

COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM TRANSPORTADOR VIBRATÓRIO LINEAR UTILIZANDO A TÉCNICA DE ELEMENTOS FINITOS

Roberto de Souza Martins

João Carlos Mendes Carvalho

Domingos Alves Rade

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica

Laboratório de Automação e Robótica, 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil.

E-mail: rsmartins@engenheiro.com.br, jcmendes@mecanica.ufu.br, domingos@ufu.br

Resumo

A simulação de transportadores vibratórios tem sido bastante utilizada para tentar prever a velocidade de transporte de um material sob sua pista. Apesar disto e de sua grande utilização na indústria, ainda tem-se grandes discrepâncias entre a velocidade real de transporte e a velocidade simulada. Uma das características deste tipo de equipamento responsável por esta discrepância, é a forma de excitação da pista, que em vários estudos é considerada constante ao longo de todo o comprimento da pista e igual a forma de onda imposta pelo excitador, o que nem sempre é verdade. Neste trabalho apresenta-se um estudo do comportamento dinâmico do sistema transportador+material transportado. Para isto utiliza-se a técnica de modelagem por elementos finitos para obtenção do comportamento da pista. Estes dados são aplicados em um modelo de movimento do material, permitindo calcular a sua velocidade média. Os resultados são comparados com uma sequência de imagens obtida com uma câmara de alta velocidade.

Palavras-chave: Transportadores vibratórios, Elementos Finitos, Simulação, Automação

1. INTRODUÇÃO

Modernas linhas de produção estão em constante mudança com o objetivo de obter aumento da produtividade com redução dos custos. Desta forma, a melhoria tem se dado em diversos pontos, entre estes se destaca o transporte de peças ou parte de peças do estoque a linha de produção ou entre postos de trabalho de uma mesma linha.

Um dos equipamentos que é bastante utilizado neste transporte é o transportador vibratório, seja ele circular, utilizado para seleção e orientação de peças, ou linear, mais utilizado no transporte de peças entre dois pontos. Este equipamento possui um baixo custo de operação, montagem e manutenção, podendo ser associado a outros processos durante o transporte (rebarbamento, resfriamento, lavagem, secagem, entre outras).

O transportador vibratório utiliza o movimento oscilatório, provocado por um excitador, para o transporte do material sobre a sua pista, onde o atrito entre a pista e o material é o responsável pela transmissão do movimento do transportador aos produtos a serem transportados. Basicamente, estes transportadores são compostos de quatro partes

fundamentais; sistema de excitação, pista, elemento elástico e a base. Tem-se notícia de que são utilizados desde o princípio do século em minas de carvão (Gaberson, 1983).

Tendo o transporte do material como objetivo final, a modelagem dos transportadores vibratórios busca calcular a sua velocidade de transporte, que é função, principalmente, do coeficiente de atrito, do ângulo de inclinação da pista e do excitador (amplitude, frequência e ciclo de excitação). Diante disto, muitas pesquisas tem sido desenvolvidas com este objetivo, e trazem informações a respeito dos parâmetros que influenciam nesta velocidade (Povydaylo, 1959 e 1960), (Both, 1964), (Gladwell e Mansour, 1971), (Gaberson, 1972). Apesar de sua grande utilização na indústria e de ser pesquisado por vários autores, apenas se conseguiu obter bons resultados em pequenas faixas de operação. Isto pode ser explicado em função de simplificações nos modelos teóricos, tais como: ocorrência ou não do repique da peça no retorno à pista após a fase de salto; desconsideração do deslocamento e deformação das molas e da pista (flexão e torção); relação entre os modos de vibração da pista e movimento da peça; limite entre os coeficientes de atrito estático e o cinemático, entre outras. Também consideram que a pista possui o mesmo movimento do excitador, bem como possui também, o mesmo movimento ao longo de todo o seu comprimento.

Carvalho e Dahan (1991) verificou vários problemas relativos a validade dos destes modelos matemáticos simplificados, sendo o que mais se destaca, a inexistência de relação entre a forma de excitação da pista e a sua resposta dinâmica.

Nas verificações experimentais realizadas com transportadores vibratórios industriais excitados por sistema eletromagnético (Martins, Carvalho e Rade, 1998) ficou evidente a diferença entre o modelo matemático de movimento da pista, largamente utilizado, e o movimento real observado. A modelagem normalmente utilizada considera que a pista tem excitação senoidal pura.

Para o caso de transportadores vibratórios com deslocamento imposto, onde se conhece a amplitude, frequência e forma do ciclo de excitação, considera-se, usualmente, que o movimento da pista é idêntico ao movimento imposto.

Martins, Carvalho e Rade (1999) utilizam a técnica de elementos finitos para determinar o comportamento dinâmico de um transportador vibratório linear com deslocamento imposto, obtendo resultados satisfatórios. Utilizando esta técnica, em conjunto com um modelo matemático de movimentação do material sobre a pista do transportador, neste trabalho apresentamos os resultados da simulação do comportamento dinâmico do sistema transportador+material transportado. Também é apresentado uma confrontação dos dados da simulação com a sequência de filmagem do movimento de uma peça em um protótipo de transportador vibratório. Esta sequência foi obtida com um câmara de alta velocidade.

A simulação por elementos finitos foi realizada com o programa ANSYS[®] V5.2 através do qual obteve-se as matrizes de massa e rigidez elementares. De posse destas matrizes, as respostas ao deslocamento imposto do transportador, em regime harmônico permanente, foram calculadas em ambiente MATLAB[®] empregando uma formulação fundamentada nas relações de flexibilidade dinâmica. A simulação numérica do comportamento do material foi realizado, utilizando como dados de entrada o comportamento da transportador, e as equações do movimento do material escritas para diferentes fases do movimento, também em ambiente MATLAB. Este programa de simulação foi construído de forma a permitir variação em vários parâmetros que influenciam no transporte.

2. MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS

A montagem do modelo de elementos finitos (EF) foi baseada em um protótipo de transportador vibratório linear, excitado por mecanismo biela-manivela, mostrado na figura 1. O modelo foi montado utilizando o programa ANSYS[®] V5.2, buscando representar, de forma

simplificada, as características do protótipo. Assim os componentes do transportador foram modelados da seguinte forma:

- Pista: elemento BEAM3 (elemento de viga bidimensional de Euler-Bernoulli, com 2 nós e 3 gdl por nó). A pista foi discretizada com 68 elementos de 5mm de comprimento e 69 nós.
- Molas: as lâminas foram discretizadas com 10 elementos utilizando o elemento BEAM3. As molas foram consideradas engastadas à base fixa.
- Conexões das molas com a pista: suas inércias foram modeladas através de elementos de massa concentrada MASS21;
- Barra acionadora: foi empregado o elemento BEAM54 (elemento de viga bidimensional com seção transversal variável, com 2 nós e 3 gdl por nó).

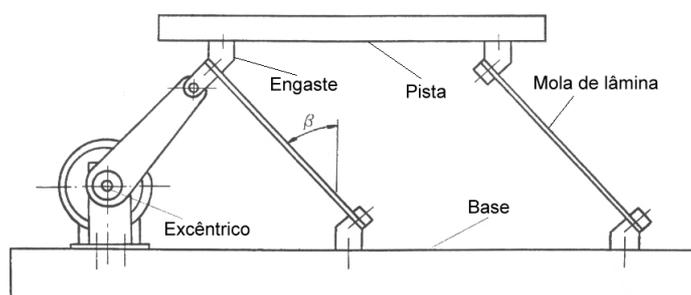


Figura 1: Esquema do protótipo construído.

As valores das propriedades físicas dos materiais, utilizados para a geração do modelo, com um número total de 294 graus de liberdade, são fornecidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores das propriedades físicas utilizados no modelo de EF

Componente	Material	Característica	Valor
Pista e barra acionadora	alumínio	Módulo de Young Densidade Coeficiente de Poisson	$7,1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 2770 Kg/m^3 0.3
Mola T (próximo ao ponto de excitação)	aço	Módulo de Young Densidade Coeficiente de Poisson	$2,08 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 7750 Kg/m^3 0.3
Mola F	aço	Módulo de Young Densidade Coeficiente de Poisson	$2,11 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 7750 Kg/m^3 0.3
Conexões	aço	Massa	0,14 Kg

As principais simplificações foram consideradas na modelagem das conexões das molas de lâmina com a pista e com a base fixa. Enquanto que no protótipo estas conexões foram realizadas através de blocos de fixação (ver Fig. 1), no modelo foram admitidas ligações pontuais rígidas dos nós extremos das molas com a pista e a base fixa. Desta forma, já se previa a necessidade de se realizar o ajuste posterior do modelo para adequar a rigidez das molas à situação real do protótipo. Martins, Carvalho e Rade (1999) apresentam a metodologia de ajuste a que foi submetido o modelo, chegando a resultados satisfatórios.

Após o ajuste e validação do modelo, obteve-se as suas matrizes de massa e rigidez elementares. De posse destas matrizes, as respostas ao deslocamento imposto, em regime harmônico permanente, foram calculadas em ambiente MATLAB[®] empregando uma

formulação fundamentada nas relações de flexibilidade dinâmica. As respostas dinâmicas obtidas são constituídas das histórias temporais da aceleração, velocidade e deslocamento em pontos previamente selecionados sobre a pista.

2. DINÂMICA DA MASSA SOBRE A PISTA

As características do movimento de uma massa sobre a pista de um transportador vibratório, podem ser equacionadas através de uma análise convencional da dinâmica do movimento. Assim, para obter as equações do movimento de uma massa sobre a pista considera-se o sistema de eixo fixo no espaço, mostrado na figura 2, onde também se apresenta as forças que agem sobre esta massa. Esta massa é considerada pontual e não sofre rolamento sobre a pista

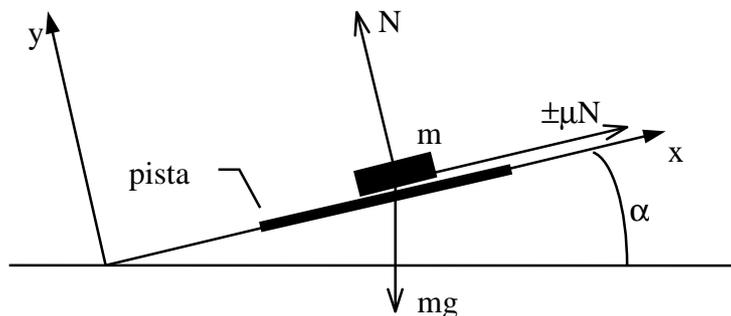


Figura 2: Sistema de coordenadas e forças atuantes em uma massa colocada sobre uma pista inclinada.

Nas equações o índice p refere-se à movimentação da pista do transportador vibratório obtida através do modelo de EF e m à massa. Um ponto sobre uma letra representa a velocidade, enquanto dois pontos representa a aceleração.

De acordo com as forças mostradas na figura 1, as equações governantes do movimento da massa são:

$$\ddot{x}_m = \pm\mu \cdot \frac{N}{m} - g \cdot \sin(\alpha) \quad (1)$$

$$\ddot{y}_m = \frac{N}{m} - g \cdot \cos(\alpha) \quad (2)$$

onde α é a inclinação da pista e μ é o atrito regido pela Lei de Coulomb e oposto ao movimento relativo entre a massa e a pista. Para efeito de cálculo considerou-se apenas o atrito estático.

Da análise do sistema, pode-se afirmar que a massa possui quatro possíveis modos de movimento sobre a pista (Martins, 1997):

a) Repouso relativo: neste modo, a massa move-se com a mesma velocidade da pista e a condição necessária para que isto ocorra é:

$$\dot{x}_m = \dot{x}_p \quad e \quad \dot{y}_m = \dot{y}_p \quad (3)$$

Sendo que este modo continua até uma das condições abaixo sejam violadas.

$$N > 0$$

$$\begin{aligned}\ddot{x}_p + \mu \cdot \frac{N}{m} + g \cdot \sin(\alpha) &\geq 0 \\ \ddot{x}_p - \mu \cdot \frac{N}{m} + g \cdot \sin(\alpha) &\leq 0\end{aligned}\quad (4)$$

b) Deslizamento para trás: modo onde a massa desliza para trás em relação à pista e as condições necessárias são:

$$\begin{aligned}N &> 0 \\ \ddot{x}_p - \mu \cdot \frac{N}{m} + g \cdot \sin(\alpha) &> 0\end{aligned}\quad (5)$$

Para que ocorra o término deste modo de movimento é necessário que a relação $\dot{x}_m - \dot{x}_p < 0$ seja violada.

c) Deslizamento para frente: neste modo, a massa move-se deslizando para frente em relação à pista e a condição necessária é dada por:

$$\begin{aligned}N &> 0 \\ \ddot{x}_p + \mu \cdot \frac{N}{m} + g \cdot \sin(\alpha) &< 0\end{aligned}\quad (6)$$

onde a mudança deste modo ocorre quando a condição $\dot{x}_m - \dot{x}_p > 0$ for falsa.

d) Salto: nesta fase, a massa perde o contato com a pista, sendo que a condição para que isto ocorra é:

$$N = 0\quad (7)$$

Este modo termina quando $y_m - y_p = 0$.

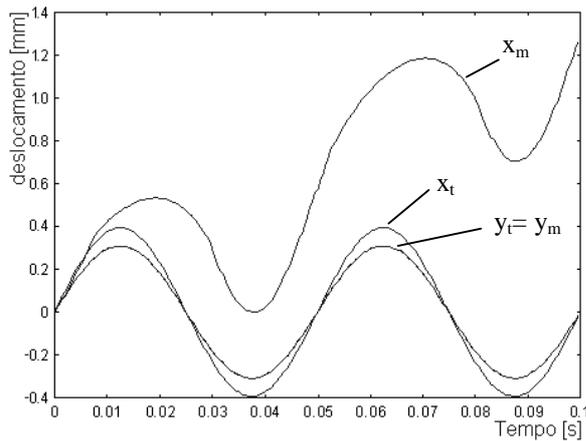
O movimento da massa consiste na combinação de todos os quatro modos apresentados anteriormente.

O programa de simulação do movimento da massa consiste destes quatro modos de movimento, e foi desenvolvido para trabalhar em ambiente MATLAB, utilizando os dados de aceleração, velocidade e deslocamento obtidos do programa de simulação do movimento da pista.

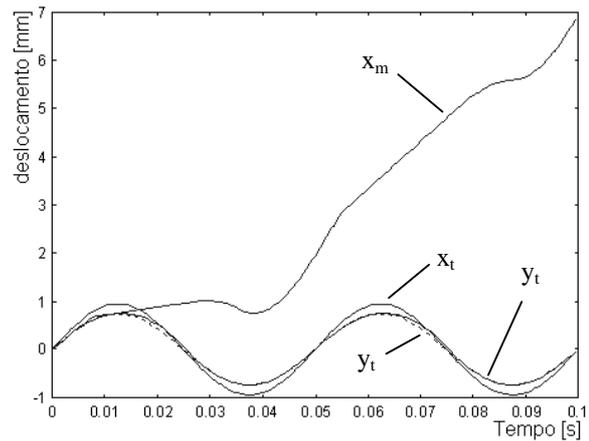
3. SIMULAÇÕES DO MOVIMENTO DA MASSA

O programa de simulação foi construído de forma a permitir diferentes características para o excitador, em termos de amplitude e frequência. Nas simulações apresentadas neste trabalho, mostramos como diferentes características de excitação influenciam no transporte do material sobre a pista. Em todas as simulações aqui apresentadas, considerou-se o ângulo de inclinação da pista ($\alpha=0^\circ$) e o coeficiente de atrito entre a peça e a pista ($\mu=0.465$) constante.

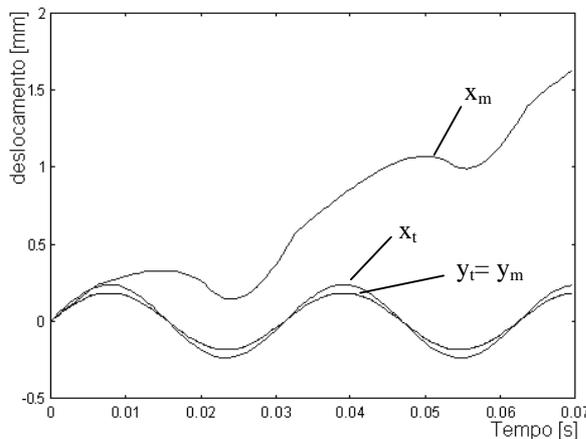
A seguir apresenta-se gráficos contendo os perfis de deslocamento da peça e da pista, para diferentes amplitudes de deslocamento e frequência de excitação.



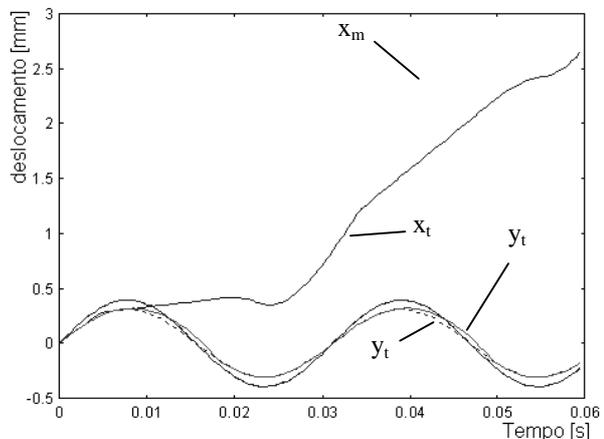
(a) 20 Hz e amplitude 0,5 mm
Vel. média = 14,65 mm/s



(b) 20 Hz e amplitude 1,2 mm
Vel. média = 103,31 mm/s



(c) 32 Hz e amplitude 0,3 mm
Vel. média = 27,70 mm/s



(d) 32 Hz e amplitude 0,5 mm
Vel. média = 72,42 mm/s

Figura 3: Perfil de deslocamento da pista e da peça, em x e y, com amplitude de 0,5 mm.

Analisando estes gráficos, temos que mantendo a frequência constante verifica-se um grande aumento da velocidade média de deslocamento da peça sobre a pista, observado entre as figuras 3.a e 3.b e entre as figuras 3.c e 3.d. Isto pode ser explicado pelo fato de ocorrer uma mudança nas fase do deslocamento da peça, ou seja, para o caso 3.a a peça move-se apenas por deslocamento e no caso 3.b ela move-se por deslocamento e por salto. O mesmo acontece entre os casos "c" e "d".

Analisando apenas em função da frequência, entre as figuras 3.a e 3.d, pode-se observar que também ocorre uma mudança nas fases do movimento da peça.

4. FILMAGEM DO TRANSPORTE E COMPARAÇÃO COM A SIMULAÇÃO

Para realização deste ensaio, foi utilizado uma câmara de alta velocidade (até 2000 quadros/s), onde foi possível filmar o movimento da peça sobre a pista do transportador vibratório. O teste foi realizado com o protótipo sendo excitado em uma frequência de 32 Hz, e filmado com uma taxa de 500 quadros/s. A sequência de filmagem é mostrada na figura 4, enquanto que na figura 5, mostra-se a simulação de um ciclo do movimento da peça para as mesmas condições de excitação da pista. Na sequência de filmagem a peça move-se da direita para a esquerda, tendo como ponto de referência um risco no lado direito das figuras.

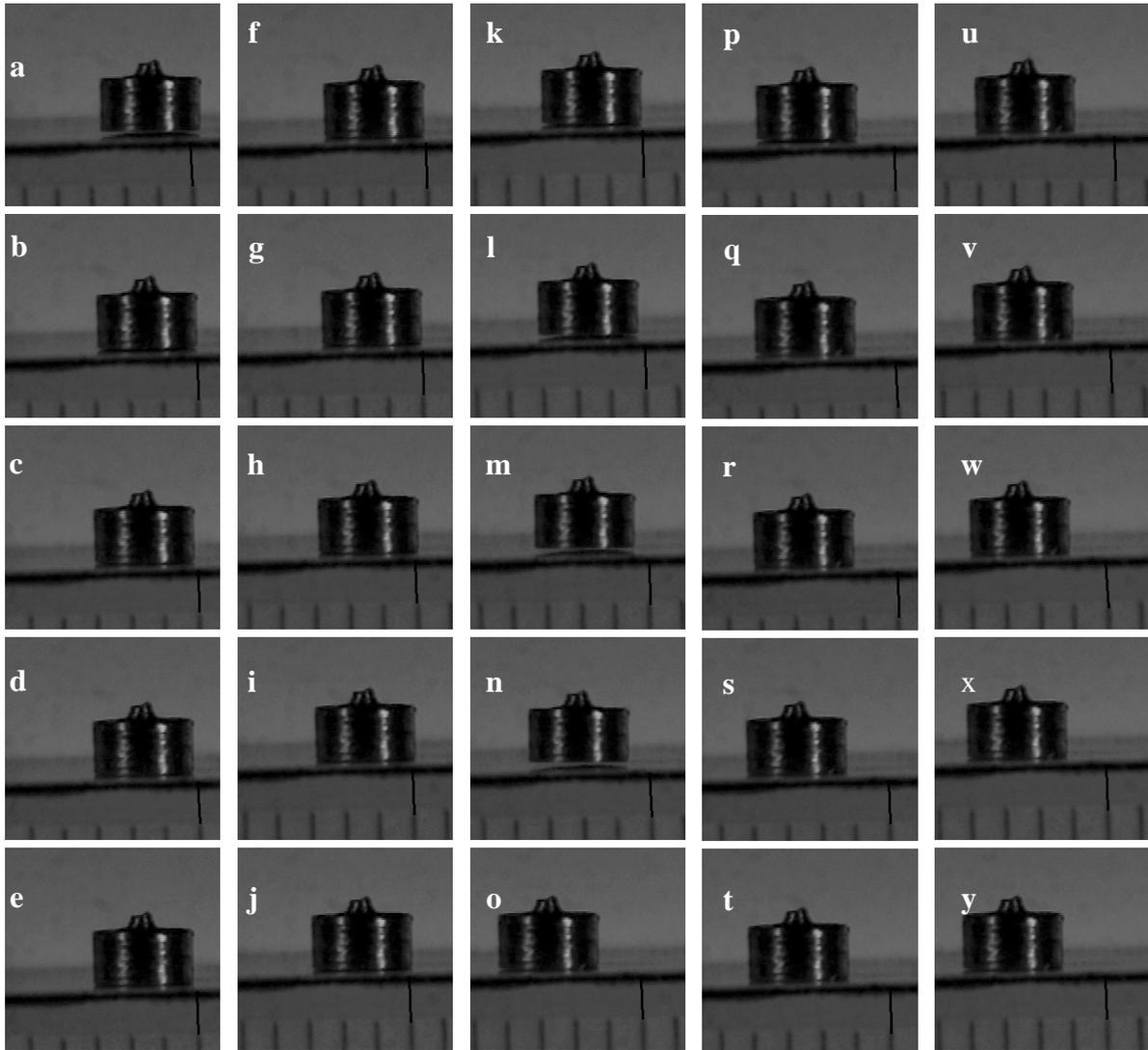


Figura 4: Sequência de filmagem realizada sobre um protótipo.

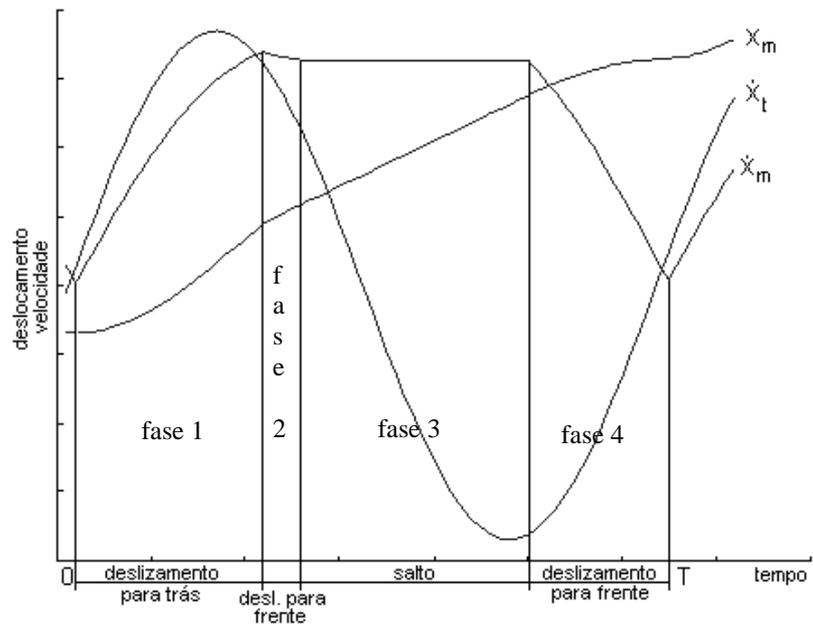


Figura 5: Simulação dos modos de movimento da peça com as características de excitação da filmagem.

Comparando-se a simulação com a filmagem, podemos verificar uma boa correlação. Na figura 4, os quadros 4.a a 4.d, referem-se a fase final de um ciclo do movimento. De 4.e à 4.t, temos um ciclo completo, e em 4.u temos o início de um novo ciclo.

Analisando o ciclo completo temos:

- de 4.e a 4.h, a peça move-se com deslizamento para trás, correspondendo a fase 1 da simulação;
- entre 4.h e 4.j, temos a fase2, que tanto na simulação, quanto na filmagem o deslizamento é desprezível;
- de 4.k à 4.p, verificamos a fase de salto correspondente a fase 3;
- de 4.q à 4.s, temos a finalização do ciclo, correspondendo a fase 4 da simulação.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado a simulação do movimento de uma peça sobre a pista de um transportador vibratório, utilizando a técnica de elementos finitos em conjunto com um modelo matemático para o movimento da peça. Através disto foi avaliado o movimento da peça com diferentes parâmetros, identificando a influência que eles exercem sobre o movimento. Para validação da técnica, também foi apresentado uma comparação dos resultados da simulação com quadros de uma filmagem, onde foi possível verificar uma boa correlação entre elas.

REFERÊNCIAS

- Booth, J. H.; McCallion, H , 1964, On Predicting the Mean Conveying Velocity of a Vibrating Conveyor, Proc. Inst. Mech. Engineers, 178(20), pp. 521-538.
- Carvalho, J. C. M.; Dahan, M.,1991, Transporteurs vibrants excités par des mécanismes plans à quatre barres, Proc. COMEFIN 3, Brasov, Romênia, pp.: 243-248.
- Gaberson, H. A., 1972, Particle Motion on Oscillating Conveyors - The Equations of Motion and the Rules for Predicting Motion Form Transitions - Part I, Trans. ASME, J. of Engng. for Industry, pp. 50-56.
- Gaberson, H. A.,1972, Particle Motion on Oscillating Conveyors - Practical Solutions to the Equations of the Motion and the Extension of the Theory to Beds of Granular Material - Part II, Trans. ASME, J. of Engng for Industry, pp. 57-63.
- Gaberson, H. A., "A Review of Vibratory Conveyor Technology", Productive Applications of Mechanical Vibrations (AMD)", vol. 52, 1983, pp. 1-13.
- Gladwell, G. M. L., Mansour, W. N., "Simulation of Vibratory Feeder", Computer Aided Engrg. Symp., Univ. of Waterloo, 1971, pp. 215-249.
- Martins, R. S, Carvalho, J. C. M., Rade, D. A., 1998, Estudo Teórico e Experimental de Transportadores Vibratórios Lineares com Excitação Eletromagnética, V Congresso de Engenharia Mecânica Norte Nordeste –CEM NNE 98, 27 a 30 de Outubro, Fortaleza, vol. 1, pp. 49-55.
- Martins, R. S, Carvalho, J. C. M., Rade, D. A., 1999, "Finite Element Modeling and Experimental Investigation of a Linear Vibratory Conveyor", Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 22 a 26 de Novembro, Águas de Lindóia, Brasil.
- Povidaylo, V. A., 1959, Design Calculations and Construction of Vibratory Hoppers, Machines and Tooling, 30(2), pp. 5-9.
- Povidaylo, V. A., 1960, Optimun Vibratory Feeder Operating Conditions, Machines and Tooling, 31(5), pp. 2-6.