

INFLUÊNCIA DA NÃO-CONFORMIDADE GEOMÉTRICA ENTRE ALOJAMENTO E MANCAL SOBRE O CAMPO DE TENSÕES DE BRONZINAS

Cleber C. Thomazi

Mário M. Pérez

Sonia A. G. Oliveira

Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica – Departamento de Projetos Mecânicos – E-mail: cthomazi@mecanica.ufu.br

Resumo

O Método dos Elementos Finitos foi usado na investigação dos efeitos da não-conformidade geométrica entre mancal e alojamento sobre o campo de tensões de uma bronzina. A distribuição de pressão hidrodinâmica atuante na bronzina foi calculada através da teoria de Ocvirk para mancais curtos. Na análise das tensões circunferenciais na superfície do mancal e das tensões cisalhantes na interface entre revestimento e a casca de aço da bronzina verificam-se concentrações de tensão nas regiões onde há perda de suporte ou influência de partículas incrustadas entre o mancal e o alojamento, as quais podem contribuir para a nucleação de falha por fadiga.

Palavras-chave: mancais de filme fluido, análise de tensão, não-conformidade geométrica, método dos elementos finitos, falha por fadiga.

1. INTRODUÇÃO

Mancais de biela e mancais principais de virabrequins de motores de combustão interna, conhecidos como bronzinas, ou casquilhos, são usualmente obtidos através da conformação de uma tira de aço de baixo carbono na qual são depositadas camadas de material metálico com o objetivo de reduzir o atrito e permitir suficiente conformabilidade para acomodar o munhão (Wilcock e Booser, 1957).

Os carregamentos cíclicos severos aos quais estes mancais estão sujeitos, podem levar o material antifricção a falhar por fadiga. Em mancais revestidos com babbitt, as trincas de fadiga progridem primeiramente através da espessura da camada de babbitt, mudando de direção à medida que aproximam-se da interface revestimento/casca de aço (encosto, Figura 1.a), passando a propagarem-se paralelamente e logo acima da interface. Quando ocorre o encontro entre trincas radiais e circunferenciais, há desprendimento de pequenos trechos do revestimento. O número destes trechos aumenta gradualmente até que a superfície de apoio restante seja insuficiente para suportar a carga. Se o material antifricção não estiver apropriadamente aderido ao encosto, estas trincas propagar-se-ão rapidamente ao longo da interface (Wilcock e Booser, 1957), causando o desprendimento do revestimento.

Qualquer tentativa na predição de falha em mancais deve ser baseada no conhecimento da distribuição de tensões em serviço. Apesar da falha por fadiga ser facilmente reconhecida, os

fatores e circunstâncias que levam à sua ocorrência ainda não estão completamente esclarecidos.

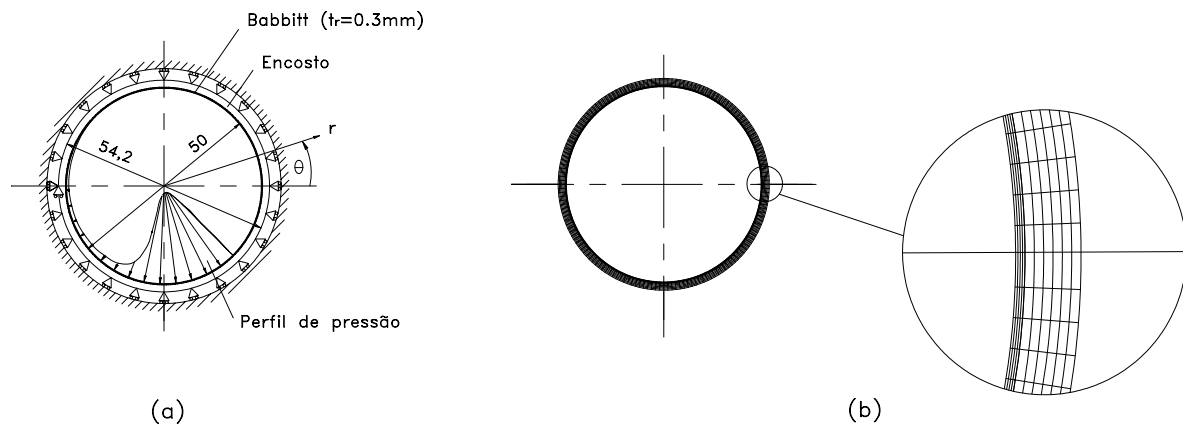


Figura 1. (a) configuração usada na análise e, (b) malha de elementos finitos.

A ausência de soluções analíticas confiáveis e a dificuldade em se obterem resultados experimentais levaram ao uso de técnicas numéricas para se atingir uma melhor compreensão do problema. Ibrahim e McCallion (1970) calcularam as tensões em uma tira bimetálica usando o método das diferenças finitas. Eles sugeriram que a falha por fadiga seria induzida na superfície do mancal devida às tensões normais flutuantes, ou na interface, devida às tensões cisalhantes flutuantes. McCallion e Lofti (1992) usaram o método dos elementos finitos para comparar as posições das tensões circunferenciais de tração máximas com a localização das trincas observadas experimentalmente por Blundell (1977)¹ e encontraram uma excelente correlação entre as posições das trincas de fadiga observadas e a posição das tensões circunferenciais de tração máximas calculadas. Xu (1996) analisou um mancal com revestimento formado por uma liga de alumínio sobre um encosto de aço, suportado por um alojamento também de aço, e propôs que a repetição de tensões cisalhantes elevadas podem iniciar trincas ao longo da interface, tanto na direção axial, quanto na circunferencial. Hacifazlioglu e Karadeniz (1996) analisaram um mancal radial adotando um modelo retificado onde foram usados elementos hierárquicos. Eles estabeleceram que a presença de um canal de lubrificação no alojamento levaria a concentrações de tensão no revestimento. Neste trabalho Hacifazlioglu e Karadeniz (1996) também analisaram os efeitos da ausência de suporte em parte do mancal.

No presente trabalho alguns resultados da influência da falta, ou da não-conformidade do suporte fornecido pelo alojamento a um mancal de filme fluido submetido a uma distribuição de pressão hidrodinâmica são apresentados. O programa de elementos finitos ANSYS[®], versão 5.4 (Swanson Analysis Systems, 1995a,b) foi usado para modelar um mancal como um anel suportado por um alojamento perfeitamente rígido. Os efeitos da ausência de suporte parcial em mancais com encosto de aço e cerâmica e, a presença de partículas incrustadas entre o mancal e o alojamento sobre as tensões circunferenciais na superfície e, sobre as tensões cisalhantes na interface entre o revestimento e o encosto foram analisadas individualmente. Espera-se que os resultados desta investigação sejam úteis no desenvolvimento de métodos que permitam prever falha por fadiga em mancais submetidos a cargas variáveis.

¹ Blundell, J. K., 1977, "The fatigue of dynamically loaded journal bearings", PhD Thesis, University of Nottingham.

2. MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS

Os mancais considerados nesta análise são constituídos por uma casca cilíndrica de aço ou cerâmica revestida por uma liga antifricção. Foi adotada a hipótese de estado plano de deformação, que, segundo Ibrahim e McCallion (1970), é uma consideração realística para relações comprimento/diâmetro (l/d) usuais. Lang (1977) também adotou estado plano de deformação em seu trabalho, enquanto Hacifazlioglu e Karadeniz (1996) consideraram esta aproximação aceitável para um pré-projeto. Os mancais analisados foram submetidos a carregamentos estáticos. Para todos os modelos assumiu-se uma perfeita aderência entre o revestimento antifricção e o encosto, o que garante a continuidade dos deslocamentos nesta região.

O modelo tomado como referência na comparação dos resultados corresponde a um mancal com alojamento perfeitamente rígido e totalmente apoiado no alojamento (Figura 1.a). O diâmetro interno do mancal é $d = 50,0$ mm, seu comprimento é $l = 25,0$ mm, a espessura do revestimento é $t_r = 0,3$ mm e, a espessura do encosto $t_e = 1,8$ mm. Estas dimensões foram tomadas de uma bronzina de uso corrente na indústria automobilística. O material antifricção é um babbitt base-estanho com módulo de Young $E_b = 50$ GPa e coeficiente de Poisson $\nu_b = 0,330$ (American Society for Metals, 1985). O aço do encosto possui módulo de Young $E_s = 207$ GPa e coeficiente de Poisson $\nu_s = 0,292$ (Shigley e Mischke, 1989). O material cerâmico é o Si_3N_4 , com módulo de elasticidade $E_{sn} = 304$ GPa e coeficiente de Poisson $\nu_{sn} = 0,240$ (Richerson, 1993). Esta cerâmica é usada na fabricação de elementos rolantes de rolamentos para eixos de máquinas ferramentas e, também, como revestimento de ferramentas de usinagem. Schwartz (1992) cita, ainda, o emprego de materiais cerâmicos em buchas.

No modelo com suporte completo os deslocamentos radiais foram restringidos ao longo de toda a circunferência externa (Figura 1.a). O nó na interface entre o encosto e o alojamento em $\theta = \pi$ também possui seus deslocamentos impedidos na direção circunferencial, conforme apresentado na Figura 1.a. Esta restrição circunferencial é necessária para evitar problemas numéricos decorrentes de movimento de corpo rígido e para simular o ressalto encontrado em bronzinas, cuja finalidade é impedir que as mesmas girem ou movimentem-se axialmente no alojamento.

A distribuição de pressão atuante na região compreendida no intervalo $3\pi/4 \leq \theta \leq 7\pi/4$ (Figura 1.a) foi calculada usando-se a teoria de Ocvirk para mancais curtos (Norton, 1996). Adotou-se, para a análise, uma pressão máxima arbitrária, $p_{máx} = 10$ MPa, que ocorre no ângulo $\theta = 297^\circ$. A velocidade de operação é $n = 3600$ rpm. Considerou-se uma folga radial do mancal $c_r = 0,022$ mm.

Foram usados elementos quadriláteros isoparamétricos de oito nós, PLANE82 (Swanson Analysis Systems, 1995b) para todos os modelos. O revestimento antifricção e o encosto foram discretizados por uma malha regular de 160×4 e 160×6 elementos, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 1.b. Esta densidade de malha foi adotada após serem executados sucessivos refinamentos e atingir-se convergência das soluções.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A ausência de suporte em parte da circunferência do encosto pode ser causada por falha de usinagem, ou superfície do alojamento com acabamento grosseiro; aperto insuficiente dos parafusos do alojamento; ou por deformação do alojamento causado por aquecimento e resfriamento brusco. Ranhuras para distribuição de óleo no alojamento devem ser evitadas, a não ser para mancais de parede grossa [Neale (ed), 1973]. Impurezas sólidas entre o mancal e o alojamento também são consideradas causas de não-conformidade.

Na Figura 2 são apresentadas as distribuições de tensões circunferenciais na superfície do mancal para as seguintes situações de apoio: suporte completo, suporte para $\pi \leq \theta \leq 2\pi$ e $\pi \leq \theta \leq 7\pi/4$. Apesar de ser quase totalmente compressiva, a tensão circunferencial na superfície do mancal com suporte completo, passa a ser de tração ao final da região de pressão, onde ocorrem os maiores gradientes de pressão. Para este mancal, a tensão circunferencial de tração máxima possui o valor de $0,0213 p_{máx}$ e, ocorre ao final da região lubrificada, onde existem os maiores gradientes de pressão.

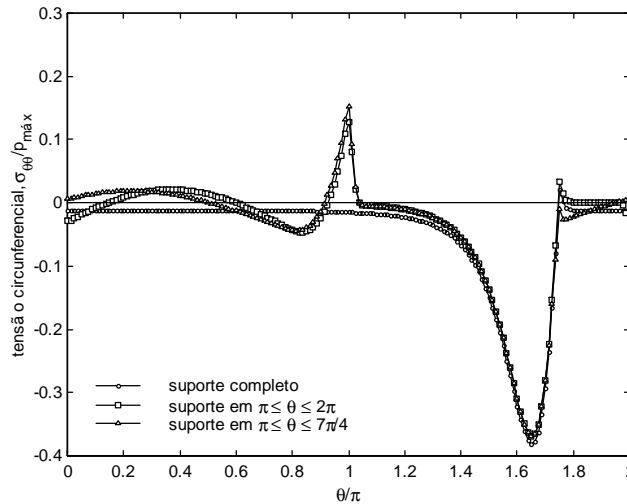


Figura 2. Influência da ausência de suporte fornecido pelo alojamento sobre as tensões circunferenciais na superfície do mancal.

Nota-se que o perfil da curva de tensão circunferencial tem sua forma alterada nas regiões onde termina o apoio do alojamento. Particularmente, se a ausência de suporte ocorre dentro da região de pressão, as tensões circunferenciais de tração tendem a valores bastante elevados, maiores que aqueles encontrados ao final da região lubrificada (fim do perfil de pressão hidrodinâmica), quando esta última apresenta-se apoiada. A ausência de suporte causa deformações de flexão localizadas induzindo as tensões circunferenciais de tração a valores muito elevados. De modo geral, os resultados desta investigação estão de acordo com aqueles apresentados por Hacifazlioglu e Karadeniz (1996).

A influência da não-conformidade geométrica sobre as tensões cisalhantes na interface entre o revestimento e o encosto para as mesmas condições de suporte acima, é apresentada na Figura 3. Para o mancal com suporte completo, a tensão cisalhante máxima na interface entre o revestimento e o encosto ocorre sob a região de maior gradiente de pressão e, seu valor é de $0,0303 p_{máx}$. Da mesma forma como ocorre com as tensões circunferenciais na superfície do mancal, nota-se uma forte modificação na distribuição e magnitude das tensões de cisalhamento nas regiões sob pressão onde há perda de suporte.

A resposta do mancal com encosto de cerâmica ao suporte incompleto do alojamento, também foi analisada. Verifica-se que o mancal com encosto de cerâmica é menos sensível à ausência de suporte do alojamento, tanto no que se refere às tensões circunferenciais de tração na superfície, quanto às tensões cisalhantes na interface entre o revestimento e o encosto (Figuras 4 e 5, respectivamente). Em $\theta = \pi$, têm-se tensões circunferenciais máximas na superfície de $0,1285 p_{máx}$, para o mancal com encosto de aço e, de $0,0921 p_{máx}$, para o mancal com encosto de cerâmica. Comportamento análogo foi obtido com relação às tensões cisalhantes máximas na interface entre o encosto e o revestimento; $0,0178 p_{máx}$, para o mancal com encosto de aço e, $0,0133 p_{máx}$, para o mancal com encosto de cerâmica.

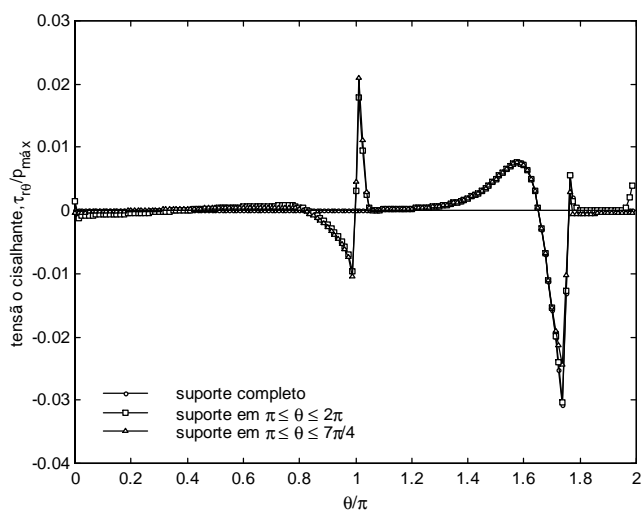


Figura 3. Influência da ausência de suporte fornecida pelo alojamento sobre as tensões cisalhantes na interface revestimento/encosto.

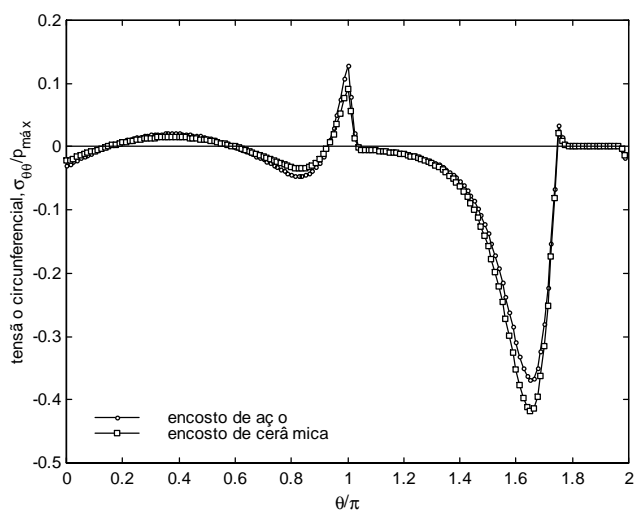


Figura 4. Influência da ausência de suporte fornecido pelo alojamento sobre as tensões circunferenciais na superfície do mancal para diferentes materiais de encosto (suporte em $\pi \leq \theta \leq 2\pi$).

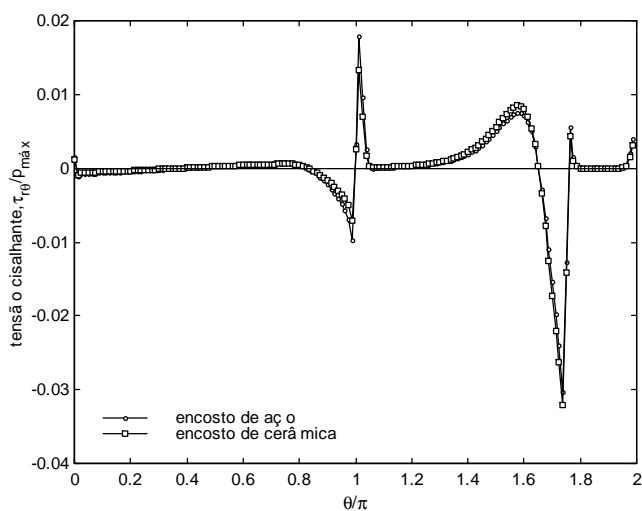


Figura 5. Influência da ausência de suporte fornecido pelo alojamento sobre as tensões cisalhantes na interface revestimento/encosto para diferentes materiais de encosto (suporte em $\pi \leq \theta \leq 2\pi$).

Outra situação de não-conformidade geométrica entre alojamento e mancal ocorre quando há presença de partículas sólidas (sujeira, rebarbas, etc.) entre o alojamento e o encosto. Estas partículas impedem o contato adequado entre a bronzina e o alojamento e dificultam o fluxo de calor. Para analisar a influência da presença destas partículas sobre o campo de tensões foi imposto ao encosto, na região correspondente ao fim do perfil de pressão hidrodinâmica, um deslocamento radial de $1\ \mu\text{m}$, no sentido do centro da bronzina. Todos os nós da circunferência externa da bronzina permaneceram nas condições de alojamento perfeitamente rígido, ou seja, com os deslocamentos impedidos na direção radial. Esta situação corresponderia à presença de um conjunto de partículas perfeitamente rígidas, com diâmetro de $1\ \mu\text{m}$, alinhadas no sentido do comprimento do mancal, incrustadas no encosto, entre o mancal e o alojamento; este último, também perfeitamente rígido. A influência da presença desta partícula sobre a distribuição das tensões circunferenciais na superfície do mancal e sobre as tensões cisalhantes na interface entre o revestimento e o encosto é mostrada nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

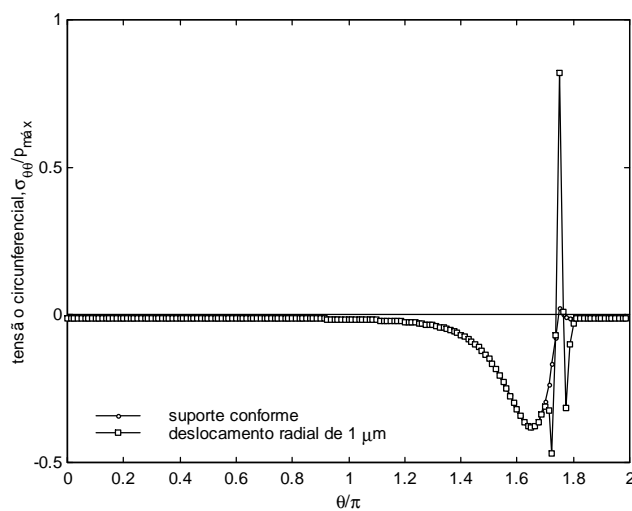


Figura 6. Influência da presença de partícula sólida entre o mancal e o alojamento sobre as tensões circunferenciais na superfície do mancal.

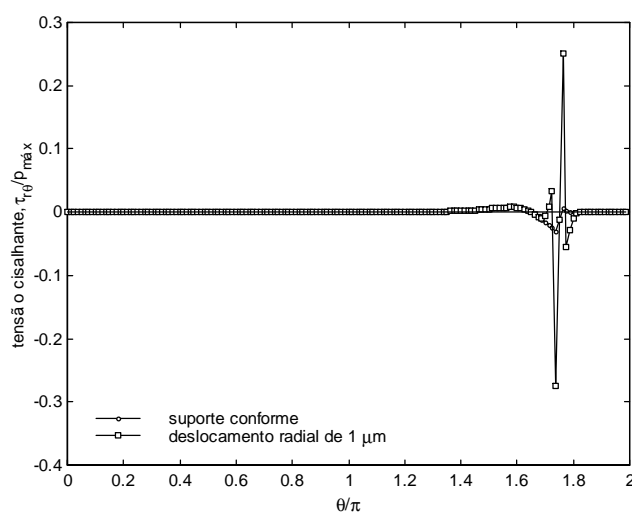


Figura 7. Influência da presença de partícula sólida entre o mancal e o alojamento sobre as tensões cisalhantes na interface revestimento/encosto.

Nota-se que, tanto as tensões circunferenciais de tração na superfície, quanto as tensões cisalhantes na interface entre o encosto e o revestimento, sofrem significativo aumento na região afetada pela presença das partículas.

A presença de partículas sólidas entre o alojamento e o mancal, causam distorções de flexão na superfície do revestimento. O efeito torna-se ainda maior quando somado à flexão devida aos elevados gradientes de pressão ao fim da região de pressão.

Analisando-se os resultados, pode-se dizer que a conformidade geométrica entre mancal e alojamento possui significativa influência na magnitude das tensões circunferenciais de tração na superfície do revestimento e das tensões cisalhantes na interface entre encosto e revestimento, devendo ser evitada a fim de aumentar a vida à fadiga do mancal.

4. CONCLUSÕES

Mancais radiais de filme fluido sob carregamento estático foram analisados através do Método dos Elementos Finitos com o objetivo de se verificar a influência da falta, ou da não-conformidade do suporte fornecido pelo alojamento ao mancal sobre o campo de tensões em bronzinas.

Dentro do escopo deste trabalho pode-se concluir que:

- i) A ausência de conformidade entre mancal e alojamento na região sob pressão induz tensões circunferenciais de tração na superfície do mancal. As tensões cisalhantes na interface entre o revestimento e o encosto também sofrem forte influência, tendo seus valores aumentados na região onde há perda de suporte;
- ii) Mancais com encosto de cerâmica apresentam-se menos sensíveis à ausência de suporte quando comparados a mancais com encosto de aço. As magnitudes das tensões circunferenciais de tração na superfície e das tensões cisalhantes na interface revestimento/encosto, na região onde ocorre perda de suporte, são menores quando comparadas aos mancais com encosto de aço;
- iii) A presença de partículas estranhas entre o alojamento e o encosto induzem deformações de flexão na superfície do mancal, originando tensões circunferenciais de tração nesta região. As tensões cisalhantes na interface têm suas magnitudes aumentadas quando há presença destas partículas.

A condição de alojamento perfeitamente rígido é uma consideração bastante simplificadora. Na realidade, não existe estrutura perfeitamente rígida. Particularmente, em mancais radiais de filme fluido, submetidos a carregamentos variáveis, uma baixa rigidez do alojamento implica uma diminuição da vida à fadiga do mancal, devido ao aumento da magnitude das tensões (Hacifazlioglu e Karadeniz, 1996; Thomazi, *et al*, 1999).

Sugerem-se investigações no intuito de verificar a viabilidade da utilização de material cerâmico na confecção de encostos de bronzinas. Apesar das dificuldades, inicialmente relacionadas com a obtenção de boa conformabilidade entre alojamento e mancal, devido à maior rigidez do material cerâmico, Hamrock e Anderson (1983) citam que, naquela ocasião, mancais de rolamentos com elementos cerâmicos estavam sendo utilizados ainda em caráter experimental. Hoje, mancais de rolamento de material cerâmico são amplamente comercializados e apresentam, em determinadas aplicações, grandes vantagens sobre os rolamentos convencionais.

A análise apresentada neste trabalho restringe-se aos efeitos da não-conformidade geométrica entre mancal e alojamento. Vários fatores relevantes que afetam a distribuição das tensões em mancais de filme fluido não foram considerados no presente trabalho. Entre eles, podem ser citados a influência da deformação do mancal e do alojamento, promovido pelo carregamento hidrodinâmico e térmico sobre a distribuição de pressão hidrodinâmica (efeito elasto-hidrodinâmico); o esmagamento das bordas da bronzina devido à operação de

montagem e, as tensões residuais devidas ao processo de fabricação. Este fatores, entre outros, são objetos de uma investigação mais ampla que encontra-se em andamento.

5. AGRADECIMENTOS

À Sra. Silvana Rizzioli, coordenadora da Área de Educação e Cultura, e ao Sr. Mário Lúcio de Oliveira, responsável pelo Setor de Gestão do Conhecimento - Mecânica, ambos da FIAT Automóveis S.A, pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

À CAPES pelo suporte financeiro e à FAPEMIG, por fornecer parte dos recursos computacionais que vêm permitindo a realização desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- American Society for Metals, 1985, "Metals Handbook", 9 ed., Vol. 3, pp 802-822.
- Hacifazlioglu, S. e Karadeniz, S., 1996 "A parametric study of stress sources in journal bearings", Int. J. Mech. Sci., Vol. 38, Nos. 8-9, pp.1001-1015.
- Hamrock, B. J. e Anderson W. J., 1983, "Rolling-Element Bearings", NASA Reference Publication 1105.
- Ibrahim, S. M. e McCallion, H., 1970, "Stresses in oil lubricated bearings", Proc. Inst. Mech. Engrs., **184**, Pt. 1, pp.69-78.
- Lang, O. R., 1977, "Surface fatigue of plain bearings", Wear, **43**, pp.25-30.
- McCallion, H. e Lofti, M., 1992, "Tensile surface stresses and fatigue in plain journal bearings", Tribology International, Vol.25, no.4, pp.247-257, Butterworth-Heinemann.
- Neale, M. J., 1973, "Tribology Handbook", Newnes-Butterworths, Londres.
- Norton, R. L., 1996, "Machine Design An Integrated Approach", Prentice-Hall Inc.
- Richerson, D. W., 1993, "Modern Ceramic Engineering - Properties, Processing, and Use in Design", segunda ed., Marcel Dekker, Nova Iorque.
- Schwartz, M. M., 1992, "Handbook of Structural Ceramics", McGraw-Hill, USA.
- Shigley, J. E., Mischke, C. R., 1989, "Mechanical Engineering Design", quinta ed., McGraw-Hill International Editions, Nova Iorque
- Swanson Analysis Systems, Inc., 1995a, "ANSYS Analysis Guide", Houston, PA.
- Swanson Analysis Systems, Inc., 1995b, "ANSYS Elements Manual", Houston, PA.
- Thomazi, C., Pérez, M., Oliveira, S., 1999, "Análise numérica de tensões em um mancal radial hidrodinâmico", Anais do VI Congresso Iberoamericano de Ingenieria Mecanica, 2v., n.p., Santiago, Chile.
- Xu, H., 1996, "Effects of EHD contacts upon the bearing and housing behavior", SAE Technical Paper Series, Paper no.960987, SAE Int. Cong. & Exp., Detroit, Michigan.
- Wilcock, D. F. e Booser, E. R., 1957, "Bearing design and application", McGraw-Hill Book Company, Inc., Londres.