

ESTUDO DA FORÇA DE ATRITO DINÂMICA EM ENSAIO DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO A SECO

María Cristina Moré Farías

Marcia Marie Maru

José Francisco dos Santos

Linilson Rodrigues Padovese

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo, SP, Brasil. E-mail:crffer@usp.br

RESUMO

Nos ensaios de deslizamento, é comum observar-se sons audíveis acompanhando o processo de atrito e desgaste. Isso sugere presença de flutuações dinâmicas de forças e movimentos na região do contato. Entre os parâmetros que podem provocar flutuações da força de atrito em ensaios de deslizamento, tem-se as vibrações introduzidas no sistema durante os ensaios, originadas do próprio equipamento e/ou pela interação entre as asperezas no contato entre as amostras. Este trabalho apresenta uma caracterização dinâmica da força de atrito de ensaios a seco em equipamento pino-contra-disco, relacionando-a com a força de atrito média e com os mecanismos de desgaste. Como principais resultados, notou-se que as frequências observadas no espectro de densidade de potência do sinal da força de atrito não dependeram da velocidade de rotação e estão relacionadas com os mecanismos de desgaste atuantes. Notou-se ainda uma modulação das amplitudes das frequências dominantes com o nível de força de atrito média em função da velocidade de rotação. Essas observações evidenciaram que o sinal da força de atrito analisado dinamicamente mostrou ser sensível às variações nos resultados tribológicos quanto ao atrito e mecanismos de desgaste do par ensaiado.

Palavras-chave: Vibração, Atrito, Desgaste, Análise de sinais

1. INTRODUÇÃO

O deslizamento relativo de dois corpos em contato é geralmente acompanhado de um som audível, e tais sons são indicativos da presença de flutuações dinâmicas de forças e movimentos na região de contato, que são de natureza aleatória.

É conhecido que os resultados de atrito e desgaste de pares de materiais apresentam elevada dispersão, o que é muitas vezes atribuído à natureza aleatória dos fenômenos envolvidos na interação entre corpos.

Uma causa para a dispersão encontrada nos resultados tribológicos pode ser atribuída ao desconhecimento do conteúdo dinâmico dos parâmetros envolvidos no atrito e desgaste. Entre esses parâmetros dinâmicos, citam-se a rugosidade das amostras, a dinâmica das interações entre asperezas no contato das amostras, e as flutuações dinâmicas devido a vibrações provocadas pela excitação estrutural da máquina. Devido a essas excitações, podem ocorrer flutuações de forças e movimentos tanto na direção normal como tangencial às amostras.

Essas flutuações afetariam as medições de força de atrito, produzindo dispersões nos resultados tribológicos de atrito e desgaste.

A contínua formação e quebra das junções das asperezas resulta em flutuações na força de atrito, mesmo sob carga normal constante e vibrações na direção normal ausentes, tendo o fenômeno de atrito uma natureza estatística (Soom e Kim, 1983).

Segundo Kumar e Swarnamani (1997), as vibrações induzidas pela força de atrito gerada entre superfícies em contato dependem da combinação dos materiais em contato, dos parâmetros experimentais, como carga e velocidade, e especificamente das características do sistema de ensaio tais como frequência natural, inércia das fixações e componentes. Dessa forma, mudanças nas superfícies em contato poderiam ser detectadas pelo monitoramento das vibrações.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo caracterizar dinamicamente o sinal da força de atrito obtido em ensaios de desgaste por deslizamento rotativo a seco, realizados em máquina tipo pino-contra-disco, em função da velocidade de rotação. Outro objetivo é relacionar as informações contidas nos espectros do sinal dinâmico da força de atrito com os respectivos valores médios de força de atrito e com os mecanismos de desgaste observados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados para os ensaios foram pinos cilíndricos de extremidade cônica (ângulo de 45°) e discos planos, ambos de material cerâmico (Al_2O_3) e com acabamento retificado na face de ensaio. A Figura 1A mostra a geometria das amostras utilizadas.

3.1 Equipamento de ensaio de desgaste e instrumentação para aquisição de sinal

O equipamento de ensaio de desgaste utilizado foi do tipo pino-contra-disco rotativo, com aplicação de carga normal por sistema de peso morto, conforme esquema mostrado na Figura 1B. A Figura 1C mostra o esquema de fixação da célula de carga utilizada para a medição de força de atrito.

Utilizou-se uma célula de carga tipo viga com 4 extensômetros de 350 ohms montados em ponte de *Wheatstone*. Essa célula é posicionada na máquina de modo a resistir à força tangencial atuante no pino, conforme mostrado na Figura 1C.

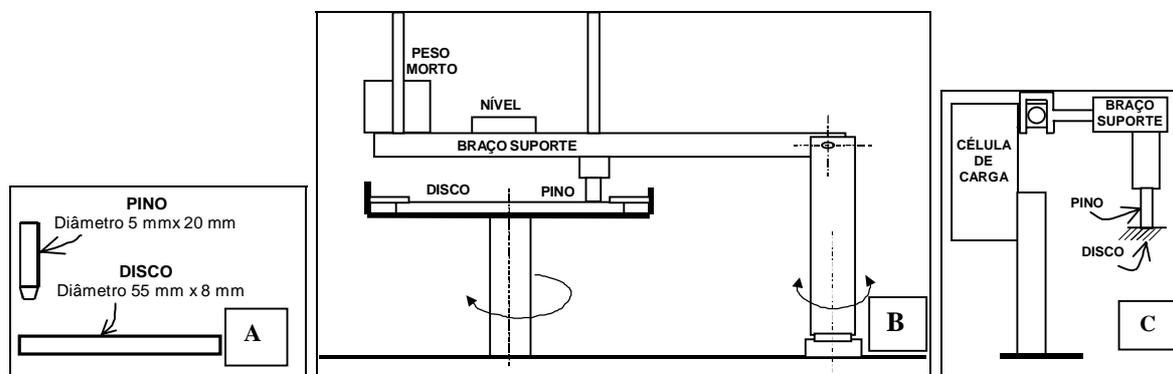


Figura 1: A) Geometria das amostras utilizadas nos ensaios. B) Equipamento tipo pino-contra-disco. C) Detalhe de montagem da célula de carga para aquisição do sinal de atrito.

A Figura 2 mostra um diagrama de blocos da instrumentação utilizada para a aquisição do sinal da força de atrito.

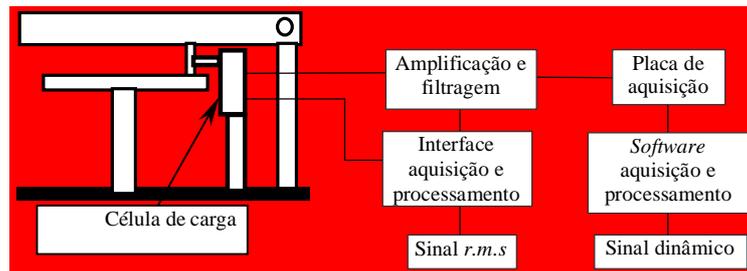


Figura 2: Diagrama de blocos da instrumentação utilizada para a obtenção do sinal da força de atrito (*r.m.s.* do sinal e sinal dinâmico).

Observa-se que foram utilizados dois métodos de aquisição da força de atrito, um para o *r.m.s.* (*root mean square*) do sinal e outro para o sinal dinâmico.

O *r.m.s.* do sinal, identificado como sinal rms, é relativo aos valores médios da força de atrito em unidades de newtons, e foram obtidos utilizando-se a interface e o *software* próprios do fabricante do equipamento de ensaio de desgaste (*Plint & Partners*).

O sinal dinâmico é adquirido em volts, e representa as flutuações dinâmicas da força de atrito, utilizado para análise espectral. Para a obtenção do sinal dinâmico da força de atrito, utilizou-se um circuito de amplificação e filtragem, e placa de aquisição PCI 6110E (*National Instruments*).

3.2 Ensaios de desgaste e aquisição de sinal

As condições de ensaio de deslizamento utilizadas foram temperatura ambiente (24 °C), umidade relativa de 56 %, carga normal de 5,8 N e velocidades de rotação do disco na faixa de 50 a 350 rpm. O raio da trilha do pino sobre o disco foi de 15 mm. Foram estudadas amostras em três condições de superfícies:

- Série A - não desgastadas, com pino lixado e disco retificado, realizando-se um assentamento inicial do pino sobre o disco com lixas de granulometrias até 320 *mesh*. A superfície do pino está mostrada na Figura 3.

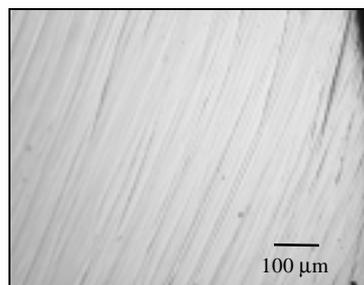


Figura 3: Foto obtida por microscopia óptica da superfície inicial do pino nos ensaios da Série A.

- Série B - previamente desgastadas através de ensaios por um ciclo de deslizamento com velocidades de rotação na faixa de 50 a 350 rpm. Para essa série, a área de contato da amostra de pino foi ligeiramente rotacionada em relação à área estabelecida na Série A.

- Série C - desgastadas através de ensaios por um longo ciclo de deslizamento, superior à Série B, com velocidades de rotação na faixa de 50 a 350 rpm.

Os ensaios foram realizados em uma seqüência crescente de velocidades; e para cada velocidade de rotação adquiriu-se o sinal rms e o sinal dinâmico em regime de atrito estacionário.

Quanto à obtenção do sinal rms, o sistema de aquisição do fabricante do equipamento de ensaio de desgaste adquire dados a cada 0,1 segundo, equivalente a um sinal com taxa de aquisição de 10 Hz. Portanto, a banda de frequência útil é de 0 a 5 Hz no máximo (teorema de Nyquist; Bendat, 1958).

Quanto à obtenção do sinal dinâmico, realizou-se aquisição do sinal com distância de amostragem constante de $3,14 \times 10^{-5}$ m e 30000 pontos (equivalente a dez rotações do pino sobre o disco). Isso foi realizado com o objetivo de se verificar e caracterizar influências das interações entre os microcontatos durante o deslizamento no sinal da força de atrito. Foram obtidos também sinais relativos ao equipamento parado e sinais de ensaios sem contato na faixa de velocidades de rotação especificada. Cada sinal teve sua densidade espectral de potência (DEP) calculada através do método de Welch (Bendat, 1958) utilizando-se uma janela de observação de 6000 pontos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Força de atrito média e mecanismos de desgaste

A Figura 4 mostra a força de atrito média (média aritmética dos valores contidos no sinal rms) em função da velocidade de rotação para três séries de ensaios.

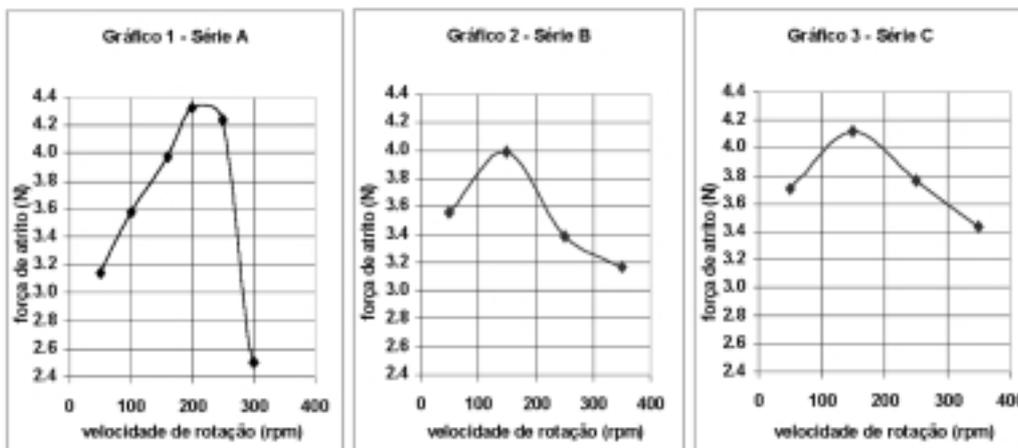


Figura 4: Gráficos da força de atrito média em função da velocidade de rotação do disco para as três séries de ensaios de desgaste.

Em todos os gráficos pode-se notar um ponto de inflexão na curva, o que seria um indicativo de ocorrência de uma mudança de mecanismo de desgaste em função da velocidade de rotação na faixa estudada.

Na Série A de ensaios de desgaste, foi possível notar que a superfície ensaiada do pino apresentou várias morfologias em função da velocidade de rotação do disco, conforme visto na Figura 5, o que evidencia a ocorrência de mudança de mecanismo de desgaste na faixa de velocidades ensaiada.

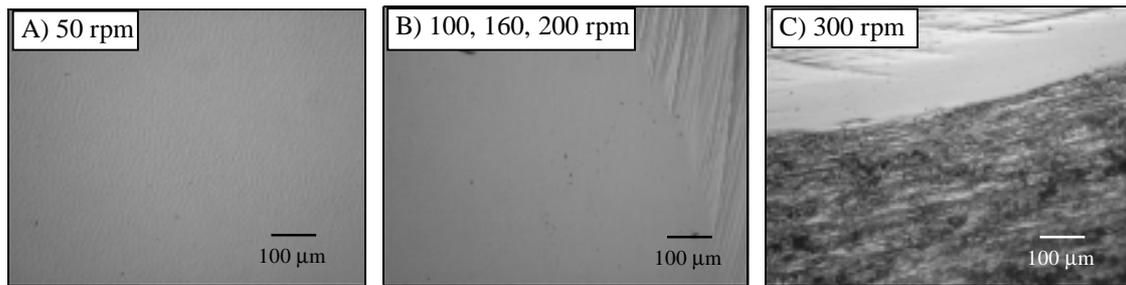


Figura 5: Fotos obtidas por microscopia óptica da superfície de ensaio do pi no cerâmico referentes ao gráfico 1 da Figura 4.

A Figura 5A mostra que, no ensaio a 50 rpm, houve um mecanismo de desgaste com produção de ondulações na superfície do pino. Já a Figura 5B mostra que os ensaios na faixa de 100 a 200 rpm resultaram em pinos com superfícies polidas. A Figura 5C mostra que a superfície do pino ensaiado na rotação de 300 rpm se apresentou escurecida, o que seria um indicativo de que houve produção de filme por reações triboquímicas durante o ensaio. A formação de filme pode ter sido a causa da diminuição do atrito, conforme mostrado na Figura 4, Série A, onde o valor médio da força de atrito diminuiu de 4,30 para 2,50 N. Essa diminuição do atrito pode estar relacionada à ocorrência de lubrificação das superfícies devido à formação do filme triboquímico. Essa série de ensaios mostrou que houve uma evolução dos mecanismos de desgaste em função da velocidade de rotação.

A Série B de ensaios de desgaste foi realizada em seqüência à Série A, rotacionando-se ligeiramente o pino, com o que obteve-se uma variação da área de contato com o disco. A Figura 6 apresenta a superfície final do pino, após o ensaio a 350 rpm, e nota-se características semelhantes à superfície final do pino ensaiado na Série A.

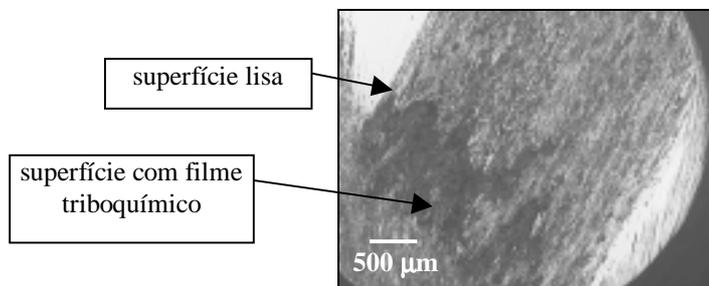


Figura 6: Superfície final do pino cerâmico após ensaios da Série B. Microscopia óptica.

Nota-se pela Figura 4 que a curva de força de atrito dos ensaios da Série C apresentou-se semelhante à curva da Série B. Entretanto, a superfície final do pino ensaiado na Série C apresentou várias microfaturas na região de contato, evidenciando a ocorrência de um mecanismo de desgaste distinto das Séries A e B. Este mecanismo de microfatura estaria relacionado à ocorrência de uma transição de mecanismo de desgaste, de moderado (incluindo formação de ondulações e filme triboquímico) para severo, correspondente à ocorrência de microfaturas. Mecanismos de desgaste semelhantes, para o contato cerâmico entre Al_2O_3 e $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, foram observados por Kumar e Swarnamani (1997). De acordo com Hutchings (1992), esta transição de mecanismo pode ocorrer em função da velocidade de deslizamento, carga normal ou umidade relativa.

4.2 Análise de sinais dinâmicos

Foram realizadas aquisições do sinal de força de atrito com o equipamento parado e o disco girando (nas velocidades de rotação utilizadas nos ensaios) estando o pino e disco sem contato. Nesse caso, os espectros mostraram apenas componentes espectrais devidas à alimentação elétrica, com amplitudes muito pequenas e irrelevantes para os ensaios de desgaste.

A Figura 7 mostra os gráficos da função densidade espectral de potência do sinal dinâmico da força de atrito para cada rotação, obtido para a Série A de ensaios de desgaste.

Note-se na Figura 7 que, para 50 rpm, a frequência dominante no espectro foi de **210 Hz**; isto provavelmente está relacionado à ocorrência do mecanismo de desgaste com formação de ondulações, conforme observado no exame por microscopia óptica da superfície do pino (vide Figura 5A).

Já nos espectros correspondentes às rotações de 100 a 250 rpm, é visualizada uma componente de frequência em **56 Hz**, constante para essa faixa de rotações. Nessas condições, o mecanismo de desgaste manteve-se constante, com produção de superfícies lisas, conforme visto na Figura 5B. Nesse caso, observa-se que as amplitudes correspondentes à frequência de 56 Hz são moduladas pelas condições do contato em função da velocidade, visto que há um ponto de inflexão quanto à amplitude nos espectros em função da velocidade, da mesma forma que ocorre no gráfico 1 da Figura 4 da força de atrito média nessa faixa de velocidades.

O espectro correspondente ao ensaio a 300 rpm mostra a presença de uma frequência ao redor de **295 Hz**. Isso pode ser uma frequência estrutural do equipamento, e a sua excitação pode estar relacionada à formação de filme triboquímico na superfície do pino, conforme visto na Figura 5C.

Aquisições do sinal de força de atrito durante os ensaios da Série B também mostraram frequências características em **25 e 56 Hz** e componentes de menor amplitude na faixa de **200 a 250 Hz**, presentes em todas as velocidades ensaiadas, com amplitudes moduladas pelas condições do contato. Na Figura 6, nota-se que o contato ocorreu em uma região com mais de um mecanismo de desgaste, ou seja, com produção de região lisa e região com filme triboquímico. Nestas condições, o filme triboquímico formado a 300 rpm nos ensaios da Série A ainda continua presente, porém pode ter deixado de ser dominante no contato ou suas características podem ter sido modificadas. Isso explicaria a ausência do pico de 295 Hz nos espectros, que foi aparentemente substituído pela faixa de 200 a 250 Hz. Os resultados de análise espectral obtidos dos ensaios da Série B mostraram que ocorreu excitação das frequências do equipamento influenciada pelos mecanismos de desgaste no contato.

Os gráficos de densidade espectral de potência do sinal de força de atrito correspondentes à Série C de ensaios de desgaste mostraram um pico significativo de frequência em **148 Hz**, constante para todas as velocidades. Isto foi relacionado ao mecanismo de desgaste atuante no contato (com microfratura na superfície do pino). Também para essa série de ensaios, foi observado nos espectros que as amplitudes da frequência dominante foram moduladas pelas condições do contato em função da velocidade, visto que houve um ponto de inflexão na amplitude dessa frequência dominante em função da velocidade de rotação, semelhante ao visto no gráfico 3 da Figura 4. Essa observação confirma a existência de uma correlação das amplitudes da frequência dominante com os valores médios da força de atrito em função da velocidade de rotação para o mecanismo de desgaste com produção de microfraturas.

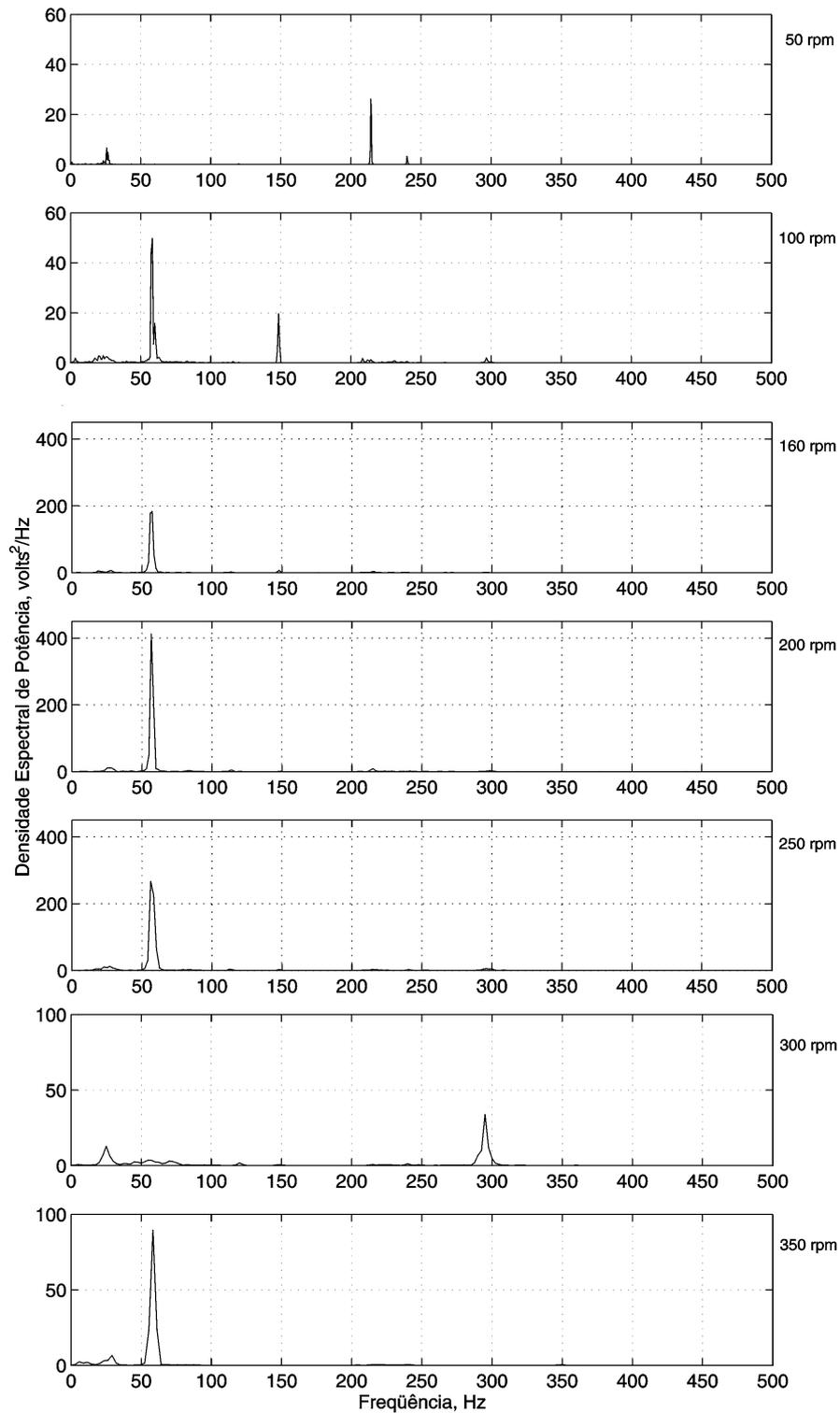


Figura 7: Densidade espectral de potência do sinal dinâmico da força de atrito correspondente à aquisição durante os ensaios da Série A. Observação: os gráficos foram plotados com escalas diferentes na ordena com a finalidade de obter uma melhor visualização das componentes de frequência.

5. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios realizados com o par cerâmico nas condições especificadas mostraram que:

- O espectro do sinal de atrito não mostrou frequências acima de 500 Hz, indicando que o sensor não foi eficiente para responder nessa faixa de frequências.
- Na faixa de frequências observada (abaixo de 500 Hz) não houve evidência de influências de frequências relativas à interação entre asperezas, visualizando-se somente frequências independentes da rotação.
- As variações no espectro de frequências abaixo de 1000 Hz podem ser relacionadas a variação na dinâmica do equipamento, devido à mudança do tipo de interação entre as asperezas do contato causada por uma modificação do mecanismo de desgaste predominante.
- Nas séries de ensaios realizadas, podem ser excitadas uma ou mais frequências relativas ao equipamento de ensaio de desgaste, dependendo das características iniciais das superfícies em contato.
- Nas séries de ensaios realizadas, foi possível observar a maioria dos mecanismos de desgaste vistos em pares cerâmicos; porém, não se observou correlação das magnitudes de força de atrito média com mecanismos de desgaste presentes.
- Para uma mesma série de ensaios, foram vistos frequências independentes da velocidade de rotação, e portanto relativas ao equipamento; porém suas amplitudes foram dependentes tanto da velocidade de rotação como das condições do contato.
- As amplitudes das frequências podem ser correlacionadas com a força de atrito média nos ensaios de desgaste com ocorrência de um único mecanismo de desgaste.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processos nos. 97/12753-9 e 98/15987-3, pelo suporte financeiro, e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) com o Programa de Apoio a Núcleos de Excelência (PRONEX 97), processo no. 203/97, pelo fornecimento das amostras cerâmicas.

7. REFERÊNCIAS

- Hutchings, I.M., 1992, "Tribology: Friction and wear of engineering materials", Cap. 5.10: Wear of ceramics, Edward Arnold, London, pp. 116-122.
- Kumar, V.K.; Swarnamani, S., 1997, "Vibration monitoring in sliding wear of plasma sprayed ceramics", Wear, Vol. 210, Elsevier Science, pp. 255-262.
- Soom, A. Kim, C., 1983, "Interactions between dynamic normal and frictional forces during unlubricated sliding", Journal of Lubrication Technology, Transactions of the ASME, Vol.105, New York, pp.221-229
- Bendat, J. S, 1958, "Principles and applications of random noise theory", Wiley, New York, 431p.