

# TRANSPORTADOR VIBRATÓRIO COM ACIONAMENTO PIEZÉLETRICO

## **Emerson Bastos de Albuquerque**

Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2160 – Campus Santa Mônica – Bloco 1M - Uberlândia/MG CEP: 38400-902

[ebalbuquerque@mecanica.ufu.br](mailto:ebalbuquerque@mecanica.ufu.br)

## **Domingos Alves Rade**

Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2160 – Campus Santa Mônica – Bloco 1M - Uberlândia/MG CEP: 38400-902

[domingos@ufu.br](mailto:domingos@ufu.br)

## **João Carlos Mendes Carvalho**

Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2160 – Campus Santa Mônica – Bloco 1M - Uberlândia/MG CEP: 38400-902

[jcmendes@ufu.br](mailto:jcmendes@ufu.br)

**Resumo.** Transportadores vibratórios têm sido largamente utilizados em diversos ramos do setor industrial para o transporte e a orientação de peças e material a granel. Neste trabalho, é proposta uma configuração inovadora de transportadores vibratórios de pequeno e médio porte, baseada no uso de materiais piezelétricos para a geração de movimento. Tais materiais oferecem a possibilidade de completa integração à estrutura com pequeno acréscimo de peso, o que os tornam muito adequados para a geração de movimento, em substituição aos sistemas tradicionais de acionamento. São apresentados resultados de simulação numérica obtidos pela associação de um modelo de elementos finitos do transportador e um modelo dinâmico de movimentação do material transportado. Tais resultados evidenciam as características operacionais do transportador vibratório. Descreve-se também um protótipo do dispositivo concebido.

**Palavras-chave:** Transportador vibratório, automação, piezeletricidade, elementos finitos.

## **1. INTRODUÇÃO**

Transportadores vibratórios têm sido largamente utilizados em diversos ramos do setor industrial para o transporte e a orientação de peças e material a granel. No que diz respeito à trajetória desenvolvida pelo material transportado, os transportadores podem ser classificados em transportadores lineares ou circulares. O acionamento pode ser feito de diferentes formas, podendo-se destacar:

- por mecanismo motor-biela-manivela;
- por desbalanceamento, no qual uma massa desbalanceada é posta a girar por um motor elétrico;
- por forças eletromagnéticas, geradas através de um eletroímã.
- acionamento pneumático e hidráulico.

Embora, em geral, o transporte vibratório revele-se eficiente e econômico, há, naturalmente, alguns inconvenientes. Assim, os dois primeiros tipos de acionamento apresentam, como desvantagens, a necessidade de freqüente manutenção, principalmente devido ao desgaste das partes móveis e os elevados níveis de ruído emitido.

O acionamento eletromagnético, por sua vez, apresenta a desvantagem de não se poder prever corretamente o movimento do material transportado em virtude da característica não linear das forças eletromagnéticas. Além disso, o campo eletromagnético gerado pode interferir na integridade e no funcionamento adequado de equipamento vizinho e mesmo do material transportado. Por fim, os transportadores pneumáticos e hidráulicos possuem elevado custo de instalação e manutenção.

Neste trabalho, é proposta uma configuração inovadora de transportadores vibratórios de pequeno e médio porte, baseada no uso de materiais piezelétricos para a geração de movimento. Em relação aos tipos tradicionais de acionamento, os transportadores vibratórios com acionamento piezelétrico apresentam importantes vantagens: permitem acionamento em amplas faixas de freqüência, com formas de onda arbitrárias, não necessariamente harmônicas, apresentam baixo nível de ruído de acionamento, baixa taxa de manutenção e seu funcionamento requer reduzido consumo de energia. Contudo, prevê-se que tenham como principal inconveniente o elevado custo atual das cerâmicas piezelétricas, observando-se, entretanto, a tendência de progressiva redução do custo destas cerâmicas.

A configuração proposta é aqui avaliada com o auxílio de simulações numéricas realizadas através de um modelo de elementos finitos do sistema estrutural combinado com um modelo matemático destinado a caracterizar o movimento do material transportado. É também descrita a construção de um protótipo destinado à avaliação experimental do dispositivo.

## 1. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DO TRANSPORTADOR

Utku (1998) e Banks (1996) fornecem as relações constitutivas dos materiais piezelétricos, sumarizadas nas seguintes equações:

$$\{\mathbf{S}\} = [c^E] \{\mathbf{e}\} - [e] \{E\} \quad (1)$$

$$\{D\} = [e]^T \{\mathbf{e}\} + [\mathbf{x}^E] \{E\} \quad (2)$$

com:

$$[e] = [c^E] \quad [d] \quad (3)$$

$$[\mathbf{x}^E] = [\mathbf{x}^s] - [d]^T \quad [c^E] \quad [d] \quad (4)$$

$\{\mathbf{S}\}$  : tensor tensão mecânica (Pa);

$[c^E]$  : matriz de elasticidade para campo elétrico constante;

$\{\mathbf{e}\}$  : tensor de deformação;

$[e]$  : matriz das constantes de tensões piezelétricas;

$\{E\}$  : campo elétrico;

- $\{D\}$  : deslocamento elétrico;
- $[\xi^E]$  : matriz das constantes dielétricas para deformação constante;
- $[c^E]$  : matriz de elasticidade para campo elétrico constante;
- $[d]$  : matriz das constantes de deformação piezelétricas.
- $[\xi^\sigma]$  : matriz das constantes dielétricas para tensão mecânica constante;

As equações acima evidenciam o efeito piezelétrico direto, segundo o qual o material, quando submetido a deformações mecânicas externas, produz distribuições de cargas elétricas (polarização). Por outro lado, o efeito piezelétrico inverso prevê o surgimento de deformações, provocando alteração nas dimensões do material, quando este é submetido a um campo elétrico externo.

Foi desenvolvido um modelo de elementos finitos para análise do comportamento estático e dinâmico de pórticos bidimensionais dotados de sensores e atuadores piezelétricos. Neste desenvolvimento foi utilizado o princípio do trabalho virtual considerando simultaneamente efeitos elétricos e mecânicos (Lima, 1999), as relações constitutivas dos materiais piezelétricos, sumarizadas nas equações (1), (2), (3) e (4), além da teoria de vigas de Euler Bernoulli (Allik 1970, Lima 1999). A Fig. (1) ilustra as características do elemento finito implementado, que consiste de um elemento composto por três camadas, sendo a camada interna puramente elástica e as duas camadas externas formadas constituídas de camadas piezelétricas. Na mesma figura são indicados os graus de liberdade elementares, incluindo os graus de liberdade estruturais ( $u_i, w_i, \theta_i, u_j, w_j, \theta_j$ ) e os graus de liberdade elétricos ( $\phi^U, \phi^L$ ).

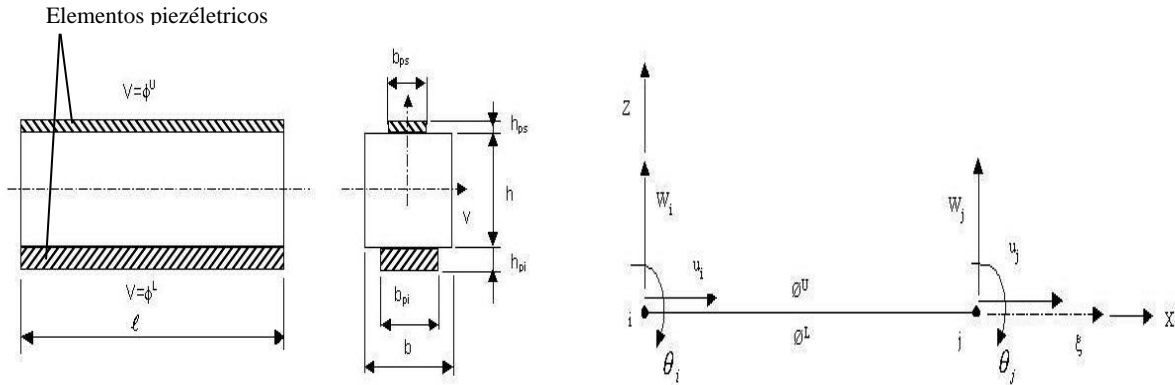


Figura 1. Geometria do elemento de viga composta e graus de liberdade elementares.

Da discretização por elementos finitos resulta o seguinte sistema de equações diferenciais:

$$[M_{qq}]\{\ddot{q}\} + \left( [K_{qq}] - [K_{qf}][K_{ff}]^{-1}[K_{fq}] \right) \{q\} = \{F_q\} - [K_{qf}]\{f_A\} \quad (5)$$

$[M_{qq}]$  : Matriz de massa;

$\{\ddot{q}\}$  : Vetor aceleração;

$[K_{qq}]$ : Rigidez do elemento;

$[K_{qf}]$ : Rigidez piezelétrica do elemento acoplamento mecânico-elétrico;

$[K_{fq}]$ : Rigidez piezelétrica do elemento acoplamento elétrico-mecânico;

$[K_{ff}]$ : Rigidez dielétrica do elemento;

$\{q\}$ : Vetor deslocamento;

$\{F_q\}$ : Forças externas;

$\{f_A\}$ : Voltagens aplicadas aos elementos piezelétricos.

cujas resoluções permitem determinar a resposta dinâmica do sistema estrutural quando este é simultaneamente excitado por forças externas, representadas pelo vetor  $\{F_q\}$  e por voltagens aplicadas aos elementos piezelétricos, as quais compõem o vetor  $\{f_A\}$ . O detalhamento do desenvolvimento das matrizes figurando em (5) podem ser encontradas em (Albuquerque, 2004).

O modelo implementado computacionalmente permite contemplar a utilização de pastilhas de características distintas entre os lados da viga-base, ou ainda a utilização de apenas uma pastilha piezelétrica em um dos lados. Além disso, permite incluir elementos piezelétricos com função de sensores ou de atuadores. O procedimento de modelagem contempla também a possibilidade de orientar arbitrariamente os elementos de viga no plano, através da utilização de transformações de rotação aplicadas às matrizes elementares.

O programa computacional desenvolvido dispõe dos seguintes módulos de cálculo: a) análise do comportamento estático; b) análise dinâmica no domínio do tempo (cálculo de respostas temporais); c) análise dinâmica no domínio da frequência (cálculo de Funções de Resposta em Frequência); d) análise modal (cálculo de frequências naturais e modos naturais de vibração).

O procedimento de modelagem foi aplicado ao transportador vibratório linear, cuja realização física e modelo de elementos finitos são apresentados em Fig. (2) e Fig. (3), respectivamente. Na Tab. 1 apresentam-se os parâmetros físicos do sistema.

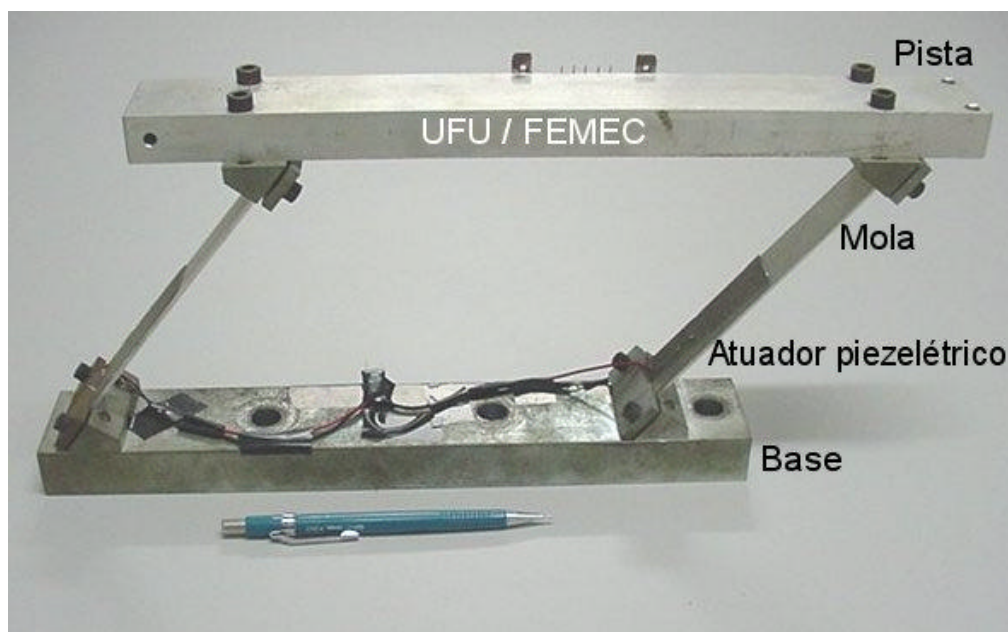


Figura 2. Protótipo de transportador vibratório acionado por pastilhas piezelétricas.

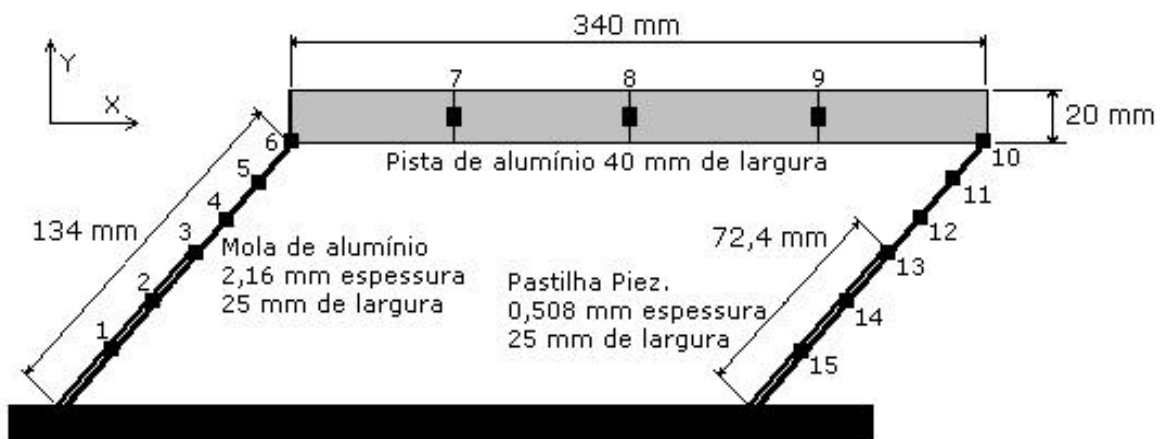


Figura 3. Esquema simplificado do transportador vibratório com acionamento piezelétrico.

Tabela 1. Parâmetros físicos do sistema

	<b>MOLAS E PISTA DO TRANSPORTADOR</b>	<b>ATUADOR</b>
Material	Alumínio	PZT
Modulo de Elasticidade $[N/m^2]$	$0,7 \times 10^{11}$	$0,66 \times 10^{11}$
Densidade $[kg/m^3]$	2700	7800
$d_{31}$ $[m/v]$	–	$1,9 \times 10^{-10}$
$\chi_{33}$ $[F/m]$	–	$15,93 \times 10^{-9}$

## 2. MODELO DE MOVIMENTO DA PEÇA

A Figura (4) mostra um esquema simplificado do movimento da pista e peça transportada.

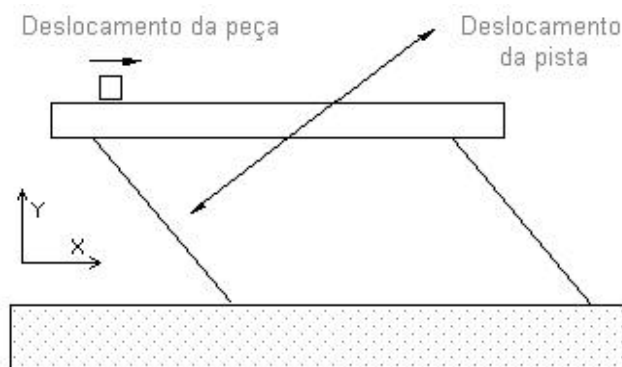


Figura 4. Esquema do movimento da pista e peça transportada

O modelo de movimento da peça resulta da aplicação das leis de Newton a uma peça isolada, à qual encontra-se aplicada a força peso e a força de contato com a pista. Assim segundo Martins (2001) a peça poderá ter 4 movimentos distintos:

**Repouso relativo à pista** – ocorre quando a força exercida pela pista na direção x é menor que a força máxima de atrito estático.

**Avanço relativo** – ocorre quando a força exercida pela pista no sentido positivo do eixo x é maior que a força máxima de atrito.

**Recuo relativo** – ocorre quando a força exercida pela pista no sentido negativo do eixo x é maior que a força máxima de atrito.

**Vôo** – ocorre quando a normal se anula.

Para se caracterizar o movimento da peça são necessários os deslocamentos, velocidades e acelerações da pista, os quais são extraídos do modelo de elementos finitos, para uma dada excitação piezelétrica. introduzida.

### 3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Várias simulações numéricas em regime estático e dinâmico do transportador foram realizadas. A título de validação do procedimento de modelagem, os resultados de algumas delas foram comparados com resultados obtidos através do programa comercial de análise por elementos finitos ANSYS®, utilizando um modelo construído com elementos sólidos (SOLID 45, SOLID 5). A proximidade entre os dois conjuntos de resultados permitiu validar o procedimento de modelagem implementado.

Os resultados de simulações, obtidos utilizando o programa computacional implementado, são apresentados a seguir:

#### 3.1. Análise modal

Na Tab. (2) são fornecidos os valores das quatro primeiras frequências naturais do transportador vibratório esquematizado na Fig. (5), obtidos pela resolução numérica do problema de autovalor associado à Eq. (5). São consideradas duas situações, na primeira as pastilhas encontram-se com suas duas faces em curto circuito, permitindo que a carga elétrica gerada durante a deformação possa fluir de uma para a outra face, evitando a formação de diferença de potencial. Na segunda situação as pastilhas encontram-se em circuito aberto, desta forma a diferença de potencial gerada tende a elevar a rigidez da estrutura e, conseqüentemente, os valores de suas frequências naturais.

Tabela 2. Frequências naturais.

SIMULAÇÃO	
PZT curto circuito	PZT circuito aberto
22,37	22,87
432,0	432,4
629,0	641,1
636,5	647,6

#### 3.2. Análise de resposta em frequência

Para uma excitação elétrica nas pastilhas piezelétricas acopladas da Fig. (3), foi obtida a função de resposta em frequência, Fig. (5), para o deslocamento do 6 nó na direção x. Observa-se que os picos da FRF correspondem às frequências naturais de vibração do transportador vibratório, dadas na Tab (2) para as pastilhas de PZT em circuito aberto.

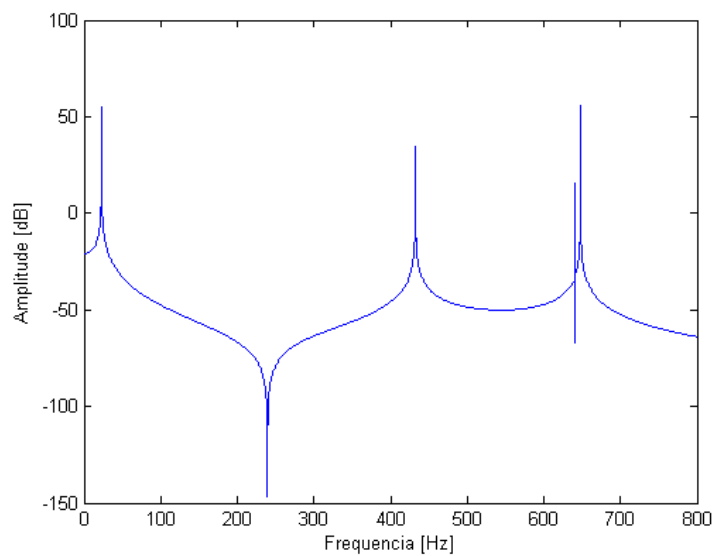


Figura 5. Função de resposta em frequência na extremidade da pista na direção horizontal.

### 3.3. Análise dinâmica no domínio do tempo

Aplicando-se uma tensão elétrica harmônica com frequência de 21Hz e amplitude de 100 Volts nos elementos piezelétricos obteve-se, por integração numérica das equações do movimento, as histórias temporais de deslocamento, velocidade e aceleração em cada nó do modelo de elementos finitos. A Fig. (6) apresenta o deslocamento horizontal do nó 6 na direção x, indicado na Fig. (3).

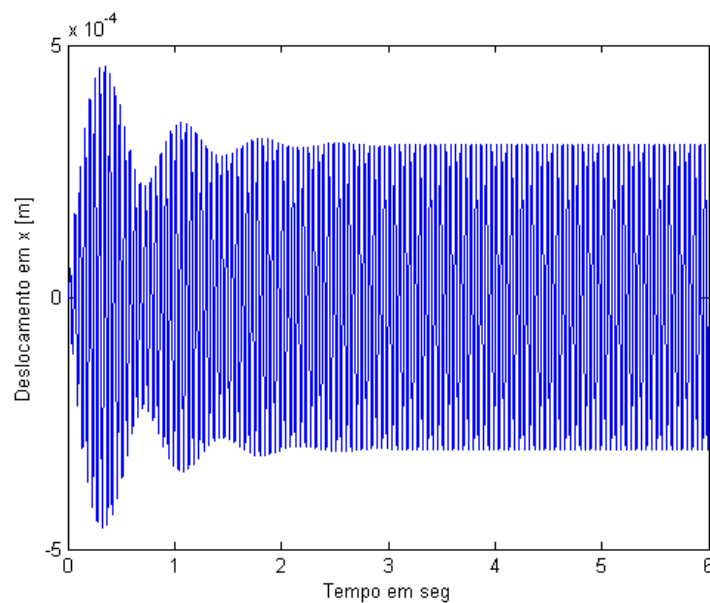


Figura 6. História de deslocamento do nó 6 na direção x.

### 3.4. Simulação do movimento do material sobre a pista do transportador

Utilizando o modelo de movimento de peças transportadas, apresentado na Seção 3, foram obtidos os resultados apresentados nas fig. (7) a (10), que permitem avaliar as características cinemáticas do movimento de uma peça isolada ao longo da pista, em termos de deslocamento, velocidade e aceleração.

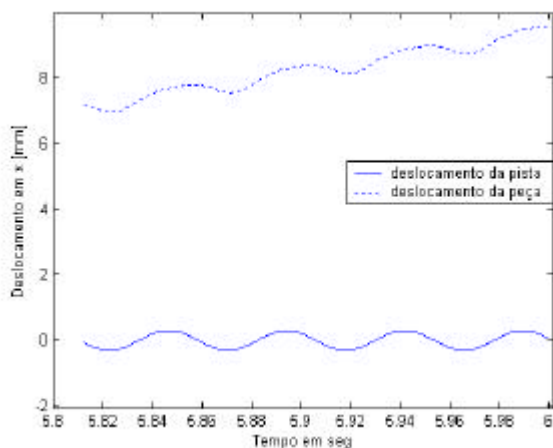


Figura 7. Deslocamentos na direção horizontal.

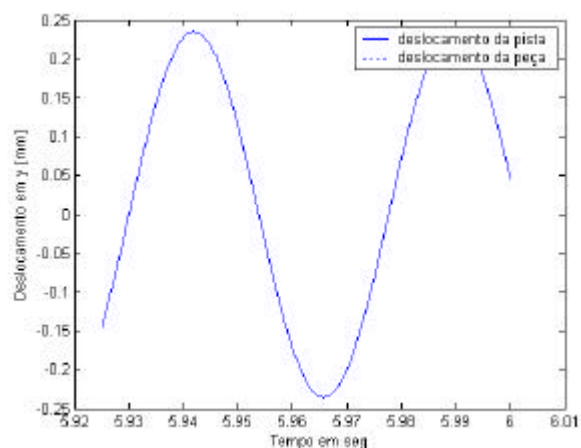


Figura 8. Deslocamentos na direção vertical.

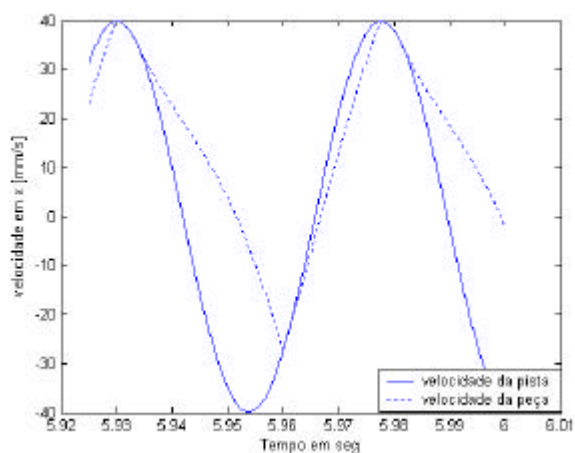


Figura 9. Velocidades na direção horizontal.

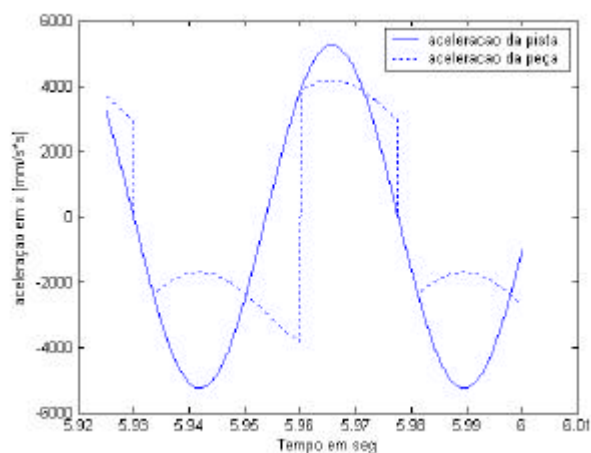


Figura 10. Acelerações na direção horizontal.

Pode-se observar através da Fig. (6) que ocorre deslocamento horizontal da peça ao longo da pista do transportador, enquanto esta última realiza um movimento oscilatório, fato que valida a concepção de transportadores vibratórios acionados por pastilhas piezelétricas. Na fig. (7) verifica-se o mesmo deslocamento vertical para o transportador e a peça transportada, indicando há não ocorrência de desprendimento da peça com a pista (vão). Nas figuras (8) e (9) pode-se observar a variação entre movimento de recuo relativo, repouso relativo e avanço relativo da peça.

#### **4. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO**

Para a realização dos experimentos foi construído o protótipo de transportador vibratório linear destinado à realização de ensaios experimentais, o qual está apresentado na Fig.2. Foi tomada como configuração-base um transportador já existente, acionado por mecanismo motor-biela-manivela estudado por Martins (2001). O sistema original de acionamento foi substituído por pastilhas piezelétricas fixadas às molas do transportador.

O PZT (titanato-zirconato de chumbo) foi escolhido para a confecção dos acionadores do transportador vibratório, devido a sua característica de elevada capacidade de geração de esforços e de maior eficiência na transformação de energia elétrica em mecânica (elevado fator de acoplamento eletromecânico).

Foi realizada uma primeira análise para verificação da funcionalidade do dispositivo desenvolvido. Nesta etapa o protótipo foi acionado com uma voltagem de 79 Volts (máximo 254 Volts) em cada uma das pastilhas, verificando-se transporte de peças sobre a pista do transportador vibratório, validando assim a concepção de transportadores vibratórios acionados por pastilhas piezelétricas.

#### **5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS**

As simulações numéricas e os primeiros experimentos permitiram comprovar a viabilidade técnica de se empregar elementos piezelétricos como acionadores de transportadores vibratórios, o que pode trazer amplas vantagens com relação aos tipos tradicionais de acionamento. As ferramentas numéricas de simulação desenvolvidas, baseadas na técnica de elementos finitos, mostram-se eficientes e úteis na caracterização do movimento do material transportado, devendo, no futuro, ser utilizadas para otimização do projeto dos transportadores vibratórios. Foi depositado pedido de patente do dispositivo descrito neste trabalho (Protocolo provisório número 46303), prevendo-se em futuro próximo sua fabricação em escala industrial.

#### **6. AGRADECIMENTOS**

E. B. Albuquerque agradece ao CNPq e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU pela concessão de sua bolsa de mestrado. D. A. Rade agradece ao CNPq pelo suporte às suas atividades de pesquisa através do processo 501051/2003-1.

#### **7. REFERÊNCIAS**

- Albuquerque, E. B., 2004, Concepção e análise de desempenho de um transportador vibratório linear com acionamento piezelétrico, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFU; “em andamento”;
- Allik, H.; Hughes, T.J.R., 1970, Finite Element Method for Piezoelectric Vibration, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol 2, pp 151-157;
- Banks, H.T., Smith, R.C., Wang, Y., 1996, Smart Material Structures: Modeling, Estimation and Control, Wiley \_ Masson Research in Applied Mathematics Series;
- Lima J.J., 1999, Modelagem de sensores e atuadores piezelétricos com aplicações em controle ativo de Estruturas, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Campinas;
- Martins, R.S., 2001, Modelagem de transportador vibratório linear, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, UFU;
- Senol Utku, 1998, Sc. D, Theory of adaptive Structures, by CRC press LLC.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

### VIBRATORY CONVEYORS ACTIVATED BY PIEZOELECTRIC PATCHES

#### Emerson Bastos de Albuquerque

Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2160 – Campus Santa Mônica – Bloco 1M - Uberlândia/MG CEP: 38400-902

[ebalbuquerque@mecanica.ufu.br](mailto:ebalbuquerque@mecanica.ufu.br)

#### Domingos Alves Rade

Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2160 – Campus Santa Mônica – Bloco 1M - Uberlândia/MG CEP: 38400-902

[domingos@ufu.br](mailto:domingos@ufu.br)

#### João Carlos Mendes Carvalho

Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2160 – Campus Santa Mônica – Bloco 1M - Uberlândia/MG CEP: 38400-902

[jcmendes@mecanica.ufu.br](mailto:jcmendes@mecanica.ufu.br)

**Abstract.** *Vibrating conveyors have been wide by used in many branches of the industrial sector for the transport and orientation of parts and bulk material. In this work it is proposed a novel configuration of linear vibration feeders based on the use of piezoelectric materials for motion generation. Such materials offer the possibility of complete integration within the structure with little added mass, which makes them very attractive for motion generation, as compared traditional excitation devices. The results of numerical simulations obtained by using a finite element model of the feeder, combined with a dynamic model for the motion of the transported material are first presented. Such results demonstrate the operational features of the vibration feeder. Then, a prototype of the device which has been constructed for experimental evaluation, is described.*

**Key Words:** *Vibrating conveyors, Vibration, piezoelectricity, finite elements.*