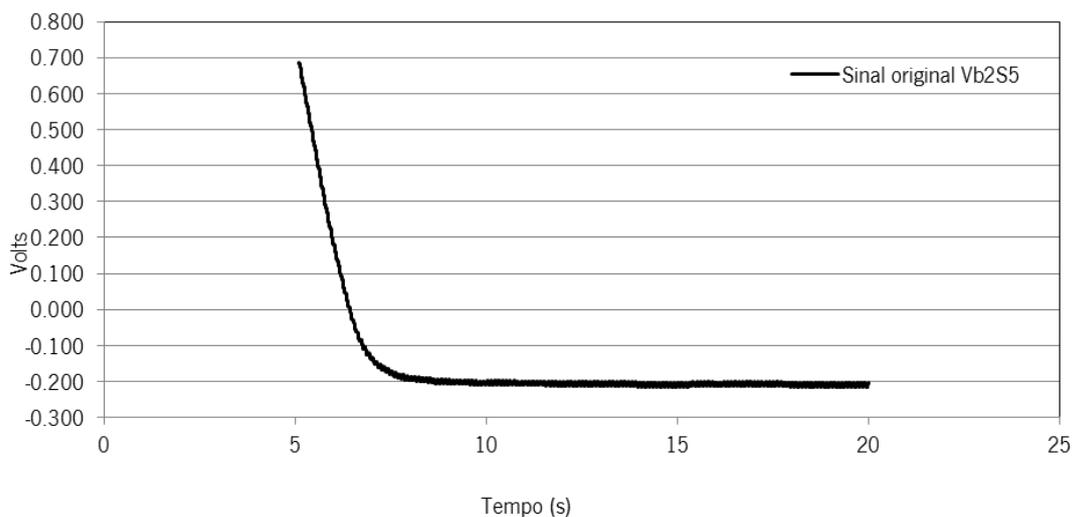


Figura 4.17 – Resposta do material PZT S5 à extensão de 700 μ strain e 10 Hz

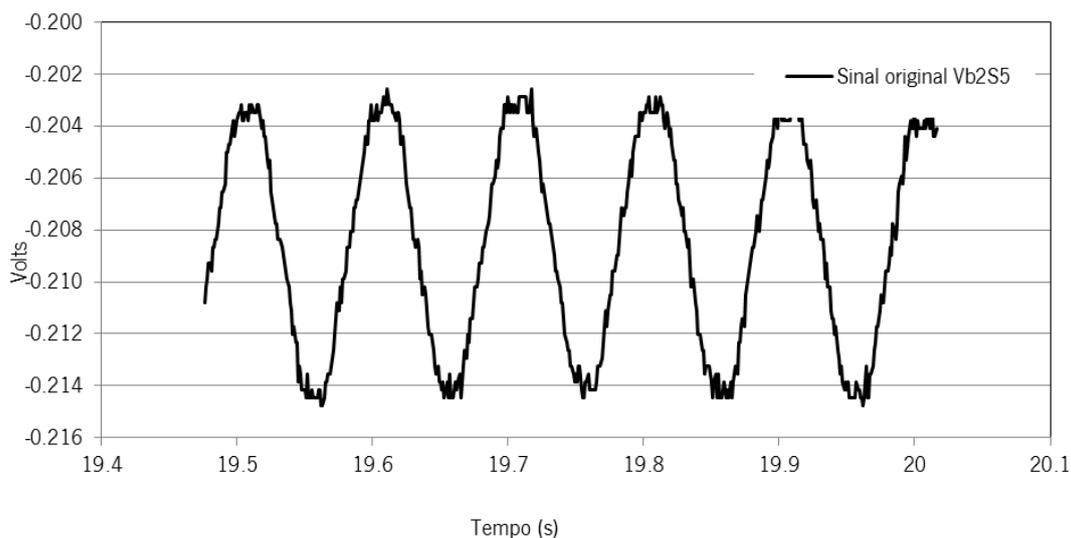
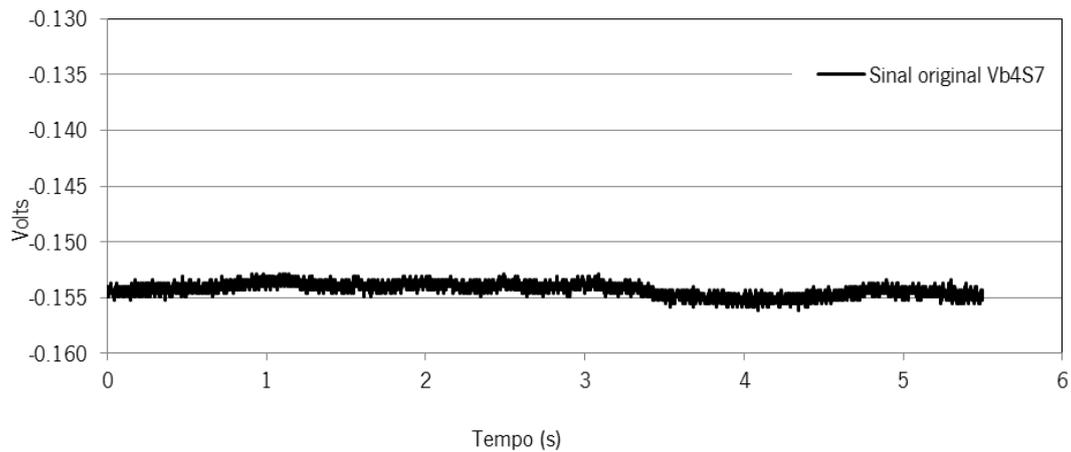
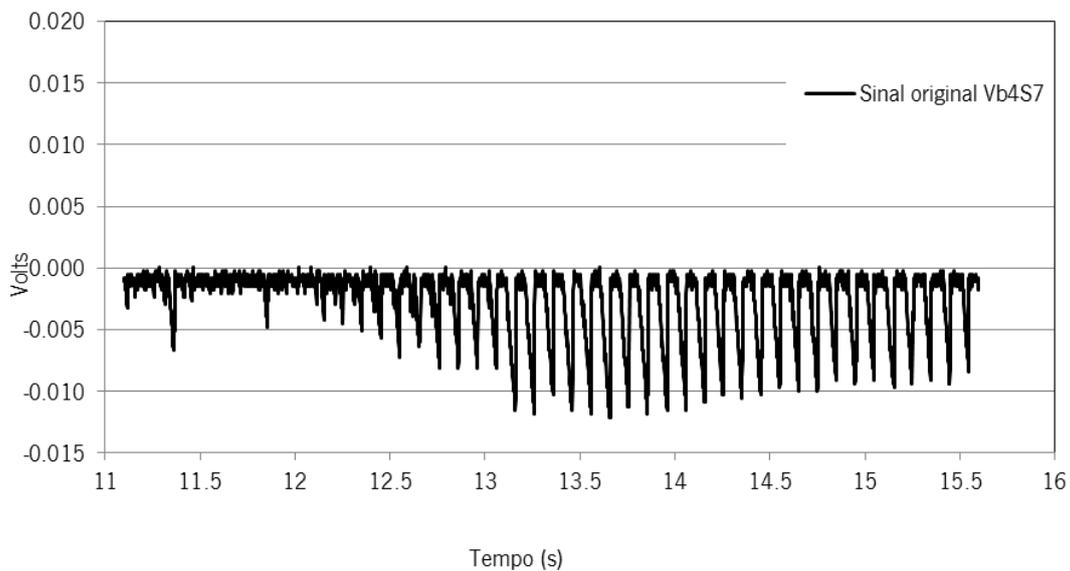


Figura 4.18 – Resposta do material PZT S5 após estabilização do sinal a 700 μ strain

Relativamente à viga V4 também equipada com material piezoelétrico PZT, o S7, foi submetida à mesma série de ensaios, em primeiro um ensaio a 100 μ strain e 30 Hz (Figura 4.19 e Figura 4.20) e depois a um segundo com 700 μ strain de amplitude e 10 Hz. Em ambos os ensaios o material apresentou um comportamento anômalo.

Figura 4.19 – Resposta do material PZT S7 à extensão de 100 μ strain e 30HzFigura 4.20 – Resposta do material PZT S7 à extensão de 700 μ strain e 10Hz

Numa primeira análise pode concluir-se que os materiais piezoelétricos cerâmicos (PZT) foram destruídos durante o processo de instalação no interior da laje.

Foram feitas mais repetições com diferentes configurações de ensaios e temperaturas com vista a modificar o comportamento da mistura betuminosa quando sujeita ao carregamento cíclico e por sua vez induzir um tipo de resposta diferente nos materiais PZT, mas estas tentativas mostraram-se infrutíferas pois o tipo de output dado pelos mesmos nas duas vigas foi sempre idêntico ao já acima descrito, ou seja anómalo.

Relativamente aos materiais piezoelétricos de base polimérica, o seu comportamento foi satisfatório depois de terem sido sujeitos a uma temperatura na ordem dos 150°C.

Após conclusão dos ensaios de validação da aplicação dos materiais piezoelétricos numa mistura betuminosa a quente, as vigas foram colocadas dentro de uma estufa a cerca de 120°C para amolecer a mistura e com cuidado desagregar a viga. Desta forma tentou-se verificar o estado dos materiais piezoelétricos depois de sujeitos a elevadas temperaturas e elevados esforços mecânicos devido à compactação com o cilindro de rasto liso.

Na Figura 4.21 e Figura 4.22 apresenta-se o aspeto dos materiais piezoelétricos poliméricos e materiais piezoelétricos cerâmicos respetivamente retirados do interior das vigas de mistura betuminosa.

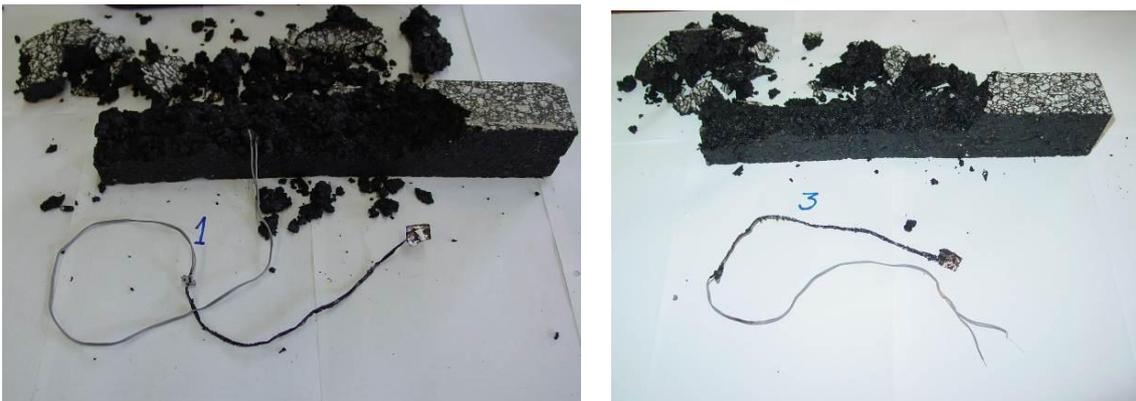


Figura 4.21 – Aspeto dos materiais poliméricos (PVDF) depois de retirados das vigas

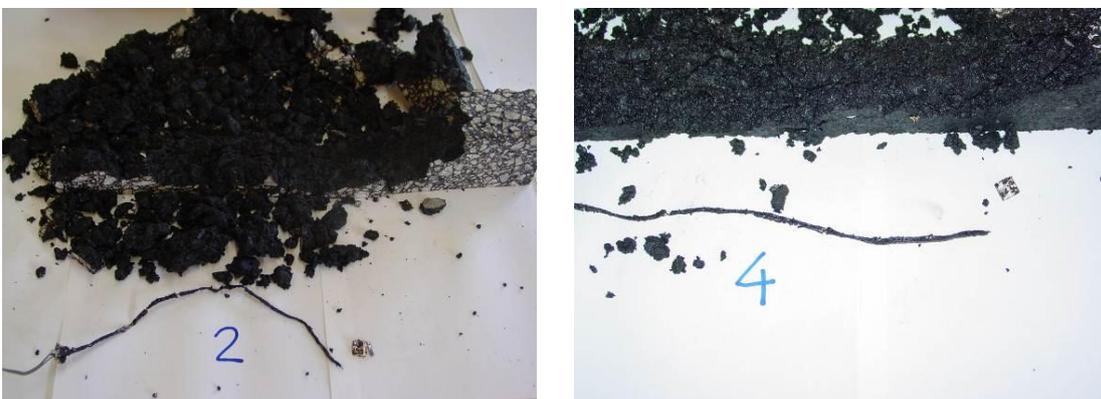


Figura 4.22 – Aspeto danificado dos materiais cerâmicos (PZT) (cabo soltou-se do material)

Depois de retirados os materiais do interior das vigas foi possível observar que o cabo utilizado para trazer o sinal desde os mesmos até à placa de aquisição de dados derreteu o seu revestimento em algumas zonas, mas não foi visível nas partes expostas que as mesmas estivessem em curto-circuito, assim pode considerar-se que apesar de derretidos os cabos não influenciaram as medições feitas aos materiais piezoelétricos.

Foi ainda possível observar que nas vigas V1 e V3 os materiais piezoelétricos PVDF de origem polimérica ficaram deformados devido ao calor que se fez sentir durante a compactação da mistura betuminosa e também devido ao esforço de compactação aplicado pelo cilindro.

Relativamente aos materiais piezoelétricos PZT instalados nas vigas V2 e V4, de origem cerâmica, observou-se que os mesmos se soltaram do cabo e além disso, um deles estava partido. Este facto pode dever-se à rigidez que estes materiais apresentam e também devido à mistura, ao ser compactada, apresentar movimentos que não foram acompanhados pelos materiais PZT o que originou no desprendimento do cabo e na fratura num dos materiais.

Pela análise visual foi assim possível concluir que os cabos utilizados terão de ter um revestimento resistente a altas temperaturas para que consigam resistir a todo o processo de colocação e compactação da mistura. Além disso, seria de todo aconselhável que os mesmos tivessem também revestimento em malha de aço na parte externa para melhor resistir aos esforços de corte durante o processo de compactação.

Os materiais piezoelétricos de origem polimérica apresentaram uma deformação devida às altas temperaturas e esforços de compactação. Esta deformação demonstrou ser favorável em comparação com os materiais piezoelétricos de origem cerâmica uma vez que não apresentaram desprendimento do cabo nem fraturaram.

***5. Instalação dos materiais
piezoelétricos num trecho
experimental***

5.1 Instalação dos materiais piezoelétricos

Para validação de todos os ensaios realizados em laboratório, nomeadamente ensaios realizados nas vigas DELRIN, para testar a vida à fadiga e comportamento térmico dos materiais piezoelétricos e ensaios realizados em vigas de mistura betuminosa para verificar a resistência dos materiais às altas temperaturas da mistura betuminosa durante a sua aplicação, seria de todo importante que os mesmos fossem testados numa situação real de tráfego.

Assim foi escolhido um local no concelho de Guimarães, na estrada nacional, EN 206, numa zona reta, conforme se pode verificar na Figura 5.1.



Figura 5.1 – Aspeto geral do local escolhido para instalação dos materiais piezoelétricos (EN206)

Antes de se proceder à instalação dos materiais foi definido em laboratório que a instalação se processaria em 3 profundidades diferentes, para se estudar o comportamento dos materiais com a profundidade e além disso seriam colocados nas 3 profundidades um material de cada tipo, ou seja, um material piezoelétrico polimérico (PVDF) e outro cerâmico (PZT). Na Figura 5.2 pode observar-se os 3 materiais poliméricos (à esquerda na figura) e os 3 materiais cerâmicos (à direita na figura).

Relativamente às profundidades, dado o tipo de estrada em que se previa que a espessura betuminosa rondaria os 10 cm, foram assim escolhidas as profundidades de 10 cm, 5 cm e

1 cm para a instalação dos materiais piezoelétricos.



Figura 5.2 – Materiais piezoelétricos instalados no pavimento da estrada às várias profundidades

Para a instalação foi necessário algum equipamento de uso comum na área dos pavimentos rodoviários, como uma caroteadora (Figura 5.3), utilizada para através da extração de um carote abrir o orifício para a instalação dos materiais, bem como o orifício para acomodação dos cabos dos mesmos na berma. O orifício feito em estrada distava da linha da berma cerca de 90 cm, uma vez que é esta a distância característica de passagem do rodado direito da maioria dos veículos.



Figura 5.3 – Caroteadora, equipamento usado para extração de carotes do pavimento

De seguida foi necessário abrir um rasgo entre o orifício da estrada e o orifício da berma, com recurso a uma rebarbadora equipada com um disco diamantado e ainda com um sistema que permitia a regulação da profundidade do rasgo, como se verifica na Figura 5.4.



Figura 5.4 – Abertura de rasgo entre os dois furos para colocação dos cabos dos materiais piezoelétricos

Depois destas operações foram retirados os carotes dos locais caroteados e foi limpa toda a área para que a operação de instalação dos materiais piezoelétricos fosse feita nas melhores condições. Os materiais foram referenciados do seguinte modo: de 1 a 3 correspondem aos materiais piezoelétricos poliméricos e do 4 ao 6 correspondem aos materiais piezoelétricos cerâmicos. Ficou ainda definido que os materiais 1 e 4, PVDF e PZT respectivamente, ficariam à profundidade de 10 cm, o 2 e 5 à profundidade de 5 cm e por último o 3 e o 6 à profundidade de apenas 1 cm.

Depois de bem limpo o orifício, foram instalados os primeiros dois materiais piezoelétricos, PVDF e PZT como se observa na Figura 5.5.



Figura 5.5 – Materiais piezoelétricos 1 e 3 na base do furo (10 cm de profundidade)

De seguida foi adicionada mistura betuminosa previamente aquecida para tapar parcialmente o furo até que o mesmo ficasse com uma profundidade de 5 cm onde seriam colocados os materiais 2 e 5 (Figura 5.6).



Figura 5.6 – Colocação de mistura sobre os materiais piezoelétricos

De seguida repetiu-se o mesmo processo com adição de mistura para cobrir os materiais piezoelétricos 2 e 5 e até à profundidade de 1 cm, onde foram colocados os últimos materiais de cada tipo, PVDF e PZT ou seja o 3 e o 6. Nesta fase final foi adicionada uma rega de colagem nos bordos do orifício para permitir que a mistura adicionada ficasse bem colada à mistura existente e em parte permitir a impermeabilização do furo, conforme se ilustra na Figura 5.7.



Figura 5.7 – Colocação dos materiais piezoelétricos 3 e 6 a 1cm de profundidade

Além dos materiais piezoelétricos em estudo, foi ainda instalado um sensor de temperatura termopar do tipo K à profundidade de 5 cm para que a temperatura do pavimento fosse monitorizada durante os ensaios. No final, todos os cabos foram encaixados no rasgo que liga os dois orifícios e fechado com betume asfáltico (Figura 5.8).



Figura 5.8 – Colocação dos cabos no rasgo e selagem do rasgo com betume asfáltico

Na Figura 5.9 apresenta-se o aspeto final, embora ainda com algum pó, da zona onde os materiais piezoelétricos foram instalados.



Figura 5.9 – Aspeto final depois da instalação dos materiais PVDF e PZT na estrada

5.2 Avaliação da resposta dos materiais piezoelétricos instalados na estrada

Para a avaliação da resposta dos materiais piezoelétricos foi usada a mesma aquisição de dados dos ensaios de laboratório, mas desta vez alimentada através de um conversor de tensão DC/AC de 12 Volts DC de uma bateria de carro para 220 Volts. Desta forma foi possível ter a aquisição de dados juntamente com o computador portátil a funcionar à tensão normal de alimentação destes equipamentos (Figura 5.10).



Figura 5.10 – Equipamento usado na aquisição de dados no trecho

Para testar os materiais piezoelétricos a diferentes velocidades, houve a necessidade, em primeiro lugar de se conhecer a velocidade de circulação do veículo e em segundo de preferência usar sempre o mesmo veículo para não introduzir demasiadas variáveis nos resultados. Assim, o veículo disponível para o efeito foi um carro ligeiro de passageiros, de marca Seat e modelo Ibiza, conforme se pode observar na Figura 5.11.



Figura 5.11 – Veículo usado em alguns ensaios

Para interpretação e armazenamento de resultados foi desenvolvido um software em LabView (Figura 5.12) que permitiu em tempo real observar o comportamento dos materiais piezoelétricos a todas as profundidades, bem como o armazenamento dos mesmos no disco rígido do computador para posterior análise.

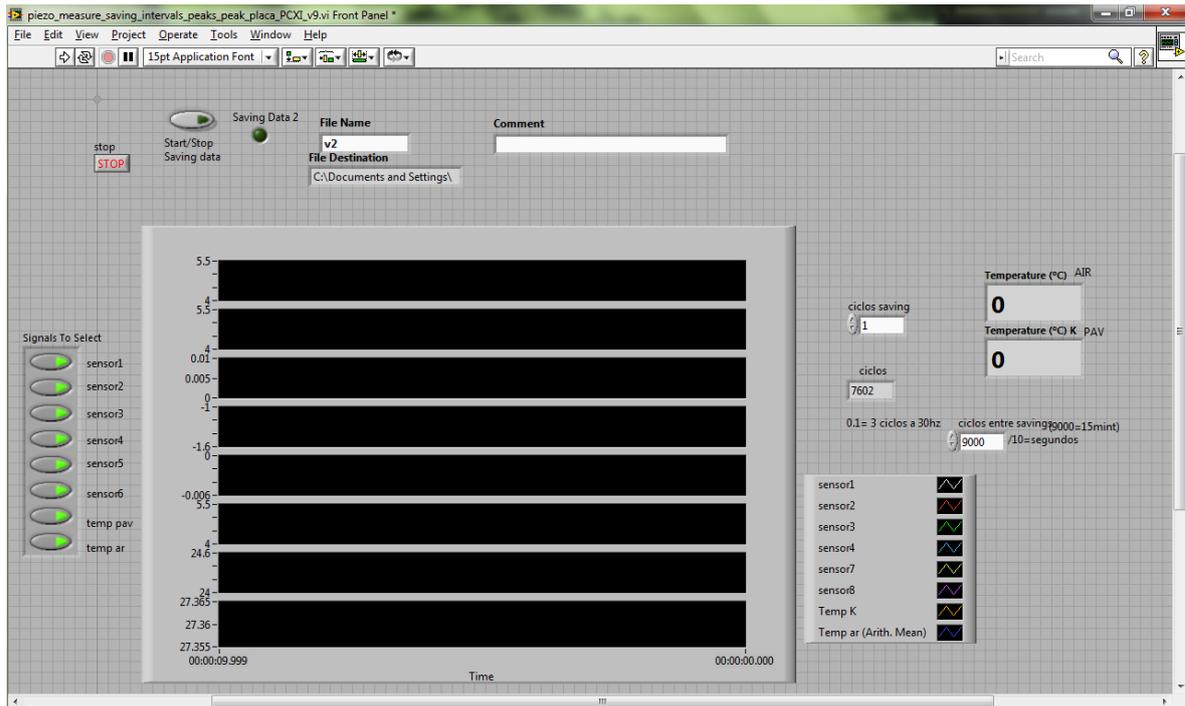


Figura 5.12 – Painel frontal do software de aquisição de dados usado nos ensaios

Depois de configurado todo o sistema, faltava ajustar os parâmetros de aquisição de dados, ou seja, a amplitude do sinal que seria esperado dos dois tipos de materiais e a diferentes profundidades, o número de amostras a recolher e a taxa de aquisição. Após algumas passagens com o veículo foi possível definir desta forma os parâmetros acima descritos e que se apresentam na Figura 5.13.

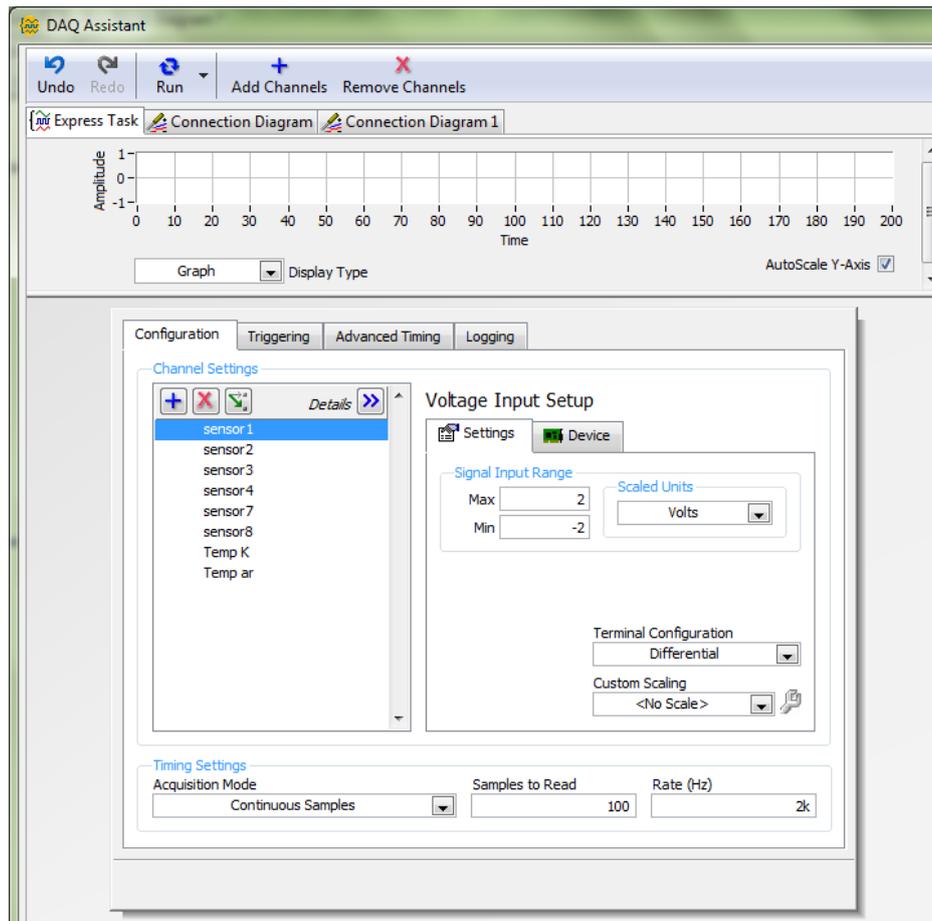


Figura 5.13 – Painel de configuração para aquisição de dados

Com esta configuração para colheita de dados foi possível iniciar os ensaios para verificar o funcionamento dos materiais PVDF e PZT. Desta forma, a seguir apresenta-se a resposta dos materiais relativos a uma primeira passagem com o veículo de testes, Seat Ibiza. Para uma melhor observação, apresentam-se os sinais relativos aos materiais piezoelétricos, PVDF e PZT à mesma profundidade. Assim, na Figura 5.14 apresenta-se a resposta de um PVDF e de um material PZT à profundidade de 10 cm. A esta profundidade a amplitude do sinal é muito baixa quase não se fazendo perceber, em contrapartida, na Figura 5.16 pode observar-se a resposta também de um material de cada tipo à profundidade de 1 cm. A esta profundidade, o sinal apresenta uma amplitude bem maior e além disso nota-se o efeito de proximidade da roda pelo tipo de pico apresentado num dos materiais.

Por último, à profundidade de 5 cm (Figura 5.15) o sinal é mais estável e a sua amplitude apresenta valores compreendidos entre os valores da amplitude à profundidade de 10 cm e 1 cm.

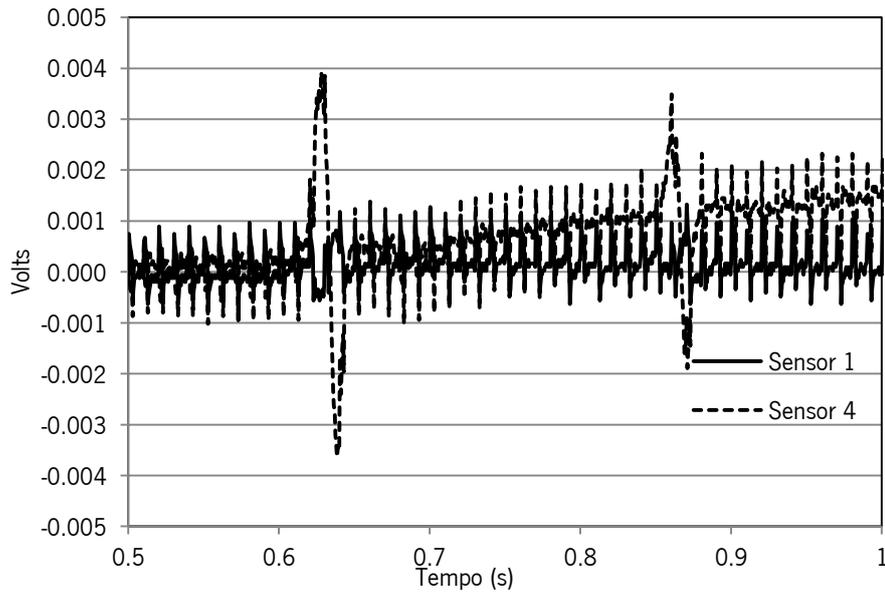


Figura 5.14 – Resposta dos materiais 1 (PVDF) e 4 (PZT) a 10 cm de profundidade

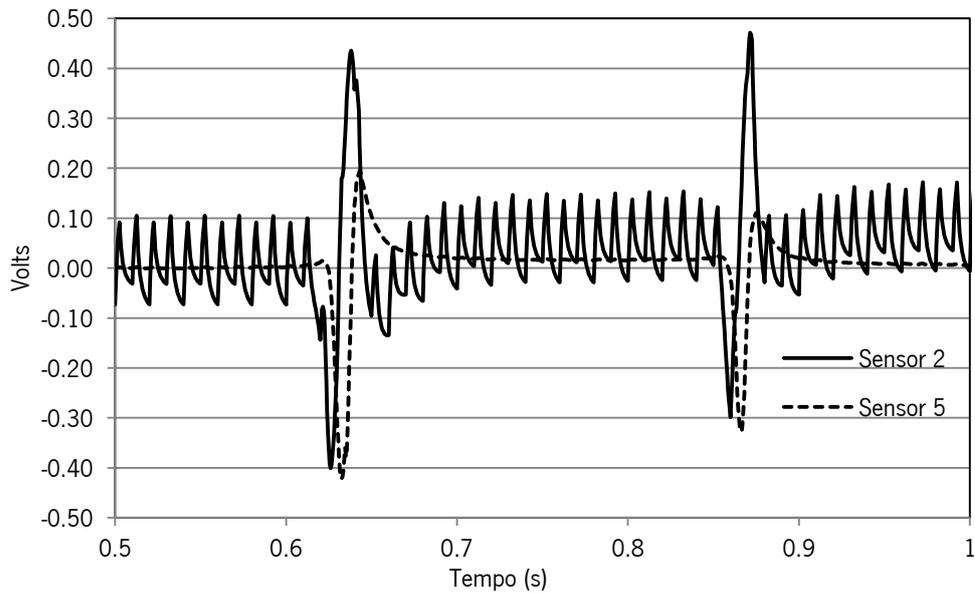


Figura 5.15 – Resposta dos materiais 2 (PVDF) e 5 (PZT) a 5 cm de profundidade

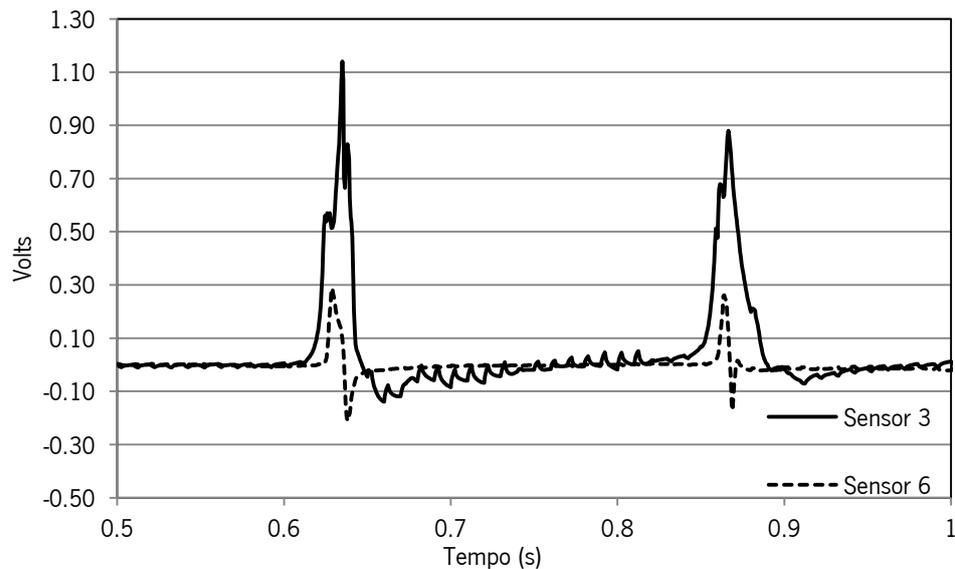


Figura 5.16 – Resposta dos materiais 3 (PVDF) e 6 (PZT) a 1 cm de profundidade

Perante os resultados acima apresentados pode concluir-se que todos os materiais piezoelétricos funcionaram aquando da passagem do veículo de testes. Além disto, todos os materiais responderam em correspondência com a profundidade a que se encontram. Também é notória a diferença entre o sinal apresentado pelos materiais piezoelétricos poliméricos e os materiais piezoelétricos cerâmicos, os últimos apresentam um sinal com baixo nível de “ruído”, especialmente para as profundidades de 5 cm e 10 cm.

Os materiais piezoelétricos poliméricos apresentam um nível de “ruído” mais elevado e nesta fase não se aplicou qualquer tipo de filtro aos sinais para se perceber exatamente qual a resposta de cada tipo de material a todas as profundidades e além disso poderá não ser correto filtrar o que em primeira análise se julga ser ruído.

Pode ainda nesta fase preliminar adiantar-se que pela observação dos sinais poderá ser possível diferenciar qualitativamente a passagem de diferentes eixos. O veículo de testes, ligeiro de passageiros, com motor à frente e apenas com o condutor, é espectável que o eixo frontal apresente mais carga que o traseiro. Assim, às profundidades de 5 cm e 1 cm é possível verificar essa diferença qualitativa entre o primeiro pico que corresponde à passagem do eixo dianteiro e o segundo pico correspondente à passagem do eixo traseiro.

No seguimento do parágrafo anterior, na Figura 5.17 apresenta-se a resposta de todos os

materiais a todas as profundidades durante a passagem de um veículo pesado de mercadorias com 5 eixos.

É possível verificar que os materiais a todas as profundidades detetaram todos os eixos do camião.

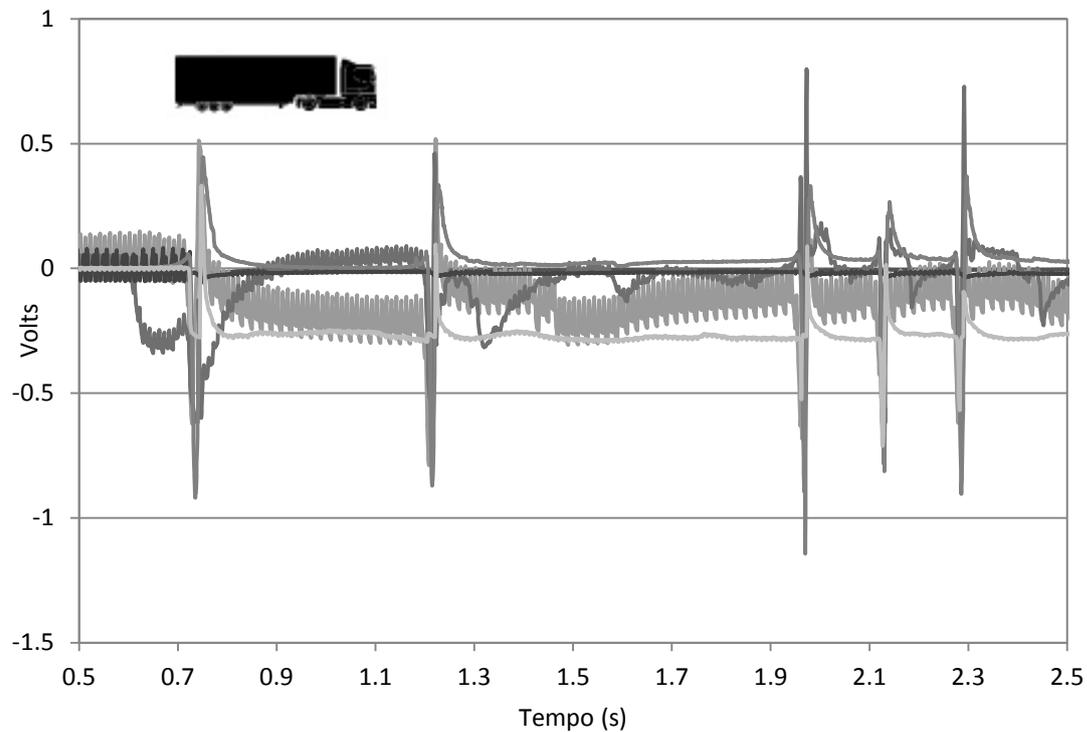


Figura 5.17 – Resposta dos materiais PVDF e PZT nas diferentes profundidades à passagem de um veículo pesado de mercadorias

Na Figura 5.18 apresenta-se um exemplo semelhante ao anterior, mas com um veículo pesado de tipologia diferente com 3 eixos, ou seja, um pesado de mercadorias com semi-reboque, onde se pode verificar não só a resposta dos materiais piezoelétricos para cada eixo mas também as amplitudes dos sinais correspondentes a cada eixo. Pela análise da figura, é possível afirmar que o eixo frontal é o eixo de menor carga e o eixo traseiro do camião é o que recebe a maior contribuição de carga não só do camião como também recebe influência de parte da carga do semi-reboque. Assim verifica-se que a amplitude dos sinais relaciona-se com a carga de cada eixo do veículo pesado.

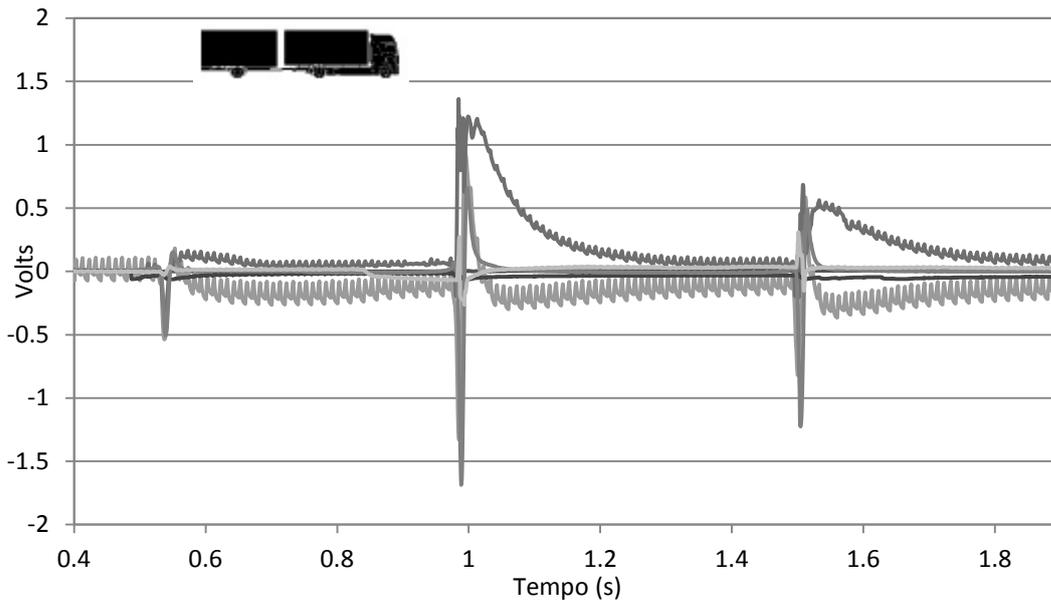


Figura 5.18 – Resposta dos materiais PVDF e PZT à passagem de um veículo pesado com semi-reboque

5.3 Avaliação do comportamento dos materiais piezoelétricos como sensores a diferentes velocidades e profundidades

Depois de verificado o funcionamento de todos os materiais piezoelétricos com a passagem de veículos ligeiros e pesados, houve a necessidade de tentar perceber melhor a resposta dos mesmos como sensores. Uma das propriedades que se testou foi a sensibilidade dos materiais quando o veículo de testes circulava sobre eles a diferentes velocidades. Além desta experiência, pretendeu-se ainda perceber melhor de que forma se comportam os materiais piezoelétricos em profundidade, ou seja, comparando o funcionamento dos dois tipos de material às três profundidades. Assim recorreu-se a resultados de várias passagens do veículo de testes sobre os materiais PVDF e PZT a velocidades desde 30 km/h a 70 km/h. Na Tabela 5.1 apresentam-se os resultados para 3 velocidades, 40 km/h, 50 km/h e 70 km/h, que após análise dos resultados apresentaram menor variabilidade em relação às restantes velocidades. Com base nos valores do pico que cada material exibiu perante a passagem de cada roda do veículo sobre os mesmos, calculou-se a média, o desvio padrão, e o coeficiente de variação para cada tipo de material nas diferentes profundidades e para cada velocidade.

Tabela 5.1 – Valores do pico de voltagem para cada tipo de material

Material	Valores de pico (volts)						Velocidade (km/h)
	1	2	3	4	5	6	
Desv. Pad.	0.0012	0.111	0.393	0.0086	0.015	0.106	40
média	0.0017	0.421	0.599	0.0099	0.386	0.211	
Coef. Varia.	72.853	26.44	65.63	87.138	3.845	50.19	
Desv. Pad.	0.0144	0.198	0.33	0.0606	0.121	0.138	50
média	0.0119	0.679	0.982	0.0489	0.353	0.23	
Coef. Varia.	121	29.22	33.61	124.05	34.23	60.14	
Desv. Pad.	0.0012	0.115	0.599	0.0372	0.133	0.094	70
média	0.0024	0.44	0.905	0.0493	0.432	0.137	
Coef. Varia.	50.938	26.14	66.17	75.337	30.87	68.72	

Como se verifica na Tabela 5.1, os dados apresentam alguma variabilidade, facto que poderá dever-se à roda não passar sempre no mesmo local, ou seja, em cima do ponto onde se encontram os materiais piezoelétricos. Verificou-se no decorrer dos ensaios que essa tarefa era difícil em fazer passar a roda exactamente em cima do orifício onde se encontravam os materiais piezoelétricos e foi possível perceber no sinal de saída que essa excentricidade era perceptível.

Por último na Tabela 5.1 pode verificar-se que para as 3 velocidades analisadas, o coeficiente de variação é menor para os materiais piezoelétricos 2 (PVDF) e 5 (PZT), os quais se encontram à profundidade de 5 cm. Desta forma pode concluir-se que nestas condições, de entre as profundidades estudadas, 1 cm, 5 cm e 10 cm, foi a profundidade de 5 cm que revelou ser aquela que conduziu a menor variabilidade do sinal medido.

5.4 Avaliação do comportamento dos materiais piezoelétricos como geradores de energia eléctrica

Os materiais piezoelétricos usados neste estudo, como referido ao longo deste trabalho, têm a particularidade de transformar outras formas de energia desaproveitadas em energia eléctrica. Neste estudo pretende-se também avaliar de que modo a energia despendida pelos veículos ao deformar os pavimentos pode ser transformada e armazenada noutra fonte de energia para

posterior utilização noutras aplicações. De salientar que este tipo de transformação de energia não interfere em nada com o normal deslocamento dos veículos, ou seja, não introduz qualquer aumento na dificuldade de rolamento das rodas sobre a superfície, aproveitando apenas o facto da deformação mecânica do pavimento deformar o material piezoelétrico e desta forma gerar energia elétrica.

Assim para melhor se perceber a possibilidade de utilização estes materiais como geradores, foi realizada uma primeira análise aos materiais instalados às 3 profundidades. Além disso foram feitas análises aos ensaios anteriormente feitos em laboratório, ensaios realizados aos materiais colados numa viga de delrin e aos materiais incorporados numa mistura betuminosa em laboratório.

Assim, na Tabela 5.2 apresentam-se os resultados dos ensaios realizados ao longo deste trabalho bem como todas as condições associadas a cada ensaio.

Tabela 5.2 – Condições de ensaio e valores da voltagem para cada material

Provete de ensaio			Piezoelétrico		Dist. ao eixo neutro	Extensão (μ strain)	Frequência (Hz)	Valor de Pico (volts)
Ref ^a	Material	Local	Ref ^a	Material				
V1	Delrin	viga	S1	PVDF	2.5 cm	100	30	0.138480
V1	Delrin	viga	S2	PVDF	2.5 cm	100	30	0.145716
V2	Delrin	viga	S3	PZT	2.5 cm	100	30	1.565892
V1	Delrin	viga	S1	PVDF	2.5 cm	50	30	0.072138
V1	Delrin	viga	S2	PVDF	2.5 cm	50	30	0.072782
V2	Delrin	viga	S3	PZT	2.5 cm	50	30	0.572069
Vb1	Betuminoso	viga	S4	PVDF	<2.5 cm	100	30	0.001526
Vb3	Betuminoso	viga	S6	PVDF	<2.5 cm	100	30	0.001831
Vb1	Betuminoso	viga	S4	PVDF	<2.5 cm	700	10	0.008108
Vb3	Betuminoso	viga	S6	PVDF	<2.5 cm	700	10	0.007630
Vb2	Betuminoso	viga	S5	PZT	<2.5 cm	100	30	danificado
Vb4	Betuminoso	viga	S7	PZT	<2.5 cm	100	30	danificado
Estrada	Betuminoso	EN206	S1	PVDF	10 cm	desconhecida	\approx 15	0.003600
Estrada	Betuminoso	EN207	S2	PVDF	5 cm	desconhecida	\approx 15	0.728500
Estrada	Betuminoso	EN208	S3	PVDF	1 cm	desconhecida	\approx 15	1.167000
Estrada	Betuminoso	EN209	S4	PZT	10 cm	desconhecida	\approx 15	0.048850
Estrada	Betuminoso	EN210	S5	PZT	5 cm	desconhecida	\approx 15	0.421000
Estrada	Betuminoso	EN211	S6	PZT	1 cm	desconhecida	\approx 15	0.183000

Pela análise da Tabela 5.2 verifica-se que os ensaios efectuados com os materiais colados na viga delrin demonstraram que o valor de pico em volts para os materiais piezoelétricos PVDF são aproximadamente 10 vezes inferiores ao valor de pico apresentado pelos materiais PZT.

Ainda na mesma viga pode verificar-se que os dois materiais quando solicitados a duas extensões diferentes, a 100 μ strain e a 50 μ strain, a sua resposta em termos de voltagem também acompanha esta tendência, ou seja, a 50 μ strain obteve-se sensivelmente metade do valor da voltagem obtido no ensaio a 100 μ strain.

Nos ensaios realizados nas vigas de mistura betuminosa, já foi referido anteriormente que os materiais PZT não resistiram à possível compactação da mistura pelo que durante as medições não funcionaram. Após desfazer as vigas foi detectado que os materiais PZT estavam partidos e o fio solto dos mesmos. Desta forma apenas foi possível analisar os dados resultantes dos ensaios nos materiais PVDF. Comparando os resultados dos ensaios na viga delrin e da viga de betuminoso, verifica-se que o valor da voltagem é bastante inferior. Este facto deve-se em parte aos materiais na viga delrin distarem do eixo neutro cerca de 2.5 cm, quando na viga de material betuminoso estes materiais encontravam-se dentro da mesma a uma distância inferior dos 2.5 cm do eixo neutro. Assim, a extensão em cada caso é diferente e no caso da viga de material betuminoso é sem dúvida inferior ao caso da viga delrin, uma vez que na viga delrin os materiais estão na fibra externa e a cerca de 2.5 cm do eixo neutro enquanto que na viga de betuminoso estão no seu interior e obviamente a uma distância inferior a 2.5 cm do eixo neutro, pelo que se justifica em parte a redução da voltagem.

Também importa referir que os materiais de suporte, viga delrin e viga de material betuminoso, têm comportamentos diferentes, sendo que a viga delrin quando deformada apresenta um comportamento quase elástico, enquanto que a viga de material betuminoso apresenta um comportamento viscoelástico.

Por último, quando se aplicaram os materiais piezoelétricos numa estrada, a 3 profundidades diferentes e colocados lado a lado materiais PVDF e PZT em cada profundidade, verificou-se que à profundidade de 10 cm foi detetado um nível de ruído mais elevado, possivelmente devido ao facto da vibração provocada pela passagem dos veículos já chegar ao local dos materiais

piezoelétricos bastante amortecida. Nesta profundidade o valor da voltagem apresentada pelos materiais PVDF é inferior ao dos materiais PZT.

Para as profundidades de 5 cm e 1 cm, esta tendência inverte-se sendo que os materiais PVDF apresentam valores de voltagem superiores.

Em termos de valores de voltagem apresentados pelos materiais em função da sua profundidade, estas apresentaram uma evolução à medida que se aproximam da superfície. Este fenómeno não foi validado pelo material PZT à profundidade de 1 cm, desconhecendo-se para já a razão para tal comportamento. Os materiais PVDF apresentaram valores de voltagem bastante superiores aos encontrados em ensaios realizados no laboratório.

6. Conclusões e trabalhos futuros

6.1 Conclusões

O presente trabalho consistiu na avaliação de materiais piezoelétricos para aplicações rodoviárias. Foram utilizados dois tipos de materiais nomeadamente: (1) materiais piezoelétricos à base de polímero (PVDF) (2) materiais piezoelétricos à base de cerâmica (PZT). Para atestar a sua capacidade de funcionamento foram realizados ensaios de laboratório e de campo. Depois de analisados os resultados de todos os ensaios é possível concluir que:

- Os materiais piezoelétricos utilizados neste estudo quando sujeitos a ensaios de flexão repetida, ensaios vulgarmente usados para avaliar a vida à fadiga de misturas betuminosas, não demonstraram qualquer perda de desempenho durante todo o ensaio;
- Os materiais de origem cerâmica têm uma resposta em termos de voltagem bastante superior quando comparados com os materiais de origem polimérica em laboratório;
- Quando sujeitos a variações térmicas, ambos os materiais apresentam uma resposta sensível a esta variação. Para temperaturas baixas a resposta destes aumenta e para temperaturas altas a resposta diminui;
- Os ensaios demonstraram que os materiais em estudo foram sensíveis a deformações, ou seja, quanto maior forem as extensões aplicadas maior é a resposta dos materiais piezoelétricos em termos de voltagem;
- Os materiais piezoelétricos foram ainda avaliados quanto à sua resposta quando solicitados a baixas e altas frequências e a sua resposta foi quase linear. Isto é, à medida que a frequência aumenta, também aumenta a resposta dos materiais piezoelétricos;
- Verificou-se a sensibilidade dos materiais piezoelétricos a baixas frequências podendo registar-se respostas de ambos os materiais para frequências de 1 Hz;
- Foi feita simulação da passagem de veículos sobre os materiais piezoelétricos obtendo-se um desempenho dos mesmos equivalente aos veículos/eixos simulados;
- Para avaliação da resistência dos materiais piezoelétricos a altas temperaturas, foi produzida uma mistura betuminosa e foram incorporados dentro da mesma. Verificou-se que os materiais piezoelétricos PVDF não se degradaram sendo possível fazer a sua detecção após instalação pelo sinal elétrico emitido;

- Foi verificado o comportamento dos materiais piezoelétricos em condições reais através da instalação dos mesmos numa estrada a várias profundidades, e os dois tipos de materiais, PVDF e PZT, funcionaram em todas as profundidades;
- Foi possível observar que a resposta dos materiais piezoelétricos instalados na estrada correspondia à passagem dos rodados sobre eles. Além disso, verificou-se que em termos qualitativos a resposta era diferente para diferentes eixos que circulavam;
- A profundidade de 5 cm conduziu a resultados mais fiáveis em termos de variabilidade do sinal para os dois tipos de materiais piezoelétricos estudados.

6.2 Trabalhos futuros

Em termos de trabalhos futuros, recomenda-se estudar um filtro que melhor se adapte aos dois tipos de material piezoelétrico (PVDF e PZT) usados neste estudo por forma a retirar mais e melhores conclusões.

Seria interessante instalar os materiais piezoelétricos durante a construção da estrada de forma a garantir que os mesmos resistem a todo o processo de construção da estrada.

A forma de colocação em estrada deve ser alvo de estudo por forma a serem obtidos resultados mais fiáveis.

Para uma análise mais eficiente em termos de produção energética é importante em trabalhos futuros desenvolver um circuito eletrónico com vista à medição da potência elétrica de cada material.

REFERÊNCIAS

Andreeva D.V., Shchukin D.G. (2008), *Smart self-repairing protective coatings*, Materials Today, 11(10), 24-30.

Anton S.R., Sodano H.A. (2007), *A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)*, Smart Materials and Structures, 16, R1-R21.

Castro H. (2006), *Sensores e Atuadores baseados em polímeros piezoelétricos*, Tese de Mestrado, Universidade do Minho.

Costa C. M. S. (2007), *Influência da percentagem de cerâmico, tamanho de grão, e matriz polimérica nas propriedades dielétricas e mecânicas de compósitos PZT-PVDF*, Mestrado em Engenharia dos Materiais, Universidade do Minho.

Dillespie T.D., Karamihas S.M., Cebon D., Sayers M.W., Nasim M.A., Hansen W., Ehsan N. (1992), *Effects of heavy vehicle characteristics on pavement response and Performance*, National Cooperative Highway research program transportation research board, National Research Council, Relatório Técnico, University of Michigan, Transportation Research Institute.

Feenstra J., Granstrom J., Sodano H. (2008), *Energy harvesting through a backpack employing a mechanically amplified piezoelectric stack*, Mechanical Systems and Signal Processing 22, 721-734

Gupta P., Tirth V., Srivastava R.K. (2006), *Structural applications on smart materials in construction engineering using robotics*, First International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIIS 2006, Sri Lanka 261-267.

Howells C. A. (2009), *Piezoelectric energy harvesting*, Energy Conversion and Management, 50, 1847-1850.

INNOWATTECH - *Energy Harvesting Systems* (<http://www.innowattech.co.il/>), 2012

Jiang X., Vaziri S.H., Haas C., Rothenburg L., Kennepohl G., Haas R. (2009), *Improvements in Piezoelectric Sensors and WIM Data Collection Technology*, Annual Conference of the

Transportation Association of Canada, Vancouver, British Columbia.

Jian-Hui L., Xiao-Ming W., Hao C., Xi L., Tian-Ling R., Li-Tian L. (2009), *Analysis of vibration-based piezoelectric power generator in discontinuous operation mode*, Sensors and Actuators A 152, 48-52

Kasap O.S. (2000), *Principles of Electrical Engineering Materials and Devices*, McGraw-Hill International Editions, Revised Edition.

Malhotra V.M., Carino N.J. (1991), *CRC handbook on nondestructive testing of concrete*, editors Malhotra V.M. and Carino N.J., Boca Raton: CRC Press. ISBN 0-8493-2984-1.

Minazara E., Vasic D., Costa F., Poulin G. (2006), *Piezoelectric diaphragm for vibration energy harvesting*, Ultrasonics, 44, 699-703.

Newnham R.E. (1992), *Piezoelectric sensors and actuators*_Smart Materials, 513-524.

Papagiannakis A.T., Johnston E.C., Alavi N., Mactutis N. (2001), *Laboratory and Field Evaluation of Piezoelectric Weigh-in-Motion Sensors*, Journal of Testing and Evaluation, 29(6).

Penrod L, Talley D, Froyd J., Caso R., Lagoudas D., Kohutec T. (2002), *Integrating smart materials into a first-year engineering curriculum: A case study*, 32nd ASEE/IEEE Frontiers in education conference, Session F3B, Boston, 21-26.

Portal de publicações Web Universidade do Minho, 11 de Dezembro 2009

<<http://www.arauto.uminho.pt/pessoas/lanceros/ProjectoPiezo/piezop.html>>

Seeboth A., Schneider J., Patzak A.,(2000), *Materials for intelligent sun protecting glazing*, Solar Energy Materials & Solar Cells 60, 263-277.

Shing S.W., Qureshi A.R., Lee J-Y., Yun C.B. (2008), *Piezoelectric sensor based nondestructive active monitoring of strength gain in concrete*, Smart Materials and Structures, 17, 1-8.

Swallow L.M., Luo J.K., Siores E., Patel I., Dodds D. (2008), *A Piezoelectric fibre composite based energy harvesting device for wearable applications*, Smart Materials and Structures, 17, 025017.

Vaziri S.H. (2011), *Investigation of Environmental impacts on piezoelectric weigh-in-motion*

sensing systems, PhD Thesis, University of Ontario, Canada.

www.jamescoxandsons.com, (2012)

Xiong H., Wang L., Wang D., Druta C. (2012), *Piezoelectric Energy Harvesting from Traffic Induced Deformation of Pavements*, International Journal of Pavement Research and Technology, 5 (5), 333-337.

Yang H., Peng Z., Zhou Y., Zhao F., Zhang J., Cao C., Hu Z. (2010), *Preparation and performances of a novel intelligent humidity control composite material*, Energy and buildings (in press), 2010.

Yao L., Zhao H.D, Dong Z.Y., Sun Y.F., Gao Y.F. (2011), *Laboratory Testing of Piezoelectric Bridge Transducers for Asphalt Pavement Energy Harvesting*, Key Engineering Materials (Volume 492), 172-175.

Zhang W., Suo C., Wang Q. (2008), *A novel sensor system for measuring wheel loads of vehicles on highways*, Sensors, 8, 7674-7689.