

ESTUDO DE DISPOSITIVOS NÃO-LINEARES PARA AMORTECIMENTO DE VIBRAÇÕES EM SISTEMAS DINÂMICOS

ANDRÉ MARQUES BARBOSA¹, FRANCISCO PAULO LÉPORE NETO².

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de metodologias de automatização de ensaios experimentais aplicados a duas classes de problemas. O primeiro é relacionado ao estudo do comportamento dinâmico de dispositivos viscoelásticos não lineares capazes de dissipar energia vibratória em diversos sistemas dinâmicos, como máquinas e equipamentos. A metodologia desenvolvida permite identificar, com um reduzido número de ensaios, os parâmetros físicos de modelos de materiais viscoelásticos, expressos pela rigidez complexa. O segundo problema estudado trata da lubrificação entre corpos cilíndricos e esféricos com uma placa plana. Neste caso, foi desenvolvido um programa computacional em plataforma LabVIEW[®] para comunicação da máquina de ensaios PLINT com o computador, permitindo determinar o valor da espessura do filme de óleo formado e o valor do atrito gerado durante os ensaios.

Palavras-chave: materiais viscoelásticos, lubrificação hidrodinâmica, automatização de ensaios experimentais.

¹ Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia – Campus Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila 2121, Uberlândia/MG, CEP 38408-902, andremarkez@yahoo.com.br

² Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia – Campus Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila 2121, Uberlândia/MG, CEP 38408-902, flepore@mecanica.ufu.br

Abstract: This work presents the development of methodologies of automatization of experimental trials applied to two classes of problems. The first is related to the study of the dynamic behavior of non linear viscoelastic devices able to dissipate vibratory energy in various dynamic systems, as machines and equipment. The methodology developed allows identifying, with a small number of trials, the physical parameters of models of viscoelastic materials, expressed by the complex rigidity. The second problem studied deals of the lubrication between cylindrical and spherical bodies with a flat plate. In this case, it was developed a computational program in LabVIEW[®] platform to communication of the machine of trials PLINT with the computer, allowing determining the value of the thickness of the film of oil formed and the value of the friction generated during the trials.

Keywords: viscoelastic materials, hydrodynamic lubrication, automatization of experimental trials.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho está inserido numa linha de pesquisa do laboratório de Sistemas Mecânicos (LSM) dedicada ao estudo do comportamento dinâmico dispositivos não lineares com aplicação ao projeto de suspensões de máquinas e equipamentos submetidos a vibrações mecânicas. O projeto de iniciação científica teve foco no desenvolvimento de técnicas de automatização de procedimentos experimentais.

É importante notar que o comportamento não linear pode ser oriundo da configuração geométrica da suspensão ou ainda do emprego de materiais que possuem propriedades não lineares, fato que ocorre nos elastômeros bem como nos dispositivos de atrito tipo Coulomb.

A metodologia proposta foi desenvolvida a fim de realizar a caracterização das estruturas não lineares, no domínio da frequência e do tempo, resultando em modelos matemáticos e computacionais, onde os parâmetros devem ser fisicamente interpretáveis, e possuir validade em uma ampla faixa de condições operacionais. Estes modelos não lineares desenvolvidos devem também ser acopláveis a modelos de máquinas e equipamentos, sendo possível a simulação do sistema dinâmico com a inclusão desses efeitos não lineares.

Os modelos dos sistemas dinâmicos, juntamente com a inclusão dos efeitos não lineares devem ser utilizados para a obtenção de respostas a diversos tipos de excitação, sendo que essas respostas devem ser utilizadas para a avaliação da eficiência do dispositivo não linear e sua otimização com vistas à atenuação da amplitude das vibrações, bem como diminuição da transmissibilidade de suspensões ao solo e ainda, para o caso de aplicações veiculares, o aumento do conforto do motorista e/ou da dirigibilidade do veículo.

Com relação ao uso e à caracterização do comportamento dinâmico de elastômeros viscoelásticos, desenvolveu-se então uma metodologia capaz de identificar, em um número reduzido de ensaios, os parâmetros físicos dos modelos de materiais viscoelásticos que são comumente encontrados no mercado. Os resultados encontrados durante a execução do projeto são descritos ao longo deste trabalho.

A automatização dos ensaios experimentais foi desenvolvida utilizando sistemas de aquisição de sinais conectados a microcomputadores. Nos ensaios de vibração há necessidade adicional de controlar o sistema de excitação e sincronizá-lo com a aquisição dos sinais. Desta forma é possível automatizar os ensaios de modo integrado.

Uma aplicação adicional foi desenvolvida. Foi desenvolvida uma interface em ambiente LabVIEW[®] para controlar o ensaio de corpos esféricos e cilíndricos em contato com uma placa plana, separadas por um filme de lubrificante. Neste caso foi utilizada uma máquina já existente no Laboratório de Tribologia de Materiais (LTM), na qual foi incorporada uma interface de aquisição de sinais. Os sinais adquiridos são utilizados para determinar a espessura do filme e o atrito entre os corpos em contato.

2. MODELOS DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS

2.1 Série de Prony

Derivadas fracionárias: O comportamento viscoelástico pode ser representado por uma expansão em série cujos parâmetros representam as seguintes propriedades físicas:

$G_R(t)$ – módulo cisalhante de relaxação

$$G_\infty(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} G_R(t) \quad (1)$$

e

$$G_0 = G_R(t = 0) \quad (2)$$

DOMÍNIO DO TEMPO

Módulo específico de relaxação:

$$g_R(t) = \frac{G_R(t)}{G_0} \quad (3)$$

$$g_R(t) = 1 - \sum_{i=1}^N g_i \left(1 - e^{-t/\tau_i}\right) \quad (4)$$

DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Armazenamento:

$$G'(\omega) = G_0 \left[1 - \sum_{i=1}^N g_i \right] + G_0 \sum_{i=1}^N \frac{g_i \tau_i^2 \omega^2}{1 + \tau_i^2 \omega^2} \quad (5)$$

Perda:

$$G''(\omega) = G_0 \sum_{i=1}^N \frac{g_i \tau_i \omega}{1 + \tau_i^2 \omega^2} \quad (6)$$

O módulo de elasticidade para o comportamento em tração e compressão (E) pode ser calculado a partir do módulo de cisalhamento. Considerando o material praticamente incompressível resulta $E = 3 G$.

A técnica de identificação é resumida nas seguintes etapas:

1. Escolher o número de termos da série (N);
2. Adotar valores iniciais de G_0 , g_i e τ_i ;
3. Calcular $G'(\omega)$ e $G''(\omega)$ para a banda de frequências do ensaio experimental;
4. Calcular a FRF do sistema vibratório com os parâmetros G_0 , g_i e τ_i ;
5. Realizar os experimentos determinando a FRF do sistema vibratório;
6. Calcular o resíduo (R) entre os valores experimentais e os calculados na etapa anterior;
7. Minimizar $R(G_0, g_i \text{ e } \tau_i)$.

2.2 Rigidez Complexa

Para dispositivos viscoelásticos discretamente distribuídos numa estrutura complexa é possível (e de maior eficiência computacional) utilizar o conceito da rigidez complexa para representar o dispositivo. Esta abordagem é aproximada. A formulação é a seguinte:

$$K^* = \theta \cdot E_C (1 + i\eta_C) \quad (7)$$

Onde K^* é a rigidez complexa do dispositivo, E_C é o módulo de armazenamento e η_C o fator de perda. θ é um fator de forma.

Para esta abordagem, o procedimento de identificação é semelhante ao apresentado anteriormente, mas o modelo físico do sistema vibratório é formulado explicitamente com K^* , resultando E_C e η_C .

As propriedades identificadas podem ser utilizadas em programas de elementos finitos permitindo desenvolver projetos de suspensões com geometria complexa e realizar simulações computacionais. Este assunto não faz parte do escopo deste trabalho.

3. DISPOSITIVOS VISCOELÁSTICOS

Os ensaios experimentais foram realizados utilizando duas bancadas. Numa o dispositivo viscoelástico é instalado numa mesa vibratória de um grau de liberdade, na outra o dispositivo é fixado diretamente a uma coluna rígida. A Figura 1 apresenta as montagens experimentais:

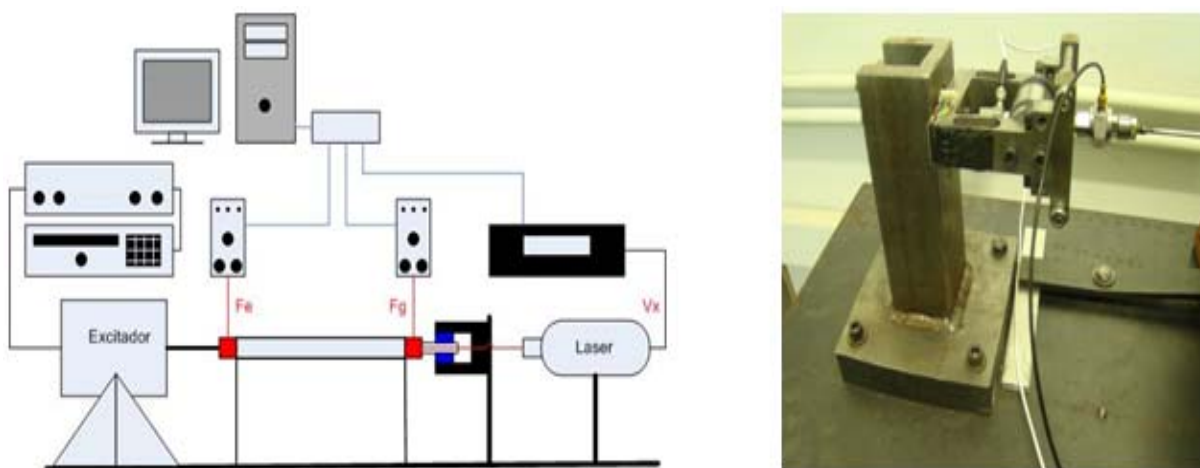


Figura 1 – Montagens experimentais para identificação de dispositivos viscoelásticos.

Os sinais V_x , F_e e F_g são adquiridos simultaneamente por uma interface NI – 6123S instalada num microcomputador. Neste caso foi elaborada uma rotina computacional na plataforma LabVIEW® para controlar a aquisição dos sinais e o processamento dos dados.

Numa segunda abordagem a interface de aquisição foi substituída por um analisador de espectros com capacidade de cálculo das FRFs. Neste caso uma rotina computacional transfere as FRFs para o microcomputador. Os arquivos de dados têm formato texto e é usado o MATLAB® para o pós-processamento.

Para o ensaio com excitação harmônica o gerador de sinais é ajustado para produzir um sinal senoidal com frequências na banda de 40 Hz a 70 Hz. Em cada frequência o ganho do amplificador de potência é regulado para que o valor RMS da velocidade V_x seja igual a 2.12 mm/s ou 2.23 mm/s. Para este ajuste o sinal da saída do Laser é conectado ao analisador SD380 (não mostrado na Figura 1) onde se calcula seu valor RMS através do estimador da função auto-densidade espectral, utilizando a média de 40 amostras de 2048 pontos cada. As frequências expressas em Hz, usadas nestes ensaios, são: 40, 45, de (48 a 62) com incremento de 1 Hz, 65 e 70.

As condições de digitalização dos sinais em todos os experimentos são as seguintes:

- Frequência de amostragem: $f_s = 2048$ Hz;
- Número de pontos por amostra: $n = 16384$;
- Número de amostras: 40.

Como consequência destes ajustes, os estimadores das funções densidade espectral serão calculados com resolução em frequência $df = 0.125$ Hz. Como os filtros passa-baixa foram ajustados com frequência de corte de 1 kHz para as forças e 1.2 kHz para a velocidade, não há ocorrência do fenômeno de ‘aliasing’.

Com vistas a realizar os experimentos de maneira automática, como são feitos pelos analisadores como o Agilent® 35670A, optou-se pela utilização de um sistema de aquisição National Instruments que permite a aquisição dos sinais em estado bruto, sem tratamento, acoplado a um gerador de sinais B&K. Neste sistema de instrumentação os sinais são adquiridos para serem posteriormente utilizados pelas metodologias de análise de sinais adequadas a sistemas não lineares.

Assim, foi necessário também o aprendizado de técnicas de instrumentação, como por exemplo, a calibração de aparelhos, e também técnicas de manuseio dos aparelhos disponíveis no laboratório, os quais são utilizados para a realização dessa instrumentação.

De forma subsequente, foi feito um estudo minucioso sobre o analisador de sinais dinâmicos da Agilent[®], modelo 35670A mostrado na Figura 2, que é capaz de realizar o ensaio de Frequency Sweep de maneira automática.

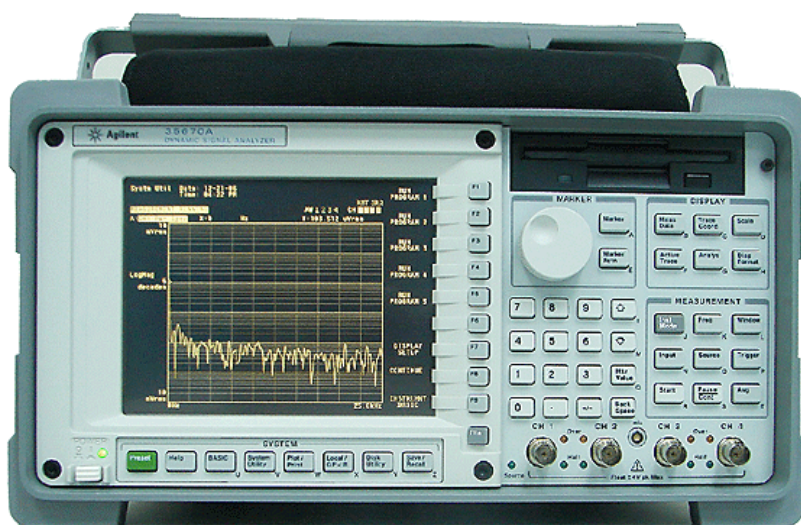


Figura 2 - Analisador de sinais dinâmicos da Agilent[®], modelo 35670A.

Após inúmeros testes no aparelho foram implementadas técnicas para a realização dos ensaios: definição da frequência de aquisição; ajuste dos fundos de escala de amplitude do sinal, definição do tempo total de amostragem; o tratamento estatístico dos sinais por meio de médias, e salvamento dos dados obtidos. Estes dados salvos em arquivos de texto e também por meios de gráficos gerados pelo próprio equipamento.

Para o ensaio com excitação por ruído branco o gerador de sinais é ajustado para produzir um sinal gaussiano na banda de 2 Hz a 2 kHz. O ganho do amplificador de potência é regulado para que o valor RMS da velocidade V_x seja igual a 2.12 mm/s ou 2.23 mm/s. Para este ajuste o sinal da saída do Laser é conectado ao analisador SD380, que calcula o valor RMS da excitação através do estimador da função densidade de probabilidade na banda de 0 a 100 Hz, utilizando a média de 40 amostras de 2048 pontos cada.

A Figura 3 apresenta o analisador SD380:



Figura 3 – Ensaios com ruído branco: dispositivo viscoelástico e Analisador SD380.

Nos ensaios com ruído branco foram analisados três tipos de elastômeros, diferenciados de acordo com suas propriedades, sendo classificados em moles, médios ou duros. Para cada tipo de borracha, foram realizados 6 ensaios, totalizando assim 18 ensaios, que foram realizados da seguinte forma:

- a) Para cada tipo de borracha, modificou-se os parâmetros de entrada, onde diferenciou-se a amplitude de tensão de deformação em três valores distintos: 50, 70 e 90;
- b) Para cada um desses três valores, fez-se dois ensaios: com e sem pré-carga;
- c) Em cada ensaio foi realizado um total de 50 médias dos valores coletados, garantindo assim uma vasta gama de situações abordadas, e conseqüentemente a veracidade do ensaio;
- d) Em cada caso foram plotados três modelos de gráficos, em ordem de seqüência: o primeiro gráfico retrata a relação aceleração/força em função da freqüência, o segundo retrata o valor do ângulo em função da freqüência e o terceiro mostra a coerência do ensaio para cada valor de freqüência.

As figuras seguintes apresentam os resultados obtidos nos ensaios com ruído branco.

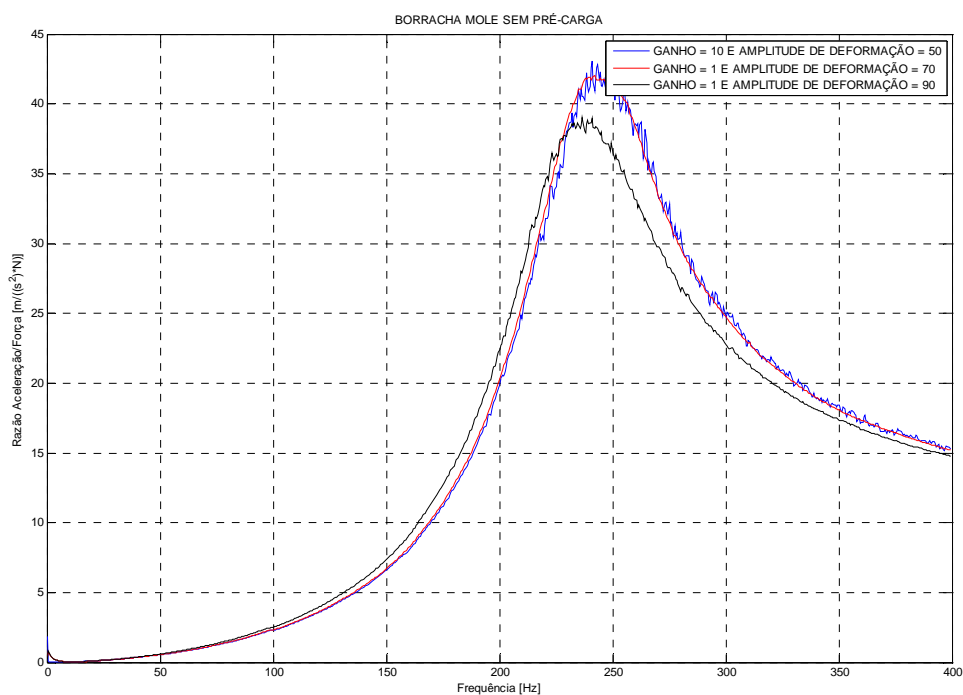


Figura 4 – Borracha mole, sem pré-carga, amplitude de deformação 50, 70 e 90.

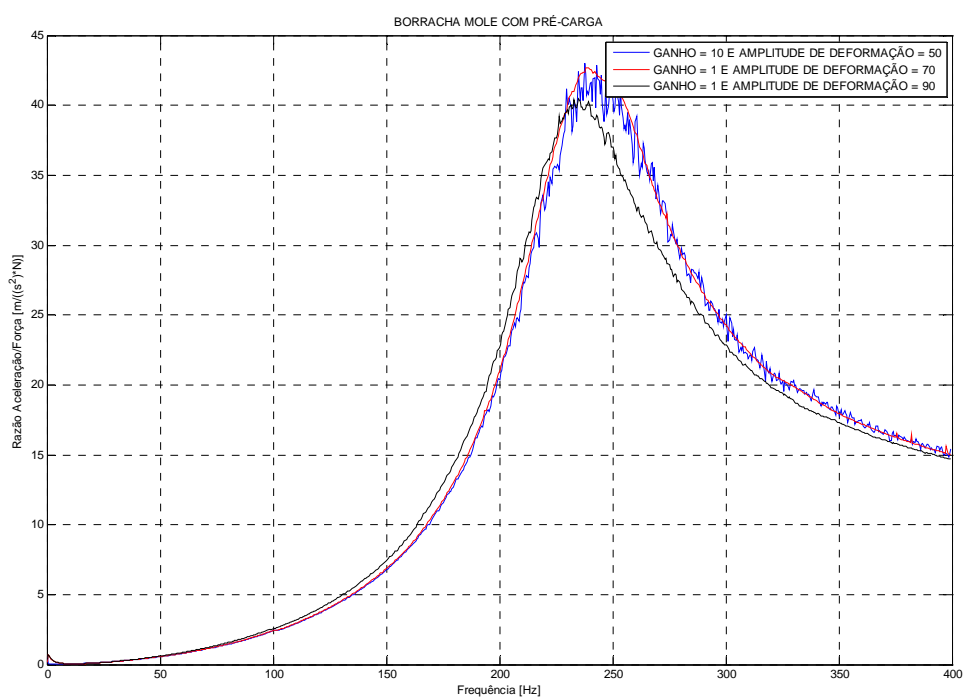


Figura 5 – Borracha mole, com pré-carga, amplitude de deformação 50, 70 e 90.

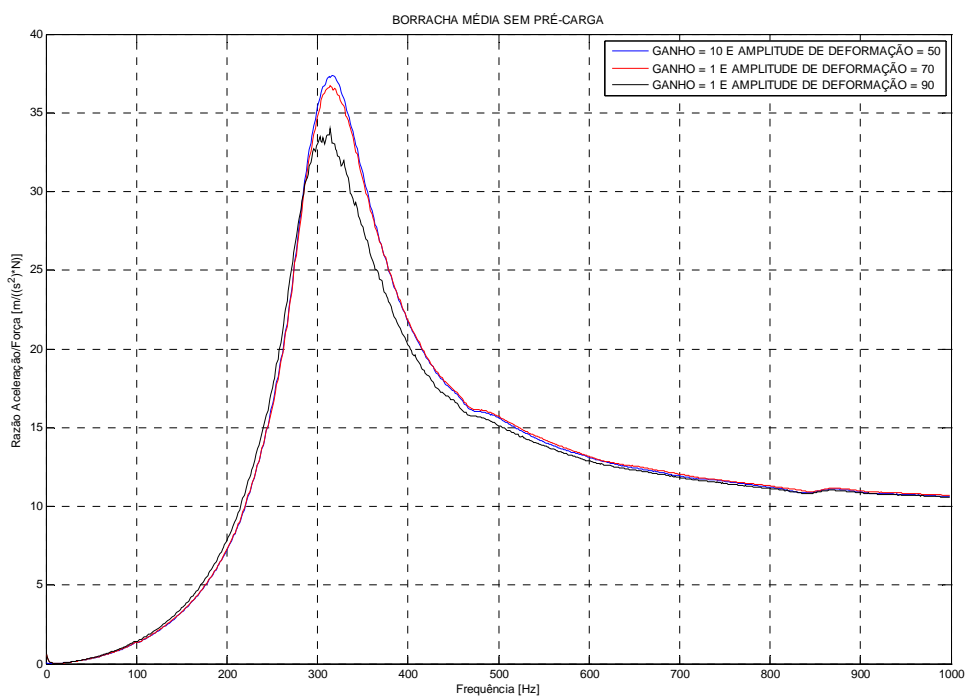


Figura 6 – Borracha média, sem pré-carga, amplitude de deformação 50, 70 e 90.

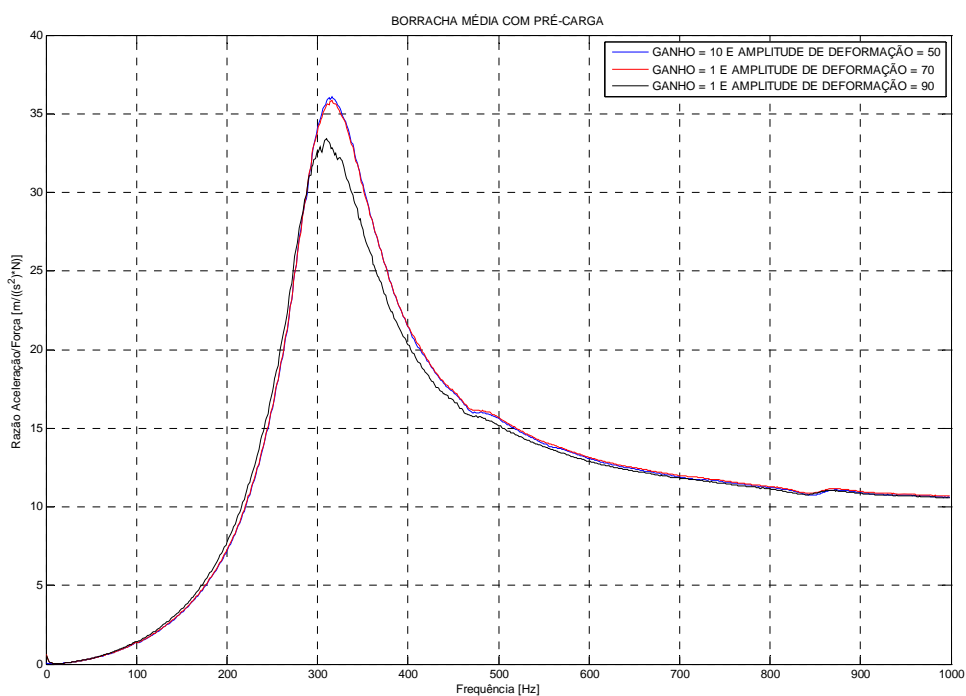


Figura 7 – Borracha média, com pré-carga, amplitude de deformação 50, 70 e 90.

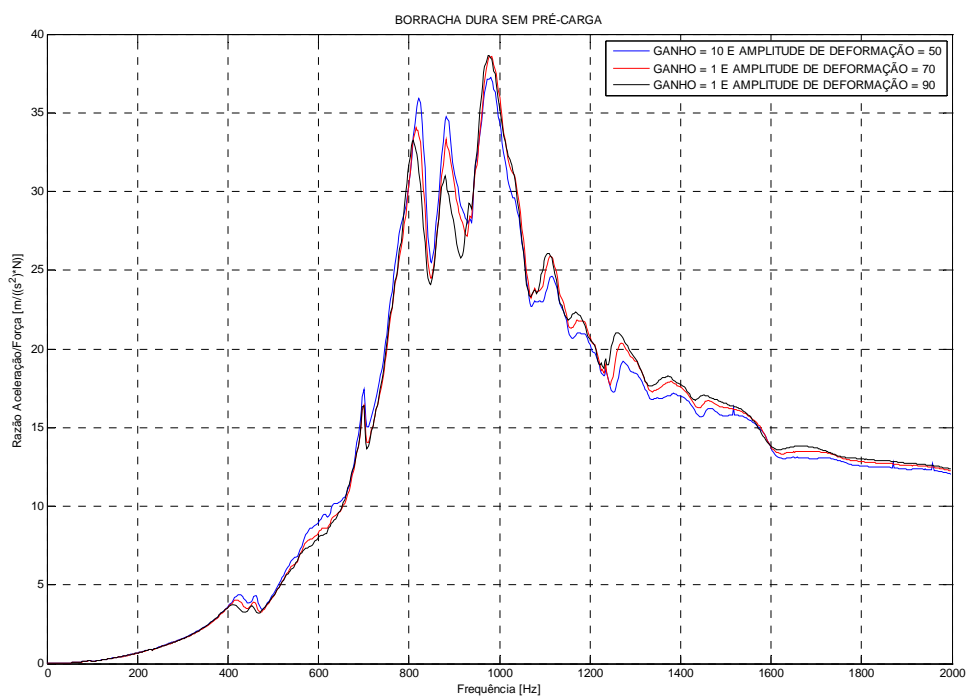


Figura 8 – Borracha dura, sem pré-carga, amplitude de deformação 50, 70 e 90.

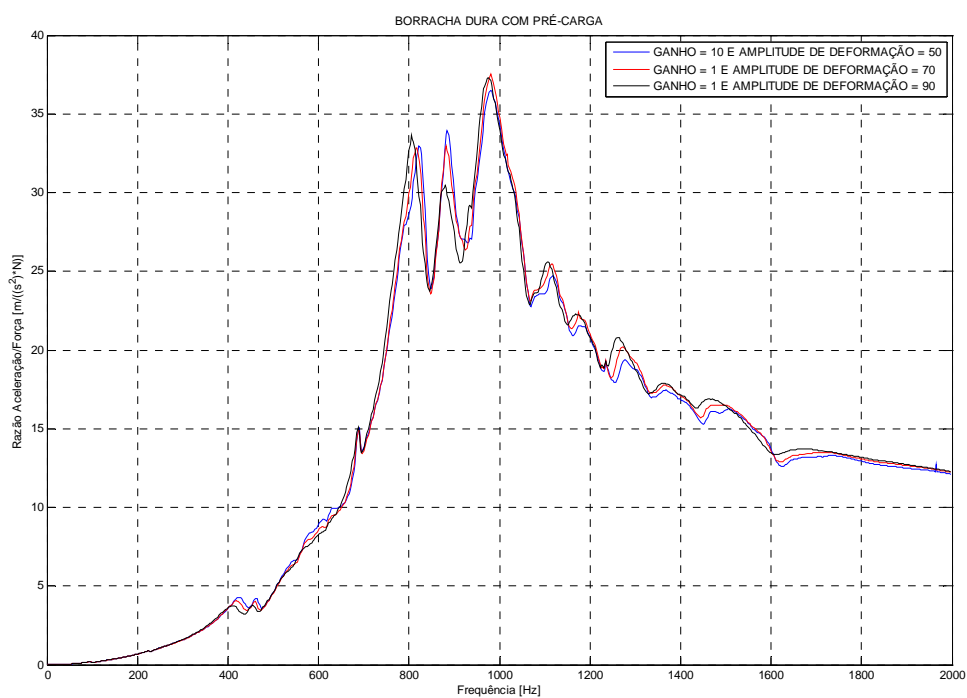


Figura 9 – Borracha dura, com pré-carga, amplitude de deformação 50, 70 e 90.

A análise destes resultados, assim como a identificação das propriedades dos materiais viscoelásticos estão fora do escopo do trabalho.

4. AUTOMATIZAÇÃO DE EXPERIMENTO DE LUBRIFICAÇÃO HIDRODINÂMICA

Para a realização do ensaio, se faz necessário a utilização de diversos equipamentos, que são mostrados na Figura 10 abaixo:



Figura 10 – Máquina PLINT com módulo BNC-2110 e sensor de medição de capacitância utilizados na realização do ensaio.

Para a determinação da espessura do filme de óleo, seja entre cilindro e placa ou entre esfera e placa, nos ensaios tribológicos através do sensor de medição de capacitância, utilizou-se o módulo de aquisição da National Instruments, NI BNC-2110, mostrado na Figura 11, e a plataforma LabVIEW[®] para desenvolvimento do software. A opção pelo módulo da National Instruments é justificada pela flexibilidade nas aplicações numéricas, maior rapidez de processamento e menor suscetibilidade ao erro, além de se garantir 100% de compatibilidade entre o módulo e a plataforma LabVIEW[®].

Os sinais coletados na máquina PLINT são enviados a um sensor de medição de capacitância, o qual contém um circuito que determina o valor da capacitância formada entre a esfera e a placa plana, enviando esses dados ao módulo BNC-2110 que está conectado ao computador. No programa feito em LabVIEW[®], são feitos todos os cálculos necessários para a determinação da espessura do filme de óleo, que será mostrado posteriormente.

Durante os ensaios, utilizou-se uma amostra quadrada e uma esfera de 10 mm de diâmetro, com lubrificante UNIGEROL 90 (Óleo para transmissões mecânicas – extrema pressão). O sensor de capacitância projetado possui uma saída linear na faixa de 200 a 2000 pF. As figuras abaixo retratam os equipamentos utilizados no experimento:



Figura 11– Módulo NI BNC-2110 da National Instruments[®].

A escolha do software LabVIEW[®] como plataforma para criação do programa, além da compatibilidade com o módulo BNC-2110, se deu pelo fato do LabVIEW[®] simular com extrema facilidade o painel de uma máquina qualquer. Assim sendo, a interação homem/máquina fica mais atraente e facilitada, uma vez que estando o programa feito, não é necessário conhecimento avançado em programação para poder operar o mesmo, possibilitando que qualquer pessoa minimamente treinada possa usá-lo.

Outro fator positivo de se utilizar o LabVIEW[®] é a facilidade em se construir o programa nesta plataforma, pois o mesmo não utiliza programação em texto, e sim programação visual, dispensando então a necessidade de decorar comandos e funções, tornando ao mesmo tempo um programa mais fácil de se entender e construir, além de ser um programa confiável e que possui bons algoritmos para a realização de cálculos matemáticos e computacionais.

O programa então desenvolvido é composto por partes distintas, ou seja, por janelas onde o usuário entra com os valores iniciais, verifica o ensaio em tempo real e ainda pode ver os valores obtidos durante o ensaio.

A Figura 12 abaixo retrata a primeira janela do programa, onde o usuário de entrará com os dados necessários para a execução do programa durante a realização do ensaio. Nesta janela, o usuário deverá preencher campos com as informações desejadas, sendo 3 campos distintos:

Figura 12 – Tela inicial do programa desenvolvido para a determinação do atrito e da espessura do filme de óleo.

4.1 Dados Iniciais ao Ensaio

Para determinar qual será a frequência de aquisição de dados pelo módulo, este campo deve ser preenchido com as seguintes informações:

- a) Resolução espacial - Distância entre coletas;
 - Refere-se à distância desejada entre uma coleta de dados e outra, ou seja, a cada quantos milímetros o operador deseja ter os dados coletados pelo módulo.
- b) Amplitude movimento (desloc. máx.);

- É a distância percorrida pela máquina PLINT durante seu movimento de um ciclo de rotação, sendo sua unidade em milímetros.

c) Frequência de oscilação da PLINT.

- Frequência de oscilação da máquina dada em Hertz, ou seja, quantos ciclos ela fará em 1 segundo.

Após a entrada desses valores, o programa é capaz de calcular então a frequência de aquisição do módulo BNC-2110, a partir da seguinte relação:

$$\Delta s = S_0 \cdot \left(1 - \cos \frac{f_{oscilacao} \cdot 2\pi}{f_s} \right) \quad (8)$$

Onde:

- Δs = resolução espacial desejada;
- S_0 = amplitude do movimento alternativo (regulada manualmente na PLINT);
- $f_{oscilacao}$ = frequência do movimento alternativo;
- f_s = frequência de aquisição.

Isolando f_s na Equação 8 acima, tem-se que a frequência de aquisição deve ser:

$$f_s = \frac{f_{oscilacao} \cdot 2\pi}{\cos^{-1} \left(1 - \frac{\Delta s}{S_0} \right)}. \quad (9)$$

4.2 Modelo utilizado

Neste campo, o operador deve informar qual o tipo de ensaio será feito, bem como as características dos materiais utilizados em questão. Logo, devem ser fornecidos os seguintes dados:

- a) Tipo de Ensaio: utilizando esfera ou cilindro;
- Tal escolha é de fundamental importância para a realização dos ensaios, uma vez que para cada estrutura utilizada tem-se uma fórmula para a determinação da capacitância e conseqüentemente análises diferentes do resultado final.
- b) Dimensões da esfera ou cilindro;
- As propriedades do material são de extrema importância para a execução do ensaio, sendo necessário o conhecimento de sua geometria, sendo necessário informar tanto para o cilindro como para a esfera o valor do raio e no caso do cilindro informar também o seu comprimento.
- c) Permissividade Relativa do Óleo lubrificante.
- É o valor relativo da permissividade do óleo em comparação ao vácuo. O conhecimento de tal valor se faz necessário para cálculos realizados no programa para se determinar a espessura do filme de óleo.

Com esses dados disponibilizados, é possível então calcular a espessura do filme de óleo formado, sendo necessário também o conhecimento do valor da capacitância gerada, sendo este valor adquirido pela placa mostrada anteriormente neste projeto. Assim, a Equação 10 refere-se à fórmula usada para a determinação da capacitância entre um cilindro e uma placa:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_o l}{\cosh^{-1}\left(1 + \frac{h_o}{r}\right)} \quad (10)$$

Onde:

- C = Capacitância;
- ϵ_r = Permissividade relativa do óleo;
- ϵ_o = Permissividade do vácuo;
- h_o = espessura do filme de óleo;
- r = raio da esfera ou cilindro utilizado.

Isolando então h_o , que é a espessura do filme de óleo, tem-se a seguinte relação:

$$h_o = \left(\cosh\left(\frac{\varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot 2\pi \cdot l}{C}\right) - 1 \right) \cdot r \quad (8)$$

4.3 Controle de Tempo e Dados de armazenamento

Neste campo, o operador deve entrar com o tempo de duração do ensaio e o local onde será salvo o arquivo gerado pelo programa. Assim, deve-se preencher os seguintes dados:

- a) Tempo de duração do ensaio;
 - É o tempo de duração do ensaio, evitando erros de cronometragem por parte do operador, evitando assim ensaios mais longos ou mais curtos do que o desejado.

- b) Local onde o arquivo será salvo;
 - Permite ao operador escolher onde será salvo os dados do ensaio, visando uma maior segurança do arquivo gerado, evitando perdas de dados, sendo os dados salvos diretamente no disco rígido em extensão .txt.

- c) Tamanho final do arquivo (aproximadamente).
 - O conhecimento sobre o tamanho final do arquivo se faz necessário para evitar que um ensaio muito longo estoure a capacidade de armazenamento do computador, o que pode acontecer em casos de valores de frequência de aquisição, número de pontos ou até tempo de duração do ensaio sejam muito altos.

Preenchidos todos esses campos, o programa já está pronto para capturar e processar os dados adquiridos pelo módulo BNC-2110. Assim, o operador deve passar para a próxima janela a fim de verificar em tempo real a aquisição de dados, podendo visualizar o valor da espessura de óleo e do atrito gerado pelo movimento da placa. Os dados adquiridos são processados pelo programa e mostrados em gráficos, como pode ser verificado na Figura 13 abaixo:



Figura 13 – Gráficos mostrando valores da espessura do filme de óleo, gerados durante a realização de um ensaio.

O diagrama de blocos do programa desenvolvido pode ser verificado na Figura 14, mostrada abaixo. Nele pode-se verificar o estilo de programação utilizado pelo software LabVIEW[®], onde a programação é feita através de blocos de funções já existentes ou criadas para a execução do programa pelo programador.

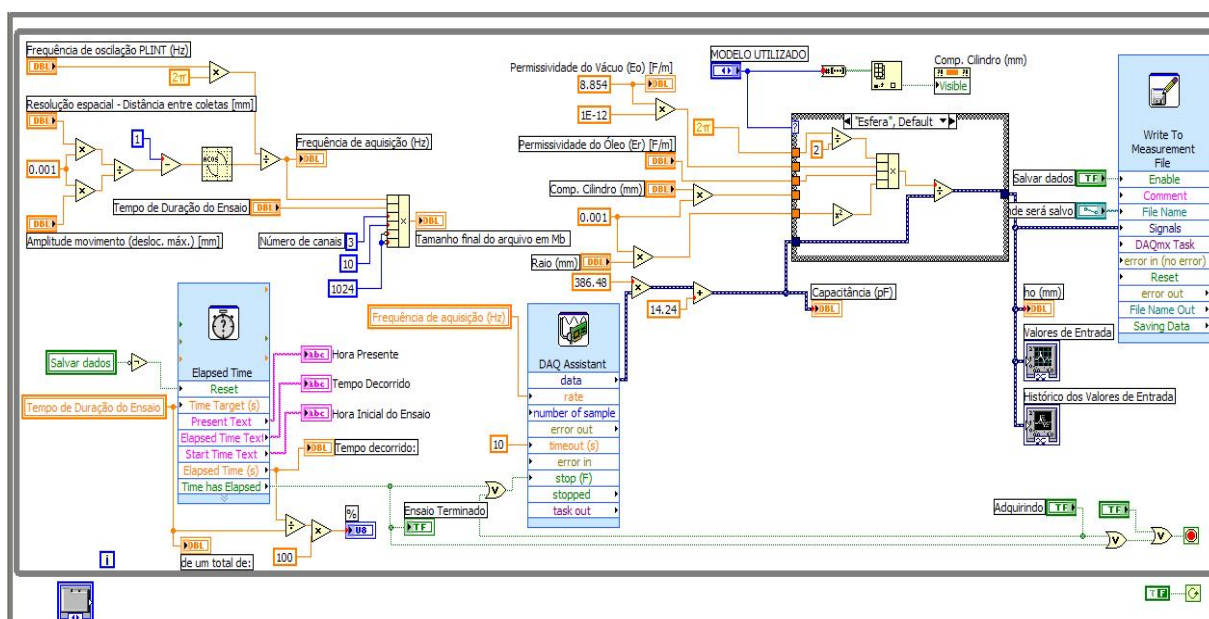


Figura 14 – Diagrama de blocos, onde é feita a execução lógica do programa.

Através de vários ensaios realizados no laboratório, verificou-se que todo o sistema aqui desenvolvido funcionou de forma estável e coesa, obtendo resultados satisfatórios conforme o desejado. Assim, com a criação deste programa, facilitou-se então a determinação da espessura de filme de óleos utilizados na lubrificação de ensaios hidrodinâmicos, bem como o valor do atrito gerado.

5. CONCLUSÃO

A metodologia desenvolvida neste trabalho para identificar os parâmetros físicos de modelos de materiais viscoelásticos mostrou-se satisfatória devido ao fato de necessitar de um número reduzido de ensaios. O programa desenvolvido em questão atende às necessidades encontradas no projeto, capaz de determinar valores de espessura de filme de óleo e atrito de forma rápida e com boa aproximação, uma vez que a plataforma utilizada contém bons algoritmos de cálculo, garantindo a veracidade e aplicabilidade do programa desenvolvido.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo e por fornecer a bolsa de estudo através do programa PIBIC, à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pela total assistência e fornecimento de equipamentos necessários para a execução deste projeto. Aos professores Marcelo Braga dos Santos e Henara Lilian Costa pelo grande auxílio prestado, e ao Germano Ferreira Santos, companheiro de laboratório, sendo de vital importância para a conclusão deste.

Agradecemos também à FAPEMIG projeto TEC 296-06 e TEC 1970-06 pelo fornecimento de equipamentos, bancadas e demais itens necessários para a conclusão deste projeto.

7. BIBLIOGRAFIA

AGILENT TECHNOLOGIES – Agilent 35670A Dynamic Signal Analyzer Operator's Guide, out. 2000

AGILENT TECHNOLOGIES – Agilent 35670A Dynamic Signal Analyzer GPIB Programming, out. 2000

AGILENT TECHNOLOGIES – Agilent 35670A Dynamic Signal Analyzer Using Instrument BASIC, out. 2000

BITTER, R.; MOHIUDDIN, T; NAUWROCKI, M., LabVIEW® advanced programing techniques, CRC, 2001.

CURI, E.I.M.; Sistema de Monitoramento e Detecção de Transição de Regime de Lubrificação em Mancal de Deslizamento, 2003

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J., Fundamentos de Física, Volume 3: eletromagnetismo, tradução e revisão técnica BIASI, R. S., Rio de Janeiro: LTC, 2009.

HARTOG, J. P. Den.; Vibrações nos sistemas mecânicos. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1972.

INMAN, Daniel J.; Engineering Vibration, Prentice Hall, 2001.

JOST, H. P. Lubrification (Tribology) – A Report on the present position and industry's needs. London, Department of education and science: 1-79, 1966.

THOMPSON, W. T. Teoria da vibração. Rio de Janeiro: Interciência, 1978.

WILLIAMS, J. A.; Engineering Tribology, Oxford, Oxford University Press, 1994.