

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**TRANSDUTORES ELETROMECAÑNICOS DE
ELETRETOS POLIMÉRICOS COM BOLHA DE
AR TERMOFORMADA**

Claudio Vara de Aquino

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Heitor Cury Basso

São Carlos

2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

CLAUDIO VARA DE AQUINO

**Transdutores eletromecânicos de eletretos poliméricos com
bolha de ar termoformada**

**Tese apresentada à Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia Elétrica.**

Orientador: Prof. Dr. Heitor Cury Basso

São Carlos

2007

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **CLAUDIO VARA DE AQUINO**

Tese defendida e julgada em 15/05/2007 perante a Comissão Julgadora:


Prof. Associado **HEITOR CURY BASSO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

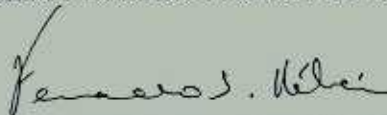
Aprovado


Prof. Titular **RUY ALBERTO CORREIA ALTAFIM**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

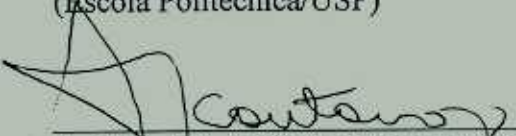
Aprovado


Prof. Titular **APARECIDO AUGUSTO DE CARVALHO**
(Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"/UNESP-Campus de Ilha Solteira)


Aprovado


Prof. Titular **FERNANDO SELLES RIBEIRO**
(Escola Politécnica/USP)

Aprovado


Prof. Dr. **NAASSON PEREIRA DE ALCÂNTARA JUNIOR**
(Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"/UNESP-Campus de Bauru)

Aprovado


Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
em Engenharia Elétrica e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado de maneira geral a todos que aqueles que empregam o seu precioso tempo no avanço construtivo da ciência.

Dedico também de maneira especial à minha esposa Tania e aos meus filhos Thais e André pela paciência, demonstrada além dos seus limites, por uma compreensão enfática, para que este trabalho fosse concluído.

AGRADECIMENTOS

A Deus, sempre presente e que tudo torna possível.

Ao Prof. Dr. Heitor Cury Basso, pela dedicação e pela orientação na realização deste trabalho, recebida de modo competente, paciente e persistente, sempre me apontando qual o melhor caminho a seguir.

Ao Prof. Titular Ruy Alberto Corrêa Altafim, pela participação co-orientada neste trabalho e pelo seu espírito de equipe, sempre me incentivando e mostrando que nunca estamos sós.

Ao Prof. Dr. Naasson Pereira de Alcântara Junior por acreditar no meu futuro acadêmico.

Ao amigo, Prof. Luiz Gonçalves Junior, grande companheiro que sempre se fez presente em todas as etapas da realização deste trabalho.

Ao colega Ruy Alberto Pisani Altafim pela realização das experiências que confirmaram os propósitos para a realização deste trabalho.

Ao técnico Rui Bertho pela confecção dos arranjos experimentais que tornaram possíveis as realizações experimentais que nortearam o rumo deste trabalho.

A todas as outras pessoas, também não menos importantes, que direta ou indiretamente exerceram uma influência positiva, colaborando para que este trabalho fosse realizado e concluído.

EPÍGRAFE

*“No meio de toda dificuldade
existe uma oportunidade.”*

Abert Einstein

RESUMO

de AQUINO, C. V. (2007). *Transdutores eletromecânicos de eletretos poliméricos com bolha de ar termoformada*. São Carlos, 2007 Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A sensibilidade eletromecânica dos transdutores de eletretos poliméricos resulta em muitas aplicações na engenharia, que motivaram a produção industrial de um filme não homogêneo e eletricamente carregado, denominado Filme EletroMecânico ou *EMFi* (*ElectroMechanical Film*). Um dispositivo alternativo a este *EMFi*, produzido em nosso laboratório, foi o resultado de uma bolha de ar homogênea termoformada, unida por dois filmes de Teflon[®] FEP. Este dispositivo possui uma estrutura similar ao *EMFi*, mas permite cavidades homogêneas a serem predefinidas e distribuídas no momento em que o dispositivo é produzido, diferindo das células no *EMFi* com tamanhos diversos e dispersas no interior do filme industrial. A possibilidade de controlar a geometria das bolhas de ar tornou possível o desenvolvimento de um modelo, empregado como uma ferramenta de projeto. A resposta eletromecânica deste transdutor foi modelada e então apresentada neste trabalho. Este modelo analítico avalia o desempenho destes transdutores com somente uma bolha termoformada, para efeitos de simplificação, baseado em capacitores em série, em função da deformação mecânica e da carga elétrica retida no polímero. São representados dinamicamente com parâmetros elétricos e mecânicos, definidos à medida que operam como sensores ou atuadores, com respeito aos limites impostos pela aplicação especificada. O gráfico da resposta em frequência mostra a frequência de ressonância e a largura da faixa para meia-amplitude que determina o coeficiente de amortecimento que não pode ser obtido diretamente do modelo analítico. Este gráfico também permite comparar a frequência natural obtida graficamente com aquela calculada pelo modelo, tornando mais confiável o modelo desenvolvido para o transdutor. Finalmente, melhorias na instrumentação e em condições mais adequadas para os testes são sugeridas, bem como métodos alternativos para trabalhos futuros.

Palavras-chave: transdutores com eletretos, transdutores eletromecânicos, sensores e atuadores, elasticidade em bolhas.

ABSTRACT

de AQUINO, C. V. (2007). Electromechanical transducers of polymeric electrets with thermo-formed air bubble. São Carlos, 2007 Ph.D. Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The electromechanical sensibility of polymeric electrets transducers yields many engineering applications which have motivated industrial production of a non-homogeneous and electrically charged film, the so-called ElectroMechanical Film (EMFi). An alternative device for this EMFi that has been produced in our laboratory was a homogeneous thermo-formed air bubbles bonded with two Teflon[®] FEP films. This device has a structure similar to the EMFi, but allows the homogeneous voids to be pre-defined and distributed at the moment the device is produced, differing the EMFi voids with diverse sizes and dispersed into the industrial film. The possibility to control the air bubbles geometry makes possible the development of a model to be used as a design tool. The electromechanical response of this transducer has been modeled and is presented in this work. Such analytical model evaluates the transducers performance using just a single thermo-formed bubble for simplification purposes, based on series capacitors, which are function of the mechanical deformation and electrical charge trapped in the polymer. They are represented dynamically, with electrical and mechanical parameters being defined as they work as sensors or actuators, regarding the limits imposed by the specified application. A frequency response plot shows the resonance frequency and the bandwidth for the half amplitude, which determines the damper coefficient that cannot be obtained directly from the analytical model. This plot also allows comparison of the natural frequency obtained graphically with the calculated one using the model, making more reliable the transducer model developed. Finally, instrumentation improvements and more suitable test conditions are suggested, as well as alternative methods for future works.

Keywords: electret transducers, electromechanical transducers, sensors and actuators, elasticity in bubbles.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. Introdução..... | 27 |
| 2. Revisão Bibliográfica | 33 |
| 2.1. A descoberta dos eletretos | 33 |
| 2.1.1. As primeiras pesquisas com eletretos..... | 34 |
| 2.1.2. Capacitores vibrantes..... | 40 |
| 2.1.3. Microfones capacitivos de eletreto..... | 41 |
| 2.2. A descoberta da piezeletricidade | 42 |
| 2.3. Polímeros homogêneos e eletretos | 44 |
| 2.3.1. Polímeros piezelétricos..... | 45 |
| 2.3.2. Polímeros não polares..... | 47 |
| 2.3.3. Eletretos e a piezeletricidade aparente..... | 48 |
| 2.4. Polímeros porosos e celulares | 54 |
| 2.4.1. Descobrimento dos polímeros porosos e celulares..... | 54 |
| 2.4.2. Medidas da atividade eletromecânica nos polímeros porosos e celulares..... | 57 |
| 2.5. Transdutores com polímeros homogêneos | 62 |
| 2.5.1. Eletretos poliméricos homogêneos em multicamadas..... | 62 |
| 2.5.2. Eletretos poliméricos homogêneos com micro-bolhas | 66 |
| 2.6. Materiais dielétricos e eletretos | 69 |
| 2.6.1. Cargas aprisionadas em armadilhas energéticas..... | 69 |
| 2.6.2. Princípios físicos dos eletretos | 71 |
| 3. Propriedades elétricas e comportamento eletromecânico..... | 75 |
| 3.1. Transdutores eletromecânicos com eletretos | 75 |
| 3.1.1. Condição estática inicial..... | 76 |
| 3.2. Comportamento eletromecânico do transdutor como sensor | 79 |
| 3.2.1. Decomposição espectral para o comportamento do sensor | 81 |

| | |
|--|-----|
| 3.2.2. O Sensor para altas frequências ou em circuito aberto | 83 |
| 3.2.3. O sensor para baixas frequências ou em curto-circuito | 85 |
| 3.2.4. O sensor para pequenas deformações | 86 |
| 3.3. Comportamento eletromecânico do transdutor como atuador | 86 |
| 3.4. Análise elétrica e considerações | 90 |
| 4. Propriedades mecânicas dos transdutores | 93 |
| 4.1. Relação causal entre força e deformação | 93 |
| 4.1.1. Forças agentes no sistema | 94 |
| 4.1.2. Deformação apresentada pelo sistema oscilatório | 96 |
| 4.2. Força e deformação em modo sensor | 96 |
| 4.3. Força e deformação em modo atuador | 99 |
| 4.4. A restituição elástica | 101 |
| 4.4.1. Deformação na película e o pistão equivalente | 102 |
| 4.4.2. Deformação elástica na película | 102 |
| 4.4.3. Pressão de ar na bolha | 102 |
| 4.4.4. Coeficiente elástico resultante | 104 |
| 4.5. Amortecimento e dissipação de energia | 105 |
| 4.6. Análise mecânica e considerações | 108 |
| 5. Medidas e Análises | 109 |
| 5.1. A amostra sob testes | 109 |
| 5.2. A resposta em frequência | 110 |
| 5.2.1. Ensaio para obtenção da resposta em frequência | 110 |
| 5.2.2. Análise do espectro de frequências | 112 |
| 5.3. A frequência natural de oscilação | 113 |
| 5.4. O amortecimento específico | 114 |
| 5.5. Desempenho do transdutor como atuador | 115 |
| 5.6 Desempenho do transdutor como sensor | 117 |

| | |
|---|-----|
| 5.7. Outras considerações | 119 |
| 6. Conclusões e Propostas Futuras | 121 |
| Referências | 125 |
| Apêndice A – Placa Circular e o Pistão Equivalente..... | 131 |
| Anexo 1 – Especificação dos filmes de Teflon® FEP <i>Dupont</i> | 135 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1: arranjo experimental de Eguchi | 35 |
| Figura 2.2: (a) heterocargas e homocargas – (b) homocargas estáveis | 36 |
| Figura 2.3: eletretos em cera de carnaúba após o preparo e depois de 22, 27 e 35 anos..... | 38 |
| Figura 2.4: circuito elétrico do capacitor vibrante..... | 40 |
| Figura 2.5: estrutura e circuito de microfone comercial de eletreto..... | 42 |
| Figura 2.6: resposta de agulhas fonográficas em cartilagem de baleia, osso e tendão..... | 46 |
| Figura 2.7: laços de histerese para o PVDF a baixas temperaturas..... | 47 |
| Figura 2.8: carregamento de um filme polimérico com vidro (dielétrico) inserido | 50 |
| Figura 2.9: circuito de medidas do potencial e das correntes nos polímeros | 52 |
| Figura 2.10: preparação do eletreto polimérico segundo Medycki e Hilczer..... | 54 |
| Figura 2.11: secção transversal de um EMFi 70 μm em microscopia eletrônica..... | 56 |
| Figura 2.12: determinação do coeficiente de sensibilidade pseudo-estático | 58 |
| Figura 2.13: filme celular de PP (a) e sua estrutura capacitiva (b)..... | 61 |
| Figura 2.14: sanduíche multicamada formado por filmes de Teflon [®] FEP e alumínio..... | 63 |
| Figura 2.15: circuito de carga para formação dos eletretos nos transdutores..... | 64 |
| Figura 2.16: atividade eletromecânica dos transdutores sob retirada de 20 N | 65 |
| Figura 2.17: obtenção dos transdutores poliméricos em laboratório..... | 66 |
| Figura 2.18: detalhe das bolhas de ar entre os filmes poliméricos | 67 |
| Figura 2.19: armadilhas energéticas em níveis discretos na zona proibida..... | 70 |
| Figura 2.20: modelo simplificado com o dielétrico carregado (eletreto) | 71 |
| Figura 3.1: modelo estático capacitivo do transdutor eletromecânico com eletretos..... | 76 |
| Figura 3.2: arranjo capacitivo equivalente | 77 |
| Figura 3.3: circuito elétrico RC equivalente para o sensor..... | 79 |
| Figura 3.4: o transdutor como atuador | 87 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.5: o atuador em função da deformação..... | 88 |
| Figura 4.1: modelo mecânico para o transdutor eletromecânico | 94 |
| Figura. 4.2: resposta normalizada do transdutor em função da frequência. | 106 |
| Figura 5.1: transdutor com uma bolha e seu modelo esquemático cilíndrico. | 110 |
| Figura 5.2: o transdutor no ensaio acústico indireto | 111 |
| Figura 5.3: o método indireto e acústico inverso. | 111 |
| Figura 5.4: resposta em frequência e a ressonância em amplitude. | 112 |
| Figura 5.5: o método indireto acústico para o sensor | 118 |
| Figura A.1: deformação na bolha e o pistão equivalente. | 131 |
| Figura A.2: volume obtido pela integração de discos elementares empilhados. | 132 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 2.1: histórico sinóptico da piezeletricidade | 43 |
| Tabela 2.2: cristais com piezeletricidade medida pelos irmãos Curie..... | 44 |
| Tabela 2.3: amostras em camadas rígidas (np) e macias (p) de Teflon [®] PTFE | 59 |
| Tabela 5.1: características específicas do Teflon [®] FEP 200 A..... | 113 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C: coulomb

dB: decibel

d.d.p.: diferença de potencial ou tensão elétrica

EESC: Escola de Engenharia de São Carlos

EMFi: Filme Eletro Mecânico (Electro Mechanical Film)

eV: elétron-volt

F: farad

FEP: Flúor Etileno Propileno

FET: Transistor de Efeito de Campo (Field Effect Transistor)

Hz: hertz

LIPP: Pulso de Pressão Induzido por Laser (Laser-Induced Pressure Pulse)

N: newton

PET: Teraftalato de Poli Etileno (Poli Ethylene Theraftalate)

PP: Poli Propileno

PU: Poli Uretano

PVDF: Fluoreto de Poli Vinilideno (Poly VinyliDene Fluoride)

PTFE: Poli Tetra Flúor Etileno

USP: Universidade de São Paulo

V: volt

Ω : ohm

LISTA DE SÍMBOLOS

a: raio da placa ou película circular

A: área ou superfície de contato das cargas elétricas

B: coeficiente de amortecimento viscoso

C_0 : capacitância na região de ar entre os eletretos

C_1 capacitân

k : constante de restituição elástica

k_f : coeficiente de restituição da deformação

k_p : coeficiente de restituição pneumática

m : massa

p : pressão do ar no interior das bolhas

p_0 : pressão atmosférica ambiente

P : polarização dielétrica

P_i : polarização dielétrica instantânea

P_p : polarização dielétrica permanente PC: Poli Carbonato

q : carga elétrica resultante no eletreto

Q_0 : carga aprisionada no eletreto

Q_1 : carga induzida nos eletrodos

$Q_{1,e}$: carga estática e inicial induzida nos eletrodos

R : resistência elétrica

S : deformação elástica

S_0 : amplitude da deformação mecânica harmônica

t : espessura da placa sob deformação

T_e : armadilha energética para elétrons-livres

T_h : armadilha energética para lacunas

V_0 : d.d.p. ou tensão elétrica gerada pelas cargas aprisionadas

V_1 : d.d.p. ou tensão elétrica gerada pelas cargas induzidas

V_p : tensão do pico de impulso

V_t : tensão elétrica de carga entre os eletrodos terminais do transdutor

Y : módulo de elasticidade de Young

Z : amplitude normalizada de oscilação

z_{max} : deflexão máxima da deformação

\bar{z} : deslocamento do pistão equivalente à deflexão máxima

δQ_1 : variação de carga induzida nos eletrodos

δV_1 : variação de tensão elétrica entre os eletrodos

α : relação entre a carga estática induzida e a carga aprisionada

δd_0 : alongação no meio elástico

γ : coeficiente específico de amortecimento

ϵ_0 : permissividade absoluta do vácuo

ϵ : permissividade elétrica relativa ou constante dielétrica

η : eficiência no carregamento impulsivo

ρ_r : densidade volumétrica de carga real

ρ_p : densidade volumétrica de carga polarizada

σ_0 : densidade superficial de carga aprisionada no eletreto

σ_1 : densidade superficial de carga induzida nos eletrodos

σ_r : densidade superficial de carga real

σ_p : densidade superficial de carga polarizada

τ : constante de tempo de relaxação para resposta transitória

ω : frequência angular ou pulsação

ω_0 : frequência angular natural ou livre

ω_M : frequência angular de ressonância em amplitude

1. INTRODUÇÃO

Aplicações em engenharia se fazem necessárias, fornecendo informações ou atuando sobre os sistemas de controle, dos mais diversos e imagináveis. Um processo pode ser controlado pelo envio de sinais elétricos, ou no papel inverso, recebendo sinais elétricos e atuando sobre sistemas de controle. Estes dispositivos que realizam estas tarefas são genericamente denominados de transdutores eletromecânicos, obviamente pela atribuição que possuem de estabelecer relações bilaterais entre fenômenos de natureza elétrica com outros de natureza mecânica. Quando um dispositivo deste tipo recebe um estímulo mecânico e devolve um sinal elétrico, ele é conhecido por um sensor e inversamente respondendo mecanicamente a um sinal elétrico, ele é chamado de atuador.

Boa parte destes transdutores que operam na entrada ou na saída de um processo são normalmente constituídos de materiais piezelétricos ou de natureza capacitiva, de grande conhecimento dos profissionais na área de controle automático. Estes dispositivos estabelecem uma relação linear de dependência entre variáveis elétricas e mecânicas, proporcionais ao comportamento real do processo. No entanto, estes dispositivos possuem um custo elevado e algumas vezes suas massas inerciais interferem sobre o sentido real das grandezas manipuladas, ou dificultam sua instalação em alguns ambientes.

Uma alternativa aos transdutores piezelétricos ou capacitivos surgiu no final deste século passado, com o emprego de películas poliméricas eletricamente carregadas, com massa desprezível e com um custo muito inferior comparado aos dos transdutores eletromecânicos usuais. O grande exemplo surgiu durante a Segunda Guerra com o descobrimento dos microfones de eletreto pelos japoneses, hoje empregados em milhões de telefones portáteis. Em linhas gerais, trata-se de materiais dielétricos, maleáveis e com a capacidade de reter cargas elétricas, de modo a exibir um campo remanente.

Desde a antiguidade, os gregos já investigavam os efeitos das cargas em isolantes, sem maiores explicações dos fatos. Somente em 1732 foi que Stephen Gray descobriu as primeiras propriedades dos eletretos, fazendo menção à existência de uma “força atrativa perpétua” presente em alguns dielétricos, tais como ceras, resinas vegetais e enxofre,

produzindo eletricidade estática nestes materiais quando resfriados depois de colocados em fusão.

No século seguinte, Michael Faraday estabeleceu os fundamentos sobre as propriedades dos eletretos, referindo-se a eles como materiais capazes de reter um momento elétrico mesmo depois da retirada do campo aplicado. Oliver Heaviside, pouco depois em 1892, analisando estas investigações de Faraday, denominou a palavra *eletreto* para justificar aqueles dielétricos dotados de um campo elétrico residual, numa analogia aos magnetos ou ímãs permanentes.

Desde o início da década de 1920, sabe-se que a cera de carnaúba possui esta propriedade constatada cientificamente por Eguchi, mas prevista e investigada dois séculos antes. Nos dias de hoje, sabe-se também que alguns materiais poliméricos também possuem esta capacidade de manter cargas elétricas em sua estrutura, por centenas de anos, sem que uma redução significativa se faça notar.

Em 1952, Anderson e Alexander realizaram experiências com um capacitor plano de armaduras móveis alimentado com uma tensão contínua. Observaram a geração de sinais elétricos alternados quando suas armaduras eram submetidas a vibrações mecânicas. Se a fonte de alimentação contínua de tensão deste circuito for substituída por uma carga elétrica constante, o mesmo princípio de funcionamento pode ser empregado na definição de modelos para transdutores eletromecânicos de eletretos com cargas depositadas em películas poliméricas. Os microfones de eletreto foram mais tarde em 1962, desenvolvidos e produzidos em escala industrial nos modelos que se encontram nos dias de hoje, em grande difusão no mercado.

São chamados de piezelétricos, aqueles materiais que apresentam uma diferença de potencial proporcional à deformação mecânica experimentada, ou a devolvem como resposta de um estímulo elétrico, também de maneira linear. Esta propriedade, presente em alguns materiais, despertou interesse nas mais diversas áreas da engenharia, em função de múltiplas aplicações, como transdutores (de pressão, posição, velocidade, aceleração, entre outros), voltados a análises e avaliações de deformações e vibrações.

Os cristais piezelétricos foram bastante indicados em aplicações como transdutores eletromecânicos, entre elas em agulhas de toca-discos, sem a apresentação de alternativas para o mercado até meados de 1960, quando surgiu uma proposta de pesquisadores japoneses, com

suas atenções voltadas para uma piezeletricidade presente em polímeros biológicos e sintéticos. Tais películas poliméricas poderiam ser empregadas em superfícies maiores, em ambientes diversos, com menos restrições de uso e com custos mais reduzidos, comparados aos transdutores equivalentes fabricados com cristais.

Juntamente com a evolução da piezeletricidade, a ciência moderna dos eletretos se desenvolveu rapidamente nas décadas do século XX. Um caminho natural, com os primeiros passos dados por Eguchi obtendo eletretos em ceras de carnaúba entre 1919 e 1924 no Japão, serviu de motivação a pesquisas futuras.

Alguns materiais de estrutura molecular polimérica exibem um comportamento que em primeira análise pode ser considerado piezelétrico, de modo bastante análogo ao observado no quartzo e demais materiais cerâmicos. São materiais carregados com eletretos, que quando se deformam dão a falsa idéia de um comportamento piezelétrico. Estas características associam os conceitos de eletretos e de piezeletricidade, dando a estes materiais uma propriedade híbrida, que muitos autores a denominam de **piezeletretos**.

Uma mudança de paradigma em 1995 mostrou a ocorrência de uma piezeletricidade aparente dependente da elasticidade, na junção de dois polímeros diferentes com cargas elétricas neles retidas. Baseando-se nesta combinação de materiais com elasticidades diferentes, as pesquisas conduziram à produção de eletretos formados em filmes dielétricos porosos, mais maleáveis. Com a evolução natural dos trabalhos vieram em seguida os filmes poliméricos celulares, com cavidades microscópicas na sua estrutura interna, intrinsecamente produzidas ainda no processo de manufatura das películas. Estes dois tipos de polímeros possuíam altos coeficientes de sensibilidade eletromecânica, superando inclusive aqueles coeficientes piezelétricos equivalentes, característicos dos melhores materiais cerâmicos.

Investigações sobre este comportamento aparentemente piezelétrico apresentado em alguns materiais de estrutura polimérica com eletretos formados, fizeram com que os conceitos de eletretos e de piezeletricidade passassem a caminhar lado a lado numa tendência em associá-los, porém de maneira incorreta.

Pesquisas recentes, nesta primeira década do século XXI, vêm empregando duas películas de Teflon[®] FEP (Flúor Etileno Propileno), tendo entre elas micro-bolhas de ar artificialmente produzidas e com características próprias. Estes filmes poliméricos, dispostos em camadas, formam eletretos quando carregados por tensões impulsivas, resultando em um

novo material para transdutor eletromecânico, fabricado por um processo bastante simples e controlado, diferente e independente daqueles industriais e relacionados com a produção dos polímeros celulares ou porosos.

Um conjunto de equações e um modelo desenvolvido permitem observações de comportamento para o projeto e a construção destes transdutores eletromecânicos, dentro das características desejadas em função de uma determinada aplicação em pequena ou larga escala. A produção destes transdutores, seja ela em laboratório ou em escala industrial, requer uma metodologia sistemática para que os dispositivos sejam obtidos em conformidade com as necessidades de projeto e de forma repetitiva. O dimensionamento e a distribuição das microbolhas com ar entre as películas com eletreto imprimem de fato um caráter determinístico, no tocante à obtenção destes dispositivos aparentemente piezelétricos, em função da aplicação a que se destine, considerando a sensibilidade e a faixa de resposta em frequência desejada.

Esta tese de doutorado, na sua contribuição original, tem a pretensão de discutir e caracterizar o transdutor eletromecânico formado em eletretos poliméricos, com o objetivo de uma análise detalhada que mostre as suas propriedades elétricas e mecânicas e o comportamento sob restrições que fazem com que ele se comporte como um material piezelétrico, quando examinado de uma forma macroscópica. Ao longo deste trabalho deve ser enfatizado que o comportamento eletromecânico destes dispositivos, operando como sensor e atuador, podendo emitir uma resposta linear sob restrições operativas, diferem daqueles efetivamente piezelétricos, característicos por assimetrias presentes na estrutura atômico-molecular e pela reciprocidade, exibindo o mesmo coeficiente de sensibilidade tanto em modo direto como em modo inverso.

Além deste capítulo introdutório, este trabalho encontra-se organizado basicamente em outros 5 capítulos, seguindo a orientação descrita.

No capítulo 2, uma revisão bibliográfica oferece suporte ao trabalho com um resumo dos estudos já realizados e mais relevantes aos processos de obtenção dos eletretos, dos fenômenos piezelétricos e dos transdutores eletromecânicos poliméricos, com seus fundamentos teóricos, suas características e métodos de avaliação, definido assim o estado da arte.

O capítulo 3 apresenta os fundamentos teóricos necessários para o conhecimento dos eletretos e das características estáticas e dinâmicas, tanto diretas, como inversas, empregadas nas aplicações dos transdutores eletromecânicos, como sensores e atuadores.

A extensão ao comportamento mecânico destes transdutores é descrita no capítulo 4, procurando estabelecer um modelo eletromecânico de operação do dispositivo como sensor e como atuador, esclarecendo a fronteira entre os eletretos e a piezeletricidade, bem como as associações que podem ser estabelecidas entre eles.

As justificativas e vantagens, bem como as restrições são apontadas no capítulo 5, com base na interpretação e análise de medidas e resultados obtidos. A validade dos resultados obtidos, comparados com aqueles realizados em trabalhos anteriores, aponta o caminho para a produção destes transdutores.

Finalmente, o capítulo 6 dedica-se às conclusões tiradas com este trabalho e propõe motivações para a continuidade dos estudos em trabalhos futuros.

O assunto torna-se inesgotável se para cada estudo realizado com polímeros sólidos e homogêneos for destacado um espaço relatando a formação dos eletretos obtidos e a piezeletricidade neles observada. O campo destes estudos é muito vasto, fruto de trabalhos realizados em várias partes do mundo e alguns praticamente ao mesmo tempo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma revisão bibliográfica se faz necessária para demonstrar o histórico evolutivo dos eletretos e da piezeletricidade, bem como o acompanhamento dos trabalhos anteriores, para que seja obtida assim, uma perfeita definição do estado da arte. Para tal, os estudos realizados pelos autores e seus colaboradores, com artigos citados nas referências bibliográficas, foram analisados com enfoque e respeito à relevância do objetivo proposto neste trabalho.

2.1 A descoberta dos eletretos

Alguns efeitos decorrentes do armazenamento de cargas ou da orientação dos dipolos elétricos em materiais isolantes datam de tempos bem anteriores, sendo de conhecimento na antiga Grécia, com simples relatos de ocorrências destes fenômenos, sem quaisquer justificativas. As primeiras propriedades de eletretos foram descobertas em 1732, mencionadas por Stephen Gray indagando a respeito de uma “força atrativa perpétua” presente em alguns dielétricos, em particular nas ceras, nas resinas vegetais e no enxofre, capaz de gerar uma eletricidade estática nestes materiais, eletrificados por contato em estado fundente e posteriormente resfriados em uma concha de ferro.

Um século mais tarde, em 1839, Michael Faraday estabeleceu os primeiros fundamentos teóricos sobre as propriedades de eletretos quando da aplicação externa de um campo elétrico sobre um capacitor, referindo-se a um “*dielétrico que retém um momento dipolar mesmo depois que o campo elétrico externo foi reduzido a zero*”. Justificou naquela época o fenômeno de forma intuitiva, baseando-se no fato de que este capacitor era capaz de manter cargas elétricas armazenadas por algum tempo, ainda que inferior ao carregamento inicial, após este ter sido carregado e suas armaduras postas em seguida e momentaneamente em curto-circuito. Faraday argumentou, naquela época, que durante o carregamento, as cargas elétricas se deslocavam dos eletrodos para o meio dielétrico; explicação essa que ficou por um tempo esquecida.

Mais tarde, em 1892 Heaviside denominou a palavra *eletreto* para explicar ou designar aqueles dielétricos com dipolos orientados que apresentavam um campo elétrico

residual, estabelecendo uma analogia com os já conhecidos magnetos ou ímãs permanentes, em consonância com a teoria dos campos magnéticos.

2.1.1 As primeiras pesquisas com eletretos

As pesquisas sobre os eletretos começaram, com bases científicas, em 1919 quando o físico japonês Eguchi formou eletretos polares, empregando misturas de resinas vegetais e misturas com ceras de abelha e de carnaúba, os mesmos materiais utilizados por Gray em 1732. Estes eletretos foram obtidos cientificamente, isto é, de modo sistemático com base na teoria da polarização em dielétricos. Foi notado também que algumas ceras e materiais resinosos possuíam uma condutividade moderada no estado líquido, mas se tornavam depois bons isolantes no estado sólido, com a condutividade diminuindo, tendendo gradualmente a zero, com a diminuição da temperatura, ou seja, na medida em que iam se solidificando.

O experimento utilizado por Eguchi foi realizado conforme o arranjo que pode ser mostrado na Fig. 2.1. Uma mistura com partes iguais de cera de carnaúba e resina, com ou sem uma certa quantidade de cera de abelha, a uma temperatura bem acima do seu ponto de fusão, cerca de 130° C, foi derramada numa vasilha metálica rasa e circular B , adquirindo depois de solidificada, o formato de um disco com 1 cm de espessura e diâmetro de 20 cm. Esta vasilha tinha a sua base mantida em contato com uma placa metálica circular P_1 . Este eletrodo de placa também estava apoiado sobre três pequenos calços isolantes de enxofre S_1, S_2, S_3 , em contato com um tripé de madeira T nivelado por três parafusos f_1, f_2, f_3 . O outro eletrodo, um disco metálico oco P_2 encontrava-se suspenso por três linhas isolantes t_1, t_2, t_3 , de modo a apenas tocar levemente a superfície superior do dielétrico fundido.

A amostra em forma de disco, ainda em estado fundente, foi submetida a um campo elétrico praticamente uniforme de 1,5 MV/m através de uma fonte de alta tensão com o terminal negativo conectado ao eletrodo P_1 e o positivo ao eletrodo superior P_2 . Após a solidificação da amostra e a remoção do campo elétrico aplicado, Eguchi constatou que o disco de cera apresentava uma distribuição superficial de cargas negativas na face superior e uma distribuição positiva na face inferior, isto é, com polaridades opostas àquelas impostas pela fonte de tensão. Estas cargas eram de natureza temporária e foram desaparecendo gradualmente em um curto intervalo de tempo, dentro de um ou dois dias.

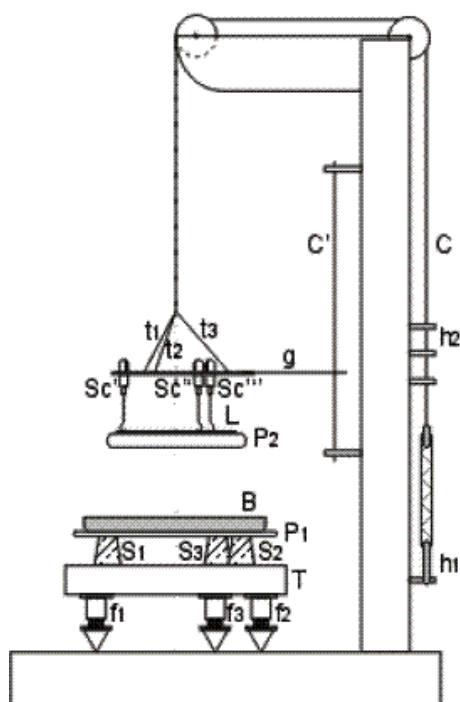


Figura 2.1: arranjo experimental de Eguchi.
(EGUCHI, 1925).

Após o decaimento completo destas cargas, outras de sinais opostos às anteriores, foram crescendo gradualmente em alguns dias e se mantiveram estáveis por muitos anos. Assim, as cargas positivas que agora apareciam na face superior do disco e as negativas na inferior, mantinham as polaridades em correspondência com os terminais da fonte de tensão aplicada durante o preparo da amostra. A estas cargas finais e superficiais do eletreto assim obtido, Eguchi chamou então de *cargas livres devido à sua própria eletrização*.

O nome “Eletreto Permanente” ou simplesmente “Eletreto” foi dado a este dielétrico especial durante o encontro ordinário da Sociedade de Física-Matemática do Japão em 21 de fevereiro de 1920, sem qualquer menção a Heaviside. Mais tarde, Eguchi encontrou nos artigos de Oliver Heaviside uma seção com o título “Eletrização e Eletrificação – Eletreto Natural” onde era proposto pela primeira vez o uso do termo “Eletreto” para justificar teoricamente a ação de um corpo eletrizado intrinsecamente.

Em 1925 Eguchi elaborou seu artigo pioneiro no *Philosophical Magazine*, apresentando suas pesquisas realizadas entre 1919 e 1924 com objetivo focado na formação de eletretos, consolidando cientificamente os primeiros experimentos rudimentares realizados dois séculos antes por Gray. Neste artigo é registrada uma mudança de polaridades nas cargas

armazenadas nas amostras e que se mantiveram estáveis ainda após alguns anos. Este comportamento estável identificava então a principal propriedade de um eletreto, como um armazenador de cargas e detentor de um campo elétrico que permanecia no material mesmo sem a presença da tensão aplicada na amostra. Ressalvou, porém que o método apresentado por ele fora obtido de modo independente e totalmente diferente daqueles das discussões fundamentadas por Heaviside (EGUCHI, 1925).

As cargas armazenadas pelos eletretos formados por alguns dielétricos sólidos e seus comportamentos anômalos foram mais tarde, em 1944, compreendidos e explicados por Gross que empregou conceitos de “homocargas” e “heterocargas”, segundo uma definição já estabelecida em 1935, para indicar respectivamente suas relações de sinal em acordo ou em desacordo com a polaridade referencial nos eletrodos adjacentes, isto é, aquela da fonte de tensão que foi aplicada no circuito de carregamento elétrico (GROSS, 1944).

Pouco depois, Gross e Denard explicaram a mudança nas polaridades das cargas e a condição de estabilidade delas sobre as faces do dielétrico, justificando a ocorrência simultânea da formação de dipolos elétricos com o aprisionamento de cargas projetadas pelos eletrodos durante o processo de carregamento elétrico das amostras, em conformidade com os experimentos relatados anteriormente por Eguchi. O campo elétrico aplicado na amostra possuía um sentido oposto àquele criado pelos dipolos formados no interior da amostra, logo após a formação dos eletretos, conforme a forma de representação genérica na Fig. 2.2 (a) (GROSS e DENARD, 1945).

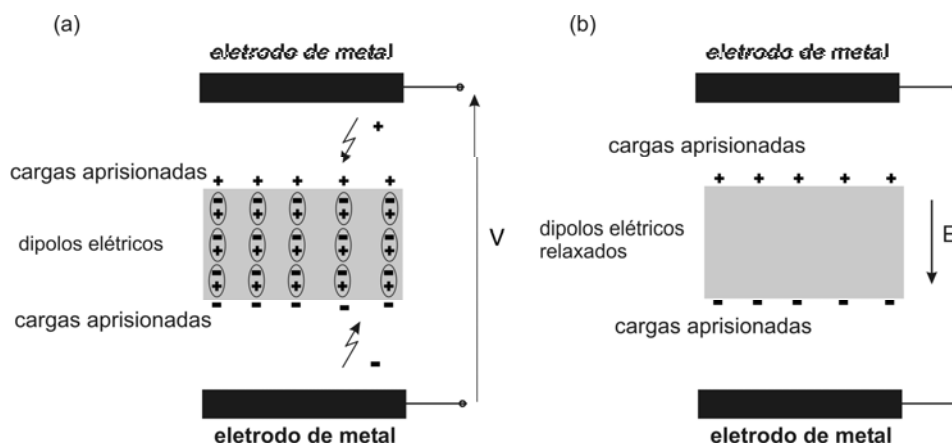


Figura 2.2: (a) heterocargas e homocargas – (b) homocargas estáveis.

Logo após o processo de carregamento elétrico pela aplicação do campo no material ainda em fusão, observou-se a presença de “heterocargas” ou cargas de polarização, cujos

momentos dipolares permaneceram ainda por um curto prazo (alguns dias), após a retirada do campo que polarizou a amostra. Em seguida com a relaxação dos dipolos, após a remoção do campo elétrico aplicado, restaram as cargas elétricas aprisionadas ou “homocargas”, mais estáveis, com polaridades iguais àsquelas dos eletrodos adjacentes, em relação à tensão aplicada, conforme mostra a Fig. 2.2 (b).

Fundamentado nestes princípios, foi possível mostrar inicialmente o aparecimento de cargas temporárias que deram lugar a um carregamento eletricamente oposto, porém com capacidade de permanecer mais tempo no dielétrico. Justificou-se o aparecimento das heterocargas logo após a produção do eletreto e a posterior substituição destas pelas homocargas mais estáveis, enfatizando também que os dielétricos sólidos teriam uma maior ou menor quantidade de cargas armazenadas associadas à temperatura em que os seus eletretos fossem preparados. Também foi justificada a estabilidade adquirida pelas cargas armazenadas em função das velocidades de descarga das heterocargas e de carga das homocargas proporcionais à temperatura de preparo dos eletretos, mencionando que eles poderiam também ser obtidos sem tratamento térmico, porém com uma menor quantidade de cargas armazenadas neles. Os trabalhos de Gross e Denard além de complementar as observações de Eguchi, demonstraram a possibilidade de se obter eletretos mais estáveis e com mais carga em função de uma maior temperatura durante o processo de preparo das amostras. Desta forma, estes artigos de 1944 e 1945 forneceram as primeiras informações sobre a influência da temperatura no comportamento elétrico dos eletretos.

Estes trabalhos foram concluídos em conformidade com o dito por Heaviside em 1892, propondo que os eletretos eram dielétricos que apresentavam um campo elétrico residual, em uma certa analogia com aquele magnético e remanente apresentado pelos ímãs permanentes. Na oportunidade foi também demonstrado que uma amostra de eletreto cortada em dois pedaços gerava dois novos eletretos. Basicamente, dois eram então os fenômenos que poderiam explicar a ocorrência de um campo elétrico residual em um dielétrico: a polarização dielétrica e a retenção das cargas elétricas em armadilhas energéticas observadas em níveis microscópicos, na estrutura molecular de alguns materiais.

Um disco com eletreto, feito com uma mistura de cera de carnaúba e resina natural, com 20 cm de diâmetro e 1 cm de espessura encontra-se preservado no Museu de Ciências de Tóquio onde foi possível verificar a permanência de suas cargas superficiais ainda que com um sétimo do valor inicial, decorridos 45 anos após o seu preparo. Fukada, realizando

experiências com vários destes discos, descreveu que imediatamente após a polarização dos eletretos, as cargas superficiais eram de sinais opostos às polaridades dos eletrodos, indicando então a presença de heterocargas. No entanto, decorridos mais de 20 anos, homocargas foram observadas no lugar daquelas heterocargas originais em acordo com o que já havia sido anteriormente observado por Eguchi e interpretado por Gross. Foi constatado também que a quantidade de homocargas presentes nos discos aumentava com a temperatura no momento de polarização das amostras. Tais resultados confirmaram a estabilidade das homocargas, aquelas lançadas pelos eletrodos sobre a cera de carnaúba (FUKADA, 2000).

A experiência de Eguchi foi confirmada por volta de 1951 conforme os resultados graficamente ilustrados na Fig. 2.3. Mostram a presença das heterocargas superficiais em eletretos em cera de carnaúba, logo após a polarização destes e a posterior substituição delas pelas homocargas, encontradas e medidas após 22, 27 e 35 anos do preparo das amostras. A polarização das amostras foi estabelecida por um gradiente de potencial de 4 MV/m e o aumento na temperatura de polarização T_p mostrou uma maior quantidade de homocargas estáveis, consequência de mais heterocargas e também de uma maior relaxação aos dipolos inicialmente formados.

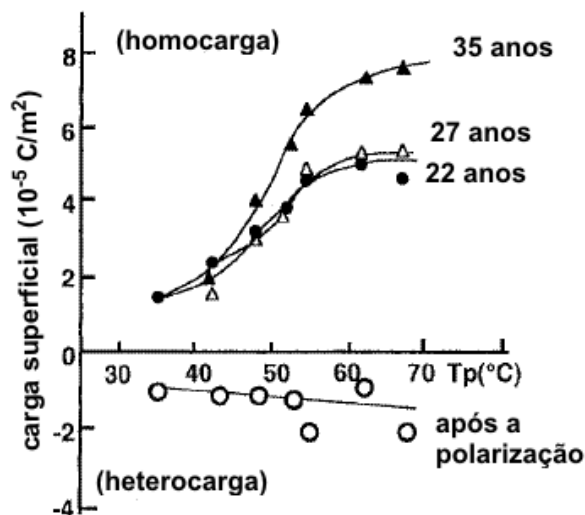


Figura 2.3: eletretos em cera de carnaúba após o preparo e depois de 22, 27 e 35 anos. (FUKADA, 2000).

Neste artigo revisional, Fukada registra as experiências de Eguchi publicadas em 1925 e suas repetições por outros pesquisadores, considerando a tomada de outras medidas, vindo a confirmar a capacidade que os eletretos possuem de armazenar as cargas injetadas (homocargas) na cera de carnaúba, mantendo-se estáveis ainda por muitos anos.

Nas décadas seguintes ao descobrimento feito por Eguchi, eletretos de materiais derivados de cera e outras substâncias foram produzidos por técnicas de carregamento diferentes daquelas do método térmico. Tais processos, tendo Selenyi por pioneiro em 1928, baseavam-se na injeção de elétrons ou íons no interior de materiais isolantes (SESSLER, 1987). Nos idos de 1970, vieram os processos de cargas em dielétricos por efeito corona (SESSLER e WEST, 1972), (SAWA, LEE e IEDA, 1975), (GIACOMETTI, FERREIRA e GROSS, 1988), (GIACOMETTI e OLIVEIRA Jr., 1992).

Um método de medida dos campos e das cargas elétricas distribuídas foi proposto, ainda que de modo indireto, pela técnica do pulso de pressão induzido por laser, LIPP (Pulso de Pressão Induzido por Laser – *Laser-Induced Pressure Pulse*). Um pulso dirigido de raio laser incide sobre uma das faces da amostra, estando esta recoberta por uma camada de grafite para facilitar a absorção da luz. O pulso de luz incidente absorvido gera um pulso de calor. Uma onda acústica se propaga e se difunde no material, causando deformações instantâneas em espessuras incrementais, produzindo um sinal elétrico em função do tempo. A tensão elétrica na amostra fornece, de modo indireto, a distribuição de cargas pelo interior do material, em termos quantitativos e de profundidade das armadilhas energéticas. Permite também a medida de campos elétricos ao longo da espessura do material (MIGLIORI e THOMPSON, 1980), (SESSLER, WEST e GERHARD, 1982).

A técnica de carregamento proposta por Selenyi em 1928 foi aperfeiçoada pela injeção de um feixe dirigido de elétrons sobre a amostra, segundo trabalhos realizados na década de 1980, cuja distribuição de cargas foi medida pela técnica conhecida do LIPP. Este processo de carregamento tem uma citação histórica por ter sido aquele que preconizou o aparecimento de outros métodos alternativos àquele conseguido por efeito corona, impondo um tempo menor à etapa do processo de carga dos dielétricos para formar eletretos (GROSS et al., 1987), (SESSLER, 1989).

Buscando um processo para medir o pico da tensão impulsiva proveniente de descargas atmosféricas, Altafim e colaboradores desenvolveram um dispositivo constituído por uma película de Teflon[®] e um pequeno espaçamento de ar, encerrando este conjunto entre dois eletrodos. A descarga atmosférica, pelo seu intenso campo elétrico, carregava o filme dielétrico formando eletretos, retendo cargas no meio dielétrico. Pela quantidade de cargas aprisionadas, era possível avaliar o pico da tensão de impulso da descarga. Mais um novo método surgia: o do carregamento em dielétricos por pulsos de curtas durações sob altas

tensões. Trabalhos advindos mostraram a evolução deste método de carregamento elétrico, onde o processo de carga por corona deu lugar à aplicação de altas tensões impulsivas com uma significativa redução de custos e de tempo para a obtenção dos eletretos. (ALTAFIM, GIACOMETTI e JANISZEWSKI, 1992), (ALTAFIM et al., 1992), (ALTAFIM e FERREIRA, 1996), (ALTAFIM, FERREIRA e GIACOMETTI, 1998).

2.1.2 Capacitores vibrantes

Em 1952, foi observada a geração de sinais elétricos alternados entre duas lâminas paralelas, tendo o ar entre elas, quando submetidas a oscilações mecânicas. Este estudo abordou a teoria dos capacitores vibrantes, onde a diferença de potencial entre as armaduras foi medida e analisada com respeito às amplitudes e frequências dos sinais emitidos por este componente, operando como um sensor eletromecânico (ANDERSON e ALEXANDER, 1952).

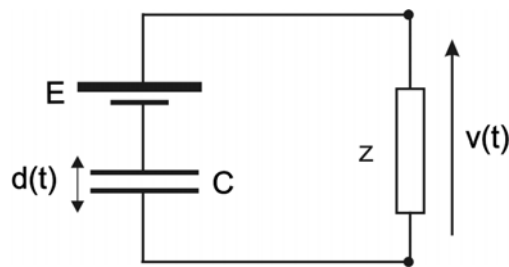


Figura 2.4: circuito elétrico do capacitor vibrante

Anderson e Alexander realizaram seus estudos baseados no princípio de um microfone capacitivo C alimentado por uma fonte de tensão contínua E , cuja resposta elétrica foi observada pela tensão elétrica $v(t)$ em uma carga de impedância z , conforme mostra a Fig. 2.4. Este capacitor operava devolvendo sinais elétricos em consequência de vibrações mecânicas experimentadas sobre suas armaduras. Um conjunto formado por duas lâminas paralelas desempenha o papel de um capacitor plano tendo o ar como dielétrico. Uma resposta elétrica aparece entre as lâminas quando a distância $d(t)$ entre elas varia no tempo, em consequência de oscilações mecânicas provocadas.

Uma vibração mecânica e harmônica estabelece uma tensão elétrica entre os terminais da impedância que completa o circuito. A manutenção da tensão pela fonte E impõe uma variação na tensão elétrica entre os terminais da carga de modo a compensar a tensão alternada que aparece entre as armaduras do capacitor. Interessante observar que estes capacitores vibrantes possuem um comportamento eletromecânico que devolve sinais

elétricos como respostas às perturbações mecânicas ou vice-versa. Este comportamento observado fornece uma falsa idéia de que os fenômenos observados encontram-se relacionados com a piezeletricidade, se analisados pelos terminais da carga. No entanto, seu princípio de funcionamento pode ser empregado na concepção de modelos para transdutores eletromecânicos obtidos por eletretos com cargas depositadas e retidas por um dielétrico, bastando para isto a substituição da fonte de tensão contínua por um suprimento de carga elétrica constante.

2.1.3 Microfones capacitivos de eletreto

A exemplo do ocorrido anteriormente com as experiências em cera de carnaúba, observou-se outro exemplo de formação de homocargas com excelente estabilidade em películas poliméricas e homogêneas de Teflon[®] FEP, muito empregadas em microfones de eletreto, disponíveis hoje em dia em milhões de telefones portáteis. Os japoneses foram os primeiros que utilizaram estes eletretos formados em películas poliméricas em microfones de telefones militares, durante a Segunda Guerra Mundial. Obtiveram êxito reduzindo estes telefones em peso e tamanho, atendendo assim propostas requisitadas em equipamentos com finalidades portáteis, necessitando de uma pequena bateria, o suficiente para alimentar e polarizar os filmes com os eletretos neles formados (ELETRETOS, 2006).

O microfone capacitivo de eletreto teve o seu desenvolvimento em escala industrial nos laboratórios da Bell por Gerhard Sessler e James West em 1962 com a grande vantagem de não requerer uma fonte de tensão elevada. Este microfone comercial com membranas sensíveis de películas poliméricas, emprega apenas um pré-amplificador integrado, com um transistor de efeito de campo FET (Transistor de Efeito de Campo – *Field Effect Transistor*), não requerendo grandes potências para operar.

A Fig. 2.5 ilustra a estrutura e o circuito elétrico de um microfone comercial de eletreto. A membrana superior 1 é protegida por uma grade metálica e pode vibrar. Um anel separador e isolante define um interstício de ar entre a membrana superior e frontal com a película carregada 2, normalmente em Teflon[®] FEP. A face inferior desta película de eletreto mantém contato com o eletrodo de indução (inferior), isolado do invólucro que contém todo o dispositivo eletromecânico.

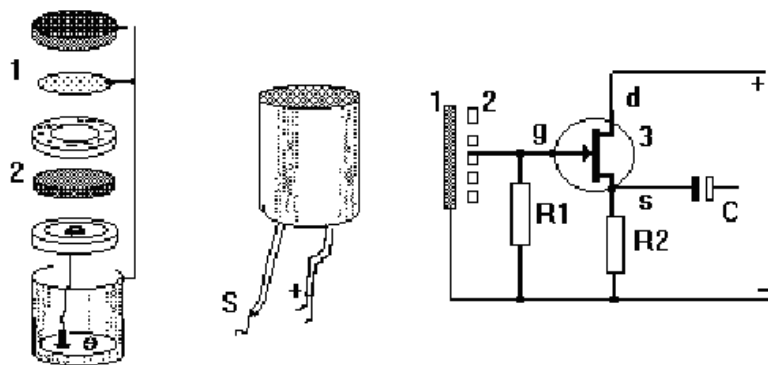


Figura 2.5: estrutura e circuito de microfone comercial de eletreto. (ELETRETOS, 2006).

Uma onda de pressão sonora faz vibrar a membrana superior, variando o espaçamento de ar entre ela e o filme carregado de eletreto. O gatilho g do transistor FET 3 é alimentado por uma tensão elétrica que varia no tempo. Observa-se então o comportamento deste microfone como um transdutor eletromecânico que produz esta tensão proporcional ao sinal acústico recebido na entrada pela membrana.

Este transistor é polarizado positivamente pelo seu dreno d contra o terminal negativo comum, por uma bateria de baixa tensão e pequena potência. O sinal elétrico proporcional ao som emitido é pré-amplificado pelo transistor FET, fazendo-o escoar pela sua fonte s , acoplado pelo capacitor C . Atualmente os microfones de eletreto são extremamente difundidos devido ao seu baixo preço, à sua portabilidade (1 mm de espessura e 5 mm de diâmetro) e às suas características eletroacústicas.

2.2 A descoberta da piezeletricidade

A palavra “piezo”, de origem grega, tem o significado de pressionar ou exercer uma determinada pressão sobre um objeto. Em uma terminologia ampla e moderna, a piezeletricidade diz respeito à correspondência estabelecida entre fenômenos elétricos e elásticos de uma forma bilateral. Ocorre mediante uma dependência linear estabelecida entre uma tensão ou corrente elétrica induzida nos eletrodos e uma correspondente solicitação ou deformação mecânica aplicada no sistema, ou reciprocamente.

Os estudos sobre as atividades piezelétricas e a sua fenomenologia, com maior predominância em alguns materiais, iniciaram-se com suposições de Charles Augustin de Coulomb, seguidas da descoberta efetiva nas conclusões tiradas pelos irmãos Curie, evoluindo posteriormente com os fundamentos teóricos estabelecidos por Born em 1920. O texto que

segue nesta seção faz uma revisão que descreve o fenômeno da piezeletricidade nas primeiras suposições, na sua descoberta científica, dentro de sua evolução histórica até os tempos atuais (BALLATO, 1996).

Um percurso pela história da piezeletricidade, partindo das suposições iniciais de Coulomb até os fundamentos científicos de Born é mostrado através dos tempos, de uma maneira sinóptica, na Tab. 2.1.

Tabela 2.1: histórico sinóptico da piezeletricidade.

| | |
|-------------------|--|
| Coulomb | Suposições: experiências com borracha – século XVIII; |
| Haüy | Experiências em cristais – século XVIII; |
| Becquerel | Eletrização por tensão mecânica, anisotropia em cristais, 1819; |
| Curie, J. & P. | Descoberta efetiva, 1880; |
| Hankel | Sugestão do termo “Piezeletricidade”, 1881; |
| Lippmann & Curies | Efeito reverso e reciprocidade, 1881; |
| Kelvin | Modelo atômico, 1893; |
| Duhem | Teoria formal e fenomenológica, 1894; |
| Pockels | |
| Voigt | Coefficientes “tensores”, 1894 – Notas de Aula, 1910; |
| Langevin | Sonar 1914-1918 (1 ^a . Guerra); disciplina de ultrassônica; |
| Born | Teoria = cálculos + experiências; esfalerita (β -ZnS), 1920. |

Entre 1780 e 1790, Coulomb levantou as primeiras suposições de que a eletricidade poderia também ser produzida por pressão, conduzindo posteriormente aos experimentos de Haüy sem resultados conclusivos, prevendo a produção de cargas em uma borracha sob tensão mecânica. No século seguinte, em 1819, Antoine César Becquerel descobriu o efeito piezelétrico em alguns cristais, detectando um potencial elétrico quando estes eram submetidos a pressões mecânicas, atribuindo tal comportamento a certas diferenças constantes e presentes no interior da estrutura cristalina do material (FAMILLE BECQUEREL, 2006).

A descoberta efetiva da piezeletricidade se deu pelos irmãos Jacques e Pierre Curie em 1880, a partir de uma curiosidade científica, observando o aparecimento de cargas superficiais em alguns materiais de estrutura cristalina quando estes eram mecanicamente solicitados. Os irmãos Curie sabiam o que procuravam e realizaram experimentos com os mais diversos tipos de materiais conforme mostra a Tab. 2.2.

Tabela 2.2: cristais com piezeletricidade medida pelos irmãos Curie.

| Cristal | Fórmula |
|---|---|
| Sulfeto de zinco / esfalerita | $\beta - \text{Zn S}$ |
| Clorato de sódio | Na Cl O_3 |
| Boracita | $\text{Mg}_3 \text{B}_7 \text{O}_{13} \text{Cl}$ |
| Turmalina | $\text{Na Mg}_3 \text{B}_3 \text{Al}_6 \text{Si}_6 \text{O}_{27} \cdot (\text{OH})_4$ |
| Quartzo | Si O_2 |
| Calamina / hemimorfita | $\text{Zn}_4 (\text{OH})_2 \text{Si}_2 \text{O}_7 \cdot \text{H}_2 \text{O}$ |
| Topázio | $\text{Al}_2 \text{Si O}_4 (\text{F}, \text{OH})_2$ |
| Ácido tartárico | $\text{H}_2 \text{C}_4 \cdot \text{H}_4 \text{O}_6$ |
| Cana de açúcar / sacarose | $\text{C}_{12} \text{H}_{22} \text{O}_{11}$ |
| Sal de Rochelle / tartarato de sódio e potássio | $\text{K Na} (\text{C}_4 \text{H}_4 \text{O}_6) \cdot 4 \text{H}_2 \text{O}$ |

O ano de 1881 foi marcado por descobertas que muito contribuíram para a evolução dos estudos iniciados pelos irmãos Curie. Hankel sugeriu o nome “piezeletricidade” que foi aceito por todos. Lippmann com bases termodinâmicas confirmou a existência de um efeito inverso daquela piezeletricidade descoberta, justificando que a imposição de cargas elétricas superficiais induzia reciprocamente o aparecimento de deformações mecânicas. Ainda neste mesmo ano, os irmãos Curie reforçaram o confirmado por Lippmann, e anunciaram que os coeficientes piezelétricos para ambos os efeitos direto e inverso eram idênticos, estabelecendo o princípio da reciprocidade.

William Thomson, conhecido por Lorde Kelvin, desenvolveu em 1893 um modelo atômico para descrever o efeito piezelétrico. No ano seguinte, em 1894, o tratamento formal da piezeletricidade avançou substancialmente com trabalhos elaborados por Duhem e Pockels. Ainda no mesmo ano, o fenômeno da piezeletricidade alcançou a sua maturidade com artigos de Woldemar Voigt, devidamente registrados em suas notas de aula (*Leherbuch*) de 1910, que tratou os coeficientes piezelétricos relacionando-os com a presença de tensores mecânicos.

Durante a Primeira Guerra Mundial, no período de 1914-1918, Langevin utilizou transdutores piezelétricos na detecção de submarinos, tornando-se mais tarde o pai do sonar e da disciplina de Ultrassônica. Mais à frente, em 1920, Born publicou o primeiro cálculo teórico para o coeficiente piezelétrico na esfalerita ou $\beta\text{-ZnS}$ (beta sulfeto de zinco), uma rocha mineral.

2.3 Polímeros homogêneos e eletretos

Os estudos da piezeletricidade avançaram no tempo e as atenções se voltaram também para estes fenômenos aparentemente presentes em alguns materiais orgânicos, de

estruturas moleculares poliméricas, fossem estas polares ou não. Alguns materiais que possuem uma estrutura molecular polimérica costumam exibir um tipo de comportamento que em primeira análise pode ser considerado piezelétrico. De modo análogo ao observado no quartzo e nas cerâmicas, vistos pelos terminais de uma caixa preta ou mesmo de um quadripolo, quando excitados por oscilações mecânicas, devolvem respostas elétricas ou vice-versa.

2.3.1 Polímeros piezelétricos

A década de 1950 foi marcada pelos primeiros estudos realizados sobre a piezeletricidade em polímeros polares e de origem biológica, como a celulose e o colágeno, bem como naqueles de origem sintética, a exemplo das poliamidas e dos ácidos poli lácticos. Em seu artigo de revisão literária, publicado em 2000, Fukada assinala que em 1950 a piezeletricidade foi identificada na madeira por Bazhenov, que atribuiu este efeito às macromoléculas de celulose na sua estrutura. Cita ainda que Yasuda em 1953 detectou a piezeletricidade nos ossos quando observou a produção de eletricidade neles, quando deformados por flexão. Esta piezeletricidade encontrada nos ossos acabou despertando interesses à medicina no campo da ortopedia, pelo efeito reverso, cujo estímulo elétrico desempenhou um papel auxiliar na consolidação de uma fratura ou mesmo no crescimento de um osso. As descobertas da piezeletricidade nos polímeros biológicos apontaram para uma série de aplicações no campo da medicina ortopédica, alguns com a característica de uma biocompatibilidade favorável a uma posterior absorção destes polímeros pelo organismo (FUKADA, 2000).

As primeiras demonstrações de dispositivos eletromecânicos empregando polímeros de origem biológica foram conduzidas por Fukada em 1959, empregando tendão, osso e cartilagem de baleia em cápsulas de agulhas para toca-discos no lugar daquelas comercialmente utilizadas e formadas com o sal de Rochelle (tartarato duplo de sódio e potássio) em tais aplicações na época. As tensões de saída nestas cápsulas fonográficas como respostas para as frequências ensaiadas, nestes materiais alternativos, encontram-se ilustradas na Fig. 2.6. Tais demonstrações, ainda que primitivas, foram suficientes na época para se fazer supor a existência de piezeletricidade nos biopolímeros.

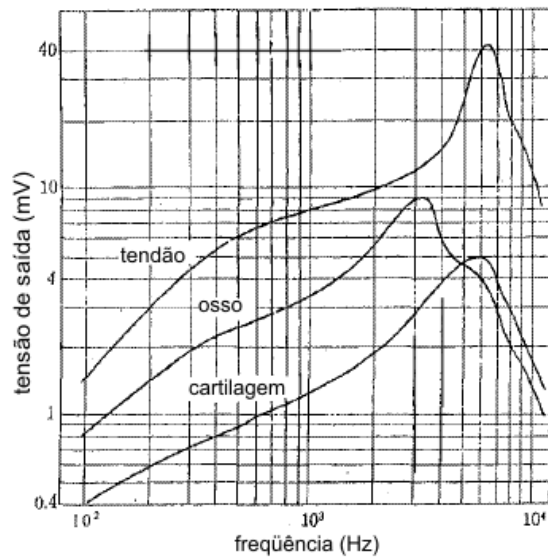


Figura 2.6: resposta de agulhas fonográficas em cartilagem de baleia, osso e tendão. (FUKADA, 2000).

A piezeletricidade era então um fenômeno distintamente marcado pelas assimetrias moleculares que se faziam presentes nas estruturas dos materiais detentores desta propriedade. As semelhanças dos polímeros piezelétricos com as propriedades ferroelétricas foram observadas, quando em 1969 uma piezeletricidade maior foi observada em películas alongadas e polarizadas de PVDF, caracterizadas por laços de histerese dielétrica em temperaturas muito baixas. Mesmo a 100°C negativos, enriquecendo as experiências realizadas em baixas temperaturas, estes laços foram observados, onde uma polarização residual remanente ainda permanecia em torno de uns 60 mC / m², não apresentando grandes variações com a temperatura de realização dos ensaios, conforme mostrado na Fig. 2.7. Por outro lado, o campo coercitivo já apresentava outro tipo de comportamento, tendo o seu valor aumentado com o decréscimo da temperatura (FURUKAWA, DATE e FUKADA, 1980).

Vários dispositivos eletromecânicos empregando o PVDF e seus copolímeros foram desenvolvidos a partir de 1970. Grandes valores para constantes piezelétricas, $d_{31} = 20$ pC/N e $d_{33} = 30$ pC/N motivaram aplicações práticas em sensores de pressão e transdutores ultrassônicos à base deste material polimérico. Transdutores eletroacústicos ultrassônicos empregando filmes alongados e polarizados de PVDF foram produzidos inicialmente em 1972 e 1973. Fones de ouvido, hidrofones e alto-falantes empregando o PVDF foram bastante comercializados em 1975.

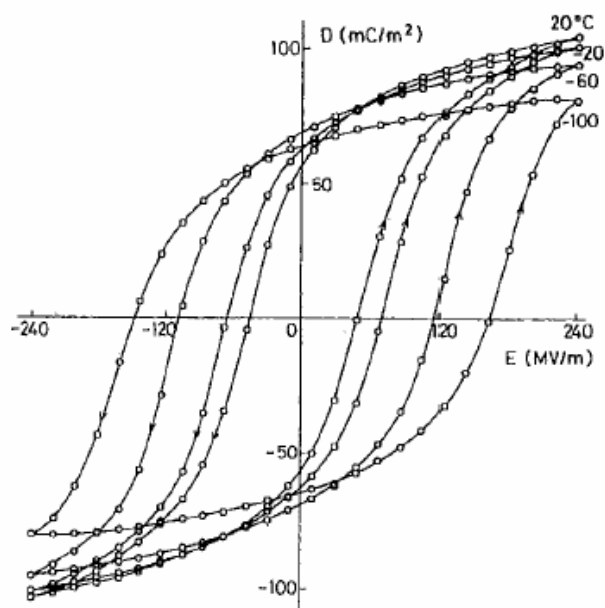


Figura 2.7: laços de histerese para o PVDF a baixas temperaturas. (FUKADA, 2000).

2.3.2 Polímeros não polares

A revisão literária de Fukada em 2000, também descreve alternativas para a obtenção de eletretos com materiais poliméricos apresentando respostas com características de um comportamento aparentemente piezelétrico, equiparado àquelas próprias dos materiais cerâmicos. O campo destes estudos é muito vasto, resultando em muitos trabalhos realizados em várias partes do mundo e alguns praticamente ao mesmo tempo. Sem fugir dos objetivos desta tese, é inevitável que alguns artigos sejam aqui omitidos.

Desde 1975, que a piezeletricidade e a piroeletricidade vêm sendo observadas, ainda que de forma aparente, também em dispositivos eletromecânicos fabricados com polímeros de características não polares, bastando que neles se encontrem camadas de cargas elétricas distribuídas. Se estes polímeros experimentarem deformações provocadas por solicitações mecânicas ou térmicas, suas cargas sofrem um deslocamento relativo, produzindo uma resposta elétrica. Por exemplo, um microfone de eletreto baseia-se neste mecanismo, onde a pequena espessura de ar e o eletreto formado pelo dielétrico carregado apresentam deformações muito diferentes. Uma diferença de pressões entre os dois lados do diafragma do dispositivo faz uma camada superficial de carga, depositada na película com o eletreto, se mover em relação aos eletrodos do microfone.

Neste sentido, uma resposta elétrica primária caracteriza-se pela variação da polarização, visto que os dipolos se deslocam de modo não uniforme, dentro de uma escala atômico-molecular. Por outro lado, outra resposta secundária é identificada pela densidade destes dipolos, estes considerados rígidos em relação ao material interposto entre eles, responsável pela maioria das deformações. Este último mecanismo vem mostrar que as camadas maleáveis ou compressíveis alternam-se com as mais rígidas e que as interfaces superficiais entre elas transportam cargas de polaridades opostas (SESSLER, 1987).

Em 1995, uma mudança de paradigma demonstrou que uma resposta elétrica ou mecânica nos polímeros poderia também estar relacionada com a estrutura molecular do sólido dielétrico, tendo nele uma carga fixa depositada. Além disto, foi observado que as respostas aos estímulos eletromecânicos eram dependentes de uma elasticidade presente e resultante da combinação de materiais dielétricos diferentes. Tal feito foi experimentalmente justificado e matematicamente equacionado para um eletreto formado pela junção de dois polímeros com propriedades elásticas distintas entre dois eletrodos: uma película de **Poli Propileno (PP)** sólido unida com outra de **Poli Uretano (PU)** elástico de mesma espessura, ou compostos de Teflon[®] PTFE (**Poli Tetra Flúor Etileno**) sólido e PP maleável (KACPRZYK et al., 1995), (KACPRZYK, DOBRUCKI e GAJEWSKI, 1997).

2.3.3 Eletretos e a piezeletricidade aparente

De um modo geral, a orientação dipolar e as cargas depositadas são os dois mecanismos contribuintes de uma aparente piroeletricidade, piezeletricidade e ferroeletricidade em boa parte dos polímeros, sejam eles polares ou não (FUKADA, 2000).

Hoje em dia as aplicações voltadas à piezeletricidade não estão mais restritas ao quartzo, aos materiais cerâmicos ou mesmo aos polímeros de natureza polar. Elas podem também ser realizadas com o emprego de materiais poliméricos de estrutura não polar, porém dentro de restrições operativas e com algumas adaptações. Mesmo com algumas limitações, estes polímeros não polares encontram muitas aplicações em transdutores eletromecânicos, substituindo sem maiores dificuldades aqueles materiais naturalmente piezelétricos. Em algumas aplicações estes transdutores oferecem até vantagens pela flexibilidade e pela impermeabilidade, características dos materiais poliméricos, além de possuir uma inércia bastante reduzida.

Enquanto que no quartzo, nas cerâmicas piezelétricas e nos polímeros polares o fenômeno se manifesta naturalmente por uma correspondência biunívoca entre uma deformação mecânica e um sinal elétrico, nos polímeros não polares o mesmo comportamento é observado desde que eles estejam eletricamente carregados. Assim, associados aos eletrodos metálicos, o comportamento que estes materiais poliméricos não polares apresentam, podem ser confundidos com aqueles dos materiais piezelétricos que apresentam naturalmente esta propriedade.

Na realidade, estes dispositivos devem ser tratados apenas como transdutores eletromecânicos obtidos por eletretos, de uma forma distinta daqueles materiais que já apresentam a piezeletricidade na sua forma natural, sem que haja a necessidade de um carregamento elétrico para uma polarização prévia sobre eles. Os eletretos são formados, com intervenção humana, em materiais dielétricos que permitem o aprisionamento de cargas elétricas interiores ou superficiais, decorrentes de um processo de carregamento na presença de um campo elétrico de alta intensidade. Mesmo depois que a origem destas cargas foi retirada, ainda exibem um campo elétrico residual. Trata-se, portanto de uma propriedade extensiva e característica de alguns materiais.

O fenômeno da piezeletricidade, por outro lado, mostra-se presente em alguns materiais cujas estruturas atômico-moleculares contêm certas assimetrias. BASSO em suas anotações demonstra, empregando tensores mecânicos e elétricos, que tais materiais com estas características devolvem um sinal elétrico sempre que experimentam qualquer tipo de tensão mecânica, seja ela de compressão, tração ou cisalhamento. Inversamente, quando excitados eletricamente respondem com deformações mecânicas, relacionadas aos tensores mecânicos. A piezeletricidade é então uma propriedade intensiva e característica da natureza de alguns tipos de materiais, com este comportamento apresentado de forma linear, reversa e recíproca (BASSO, 2006).

O conceito sobre os eletretos já estava formado e justificado pela realização de várias pesquisas a este respeito. As investigações posteriores sobre a piezeletricidade em materiais de estrutura polimérica tornaram possível que os eletretos neles formados e o comportamento verificado passassem a caminharem juntos associando os dois conceitos, procurando definir assim um modelo para os transdutores eletromecânicos poliméricos obtidos com a formação de eletretos.

Desta forma, uma análise em parâmetros de circuito veio mostrar que o filme polimérico e os espaçamentos de ar poderiam ser vistos como dielétricos e os eletrodos como armaduras de uma associação de capacitores planos dispostos em série, sem maiores dificuldades. De posse deste modelo, tornava-se também possível conhecer a distribuição das cargas que ficavam depositadas e as forças de ação do campo elétrico, agentes sobre os eletrodos em função do dielétrico carregado. Avaliando estas forças, campos e potenciais o comportamento dos microfones e alto-falantes com eletretos tornaram-se melhor interpretados e compreendidos cientificamente (SESSLER, 1972).

Ainda no ano de 1972, foram realizados estudos mais refinados sobre a deposição das cargas sobre películas poliméricas dielétricas de PET (**P**oli **E**tileno **T**eraftalato), Teflon[®] FEP e PC (**P**oli **C**arbonato), tendo uma de suas faces metalizada. Cada película ensaiada foi eletricamente carregada sob efeito corona e uma lâmina de vidro foi colocada entre a face não metalizada da película e o eletrodo inferior aterrado, conforme o ilustrado pela Fig. 2.8 (a).

Após o carregamento elétrico para a formação dos eletretos em cada filme, antes que o polímero fosse removido do conjunto, o eletrodo superior foi afastado e a face metalizada do filme foi posta em curto-circuito com o eletrodo inferior, conforme pode ser mostrado na Fig. 2.8 (b). Mesmo com a fonte de tensão removida e o conjunto posto em curto-circuito, as películas ainda se mostravam eletricamente carregadas (SESSLER e WEST, 1972).

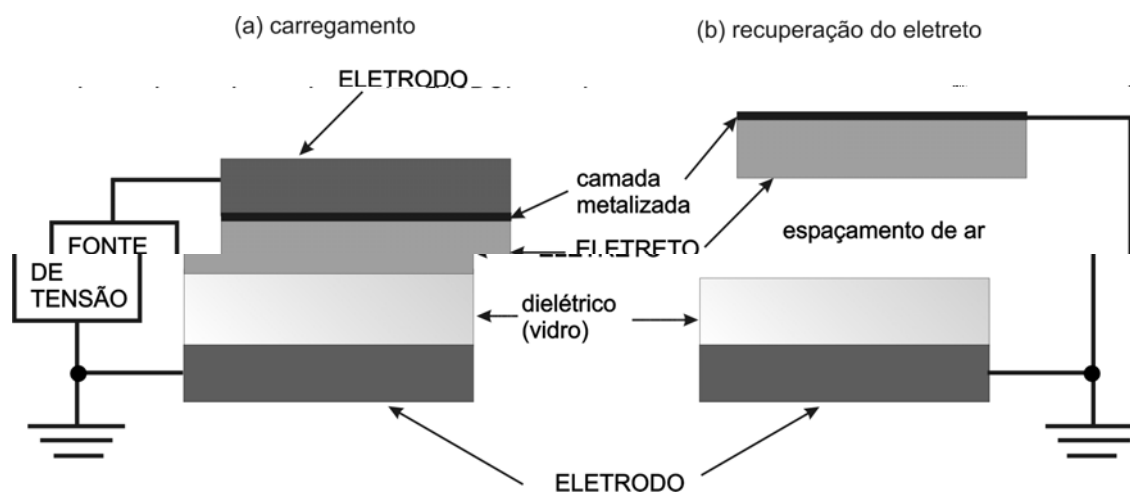


Figura 2.8: carregamento de um filme polimérico com vidro (dielétrico) inserido.

Estes dois artigos, elaborados no mesmo ano, mostraram o avanço dos trabalhos no campo dos eletretos poliméricos, sinalizando os primeiros indícios de um comportamento eletromecânico para este tipo de transdutor polimérico. Descreveram o comportamento destes

isolantes poliméricos como eletretos, exibindo uma significativa capacidade de armazenamento de carga, da ordem de até $1 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, com uma constante de tempo de decaimento da ordem de uns 10 anos. Com isto, pode-se inferir que a carga elétrica depositada fica praticamente retida no material dielétrico, justificando o eletreto formado. O primeiro artigo demonstrou os cálculos dos campos elétricos nas camadas do isolante e no espaçamento entre eles, oferecendo uma ferramenta simples e direta para avaliar o comportamento destes transdutores eletromecânicos, determinando também a força agente nos eletrodos em resposta a uma solicitação elétrica. O segundo artigo apresentou, com outro enfoque, o comportamento físico de alguns filmes poliméricos quanto ao carregamento elétrico, sem a ocorrência de rupturas dielétricas no ar, mesmo além dos limites estabelecidos pela curva de Paschen (KUFFEL e ZAENGL, 1984).

Uma análise do comportamento eletromecânico inverso para este transdutor apontou para um fenômeno interessante: mostrou que dois tipos de excitações, basicamente diferentes em natureza, apresentaram efeitos aparentemente similares. A excitação elétrica alternada e direta entre seus eletrodos fazia com que o transdutor eletrostático produzisse vibrações mecânicas. Por outro lado, a excitação alternada aplicada num eletrodo do transdutor provocava uma vibração no elemento dielétrico que se transmitia ao outro eletrodo adjacente. Este estudo separa os dois tipos de excitações mencionadas e foi realizado com a análise de um transdutor capacitivo ultrassônico produzindo vibrações mecânicas nos eletrodos sobre as faces de uma película isolante de PP com $10 \mu\text{m}$ de espessura. Duas formas de ondas foram observadas, sendo denotadas pelas defasagens e tipos de interferências provocadas entre elas, percebendo-se então que se tratava de duas causas distintas. Tal feito foi desmembrado e atribuído a certa pressão eletrostática exercida diretamente sobre os eletrodos como também a vibrações na lâmina dielétrica central que era transmitida aos eletrodos. A pressão eletrostática, exercida sobre os eletrodos de forma direta, é traduzida por um trabalho realizado sobre a amostra, que modifica a energia armazenada pelo campo elétrico (DREYFUS e LEWINER, 1973).

As pesquisas voltadas aos eletretos formados em materiais de origem polimérica e as aparentes atividades piezelétricas a eles associados prosseguiram com a publicação de vários trabalhos provenientes de vários países. Moreno e Gross apresentaram uma técnica experimental e teoricamente justificada com o objetivo de medir o desenvolvimento e o decaimento do potencial de superfície, simultaneamente com as correntes elétricas em amostras de eletretos obtidos com Teflon[®] FEP e Polietileno (MORENO e GROSS, 1976).

Um arranjo experimental foi idealizado segundo mostra a Fig. 2.9. Um eletrodo em ponta P , alimentado por uma fonte de alta tensão contínua V_C polarizada negativamente, ioniza o meio, carregando eletricamente sob efeito corona uma película polimérica S de formato circular, distante 6,5 cm deste eletrodo. A distribuição dos elétrons sobre a amostra é melhorada por uma grade no potencial de terra separada por 4 mm da amostra. A amostra possui uma fina camada externa e inferior condutora apoiada sobre um disco metálico circular com 7,5 cm de diâmetro. Um anel de guarda G , com diâmetro interno de 5,8 cm e externo de 7,5 cm é mantido a um potencial positivo de polarização V_0 e impede que as correntes de superfície cheguem ao eletrodo de medida E , este interno ao anel de guarda com 5,6 cm de diâmetro. Todo este conjunto possui o comportamento de uma válvula de emissão catódica controlada pelo potencial de grade e é encerrado no interior de um cilindro metálico e aterrado M .

Um alto-falante L com sua membrana vinculada ao eletrodo E é excitado por um oscilador senoidal com uma amplitude de $1,2 \mu\text{m}$ e uma frequência de 280 Hz. Este conjunto, formado pela amostra e pelo eletrodo E , desempenha o papel de um sensor de vibração, possibilitando medidas da corrente de carga e do potencial de superfície na amostra.

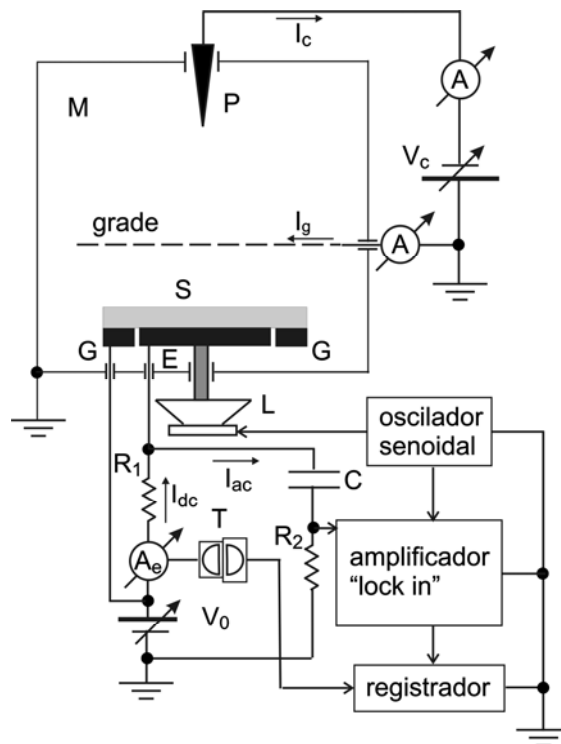


Figura 2.9: circuito de medidas do potencial e das correntes nos polímeros. (MORENO e GROSS, 1976).

O circuito de medida, externo ao cilindro blindado, é constituído de dois ramos. Um ramo em corrente contínua I_{dc} passando pelo resistor R_1 de 20 M Ω é medida a um potencial elevado pelo eletrômetro A_e e um transdutor fotoelétrico T , cuja saída vai a um registrador. O outro ramo bloqueia a corrente contínua pelo capacitor C com 16 nF, transmitindo a componente alternada, medida no resistor R_2 de 500 k Ω posteriormente amplificada. O amplificador sintonizado com seleção de frequência “*lock-in*” e o registrador transmitem o sinal que traduz a medida do potencial equivalente de superfície da amostra. Assim, o potencial V_S na superfície da amostra pode ser determinado, conhecendo-se as tensões no resistor R_2 e a da fonte V_0 .

Esta experiência veio mostrar como os polímeros se comportam na formação dos eletretos, fornecendo subsídios a serem levados em conta nos projetos de transdutores eletromecânicos poliméricos, ilustrando os comportamentos do crescimento do potencial de superfície e do decréscimo da corrente de carga destes eletretos em função do tempo (GIACOMETTI e OLIVEIRA Jr., 1992).

Em 1987, Medycki e Hilczer apresentaram uma melhora no processo de carga dos eletretos poliméricos, realizando experiências com amostras de PET e Teflon[®] FEP, corroborando o trabalho desenvolvido por Sessler e West em 1972. Substituíram a placa dielétrica de vidro, ilustrada na Fig. 2.8, por uma película do mesmo filme dielétrico do eletreto, porém não polarizado e de condutividade muito baixa, com o intuito de obter uma maior densidade de carga no eletreto formado. O circuito de ensaio, ilustrado na fig. 2.10 (a), possuía uma chave bipolar de modo a conectar ou desconectar o arranjo sob teste simultaneamente da fonte e da terra; o eletreto era polarizado por uma fonte de tensão contínua e depois era totalmente isolado da alimentação. A seguir, o eletrodo superior era removido, de acordo com a Fig. 2.10 (b). O dielétrico não polarizado era então afastado e o eletreto era obtido no filme polimérico com uma face (inferior) metalizada, como pode ser visto na Fig. 2.10 (c). Como resultado deste processo, o eletreto formado ficava com cerca de 70 % da tensão de polarização, contra aproximadamente 30 % obtido por Sessler e West (MEDYCKI e HILCZER, 1987).

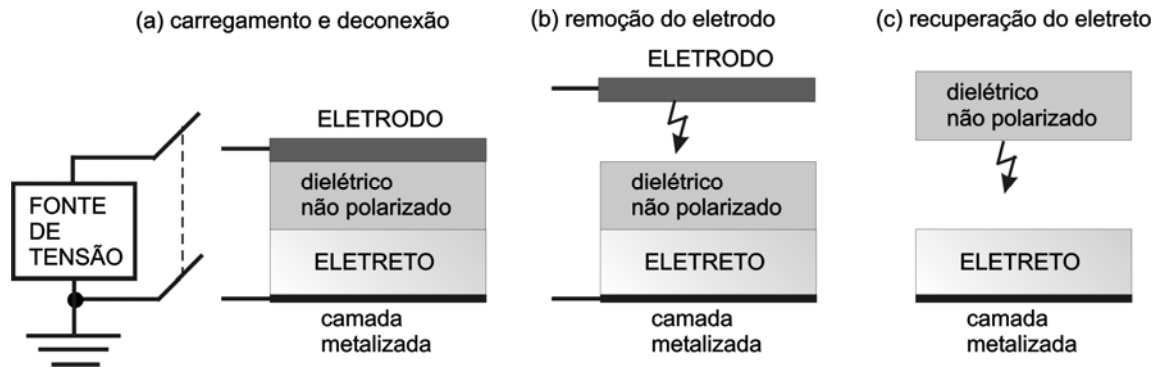


Figura 2.10: preparação do eletreto polimérico segundo Medycki e Hilczer.

2.4 Polímeros porosos e celulares

Os materiais poliméricos homogêneos já haviam sido exhaustivamente investigados no tocante às suas propriedades eletromecânicas, principalmente no que dizia respeito aos microfones de eletreto. Como pode ser visto na Fig. 2.5, estes dispositivos são constituídos por dois eletrodos, uma película polimérica carregada eletricamente e um pequeno interstício de ar, empilhados sem maiores complexidades. Uma das faces desta película de eletreto mantém um contato com um dos eletrodos enquanto que a outra não metalizada se encontra separada do outro eletrodo por uma pequena espessura de ar. O dispositivo assim formado com o eletreto é constituído basicamente pela junção de dois meios com propriedades elásticas diferentes, justificando assim o fenômeno responsável pela conversão eletroacústica.

2.4.1 Descobrimto dos polímeros porosos e celulares

Com base na elasticidade linear já mencionada anteriormente, Kacprzyk e seus colaboradores demonstraram a ocorrência de uma piezeletricidade aparente devido à simples justaposição de dois materiais, com a restrição de que eles possuam propriedades elásticas diferentes e que as deformações experimentadas sejam muito menores do que suas espessuras, que sofrem as solicitações mecânicas. Estas descobertas realizadas em meados da década de 1990 despertaram o interesse para o desenvolvimento de um transdutor em eletreto, que fosse formado por um único material, porém de consistência heterogênea e que estivesse sustentado pelos mesmos fundamentos teóricos enunciados acima, com base na associação de dois materiais de consistências diferentes.

As deduções e experiências realizadas orientaram o desenvolvimento de um dispositivo feito em camadas alternadas de filmes de Teflon[®] PTFE poroso (*p*) e mais maleável, com o mesmo material só que não-poroso (*np*) e menos maleável. O filme poroso

foi desenvolvido na China (*Shanghai Plastics Institute*), enquanto que o filme não poroso da mesma substância foi fabricado na Rússia (*Plastpolymer*) e na Inglaterra (*Goodfellow*). Surgia então uma película híbrida constituída de um material poroso, dotado de micro-orifícios, envolvido por camadas externas de películas não porosas. O conjunto exibia propriedades que justificavam as atividades eletromecânicas para um transdutor de eletretos dotado de uma piezeletricidade aparente (GERHARD-MULTHAUPT et al., 1999).

A descrição detalhada sobre o funcionamento de um microfone de eletreto despertou muitos pesquisadores na busca do desenvolvimento de um filme polimérico que tivesse minúsculas bolhas ou orifícios distribuídos pelo seu interior, esperando com isso, uma resposta eletromecânica mais sensível. Esta motivação levou ao desenvolvimento de um filme polimérico de PP na Finlândia por volta de 1998, contendo cavidades celulares ou microbolhas no interior da sua estrutura. De modo análogo, agregando melhorias às películas formadas por polímeros porosos associados com não porosos de mesmo material, esta película industrializada era mais uma alternativa de dispor minúsculos microfones de eletreto, em um único material, dentro de uma estrutura heterogênea.

Estava dada então, a partida na corrida ao desenvolvimento de transdutores eletromecânicos construídos com materiais poliméricos de consistência heterogênea, formando eletretos e conhecidos pelas suas propriedades ferroelétricas, procurando também uma identidade com as propriedades piroelétricas e piezelétricas. A descoberta destes filmes poliméricos heterogêneos e a piezeletricidade aparente a eles associada foi bastante marcada e justificada em publicações de autores de diversos países ao longo dos anos. Particularmente, a descoberta destas películas foi descrita pela estrutura microscópica, pela forma de operação e finalmente pela caracterização de uma película de PP, um material básico e de baixo custo, designado por Filme Eletro Mecânico (*EMFi – Electro Mechanical Film*) dotado de estrutura celular e detentor de patente internacional, empregado em sensores e atuadores (LEKKALA e PAAJANEN, 1999).

O *EMFi* é eletricamente carregado pelo efeito corona ainda durante a manufatura do filme, sendo posteriormente coberto por duas camadas finas e metálicas de eletrodos. A película empregada nos estudos realizados por Lekkala e Paajanen é constituída por três camadas. Duas camadas mais externas de PP lisas e homogêneas com espessura de 35 µm providas externamente de eletrodos de alumínio vaporizados a vácuo, envolvem uma secção intermediária do polímero, mais espessa, heterogênea e dominante com 70 µm de espessura e

espaçamentos vazios dispersos em camadas folhadas também em PP, conforme visto pela varredura de um microscópio eletrônico, mostrada na Fig. 2.11. A secção transversal do filme ilustra as micro-cavidades com dimensões laterais predominantes entre 10 μm e 100 μm e dimensões verticais desprezíveis, em relação a estas medidas, de alguns poucos microns. Estes espaçamentos vazios e alongados, com estas dimensões e as camadas envolventes, transmitem a idéia de capacitores planos, associados em série entre os eletrodos, dispondo finalmente estes arranjos seriais em paralelo.

Entre as vantagens, este material apresenta uma maleabilidade maior devido às micro-cavidades presentes internamente, aliadas a uma forte carga elétrica retida e permanente, imprimindo maior sensibilidade às respostas das ações de forças exercidas numa direção normal à sua superfície. Na mesma época, a modelagem destes polímeros operando como sensores e como atuadores piezelétricos foi proposta com a adição de hipóteses simplificadoras, oferecendo uma previsão na resposta destas películas em função das suas dimensões, da sua constituição física e das ações externas, comprovadas experimentalmente (PAAJANEN, VÄLIMÄKI e LEKKALA, 1999), (SESSLER e HILLENBRAND, 1999).

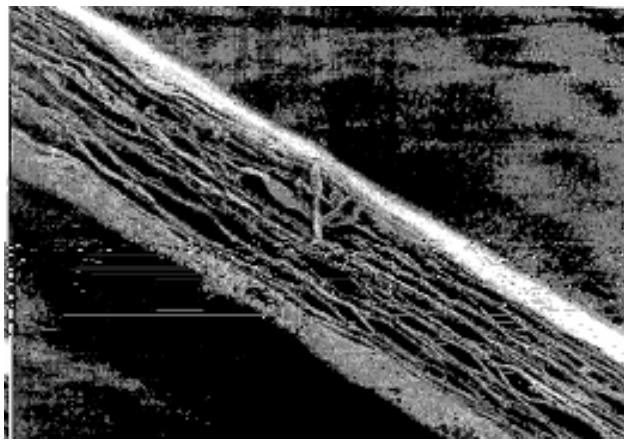


Figura 2.11: secção transversal de um *EMFi* 70 μm em microscopia eletrônica. (LEKKALA e PAAJANEN, 1999).

Em linhas gerais, pode-se dizer que o *EMFi* é constituído por varias camadas de PP separadas por micro-bolhas de ar, fornecendo as características e as propriedades que o tornam muito empregados em aplicações de sensores e atuadores eletromecânicos. Este conjunto pode ser observado, numa escala microscópica, como inúmeros microfones de eletreto dispersos pelo interior da película (PAAJANEN, LEKKALA e KIRJAVAINEN, 2000).

Este material desenvolvido e conhecido como *EMFi*, é fino e fácil de cortar em qualquer forma e tamanho, podendo assim ser utilizado em inúmeras aplicações, destacando-se pela sua portabilidade e também pela sua versatilidade. Pode ser utilizado, por exemplo, para monitorar a distribuição de pressão no solo como sensores flexíveis e finos, nas áreas de alarmes, em comutadores de segurança e em equipamentos de supervisão. Teclados e microfones acústicos podem empregar o uso desta película. Alto-falantes grandes com 50 x 60 cm² e finos com 5 mm de espessura são também fabricados com este tipo de filme vibrando em uma cavidade entre eletrodos, produzindo uma pressão sonora superior a 100 dB (GERHARD-MULTHAUPT, 2002).

É interessante comentar que o processo de produção destes filmes poliméricos não polares de PP celular ou de Teflon[®] PTFE poroso utiliza recursos de aeração em fusão, seguida de extrusão sob resfriamento, para a introdução e alongamento das cavidades ou poros dispersos no interior da massa polimérica. Desta forma, a dimensão destas microcavidades não é homogênea, sendo assim determinadas por um conjunto de condições específicas tais como, da temperatura de fusão, da velocidade de agitação da massa fundida, da pressão do ar insuflado na solução, do diâmetro do tubo na extrusão, da temperatura de resfriamento, além de eventuais interferências que possam ocorrer. A influência de todas estas variáveis acaba contribuindo para que o processo industrial assim descrito seja controlado estatisticamente na linha de produção.

2.4.2 Medidas da atividade eletromecânica nos polímeros porosos e celulares

As atividades eletromecânicas aparentemente piezelétricas apresentadas por estes transdutores com eletretos poliméricos de constituição heterogênea, foram medidas em arranjos experimentalmente montados para tais finalidades. Seus coeficientes de sensibilidade tanto direta como inversa foram analisados e comparados com os resultados dos conhecidos cristais, cerâmicas e polímeros homogêneos nas mesmas condições, cuja descoberta já avançava há décadas. Foi constatado que este tipo de transdutor produzido com polímeros heterogêneos, contendo minúsculos microfones de eletreto no seu interior, melhorava em muito os coeficientes de sensibilidade eletromecânica em relação àqueles feitos com materiais poliméricos homogêneos e algumas vezes eram comparáveis até em relação a alguns cristais e cerâmicas piezelétricas (GERHARD-MULTHAUPT et al., 1999).

Dentre alguns ensaios realizados para se medir as atividades eletromecânicas, o mais simples e imediato consiste na determinação de um coeficiente de sensibilidade equivalente

ao de piezeletricidade direta d_{33} em um modo pseudo-estático. Conforme o arranjo esquematizado na Fig. 2.12, um corpo de massa m entre 0,5 kg e 1 kg exerce uma força sobre o transdutor sob teste eletricamente carregado, que o deforma no sentido transversal da sua espessura. O coeficiente de sensibilidade eletromecânica, dado pela relação entre a carga elétrica e a força aplicada, é determinado a partir da carga induzida nos eletrodos da amostra, devido a uma súbita solitação ou retirada do peso $P = mg$, considerando g a aceleração da gravidade local. Em paralelo com o dispositivo sob teste é conectado um capacitor de medidas C_M com 101,5 nF e um eletrômetro V_M . A capacitância das amostras, entre 8,5 pF e 18 pF, muito menor do que a do capacitor de medidas, faz com que praticamente toda a carga gerada pela amostra seja para ele transferida e armazenada, tornando possível a medida da carga em consequência da deformação experimentalada.

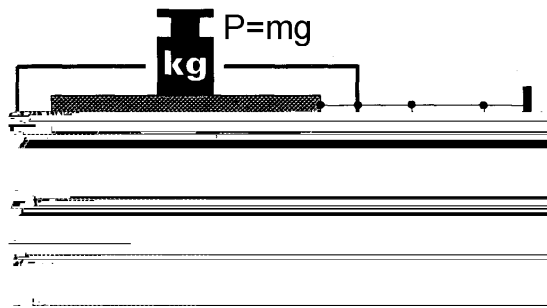


Figura 2.12: determinação do coeficiente de sensibilidade pseudo-estático.

Este ensaio foi realizado em amostras preparadas com duas, três e até quatro camadas constituídas por arranjos entre filmes homogêneos não porosos (np) de Teflon[®] PTFE com 15 ou 25 μm de espessura (*Plastpolymer* e *Goodfellow* respectivamente) e filmes porosos (p) de Teflon[®] PTFE com 40, 80 e 100 μm de espessura (*Shanghai Plastics Institute*).

A Tab. 2.3 exibe os resultados das densidades de carga elétrica e os coeficientes de sensibilidade eletromecânica. Com exceção dos arranjos *A* e *B*, que tiveram somente os filmes externos carregados, os demais arranjos, de *C* até *H* tiveram todas as suas películas carregadas anteriormente à montagem dos transdutores. Pelos resultados obtidos, o arranjo *H* em quatro camadas e com um eletrodo interno e isolado na medida, produziu o dobro da resposta piezelétrica observada na amostra *D* sob a mesma solitação mecânica (GERHARD-MULTHAUPT et al., 1999), (WEINHOLD et al., 2000).

Em resumo, demonstrou-se que estes arranjos contendo variações de Teflon[®] PTFE poroso e não poroso possuem uma estabilidade de cargas elétricas superficiais e são bastante

adequados em aplicações para uso em transdutores eletromecânicos com eletretos. Os coeficientes de sensibilidade apresentaram variações em função da densidade de carga elétrica e se mostraram fortemente dependentes da forma como as camadas foram arranjadas em cada transdutor ensaiado, sem nada poder se afirmar a respeito de uma resposta linear por parte deste tipo de transdutor.

Tabela 2.3: amostras em camadas rígidas (np) e macias (p) de Teflon[®] PTFE. (GERHARD-MULTHAUPT et al., 1999)

| Estrutura das amostras | σ , mC/m ² | pC/N | Estrutura das amostras | σ , mC/m ² | pC/N |
|--------------------------|------------------------------|-------|--------------------------|------------------------------|------|
| 25 μ m np(rígido) | 1,4 | 11,12 | | 4,8 | 15,5 |
| B | | | F | | |
| 25 μ m np - σ | 0,35 | 1,66 | 100 μ m np | 0,2 | 3 |
| 40 μ m p | | | 40 μ m p - σ | 0,4 | 6,2 |
| 40 μ m p | 0,7 | 3,1 | | | |
| 25 μ m np + σ | 1,4 | 7,76 | G | | |
| C | | | 100 μ m np | 0,2 | 3 |
| 25 μ m np - σ | 0,7 | 5,2 | 80 μ m p - σ | 0,4 | 5,2 |
| 40 μ m p | | | | | |
| 40 μ m p | 1,4 | 10,9 | | | |
| 25 μ m np + σ | 2,8 | 20 | H | | |
| D | | | 15 μ m np - σ | 1,2 | 23 |
| 15 μ m np - σ | 1,2 | 11 | 40 μ m p - σ | 2,4 | 35 |
| 40 μ m p | 2,4 | 18 | 40 μ m p - σ | 2,4 | 35 |
| | | | 15 μ m np - σ | 4,8 | |
| | 4,8 | 30 | | | |

O autor e seus colaboradores realizaram ensaios, apontando indícios sobre o comportamento das amostras, levando-se em consideração diversos tipos de configurações geométricas, sensibilidades e linearidades nas respostas destes transdutores operando como sensores em um modo pseudo-estático. Dos oito conjuntos para testes apresentados, o arranjo

A é aquele que mais se aproxima da configuração apresentada pela película de *EMFi*, obtido com uma película porosa de PP envolta por duas outras não porosas e mas rígidas do mesmo material. É também aquele que assume a configuração mais próxima do transdutor eletromecânico composto de dois filmes poliméricos rígidos e homogêneos envolvendo bolhas de ar termoformadas, objeto desta tese. Desta forma, este arranjo será tomado como referência para o estudo do comportamento eletromecânico dos transdutores poliméricos com eletretos.

Outros ensaios realizados consistiram em se determinar o coeficiente de sensibilidade eletromecânica de forma dinâmica em cada tipo de camada que compõe um filme eletromecânico (*EMFi*) de PP celular, conforme a estrutura microscópica mostrada na Fig. 2.11. Desta vez, as amostras de PP celular foram submetidas a vibrações mecânicas segundo uma direção vertical, de modo que uma pressão fosse exercida sobre elas.

As camadas do filme eletromecânico foram separadas e medidas. As películas mais externas e homogêneas mostraram uma sensibilidade de 30 ± 2 pC / N e as internas e heterogêneas, com micro-bolhas, um valor de 160 ± 5 pC / N para os coeficientes eletromecânicos diretos, em modo sensor. Em modo atuador, as variações na espessura do filme, em resposta a uma tensão elétrica externa de controle, foram medidas com um microscópio de varredura eletrônica, registrando uma sensibilidade de 45 ± 15 pm / V para o filme das camadas externas e de 225 ± 25 pm / V para aqueles com bolhas dispersas, valores estes ligeiramente maiores do que no modo sensor. Foi visto também que a sensibilidade eletromecânica do filme como um todo, também era função do tempo decorrido após o seu carregamento elétrico (LEKKALA e PAAJANEN, 1999).

Em prosseguimento aos estudos com estes transdutores obtidos com eletretos formados em polímeros heterogêneos, Hillenbrand e Sessler desenvolveram um modelo matemático para justificar o comportamento eletromecânico apresentado pelos filmes porosos de Teflon[®] PTFE e pelos celulares *EMFi* em PP. Realizaram ensaios em filmes celulares de PP, verificando o comportamento destes filmes como transdutores, tanto no modo sensor como no modo atuador. Apontaram para uma reciprocidade entre os coeficientes de sensibilidade diretos (modo sensor) e os correspondentes inversos (atuador), embora separadamente nas condições de curto-circuito e circuito aberto. Deduziram uma expressão não linear e que a definiram contrariamente, em condições determinadas, como se tratando de um coeficiente piezelétrico mostrando inclusive reciprocidades para comportamentos

inversos. Complementando a Fig. 2.11 com o corte microscópico, a Fig. 2.13 (a) ilustra imagens de uma varredura em microscopia eletrônica, onde a estrutura celular do filme em PP pode ser vista em 3 escalas. Uma associação capacitiva em série com 3 camadas sólidas de eletreto intercaladas por 2 camadas compressíveis de ar encontra-se na Fig. 2.13 (b), servindo para definir matematicamente o modelo proposto (HILLENBRAND e SESSLER, 2000).

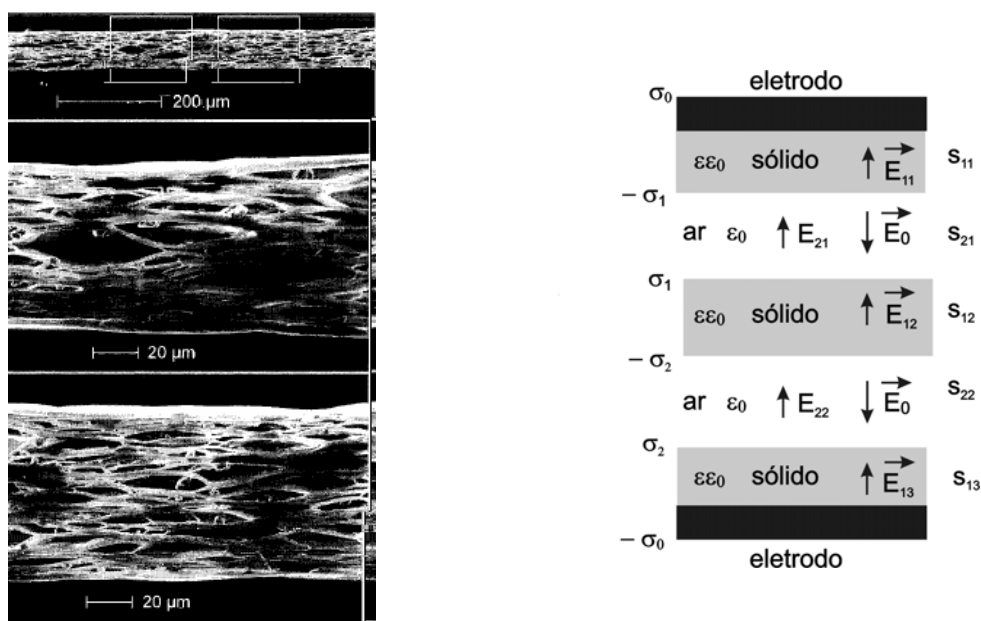


Figura 2.13: filme celular de PP (a) e sua estrutura capacitiva (b).
(HILLENBRAND e SESSLER, 2000)

Neste trabalho, os autores admitem que a variação da carga induzida nos eletrodos possui uma relação com a variação na espessura da camada compressível de ar, o que é correto. Admitem, porém uma linearidade nesta compressibilidade da camada de ar, o que pode induzir a algumas interpretações erradas ao definir o coeficiente piezolétrico direto d_{33} como uma relação entre a diferença de carga elétrica induzida nos eletrodos e a força aplicada no dispositivo. Definem dois coeficientes diferentes de sensibilidades, d_{33} e g_{33} para o modelo do transdutor nas situações de curto-circuito e circuito aberto respectivamente. Na realidade, este estudo trata o dispositivo apresentado com modelos distintos para as situações de curto-circuito e circuito-aberto, embora os autores insistam em atribuir um comportamento piezolétrico ao transdutor apresentado. Ressalte-se aqui, no entanto, que se tratam de comportamentos distintos para o dispositivo em função da impedância de saída, o que contradiz o princípio linear e recíproco da piezeletricidade, independente da carga.

O desenvolvimento de filmes poliméricos, porosos e celulares, por processos industriais de produção, propiciou um melhor desempenho aos transdutores eletromecânicos

obtidos por eletretos. Os filmes são carregados por efeito corona ainda no processo de manufatura, onde as cargas são depositadas segundo uma distribuição volumétrica e dispostas em multicamadas microscópicas internas, resultado de camadas maleáveis, porosas e heterogêneas envolvidas por duas outras menos maleáveis lisas e homogêneas de PP. Estes filmes possuem uma característica peculiar intrínseca: inúmeras micro-cavidades preenchidas com gás, envolvidas por camadas poliméricas carregadas eletricamente em polaridades opostas. Quando uma solicitação mecânica, térmica ou elétrica é aplicada a eles, observa-se um comportamento aparentemente piezelétrico, piroelétrico ou ferroelétrico (SESSLER, 1987), (KACPRZYK e MOTYL, 1994), (GERHARD-MULTHAUPT, 2002).

2.5 Transdutores com polímeros homogêneos

Os resultados das experiências descritas em trabalhos com transdutores eletromecânicos obtidos com filmes de eletretos poliméricos celulares ou porosos motivaram Altafim e colaboradores no desenvolvimento de um dispositivo similar, porém empregando eletretos em duas películas homogêneas poliméricas de Teflon[®] FEP, envolvendo cavidades maleáveis na forma de minúsculas bolhas de ar e que pudessem ser produzidos em laboratório. Os primeiros transdutores deste tipo e equiparados àqueles obtidos com eletretos em polímeros porosos ou celulares, foram produzidos em laboratório a partir de processos bastante elementares, sem requisitar o desenvolvimento de uma tecnologia (ALTAFIM et al., 2003). Passando por uma escala evolutiva, o processo de produção destes transdutores passou a apresentar melhorias agregadas às alternativas precedentes (ALTAFIM et al., 2005).

2.5.1 Eletretos poliméricos homogêneos em multicamadas

Em 2003, mais um passo foi dado no avanço das pesquisas sobre transdutores eletromecânicos com filmes de eletretos carregados, baseando-se no princípio das cargas elétricas retidas por um meio isolante. Empregando duas películas homogêneas de Teflon[®] FEP, Altafim e colaboradores produziram transdutores eletromecânicos poliméricos carregados por tensões impulsivas, formando eletretos nos filmes e envolvendo cavidades microscópicas de ar entre eles, sem fugir à conhecida concepção baseada nos microfones de eletreto (ALTAFIM et al., 2003), (RODRIGUES, 2003).

O primeiro dispositivo formado pela equipe de Altafim era constituído por duas camadas circulares de Teflon[®] FEP empilhadas, cada uma com 2,5 cm de diâmetro e 75 µm de espessura, terminadas por duas folhas laminadas em alumínio, como eletrodos de contato,

conforme a ilustração na Fig. 2.14. Os filmes poliméricos foram unidos pela aspersão de verniz pulverizado, como um adesivo, sobre a superfície interior em cada película. A irregularidade deixada pela aspersão do verniz acabou resultando na formação de cavidades microscópicas de ar, que deixava uma espessura média de uns 10 μm entre os filmes poliméricos, conferindo então uma geometria semelhante àquela dos filmes celulares industrialmente produzidos. A princípio o mesmo verniz foi utilizado para colar as folhas de alumínio, como eletrodos, nas películas de Teflon[®] FEP, sem muito sucesso, tendo em vista que a antiaderência é a propriedade mais marcante neste polímero.

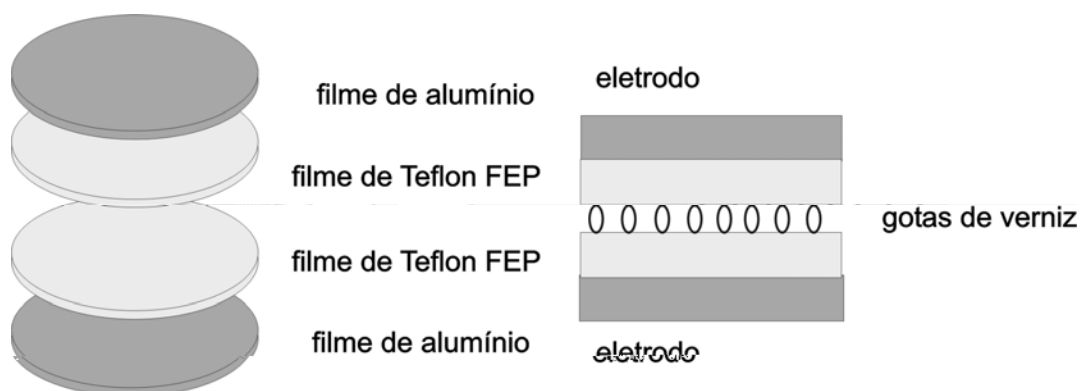


Figura 2.14: sanduíche multicamada formado por filmes de Teflon[®] FEP e alumínio.

O dispositivo foi então montado e carregado por um impulso negativo em alta tensão. A forma da onda de tensão impulsiva gerada em função do tempo $v(t)$ é o resultado de uma diferença entre dois decaimentos exponenciais de mesmo valor inicial V_{MAX} , e constantes de tempo $1/\beta_1$ e $1/\beta_2$, sendo β_1 maior do que β_2 . Assim, a tensão impulsiva no tempo fica:

$$v(t) = V_{MAX} [\exp(-\beta_1 t) - \exp(-\beta_2 t)] \quad (2.1)$$

O circuito de carregamento para formar os eletretos nos transdutores emprega um gerador de impulsos do tipo Marx, mostrado na Fig. 2.15, onde as resistências possuem valores $R_1 = 72 \Omega$, $R_2 = 44 \Omega$, e as capacitâncias $C_1 = 1,35 \text{ mF}$ e $C_2 = 11 \text{ nF}$. O ajuste destes parâmetros no circuito elétrico com estes valores resulta numa onda padronizada de impulso de tensão elétrica, cujo valor de pico de $-12,5 \text{ kV}$ é atingido após $1,2 \mu\text{s}$, decrescendo em seguida a um valor da metade deste máximo após $50 \mu\text{s}$ do seu início (GREENWOOD, 1970) e (RODRIGUES, 2003).

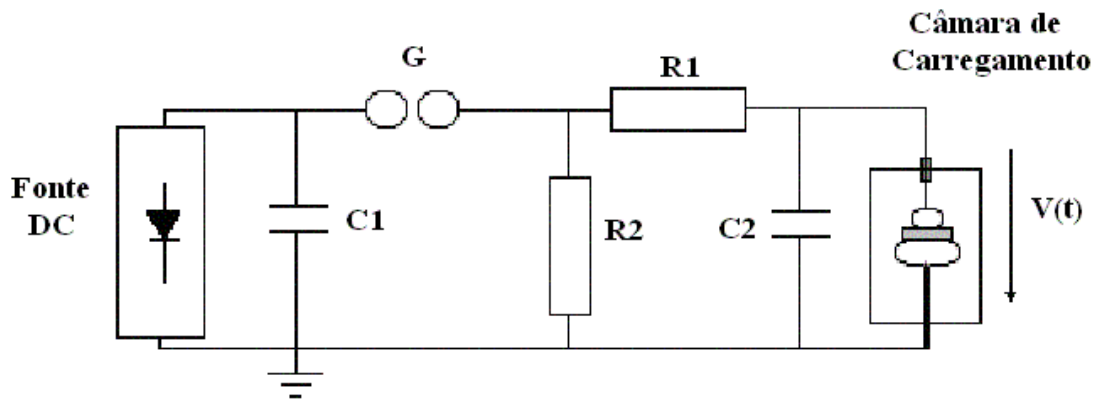


Figura 2.15: circuito de carga para formação dos eletretos nos transdutores. (RODRIGUES, 2003).

Este impulso sobre o dispositivo sob teste e a espessura de ar nas bolhas formadas fizeram com que campos elétricos nos filmes e nas micro-cavidades exercessem um controle sobre o potencial de superfície, de modo que um coeficiente de sensibilidade eletromecânica pudesse ser estabelecido para caracterizar o comportamento deste transdutor eletromecânico em termos da quantidade de carga retida pelo filme dielétrico (ALTAFIM, GIACOMETTI e JANISZEWSKI, 1992).

As atividades aparentemente piezelétricas e diretas foram medidas numa condição pseudo-estática, empregando-se o mesmo arranjo ilustrado na Fig. 2.12, da mesma forma com que foram verificadas as sensibilidades eletromecânicas nas amostras porosas e celulares industrializadas. Um capacitor de medidas C_M com 86,91 nF armazenou praticamente toda a carga gerada pela amostra, quando esta foi mecanicamente solicitada, pela retirada brusca de uma força de intensidade 20 N. A resposta eletromecânica deste sensor encontra-se mostrada na Fig. 2.16, destacando a retirada da força aplicada sobre ele. O eletrômetro originalmente utilizado foi substituído por um osciloscópio digital, para o registro da tensão elétrica nos terminais do capacitor de medidas. Multiplicando-se esta capacitância pela tensão de pico obtida, a carga gerada foi determinada. Um coeficiente de sensibilidade aparentemente piezelétrica d_{33} foi obtido, dado pela relação entre esta carga gerada e a força aplicada que a motivou.

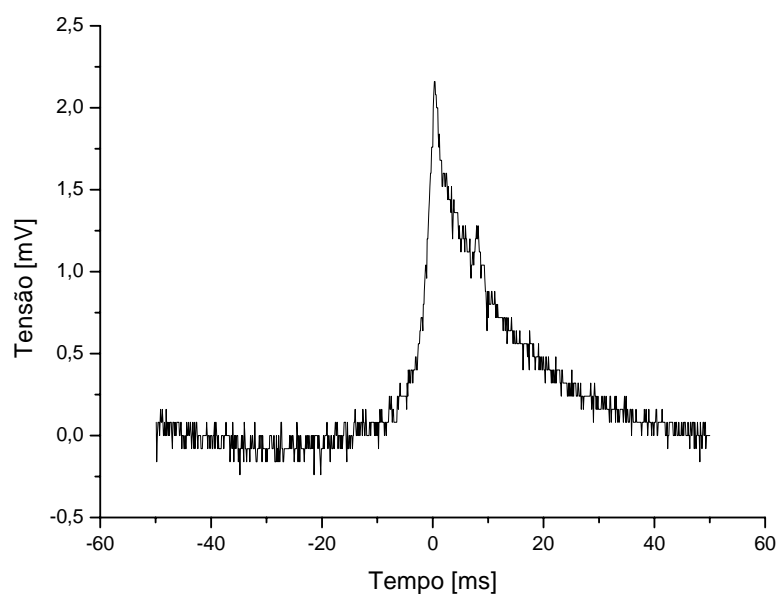


Figura 2.16: atividade eletromecânica dos transdutores sob retirada de 20 N. (RODRIGUES, 2003).

As gotículas de verniz, nas faces internas dos filmes, formaram uma interface com minúsculos separadores entre as películas poliméricas de Teflon[®] FEP. A condutividade elétrica destas gotas de verniz, que não pode deixar de ser considerada, propiciou a ocorrência de descargas internas e indesejáveis entre células vizinhas, prejudicando o efeito eletromecânico sob certas exigências. A aspersão do verniz sobre os filmes poliméricos não garantiu que a interface entre eles tivesse as micro-cavidades com as mesmas dimensões, dentro de uma constituição homogênea. Acrescente-se ainda que este verniz depositado ainda apresentou uma deterioração ao longo do tempo, destruindo as amostras e perdendo assim as suas propriedades como eletreto.

As células de ar formadas nesta camada de separação, pela aspersão do verniz, possuíam certa elasticidade, tornando-se responsável pelos efeitos eletromecânicos obtidos com estes transdutores. Em suma, este primeiro método empregado na obtenção destes transdutores com eletretos em polímeros homogêneos foi considerado pioneiro e artesanal. Não mostrou repetibilidade nas respostas para os mesmos estímulos, deixando de inspirar confiabilidade ao seu desempenho e a um posterior desenvolvimento deste dispositivo em linhas de produção. Assim, a forma como o verniz é depositado sobre os filmes, abriu espaço para discussões futuras, visando melhorar a qualidade destes transdutores eletromecânicos obtidos com eletretos poliméricos de Teflon[®] FEP.

2.5.2 Eletretos poliméricos homogêneos com micro-bolhas

Os problemas apresentados, quanto à aspensão do verniz entre os dois filmes de Teflon[®] FEP, foram observados e novas mudanças foram propostas por Altafim e colaboradores dois anos depois. Em lugar do verniz sob aspensão, o elemento de separação entre as camadas poliméricas foi substituído por micro células obtidas com bolhas de ar distribuídas na interface entre as películas, minimizando-se assim a condutividade elétrica e a ocorrência de descargas internas nas camadas de ar, observadas na versão anterior deste dispositivo.

Como uma alternativa melhorada, mais um transdutor eletromecânico com eletretos em filmes poliméricos de Teflon[®] FEP, não poroso e não celular, foi desenvolvido. Este dispositivo foi produzido em laboratório com o auxílio de um arranjo especificamente montado, conforme a Fig. 2.17, nas oficinas do Departamento de Engenharia Elétrica na Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.

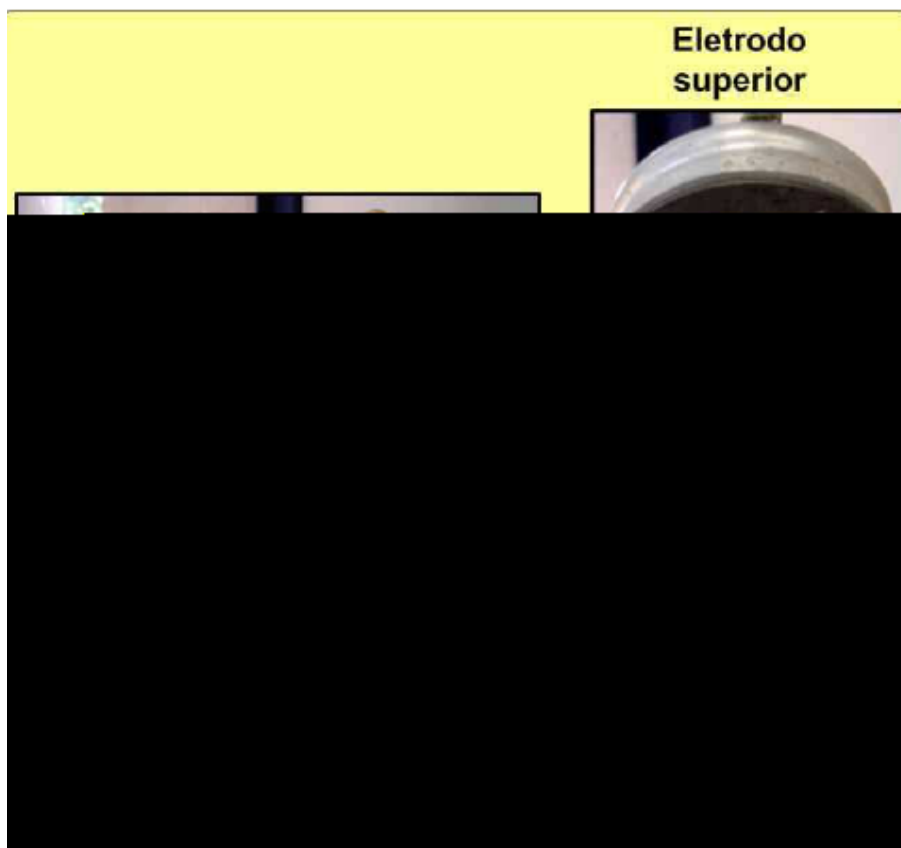


Figura 2.17: obtenção dos transdutores poliméricos em laboratório. (LIMA, 2006).

Este arranjo possui uma placa metálica superior móvel pivotante e outra fixa a uma base inferior, ambas com uma resistência elétrica, para o aquecimento controlado, numa temperatura inferior ao ponto de fusão das películas. Sobre a base inferior é colocada uma espécie de máscara metálica que configura a geometria das bolhas de ar que serão formadas. Esta máscara é formada por uma grade reticulada ou por uma chapa perfurada por meio do qual todas as bolhas serão formadas de maneira homogênea. Esta base fixa e inferior possui uma comunicação hermética com uma bomba de vácuo, que provoca o estiramento da película inferior quando aquecida.

Estando as duas placas aquecidas, uma película é posta sobre a máscara aquecida, sendo então submetida a um vácuo que provoca o estiramento do filme nos locais marcados pela máscara, concebendo forma às bolhas. Em seguida, a outra película é posta sobre a primeira e ambas são prensadas entre as duas placas aquecidas, o suficiente para uni-las por uma espécie de solda. Neste processo de obtenção a dimensão das micro-bolhas é dada pelas medidas da grade ou dos orifícios da chapa, permitindo que a produção destes transdutores poliméricos se dê por um processo que tenha um controle determinístico. A Fig. 2.18 mostra um transdutor produzido em laboratório por este processo, com os detalhes das micro-bolhas de ar formadas entre os dois filmes poliméricos de Teflon[®] FEP, que serão posteriormente

vantagens de um tempo rápido de carga e a um baixo custo. Quanto maior o pico de tensão, maior a quantidade de carga armazenada e retida no filme dielétrico, observando-se um limite de tensão determinado em função de descargas reversas que possam ocorrer durante o processo de carregamento elétrico para formar os eletretos desejados.

Em seguida o transdutor eletromecânico formado foi submetido a ensaios ditos pseudo-estáticos e dinâmicos, para a medida dos coeficientes de sensibilidade. Os ensaios

2.6 Materiais dielétricos e eletretos

As cargas, responsáveis pelos arranjos dipolares, já existem no material e não contribuem com uma eventual condução de corrente elétrica. Trata-se de cargas de polarização, vinculadas por forças atômicas e moleculares, sofrendo pequenos deslocamentos em resposta às solicitações de um campo elétrico aplicado externamente. Assim, um dielétrico de modo geral, na presença de um campo elétrico, possui arranjos microscópicos de dipolos, fornecendo assim um momento dipolar resultante e não nulo ao material.

Nesta seção serão mostradas além destas características dielétricas gerais, as propriedades peculiares de alguns isolantes com a capacidade de conter cargas elétricas de origens externas, neles depositadas. Esta retenção de cargas dá-se em armadilhas energéticas presentes nos átomos ou grupos atômicos, que no interior da estrutura atômico-molecular destes materiais, possuem a propriedade de aprisionar cargas elétricas no seu meio, dando origem aos eletretos.

2.6.1 Cargas aprisionadas em armadilhas energéticas

Um material dielétrico possui um momento dipolar resultante de cargas internas a ele que sofrem deslocamentos microscópicos e não são responsáveis pelo estabelecimento de uma corrente elétrica. Aliada à condição de um momento dipolar resultante e presente, adicione-se a presença de cargas externas que podem ficar retidas no meio dielétrico, dando origem aos conhecidos eletretos. Em linhas gerais, os eletretos são dielétricos carregados que possuem a capacidade de armazenar estas cargas de origem externa por muito tempo, isto é, com uma constante de tempo de descarga tendendo ao infinito.

Uma análise microscópica em nível atômico faz observar que os níveis energéticos sofrem a influência dos arranjos moleculares do material dielétrico como um todo, fazendo com que seus átomos, ou grupos atômicos, apresentem um nível de energia próprio. Estes níveis energéticos evidenciam a formação de armadilhas energéticas para elétrons livres e para lacunas, localizadas entre as bandas de valência e de condução, no interior da zona proibida entre elas. Em consequência disto, as bandas de valência e de condução dos átomos envolvidos na estrutura atômico-molecular dos polímeros, apresentam perfis energéticos irregulares e adquirem a capacidade de aprisionar elétrons-livres ou lacunas, que se transformam em armadilhas do tipo T_e para os elétrons livres ou do tipo T_h para as lacunas. As armadilhas destinadas aos elétrons livres ficam negativamente carregadas quando ocupadas

por eles, enquanto que aquelas para aprisionar as lacunas tornam-se positivamente carregadas quando da liberação de elétrons que as mantinham neutras antes da ocupação destes portadores de carga positiva.

Nos dielétricos, os níveis locais de energia são afetados pelo ambiente molecular, resultando em faixas estruturadas por barreiras de potencial. A Fig. 2.19 apresenta o diagrama energético típico de um polímero e a classificação de suas armadilhas energéticas, tanto para elétrons como para lacunas, em rasas e profundas, medidas em elétron-volts (eV) referentes ao nível mais alto da banda de condução do átomo ou do grupo atômico da estrutura molecular do material (SESSLER, 1987). Pode-se dizer que quanto mais profundas estas armadilhas, mais próximas do nível de Fermi se encontram. Ressalte-se, no entanto, que podem também existir armadilhas profundas na superfície e rasas no interior dos materiais.

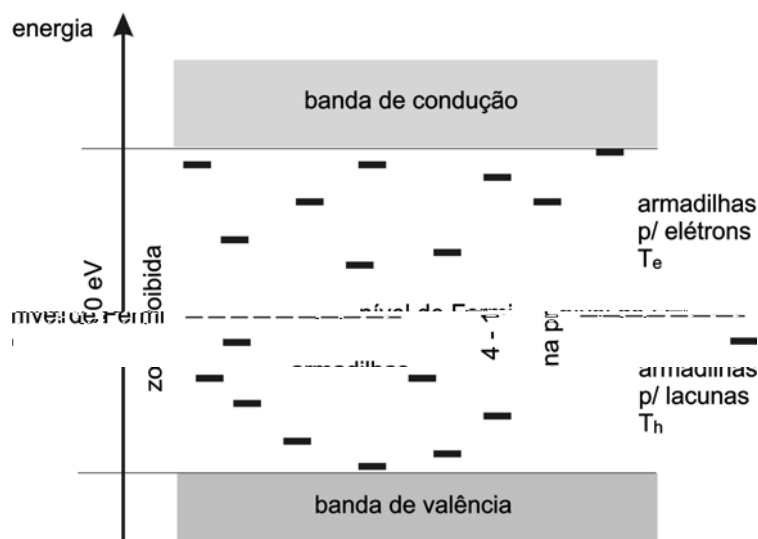


Figura 2.19: armadilhas energéticas em níveis discretos na zona proibida.

Em materiais poliméricos, as armadilhas internas são em geral atribuídas a anomalias estruturais, como impurezas, defeitos e irregularidades nas cadeias carbônicas ou então a imperfeições nos retículos cristalinos. Por outro lado, as armadilhas superficiais existem em um grande número de polímeros e podem ser devidas, a impurezas químicas, a irregularidades provocadas por oxidações sofridas na superfície em questão, a quebras de cadeias carbônicas, ou por moléculas adsorvidas (depositadas sobre outras). Em experimentos realizados com correntes termicamente estimuladas, foi identificada a predominância de armadilhas profundas e de superfície em películas de Teflon[®] FEP (ALTAFIM, GIACOMETTI e JANISZEWSKY, 1992).

2.6.2 Princípios físicos dos transdutores de eletretos

O conhecimento dos campos, forças e correntes elétricas devidos a uma distribuição de carga em um dielétrico é de grande importância para o entendimento das propriedades características de polímeros com a formação de eletretos. Para uma discussão inicial e genérica, estas grandezas serão deduzidas partindo-se do pressuposto que, dois filmes de constante dielétrica ε com espessura d_1 cada, apresentam-se eletricamente carregados formando eletretos com cargas distribuídas segundo densidades superficiais $\pm \sigma_0$ e volumétricas $\pm \rho_0$. Uma outra camada de ar de espessura d_0 não carregada separa estas películas com cargas de polaridades opostas, isolando-as. O modelo assim descrito é terminado por dois eletrodos de metal, conforme pode ser visto na Fig. 2.20. Admite-se ainda que todas as dimensões laterais ou paralelas aos eletrodos são admitidas muito maiores do que as espessuras envolvidas.

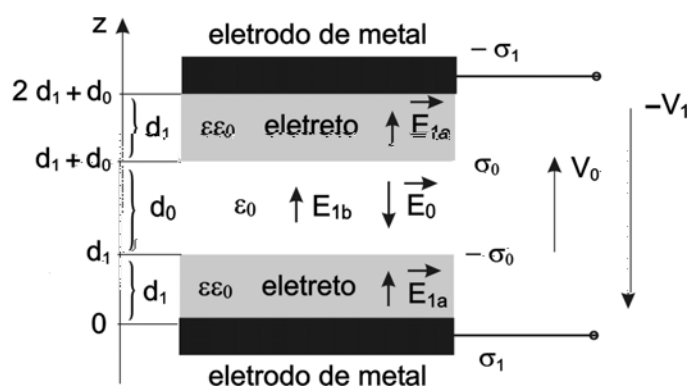


Figura 2.20: modelo simplificado com o dielétrico carregado (eletreto)

Como hipótese, nas camadas poliméricas de constante dielétrica ε , adjacentes aos eletrodos, encontram-se presentes as cargas reais praticamente permanentes (e aprisionadas) nas armadilhas energéticas do material, segundo distribuições uniformes de densidade volumétrica $\rho_r(z)$ e superficial $\sigma_r(z)$ no sentido lateral, isto é, em planos perpendiculares ao eixo vertical z . Além destas cargas reais, uma polarização também uniforme $P(z)$ é admitida e desmembrada em duas componentes de modo que:

$$P(z) = P_i(z) + P_p(z) \quad (2.2)$$

Como os valores serão tomados somente numa única direção (vertical), a representação vetorial pode ser abolida. A primeira componente $P_i(z)$ é aquela que segue instantaneamente a aplicação de um campo externo $E(z)$. Assim,

$$P_i(z) = \epsilon_0 (\epsilon - 1) E(z) \quad (2.3)$$

Por outro lado, a outra componente $P_p(z)$ é aquela pseudo-estática devido à polarização dos dipolos ou ao microscópico deslocamento de suas cargas. Esta parcela na polarização produz cargas de densidade local $\rho_p(z)$ em volume, conforme a aplicação do teorema da divergência no volume envolvido por uma superfície fechada. Tratando a situação dentro de um domínio volumétrico v ,

$$\int_v \rho_p dv = - \int_v \frac{\partial P_p(z)}{\partial z} dv \quad (2.4)$$

As duas integrais se estendem ao mesmo domínio de volume e a variação da polarização só depende da sua espessura, isto é, da variável z . Assim, a derivada parcial pode ser substituída pela total, resultando na seguinte expressão diferencial:

$$\rho_p = - \frac{dP_p(z)}{dz} \quad (2.5)$$

Se a polarização $P_p(z)$ varia de $\Delta P_p(z)$ em certa interface, esta pode ser tratada como uma densidade planar ou superficial de carga σ_p , resultando:

$$\sigma_p = - \Delta P_p(z) \quad (2.6)$$

Estas equações permitem que as densidades volumétrica ρ e superficial σ totais e praticamente permanentes sejam dadas em termos de cargas reais e de polarização, respectivamente por:

$$\begin{aligned} \rho(z) &= \rho_r(z) + \rho_p(z) \\ \sigma(z) &= \sigma_r(z) + \sigma_p(z) \end{aligned} \quad (2.7)$$

As distribuições de cargas aprisionadas volumétricas e superficiais reais ($\rho_r + \sigma_r$) e aquelas polarizadas ($\rho_p + \sigma_p$) caracterizam em primeira análise o eletreto.

Duas considerações importantes e simplificadoras devem ser feitas. O filme dielétrico é constituído pelo polímero Teflon[®] FEP, onde suas armadilhas energéticas são profundas e de superfície na sua maioria. As cargas volumétricas eventualmente existentes são consideradas como projetadas nas superfícies do filme isolante e posteriormente agregadas àquelas de distribuição superficial. Desta forma, as cargas aprisionadas no material

dielétrico serão todas elas consideradas nas superfícies do filme com densidade superficial σ_0 e $-\sigma_0$.

Conforme o modelo simplificado, mostrado na Fig. 2.20, as espessuras envolvidas são muito menores do que as dimensões laterais ou paralelas aos eletrodos, permitindo que o efeito das bordas seja desprezado para efeitos de espraçamento das linhas de força dos campos elétricos tanto no interior das películas como no espaçamento entre elas. Desta feita, as cargas aprisionadas no meio dielétrico geram um campo elétrico uniforme E_0 na região de ar, que se afasta das cargas positivas de densidade σ_0 e se aproxima das cargas de distribuição $-\sigma_0$ dado por

$$E_0 = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (2.8)$$

Estas cargas, aprisionadas nas armadilhas energéticas do material, induzem cargas de densidade superficial σ_1 em polaridades opostas em cada eletrodo metálico, que por sua vez criam campos elétricos E_{1a} ao longo da espessura em cada filme e E_{1b} na região de ar entre eles, também uniformes onde

$$\begin{aligned} E_{1a} &= \frac{\sigma_1}{\epsilon\epsilon_0} \\ E_{1b} &= \frac{\sigma_1}{\epsilon_0} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Entre os eletrodos de metal, surge uma diferença de potencial (d.d.p.) V_0 decorrente do campo elétrico E_0 gerada pelas cargas aprisionadas nas películas dielétricas, presente no espaçamento de ar. Para o potencial de referência admitido no eletrodo inferior tem-se:

$$V_0 = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} d_0 \quad (2.10)$$

Por outro lado, as cargas induzidas $\pm \sigma_1$ nos eletrodos, também criam campos elétricos que determinam uma d.d.p. ou tensão elétrica negativa V_1 , mostrada na Fig. 2.20, com relação ao potencial de referência definido no eletrodo inferior. Assim,

$$V_1 = 2 \frac{\sigma_1}{\epsilon\epsilon_0} d_1 + \frac{\sigma_1}{\epsilon_0} d_0 \quad (2.11)$$

O termo “eletróforo”, isto é, portador de eletricidade, possuía antigamente o mesmo significado amplo que o termo eletreto possui nos dias de hoje, reservado àqueles materiais dielétricos com cargas armazenadas, ou com orientação dipolar. Saliente-se, porém, que este significado já mudou com o passar do tempo, visto que alguns fenômenos desta natureza já são discutidos sob diferentes aspectos, tais como, ferroelétricos, piroelétricos e piezelétricos, distribuição espacial de cargas em dielétricos, etc (GERHARD-MULTHAUPT, 2002).

As considerações apontadas nesta revisão bibliográfica, desde aquela pioneira de Eguchi em 1925, oferecem uma grande contribuição para as considerações e definições de modelos e estudos das metodologias de projeto, produção e aplicação de transdutores eletromecânicos com eletretos de natureza polimérica.

O modelo a ser descrito nesta tese encontra-se embasado nestes transdutores de eletretos com micro-cavidades ou bolhas de ar, formadas na junção de duas películas poliméricas de Teflon® FEP. Mostra o comportamento deste dispositivo justificando seu funcionamento por um modelo elétrico associado a uma deformação mecânica experimentada por uma única bolha.

3. PROPRIEDADES ELÉTRICAS E COMPORTAMENTO ELETROMECHANICO

Uma metodologia de projeto requer o estabelecimento de critérios que venham a atender as condições e as restrições que se situem dentro de uma necessidade especificada. Em função de critérios estabelecidos, parte-se então para o desenvolvimento de modelos e protótipos dos mais simplificados aos mais sofisticados, que permitam avaliações qualitativas e quantitativas do comportamento daquele que será o produto final, destinado a uma dada aplicação. Assim, um modelo bem definido depende de embasamentos teóricos, da realização de cálculos e da imposição de eventuais hipóteses simplificadoras, segundo a complexidade do produto que se queira obter. Este capítulo trata o comportamento elétrico do transdutor com eletretos poliméricos, associado à deformação mecânica na camada de ar, quando o dispositivo sofre a solicitação de uma força, seja ela uma causa ou um efeito.

3.1 Transdutores Eletromecânicos com Eletretos

O transdutor eletromecânico com eletretos formados em películas poliméricas implica num modelo capacitivo, conforme já elucidado por trabalhos anteriores citados na revisão bibliográfica, no capítulo anterior. O modelo descrito por esta tese encontra-se embasado nos transdutores de eletretos com micro-cavidades ou bolhas formadas na junção de duas películas poliméricas de Teflon[®] FEP. Estas bolhas de ar foram inseridas entre eles através de um processo térmico auxiliado por vácuo, segundo trabalhos mais recentes desenvolvidos por Altafim e colaboradores (ALTAFIM et al., 2005) e (ALTAFIM, R. A. C. et al., 2006).

Para uma modelagem inicial, o transdutor eletromecânico em questão constitui-se de duas películas poliméricas com cargas retidas, envolvendo uma terceira camada compressível, ou seja, uma bolha contendo ar sob pressão nesta região. Pela descrição deste modelo, já ilustrado na Fig. 2.20, é admitido que as medidas transversais ou espessuras nas camadas poliméricas e os espaçamentos na de ar são bem menores do que a medida do raio ou dos lados que delimitam as superfícies na bolha. As medidas relativas destas dimensões conferem então, dentro de certos limites, uma distribuição uniforme nos campos elétricos presentes em cada camada deste dispositivo eletromecânico. Redesenhando a Fig. 2.20, com a admissão

destas condições, a Fig. 3.1 a seguir exhibe o corte transversal de um segmento deste transdutor eletromecânico, formado por dois filmes de eletretos de mesma espessura d_1 , por sua vez, espaçados por outra camada delgada de ar. Esta região compressível forma um interstício maleável cuja espessura em condições estáticas iniciais é d_0 , sofrendo variações em função de uma deformação experimentada. Este conjunto é finalmente terminado por um par de eletrodos metálicos, estando um deles, no caso o inferior, aterrado.

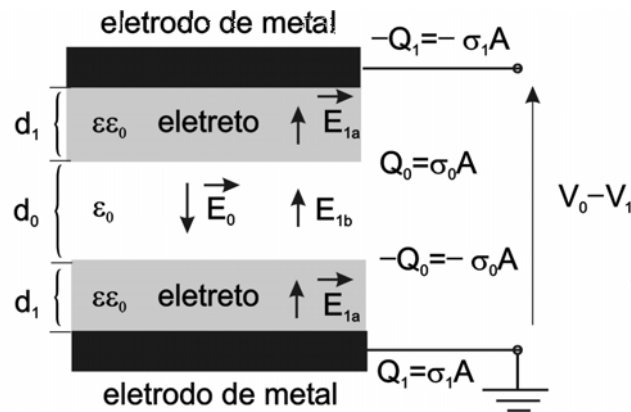


Figura 3.1: modelo estático capacitivo do transdutor eletromecânico com eletretos.

Uma tensão elétrica ou diferença de potencial (d.d.p.) $V_0 - V_1$ pode ser tanto aplicada como produzida entre os eletrodos terminais. Como tal devolve um sinal elétrico em resposta a um estímulo mecânico, ou de modo reverso, mediante a aplicação de um sinal elétrico, devolve uma resposta mecânica. Considerando esta d.d.p. $V_0 - V_1$ entre os terminais deste dispositivo, conforme as eqs. (2.10) e (2.11), pode-se escrever de modo geral que:

$$V_0 - V_1 = \sigma_0 \frac{d_0}{\varepsilon_0} - \sigma_1 \left(\frac{2d_1}{\varepsilon\varepsilon_0} + \frac{d_0}{\varepsilon_0} \right) \quad (3.1)$$

3.1.1 Condição Estática Inicial

No caso, os eletretos são formados nos filmes poliméricos pelo carregamento elétrico de um impulso de tensão sobre o dispositivo. No final deste processo, quando a tensão da fonte vai a zero, os eletrodos do transdutor são colocados em curto-circuito. Assim, uma condição inicial e estática, com a carga aprisionada nos filmes dielétricos, permite que o dispositivo em questão possa ser modelado eletricamente como um arranjo capacitivo, tendo uma carga inicial nele armazenada. Multiplicando e dividindo o lado direito da eq. (2.10) pela área A que contém cada carga superficialmente distribuída, tem-se:

$$V_0 = \frac{d_0}{\varepsilon_0 A} A \sigma_0 = \frac{Q_0}{C_0} \quad (3.2)$$

O modelo do circuito e as implicações físicas na formação dos eletretos mostram que a d.d.p. V_0 , estabelecida pela carga retida Q_0 , desempenha o papel de uma fonte geradora de tensão elétrica. Da mesma forma, multiplicando e dividindo o lado direito da eq. (2.11) pela área de carga elétrica A , obtém-se a tensão elétrica V_1 motivada pela presença da carga estática e induzida $Q_{1,e}$, armazenada pela capacitância equivalente C_t do dispositivo de modo que:

$$V_1 = \left(\frac{2d_1}{\varepsilon \varepsilon_0 A} + \frac{d_0}{\varepsilon_0 A} \right) A \sigma_1 = \frac{Q_{1,e}}{C_t} \quad (3.3)$$

A expressão acima mostra que em cada filme dielétrico existe uma capacitância C_1 e que na região de ar entre eles encontra-se uma outra capacitância C_0 , todas em série, com a mesma carga $Q_{1,e}$ armazenada pela associação. Estas duas últimas equações, juntamente com o modelo apresentado e descrito na Fig. 3.1, permitem que o conjunto assim formado pelos filmes poliméricos e pelo espaçamento da região de ar entre eles seja então tratado como um arranjo serial de capacitores planos de área A associados a uma fonte de tensão V_0 , conforme a Fig. 3.2 é capaz de mostrar.

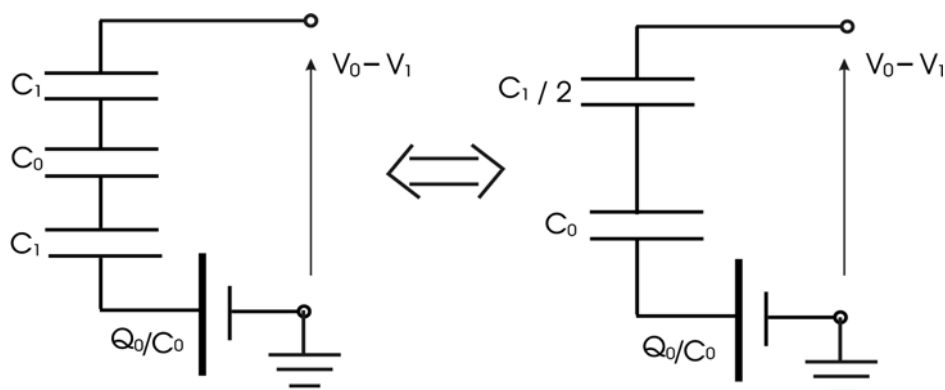


Figura 3.2: arranjo capacitivo equivalente.

Admitindo então esta condição inicial, após o carregamento impulsivo, com os terminais do dispositivo em curto-circuito, $V_0 = V_1$ e a igualdade entre as eqs. (3.2) e (3.3) exhibe uma relação estática entre as cargas induzidas e aquelas aprisionadas, ditadas por uma constante real α , cujo valor exprime também a razão entre a capacitância total C_t e a do espaçamento C_0 entre os filmes de modo que:

$$\frac{Q_{1,e}}{C_t} = \frac{Q_0}{C_0} \Rightarrow Q_{1,e} = \alpha Q_0 \quad (3.4)$$

Esta condição descreve como a carga induzida e ainda estática nos eletrodos é determinada em função da carga aprisionada, bem como exprime uma relação entre a capacitância total e aquela na região de ar, no equilíbrio inicial do sistema. O parâmetro α assim definido pode ser obtido na prática, conhecendo-se a constante dielétrica ε e as espessuras tanto dos filmes isolantes como do espaçamento na bolha de ar entre eles (BASSO, 2006). Ou seja,

$$\alpha = \frac{C_t}{C_0} = \frac{d_0}{2d_1/\varepsilon + d_0} \quad (3.5)$$

O modelo estabelecido para o transdutor eletromecânico de eletretos poliméricos com uma bolha de ar termoformada admite uma rigidez mecânica em cada filme dielétrico muito superior à da camada de ar entre eles. Desta forma, a região compressível com ar é admitida como a única camada que pode sofrer uma variação ou deformação na sua espessura inicial d_0 . A variação experimentada pela espessura d_0 na camada de ar modifica a capacitância relativa a este espaçamento, resultado de uma deformação específica e elástica S definida por:

$$S = \frac{d_0(S) - d_0}{d_0} = \frac{d_0(S)}{d_0} - 1 \quad (3.6)$$

Esta deformação mecânica associada ao circuito elétrico para o modelo, constitui-se em um dos parâmetros mais importantes, sendo apresentada como uma contribuição inédita para a realização deste trabalho. A expressão acima é empregada nas equações eletromecânicas que demonstram e modelam este transdutor com eletretos operando como sensor e, de modo reverso, como atuador. A variação na espessura da região de ar é dada pelo produto $S d_0$, justificando o comportamento eletromecânico do transdutor em questão. Ou ainda em outras palavras, a espessura da região do interstício de ar em função da deformação, isto é, $d_0(S)$ entre os filmes é dinamicamente determinada por $(1+S) d_0$.

De um modo geral, tanto uma tensão elétrica como uma força externa, podem ser aplicadas no sistema que compõe o transdutor eletromecânico em questão. A deformação, seja ela causa ou efeito, será aqui tratada como uma variável independente e a relação existente

entre ela e a força será por enquanto deixada de lado, sendo objeto de análise mecânica, no próximo capítulo.

3.2 Comportamento eletromecânico do transdutor como sensor

Neste trabalho, um sensor eletromecânico é definido como um transdutor capaz de devolver um sinal elétrico em resposta a uma solicitação mecânica. Assim, quando um eletrodo, sob a ação de uma força externa, passa a se mover em relação ao outro, observa-se uma variação na capacitância do espaçamento de ar entre os filmes dielétricos, levando a um rearranjo transitório nas cargas induzidas nos eletrodos, produzindo então a resposta elétrica esperada.

No intuito de oferecer maiores simplicidades à explanação do modelo, a impedância terminal do sensor foi admitida como resistiva, não impedindo que outro tipo de impedância possa ser considerada. Assim, o comportamento eletromecânico do transdutor como um sensor é justificado pelo circuito elétrico mostrado na Fig. 3.3, terminado por uma resistência elétrica R e pelas capacitâncias dos filmes poliméricos e do espaçamento entre eles, esta dada em função da deformação específica S na camada de ar.

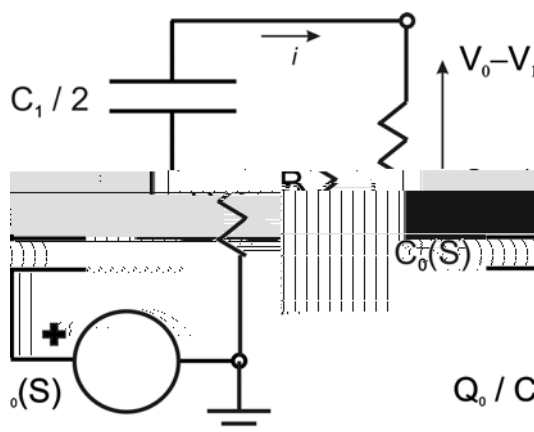


Figura 3.3: circuito elétrico RC equivalente para o sensor.

Uma comparação com o circuito equivalente estático da Fig. 3.2 mostra que a fonte de tensão foi substituída por outra, função da deformação experimentada na espessura de ar. Uma vez que o circuito elétrico esteja fechado, uma corrente elétrica é estabelecida e uma tensão elétrica $V_0 - V_1 = R i(t)$ aparece entre os eletrodos que determinam o arranjo capacitivo do modelo. Da eq. (3.1) e considerando a região compressível de ar $d_0(S)$, variante com a

deformação, uma corrente $i(t)$ é estabelecida no circuito elétrico, resultado da variação temporal da carga induzida Q_I , onde

$$\sigma_0 \frac{d_0(S)}{\varepsilon_0} - \sigma_1(t) \left(\frac{2d_1}{\varepsilon\varepsilon_0} + \frac{d_0(S)}{\varepsilon_0} \right) = R \frac{d}{dt} Q_1(t) \quad (3.7)$$

Em condições estáticas e iniciais, a eq. (3.4) relaciona a carga induzida $Q_{I,e}$ com aquela Q_0 aprisionada nos filmes de eletreto e as capacitâncias são expressas em função da capacitância total e mensurável do sistema, por meio do parâmetro α . Considerando ainda a deformação dada pela eq. (3.6), no espaçamento de ar entre os filmes, a equação acima se torna:

$$R \frac{d}{dt} Q_1(t) + (1 + \alpha S) \frac{Q_1(t)}{C_t} = \alpha(1 + S) \frac{Q_0}{C_t} \quad (3.8)$$

O primeiro termo do lado esquerdo desta expressão mostra a d.d.p. no resistor enquanto que o segundo descreve a queda de tensão no capacitor equivalente do dispositivo. O lado di

O transdutor formado por filmes poliméricos de eletretos com um interstício de ar entre eles tem o seu funcionamento justificado como um sensor, quando uma variação provocada na espessura da camada de ar faz com que uma d.d.p. apareça entre os terminais deste dispositivo. Explicando, uma deformação positiva indica um aumento na espessura d_0 (S) entre as películas de eletretos, fazendo com que a capacitância C_0 (S) da região compressível com ar seja diminuída. No entanto, o arranjo capacitivo do modelo impõe a manutenção da carga estática induzida $Q_{l,e}$, sustentada por uma d.d.p. positiva no ar, entre os filmes eletricamente carregados. Este aumento na tensão elétrica, ainda que transitório, é traduzido como uma resposta do sensor, causa de um rearranjo nas cargas induzidas, estabelecendo então uma corrente que sai da placa superior e vai para a placa inferior, passando pela impedância terminal e motivada pelas novas cargas induzidas – $Q_{l,e} + \delta Q_l$ e $Q_{l,e} - \delta Q_l$ nos eletrodos superior e inferior respectivamente. De modo inverso, se a espessura d_0 (S) sofresse uma contração, esta seria justificada por uma deformação negativa que levaria a uma d.d.p. também negativa como resposta do sensor em questão.

A eq. (3.8) representa o comportamento eletromecânico do sensor, dependente da deformação em cada instante, de modo que a carga induzida nos eletrodos é decomposta em uma parte estática inicial $Q_{l,e}$ e outra dinâmica $\delta Q_l(t)$, fornecendo:

$$Q_1(t) = Q_{l,e} + \delta Q_1(t) \quad (3.10)$$

A derivada temporal da carga induzida considera então apenas a componente dinâmica como responsável pelo estabelecimento da corrente elétrica i mostrada no circuito da Fig. 3.3. Considerando ainda a eq. (3.4), a eq. (3.8) passa a ser escrita como:

$$R \frac{d}{dt} \delta Q_1(t) + \frac{1 + \alpha S}{C_t} \delta Q_1(t) = \frac{Q_0}{C_t} \alpha(1 - \alpha) S \quad (3.11)$$

3.2.1 Decomposição Espectral para o comportamento do sensor

O comportamento eletromecânico deste sensor com eletretos é justificado pela eq. (3.11), diferencial, de primeira ordem e não homogênea, cuja solução geral é obtida pelo emprego do fator integrante. No entanto, as aplicações operacionais deste tipo de transdutor eletromecânico implicam numa relação de funções com características periódicas, tanto na excitação como na resposta. Sabe-se também que tais funções podem ser decompostas em séries, cujos termos contêm funções senoidais de amplitudes e frequências adequadas. Assim

sendo, uma solução particular para uma excitação mecânica harmônica, torna mais fácil o entendimento do modelo deste transdutor quando operando como um sensor.

Considerando então uma excitação mecânica deste dispositivo mediante uma deformação harmônica de amplitude S_0 e uma frequência angular de oscilação ω no campo complexo, pode-se escrever que:

$$S(t) = S_0 \exp(j\omega t) \quad (3.12)$$

Esta deformação, variável no tempo, dá origem a uma corrente elétrica proveniente da variação da carga induzida nos eletrodos. Assim, uma solução particular para a eq. (3.11) fornece $\delta Q_I(t)$ decomposto em uma série de Fourier, tal que:

$$\delta Q_I(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \delta Q_{1,n} \exp(jn\omega t) \quad (3.13)$$

Posto que o valor médio de $\delta Q_I(t)$ é nulo, esta série se inicia com o termo correspondente para a frequência fundamental, ou seja, para $n = 1$. Considerando a constante de tempo do circuito capacitivo equivalente $\tau = RC_i$, a resposta esperada é obtida aplicando estes valores na eq. (3.11) onde:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} jn\omega \delta Q_{1,n} \exp(jn\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\delta Q_{1,n}}{\tau} \exp(jn\omega t) + \\ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha S_0 \delta Q_{1,n}}{\tau} \exp[j(n+1)\omega t] - \frac{Q_0}{\tau} \alpha(1-\alpha) S_0 \exp(j\omega t) = 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Obtém-se um polinômio expresso em termos de $\exp(jn\omega t)$, não nulo. Para que a condição de um polinômio identicamente nulo seja satisfeita, todos os coeficientes de cada exponencial devem ser iguais a zero. Uma análise espectral deste comportamento consiste no tratamento em separado de cada frequência desta variação de carga induzida. Tomando $n = 1$ nesta equação geral, a componente correspondente à frequência fundamental da variação da carga induzida será obtida fornecendo:

$$\delta Q_{1,1} = \frac{Q_0}{1 + j\omega\tau} \alpha(1-\alpha) S_0 \quad (3.15)$$

Para valores de n inteiro e superior a 1, os harmônicos desta quantidade dinâmica de carga são deduzidos por uma relação de recorrência ao harmônico de frequência imediatamente precedente, onde cada

$$\delta Q_{1,n} = -\frac{\delta Q_{1,n-1}}{1 + jn\omega\tau} \alpha S_0 \quad (3.16)$$

3.2.2 O Sensor para Altas Frequências ou em Circuito Aberto

Em frequências muito altas, onde $\omega\tau \gg 1$, a queda de tensão no capacitor equivalente do circuito pode ser desprezada e o primeiro termo do lado esquerdo da eq. (3.11) prevalece sobre o segundo. Assim,

$$\delta V_1(t) = R \frac{d}{dt} \delta Q_1(t) = \frac{Q_0}{C_t} \alpha(1-\alpha) S(t) \quad (3.17)$$

Nestas condições, a tensão elétrica de resposta assume a mesma forma que a deformação mecânica, configurando assim uma resposta linear com a excitação deste transdutor operando como um sensor em altas frequências. Logo a componente fundamental da variação de carga $\delta Q_{1,1}$ passa a ser escrita com base na eq. (3.15) onde:

$$\delta Q_{1,1} = -j \frac{Q_0}{\omega\tau} \alpha(1-\alpha) S_0 \quad (3.18)$$

Por recorrência e ainda baseando-se na mesma hipótese, a eq. (3.16) fica:

$$\delta Q_{1,n} = j \frac{\delta Q_{1,n-1}}{n\omega\tau} \alpha S_0 \quad (3.19)$$

Estas duas últimas equações mostram que as componentes harmônicas da variação de carga induzida serão desprezíveis, se analisadas frente ao termo fundamental. Desta feita, a variação de tensão fundamental que aparece entre os terminais do transdutor será dada por:

$$\delta V_{1,1} = R \frac{d}{dt} \delta Q_{1,1} = \frac{Q_0}{C_t} \alpha(1-\alpha) S_0 \quad (3.20)$$

Considerando o processo preliminar de carregamento impulsivo do dispositivo para formar os eletretos, entre os filmes poliméricos, no interior deste transdutor, aparecerá uma

tensão elétrica $V_t = Q_0 / C_t$ onde $V_t = \eta V_P$, sendo η a eficiência do método de carregamento com uma tensão no pico de impulso de V_P para a formação dos eletretos no dispositivo. Logo,

$$\delta V_{1,1} = \alpha (1 - \alpha) V_t S_0 \quad (3.21)$$

Esta expressão mostra que, para o transdutor operando em altas frequências como um sensor, a d.d.p. é linearmente relacionada com a deformação, não importando o valor da sua amplitude, independendo também da frequência de vibração do sistema. Além disto, nestas condições, observa-se que a tensão elétrica está em fase com a deformação, o que é correto.

A relação linear da equação acima vale enquanto os harmônicos da tensão elétrica fundamental forem considerados desprezíveis. Impondo a condição para que $|\delta V_{1,2}| \ll |\delta V_{1,1}|$ tem-se:

$$\alpha S_0 \ll \omega \tau \quad (3.22)$$

Tanto α como S_0 são valores menores do que a unidade, mas com uma condição mais fraca do que aquela assumida para as altas frequências onde $\omega \tau \gg 1$. O regime linear será exato no limite em que tanto a resistência da carga como a frequência de excitação se tornem infinitas. A solução da eq. (3.11) particularizada pela eq. (3.17), admitindo a queda de tensão desprezível no capacitor equivalente, é caracterizada como uma solução do sensor quando em circuito-aberto. Pode ser verificado também que a mesma solução se apresenta na eq. (3.21) para a frequência fundamental da variação de tensão terminal. Em regime linear pode-se então definir um coeficiente de sensibilidade h , dado por:

$$h = \frac{\delta V_1(t)}{S(t)} = \frac{\delta V_{1,1}}{S_0} = \alpha (1 - \alpha) V_t \quad (3.23)$$

Este coeficiente é uma medida da resposta elétrica do transdutor quando excitado mecanicamente por altas frequências em decorrência da deformação experimentada. Observe-se ainda que, dentro da faixa de frequência admitida com linearidade, este coeficiente h depende da tensão elétrica que é aplicada entre os eletrodos terminais do transdutor no momento do carregamento elétrico, isto é, quando da formação dos eletretos nas películas poliméricas, observando-se os limites impostos para a manutenção da rigidez dielétrica, impedindo que descargas elétricas venham a ocorrer na região de ar entre os filmes.

O processo de carregamento impulsivo mostra um crescimento linear do potencial na superfície dos filmes com a tensão de pico do impulso até um certo limiar. A partir deste limite observa-se uma saturação do potencial de superfície, atribuído à ocorrência de descargas reversas (ALTAFIM, GIACOMETTI e JANISZEWSKY, 1992).

3.2.3 O Sensor para Baixas Frequências ou em Curto-Circuito

Considerando agora as deformações provocadas em frequências mais baixas, o segundo termo do lado esquerdo na eq. (3.11) passa a prevalecer sobre o primeiro. Nestas condições, a solução para $\delta Q_I(t)$ será simplesmente:

$$\delta Q_I(t) = \alpha (1 - \alpha) Q_0 \frac{S(t)}{1 + \alpha S(t)} \quad (3.24)$$

A solução simplificada da eq. (3.11), desprezando a queda de tensão no resistor, constitui a característica de curto-circuito do dispositivo. Neste caso, a queda de tensão elétrica se concentra no arranjo capacitivo e a d.d.p. que aparece entre os terminais do transdutor é definida por $\delta V_I(t) = \delta Q_I(t) / C_t$. Considerando ainda a carga retida $Q_0 = C_t V_t$, a tensão elétrica entre os eletrodos, neste caso de curto-circuito, passa a ser expressa por:

$$\delta V_I(t) = \alpha (1 - \alpha) V_t \frac{S(t)}{1 + \alpha S(t)} \quad (3.25)$$

Observa-se que esta resposta elétrica não se encontra linearmente relacionada à deformação. De um modo totalmente diferente dos materiais piezelétricos, se houvesse uma constante piezelétrica, esta não seria de forma geral, um parâmetro característico do sistema. Este coeficiente assim definido, ainda continuaria sendo expresso em função da própria deformação S . Pode-se apenas definir um outro coeficiente de sensibilidade eletromecânica h_c para o circuito fechado dado como:

$$h_c = \frac{\delta V_I}{S} = V_t \frac{\alpha(1 - \alpha)}{1 + \alpha S} \quad (3.26)$$

Este coeficiente h_c , expresso em volts, possui a mesma dimensão do coeficiente de sensibilidade h , definido na eq. (3.23), para a sensibilidade eletromecânica do sensor, quando posto em circuito aberto.

3.2.4 O Sensor para Pequenas Deformações

Em qualquer faixa de frequências, para o caso particular de pequenas deformações onde $S \ll 1$ o regime linear é recuperado, reproduzindo assim os resultados obtidos como nos materiais piezelétricos em modo direto. Então, nestas condições, a constante de sensibilidade aparentemente piezelétrica pode ser escrita como na eq. (3.23), fornecida para o coeficiente eletromecânico do sensor operando em altas frequências ou em circuito aberto.

Este resultado é matematicamente obtido pela expansão em séries de Taylor em torno de uma deformação nula, considerando apenas o termo de primeira ordem. Admitindo esta condição para pequenas deformações, esta constante é a própria h , exprimindo o mesmo significado para ambos os casos.

Resumindo, este transdutor eletromecânico empregado como um sensor, fornece uma resposta linear para as seguintes situações: quando terminado por uma impedância elétrica elevada, quando excitado mecanicamente por uma frequência bastante alta em relação ao inverso da constante de tempo do circuito elétrico e também sem restrições de frequência desde que a amplitude da deformação seja muito pouco significativa, próxima de um valor nulo. Nestes casos particulares, o comportamento macroscópico deste dispositivo assemelha-se muito ao daqueles materiais piezelétricos, no que diz respeito à linearidade na resposta.

3.3 Comportamento eletromecânico do transdutor como atuador

Assim como o conceito do sensor foi estabelecido neste trabalho, um atuador eletromecânico é definido como um transdutor capaz de responder a um sinal elétrico com uma solicitação mecânica. Assim, quando uma d.d.p. é aplicada entre os eletrodos terminais do transdutor de eletretos em questão, uma modificação nas cargas induzidas dá origem a uma força de campo elétrico capaz de imprimir uma deformação, ou seja, uma variação na espessura total do dispositivo, como resposta mecânica esperada. Em outras palavras, uma tensão elétrica aplicada entre os eletrodos do dispositivo em estudo, produz um deslocamento relativo que modifica o espaçamento da região de ar contido entre os filmes poliméricos.

Uma tensão elétrica variável no tempo, quando aplicada no dispositivo eletromecânico de eletretos, leva a uma variação na carga induzida Q_I do arranjo capacitivo no modelo proposto. Conforme pode ser mostrado pela Fig. 3.4, uma força aparece na película superior, onde a carga elétrica $q = Q_0 - Q_I$ ali resultante fica sujeita a um campo E criado pela carga $Q_I - Q_0$, presente na película inferior que é mantida fixa e aterrada.

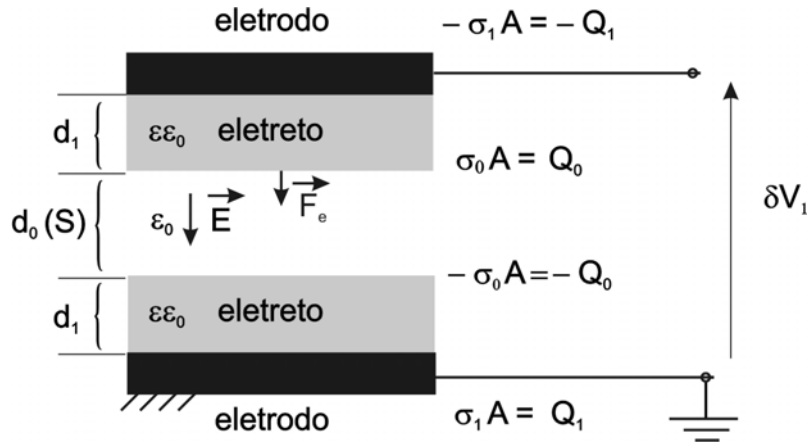


Figura 3.4: o transdutor como atuador.

Aqui a notação vetorial é dispensada uma vez que as análises encontram-se voltadas apenas à direção vertical, com a orientação do eixo z adotada positivamente para cima. Assim, na região de ar entre as películas, este campo elétrico criado pelo filme inferior é dado por:

$$E = -\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + \frac{\sigma_1}{\epsilon_0} \quad (3.27)$$

O filme superior por sua vez encontra-se carregado com uma carga total que, reportada à superfície na interface com a região de ar, pode assim ser definida:

$$q = (\sigma_0 - \sigma_1)A = Q_0 - Q_1 \quad (3.28)$$

Esta película superior fica então sujeita a uma força elétrica F_e onde:

$$F_e = qE = -\frac{(Q_0 - Q_1)^2}{\epsilon_0 A} = -\left(1 - \frac{Q_1}{Q_0}\right)^2 \frac{Q_0^2}{\epsilon_0 A} \quad (3.29)$$

Esta força elétrica interage com a sua reação presente no filme fixo, na tendência de atrair as duas películas e neutralizar as cargas elétricas. No entanto, isto não ocorre porque os vínculos estruturais e restaurativos estabelecem uma compensação com a força de campo, mantendo as películas afastadas e assim eletricamente carregadas.

Com o transdutor comportando-se como um atuador, uma d.d.p. irá provocar a ação de uma força que por sua vez causará uma deformação específica, definida pela eq. (3.6) já apresentada, na espessura inicial d_0 da camada compressível de ar. O circuito elétrico capacitivo mostrado na Fig. 3.5 a seguir é empregado para definir o modelo do transdutor

operando como um atuador no tocante às suas propriedades elétricas relacionadas com a deformação mecânica.

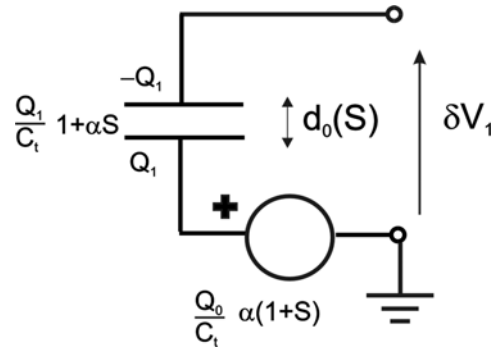


Figura 3.5: o atuador em função da deformação.

As cargas elétricas $\pm Q_I$ nos eletrodos são descritas em função da variação de tensão δV_I aplicada entre eles e da deformação S . Neste caso tem-se uma quantidade de carga nas placas metálicas que depende de uma d.d.p. externa δV_I e da deformação S , admitindo o espaçamento inicial d_o como referência para o estabelecimento das condições iniciais. A relação entre carga e tensão elétrica externa vem diretamente da análise do circuito acima e da eq. (3.8) onde a queda de tensão na resistência é substituída por uma força eletromotriz δV_I entre os terminais do transdutor. E a carga induzida Q_I passa a ser dada em função agora da deformação e da variação de tensão aplicada. Daí,

$$\frac{1+\alpha S}{C_t} Q_I(S, \delta V_I) = \frac{Q_0}{C_t} \alpha(1+S) - \delta V_I \quad (3.30)$$

Se a força eletromotriz aplicada for positiva, esta provocará uma diminuição na carga induzida em cada armadura, acarretando uma diminuição na capacitância equivalente, mediante uma deformação positiva, observada pelo afastamento relativo dos eletrodos. Como as películas poliméricas são admitidas incompressíveis, este aumento na separação entre os eletrodos dar-se-á pelo acréscimo no interstício de ar d_o entre os filmes.

A eq. (3.30) mostra a distribuição das tensões elétricas no circuito em função da deformação respondida mediante a força eletromotriz aplicada externamente, de um modo análogo àquele demonstrado para o sensor. Assim, a carga elétrica nas armaduras do capacitor equivalente fica então determinada:

$$Q_I(S, \delta V_I) = \frac{\alpha(1+S)}{1+\alpha S} Q_0 - \frac{C_t \delta V_I}{1+\alpha S} \quad (3.31)$$

Este valor de Q_I substituído na eq. (3.29) define a força elétrica em função da deformação e da variação na tensão elétrica aplicada. Feitas as considerações já abordadas no caso do sensor ao carregamento impulsivo para formar os eletretos, tem-se:

$$F_e(S, \delta V_1) = - \left[1 - \frac{\alpha(1+S)}{1+\alpha S} + \frac{\delta V_1}{V_t} \frac{1}{(1+\alpha S)} \right]^2 \frac{Q_0^2}{\varepsilon_0 A} \quad (3.32)$$

Observe-se que a equação que define esta força elétrica vem precedida do sinal negativo, indicando a sua natureza atrativa, conforme já mencionado. Esta expressão fica multiplicada pelo quadrado da carga aprisionada Q_0 , que por sua vez é determinada pelo produto da capacitância total C_t do dispositivo pela tensão de formação dos eletretos V_t . Logo,

$$F_e(S, \delta V_1) = - \frac{(C_t V_t)^2}{\varepsilon_0 A} \left[\frac{1}{1+\alpha S} \right]^2 \left[(1-\alpha) + \frac{\delta V_1}{V_t} \right]^2 \quad (3.33)$$

A força elétrica que causa a deformação no atuador é definida em função das variáveis S e δV_1 de modo independente mas não linear. Assim uma variação positiva δV_1 na d.d.p. aplicada, mantendo constante a deformação, diminui a quantidade de carga nos eletrodos, levando a um aumento da força de atração, o que é coerente. Por outro lado, uma deformação positiva com a d.d.p. externa mantida constante, diminui a capacitância do dispositivo, conduzindo a um decréscimo na força atrativa, já que há um aumento de carga nos eletrodos, por um comportamento oposto à força restauradora.

Para pequenas deformações onde $S \ll 1$ e tensões aplicadas tais que $\delta V_1 \ll V_t$, a expansão em Taylor da equação acima, na vizinhança destes parâmetros, resulta para a força elétrica até o termo linear, a seguinte expressão simplificada:

$$F_e(S, \delta V_1) = - \frac{(C_t V_t)^2}{\varepsilon_0 A} (1-\alpha)(1-2\alpha S) \left(1 - \alpha + 2 \frac{\delta V_1}{V_t} \right) \quad (3.34)$$

Esta condição específica de operação vem mostrar o comportamento eletromecânico do transdutor como um atuador devolvendo pequenas deformações, numa resposta linear e modulada pela variação da tensão elétrica aplicada entre os seus terminais.

3.4 Análise Elétrica e Considerações

O coeficiente α pode ser obtido experimentalmente, conforme a eq. (3.5), tomando-se a medida nas espessuras das películas e na região de ar entre elas. Este parâmetro define o percentual de carga induzida em relação à carga retida na formação dos eletretos ou exprime uma relação entre a capacitância equivalente do dispositivo como um todo e aquela existente na região de ar em condições estáticas. É empregado nas expressões que modelam o transdutor eletromecânico em questão como sensor e como atuador. De outra maneira, em qualquer faixa de frequência, o coeficiente α pode ser obtido pela razão entre a componente de segunda harmônica $\delta V_{1,2}$ e a fundamental $\delta V_{1,1}$ da variação de tensão entre os terminais. Assim, a componente de segunda harmônica da variação de tensão com auxílio da carga induzida na eq. (3.16), com $n = 2$, dividida pela correspondente fundamental da queda de tensão fornece:

$$\frac{\delta V_{1,2}}{\delta V_{1,1}} = -\frac{2\alpha S_0}{1 + j2\omega\tau} \quad (3.35)$$

Análises realizadas sobre este transdutor eletromecânico com uma bolha termoformada mostram que o dispositivo assim obtido comporta-se como uma associação de capacitores em série terminados por dois eletrodos metálicos. Este dispositivo torna possível a obtenção de um sinal elétrico como resposta de um estímulo mecânico desempenhando o papel de um sensor, ou inversamente, uma resposta mecânica como consequência da entrada de um sinal elétrico entre os seus eletrodos faz com que o dispositivo comporte-se como um atuador. Observa-se, no entanto, que os coeficientes que exprimem as sensibilidades eletromecânicas deste transdutor operando como sensor e como atuador não serão os mesmos.

O comportamento deste transdutor acima descrito, admite a reversibilidade, mas exclui o princípio da reciprocidade para este tipo de dispositivo, diferenciando estes daqueles transdutores com materiais efetivamente piezelétricos. Além dos coeficientes de sensibilidade não serem os mesmos nos dois modos de funcionamento, a linearidade nas respostas não pode ser esperada sob qualquer condição operativa. Ressalte-se aqui que a linearidade na resposta também é uma característica inerente aos materiais piezelétricos.

Os modelos que regem o funcionamento deste transdutor eletromecânico com eletretos podem vir a apresentar um comportamento linear desde que sejam impostas algumas condições, distintas para cada modo de operação. Como sensor terminado por altas

impedâncias e sob altas frequências ($\omega\tau \gg 1$), qualquer deformação fornece uma resposta elétrica linear, enquanto que sob frequências menores a linearidade só será respeitada se o dispositivo for excitado por pequenas deformações. Como atuador a resposta linear é obtida somente quando a resposta do transdutor resultar em pequenas deformações.

Estudos realizados sobre sistemas mecânicos, numa abordagem inicial, analisam a presença das forças neles aplicadas. Também, o comportamento dos transdutores de eletretos com filmes poliméricos, requer sob o ponto de vista mecânico, uma análise das forças que atuam sobre estes dispositivos, como elementos de causa ou efeito primários, quando estes operam como sensores ou como atuadores respectivamente.

O dispositivo em questão deve ser analisado através de uma relação estabelecida entre forças aplicadas e a correspondente deformação apresentada. O transdutor operando como um sensor devolve uma resposta elétrica função de uma deformação mecânica, conseqüente de uma força nele aplicada. Quando o mesmo transdutor passa a operar como um atuador, este devolve uma deformação mecânica, resultado de um conjunto de forças, dentre as quais uma de natureza elétrica em conseqüência da d.d.p. aplicada entre os eletrodos terminais do dispositivo eletromecânico.

Uma eventual defasagem entre a deformação e a correspondente força periódica sobre o transdutor eletromecânico não é abordada aqui e não denota importância sob o ponto de vista elétrico, na operação do dispositivo em regime permanente. Os eventuais atrasos ou adiantamentos que possam ocorrer entre a aplicação da força e a conseqüente deformação serão objetos de estudos no próximo capítulo, onde as considerações mecânicas serão abordadas (BASSO, 2006).

4. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS TRANSDUTORES

Este tópico trata os princípios físicos dos transdutores eletromecânicos de eletretos com uma bolha entre duas películas poliméricas de Teflon[®] FEP com eletretos nelas formados, com enfoque no comportamento mecânico, relacionado com as equações já deduzidas para o comportamento elétrico, no capítulo precedente. O modelo eletromecânico deste dispositivo foi analisado, abordando os sinais elétricos de entrada ou saída, em função da ocorrência de correspondentes deformações elásticas na bolha de ar vinculada pelas duas películas poliméricas. Em outras palavras, um modelo elétrico foi concebido, baseando-se em um circuito elétrico relacionado a uma deformação na espessura de um dos capacitores da associação, para representar o comportamento eletromecânico do transdutor em estudo operando como um sensor ou como um atuador. O dispositivo em questão foi classificado, segundo a análise bibliográfica apresentada, como um transdutor de eletretos poliméricos, com bolha de ar obtida por um processo térmico assistido a vácuo. Dentro de uma análise macroscópica e qualitativa, o conjunto formado pelos filmes homogêneos intercalados pelo colchão da bolha de ar e terminado por dois eletrodos metálicos, se compara operacionalmente àqueles filmes eletromecânicos industrializados (*EMFi*), ilustrados nas Figs. 2.11 e 2.13, obtidos após um conjunto de processos industriais sobre um filme polimérico originalmente homogêneo. Ressalte-se que este modelo para o transdutor eletromecânico em estudo apresenta uma única cavidade de ar capaz de se deformar entre duas películas poliméricas homogêneas e rígidas.

Neste capítulo, o comportamento eletromecânico deste transdutor com bolha de ar termoformada entre filmes de eletretos será analisado nos dois modos, enfocando a relação causal que existe entre uma deformação apresentada e a força correspondente.

4.1 Relação causal entre força e deformação

O estudo destes transdutores de eletretos com filmes poliméricos requer, sob o ponto de vista mecânico, uma análise das forças que atuam sobre estes dispositivos, como elementos primários de causa quando estes operam como sensores, ou de efeito estando eles operando na

condição de atuadores. Como já estabelecido, o modelo eletromecânico do dispositivo, baseia-se em um capacitor equivalente dependente de uma deformação mecânica linear, de natureza elástica. Assim, o dispositivo em questão deve ser analisado sob o ponto de vista mecânico, através de uma relação estabelecida entre forças aplicadas e a correspondente deformação apresentada.

Este transdutor operando como um sensor devolve uma resposta elétrica, função de uma deformação mecânica sofrida, por sua vez em consequência de uma força nele aplicada. Quando o mesmo transdutor passa a operar como um atuador este passa agora a devolver uma deformação mecânica, resultado de duas forças, sendo uma de compensação eletrostática e outra de ação elétrica em consequência da d.d.p. aplicada como estímulo entre os terminais do dispositivo eletromecânico.

4.1.1 Forças agentes no sistema

Uma analogia pode ser estabelecida entre um corpo submetido a deformações quando posto em vibração e um movimento oscilatório, cuja elongação corresponde a uma deformação periódica deste corpo em vibração (ALONSO e FINN, 1971).

A forma como este transdutor, formado por dois filmes de eletretos poliméricos com uma bolha entre eles, responde aos estímulos, sejam eles mecânicos ou elétricos, faz com que o dispositivo em questão seja visto como um sistema massa-mola dotado de amortecimento, quando sob uma análise mecânica. Como admitido anteriormente, a bolha de ar possui uma dimensão longitudinal muito maior do que a transversal, sendo representada por uma região de ar paralelamente inserida entre os filmes pol.03411.108 35036 cm/Im0 DoQEMC /P <</MCID 6 >>BDC BT

Nestas condições, uma força $F(t)$, aplicada na parte móvel do dispositivo, produz uma deformação na bolha de ar do sistema, de modo que o espaçamento d_0 de ar entre as películas se modifique para $d_0 + \delta d_0$, produzindo, neste caso, uma deformação S nesta camada, já apresentada na eq. (3.6) e aqui reescrita:

$$S = \frac{\delta d_0}{d_0} \quad (4.1)$$

A região compressível de ar sofre uma variação na sua espessura, que por sua vez apresenta uma deformação S , devido ao trabalho realizado sobre a parte móvel do dispositivo. Ainda dentro de uma análise energética, o balanço no sistema é fechado por uma parcela de energia que se dissipa, aqui justificada pela resposta de amortecimento que o sistema oferece em decorrência da ação da força aplicada sobre ele. Como consequência, o sistema massa-mola reage no sentido de anular a deformação na camada de ar.

Em uma análise das forças de reação oferecidas pelo sistema, este transdutor eletromecânico de eletretos fica sujeito à ação de uma força elástica F_{elast} de constante restitutiva k que se opõe à elongação δd_0 sofrida, cuja intensidade é dada por:

$$F_{elast} = k \delta d_0 \quad (4.2)$$

Sendo este um sistema massa-mola com amortecimento, a parcela de energia dissipada é justificada pela presença de uma força de natureza viscosa F_{visc} opoente e proporcional à velocidade da elongação sofrida, regida por uma constante de proporcionalidade B . Sua intensidade é expressa por:

$$F_{visc} = B \frac{d}{dt} (\delta d_0) \quad (4.3)$$

A força resultante agente sobre o sistema fica então determinada pela aplicação da força externa $F(t)$ e pelas reações que o sistema oferece. Desta forma, a força resultante F_{RES} é determinada da seguinte forma:

$$F_{RES} = F(t) - F_{elast} - F_{visc} \quad (4.4)$$

O conjunto oscilante de massa m fica então sujeito à ação de um conjunto de forças representadas por uma resultante inercial de modo que o problema seja formulado da seguinte maneira:

$$m \frac{d^2}{dt^2}(\delta d_0) + B \frac{d}{dt}(\delta d_0) + k \delta d_0 = F(t) \quad (4.5)$$

O emprego da eq. (4.1) faz com que a elongação δd_0 sofrida pelo dispositivo elástico seja escrita em função da deformação, onde:

$$\frac{d^2}{dt^2}S(t) + \gamma \frac{d}{dt}S(t) + \omega_0^2 S(t) = \frac{F(t)}{md_0} \quad (4.6)$$

A deformação apresentada pelo transdutor eletromecânico em estudo pode então ser obtida por esta equação diferencial ordinária não homogênea, de segunda ordem a parâmetros constantes, onde:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{B}{m} \\ \omega_0^2 &= \frac{k}{m} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Este conjunto define dois parâmetros importantes na definição do modelo oscilatório para o sistema mecânico do transdutor de eletretos. O parâmetro γ é o coeficiente específico de amortecimento viscoso, enquanto que o coeficiente específico de elasticidade é dado por ω_0^2 , representado pelo quadrado da frequência angular natural de vibração da parte superior do sistema oscilatório livre, isto é, desprovido de amortecimento. A superposição destas duas propriedades propõe um modelo mecânico para o transdutor baseado em um oscilador harmônico forçado.

Enfatizando mais uma vez a importância prática na relação entre excitações e respostas periódicas neste tipo de transdutor, a eq. (4.6) não será resolvida pelo modo convencional, mas sim considerando uma força de natureza harmônica aplicada ao transdutor eletromecânico, com uma amplitude F_0 e uma frequência angular de oscilação ω , onde:

$$F(t) = F_0 \exp(j\omega t) \quad (4.8)$$

4.1.2 Deformação apresentada pelo sistema oscilatório

Admite-se que uma força harmônica aplicada sobre um dispositivo oscilador produz também uma deformação de mesmo tipo e com a mesma frequência da fonte de excitação, considerando uma eventual defasagem entre esta deformação e a correspondente força

aplicada. Para uma força harmônica dada pela eq. (4.8), a solução da eq. (4.6), substituindo cada derivada temporal por $j\omega$, fornece a deformação na bolha de ar, de modo que:

$$S(t) = \frac{F_0 \exp[j(\omega t - \phi)]}{m d_0 \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega\gamma)^2}} \quad (4.9)$$

A expressão acima mostra que a deformação apresentada e relacionada com a força correspondente é de natureza harmônica e possui uma amplitude dada por:

$$S_0 = \frac{F_0}{m d_0 \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega\gamma)^2}} \quad (4.10)$$

Observa-se também para esta solução particular da eq. (4.6), que a deformação apresentada na região compressível de ar encontra-se defasada da força. Esta forma polar da deformação dada pela eq. (4.9) mostra que ela pode estar atrasada ou adiantada em relação à força aplicada, cuja defasagem é expressa através do ângulo:

$$\phi = \arctg\left(\frac{\omega\gamma}{\omega_0^2 - \omega^2}\right) \quad (4.11)$$

Os parâmetros específicos γ e ω_0^2 da eq. (4.7) determinam o desempenho do dispositivo eletromecânico a ser modelado. São cruciais para uma avaliação do desempenho eletromecânico do sensor e do atuador formados por estes transdutores com eletretos, com uma camada compressível entre eles, quando analisados analiticamente. A frequência natural de oscilação é determinada em função das dimensões e da elasticidade do filme polimérico que envolve cada bolha de ar. Já o coeficiente representante da dissipação ou amortecimento, por interagir com o meio, é determinado em função da resposta em frequência medida em laboratório, como será mostrado mais à frente.

Os estudos sobre o comportamento eletromecânico deste dispositivo com eletretos, operando como um sensor e como um atuador, são apresentados em [55].

deformações apresentadas, desde que elas sejam muito pequenas, fazendo com que a força elétrica se reduza à forma simplificada da eq. (3.34).

Os modelos eletromecânicos propostos para o funcionamento deste dispositivo como sensor e como atuador, consideraram até então, a deformação mecânica apenas como uma variável independente.

4.2 Força e deformação em modo sensor

Com base nas hipóteses do capítulo anterior e mencionadas acima, a eq. (3.17) exprime a variação de tensão elétrica δV_I que aparece entre os eletrodos do transdutor quando este opera como um sensor. Assim, para uma excitação harmônica e considerando agora a defasagem entre ela e a força aplicada, a deformação $S(t)$ fornece:

$$\delta V_I(t) = \frac{Q_0}{C_t} \alpha(1-\alpha) S_0 \exp[j(\omega t - \varphi)] \quad (4.12)$$

A amplitude da deformação é fornecida em função da amplitude da força que faz vibrar o transdutor, a causa de sua excitação mecânica neste modo de operação. A expressão acima pode ser compreendida em função da amplitude da força aplicada sobre o sensor e pela defasagem existente entre ela e a deformação produzida, segundo o mostrado pelas eqs. (4.10) e (4.11), que por sua vez, utilizam as constantes mecânicas específicas da elasticidade e da dissipação.

Foi visto no capítulo anterior, que as condições impostas ao sensor para que ele forneça uma resposta elétrica linear frente a uma excitação harmônica aplicada, consideram os efeitos provocados pela componente fundamental da deformação sofrida em consequência da força aplicada que faz vibrar o dispositivo. Desta feita, a amplitude da componente fundamental de sua resposta elétrica como sensor pode ser obtida, de acordo com a eq. (3.21), da seguinte forma:

$$\delta V_{1,1} = \alpha(1-\alpha) V_t \frac{F_0}{m d_0 \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega\gamma)^2}} \quad (4.13)$$

A resposta eletromecânica deste transdutor operando como sensor estará perfeitamente determinada, uma vez que se conheçam a constante de restituição elástica e o amortecimento dissipativo no sistema em análise.

4.3 Força e deformação em modo atuador

A resposta eletromecânica para o funcionamento do transdutor como atuador foi analisada no capítulo anterior, tratando a deformação mecânica específica como o efeito final no comportamento do dispositivo, sem levar em consideração a causa física de sua origem, a força aplicada $F(t)$. Desta vez, uma força elétrica, função da deformação S e da tensão elétrica aplicada δV_I entre os eletrodos, interage com os filmes poliméricos segundo a expressão simplificada e definida pela eq. (3.34), para pequenas deformações e de natureza atrativa para uma deformação linear considerada positiva; daí a justificativa para o sinal negativo na sua expressão.

Foi mostrado pelas eqs. (3.6) e (4.1), que a deformação específica é definida instantaneamente, onde o tempo não figura necessariamente como uma variável independente. Assim sendo, a força de resposta externa $F(t)$ aplicada sobre o transdutor operando na condição de um atuador é a própria força elétrica $F_e(S, \delta V_I)$.

Se uma tensão elétrica positiva é aplicada entre os terminais do transdutor eletromecânico de eletretos, este responde com uma força elétrica de atração entre as duas películas com cargas de polaridades opostas. Neste caso, impedindo que ocorra uma recombinação das cargas elétricas, uma força constante de compensação F_c , passa a fazer parte do conjunto de forças atuantes, para que o funcionamento do dispositivo como um atuador eletromecânico seja viável. Esta força de compensação pelos vínculos estruturais no sistema encontra-se aplicada aos pares, uma em cada película. Desta forma, acrescentando esta força no lado direito da eq. (4.6) com a força elétrica fornecida pela eq. (3.34), vem:

$$m d_0 \left(\frac{d^2 S}{dt^2} + \gamma \frac{dS}{dt} + \omega_0^2 S \right) = - \frac{(C_t V_t)^2}{\epsilon_0 A} (1 - \alpha)(1 - 2\alpha S) \left(1 - \alpha + 2 \frac{\delta V_I}{V_t} \right) + F_c \quad (4.14)$$

Para a expressão acima, numa condição estática, isto é, $S = \delta V_I = 0$, a força de compensação F_c é então determinada. Assim,

$$F_c = \frac{(C_t V_t)^2}{\epsilon_0 A} (1 - \alpha)^2 \quad (4.15)$$

Desenvolvendo os produtos do lado direito na eq. (4.14), desprezando o termo $4\alpha S \delta V_I / V_t$ de menor ordem e substituindo cada derivada temporal d/dt por $j\omega$, tem-se:

$$md_0 \left[\omega_0^2 - \omega^2 - 2 \frac{(C_t V_t)^2}{md_0 \epsilon_0 A} \alpha (1 - \alpha)^2 + j\omega\gamma \right] S = -2(1 - \alpha) \frac{(C_t V_t)^2}{\epsilon_0 A} \frac{\delta V_I}{V_t} \quad (4.16)$$

Quando os eletrodos terminais do transdutor são excitados eletricamente por uma d.d.p. harmônica dada por $\delta V_I(t) = \delta V_0 \exp(j\omega t)$, o dispositivo eletromecânico responde com uma deformação elástica na sua região compressível, de modo que:

$$S(t) = - \frac{2(1 - \alpha) C_t^2 V_t \delta V_0 \exp[j(\omega t - \theta)]}{md_0 \epsilon_0 A \sqrt{\left[\omega_0^2 - \omega^2 - 2 \frac{(C_t V_t)^2}{md_0 \epsilon_0 A} \alpha (1 - \alpha)^2 \right]^2 + (\omega\gamma)^2}} \quad (4.17)$$

O sinal negativo nesta expressão mostra que a deformação produzida pelo atuador de eletretos poliméricos encontra-se em oposição de fase em relação à tensão elétrica aplicada entre os seus eletrodos, o que é correto. Além desta oposição de fase mencionada, existe ainda a contribuição da defasagem existente entre a força aplicada e a deformação gerada, denotada pelo ângulo:

$$\theta = \arctg \left(\frac{\omega\gamma}{\omega_0^2 - \omega^2 - 2 \frac{(C_t V_t)^2}{md_0 \epsilon_0 A} \alpha (1 - \alpha)^2} \right) \quad (4.18)$$

A deformação no transdutor como um atuador, além de ser determinada por um coeficiente diferente daquele definido para o mesmo dispositivo operando como um sensor, ainda aparece com uma defasagem, também diferente. Mais uma vez nota-se a ausência do princípio da reciprocidade, uma das propriedades características dos materiais piezelétricos. Com base em pequenas deformações, a expressão para $S(t)$ em função da frequência expressa na eq. (4.17) mostra uma relação linear entre a amplitude da deformação S_0 e a amplitude da variação de tensão elétrica aplicada δV_I , embora em oposição de fase.

Nota-se mais uma vez, que a resposta eletromecânica deste atuador ficará perfeitamente estabelecida, tendo-se em mãos as grandezas referentes à restituição elástica e à dissipação pelo sistema em estudo.

4.4 A restituição elástica

A produção destes transdutores eletromecânicos, pelo modelo concebido, define uma bolha microscópica, contendo ar no interior dela, entre dois filmes poliméricos com cargas elétricas de polaridades opostas neles retidas. Esta bolha contém o ar proveniente da atmosfera ambiente, visto que no seu processo de formação, as duas películas, ainda descarregadas, são postas em contato uma com a outra. Em seguida, após o processo térmico de soldagem dos filmes, este ar termina retido sob pressão atmosférica no interior da bolha termoformada.

Para um estudo mais simplificado da deformação na bolha de ar, mas sem prejuízo no entendimento, será admitido que esta bolha termoformada contém o ar à pressão atmosférica, quando isenta de deformação. Adquire a forma geométrica de um minúsculo cilindro, de altura d_0 e bases com raio a , envolta por placas circulares de filmes poliméricos. Admite-se então, nesta bolha cilíndrica, que a película em uma de suas bases, comporta-se como uma placa circular engastada em todo o seu contorno e que apenas ela venha a sofrer uma deformação mecânica enquanto que a outra, na base oposta, é suposta rigidamente apoiada sobre uma superfície plana. Saliente-se aqui que a superfície tubular, do contorno cilíndrico, também permanece rígida, sendo somente uma das bases o único elemento suscetível à deformação.

A ação de uma força aplicada sobre uma das bases ou placa circular polimérica, provoca deformações que interferem diretamente na bolha de ar entre os filmes, culminando com uma variação em seu volume. Esta deformação apresentada na bolha é vista fisicamente como aquela sofrida pela placa circular engastada, devido à ação de uma carga mecânica concentrada, aplicada no seu centro. Por outro lado, uma equivalência aponta para o deslocamento de um pistão de mesma área circular que a da placa mencionada, agora admitida rígida, sem deformação.

A restituição elástica da bolha contida neste transdutor em estudo requer uma análise de seu comportamento mecânico, contendo ar no seu interior, sob pressão. Resumindo, a bolha cilíndrica, quando submetida a um esforço na direção axial, sofre uma deformação que demanda uma análise considerando dois fenômenos em separado, mas que conduzem ao mesmo efeito. Ou seja, a mudança irregular de perfil em uma placa circular polimérica e o deslocamento uniforme de um pistão contra a pressão do ar, ambos produzindo a mesma

variação no volume de ar na bolha. O Apêndice A descreve a deformação sofrida pela bolha de ar em maiores detalhes.

4.4.1 *Deformação na película e o pistão equivalente*

A força que é aplicada sobre a placa circular polimérica de um dos filmes, produz uma deformação cujo efeito final resulta na variação do volume de ar no interior da bolha termo-formada. Uma primeira componente desta força normal atua na deformação da placa, sem considerar o ar contido na bolha. Ainda nesta direção, uma outra componente é responsável pela variação na pressão do gás, no caso, o ar que recebe ou realiza trabalho na bolha, desta vez sem considerar a força que produz a deformação na placa.

Sob o ponto de vista de uma placa circular engastada, o seu perfil sofre uma deformação não regular, em função da distância radial atingindo uma deflexão máxima no seu centro e zero nas bordas do contorno, nos vínculos. Por outro lado, a variação ocasionada no volume de ar também é justificada pelo deslocamento de um pistão circular, cuja área é a mesma da placa sem esforços. Considere-se então que a variação em volume de ar é a mesma tanto quando analisada para a deformação de uma placa circular engastada, como para o deslocamento de um pistão.

4.4.2 *Deformação elástica na película*

O filme polimérico, constituído por uma placa circular engastada, de constante elástica k_f , se deforma quando da aplicação de uma força F_f e atinge um máximo de deflexão z_{max} dado no Apêndice A pela eq. (A.11). Se esta deformação for admitida linear, a aplicação da lei de Hooke garante então que a menos do sinal,

_____ max

ou de uma resposta, os filmes poliméricos deste transdutor sofrem deformações. Com isto, o volume de ar confinado no interior da bolha entre as películas, sofre uma compressão ou uma expansão, devido a uma variação de pressão.

Para esta análise, o ar contido na bolha será admitido como um gás perfeito sofrendo uma transformação isotérmica, exercendo inicialmente uma pressão p_0 equalizada com a pressão atmosférica ambiente. Se um pistão se desloca de uma distância \bar{z} comprimindo o ar, a deformação na bolha, mantida a temperatura, faz com que o ar exerça uma nova pressão p devido à variação de volume ΔV . Mantida a hipótese de uma bolha cilíndrica de raio a e altura d_0 , tem-se:

$$p = p_0 \frac{d_0}{(d_0 - \bar{z})} \quad (4.20)$$

Inicialmente, o ar contido exerce uma força sobre a área circular de raio a na bolha sem deformação. A compressão desta bolha, considerando a transformação isotérmica, faz com que o ar exerça uma nova pressão p dada pela eq. (4.20). Uma força pneumática F_p passa a atuar sobre a área circular A , em decorrência da variação de pressão experimentada pelo ar. Logo:

$$F_p = (p - p_0)A = \pi a^2 p_0 \left[\frac{d_0}{(d_0 - \bar{z})} - 1 \right] \quad (4.21)$$

Conforme mostrado no Apêndice A, o deslocamento do pistão corresponde à quarta parte da deflexão máxima real sofrida pela película envolvendo a bolha, quando uma força concentrada no centro dela é aplicada. Assim, pela aplicação da eq. (A.12), o deslocamento uniforme e equivalente para o pistão pode ser dado por:

$$\bar{z} = \frac{z_{\max}}{4} \quad (4.22)$$

Considerando esta relação de equivalência entre o deslocamento uniforme e a máxima deflexão obtida na deformação da bolha tem-se:

$$F_p = \pi a^2 \frac{p_0 z_{\max}}{4d_0 - z_{\max}} \quad (4.23)$$

A expressão acima denota a ação de uma força pneumática não linear, que age sobre o mesmo filme que sofre a deformação mecânica na placa circular.

4.4.4 *Coefficiente elástico resultante*

Quando o transdutor em questão encontra-se sob a ação de uma força F , pode-se observar, sem maiores dificuldades, que a sua decomposição considera os dois efeitos superpostos desde que as deformações sejam muito pequenas. Somando-se as duas forças, dadas pelas eqs. (4.19) e (4.23), obtém-se:

$$F = \left(\frac{4Yt^3}{3a^2} + \frac{p_0 a^2}{4d_0 - z_{\max}} \right) \pi z_{\max} \quad (4.24)$$

Esta expressão não é rigorosamente linear e para a aplicação da lei de Hooke admite-se que a deflexão máxima na película é muito menor do que a altura ou espessura d_0 da bolha sem deformação. Feita esta consideração, a constante elástica resultante assume a forma linear

A operação deste transdutor eletromecânico com filmes de eletretos implica na ação de uma força externa, seja ela um estímulo ou uma resposta ao seu funcionamento. Com isto, este dispositivo reage no sentido contrário ao da deformação que aparece na camada compressível da região de ar entre as películas poliméricas. Esta reação mecânica aparece no transdutor cada vez que a solicitação externa motiva uma deformação na camada compressível entre os filmes, tomando parte na recomposição elástica dos esforços sofridos na bolha com ar sob pressão, cuja constante linearizada de restituição é dada pela eq. (4.25).

Como os eletrodos adjacentes aos filmes sob oscilação possuem uma espessura com ordem de grandeza nanométrica, sua massa não faz parte dos cálculos, sendo aqui considerada desprezível.

4.5 Amortecimento e dissipação de energia

Conforme foi enfatizado, este transdutor eletromecânico encontra aplicações das mais diversas, quando operando sob um regime harmônico. Dizendo em outras palavras, este dispositivo tem o seu funcionamento baseado na recepção ou na emissão de vibrações, definindo saídas ou entradas elétricas respectivamente. Fisicamente, este transdutor eletromecânico, com filmes poliméricos de eletretos e uma bolha de ar, compressível entre eles, realiza um movimento oscilatório e forçado com dissipação de energia, apresentando perdas em condições reais de operação. A parcela de energia mecânica que não se conserva é considerada no amortecimento do sistema e nas dissipações por calor, atrito ou demais formas que possam ocorrer.

Com base na análise harmônica, este movimento vibratório realizado pelo transdutor em estudo é forçado pela imposição de uma ação externa, de forma a compensar o amortecimento na oscilação do sistema. Observa-se então que a ressonância em amplitude ocorre numa frequência angular ω_M , menor do que aquela livre e natural ω_0 sem amortecimento (ALONSO e FINN, 1971).

A frequência angular e natural do sistema oscilatório sem amortecimento é obtida analiticamente pela eq. (4.26), considerando a deformação da película polimérica e a variação na pressão do ar confinado na bolha. Por outro lado, a constante específica γ de amortecimento ou dissipação pode ser determinada, desde que se conheça a frequência angular da ressonância em amplitude ω_M do dispositivo. A obtenção deste amortecimento é conseguida por um método indireto, medindo-se a frequência da ressonância em amplitude do

transdutor em operação, dentro de uma faixa de freqüências, relacionada com um fator de qualidade. Assim, um ensaio medindo a resposta em freqüência permite que o ponto de ressonância seja conhecido através de um método acústico indireto onde o transdutor em questão é submetido a uma excitação elétrica senoidal de amplitude constante, com uma variação de freqüência capaz de excitar o microfone de um medidor de pressão sonora (ALTAFIM, R. A. P., 2006).

Como este método indireto não fornece o valor da força causadora da vibração, os valores da resposta do dispositivo em função da freqüência não são determinados através de um método exato, conforme as eqs. (4.10) ou (A.14) na sua forma absoluta. O problema é contornado por uma expressão normalizada para a amplitude Z da resposta em freqüência do dispositivo eletromecânico em questão, onde:

$$Z(\omega) = \frac{Z_0}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (\gamma\omega)^2}} \quad (4.27)$$

O gráfico desta resposta normalizada é mostrado na Fig. 4.2, onde o valor máximo ocorre para um valor unitário da amplitude, na freqüência angular de ressonância ω_M .

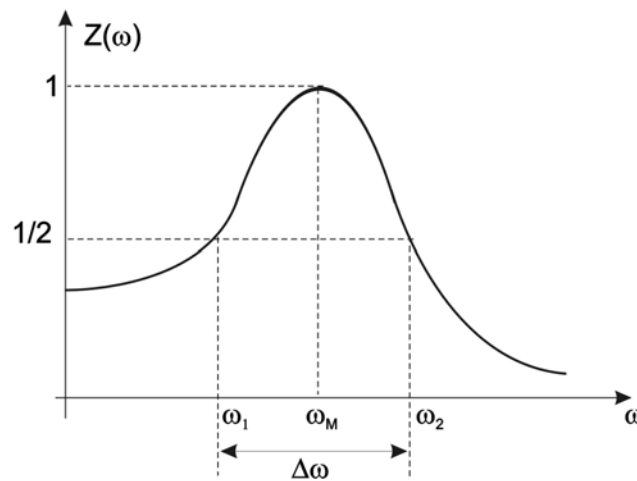


Figura 4.2: resposta normalizada do transdutor em função da freqüência.

Para a expressão na eq. (4.27) igualada a 1, em função da freqüência de ressonância em amplitude, tem-se:

$$Z_0 = \gamma \sqrt{\omega_0^2 - \left(\frac{\gamma}{2}\right)^2} \quad (4.28)$$

A observação da Fig. 4.2 mostra também que a largura de uma faixa de frequência pode ser analisada em função de um fator de qualidade. Uma maior largura desta faixa implica em um maior amortecimento no sistema e conseqüentemente a uma maior dissipação de energia. Atribuindo-se um intervalo centrado na frequência de ressonância, esta pode ser determinada, para valores simétricos de frequências, correspondentes à metade da amplitude máxima normalizada. Assim, para tais valores de ω tem-se que:

$$\frac{\gamma \sqrt{\omega_0^2 - \left(\frac{\gamma}{2}\right)^2}}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (\gamma\omega)^2}} = \frac{1}{2} \quad (4.29)$$

Estas frequências são obtidas pela solução de uma equação bi-quadrada, cuja forma geral é dada por:

$$(\omega_{1,2})^2 = \omega_0^2 - \left(\frac{\gamma}{2}\right)^2 \pm \sqrt{\left(\omega_0^2 - \frac{\gamma^2}{2}\right)^2 - (\omega_0^2 - \gamma^2)^2 + 2(\omega_0\gamma)^2} \quad (4.30)$$

Uma análise desta expressão permite ver que estas frequências não podem ser obtidas diretamente, tendo em vista que ela é função também do amortecimento específico, objetivo deste cálculo e não conhecido. Admite-se que a ressonância se dê numa frequência próxima da natural ω_0 e que a largura da faixa de meia amplitude esteja compreendida dentro de um valor $\Delta\omega$, neste caso conhecido e medido em laboratório. Desta forma, pode-se escrever que:

$$\left(\omega_0 \pm \frac{\Delta\omega}{2}\right)^2 = \omega_0^2 \pm (\omega_0\gamma)\sqrt{2} \quad (4.31)$$

O desenvolvimento do lado esquerdo desta expressão, desprezando-se o termo de menor ordem, permite que um valor inicial para o amortecimento específico seja obtido em função da largura da faixa conhecida. Após simplificações, o coeficiente de amortecimento específico é dado por:

$$\gamma = \frac{\Delta\omega}{\sqrt{2}} \quad (4.32)$$

4.6 Análise Mecânica e Considerações

A força F_c definida pela eq. (4.15), no caso do atuador, evita que as películas eletricamente carregadas se atraiam mutuamente, inviabilizando assim o funcionamento do dispositivo como um transdutor, da forma como é concebido. Saliente-se que esta força encontra-se sempre presente e compensa o efeito atrativo da força eletrostática definida na eq. (3.29). Em outras palavras, considerando a definição do parâmetro α na eq. (3.4), as duas expressões, tanto da força elétrica como da de compensação, são exatamente iguais para o caso estático. Este efeito limita o carregamento elétrico nas películas poliméricas, evitando um colapso entre elas, bem como contribui no dimensionamento das superfícies nas bolhas termoformadas, admitidas como cilíndricas neste contexto.

Este modelo mecânico proposto para a operação deste transdutor encontra-se inicialmente embasado em um sistema massa-mola sob vibrações em função da frequência e da amplitude de oscilação, com amortecimento devido à dissipação de energia. Quando o dispositivo opera como um sensor a amplitude considerada é a da força de excitação e quando o mesmo opera como um atuador esta amplitude é a da tensão elétrica aplicada entre os seus eletrodos.

A sensibilidade deste transdutor eletromecânico sob vibrações é determinada pela resposta que este dispositivo fornece em função de cada frequência de operação para uma amplitude constante. Conhecendo-se então a frequência angular natural sem amortecimento dada pela constante de restituição elástica e pela massa sob vibração, o coeficiente de dissipação ou viscosidade pode ser facilmente obtido, desde que se tenha o valor da frequência para a máxima amplitude de oscilação, com a consideração do amortecimento.

Este oscilador harmônico complementa a definição dos parâmetros elétricos e mecânicos para o modelo eletromecânico de entendimento da operação deste transdutor eletromecânico, no papel de uma importante ferramenta para projeto de tais dispositivos em função das aplicações requisitadas.

5. MEDIDAS E ANÁLISES

Dentre os objetivos desta tese, um deles encontra-se voltado à proposição de um modelo que possa ser utilizado como uma ferramenta de projeto para transdutores fabricados com filmes poliméricos envolvendo cavidades microscópicas e compressíveis de ar. Para tal, medidas experimentais se fazem necessárias para uma complementação na definição deste modelo dentro de uma avaliação do comportamento dinâmico deste transdutor em função da frequência.

Para que o comportamento dinâmico deste transdutor pudesse ser avaliado, uma amostra foi produzida em laboratório servindo para a determinação do coeficiente γ de amortecimento específico e para a verificação da frequência natural ω_0 de oscilação livre.

5.1. A amostra sob testes

Para a amostra produzida em laboratório e destinada aos ensaios, foram empregadas películas poliméricas de Teflon[®] FEP, classificação 200 A, com 50 μm de espessura, conforme as características da especificação técnica do fabricante *Dupont*, mostradas no Anexo 1 deste trabalho. A amostra utilizada foi produzida, conforme a Fig. 5.1 do lado esquerdo, com duas películas poliméricas unidas por um processo de solda térmica, deixando o espaço de uma cavidade previamente termoformada a vácuo. Feito isto, o dispositivo foi terminado com alumínio vaporizado sob vácuo, sobre as partes externas de cada película polimérica, servindo de eletrodos para estabelecer um contato elétrico isoladamente, sem colocá-las em curto-circuito. A bolha de ar termoformada assim produzida assume a forma geométrica aproximada de um cilindro, tendo este 1 mm de altura e bases circulares com 4 mm de diâmetro, de acordo com o modelo proposto na teoria e mostrado na mesma Fig. 5.1 do lado direito.

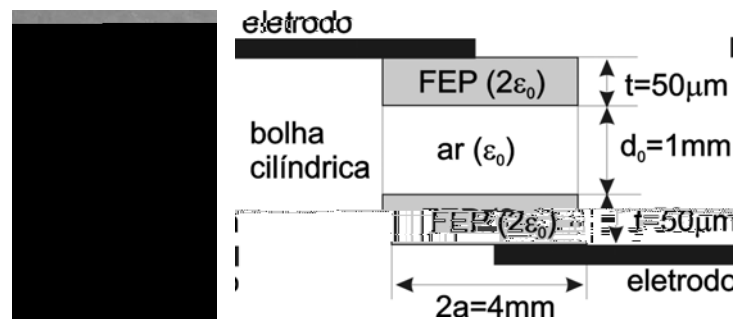


Figura 5.1: transdutor com uma bolha e seu modelo esquemático cilíndrico.

5.2. A resposta em frequência

Como já foi mostrado, o coeficiente de amortecimento específico é determinado em função de um fator de qualidade, capaz de mostrar este amortecimento proporcional a uma faixa de frequências simétricas em relação à ressonância em amplitude do sinal de saída. Em outras palavras, pode-se dizer que quanto menor a largura desta faixa, menor o amortecimento e maior o fator de qualidade do transdutor. Daí o interesse na realização de um ensaio neste dispositivo eletromecânico, de modo que seja possível verificar a sua capacidade de resposta em função da frequência na vibração.

5.2.1. Ensaio para obtenção da resposta em frequência

O transdutor sob teste foi submetido a um ensaio de capacidade de resposta em frequência para que o seu amortecimento pudesse ser determinado em função de um fator de qualidade em torno da frequência de ressonância do sistema. Na realização deste ensaio, avaliou-se o desempenho do dispositivo operando como um atuador. A amostra sob teste foi encerrada no interior de uma caixa de madeira no formato de um cubo com 60 cm de aresta, uma espécie de câmara anecóica, de modo a manter o dispositivo e todo o sistema de medidas isolados o máximo possível de interferências acústicas. O arranjo para os ensaios com a amostra dentro desta câmara de isolamento acústica é mostrado na Fig. 5.2, do lado esquerdo. Ainda para deixar a amostra imune à interferência de campos eletromagnéticos, esta foi ensaiada no interior de um recipiente blindado, sob uma grade metálica, conforme mostra a Fig. 5.2 do seu lado direito.

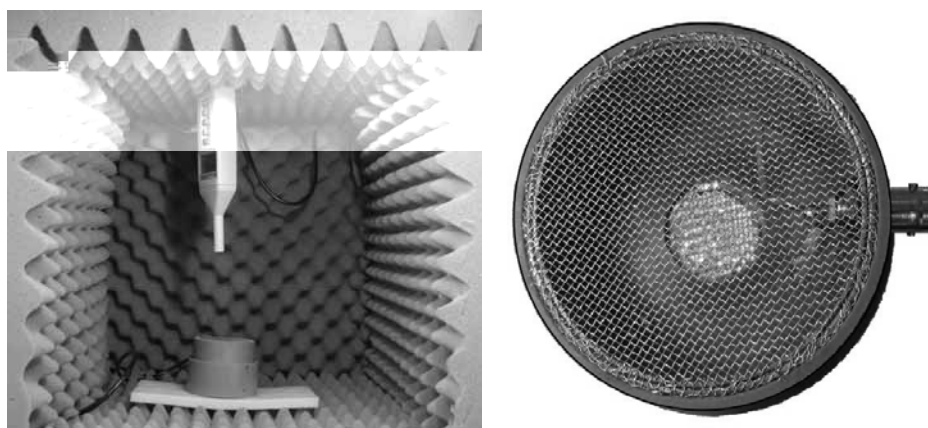


Figura 5.2: o transdutor no ensaio acústico indireto

A seguir o transdutor, dentro da câmara fechada, foi eletricamente excitado por meio de um gerador de áudio senoidal a uma amplitude constante de 10 V, com uma variação de frequências entre 1 kHz e 3 kHz. A potência acústica irradiada por este atuador eletromecânico polimérico, operando como um emissor acústico, foi medida com um decibelímetro ou medidor de pressão sonora Minipa IEC-651 *type II* ajustado com a curva *C* de ponderação. A saída elétrica deste medidor de pressão sonora foi conectada à entrada de um amplificador auto-sintonizado (*Lock-in*), juntamente com o sinal de entrada de áudio, conforme mostra o arranjo esquemático na Fig. 5.3.

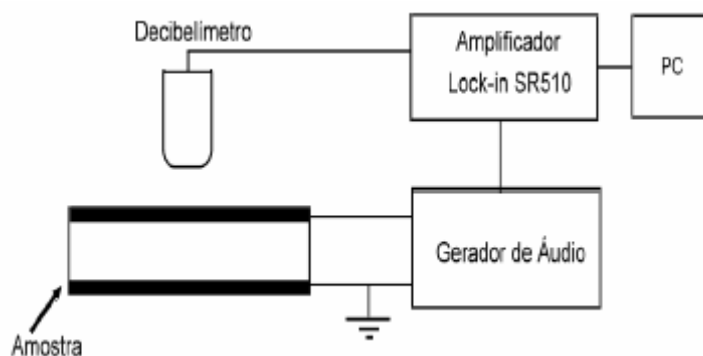


Figura 5.3: o método indireto e acústico inverso.
(ALTAFIM, R. A. P., 2006)

As medidas elétricas de entrada ou excitação da amostra e de saída registrada pelo medidor de pressão sonora foram coletadas e posteriormente processadas por um sistema automático de aquisição, mediante um programa computacional desenvolvido no laboratório do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. A metodologia deste ensaio encontra-se descrita em detalhes na

dissertação de mestrado de Ruy Alberto Pisani Altafim que a utiliza na caracterização destes transdutores poliméricos com uma camada compressível (ALTAFIM, R. A. P., 2006).

5.2.2. Análise do espectro de frequências

O dispositivo sob teste foi ensaiado empregando-se o arranjo descrito esquematicamente na Fig. 5.3 e os resultados fornecidos foram então registrados automaticamente pelo sistema de aquisição digital desenvolvido e citado acima. Estes resultados alimentaram um programa gerador de gráficos da *Microcal Origin*, que forneceu os resultados da resposta em frequência do atuador, conforme ilustração dada pela figura 5.4.

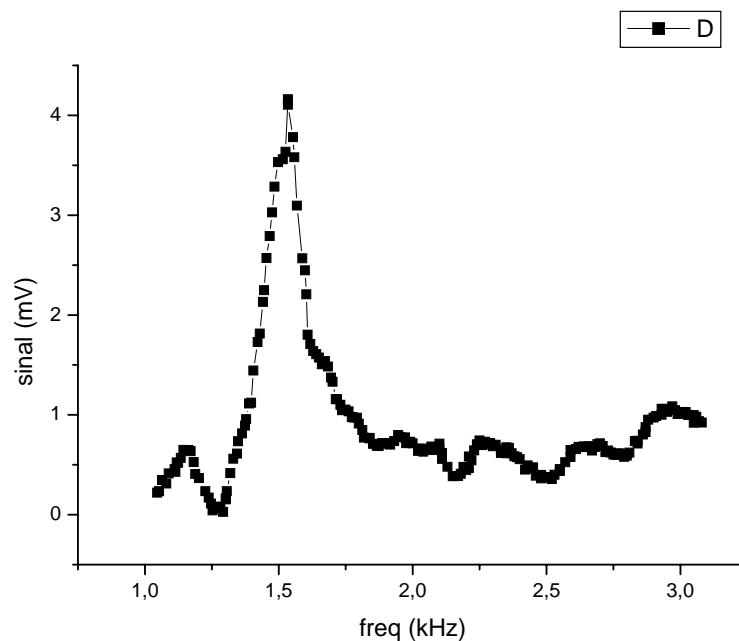


Figura 5.4: resposta em frequência e a ressonância em amplitude.

A análise deste gráfico mostrou um valor máximo para o sinal de resposta para uma frequência dita de ressonância em amplitude do sistema. Em torno desta frequência pode-se observar também uma faixa de frequências simétricas em relação a esta ressonância, definindo a largura desta faixa e conseqüentemente o fator de qualidade deste sistema oscilatório, determinante do coeficiente de amortecimento específico ou de dissipação no sistema.

5.3. A frequência natural de oscilação

A largura da faixa de frequências em torno da ressonância corresponde ao amortecimento do sistema. No entanto, para uma determinação quantitativa deste amortecimento, tornou-se necessário conhecer também a frequência natural de oscilação livre do dispositivo, isto é, sem amortecimento.

Mediante a suposição de que a bolha de ar tenha um formato cilíndrico, conforme mostrado na Fig. 5.1, com as bases sujeitas a uma deformação elástica, a frequência angular natural ω_0 do dispositivo sob teste foi obtida segundo os cálculos desenvolvidos e mostrados no capítulo 4. As informações de interesse ao cálculo desta frequência natural encontram-se descritas na Tab. 5.1.

Tabela 5.1: características específicas do Teflon[®] FEP 200 A.

| Y (Mpa) | t (μm) | f_A (m^2 / kg) |
|---------|---------------------|------------------------------------|
| 480 | 50 | 9 |

Considerou-se que o ar foi retido na bolha termoformada à pressão atmosférica

$$p_0 = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

As dimensões da bolha compressível foram medidas, sendo a altura e o diâmetro da base respectivamente:

$$\text{altura: } d_0 = 1,0 \text{ mm;}$$

$$\text{diâmetro: } 2a = 4,5 \text{ mm.}$$

Conhecidas estas dimensões, a pressão do ar na bolha e os dados do fabricante das películas poliméricas, a constante elástica, segundo a eq. (4.25), foi assim determinada:

$$k = \pi \frac{4 \times 480 \times 10^6 \times (50 \times 10^{-6})^3}{3 \times (2,25 \times 10^{-3})^2} + \pi \frac{1,013 \times 10^5 \times (2,25 \times 10^{-3})^2}{4 \times 1,0 \times 10^{-3}} \left(\frac{\text{N}}{\text{m}} \right)$$

Sabe-se que a primeira parcela deste coeficiente mostra a rigidez imposta pelo filme na sua deformação mecânica enquanto que a segunda parcela descreve uma segunda

componente da rigidez do dispositivo, esta imposta pela variação da pressão do ar na bolha. Assim, feitos os cálculos tem-se a constante de restituição elástica k onde:

$$k = 49,96 + 402,78 = 452,74 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Observou-se que para esta amostra, o ar contido na bolha contribuiu em maior parte na rigidez imposta a este transdutor polimérico, quando submetido a deformações.

Em seguida a frequência angular natural ω_0 do dispositivo foi determinada segundo a relação entre o coeficiente elástico e a massa dada pela eq. (4.26). Utilizando-se o fator de área f_A para o cálculo da massa oscilante, tem-se:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{452,74 \times 9}{2\pi (2,25 \times 10^{-3})^2}} = 11318 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Esta frequência angular corresponde a uma frequência natural de oscilação

$$f_0 = 1,80 \text{ kHz}$$

A massa do eletrodo vaporizado adjacente à película oscilante não foi considerada nos cálculos por ser desprezível em relação à massa de todo o conjunto sob oscilação.

5.4. O amortecimento específico

O amortecimento específico foi obtido pela leitura da faixa para meia amplitude, observada no ensaio de resposta em frequência do transdutor polimérico, operando como um atuador. O fator de qualidade é expresso por esta largura da faixa de frequências limitada aos valores correspondentes à metade da amplitude de ressonância da amostra. No caso pela Fig. 5.4, a faixa de frequências apresentou um valor

$$\Delta f = 184 \text{ Hz}$$

Com esta largura tomada como referência, o valor para o amortecimento específico γ , segundo a eq. (4.32), foi dado por

$$\gamma = \frac{2\pi \times 184}{\sqrt{2}} = 818 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

A curva de resposta do atuador mostrou um pico de ressonância numa frequência

$$f_M = 1540 \text{ Hz}$$

Com estes valores do amortecimento e da frequência de ressonância em amplitude mostrada na curva de resposta, o valor da frequência natural foi calculado resultando:

$$f'_0 = 1,54 \text{ kHz}$$

Este valor não é obviamente igual ao teórico calculado pela expressão puramente elástica dada na eq. (4.26) que considera apenas a elasticidade do dispositivo, sem a interação dele com o meio em que é submetido a vibração. Existe um erro relativo de 14 % para esta frequência em relação à frequência natural de 1,80 kHz calculada por meios teóricos. Este erro é considerado satisfatório para um modelo analítico, onde tais desvios são esperados e podem ser atribuídas a vários fatores. Entre eles destacam-se o ar retido na bolha considerado como um gás perfeito, o arraste do ar na câmara anecóica não considerado pela vibração do atuador, a massa e a rigidez não consideradas dos eletrodos vaporizados e também admitindo um vínculo rígido de engaste na união das películas poliméricas.

Com estes parâmetros mecânicos obtidos, em complementação com aqueles elétricos já discutidos, o modelo teórico proposto fica então estabelecido, permitindo uma avaliação prévia do comportamento eletromecânico deste transdutor de eletretos poliméricos com uma bolha de ar termoformada, operando como um sensor e como um atuador.

5.5. Desempenho do transdutor como atuador

O resultado destes ensaios realizados e o cálculo dos parâmetros elétricos e mecânicos, serviram para se verificar a sensibilidade do dispositivo sob teste, operando como um atuador. A sensibilidade deste atuador ensaiado foi verificada para o seu valor máximo, isto é, vibrando na sua frequência natural, no ensaio de resposta em frequência pelo modelo definido, empregando-se a expressão para a amplitude da deformação, fornecida na eq. (4.17).

Conforme as especificações do fabricante *Dupont*, as películas em Teflon[®] FEP 200 A (50 μm de espessura) possuem uma permissividade elétrica de $2 \varepsilon_0$. Admite-se ainda a bolha de ar entre os filmes com o formato cilíndrico e as dimensões já mencionadas anteriormente. Foi considerada uma permissividade elétrica no ar ε_0 , igual àquela atribuída para o vácuo. Logo

$$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9} \text{ F}}{36\pi \text{ m}}$$

Este modelo admite capacitâncias planas nos filmes e na bolha, sendo que as superfícies das armaduras são circulares de raio a . Foi encontrado para a capacitância da bolha de ar o valor

$$C_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \frac{\pi(2,25 \times 10^{-3})^2}{1,0 \times 10^{-3}} = 0,1406 \text{ pF}$$

Da mesma forma, considerando a constante dielétrica no Teflon[®] FEP, pode-se escrever para a capacitância de cada película polimérica que

$$C_1 = 2 \frac{10^{-9}}{36\pi} \frac{\pi(2,25 \times 10^{-3})^2}{50 \times 10^{-6}} = 5,625 \text{ pF}$$

Para as capacitâncias em série tem-se uma equivalente C_t onde:

$$\frac{1}{C_t} = \frac{2}{C_1} + \frac{1}{C_0} = \left(\frac{2}{5,625} + \frac{1}{0,1406} \right) 10^{12}$$

Ou

$$C_t = 0,1339 \text{ pF}$$

O parâmetro α indica como visto em muitas expressões, uma relação entre a carga induzida nos eletrodos do dispositivo e a carga retida pelo dielétrico na formação dos seus eletretos. Este mesmo parâmetro mostra também uma relação entre a capacitância da amostra e a capacitância na bolha de ar. Assim, segundo a definição mostrada na eq. (3.4), o parâmetro α foi assim determinado pela relação entre as capacitâncias, fornecendo:

$$\alpha = \frac{C_t}{C_0} = \frac{0,1339}{0,1406} = 0,9523$$

Desta forma, tem-se um valor complementar para α , ou seja,

$$1 - \alpha = 0,0477$$

No processo de formação dos eletretos, foi admitida uma eficiência de 100 % no carregamento impulsivo. Se as cargas retidas são formadas pela descarga de um impulso de

tensão com 3 kV de pico, a carga Q_0 retida pelas películas como eletreto é dada pelo produto $C_t V_t$, determinada por

$$Q_0 = C_t V_t = 0,1339 \times 10^{-12} \times 3,0 \times 10^3 = 401,7 \text{ pC}$$

Finalmente o valor do fator $m d_0 \varepsilon_0 A$, empregado na eq. (4.17) da deformação, foi calculado utilizando-se o valor da massa oscilante como a área de contato dividida pelo fator de área f_A , a exemplo dos cálculos anteriores. Desta forma, foi encontrado

$$m d_0 \varepsilon_0 A = 2 \frac{\pi (2,25 \times 10^{-3})^2}{9} 1,0 \times 10^{-3} \frac{10^{-9}}{36\pi} \pi (2,25 \times 10^{-3})^2 = 4,9701 \times 10^{-25} \text{ kg Fm}^2$$

Com estes valores, a amplitude da deformação foi assim calculada para o atuador vibrando na sua frequência natural de oscilação, onde para $\omega = \omega_0 = 11\,318 \text{ rad/s}$, tem-se:

$$S_0(\omega = \omega_0) = \frac{2 \times 0,0477 (401,7 \times 10^{-12})^2 \times 10 / (3,0 \times 10^3)}{4,9701 \times 10^{-25} \sqrt{\left[\frac{2(401,7 \times 10^{-12})^2}{4,9701 \times 10^{-25}} 0,9523(0,0477)^2 \right]^2 + (818 \times 11318)^2}} \Rightarrow$$

$$S_0(\omega = \omega_0) = 11,1517 \times 10^{-6}$$

Pela definição dada pela deformação nas eqs. (3.6) e (4.1), foi então determinado um valor para a deflexão nesta frequência natural onde

$$\delta d_0 = S_0 d_0 = 11,1517 \times 10^{-6} \times 1,0 \times 10^{-3} = 11,15 \text{ nm}$$

Pelo resultado acima, observa-se que esta seria a máxima deflexão que este atuador sob testes poderia mostrar. Uma medida para este deslocamento com ordem de grandeza nanométrica, só poderia ser realizada com o emprego de técnicas e instrumentações de varredura a laser sob condições especiais imune de interferências, o que não é oferecido nas condições do ensaio de resposta em frequência.

5.6 Desempenho do transdutor como sensor

Em princípio o transdutor sob ensaios poderia ter sido colocado na câmara silenciosa e posto a vibrar por meio de uma fonte mecânica oscilatória, medindo-se o sinal elétrico de saída de modo direto. A solução encontrada para medir o sinal de saída foi de acoplar

mecanicamente o dispositivo a um alto-falante por meio de uma haste rígida entre eles. No entanto, a massa desta haste passando a fazer parte do conjunto vibratório, interfere na frequência natural de oscilação do dispositivo e conseqüentemente não forneceria valores coerentes no ensaio de resposta em frequência.

Abandonada esta idéia, o transdutor sob testes foi submetido a vibrações causadas indiretamente através de um alto-falante excitado por um gerador de áudio, conforme mostra o arranjo esquemático na Fig. 5.5. Este transdutor sob testes foi então submetido a ensaios de resposta em frequência como um sensor, tendo o sinal elétrico de saída conectado a um amplificador auto-sintonizado (*Lock-In*), monitorado por um medidor de pressão sonora conectado por sua vez a um osciloscópio.

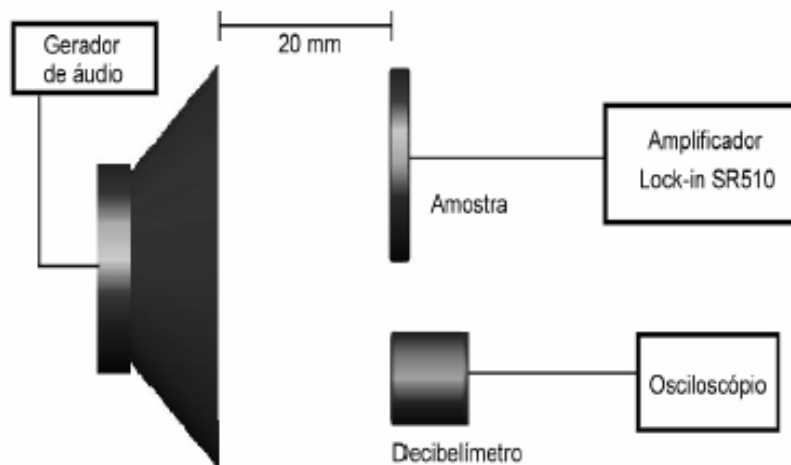


Figura 5.5: o método indireto acústico para o sensor
(ALTAFIM, R. A. P., 2006)

Os resultados deste ensaio, verificando o comportamento do transdutor como um sensor, não se mostraram confiáveis e esta idéia foi também posta de lado, devido à geração de ruídos pelo alto-falante no interior da câmara silenciosa e à dificuldade de se determinar a força de excitação para se obter a amplitude da tensão elétrica de saída, ainda que de uma forma aproximada (ALTAFIM, R. A. P., 2006).

5.7. Outras considerações

O modelo linear e teórico da elasticidade limitado para pequenas deflexões (flechas) ou deformações não condiz com deformações maiores experimentadas na prática, características de membranas ou diafragmas, fora do regime de linearidade. Detalhes

construtivos do processo para a obtenção da bolha termoformada fazem com que a sua deformação se aproxime ao máximo àquela de uma placa com bordas engastadas, ou a uma membrana elástica, submetida a tensões tangenciais de tração, com um comportamento não linear. Um método primário para se medir o coeficiente elástico de restituição seria através da declividade na reta que mostra o comportamento da força aplicada sobre a película em função da deformação ou deflexão apresentada, desde que ela seja muito pequena para ser considerada dentro do regime linear, exigindo para tal uma instrumentação mais sensível, não disponível, além de condições isoladas para a realização do ensaio.

Como resultados deste trabalho, foram publicados e posteriormente apresentados dois artigos em congressos internacionais do IEEE (*Institute of Electric and Electronics Engineers*) (ALTAFIM et al., 2005) e (BASSO et al., 2006). Outro artigo mais detalhado a este respeito foi também publicado na revista *IEEE – Transactions on Dielectric and Electrical Insulation* (ALTAFIM, R. A. C. et al., 2006), justificando o conteúdo abordado neste trabalho.

6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

CONCLUSÕES

O desenvolvimento de um produto advém da concepção de uma idéia que por sua vez implica na definição de um modelo ou na construção de um protótipo, podendo ocorrer as duas hipóteses ou apenas uma delas. É claro que a definição de um modelo comprovada pelo comportamento de um protótipo oferece maior segurança como resposta da idéia concebida e conseqüentemente a respeito do produto que se tenha em mente.

Esta tese de doutorado mostra que é possível uma previsão do comportamento elétrico e mecânico destes transdutores com eletretos em filmes poliméricos envolvendo bolhas de ar e empregar os modelos desenvolvidos para o sensor e o atuador, no projeto destes dispositivos eletromecânicos, levando-se em conta os seus limites de operação condizentes com a aplicação desejada.

Um protótipo deste transdutor eletromecânico foi produzido em laboratório com duas lâminas de eletretos poliméricos de Teflon[®] FEP e uma camada compressível de ar entre elas. O modelo analítico deste trabalho permite uma avaliação prévia do comportamento dinâmico deste dispositivo operando como um atuador, considerando a deformação elástica existente em apenas uma bolha com ar sob pressão.

Este transdutor comporta-se como um arranjo capacitivo em série terminado por dois eletrodos metálicos, em função da deformação na bolha de ar compreendida entre as películas. Respondendo com um sinal elétrico quando operando como um sensor, ou fornecendo uma resposta mecânica como conseqüência da entrada de um sinal elétrico comportando-se como um atuador. Este dispositivo implica na definição de um modelo elétrico baseado em parâmetros de circuitos envolvendo um modelo mecânico em que a deformação na bolha de ar assume um papel de destaque no seu desempenho.

A deformação elástica na camada compressível apresenta-se como uma contribuição inédita na realização deste trabalho, sendo tomada como base para demonstrar o modelo que estabelece o funcionamento deste transdutor eletromecânico com eletretos de uma forma bilateral, isto é, operando como sensor e como atuador, admitindo a inversão, mas não a

reciprocidade, característica nos transdutores feitos com materiais realmente piezelétricos. Observa-se então que este dispositivo operando como sensor e como atuador não apresenta a mesma sensibilidade.

Uma resposta linear com a entrada é possível desde que como sensor o dispositivo opere em altas frequências, ou com pequenas deformações sem restrições na frequência de operação. Operando como um atuador, tal linearidade só pode ser conseguida pela resposta de pequenas deformações.

Qualquer impedância de saída pode ser colocada entre os terminais do dispositivo, feitas as considerações necessárias para a frequência e para a defasagem entre a tensão e a corrente, embora o funcionamento deste transdutor eletromecânico tenha sido mostrado com os eletrodos terminados por uma carga resistiva, para simplificação dos resultados.

O modelo assim proposto emprega a carga elétrica aprisionada no dielétrico, representada como uma fonte equivalente de tensão, com base nos mesmos princípios do microfone de eletreto.

A força de compensação dos vínculos estruturais impede o colapso entre as duas películas carregadas com cargas iguais e polaridades opostas e se faz sempre presente. No entanto, sua importância só se faz relevante no modelo proposto ao atuador, tratando a força elétrica como um agente da deformação resultante. No entanto, observa-se que esta compensação limita o carregamento elétrico das películas e o dimensionamento da bolha de ar termoformada, evitando que os filmes poliméricos se atraiam mutuamente.

A garantia de que a lei de Hooke possa ser aplicada, se faz admitindo apenas pequenas deformações elásticas, portanto lineares ou próximas desta condição.

O coeficiente de amortecimento específico do dispositivo com uma bolha cilíndrica com 4 mm de diâmetro, pelo método acústico, indireto e inverso, foi obtido indiretamente pelo ensaio de resposta em frequência como um atuador, tendo em vista que a ressonância ocorreu numa frequência abaixo da limitação imposta pelo medidor de pressão sonora, cuja frequência de corte é de 8 kHz.

Este trabalho atingiu seus objetivos contribuindo com os passos iniciais dados na direção de uma metodologia sistemática, na definição e na produção de transdutores eletromecânicos com eletretos poliméricos, segundo as condições de operação e a aplicação

desejada. Trata-se do primeiro modelo analítico apresentado para estes transdutores poliméricos com eletretos, abordando uma única bolha de ar termoformada como camada compressível para o funcionamento destes dispositivos eletromecânicos. Um erro relativo de apenas 14 % verificado nos ensaios demonstra a confiabilidade neste modelo, considerando as hipóteses simplificadoras para o estabelecimento de um modelo analítico. Este trabalho produziu como resultado científico publicações de dois artigos em congressos e um em revista técnica de renomes internacionais. Desta forma, é recomendado que o assunto seja mais explorado em estudos e desenvolvimentos futuros.

PROPOSTAS FUTURAS

O modelo desenvolvido considerou apenas a deformação em uma bolha de ar, servindo de referência a proposições de modelos futuros contemplando transdutores eletromecânicos com múltiplas cavidades de ar, atendendo a uma gama maior de frequências com sensibilidade adequada às aplicações solicitadas, em função da geometria das bolhas. Assim, a conclusão deste trabalho deixa um incentivo ao desenvolvimento de procedimentos futuros que simulem o comportamento eletromecânico dos transdutores, recorrendo-se ao auxílio de métodos numéricos, tais como, elementos e diferenças finitas, entre outros.

Este processo desenvolvido por métodos analíticos foi verificado por medidas obtidas em laboratório, dentro de restrições impostas aos instrumentos utilizados e disponíveis. Acredita-se que o emprego de uma instrumentação mais sensível em condições favoráveis aos ensaios venha a permitir que o modelo analítico proposto seja validado como um todo, isto é, como sensor e como atuador.

O erro relativo encontrado em torno de 14 % pode também ser reduzido mediante considerações inerentes ao processo de produção e realização dos ensaios. Dentro deste contexto, uma medida experimental do coeficiente de restituição elástica exige o emprego de uma instrumentação de grande sensibilidade em um ambiente totalmente isolado para que a coleta dos dados ocorra dentro da faixa linear de elasticidade, isto é, com deformações muito pequenas.

A frequência de ressonância foi verificada na amostra ensaiada por estar em um valor inferior àquela de corte do medidor de pressão sonora, isto é, abaixo de 8 kHz. Uma instrumentação mais sensível irá favorecer medidas além desta faixa, permitindo a

determinação da resposta em frequência para validar modelos de transdutores com bolhas múltiplas e microscópicas.

Propõe-se para trabalhos futuros a realização de ensaios de resposta em frequência no transdutor como sensor para complementar os testes de validade do modelo analítico desenvolvido para o transdutor, de forma bilateral, sendo possível a verificação da dualidade entre os dois modos de operação.

Estes transdutores, desenvolvidos e modelados com eletretos poliméricos envolvendo uma bolha termoformada, podem substituir os acelerômetros capacitivos e piezelétricos dentro de restrições operativas para condições lineares, com vantagens em relação aos acelerômetros convencionais. Possuem menor massa inercial, maior maleabilidade, tamanho reduzido e provocam menos interferência nas medidas, permitindo aplicações em geometrias e ambientes dos mais diversos e a um baixo custo.

A produção destes dispositivos eletromecânicos deve ser incentivada e desenvolvida em escala de modo a levar o país a uma independência tecnológica.

REFERÊNCIAS

- (ALONSO e FINN) Alonso, M.; Finn, E. (1971) São Paulo, Ed. Edgard Blücher, Física, um Curso Universitário, v.1 Mecânica, 487 p.
- (ALTAFIM, GIACOMETTI e JANISZEWSKI) Altafim, R. A. C.; Giacometti, J. A.; Janiszewski, J. M. (1992) A novel method for electret production using impulse voltages, In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, v. 27, n. 4, Aug., p. 739 – 743.
- (ALTAFIM et al.) Altafim, R. A. C.; Nunes, V. A. A.; Giacometti, J. A.; Oliveira Jr., O. N. (1992) Electrical discharges in small air gap, In: 1992 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Oct., p. 316 – 321.
- (ALTAFIM e FERREIRA) Altafim, R. A. C.; Ferreira, G. F. L. (1996) Teflon FEP charged by microsecond voltage pulses: numerical results and model, In: International Symposium on Electrets, 9., Sep., p. 189 – 194.
- (ALTAFIM, FERREIRA e GIACOMETTI) Altafim, R. A. C.; Ferreira, G. F.L.; Giacometti, J. A. (1998) Self-controlled pre-breakdown discharges in planar symmetry, In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 5, n. 1, Feb., p. 77 – 81.
- (ALTAFIM et al.) Altafim, R. A. C.; Dias, C.; Gonçalves Neto, L.; Basso, H. C.; Murakami, C.; Veronese, P. R.; Rodrigues, E. M. F. (2003) Piezoelectricity of multi-layers space-charging electrets from Teflon FEP film with homogeneous voids distributed on its surface, In: IEEE 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p. 225 – 228.
- (ALTAFIM et al.) Altafim, R. A. C.; Basso, H. C.; Gonçalves Neto, L.; Lima, L.; Altafim, R. A. P.; de Aquino, C. V. (2005) Piezoelectricity in multi-air voids electrets, In: 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p. 669 – 672.

- (ALTAFIM, R. A. C. et al.) Altafim, R.A. C.; Basso, H. C.; Altafim, R. A. P.; Lima, L.; de Aquino, C. V.; Gonçalves Neto, L.; Gerhard-Multhaupt, R. (2006) Piezoelectrets from thermo-formed bubble structures of fluoropolymer-electret films, In: IEEE – Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 13, n. 5, Oct., p. 979 – 985.
- (ALTAFIM, R. A. P.) Altafim, R. A. P. (2006) Análise e implementação de métodos para a caracterização de eletretos termo-formados – Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 68 p.
- (ANDERSON e ALEXANDER) Anderson, J. R.; Alexander, A. E. (1952) Theory of the vibrating condenser converter and application to contact potential measurement, In: Australian of Journal Applied Science, v. 3, p. 201 – 209.
- (BALLATO) Ballato, A. (1996) Piezoelectricity: history and new thrusts, In: IEEE Ultrasonics Symposium, p. 575 – 583.
- (BASSO) Basso, H. C. (2006) Notas em piezeletricidade sobre o transdutor eletromecânico de eletreto – Publicação Interna – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 38 p.
- (BASSO et al.) Basso, H. C.; de Aquino, C. V.; Altafim, R. A. P.; Altafim, R. A. C.; Gerhard-Multhaupt, R (2006) Piezoelectricity of a single bubble formed by two oppositely charged Teflon® -FEP films, In: IEEE – 2006 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p. 146 – 149.
- (DREYFUS e LEWINER) Dreyfus, G.; Lewiner, J. (1973) Piezoelectricity induced by charge injection in thin polymer films, In: Electrets, Charge Storage and Transport in Dielectrics, Perlman M. The Electromechanical Society, p. 517 – 528.
- (DUPONT) (2006) Properties Bulletin. Disponível em <http://www2.dupont.com/Teflon_Industrial/em_us>. Acesso em 13.10.2006.
- (EGUCHI) Eguchi, M. (1925) On the permanent electret, In: Philosophical Magazine, v. 49. Disponível em <<http://website.lineone.net/~aarekhu/eguchi.htm>>. Acesso em 03 jul. 2002

-
- (ELETRETOS) (2006) Eletreto, o ímã da eletrostática. Disponível em
<<http://www.feiradeciencias.com.br/sala19/texto46.asp>>. Acesso em 12.06.2006.
- (FAMILLE BECQUEREL) (2006) Disponível em
<<http://isimabomba.free.fr/biographies/chimistes/becquerel.htm>>. Acesso em
12.06.2006.
- (FUKADA) Fukada, E. (2000) History and recent progress in piezoelectric polymers, In:
IEEE, Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, v. 47, n. 6,
Nov., p. 1277 – 1290.
- (FURUKAWA, DATE e FUKADA) Furukawa, T.; Date, M.; Fukada, E. (1980) Hysteresis
phenomena in polyvinylidene fluoride under high-electric field, In: Journal of Applied
Physics, v. 51, n. 2, Feb., p. 1135 – 1141.
- (GERHARD-MULTHAUPT et al.) Gerhard-Multhaupt, R.; Xia, Z.; Künstler, W.; Pucher, A.
(1999) Preliminary study of multi-layer space-charge electrets with piezoelectric
properties from porous and non-porous Teflon films, In: IEEE International Symposium
on Electrets, 10. p. 273 – 276.
- (GERHARD-MULTHAUPT) Gerhard-Multhaupt, R. (2002) Less can be more – holes in
polymers lead to a new paradigm of piezoelectric materials for electret transducers, In:
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 9, n. 5, Oct., p. 850 – 859.
- (GERHARD-MULTHAUPT et al.) Gerhard-Multhaupt, R., Wegener, M., Wirges, W.,
Giacometti, J. A., Altafim, R. A. C., Santos, L. F., Faria, R. M. e Paajanen, M. (2002)
Electrode poling of cellular polypropylene films with short high-voltage pulses, In:
Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p 299 –
302.
- (GIACOMETTI, FERREIRA e GROSS) Giacometti, J. A.; Ferreira, G. F. L.; Gross, B.
(1988) A summary of corona charging methods, In: IEEE International Symposium on
Electrets, 6., Sep, p. 87 – 91.

- (GIACOMETTI e OLIVEIRA Jr.) Giacometti, J. A.; Oliveira Jr., O. N. (1992) Corona charging of polymers, In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, v. 27, n. 5, Oct., p. 924 – 943.
- (GREENWOOD) Greenwood, A. (1970) New York, John Wiley & Sons, Electrical Transients in Power Systems, 543 p.
- (GROSS) Gross, B. (1944) Experiments on electrets, In: Physical Review, v. 66, ns. 1 e 2, Jul., p. 26 – 28.
- (GROSS e DENARD) Gross, B; Denard, L. F. (1945) On permanent charges in solid dielectrics. Dielectric absorption and temperature effects in carnauba wax, In: Physical Review, v. 67, ns. 7 e 8, Apr., p. 253 – 259.
- (GROSS et al.) Gross, B.; Gerhard-Multhaupt, R.; Berraisoui A.; Sessler, G. M. (1987) Electron-bean poling of piezoelectric polymer electrets, In: Journal of Applied Physics, v. 62, n. 4, Aug., p. 1429 – 1432.
- (HILLENBRAND e SESSLER) Hillenbrand, J.; Sessler, G.M. (2000) Piezoelectricity in cellular electret films, In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 7, n. 4, p. 537 – 542.
- (KACPRZYK e MOTYL) Kacprzyk, R.; Motyl, E. (1994) Properties of PP-PS double layer electrets, In: IEEE International Symposium on Electrets, 8., p. 703 – 708.
- (KACPRZYK et al.) Kacprzyk, R.; Motyl, E.; Gajewski, J. B.; Pasternak, A. (1995) Piezoelectric properties of non-uniform electrets, In: Journal of Electrostatics, v. 35, p. 161 – 166.
- (KACPRZYK, DOBRUCKI e GAJEWSKI) Kacprzyk, R.; Dobrucki, A.; Gajewski, J. B. (1997) Double-layer electret transducer, In: Journal of Electrostatics, v. 39, p. 33 – 40.
- (KUFFEL e ZAENGL) Kuffel, E.; Zaengl, W. S.; (1984) High Voltage Engineering Fundamentals, Oxford, Pergamon International Library, 498 p, ISBN 0-08-024212-X.

-
- (LEKKALA e PAAJANEN) Lekkala, J.; Paajanen, M. (1999) EMFi – new electret material for sensors and actuators, In: IEEE International Symposium on Electrets, 10. p. 743 – 746.
- (LIMA) Lima, L. (2006) Termo eletretos de Teflon FEP como transdutores piezelétricos – Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 72 p.
- (MEDYCKI e HILCZER) Medycki, W.; Hilczer, B. (1987) An efficient method of production of high charge density electrets, In: Journal of Electrostatics, v. 19, p. 205 – 207.
- (MIGLIORI e THOMPSON) Migliori, A.; Thompson, D. (1980) A nondestructive acoustic electric field probe, In: Journal of Applied Physics, v. 51, n. 1, Jan., p. 479 – 484.
- (MORENO e GROSS) Moreno, R.A.; Gross, B. (1976) Measurement of potential buildup and decay, surface charge density, and charging currents of corona-charged polymer foil electrets, In: Journal of Applied Physics, v. 47, n. 8, Aug., p. 3397 – 3402.
- (PAAJANEN, VÄLIMÄKI e LEKKALA) Paajanen, M.; Välimäki, H.; Lekkala, J. (1999) Modeling the sensor and actuator operations of the electro mechanical film EMFi, In: IEEE International Symposium on Electrets, 10., p. 735 – 738.
- (PAAJANEN, LEKKALA e KIRJAVAINEN) Paajanen, M.; Lekkala, J.; Kirjavainen, K. (2000) Electromechanical film (EMFi) – A new multipurpose electret material, In: Sensors and Actuators, v. 84, p. 95 – 102.
- (RODRIGUES) Rodrigues, E. M. F. (2003) Novos sensores piezelétricos com eletretos de Teflon FEP – Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 54 p.
- (SAWA, LEE e IEDA) Sawa, G.; Lee, D. C.; Ieda, M. (1975) Discharge current from corona charged polyethylene, In: Japanese Journal of Applied Physics, v. 14, n. 5, May, p. 643 – 649.

- (SESSLER) Sessler, G.M. (1972) Electric fields and forces due to charged dielectrics, In: Journal of Applied Physics, v. 43, n. 2, Feb., p. 405 – 408.
- (SESSLER e WEST) Sessler, G. M.; West, J. E. (1972) Production of high quasi-permanent charge densities on polymer foils by application of breakdown fields, In: Journal of Applied Physics, v. 43, n. 3, Mar., p. 922 – 926.
- (SESSLER, WEST e GERHARD) Sessler, G. M.; West, J. E.; Gerhard, G. (1982) High-resolution laser-pulse method for measuring charge distributions in dielectrics, In: Physical Review Letters, v. 48, n. 8, Feb., p. 563 – 566.
- (SESSLER) Sessler G. M. (1987) Topics in Applied Physics – ELECTRETS, 2nd. ed. Berlin, Springer-Verlag, 453 p.
- (SESSLER) Sessler, G. M. (1989) Charge storage in dielectrics, In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, v. 24, n. 3, Jun., p. 395 – 402.
- (SESSLER e HILLENBRAND) Sessler, G. M.; Hillenbrand, J. (1999) Electromechanical response of cellular electret films, In: IEEE International Symposium on Electret, 10., p. 261-264.
- (TIMOSHENKO) Timoshenko, S. P. (1959) New York, McGraw-Hill, Theory of Plates and Shells, 621 p.
- (WEINHOLD et al.) Weinhold, T.; Seiß, M.; Künstler, W.; Görne, T.; Gerhard-Mulhaupt, R. (2000) Porous polytetrafluorethylene (PTFE) single-film space-charge electrets with high piezoelectric coefficients, In: IEEE, Dielectric Materials, Measurements and Applications – Conference Publication, n. 473, p. 380 – 385.
- (YOUNG e BUDYNAS) Young, W.C.; Budynas, R. G. (2002) 7th ed. McGraw-Hill, Roark's Formulas for Stress and Strain, 852 p, ISBN 0-07-072542-X.
- (ZHANG, HILLENBRAND e SESSLER) Zhang, X., Hillenbrand, J.; Sessler, G. M. (2006) Thermally stable fluorocarbon ferroelectrets with high piezoelectric coefficient, In: Applied Physics A – Materials Science & Processing, v. 84, p. 139 – 142.

APÊNDICE A – PLACA CIRCULAR E O PISTÃO EQUIVALENTE

O modelo proposto para o transdutor eletromecânico de eletretos em questão, leva em consideração a presença de bolhas de ar envolvidas por duas películas poliméricas, em conseqüência do processo de formação térmica. Cada uma destas bolhas com ar sob pressão possui o formato de cilindros microscópicos, todos com altura d_0 e bases com raio a . A porção do filme que se deforma, segundo o ilustrado à esquerda na Fig. A.1, envolvendo cada bolha, é analisada em função das características físicas das películas, da geometria das bolhas termoformadas e obviamente da força aplicada.

t e coeficiente de Poisson ν , cujo modelo mecânico estrutural é o de uma placa circular engastada em todo o seu contorno. No estudo de deformações em placas, o módulo de Young passa então a ser substituído por $Y / (1 - \nu^2)$ e o momento de inércia por $t^3 / 12$. (TIMOSHENKO, 1959).

Com base em cálculos estruturais, um coeficiente de rigidez à flexão da placa ou ainda um módulo composto de elasticidade D para a placa, é definido e empregado nos cálculos das deformações em placas e diafragmas ou membranas onde:

$$D = \frac{Yt^3}{12(1-\nu^2)} \quad (\text{A.1})$$

Uma carga mecânica concentrada F , aplicada vertical e pontualmente no centro de uma placa circular e horizontal de raio a , leva a uma deflexão também vertical z em toda a sua

extensão superficial e no mesmo sentido da carga, expressa em função da distância radial r do seu centro. Para r não nulo tem-se:

$$z(r) = -\frac{F}{16\pi D} \left[a^2 - r^2 \left(1 + 2 \ln \frac{a}{r} \right) \right] \quad (\text{A.2})$$

A deflexão é negativa em função da orientação positiva do eixo z , vertical para cima. Pela eq. (A.1) o módulo de elasticidade D da placa encontra-se inversamente dependente do quadrado da deformação vinculada ao esforço principal, isto é, do coeficiente ν de Poisson. No caso particular de uma película de Teflon[®] FEP com espessura micrométrica, esta deformação na tangencial, devido a uma solicitação normal, permite que o coeficiente de Poisson seja aqui desprezado. Assim, tornando nulo o coeficiente de Poisson, a deflexão em função da distância radial para cada placa circular polimérica passa a ser:

$$z(r) = -\frac{3F}{4\pi Yt^3} \left[a^2 - r^2 \left(1 + 2 \ln \frac{a}{r} \right) \right] \quad (\text{A.3})$$

Pelo exemplo ilustrado, observa-se uma diminuição ΔV no volume de cada bolha. Tal variação volumétrica é obtida pela integração de discos circulares elementares, conforme é mostrado na Fig. A.2, cada um com raio r e espessura dz , centrados e empilhados.

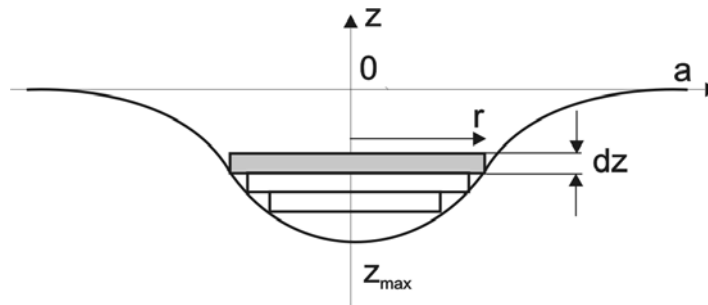


Figura A.2: volume obtido pela integração de discos elementares empilhados.

Por este procedimento, o volume de cada disco passa a ser dado em função do raio de modo que:

$$dV = \pi r^2 dz \quad (\text{A.4})$$

Cada disco elementar encontra-se centrado e posicionado ao longo do eixo z , em função da distância radial r . A variação de volume na bolha em decorrência da deformação sofrida pela placa é obtida pela integração dos volumes infinitesimais dV . Tomando-se o valor

de z na eq. (A.3) e derivando em relação ao raio r , obtém-se a espessura dz que aplicada na eq. (B.4) fornece:

$$dV = \frac{3F}{Yt^3} r^3 \ln\left(\frac{a}{r}\right) dr \quad (\text{A.5})$$

Integrando a expressão acima, de $r = 0$ até $r = a$, obtém-se a variação ΔV , resultante da compressão do ar. Logo:

$$\Delta V = \frac{3F}{Yt^3} \int_{0+}^a r^3 \ln\left(\frac{a}{r}\right) dr \quad (\text{A.6})$$

Tomando a integral acima e fazendo

$$\begin{aligned} u = \ln \frac{a}{r} &\Rightarrow du = -\frac{dr}{r} \\ dv = r^3 dr &\Rightarrow v = \frac{r^4}{4} \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Após simplificação, a variação no volume de cada bolha devido à compressão do ar é dada por:

$$\Delta V = \frac{3Fa^4}{16Yt^3} \quad (\text{A.8})$$

Esta mesma variação de volume pode ser agora analisada na Fig. A.1, do lado direito, por um pistão que se desloca verticalmente de uma distância \bar{z} , onde:

$$\Delta V = \pi a^2 \bar{z} \quad (\text{A.9})$$

Pela igualdade entre os volumes comprimidos, dados pela expressão acima e aquele admitido pela deformação da placa engastada na eq. (A.8), obtém-se um deslocamento \bar{z} equivalente para um pistão que comprime o mesmo volume ΔV . Logo,

$$\bar{z} = \frac{3Fa^2}{16\pi Yt^3} \quad (\text{A.10})$$

Exatamente no centro de uma placa circular engastada, onde a força é aplicada, a distância radial é nula e a deflexão é máxima. Assim, para $r = 0$ tem-se pela eq. (A.3), a menos do sinal, que:

$$z_{\max} = \frac{3Fa^2}{4\pi Yt^3} \quad (\text{A.11})$$

Estabelecendo uma relação entre esta deflexão máxima sofrida pela placa circular e o deslocamento uniforme e equivalente para o pistão, dado pela eq. (A.10), pode-se escrever que:

$$z_{\max} = 4\bar{z} \quad (\text{A.12})$$

Em outras palavras o deslocamento do pistão corresponde à quarta parte da deflexão máxima real sofrida pela película envolvendo cada bolha, quando uma força concentrada no centro dela é aplicada.

**ANEXO 1 – ESPECIFICAÇÃO DOS FILMES DE TEFLON® FEP
*DUPONT***



High Performance Films

DuPont FEP

fluorocarbon film

Description

DuPont FEP film is a transparent, thermoplastic film that can be heat sealed, thermoformed, vacuum formed, heat bonded, welded, metalized, laminated—combined with dozens of other materials, and can also be used as an excellent hot-melt adhesive.

This wide variety of fabrication possibilities combines with the following important properties to offer a unique balance of capabilities not available in any other plastic film.

Chemical Compatibility

- Teflon® is the most inert of all plastics.
- Complies with USFDA legislations for safe use with food
- DuPont FEP film is chemically inert and solvent-resistant to virtually all chemicals, except molten alkali metals, gaseous fluorine, and certain complex halogenated compounds such as chlorine trifluoride at elevated temperatures and pressures.
- Low permeability to liquids, gases, moisture, and organic vapors

Electrical Reliability

- Superior reliability and retention of properties over large areas of film
- High dielectric strength, over 6500 V/mil for 1 mil film (260 kV/mm for 0.025 mm film)
- No electrical tracking, non-wettable, and non-charring
- Very low power factor and dielectric constant, only slight change over wide ranges of temperature and frequency

Wide Thermal Range

- Continuous service temperature -240 to 205°C (-400 to 400°F)
- Melting range 250 to 280°C (500 to 540°F)
- Heat sealable

Mechanical Toughness

- Superior antistick and low frictional properties
- High resistance to impact and tearing
- Useful physical properties at cryogenic temperatures

Long Time Weatherability*

- Inert to outdoor exposure; no measurable change after 20 years in Florida
- High transmittance of ultraviolet and all but far infrared

Reliability

- DuPont FEP film contains no plasticizers or other foreign materials
- Conventional equipment and techniques can be used for processing; basic composition and properties will not be influenced
- Rigid quality control by DuPont ensures uniform gauge, void-free film

The convenience of Teflon® in easy-to-use film facilitates the design and fabrication of this low-friction thermoplastic for all sorts of high-performance jobs. It is transparent and can be *heat sealed, thermoformed, welded, and heat bonded.*

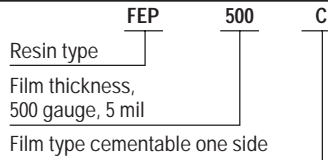
Superior antistick properties make it an ideal release film for many applications. A *cementable* type with an invisible surface treatment is available for bonding to none or both sides with adhesives.

This versatility is augmented by the superior properties of a true melt-processible fluorocarbon and by the wide choice of product dimensions available from DuPont.

Table 1
Types and Gauges of DuPont FEP Fluorocarbon Film

| Gauge | 50 | 100 | 200 | 300 | 500 | 750 | 1000 | 1500 | 2000 | 3000 | 6000 | 9000 | 12500 | 19000 |
|--|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Thickness, mil | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 5 | 7.5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 60 | 90 | 125 | 190 |
| Thickness, μm | 12.5 | 25 | 50 | 75 | 125 | 190 | 250 | 375 | 500 | 750 | 1500 | 2300 | 3125 | 4750 |
| Approximate area factor, ft^2/lb | 180 | 90 | 45 | 30 | 18 | 12 | 9 | 6.0 | 4.5 | 3 | 1.5 | 1 | 0.72 | 0.47 |
| Approximate area factor, m^2/kg | 36 | 18 | 9 | 6 | 4 | 2.5 | 2 | 1.2 | 1 | 0.6 | 0.3 | 0.2 | 0.14 | 0.09 |
| Availability | | | | | | | | | | | | | | |
| Type A —FEP, general-purpose | X | X | X | X | X | X | X | — | X | — | — | — | — | — |
| Type C —FEP, one side cementable | X | X | X | X | X | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Type C-20 —FEP, both sides cementable | X | X | X | — | X | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Type L —FEP, high stress crack resistance in extreme environments | — | — | — | — | X | — | X | X | X | X | X | X | X | X |

Note: Each roll of DuPont film is clearly identified as to resin type, film thickness, and film type.



Property Values of DuPont FEP Fluorocarbon Film

| Property | Test Method | Typical Value ^a | |
|--|--------------------------------|---|-----------------------------------|
| | | SI Units | English Units |
| Mechanical | | | |
| Tensile Strength at Break | ASTM D-882 | 21 N/mm ² | 3000 psi |
| Elongation at Break | ASTM D-882 | 300% | |
| Yield Point | ASTM D-882 | 12 MPa | 1700 psi |
| Elastic Modulus | ASTM D-882 | 480 MPa | 70 000 psi |
| Impact Strength | DuPont pneumatic impact tester | 7.7 × 10 ³ J/m | 144 ft-lb/in |
| Folding Endurance (MIT) | ASTM D-2176 | 10,000 cycles | |
| Tear Strength–Initial (Graves) | ASTM D-1004 | 2.65 N | 270 g force |
| Tear Strength–Propagating (Elmendorf) | ASTM D-1922 | 1.23 N | 125 g |
| Bursting Strength (Mullen) | ASTM D-774 | 76 kPa | 11 psi |
| Thermal | | | |
| Melt Point | ASTM D-3418 (DTA) | 260–280°C | 500–536°F |
| Zero Strength Temperature | ^b | 255°C | 490°F |
| Coefficient of Thermal Conductivity | Cenco-Fitch | 0.195 W/m·K | 1.35 Btu-in/h-ft ² ·°F |
| Specific Heat | — | 1172 J/kg·K | 0.28 Btu/lb·°F |
| Heat Deflection Temperature at 0.46 N/mm ² (66 psi) at 1.82 N/mm ² (264 psi) | ASTM D-648 Tensile Bars | 70°C 51°C | 158°F 124°F |
| Dimensional Stability | 30 min at 150°C (302°F) | MD = 0.72% expansion TD = 2.2% shrinkage | |
| Flammability Classification ^c | ANSI/UL 94 | VTM-0 | |
| Oxygen Index | ASTM D-2863 | 95% | |

(continued on next page)

^aFor 0.025 mm (1 mil) film at 25°C (77°F) unless otherwise specified.

^bTemperature at which a film supports a load of 0.14 N/mm² (20 psi) for 5 sec.

^cThis classification rating is not intended to reflect hazards presented by this or any other material under actual fire conditions.

^dSamples melted in arc did not track.

^eTo convert to cm³/100 in²·24 h·atm, multiply by 0.0645.

Property Values of DuPont FEP Fluorocarbon Film (continued)

| Property | Test Method | Typical Value ^a | |
|--|---|--|--------------------------|
| | | SI Units | English Units |
| Electrical | | | |
| Dielectric Strength, short-time in air at 23°C (73°F), 6.35 mm (1/4 in) diameter electrode, 0.79 mm (1/32 in) radius 60 Hz, 500 V/s rate of rise: 0.025 mm (1 mil) film 5 mm (20 mil) film | ASTM D-149 Method A | 260 kV/mm 70 kV/mm | 6500 V/mil 1800 V/mil |
| Dielectric Constant, 25°C (77°F), 100 Hz to 1 MHz -40 to 225°C (-40 to 437°F), 1000 Hz | ASTM D-150 | 2.0 2.02-1.93 | |
| Dissipation Factor, 25°C (77°F), 100 Hz to 1 MHz -40 to 225°C (-40 to 437°F), 1000 Hz -40 to 240°C (-40 to 464°F), 1 MHz | ASTM D-150 | 0.0002-0.0007 0.0002 0.0005 | |
| Volume Resistivity, -40 to 240°C (-40 to 464°F) | ASTM D-257 | >1 × 10 ¹⁸ μm·cm | |
| Surface Resistivity, -40 to 240°C (-40 to 464°C) | ASTM D-257 | >1 × 10 ¹⁶ Ω/sq | |
| Surface Arc Resistance | ASTM D-495 | >165 sec ^d | |
| Insulation Resistance at 100°C (212°F) at 150°C (302°F) at 200°C (392°F) | Based upon 0.2 MF wound capacitor sections, using single layer, Teflon [®] 50A Film | 350,000 Mohm·μF 250,000 Mohm·μF 65,000 Mohm·μF | |

(continued on next page)

^aFor 0.025 mm (1 mil) film at 25°C (77°F) unless otherwise specified.

^bTemperature at which a film supports a load of 0.14 N/mm² (20 psi) for 5 sec.

^cThis classification rating is not intended to reflect hazards presented by this or any other material under actual fire conditions.

^dSamples melted in arc did not track.

^eTo convert to cm³/100 in²·24 h·atm, multiply by 0.0645.

Property Values of DuPont FEP Fluorocarbon Film (continued)

| Property | Test Method | Typical Value ^a | |
|--|-----------------------------------|--|-----------------------------|
| | | SI Units | English Units |
| Chemical | | | |
| Moisture Absorption | — | <0.01% | |
| Weatherability | Continuous exposure in Florida | No adverse effects after 20 yr | |
| Permeability, Gas: | ASTM D-1434 | cm ³ /m ² ·24 h·atm ^e | |
| Carbon Dioxide | | 25.9 × 10 ³ | |
| Hydrogen | | 34.1 × 10 ³ | |
| Nitrogen | | 5.0 × 10 ³ | |
| Oxygen | | 11.6 × 10 ³ | |
| Permeability, Vapors: | ASTM E-96 | g/m ² ·d | g/100 in ² ·24 h |
| Acetic Acid | | 6.3 | 0.41 |
| Acetone | | 14.7 | 0.95 |
| Benzene | | 9.9 | 0.64 |
| Carbon Tetrachloride | | 4.8 | 0.31 |
| Ethyl Alcohol | | 10.7 | 0.69 |
| Hexane | | 8.7 | 0.56 |
| Water | | 7.0 | 0.40 |
| Teflon [®] is chemically inert and solvent-resistant to virtually all chemicals except molten alkali metals, gaseous fluorine, and certain complex halogenated compounds such as chlorine trifluoride at elevated temperatures and pressures. | | | |
| Miscellaneous | | | |
| Density | ASTM D-1505 | 2150 kg/m ³ | 134 lb/ft ³ |
| Coefficient of Friction Kinetic (Film-to-Steel) | ASTM D-1894 | 0.1–0.3 | |
| Refractive Index | ASTM D-542 | 1.341–1.347 | |
| Solar Transmission | ASTM E-424 | 96% | |

^aFor 0.025 mm (1 mil) film at 25°C (77°F) unless otherwise specified.

^bTemperature at which a film supports a load of 0.14 N/mm² (20 psi) for 5 sec.

^cThis classification rating is not intended to reflect hazards presented by this or any other material under actual fire conditions.

^dSamples melted in arc did not track.

^eTo convert to cm³/100 in²·24 h·atm, multiply by 0.0645.

United States

DuPont High Performance Films
P.O. Box 89
Route 23 South and DuPont Road
Circleville, OH 43113
Ordering Information:
800-967-5607
Product Information:
800-237-4357
Fax: 800-879-4481

Canada

DuPont Canada, Inc.
P.O. Box 2200, Streetsville
Mississauga, Ontario, Canada
L5M 2H3
Inquiries: 905-821-5603
Customer Service: 800-263-2742
Fax: 905-821-5230

Latin America

Argentina

DuPont Argentina
Av. Mitre y Calle 5
CP 1884, Berazategui, Argentina
Pcia de Buenos Aires
54-1-256-2435
Fax: 54-1-319-4451

Brazil

DuPont do Brasil
Al. Itapecuru, 506
06454-080, Alphaville
Barueri, Sao Paulo
55-11-421-8689
Fax: 55-11-421-8686

Mexico

DuPont S.A. de C.V.
Homero 206
Col. Chapultepec Morales
Mexico, D.F. 11570
525-722-1184
Fax: 525-722-1370

Venezuela

DuPont Venezuela
Edificio "Los Frailes"
Calle la Guarita
Urbanization Chuao
CP 1060, Caracas, Venezuela
58-2-92-8547
Fax: 58-2-91-5638

Europe

DuPont de Nemours
(Luxembourg) S.A.
Contern
L-2984 Luxembourg
Grand Duchy of Luxembourg
352-3666-5575
Fax: 352-3666-5000

Asia Pacific

Japan

DuPont Kabushiki Katsha
Arco Tower
8-1, Shimomeguro 1-chome
Meguro-ku, Tokyo 153
Japan
81-3-5434-6139
Fax: 81-3-5434-6193

ASEAN

DuPont Singapore PTE Ltd.
1 Maritime Square
#07-01 World Trade Centre
Singapore 099253
65-279-3434
Fax: 65-279-3456

Hong Kong/China

DuPont China Ltd.
1122 New World Office Bldg.
East Wing
Salisbury Road, Kowloon
Hong Kong
852-2734-5401
Fax: 852-2721-4117

India

DuPont South Asia Ltd.
503-505, Madhava
Bandra Kurla Commercial Complex
Bandra (E)
Bombay 400 051
India
91-22-6438255/6438256
Fax: 91-22-6438297

Korea

DuPont Korea Ltd.
4/5th Floor, Asia Tower
#726, Yeoksam-dong, Kangnam-ku
Seoul 135-082, Korea
82-2-222-5398
Fax: 82-2-222-5476

Taiwan

DuPont Taiwan Ltd.
7, Tsu-Chiang 1st Road
Chungli, Taoyuan
Taiwan, ROC
866-3-4549204
Fax: 866-3-4620676



The data listed herein fall within the normal range of product properties but they should not be used to establish specification limits nor used alone as the basis of design. The DuPont Company assumes no obligation or liability for any advice furnished by it or for results obtained with respect to these products. All such advice is provided gratis and Buyer assumes sole responsibility for results obtained in reliance thereon. DuPont warrants that the material itself does not infringe any United States patent but no license is implied nor is any further patent warranty made.

Caution: Do not use in medical applications involving permanent implantation in the human body. For other medical applications, see "DuPont Medical Caution Statement," H-50102.



Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)