

SENSORES PARA EMISSÃO ACÚSTICA USANDO COMPÓSITOS FERROELÉTRICOS

P. INÁCIO, C. J. DIAS, J. N. MARAT-MENDES

Secção de Física Aplicada, FCT-UNL

Descreve-se a construção de um sensor ⁽¹⁾ para detecção de sinais de emissão acústica (frequências da ordem dos MHz) usando o compósito ferroeléctrico feito de titanato de chumbo modificado com cálcio (PTCa) e de um copolímero do fluoreto de polivinilideno (P(VDF/TrFE)), numa fracção volúmica de 65:35%, respectivamente. O sensor foi testado usando o sistema de emissão acústica computadorizado LOCAN 320. Os testes efectuados são comparativos, isto é, comparou-se o desempenho deste sensor com o de outro já existente, nomeadamente o R15 da Physical Acoustics Corporation, que é usado na detecção de sinais de emissão acústica. Fez-se, também, a medição da impedância em função da frequência de ambos os sensores.

1. FERROELECTRICIDADE E PIEZOELECTRICIDADE

Ferroelectricidade

Num material ferroeléctrico, a constante dieléctrica (ϵ) varia com a temperatura de acordo com uma lei conhecida por lei de Curie-Weiss. Abaixo de uma certa temperatura (temperatura de Curie) estes materiais polarizam-se espontaneamente, isto é, desenvolve-se uma polarização eléctrica sem a ajuda de um campo eléctrico externo (este fenómeno é análogo à magnetização espontânea que ocorre nos materiais ferromagnéticos). Esta polarização acontece porque os dipolos elementares interagem uns com os outros, dando origem a um campo eléctrico interno, que alinha os dipolos. Acima da temperatura de Curie o material está numa fase dita paraeléctrica, em que os dipolos estão orientados aleatoriamente, não havendo, portanto, polarização.

Porém, usualmente um material ferroeléctrico está num estado despolarizado. Para o polarizar é necessário aplicar um campo eléctrico externo. Ao se

aplicar o campo, a polarização vai aumentando até um certo ponto. Se depois se for reduzindo o campo até zero, a polarização não se anula: sobrevive alguma polarização — chamada polarização remanescente. Para destruir esta polarização é necessário aplicar um determinado campo eléctrico negativo, conhecido por campo coercivo. Se se aplicar um campo eléctrico que alterna periodicamente, a polarização descreve uma curva que é um ciclo de histerese (ver fig. 1). O uso de um ciclo de histerese é um método usual para avaliar a polarização e coercividade de um material ferroeléctrico.

Piezoelectricidade

Associado à ferroelectricidade encontra-se sempre o fenómeno da piezoelectricidade. Embora a ferroelectricidade

⁽¹⁾ C. J. Dias (1994), *Ferroelectric composites for pyro and piezoelectric applications*. Thesis submitted in candidature for the degree of PhD, School of Electronic Eng. and Comp. Systems, Univ. of Wales, Bangor, U.K.

Ferroelectricidade
Piezoelectricidade
Emissão Acústica
Sensor para detecção
Testes experimentais

implique sempre a piezoelectricidade, o contrário não é verdadeiro.

O termo piezoelectricidade refere-se ao facto de que, quando se aplica uma tensão mecânica a um cristal, desenvolve-se um campo eléctrico dentro do material. Como resultado deste campo, desenvolve-se um potencial através do material. Medindo este potencial pode-se determinar o campo. O efeito inverso também se verifica: a aplicação de um campo eléctrico produz uma tensão mecânica. (Foi descoberto cerca de 1880).

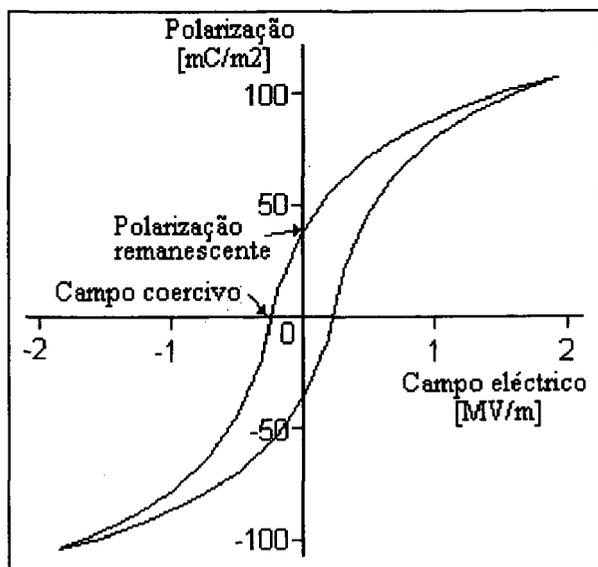


Fig. 1 — Ciclo de histerese típico de um material ferroeléctrico.

O efeito piezoeléctrico é usado para converter energia eléctrica em energia mecânica, e vice-versa, isto é, o material é usado como um transdutor. Por exemplo, se se aplicar um campo eléctrico nas faces (ambas com eléctrodos) de um pequeno disco de um material piezoeléctrico (como o quartzo, por exemplo) desenvolve-se uma tensão mecânica, que faz com que o disco se comprima ou se expanda, na direcção perpendicular às faces do disco, conforme o sentido do campo. Por outro lado, a aplicação de uma tensão mecânica nas faces do disco origina um campo eléctrico, cujo sentido depende de a tensão mecânica ser compressiva ou extensiva.

2. COMPÓSITOS

Nos últimos anos tem-se tentado combinar cerâmicas piezoeléctricas com polímeros tendo em vista a grande flexibilidade destes materiais na obtenção de propriedades particulares, tais como mecânicas, eléctricas, térmicas e/ou acoplamentos entre estas.

Hoje em dia são muito usados os materiais piezoeléctricos convencionais em aplicações que usem as suas propriedades piro e piezoeléctricas. Entre estes materiais encontram-se o zirconato-titanato de chumbo ou mais recentemente titanatos de chumbo modificados. Recentemente apareceram polímeros ferroeléctricos tais como o polivinilideno de flúor (PVDF) e os seus copolímeros com trifluoretileno (P(VDF/TrFE)).

Os compósitos podem ser vistos como materiais intermédios entre estes dois tipos de materiais combinando atributos como a flexibilidade e formabilidade, a toda uma gama de propriedades piro e piezoeléctricas que dependem quer da mistura cerâmica-polímero quer do processo empregue no seu fabrico. Para o fabrico de um bom compósito é de grande importância a identificação das variáveis que controlam o comportamento de uma propriedade. A mais óbvia é a de que a cerâmica deve exibir altas propriedades piro e piezoeléctricas.

3. INTRODUÇÃO À EMISSÃO ACÚSTICA

Existem poucos processos, em materiais, susceptíveis de produzir emissão acústica (EA) numa zona de alta energia e que podem portanto, ser detectados pelo ouvido humano. Na realidade, muito mais processos podem produzir emissão acústica. A técnica de EA permite detectar sinais sónicos e ultrasónicos de baixo nível gerados pela deformação, degradação ou rotura dos materiais. Os materiais "falam" quando têm problemas. Com equipamento de emissão acústica podem "ouvir-se" os sons de fendas a crescer, fibras a quebrar e muitos outros danos num material submetido a tensões.

A emissão acústica é uma técnica versátil com vários domínios de aplicação. Eis alguns exemplos de aplicação da EA em testes de materiais: comportamento de materiais (metais, cerâmicas, compósitos, rochas, betão), testes não destrutivos durante processos de fabrico, monitorização de estruturas, e também algumas aplicações especiais em química e petroquímica, aeronáutica e tecnologia aeroespacial, electrónica, etc.

Emissão acústica

Entende-se por Emissão Acústica, simultaneamente, o método de controlo e a classe de fenómenos nos quais ondas elásticas são geradas pela libertação descontínua de energia a partir de fontes localizadas dentro de um material submetido a uma acção mecânica ou térmica. Uma fonte de EA dá origem a uma onda elástica esférica que se propaga em todas as direcções do material com um certo amortecimento. Ao atingir a superfície do material aparece uma onda de superfície, ou onda de Rayleigh.

Descrição do sistema de teste (LOCAN 320)

Os testes efectuados ao sensor foram realizados no Núcleo de Cerâmicas e Plásticos do Lab. Nacional de Eng. Civil, utilizando o sistema LOCAN 320.

O LOCAN 320 é um sistema de emissão acústica computadorizado que efectua medições de sinais de EA e armazena, exhibe, e analisa os dados resultantes em tempo real. Os sinais acústicos vindos das estruturas são convertidos em sinais eléctricos através de sensores, que são depois amplificados por pré-amplificadores e medidos em módulos computadorizados.

A detecção de uma fonte de acontecimentos na estrutura constitui uma contagem de EA. O início de um acontecimento é gerado quando o sinal de EA ultrapassa pela primeira vez o nível limiar. Sempre que o sinal de EA ultrapassa o nível limiar há uma contagem de EA. O acontecimento acaba quando descer abaixo do nível limiar. Cada sinal de EA é descrito em termos das seguintes características (ver fig. 2):

- 1) tempo de subida;
- 2) duração;
- 3) contagens de EA no pico
- 4) contagens de EA;
- 5) energia;
- 6) frequência média;
- 7) nível limiar (dB);
- 8) amplitude do pico da EA (dB);
- 9) RMS;
- 10) nível médio do sinal.

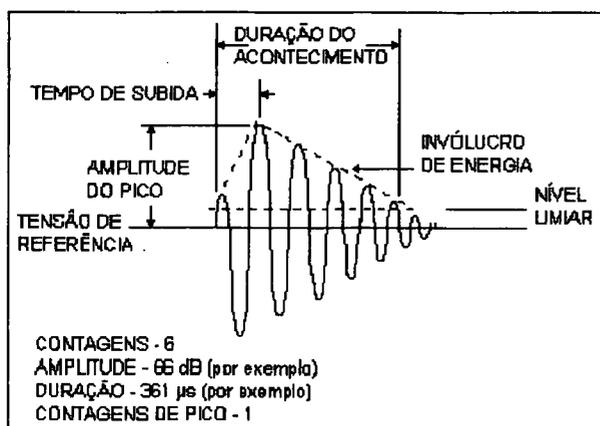


Fig. 2 — Características da forma de onda de um acontecimento típico.

Na fig. 3 encontra-se um esquema da montagem utilizada para testar o sensor construído. A emissão acústica no material era provocada quebrando uma mina de lápis na superfície do material, ou dando pequenas pancadas, num ponto equidistante aos dois sensores, que se encontram a cerca de 5 cm um do outro. A energia acús-

tica assim gerada é convertida num sinal eléctrico pelos sensores. Esse sinal é depois amplificado por um pré-amplificador (um para cada transdutor), que tem um ganho seleccionável de 40 dB ou 60 dB.

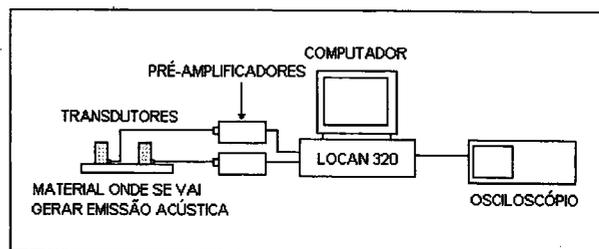


Fig. 3 — Esquema da montagem para o teste do sensor.

4. SENSOR PARA DETECÇÃO DE SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA

Frequência de ressonância

Quando uma onda mecânica é aplicada a um disco, haverá ressonância quando a frequência (f_0) de oscilação corresponder a um comprimento de onda (λ_0) que é o dobro da espessura da amostra (ver fig.4). Estas grandezas relacionam-se com a velocidade do som no material (V_s) através de

$$\lambda_0 f_0 = V_s$$

de modo que se d for a espessura da amostra, segue-se que $\lambda_0 = 2d$ e,

$$f_0 = V_s/2d$$

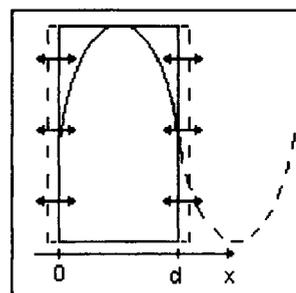


Fig. 4 — Ressonância numa amostra piezoeléctrica.

Preparação do elemento piezoeléctrico

O compósito usado como elemento piezoeléctrico é uma mistura do polímero P(VDF/TrFE) 75:25 mol% com uma fracção volúmica de 65% da cerâmica tita-

nato de chumbo modificado com cálcio, ou seja, PTCa:P(VDF/TrFE) 65%.

Para a obtenção de películas do compósito o material foi prensado a uma temperatura de cerca de 150°C com uma pressão de 1-1.5 ton durante 3-5 minutos. Deste modo obtiveram-se películas circulares (\varnothing 25 mm) com a espessura desejada. Para a aplicação pretendida foram obtidas películas com espessura de 0.55 mm.

Depois, evaporaram-se (numa câmara de vácuo) eléctrodos circulares (\varnothing 10 mm) de alumínio em ambos os lados das películas.

Estas películas foram depois polarizadas, a uma temperatura de aproximadamente 100°C, com a aplicação de uma tensão eléctrica de 9000V durante 15 minutos. (Nota: Polarização é o processo que um material ferroeléctrico sofre quando os seus dipólos eléctricos se alinham irreversivelmente por aplicação de um campo eléctrico, de modo a que o material possa depois ter propriedades piezoeléctricas).

Construção dos transdutores

Na fig. 5 está representado um esquema dos transdutores construídos. O elemento piezoeléctrico é uma película do compósito PTCa-2:P(VDF/TrFE)65% com eléctrodos de alumínio em ambas as faces. O eléctrodo interior terá um diâmetro de 10 mm e o exterior estará ligado ao invólucro para que haja uma ligação à terra. Esta película fixa-se a um material de apoio através de uma fina camada de cola. Na zona em que a película faz o contacto com o fio de ligação a colagem foi feita com cola de prata, para assegurar uma boa condução eléctrica.

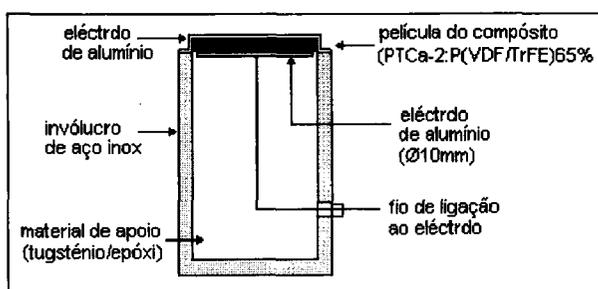


Fig. 5 — Diagrama esquemático do sensor.

O material de apoio é feito de uma mistura de tungsténio/epóxi em proporções apropriadas. A proporção da mistura é escolhida de modo a ter uma impedância acústica próxima da do compósito. Deste modo atenuam-se os "ecos" inconvenientes que possam surgir devido às sucessivas reflexões da onda sonora nas superfícies da película. No caso do sensor aqui construído escolheu-se

uma mistura de tungsténio/epóxi numa fracção volúmica de 35:65%, respectivamente. Assim, a impedância acústica específica desta mistura será 12.5 MRayl, que é bastante próxima da do compósito (13.5 MRayl).

A velocidade do som no compósito é 2600 m/s. Como a película de compósito tem uma espessura igual a 0.55 mm, a frequência de ressonância esperada para o sensor é 2.36 MHz.

Na fig. 6 pode-se ver uma fotografia do sensor.

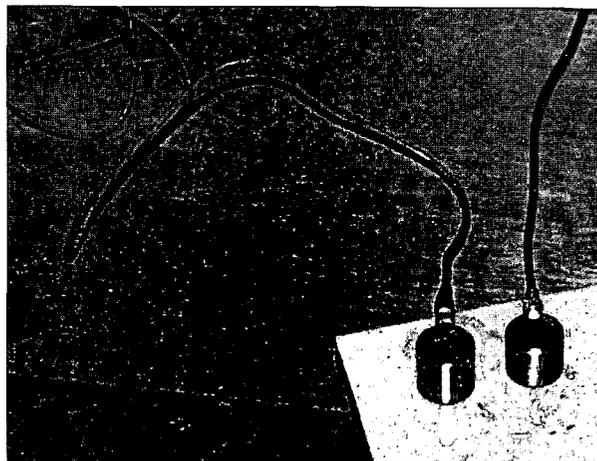


Fig. 6 — À esquerda o sensor R15 da PAC, e à direita o sensor aqui proposto

Descrição do sensor R15 da PAC (sensor comercial)

O sensor R15 tem um desenho e dimensões semelhantes (ver fig. 6) às do sensor aqui proposto, e utiliza também uma cerâmica como elemento piezoeléctrico. Apresenta-se a seguir uma lista com algumas das características do R15.

- Sensibilidade máxima: -64 dB [ref 1V/mbar]
- Gama de frequências de funcionamento: 50-200 kHz
- Frequência de ressonância: 150 kHz
- Capacidade: 290 pF

5. RESULTADOS DOS TESTES NO SISTEMA LOCAN 320

Como já se disse, os testes efectuados ao sensor são comparativos, isto é, comparou-se o seu desempenho com o do sensor R15.

Foi analisada a resposta do sensor em termos das contagens de EA, do tempo de subida, da energia e da duração. Não foi possível obter qualquer registo gráfico, pelo que os resultados apresentados são apenas qualitativos. Obtiveram-se os seguintes resultados:

- Acertos: cerca de 20% dos registados pelo R15;
- Tempo de subida: ligeiramente inferiores aos do R15 (na ordem das dezenas de μs para o R15);
- Energia: cerca de 25% da registada pelo R15.
- Duração: cerca de 30% da registada pelo R15 (na ordem das centenas de μs para o R15).

Nas figs. 7 e 8 encontram-se as formas de onda obtidas por cada um dos sensores quando se quebra uma mina de lápis na superfície do material.

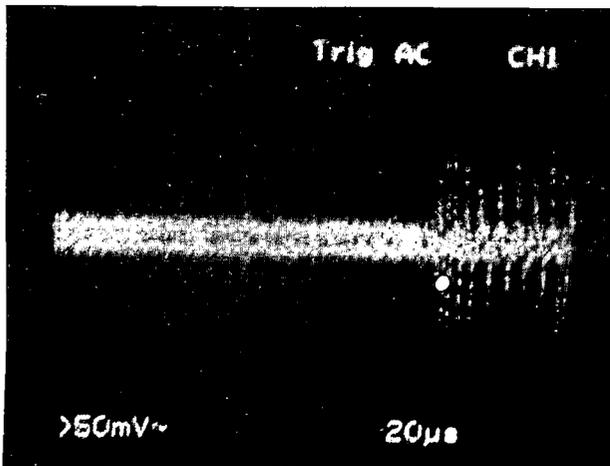


Fig. 7 — Forma de onda obtida pelo sensor R15, quando se quebra uma mina de lápis na superfície do material.

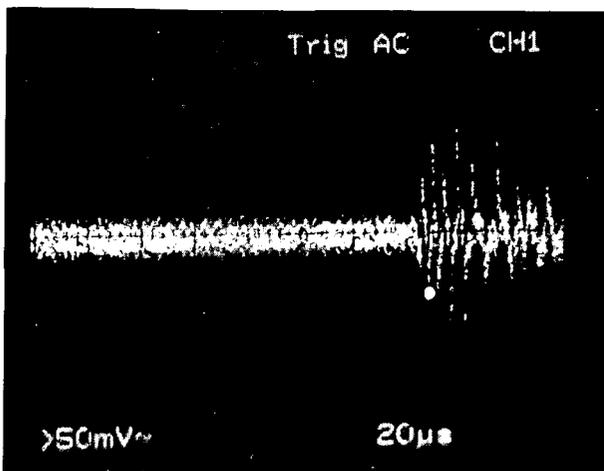


Fig. 8 — Forma de onda obtida pelo sensor proposto, quando se quebra uma mina de lápis na superfície do material.

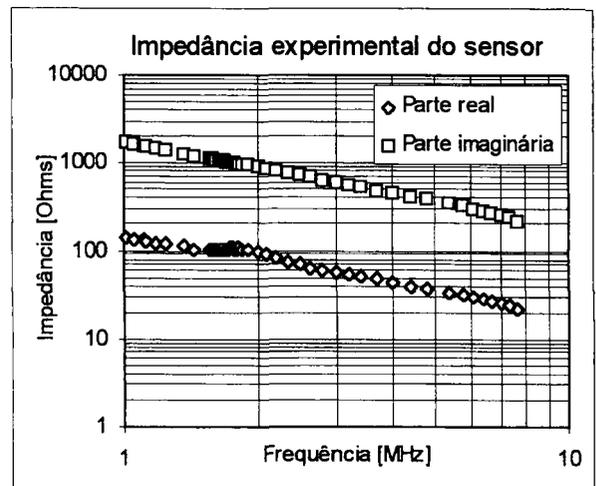
6. IMPEDÂNCIA EXPERIMENTAL E LARGURA DE BANDA DOS SENSORES

As medições da impedância dos sensores foram efectuadas na Secção de Electrónica Teórica e Medidas Eléctricas do IST/UTL, usando o HP 4195A Network/Spectrum Analyzer. Nas figs. 3 e 4 encontram-se os gráficos dos resultados obtidos.

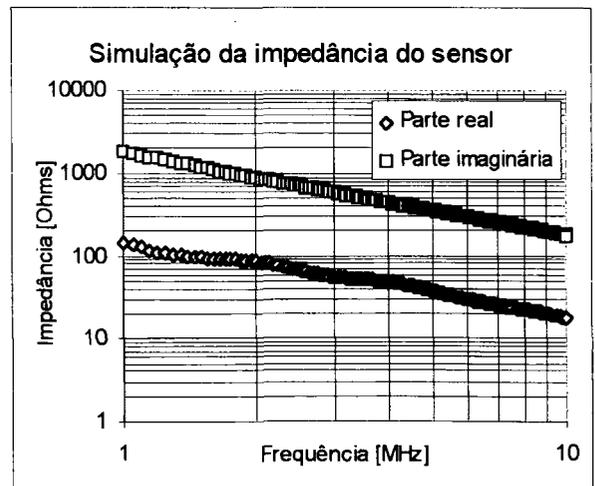
Impedância do sensor

Pelo gráfico da fig. 9 pode-se ver que o sensor construído apresenta um pico na parte real da impedância à volta de 2 MHz, o que corresponde à frequência de ressonância esperada para o sensor (2.36 MHz).

A largura de banda (região à volta do pico) é cerca de 1 MHz.



a)



b)

Fig. 9 — a) — Impedância experimental do sensor; b) — simulação da impedância do sensor

Para a simulação da impedância do sensor usou-se a seguinte expressão [1]:

$$Z = \frac{1}{i\omega C_s} + \frac{h^2 Z_b + 2i Z_a \left(\frac{1 + \cos(x)}{\sin(x)} \right)}{Z_a \left(i \frac{Z_b}{\operatorname{tg}(x)} - Z_a \right)}$$

sendo $x = \pi f / \alpha f_0$, $\alpha = (1 + i\Psi f / f_0)^{1/2}$, $\omega = 2\pi f$, $C_s = \epsilon^x (1 - \tan\delta_e) \epsilon_0 A/d$, $Z_b = A z_b$, $Z_a = A z_a$. A é a área da película ($\varnothing 10$ mm), $d (=0.55$ mm) é a espessura da película, $\tan\delta_e$ são as perdas dieléctricas, h é uma constante piezoeléctrica, ω é a frequência angular, C_s é a capacidade do elemento piezoeléctrico, ϵ^x é a parte real da constante dieléctrica do elemento piezoeléctrico, ϵ_0 é a permissividade eléctrica no vazio, Z_a e Z_b são, respectivamente, a impedância acústica do elemento piezoeléctrico e do material de apoio (sendo Z_a e Z_b as respectivas impedâncias acústicas específicas), Ψ representa as perdas mecânicas no elemento piezoeléctrico, f é a frequência e f_0 é a frequência de ressonância.

A simulação foi feita para o intervalo de 1-10MHz (ver fig. 6b), com os seguintes parâmetros:

Ψ	Z_a [MRayl]	Z_b [MRayl]	v_s [m/s]	ϵ^x	h [GVIm]	$\tan\delta_e$
0.13	13.5	12.5	2600	39	3.5	0.1

Impedância do R15

No gráfico da fig. 10 encontram-se os resultados da medição da impedância do sensor R15 da Physical Acoustics Corporation. Pelo gráfico pode-se ver que o R15

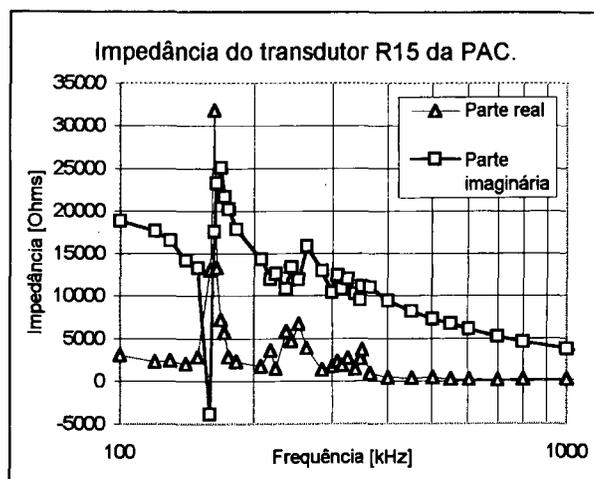


Fig. 10 — Impedância do transdutor R15 da PAC.

apresenta um pico muito acentuado na parte real da impedância a cerca de 160kHz, o que corresponde à sua frequência de ressonância. Este valor para a frequência de ressonância está de acordo com o valor fornecido pela PAC, e que é cerca de 150kHz.

A largura de banda é cerca de 20 kHz.

CONCLUSÕES

- Pode-se concluir que o desempenho do sensor construído é inferior ao do R15, relativamente ao resultado dos testes no sistema LOCAN 320.

- No entanto, deve-se ter em conta que o sistema LOCAN 320 está otimizado para funcionar nas frequências 100-300 kHz.

- E de salientar que este compósito (PTCa-2: P(VDF/TrFE)65%) indicia boas potencialidades para aplicações na área de detecção de sinais de emissão acústica, pois, mesmo para frequências muito inferiores às de ressonância se conseguiu detectar sinais de emissão acústica.

- E, portanto, válida a hipótese de considerar este compósito como tendo uma banda larga de frequências em que pode operar, o que é bastante vantajoso.

- Como trabalho futuro fica uma melhor construção dos sensores e a realização de testes que permitam determinar com mais exactidão as características do sensor.

Paulo A. R. F. Inácio licenciou-se em Engenharia Física na Universidade Nova de Lisboa, Portugal, em 1995. Actualmente, frequenta o Mestrado em Instrumentação, Manutenção Industrial e Qualidade. Faz investigação nas áreas de materiais piezoeléctricos, biosensores e instrumentação.

Carlos J. M. M. Dias licenciou-se em Engenharia Física na Universidade Nova de Lisboa, Portugal, em 1982. Doutorou-se na University of Wales, Reino Unido, em 1994, defendendo uma tese no domínio de compósitos ferroeléctricos. Actualmente, é professor auxiliar na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Faz investigação nas áreas de dieléctricos, materiais ferroeléctricos e suas aplicações e fenómenos de relaxação nestes materiais.

José N. Marat-Mendes licenciou-se em Físico-Química na Universidade de Lisboa, Portugal, em 1967. Doutorou-se em Física na University of Witwatersrand, África do Sul, em 1976. Actualmente, é professor associado e Coordenador da Secção de Física Aplicada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Faz investigação nas áreas de ciência dos materiais, electretes, electrocerâmica, compósitos e suas aplicações em instrumentação.