

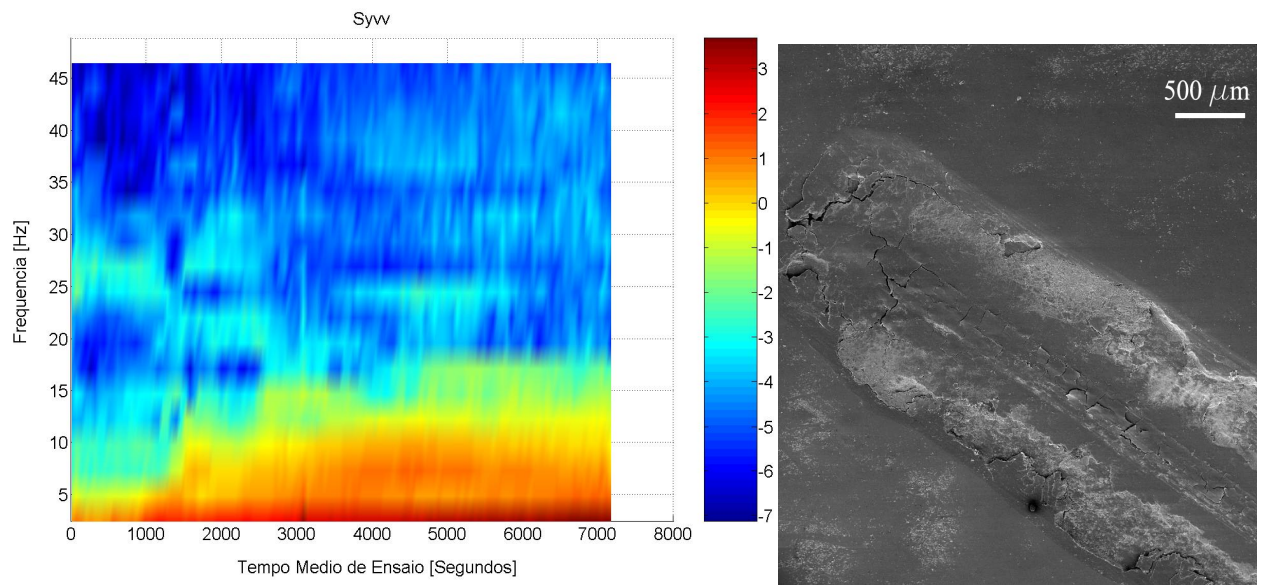


Figura 5.32 - Força de atrito estimada, S_{y_v, y_v} , e foto obtida no MEV para a condição de danos visíveis a camada de Teflon.

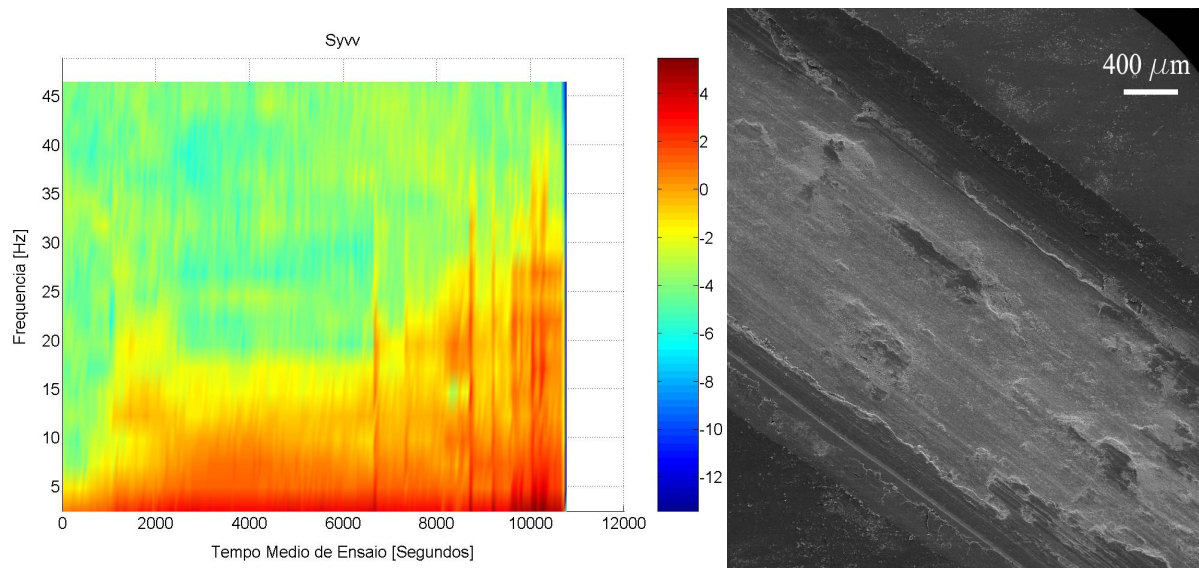


Figura 5.33 - Força de atrito estimada, S_{y_v, y_v} , e foto obtida no MEV para a condição de remoção da camada de Teflon.

Na Figura 5.33 mostra os resultados para o ensaio onde existe remoção completa da camada de Teflon onde nota-se novamente os mesmos fenômenos observados na Figura 5.32. Adicionalmente pode-se notar que existe um aumento gradual dos valores da função auto densidade espectral nas bandas de frequência inferiores à 5 Hz e entre 15 e 30 Hz após 6800 segundos de ensaio. Na foto de MEV verifica-se a remoção da camada de Teflon que cronologicamente deve ocorrer após sua fragmentação. Novamente pode-se associar tais

fenômenos, mudanças nos valores da auto densidade espectral e mudanças de superfície, onde atribui-se que entre 6800 segundos e 8500 segundos aproximadamente existem apenas fragmentos de Teflon sobre a superfície e que estes fragmentos vão sendo removidos da interface entre os corpos gradualmente com o movimento relativo entre as superfícies. Assume-se também que a remoção completa ocorre a partir de 8500 segundos onde se verifica-se um aumento significativo da força de atrito ratificado pela perda do efeito de lubrificação sólida com a remoção do Teflon da interface.

Na Figura 5.34 e na Figura 5.35 são mostradas as comparações entre o potencial de contato e o valor RMS da força de atrito estimada para a banda de 10 à 15 Hz. Pode-se notar que existe um padrão para o comportamento da força de atrito até 7000 segundos em ambos os ensaios indicando que os fenômenos tribológicos relacionados ao aparecimento das trincas e da fragmentação da camada de Teflon são precedentes a remoção desta camada.

Em maior destaque nota-se que no ensaio sem remoção da camada de Teflon existem dois picos no valor RMS, o primeiro próximo à 1600 segundos, o segundo próximo à 2600 segundos tais picos podem ser correlacionados as variações na função auto densidade espectral da força de atrito estimado na Figura 5.32. Isto permite utilizar a correlação já feita entre a força de atrito estimada e os fenômenos tribológicos e associar o início do aparecimento das trincas ao primeiro pico do valor RMS da força de atrito estimada e o início da fragmentação ao segundo pico do valor RMS.

Na Figura 5.35 os picos de valor RMS não são tão destacados porém nota-se que o aumento do valor RMS ocorre novamente próximo a 1600 segundos como verificado na Figura 5.34. Isto é, pode-se dizer que o início da formação de trincas na camada de Teflon também ocorre em 1600 segundos no ensaio em que se verifica a remoção completa da camada de Teflon.

O comportamento do valor RMS da força de atrito estimada mostra ainda uma queda que se inicia em 4500 segundos e dura até 7000 segundos. Pode-se formular uma hipótese para este comportamento que é o fato de no contato, entre o contra corpo esférico e o corpo, existir um leito de fragmentos de Teflon, tais fragmentos podem rolar entre si reduzindo ligeiramente a força de atrito. Salienta-se que esta hipótese não pode ser confirmada porém apresenta uma certa coerência física quando imagina-se que os fragmentos tenham formas esféricas promovendo uma força de atrito decorrente do rolamento entre estas esferas, este efeito se cessaria com início da remoção destes fragmentos e o contato do contra corpo com o alumínio do substrato do corpo.

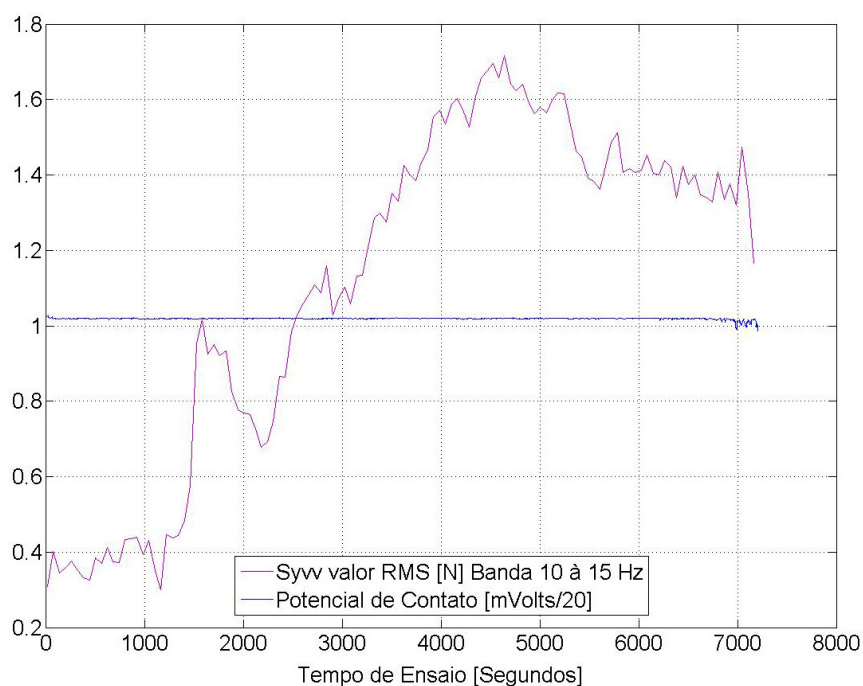


Figura 5.34 - Valor RMS para a força de atrito estimada, $S_{y_v y_v}$, e para o potencial de contato ao longo do ensaio sem remoção da camada de Teflon.

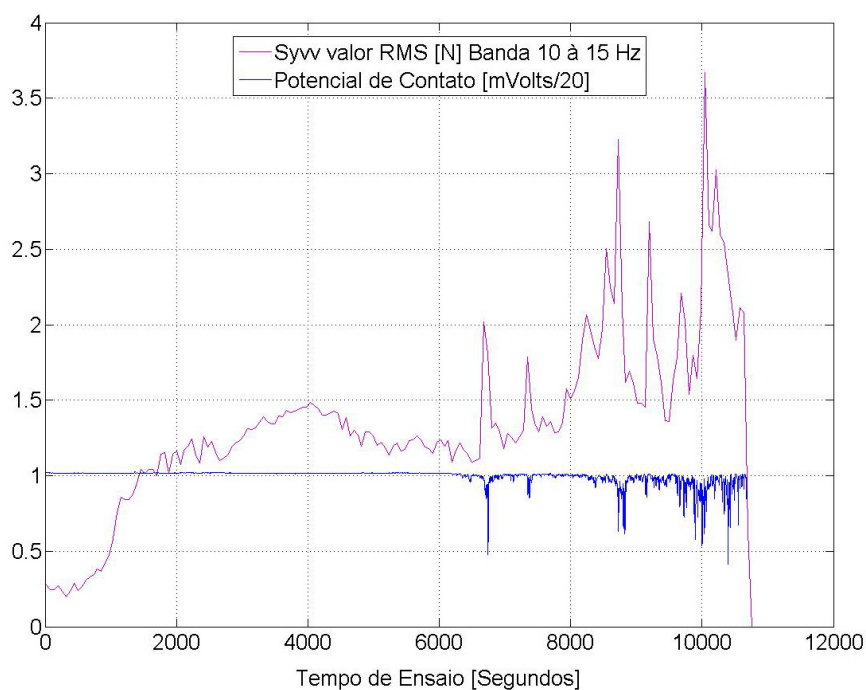


Figura 5.35 - Valor RMS para a força de atrito estimada, $S_{y_v y_v}$, e para o potencial de contato ao longo do ensaio com remoção da camada de Teflon.

A correlação entre o potencial de contato e a força de atrito estimada também é mostrada na Figura 5.34e na Figura 5.35. Nestas figuras nota-se que para o ensaio sem remoção da camada de Teflon o potencial de contato se manteve em 50 mv durante todo o ensaio e o valor RMS da força de atrito abaixo de 1.8 N, porém no ensaio com remoção da camada de Teflon o nível RMS da força de atrito subiu até valores de 4 N acompanhados da queda do potencial de contato. Verifica-se também que os picos da força de atrito ocorrem simultaneamente aos vales do potencial de contato indicando uma forte correlação desta força com a presença ou não de Teflon na interface do contato.

5.4 Conclusões

A instrumentação e a rotina de aquisição dos dados mostram-se adequadas a aplicação da metodologia proposta para a identificação da força de atrito em ensaios tribológicos. A resolução no tempo dos fenômenos tribológicos de 92 segundos foi suficiente para os ensaios realizados. A principal deficiência observada foi a grande quantidade de dados gerados, em média 1.5 gigabytes por ensaio, que pode ser suprimida caso fosse implementada a aquisição dos dados simultaneamente aos cálculos decorrentes da metodologia proposta. Para este ultimo caso seria necessário armazenar-se somente o resultado final da média dos estimadores para cada ciclo de aquisição, poderia-se inclusive eliminar o tempo de pausa, 60 segundos, utilizando-se este tempo para a aquisição de novos blocos de amostra, aumentando-se o número de médias dos estimadores, reduzindo-se os erros aleatórios sem comprometer a resolução no tempo para a identificação dos fenômenos tribológicos.

A metodologia proposta é adequada para o cálculo da força de atrito independente da dinâmica do sistema linear. Tal característica permite que as forças de atrito obtidas em diferentes máquinas para ensaios tribológicos sejam comparadas.

A força de atrito estimada é sensível a mudanças nas superfícies dos corpos em contato, independente do tipo de amostra ensaiada. Isto foi verificado em ambos os ensaios, com alumínio anodizado e com o alumínio recoberto de Teflon, onde a força de atrito diminuiu e aumentou sua amplitude respectivamente após a remoção das camadas superficiais.

A metodologia proposta permite a identificação dos fenômenos tribológicos em bandas de baixas e altas frequências. A melhor banda de análise pode ser selecionada dependendo da correlação da força de atrito identificada com o fenômeno tribológico. Este fato exige que sempre sejam realizados ensaios preliminares para caracterizar a sensibilidade ótima da força de atrito em relação ao fenômeno tribológico.

As bandas de alta frequência em geral portam informações a respeito de fenômenos superficiais que produzem baixas amplitudes de resposta do sistema. Esta característica

promove a metodologia proposta para aplicações em que era possível aplicar somente a técnica de emissão acústica. Porém, conforme citado no capítulo anterior a transmissibilidade entre o ponto em que a força de atrito atua e o ponto em que se obtém a resposta do sistema deve ser considerada. Para os ensaios com alumínio recoberto de Teflon notou-se que em altas frequências a coerência acumulada assumiu valores muito baixos, o que pode ser atribuído à atenuação provocada por pequenas folgas encontradas na fixação da amostra e em outras juntas do tribômetro PLINT & PARTNERS. Para aplicar a metodologia com sucesso, na região de altas frequências, é necessário promover modificações no projeto do equipamento de ensaio.

A principal alteração a ser sugerida no tribômetro é o posicionamento da célula de carga fixa ao referencial inercial. Para o tribômetro utilizado entre o porta amostra é a célula de carga existem rolamentos, lineares e de encosto, e a inércia do braço de alavanca é elevada, tais características atenuam a resposta a excitações pela força de atrito. Pode-se sugerir a colocação de uma célula de carga tridimensional entre a aplicação de carga normal pelo peso morto e o contra corpo, fixar o braço de alavanca atual e compatibilizar o sistema de fixação do contra corpo com a célula de carga tridimensional. Tais alterações aumentariam a transmissibilidade do caminho entre o ponto de atuação da força de atrito e o ponto em que se mede a força de reação a um referencial inercial.

Em geral pode-se dizer que no projeto do tribômetro deve-se evitar elementos de máquinas como mancais e guias entre o ponto de aplicação da força de atrito e o ponto de leitura da resposta do sistema a esta força. O uso de estruturas leves e rígidas são soluções desejáveis. A estrutura deve ter rigidez superior a da célula de carga que irá medir a força de reação ao referencial inercial, caso contrário a sensibilidade da cadeia de instrumentação será prejudicada.

As bandas de baixas frequências portam informações sobre a força de atrito conforme previsto pela teoria de Coulomb. Tal característica permitiu a visualização de pequenas alterações na força de atrito. Para tribômetros onde a força normal também é instrumentada seria possível visualizar também pequenas alterações do coeficiente de atrito, que é um parâmetro importante nos modelos baseados na teoria de Coulomb, normalmente utilizados em estudos tribológicos.

Capítulo VI

Conclusões

Foram desenvolvidas metodologias que aplicadas em sistemas com não linearidades, permitem o correto planejamento de um ensaio tribológico de desgaste com vistas à determinação de suas características dinâmicas e o acompanhamento da evolução da força de atrito ao longo do ensaio, separadamente da influência da dinâmica da máquina de ensaio.

A formulação dos modelos de elementos finitos para o contato corpo permite reproduzir no ensaio a mesma natureza dos campos de tensões e pressões atuantes no tribosistema real.

Este modelo computacional é capaz de fornecer resultados satisfatórios para os problemas de contato nos casos onde não há soluções analíticas para as equações potenciais de Boussinesq. Deve-se, no entanto, a cada novo modelo realizar um correto ajuste dos parâmetros de integração e um correto refinamento da malha a fim de se obter resultados coerentes sem grandes esforços computacionais.

Foi mostrada em uma análise térmica a viabilidade em se calcular o comportamento dos corpos em contato, considerando o calor gerado pela força de atrito. Pode-se portanto acoplar os efeitos de temperatura ao modelo de mecânica do contato tornando este mais completo. Tal característica qualifica o modelo de elementos finitos para a solução de problemas termomecânico que não possuem soluções analíticas viáveis.

As soluções obtidas permitiram a correta visualização dos campos de tensões resultantes do contato entre dois cilindros e entre uma esfera e um plano. Estes resultados auxiliam na análise da correlação entre os campos de tensões previstos com os mecanismos de desgaste que são observados, por microscopia eletrônica de varredura, nas superfícies do contato das amostras ensaiadas.

Através da simulação de elementos finitos mostrou-se que é possível representar o campo de tensões atuantes em cilindros de laminação através de duas configurações de contato mecânico: Contato entre cilindros e o contato entre uma esfera e um plano. Nestas simulações verificou-se que os campos de tensões são elípticos e que a maior tensão de cisalhamento ocorre abaixo da superfície para ambas as configurações de contato. Pode-se portanto afirmar que em vistas à natureza do campo de tensões atuantes ambas as soluções são úteis para representar o tribosistema da laminação.

Desta forma, resultou a primeira contribuição deste trabalho: O planejamento do experimento de desgaste pode ser feito com valores da carga normal e da velocidade de escorregamento. A avaliação feita com o modelo de elementos finitos é muito importante principalmente nos casos em que o contato ocorre entre corpos de comprimentos diferentes, produzindo concentrações de tensão nas regiões onde ocorrem as descontinuidades geométricas. Esta é uma das justificativas para se realizar ensaios com o modelo experimental de uma esfera sobre um plano, pois é possível gerar altos níveis de tensão, reproduzir efeitos de fadiga mecânica e térmica, usando carregamentos normais relativamente baixos. Adicionalmente, estes modelos constituem ferramenta auxiliar para a interpretação dos fenômenos tribológicos atuantes nas amostras, durante os ensaios de desgaste.

A segunda contribuição é a metodologia proposta para identificar o comportamento da força de atrito, a partir dos sinais da força total medida no ensaio de desgaste, independentemente da parcela linear do sistema mecânico que representa a máquina de ensaio. O estudo da natureza estatística permitiu analisar o comportamento da força de atrito e a validação da função não linear que a representa. Tal característica permite que os resultados obtidos em máquinas diferentes sejam comparados. Portanto habilitando a técnica para realizar estudos mais detalhados de fenômenos tribológicos que venham a ocorrer nas superfícies dos corpos em contato.

A função não linear com a formulação de Coulomb, que representa o atrito foi mais eficiente que o modelo proposto por Pontes Junior(2004) para representar o atrito, inclusive nas condições em que existe a presença de lubrificantes na interface entre os patins e a haste do amortecedor de Coulomb. A metodologia proposta mostrou-se adequada a esta classe de problemas onde têm-se interesse na obtenção da força de atrito indiretamente através da medida de outras grandezas físicas como deslocamento da estrutura e a força de reação medida entre a massa principal e um referencial inercial.

No entanto duas limitações, mutuamente correlacionadas, foram observadas e devem ser consideradas em qualquer análise de um sistema não linear.

A primeira diz respeito ao nível total dos sinais medidos na saída em relação à parcela da resposta provocada pela não linearidade a ser identificada, neste caso, a força de atrito. Deve-se garantir que a variável medida seja sensível ao fenômeno não linear a ser identificado.

A segunda limitação é a característica do caminho de transmissão do sinal que porta os efeitos da não linearidade. Nos casos estudados, a força de atrito é transmitida ao longo do sistema dinâmico, incluindo a cadeia de instrumentação. Deve-se escolher o correto posicionamento do sensor e escolher a banda de frequências da resposta que apresente maior sensibilidade aos efeitos da não linearidade. Ambas as limitações, quando não consideradas podem levar a erros significativos na estimativa da não linearidade.

O correto planejamento dos experimentos no que diz respeito ao número de médias para minimizar os erros aleatórios dos estimadores das funções densidade espectral deve ser sempre realizado. Baixos níveis de erros aleatórios dos estimadores somente podem ser obtidos para elevados níveis de coerência ordinária das saídas ou elevado número de médias. No entanto, deve-se considerar o ajuste ótimo do tempo de espera entre os blocos de médias para não comprometer a resolução temporal de identificação da evolução dos fenômenos tribológicos associados ao desgaste. Deve-se portanto sempre que possível optar pelo aumento dos valores das funções coerências, por meio escolha do melhor caminho de transmissão entre o ponto de excitação da não linearidade e o ponto de medida da resposta, ou pela escolha de uma banda de frequência mais favorável para a análise dos sinais. Conseqüentemente o tribômetro deve ser projetado, sempre que possível, prevendo o comportamento dinâmico ótimo.

A força de atrito estimada é sensível a mudanças nas superfícies dos corpos em contato, independente do tipo de amostra ensaiada. Isto foi verificado em ambos os ensaios, com alumínio anodizado e com o alumínio recoberto de Teflon, onde a força de atrito diminuiu e aumentou sua amplitude respectivamente após a remoção das camadas superficiais.

A metodologia proposta permite a identificação dos fenômenos tribológicos em bandas de baixas e altas frequências. A melhor banda de análise pode ser selecionada dependendo da correlação da força de atrito identificada com o fenômeno tribológico. Este fato exige que sempre sejam realizados ensaios preliminares para caracterizar a sensibilidade ótima da força de atrito em relação ao fenômeno tribológico.

As bandas de baixas frequências portam informações sobre a força de atrito conforme previsto pela teoria de Coulomb. Tal característica permitiu a visualização de pequenas alterações na força de atrito. Para tribômetros onde a força normal também é instrumentada seria possível visualizar também pequenas alterações do coeficiente de atrito, que é um parâmetro importante nos modelos baseados na teoria de Coulomb, normalmente utilizados em estudos tribológicos.

A resolução no tempo adotada nos ensaios de desgaste foi de 92 segundos, mostrou-se foi adequada para identificar o rompimento das camadas superficiais de alumina e de teflon nos ensaios realizados. Para outros ensaios tribológicos esta resolução deve ser avaliada.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho apresentou uma metodologia para estimativa da força de atrito real em tribômetros do tipo alternativo, indicando que ela pode ser empregada no estudo de diversos

tribosistemas utilizando assinaturas da força de atrito. Tais assinaturas permitem a verificação do comportamento da força de atrito frente aos mecanismos de desgaste em cada tribosistema.

No projeto de um tribômetro recomenda-se evitar o uso de elementos de máquinas como mancais e guias entre o ponto de aplicação da força de atrito e o ponto de leitura da resposta do sistema a esta força. O uso de estruturas leves e rígidas são soluções desejáveis. A estrutura deve ter rigidez superior à da célula de carga que irá medir a força de reação ao referencial inercial, caso contrário à sensibilidade da cadeia de instrumentação será prejudicada. O uso de uma célula de carga tridimensional, entre o porta amostra e o ponto de aplicação de carga normal, combinada ao uso de uma estrutura de fixação rígida é uma alternativa viável que poderia trazer benefícios para a estimativa da força de atrito nos tribômetros. A proximidade entre a célula de carga e o ponto de aplicação da força de atrito, assim como a posição da célula entre o contra corpo e o dispositivo de aplicação de carga normal, permitiriam obter as forças nas direções dos movimentos relativos entre os corpos de prova, com menor influência da dinâmica da máquina.

Para estudos mais completos de contato mecânico sugerem-se a obtenção das propriedades termo-físicas dos materiais em contato e a simulação em conjunto do problema mecânico e térmico. Tal procedimento seria útil, por exemplo, na determinação do campo de tensões atuantes em cilindros de laminação à quente permitindo um melhor projeto das geometrias de coroamento e dos sistemas de refrigeração dos cilindros.

O uso de teorema de identificação de funções não lineares pode ser aplicado para o desenvolvimento de funções matemáticas que incluam outros fenômenos de superfície além daqueles mostrados nesta tese. Sugere-se o desenvolvimento de funções que não só sejam capazes de representar demais fenômenos de superfície mas que tenham validade sobre uma faixa ampla de condições de contato.

Sugere-se a aplicação da análise de sinais não lineares em esclerômetros. Em geral tais ensaios utilizam a força medida por uma célula de carga para medir a resistência ao risco de um material. A aplicação da metodologia proposta pode trazer benefícios ao se eliminar a dinâmica da cadeia de instrumentação da estimativa da resistência ao risco de um determinado material.

Pode-se aplicar a análise de sinais não lineares em outros tipos de sistemas reais com características não lineares. Nesta classe de problemas poder-se-ia identificar a natureza dos caminhos não lineares e das funções respostas lineares do sistema. Caso seja adotado um modelo para a não linearidade, pode-se separar a parcela da resposta linear da resposta global, identificando a parcela não linear. Por outro lado, em problemas onde uma não linearidade é adicionada a um sistema linear cuja resposta é previamente conhecida, pode-se

identificar a parcela da resposta global que é devida às não linearidades e posteriormente ajustar um modelo inverso.

Como exemplos de sistemas nos quais a metodologia mostrada pode trazer resultados satisfatórios, pode-se enumerar os seguintes:

- Sistemas com molas e amortecedores não lineares.
- Sistemas submetidos a forças magnéticas, como rotores com mancais magnéticos.
- Sistemas mecânicos com batentes.
- Análise dinâmica de sistemas submetidos a interação fluído-estrutura.

Em geral problemas relacionados à dinâmica de veículos envolvem componentes não lineares como amortecedores, pneus, molas e batentes. Portanto a aplicação da análise de sinais não lineares nesta classe de problemas pode trazer benefícios à modelagem destes sistemas.

Referências Bibliográficas

Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 1986, "Random Data: Analysis and Measurement Procedures", John Wiley and Sons Inc., New York.

Bendat, J. S., Palo, P. A. and Coppelino, R. N., 1992, "A general identification technique for non-linear differential equations of motions", Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 7, pp. 43-61.

Bendat, J. S., 1998, "Nonlinear Systems Techniques and Applications", John Wiley and Sons Inc., New York.

Boussinesq, J., 1885, "Application des Potentials à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques", Gauthier-Villars, Paris.

Carslaw, H. S. & Jaeger, J. C., 1959, "Conduction of Heat in Solids", 2nd Edition, Oxford University Press, Clarendon, UK.

Chen, M. Y. and Breslin, M. C., 2002, "Friction Behaviour of co-continuous alumina/aluminium composites with and without SiC reinforcement", Wear, Vol. 249, pp. 868-876.

Dieter, G., 1986, "Mechanical Metallurgy", 3rd Edition, McGraw-Hill Science, New York, USA.

Duvaut, G. & Lions, J. -L., (1972), "Les inéquations en mécanique et en physique", Dunod, Paris, France.

Fichera, G., 1964, "Problemi elastostatici con vincoli unilaterale: il problema di Signorini con ambigue condizioni al contorno", Mem. Accad. Naz. Lincei, Series 8, Italy.

Fressler, H. & Ollerton, E., 1957, "Contact stresses in toroids under radial loads", British Journal of Applied Physics, Vol. 8-39, pp.67-99, UK

LE, H. R., Sutcliffe, M.P.F., Wang, P.Z. and Burstein, G.T., 2004, "Surface oxide fracture in cold aluminium rolling", *Acta Materialia*, Vol. 52, pp. 911-920

Hutchings, I. M., 1992, "Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials", CRC Press Inc., Boca Raton, USA, 273 p.

Johnson, K. L., 1985, "Contact Mechanics", Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Kalker, J. J., 1978, "Numerical contact elastostatics", In *Contact Problems and Load Transfer in Mechanical Assemblages*, Proc. Euromech Coll. No 110, Linköping, Sweden.

Laursen, T.A. and Simo, J.C., 1993, "Algorithmic Symmetrization of Coulomb Frictional Problems Using Augmented Lagrangians", *Computers Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 108, No. 1 & 2, pp. 133-146.

Love, A. E. H., 1952, "A treatise on the Mathematical Theory of Elasticity", 4th Edition, Cambridge University Press, UK.

Lundberg, G & Sjövall, H., 1958, "Stress and Deformation in Elastic Solids", Publication No 4, Institute of Theory of Elasticity, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

Lur'e, A. I., 1964, "Three-dimensional Problems of the Theory of Elasticity", English Translation by J.R.M. Radok, Interscience, UK

McEwen, E., 1949, "Stresses in elastic cylinders in contact along a generatrix", *Philosophical Magazine*, Vol. 40, pp. 454, UK

McMillan, A. J., 1997, "A NON-LINEAR MODEL FOR SELF-EXCITED VIBRATIONS", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 205-3, pp. 323-335, Academic Press, England.

Milan, J. C. G., 2004, "Comportamento Tribológico de aços-rápidos para laminação a quente", Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

Oxford, 2002 "The Oxford English Dictionary", Oxford University Press, London, UK.

Pappoulis, Athanasios , 1977, "Signal Analysis", McGraw-Hill Inc., United States of America

Pontes Junior, B. R., 2003," Dinâmica e Controle de Sistemas Não Lineares com Interação Auto-Excitadora, Sujeitos à Fontes De Energia do Tipo Ideal e Não Ideal", Tese de doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.

Rostovtzev, N. A., 1953, "Complex stress function in the axi-symmetric contact problem of the Theory of Elasticity", PMM, UK

Routh, E. J., 1908, "Analytical Statics", Vol. III, Cambridge University Press, UK.

Santos, M.; Léopore Neto, F. P.; Mello, J.D.B., 2001, "Numerical Simulation of Non Conforming Contact using Finite Element Model.", XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, XVI COBEM, 2001, Uberlândia, Proceedings of COBEM 2001. Uberlândia, MG, Brasil, ABCM, v. 3, p. 282-290.

Schey, J. A., 1983, "Tribology in Metal Working – Friction, Lubrication and Wear", Asm, Metals Park, Ohio, 715p

Williams, J.A, 1994, "Engineering Tribology", Oxford University Press, UK.

Zhou, Z. R., Gu, S. R. And Vicent, L., 1997, "An investigation of the fretting wear of two aluminium alloys", Tribology International, Vol. 30, N. 1, pp. 1-7.

Zum Gahr, K. L., 1987, "Microstructure and Wear of Materials", Tribology Series, Vol. 10, Elsevier Science Publishers B. V., 560 p.

