

# CERÂMICA PIEZOELETRICA TRAPEZOIDAL PARA MOTORES ACIONADOS POR ONDAS PROPAGANTES

**Adolfo Gomes Marto**

[agmarto@iae.cta.br](mailto:agmarto@iae.cta.br)

Centro Técnico Aeroespacial, Instituto de Aeronáutica e Espaço

Praça Marechal do Ar Eduardo Gomes,50

São José dos Campos -SP

**Pablo Siqueira Meirelles**

[pablo@fem.unicamp.br](mailto:pablo@fem.unicamp.br)

Faculdade de Engenharia da Unicamp, Departamento de Mecânica Computacional

Cx. P. 6122 – 13083-970, Campinas, SP, Brasil

**Resumo** Motores ultra-sônicos vêm substituindo motores elétricos em pequenas aplicações, devido a algumas de suas vantagens, como por exemplo: alto torque por unidade de massa, baixa velocidade de operação e por ser muito compacto, além de silencioso. Porém, ainda são motores com um custo muito alto se comparado com o motor eletromagnético convencional. Um motor ultra-sônico acionado por ondas propagantes, por exemplo, necessita de cerâmica piezoelétrica devidamente polarizada para que seja possível induzir uma onda propagante em torno do estator. A configuração geométrica que determina o sentido da polarização é relativamente simples. Existem métodos diferentes para que a cerâmica piezoelétrica se deforme adequadamente. Por exemplo, expõe-se, simultaneamente, setores circulares de um disco de cerâmica piezoelétrica a campos elétricos elevado, com polaridades distintas, simultaneamente. Ou, então secciona-se os terminais de contato elétrico da cerâmica piezoelétrica, conectando-os à polaridades elétricas diferentes. O primeiro método encarece muito a manufatura do estator e, por consequência o preço final do motor, já que o processo de polarização forçada é complexo. O segundo necessita de uma malha de condutores elétricos atrás do estator para conseguir a polaridade correta em cada setor da cerâmica piezoelétrica. Este trabalho discute um método que secciona setores circulares de cerâmica piezoelétrica para que se possa compor a geometria de polarizações apenas invertendo o sentido da polarização no momento em que os setores são colados no estator. Este método aproveita a vantagem de uma polarização única da cerâmica piezoelétrica e a polaridade elétrica única de cada grupo a ser excitado para induzir uma onda propagante.

**Palavras chaves:** Motores Ultra-sônicos, Onda Propagante, piezoeletricidade, polarização, manufatura

## 1. Introdução

Motores ultra-sônicos transformam vibrações com frequência acima da audível em forças de acionamento. Para tanto, a energia elétrica é transformada em energia mecânica de vibração por algum atuador, geralmente piezoelétrico, e sendo posteriormente transformado em energia de acionamento através da troca de forças de atrito entre duas peças em contato.

Entre os motores ultra-sônicos, um dos mais promissores é o motor acionado por ondas propagantes apresentado em Sashida e Kenjo (1993). Trata-se de duas peças em contato (estator e rotor). O estator é induzido a vibrar de forma que ondas (ondas propagantes) se propaguem em torno de seu centro. Devido a estas ondas, a superfície de contato desenvolve deslocamentos elípticos capazes de acionarem o rotor.

Este motor possui a vantagem de produzir um alto torque por unidade de massa a uma baixa velocidade, além de ser silencioso. Estas características tornam o motor ideal em algumas aplicações e, desta forma, as pesquisas se intensificam a fim de que o funcionamento do motor seja plenamente conhecido e que os custos de fabricação sejam economicamente viáveis para as aplicações potenciais.

Este motor possui um conjunto pequeno de peças mecânicas, sendo basicamente formado por: cerâmica piezoelétrica, estator, rotor e camada de contato. Apesar disto ainda precisa de um elaborado circuito gerador de sinais elétrico e amplificador de potência a uma frequência alta. A cerâmica piezoelétrica tem que estar devidamente polarizada para acionar as ondas propagante no estator. Também, esta cerâmica tem que estar bem colada para que os esforços sejam devidamente transferidos ao estator. A camada de contato otimiza a transferência de energia em forma de acionamento.

Sashida e Kenjo (1983) apresentam uma polarização setorizada de forma que cada setor tenha sua polarização invertida com relação à polaridade do setor adjacente. Esta polarização consiste em expor setores circulares de um disco de cerâmica piezoelétrica a um campo elétrico elevado, com polaridades distintas, simultaneamente. Esse processo requer um complexo circuito de alta tensão elétrica

Uma opção que dispensa a polarização por setores é apresentada por Ueha et al(1993). Uma cerâmica polarizada uniformemente tem seus terminais de contato elétrico seccionados com a mesma configuração que a polarização por setores. Esses contatos elétricos são conectados a polaridades diferentes do sinal elétrico e isso requer um circuito elétrico complexo junto ao motor.

Wallaschek (1995) apresenta claramente a configuração desta polarização para que seja induzida onda propagante no estator. Hagedorn e Wallaschek (1992) apresentam matematicamente a dinâmica do estator.

Friend (1998) apresenta uma classificação de colas capazes de colar a cerâmica piezoelétrica no estator e também os procedimentos básicos de colagem.

Seeman et al(1997) fazem um estudo dos esforços da cola quando submetida aos esforços oscilantes do estator e da cerâmica piezoelétrica. Shi (2002) apresenta um estudos dos efeitos da cola sobre a dinâmica entre o estator e a cerâmica piezoelétrica.

Este trabalho apresenta uma forma de colagem de setores circulares de cerâmica piezoelétrica previamente cortados com os procedimentos apresentados por Lima (1998) e aprimorados por Marto(2002). Esta forma alia a vantagem de uma polarização uniforme com a simplicidade de conexão dos sinais elétricos. Inicialmente será descrito como funciona um motor acionado por ondas propagantes. Brevemente será apresentado como se consegue a polarização desejada em uma cerâmica piezoelétrica. A manipulação da cerâmica piezoelétrica em formas de setores circulares é apresentada como alternativa às técnicas utilizando a cerâmica circular inteira. Um motor acionado por ondas propagantes concebido em laboratório é apresentado para discussões sobre as técnicas utilizadas.

## **2. MOTOR ACIONADO POR ONDAS PROPAGANTES**

Um motor acionado por ondas propagante típico pode ser visto na Fig. 1. A composição adequada de duas ondas estacionárias gera uma onda propagante em torno do estator como esquematizado na Fig.1., à direita. Estas duas ondas estacionárias são excitadas no estator por

elementos piezoelétricos com a configuração de polarização bem definida. Abaixo será discutido

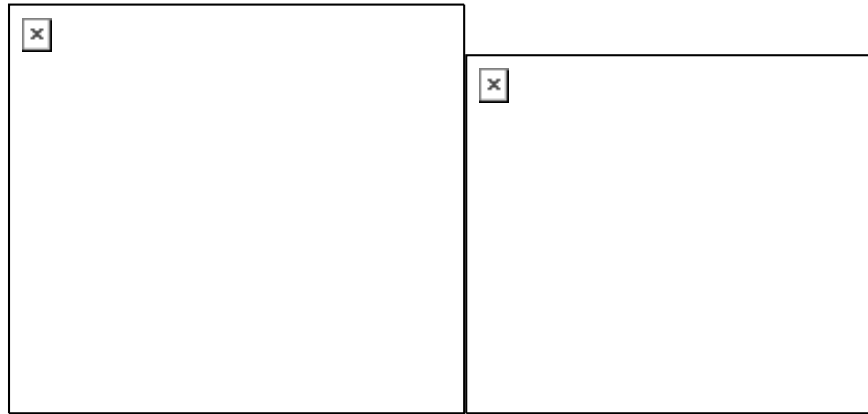


Figura 1 Motor ultra-sônico acionado por ondas propagantes e o seu princípio de funcionamento

como surge a onda propagante a partir de ondas estacionárias e como deve estar configurada a geometria para ser possível excitar estas ondas estacionárias.

### Obtenção das ondas propagantes

Devido à simetria, uma placa circular tem inúmeras famílias de modos acoplados de vibrar, ou modos degenerados. Cada família de modos vibra com a mesma frequência e os modos possuem formas semelhantes de vibrar. Estas formas são ondas estacionárias.

Os deslocamentos transversais de uma placa circular, por exemplo, com altura  $h$ , de um material com densidade  $\rho$ , módulo de elasticidade de Young  $E$ , e coeficiente de Poisson  $\nu$ , estudado pela teoria de Kirchhoff-Love de placas, satisfazem a equação diferencial Eq. (1), apresentada, por exemplo, em Meirovitch (1980):

$$D\nabla^4 w + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = f(r, \theta, t). \quad (1)$$

Sendo que a rigidez à flexão,  $D$ , é definida por:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

e o operador diferencial bi-harmônico apropriado é expresso, em coordenadas cilíndricas, por:

$$\nabla^4 = \nabla^2 \nabla^2 = \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right)^2. \quad (3)$$

Para se obter os maiores deslocamentos na superfície de contato, o estator é excitado a uma frequência próxima da frequência de um dos modos. Desta forma é importante conhecer a solução da equação diferencial homogênea,  $f(r, \theta, t) = 0$ , como apresentam Hagedorn & Wallaschek (1992).

Utilizando o método de separação de variáveis, os modos de vibrar do estator podem ser escritos como:

$$w_A = R(r) \cos(m\theta) \cos(\omega t) \quad \text{e} \quad w_B = R(r) \sin(m\theta) \cos(\omega t). \quad (4)$$

Sendo  $m$  o número de onda, função do comprimento angular de onda  $\lambda$ , definido por

$$m = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (5)$$

e  $R(r)$  a função de Bessel modificada correspondente a uma onda estacionária com frequência angular natural  $\omega$ .

Os modos de vibrar ortogonais estacionários  $w_A$  e  $w_B$  podem ser decompostos em ondas propagantes, como apresenta Meirovich (1967):

$$w_A = \frac{1}{2} R(r) \cos(m\theta + \omega t) + \frac{1}{2} R(r) \cos(m\theta - \omega t) \quad (6)$$

$$w_B = \frac{1}{2} R(r) \sin(m\theta + \omega t) + \frac{1}{2} R(r) \sin(m\theta - \omega t) \quad (7)$$

Considerando que o modo de vibrar  $w_B$  é o mesmo modo que o modo  $w_A$  com apenas uma defasagem espacial  $\Delta\theta$  e que os dois modos podem ser excitados com uma defasagem entre si  $\Delta t$  em relação ao tempo, os dois modos podem ser escritos como

$$w_A = \frac{1}{2} R(r) \cos(m\theta + \omega t) + \frac{1}{2} R(r) \cos(m\theta - \omega t) \quad (8)$$

$$w_B = \frac{1}{2} R(r) \cos(m\theta + m\Delta\theta + \omega t + \omega \Delta t) + \frac{1}{2} R(r) \cos(m\theta + m\Delta\theta - \omega t - \omega \Delta t) \quad (9)$$

Assim é possível se obter uma relação entre estas defasagens de forma que se obtenha uma onda propagante:

$$\begin{cases} m\Delta\theta + \omega\Delta t = p\pi \\ m\Delta\theta - \omega\Delta t = q\pi \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta\theta = \frac{(p+q)\pi}{2m} \\ \Delta t = \frac{(p-q)\pi}{2m} \end{cases} \quad (10)$$

A Tab. (1) apresenta as formas de deslocamentos quando,  $p$  e  $q$  são números inteiros.

Tabela 1. Formas dos deslocamentos transversais de uma placa circular em função das ondas estacionárias

Natureza de $p$	Natureza de $q$	Forma de vibrar	Característica do deslocamento
Par	Par	$R(r)[\cos(m\theta + \omega t) + \cos(m\theta - \omega t)]$	Onda estacionária
Impar	Par	$R(r)\cos(m\theta - \omega t)$	Onda Propagante Progressiva
Par	Impar	$R(r)\cos(m\theta + \omega t)$	Onda Propagante Regressiva
Impar	Impar	0	Nula



Figura 2 Configuração de polarização da cerâmica piezoelétrica para um motor acionado por ondas propagantes

Assim, para  $p=2$  e  $q=1$ , por exemplo, pode-se obter as defasagem em função do comprimento de onda  $\lambda$  e do período da onda  $T$ :

$$\Delta\theta = \frac{3}{4}\lambda \quad \text{e} \quad \Delta t = \frac{1}{4}T \quad (11)$$

### Configuração geométrica de polarização

Como apresentado anteriormente para se excitar uma onda propagante em torno do estator é necessário excitar duas ondas estacionárias com uma diferença de fase em relação ao tempo de um quarto do período  $T$ , ou melhor,  $\pi/2$ . Sendo assim, enquanto uma onda estacionária é excitada com um sinal elétrico proporcional a  $\cos(\omega t)$  a outra onda estacionária é excitada com um sinal elétrico proporcional a  $\sin(\omega t)$ .

Marto (2002) apresenta algumas formas de como é possível se excitar os dois modos estacionários. A Fig. (2) apresenta a configuração geométrica de dois grupos de cerâmica colados na estator, com a devida defasagem entre eles para que sejam excitados os dois modos estacionários.

### 3. POLARIZAÇÃO DA CERÂMICA PIEZOELÉTRICA

O fenômeno da piezoeletricidade se deve a um desequilíbrio elétrico molecular ocorrido quando o cristal se deforma, como ilustrado na Fig. (3). Há, então, um deslocamento de cargas elétricas no cristal para recompor o equilíbrio. Uma particular família de estrutura policristalinas com estas propriedades é a estrutura perovskita, como o Titanato de Bário,  $\text{BaTiO}_3$ .



Figura 3 Esquema de movimentação atômica de um cristal piezoelétrico

Uma solução sólida composta por duas destas estruturas cristalinas estudada por Su (1998), Titanato de Chumbo  $\text{PbTiO}_3$  e Zirconato de Chumbo  $\text{PbZrO}_3$ , quando estão a uma particular composição Ti/Zr de 52/48%, possui uma excepcional qualidade de polarização. Esta estrutura é conhecida como cerâmica piezoelétrica ou comercialmente *pzt*.

A polarização é um processo pelo qual um material piezoelétrico é submetido a um campo elétrico superior a um campo elétrico coersivo.

Alguns materiais possuem um comportamento histerético, como é o caso das cerâmicas piezoelétricas. Estes materiais são conhecidos como materiais ferroelétricos. Estes materiais apresentam uma polarização remanescente proporcional à voltagem aplicada quando esta é submetida a um campo elétrico acima do coersivo, como apresentado na Fig. (4).

#### 4. MANIPULAÇÃO DE UMA CERÂMICA PIEZOELÉTRICA

A alternativa encontrada para utilizar a praticidade de uma placa de cerâmica piezoelétrica uniformemente polarizada e a simplicidade das conexões elétricas com os terminais da cerâmica foi cortar a cerâmica piezoelétrica em trapézios, correspondente à metade do comprimento circular de onda  $\lambda/2$ . Observando a ordem da polaridade de cada peça conforme a configuração da Fig. (5), preparam-se os elementos piezoelétricos para serem colados. Nota-se na figura que existem setores menores (com um quarto do comprimento circular de onda  $\lambda/4$ ), estes são colados ao estator para cumprirem a função de sensor.

A cerâmica piezoelétrica é muito fina e se não houver uma manipulação adequada algumas das propriedades piezoelétricas podem não ser alcançadas ou mesmo perdidas. Algumas técnicas utilizadas neste trabalho foram aprimoradas das apresentadas por Lima (1999).

##### Corte da Cerâmica

Uma placa de cerâmica piezoelétrica é aderida em uma superfície rígida e plana utilizando um fluido volátil, como álcool, por exemplo. Este procedimento permite a manipulação da cerâmica piezoelétrica sem que ela se movimente em relação à superfície de apoio, pois forma uma ventosa entre as duas superfícies. Assim é possível desenhar a geometria desejada dos setores na forma de trapézios e cortar um a um dos setores. Os cortes são mais precisos e sem muitas perdas pela quebra da cerâmica. As peças trapezoidais são fixas por duas superfícies lisas e isoladas para o acabamento final com o lixamento.

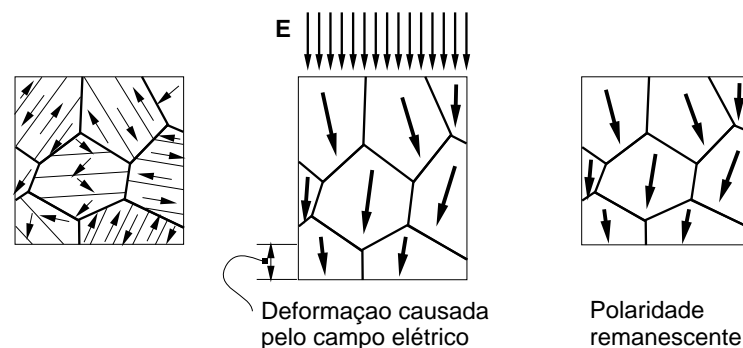


Figura 4 Esquema de polarização de uma cerâmica piezoelétrica

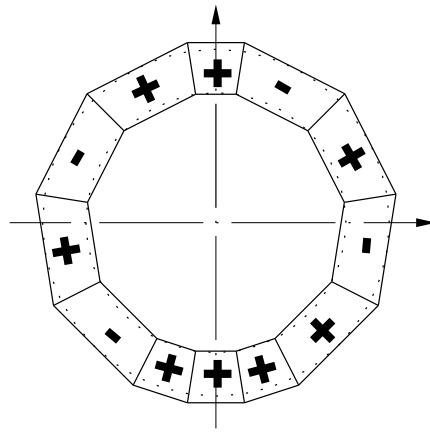


Figura 5 Configuração da disposição dos elementos trapezoidais de cerâmica piezoelétrica

### Colagem da Cerâmica

A colagem de cerâmicas piezoelétricas em estruturas metálicas precisa de uma cola que suporte esforços de cisalhamento. Lima (1999) e Friend (1998) apresentam estudos sobre os diversos tipos de cola a serem usados. Neste trabalho foi adotada uma cola a base de epóxi com o tempo de cura de 24 horas. Os trapézios cortados são fixos por uma fita adesiva de dupla face a uma superfície rígida e plana de acordo com a configuração esquematizada na Fig. (5). O estator é colado ao conjunto de cerâmicas com a cola já mencionada, sendo que a cura é feita com uma pressão de contato por 24 horas.

## 5. CONCEPÇÃO DE UM MOTOR ACIONADO POR ONDAS PROPAGENTES

As dimensões preliminares do anel foram adaptadas de Hirata & Ueha (1995). A Fig. (6) apresenta as principais dimensões do estator e do rotor.

Para aumentar a amplitude dos deslocamentos no sentido do acionamento do motor é considerado um anel com dentes, aumentando a distância dos pontos na superfície de contato à linha neutra.

Na face contrária a do contato, os setores de cerâmica piezoelétrica são colados como discutido na seção anterior.

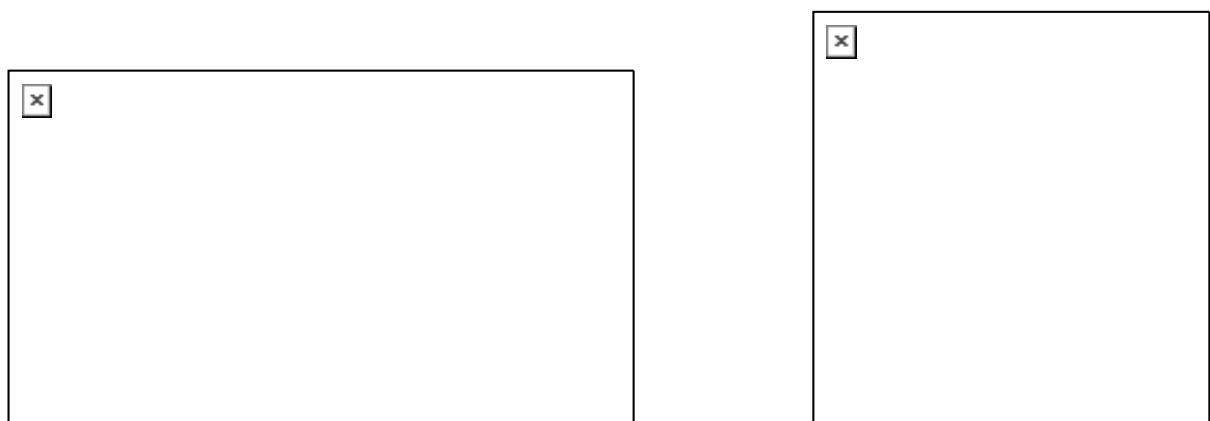


Figura 6 Dimensões do rotor e estator de um motor acionado por ondas propagantes

A Fig. (7) apresenta esquematicamente qual é a forma da onda propagante esperada. A forma desta onda corresponde ao quinto modo de vibração transversal. A frequência de excitação de 14,5 kHz foi calculada em Marto (1999).

As dimensões do rotor foram estimadas de tal forma que o rotor fosse centrado por um eixo no suporte do motor pela mesma linha de simetria do estator, por meio de um rolamento. Ao eixo do rotor é permitido o deslizamento axial no rolamento de forma que seja possível variar a força de contato. O rotor é pressionado contra o estator por um conjunto solidário: rotor, arruelas, mola e pista interna do rolamento. A deformação da mola controla a intensidade da pressão de contato.

## 6. RESULTADOS

Uma bancada para ensaiar o motor acionado por ondas propagantes foi desenvolvida, como apresentado na Fig. (8)

Com esta bancada foi possível medir o torque e velocidades do motor. O desempenho do motor é apresentado na Fig. (9).

A potência extraída do motor foi calculada pelo produto torque por velocidade. O motor foi ensaiado com diferentes pressões de aperto e frequência de excitação.

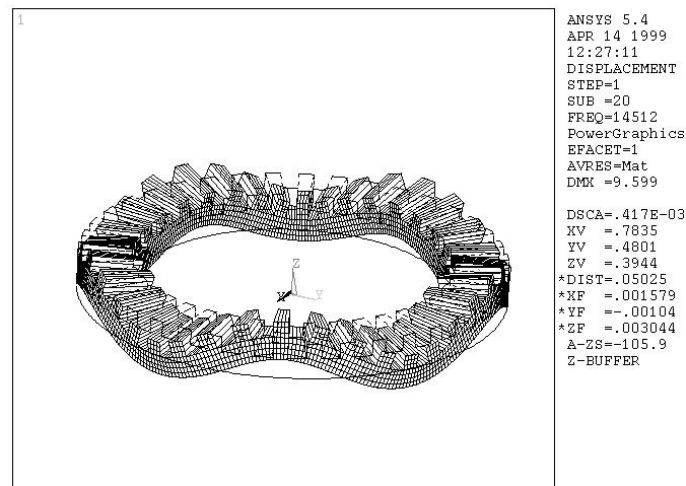


Figura 7 Representação numérica da forma do estator do modo de vibrar esperado

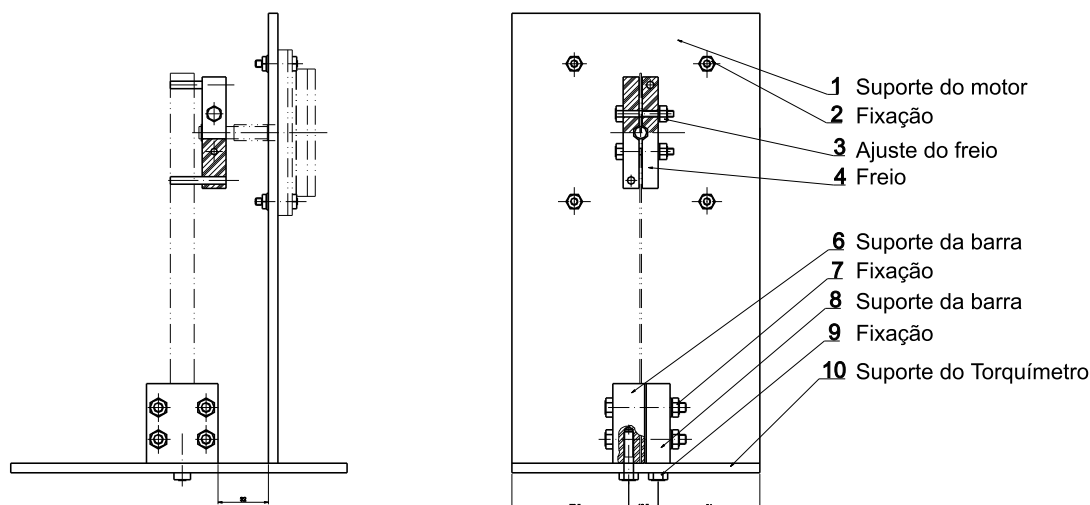


Figura 8 Bancada de ensaio do motor acionado por ondas propagante



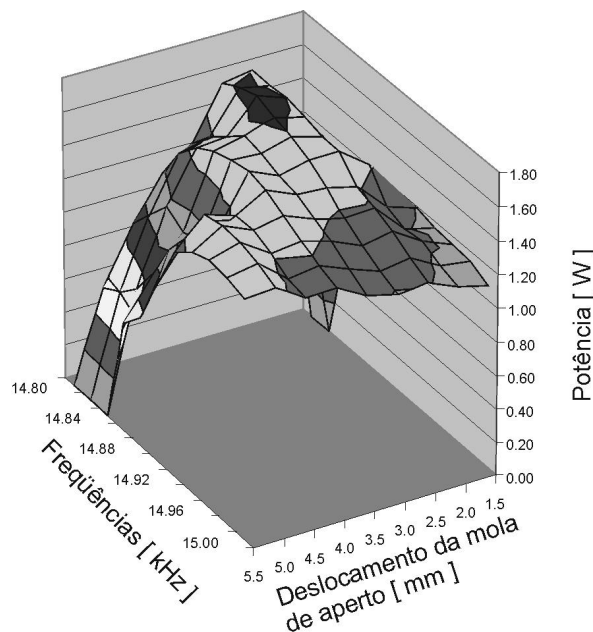


Figura 9 Desempenho do motor em função da frequência de operação e do aperto do freio

## 7. CONCLUSÃO

Através de técnicas simples de manipulação de cerâmica e conhecimentos de polarização de cerâmicas piezoelétricas foi possível construir um motor acionado por ondas propagantes didático. A etapa de polarização é mais simples, podendo ser usada até placas de cerâmicas piezoelétricas já polarizadas encontradas comercialmente. O circuito elétrico, junto ao estator, é muito mais simples, uma vez que cada grupo utiliza apenas uma polaridade elétrica.

## 8. AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer também ao apoio financeiro dado pelo CNPq e Capes e o investimento da FAPESP na construção do protótipo didático

## 9. REFERÊNCIAS

- Friends, J. 1998, Bonding sugestions for piezoelectric motor system,"[www.umn.edu/~piezo/MotorAnalysis/BondingNote/BondingNote.html](http://www.umn.edu/~piezo/MotorAnalysis/BondingNote/BondingNote.html)"
- Hagedorn, P. and Wallaschek, J, 1992 Travelling wave ultrasonic motors, part I: Working principle and mathematical modelling of the stator, "Journal of Sound and Vibration", Vol.155,pp.31-46.
- Lima, J. J., 1999 "Modelagem de Sensores e Atuadores Piezoelétricos com Aplicações em Controle Ativo de Estruturas", Faculdade de Engenharia Mecânica,Unicamp, Brasil, (Tese de Doutorado)
- Marto A. G., 2002, Modelagem e avaliação experimental de um motor acionado por ondas propagantes, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, Brasil (tese de Doutorado)
- Marto A. G. and Meirelles, P. S., 1999, Motor por ondas propagantes, "Cobem 1999", LINDOIA
- Meirovitch, L. 1980,"Analytical methods in vibrations", MacMillan, London
- Sashida, T. and Kenjo, T., 1983, "An Introduction to Ultrasonic Motors", Oxford Science Publications, Oxford
- Seemann, W.; Wolf, K.; Straub, A.; Hagedorn, P. & Chang, F.-K.; Bonding Stresses between Piezoelectric Actuator and Elastic Beams, "Proc. of the SPIE Conference on Smart Materials and Structures", San Diego, 1997, 665-675.

- Ueha, S., Tomikawa, Y., Kurosawa, M. and Nakamura, N., 1993, Ultrasonic motors, Theory and Applications, Oxford Science Publications, Oxford
- Wallaschek, J., 1995, Piezoelectric motors” Journal of Intelligent Material Systems and Structures”, Vol. 6, pp. 71-83
- Su, B., 1998 ”Novel fabrication processing for improved lead zirconate titanate (PZT) ferroelectric ceramic materials”, Birmingham: University of Birmingham, School of Metallurgy and Materials, Faculty of Engineering, PhD Thesis

## **PIEZOELECTRIC TRAPEZOIDAL CERAMIC FOR MOTORS SET BY TRAVELLING WAVE**

**Adolfo Gomes Marto**

[agmarto@iae.cta.br](mailto:agmarto@iae.cta.br)

Centro Técnico Aeroespacial, Instituto de Aeronáutica e Espaço

Praça Marechal do Ar Eduardo Gomes, 50

São José dos Campos -SP

**Pablo Siqueira Meirelles**

[pablo@fem.unicamp.br](mailto:pablo@fem.unicamp.br)

Faculdade de Engenharia da Unicamp, Departamento de Mecânica Computacional

Cx. P. 6122 – 13083-970, Campinas, SP, Brasil

**Abstract** *Ultrasonic Motors are substituting electric motors in small applications, due to some of their advantages, like for example: high torque per weight unit, slow angular speed, simple construction and silent operation. However, they are expensive if compared with conventional electromagnetic motors. A traveling wave motor, for example, needs the special piezoelectric ceramic polarized to induce the traveling wave around the stator. The geometric configuration of this polarization is relatively simple. There are different methods in order to stator deforms correctly due to piezoelectric ceramic. For example, it is exposed the sectors of a piezoelectric ceramics circular plate to a high electric fields, with different polarities, simultaneously. In another way, cut only the electric terminals of piezoelectric ceramic circular connecting them with different electric polarities, using a electric circuit. The first method is very expensive due to the forced polarization plate is complex. The second method needs a mesh of electric conductors behind the stator to obtain the correct polarity in each sector of piezoelectric ceramics. This work present a method that trapezoidal sectors of piezoelectric ceramics are cut, in order to compose the geometry of polarization. The polarization configuration is obtained only inverting the direction of the polarity at the moment that the sectors are glued in the stator. This method uses the advantage of a only one polarization of piezoelectric ceramics and only one electric polarity of each group, in order to induce a traveling wave.*

**Keywords:** *ultrasonic motors, traveling wave, piezoelectricity, polarization, manufacture.*