DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DE TESTES PARA MANCAIS

Luigi Carvalho Greco
waxmen1@gmail.com

Philip Von Pritzelwitz
philip.pritzelwitz@gmail.com

Roberto Martins de Souza
roberto.souza@poli.usp.br

Rodrigo Lima Stoterau
rlstoeterau@googlemail.com

Resumo: A crescente demanda por motores mais econômicos e com maiores densidades de potência gera a necessidade de estudo de comportamentos específicos de cada componente desses motores. Nesse âmbito, analisou-se a elaboração de uma bancada de testes para o estudo de mancais de deslizamento em condições específicas de operação. Para a elaboração da bancada, avaliaram-se condições cedidas pela empresa ThyssenKrupp e elaborou-se um projeto que melhor atendesse a essas características e que pudesse avaliar e diferenciar tipos de mancais. A solução obtida consiste em uma mesa instrumentada, capaz de quantificar os parâmetros: espessura do filme de óleo, temperatura e pressão do óleo, perda de potência e perda lateral de óleo pelo mancal. Este texto apresenta aspectos teóricos de mancais, uma descrição geral da bancada, cálculos pertinentes para dimensionamento e seleção de componentes da mesma, simulações em elementos finitos de partes críticas, elaboração de desenhos técnicos e informações sobre a usinagem e a montagem.

Palavras-chave: Projeto de Máquinas. Fabricação. Mancais.

1. INTRODUÇÃO

O aperfeiçoamento dos motores de combustão modernos criou condições mais severas de operação e a necessidade de melhora de cada componente dos mesmos, para aproveitar melhor a energia dos combustíveis e reduzir a massa não útil do veículo. Além disso, a redução dos custos operacionais e o controle das emissões veiculares têm sido dois vetores importantes para o desenvolvimento da indústria automotiva. O estudo da tribologia (atrito, desgaste e lubrificação) dos componentes dos motores é tema fundamental para atingir benefícios significativos nessas áreas e os avanços podem ser decorrentes de projetos de motores mais adequados, do emprego de texturas superficiais e recobrimentos diferenciados dos componentes e do uso de lubrificantes específicos.

Com o auxílio de métodos computacionais, houve grande progresso na visualização de alguns fenômenos típicos de mancais de deslizamento, devido à criação e ao desenvolvimento de modelos específicos, permitindo uma previsão do comportamento em diversas condições de operação e facilitando as análises de um modo geral. Contudo, mesmo com o auxílio computacional os testes experimentais não podem ser dispensados, mesmo que demandem gastos e equipamentos devidamente instrumentados. Por esse motivo, a fase experimental é geralmente realizada no fim do processo de concepção de novas soluções, como teste final de soluções que foram desenvolvidas com base nas simulações.

Dentro desse sistema de desenvolvimento, a criação de equipamentos de teste específicos, que tenham baixo custo em comparação com os ensaios feitos diretamente e motores e forneçam subsídios para validação dos resultados da simulação, é bastante importante e vem sendo cada vez mais estudada.

Este texto apresenta aspectos teóricos de mancais, bem como a descrição de tópicos relativos ao desenvolvimento de uma bancada para testes de mancais.

2. PROJETO PROPOSTO – PARÂMETROS DE INTERESSE

O desenvolvimento da bancada de testes foi baseado em parâmetros característicos do funcionamento de mancais, que são: vazão lateral de óleo (perdas durante a operação); perda de potência no mancal; temperatura e pressão do óleo na condição de operação; e espessura do filme de óleo.

Com base nesses parâmetros pode-se ter uma boa definição do comportamento em funcionamento, assim como das condições do meio lubrificante. Essas informações são de extrema importância para o projeto de novos mancais, pois a partir delas consegue-se determinar se as especificações de projeto foram atendidas e pode-se comparar dois tipos de mancais diferentes (seja pelo acabamento superficial, pelo tipo de entrada de óleo ou por alguma característica em estudo).

Em termos das faixas de análise e funcionamento, definiram-se os seguintes parâmetros:

- Diâmetro interno do mancal: 30 a 50 milímetros;
- Comprimento do mancal: 12,5 a 22,5 milímetros;
- Rotação do eixo: 500 a 1500 RPM;
- Espessura de filme de óleo: maior ou igual a 1μm.

3. REVISÃO TEÓRICA

3.1 Característica da Aplicação

Os mancais de biela utilizados em motores automotivos possuem condições severas de aplicação, devido às altas rotações dos motores (acima de 3000RPM) e seus grandes carregamentos (no momento da explosão do combustível), sendo que para uma boa eficiência termodinâmica, os motores trabalham a uma temperatura de óleo de até 130ºC. Durante a explosão, a pressão do filme de óleo pode chegar a valores na ordem de 200MP, que podem interromper a condição hidrodinâmica de lubrificação existente nos mancais. Outra característica importante é a espessura do filme de óleo, no momento da combustão pode atingir valores mínimos na ordem de 5µm, os quais são comparáveis aos das deformações elásticas que mancal e virabrequim sofrem durante a combustão. O estudo para filmes com espessuras menores possibilita o um futuro aumento da densidade de potência dos motores, de tal forma que a energia liberada no momento da combustão seja maximizada para um mesmo tamanho de motor.

No caso do mancal-virabrequim, a influência da parcela térmica – referente à explosão – é menor em relação à que sofrem as partes mais próximas da explosão. Contudo, as temperaturas no virabrequim podem ser elevadas, alterando as propriedades do óleo lubrificante.

3.2 Mancal

Conforme Hutchings (1992), mancal é um componente que permite a livre movimentação relativa entre duas partes de um mecanismo, seja em uma ou duas dimensões, mantendo as dimensões originais das partes. Uma das características mais importantes de um mancal é operar com baixos coeficientes de atrito. Os mancais, devido às suas inúmeras aplicações, possuem diversas formas, sendo que as principais são mancais planos (estáticos e dinâmicos) e mancais de elementos girantes.

Os mancais de elementos rolantes possuem esferas ou rolos entre as superfícies com movimento relativo, de tal forma que esses elementos fazem a redução do atrito e sustentam as forças atuantes. Por sua vez, os mancais planos possuem um filme de óleo separando as superfícies móveis, sendo subdivididos em: mancais onde o suprimento de óleo é contínuo, de forma a gerar um filme lubrificante, seja hidrodinâmicamente ou hidroestaticamente; e mancais onde a lubrificação é intermitente ou retida na superfície do mancal.

A diferença entre os mancais hidrodinâmicos e hidrostáticos consiste na pressão de filme de óleo de operação. Nos mancais hidrostáticos, o filme de óleo é aplicado ao sistema a altas pressões, de forma a suportar os carregamentos das partes envolvidas e manter a lubrificação. Por sua vez nos mancais hidrodinâmicos, o óleo entra no sistema a baixas pressões e o movimento relativo entre as partes gera um aumento local de pressão no óleo, ocasionando a sustentação das partes envolvidas.

3.3 Regimes de Lubrificação

Na lubrificação hidrodinâmica não ocorre contato metálico entre os componentes, pois uma película significativa de lubrificante está sempre presente entre as superfícies e é capaz de separá-las. Desse modo, o coeficiente de atrito é função da reologia (viscosidade) dos lubrificantes e podem-se obter bons resultados por meio da seleção de óleos básicos adequados e também do uso de melhoradores de índice de viscosidade (MIVs) apropriados. Em geral, óleos conhecidos como *fuel economy*, que apresentam baixos coeficientes de atrito, possuem viscosidade baixa (usualmente SAE 5W30) e empregam MIVs com boas características de perda temporária de viscosidade.

No regime limítrofe, o contato metal-metal ocorre de maneira frequente e expressiva, pois o filme lubrificante não é capaz de desenvolver uma pressão suficiente para separar as partes metálicas. Nessa condição estão presentes somente filmes muito delgados de lubrificante aderidos quimicamente, e, nesse regime, os aditivos antidesgaste e modificadores de atrito são fundamentais na redução do coeficiente de atrito. Em geral, os óleos *fuel economy* possuem uma boa carga de aditivos modificadores de atrito.

A lubrificação mista é um regime transitório entre o limítrofe e o hidrodinâmico, em que o filme de lubrificante fica aprisionado nos vales das rugosidades das superfícies e é rompido esporadicamente nos picos dessas rugosidades, o que resulta em contato metal-metal.

A curva de Stribeck é um gráfico que relaciona o coeficiente de atrito com a espessura do filme de óleo lubrificante, sendo tal espessura definida por uma equação que é função da carga e da velocidade relativa dos componentes e da viscosidade do óleo. Além disso, a rugosidade dos componentes em contato tem papel decisivo na formação da camada de lubrificante, assim como o modo que o fluido irá escoar entre elas. Na Figura 3.1 (Lastres, 2011)é apresentada uma curva de Stribeck, com os três regimes de lubrificação e com a faixa de trabalho dos principais componentes dos motores, responsáveis pelas perdas por atrito em motores. Na figura, nota-se que os mancais, em geral, trabalham no regime hidrodinâmico, podendo atingir a condição de lubrificação mista em condições limites. A Figura 3.1 revela um comportamento qualitativo com base no atrito para a faixa de rotação em regime permanente. Por outro lado, no momento da partida e no da combustão, as condições são bastante diferentes, de tal forma que as condições de atrito são diferentes, sendo muito mais próximas das lubrificações mista e limítrofe do que da hidrodinâmica. Conforme Lastres (2011), uma estimativa dos valores de perdas ocasionados nos motores pode ser descrita como: anéis de pistões – 35 a 40%; distribuição – 20 a 25%; mancais – 10 a 15%; cilindros – 10 a 15%; e outros – 5 a 20%.

Figura 3.1 - Curva de Stribeck aplicada para motores automotivos. (Lastres, 2011)

3.4 Características do Lubrificante

3.4.1 Ação do Lubrificante

A existência de um fluido lubrificante, em teoria, deveria resultar em um isolamento de ambas as superfícies e, por consequência, o sistema não deveria apresentar desgaste e o atrito deveria ser baixo. Entretanto, a existência de um fluido na interface depende de características como a geometria de contato e a viscosidade do lubrificante, que exercem efeito na capacidade de sustentação hidrodinâmica do filme. Dessa forma, a sustentação hidrodinâmica e a ação das forças viscosas do fluido determinam a separação das superfícies e o atrito.

O entendimento dos mecanismos associados aos diversos regimes de lubrificação é importante para o projeto e conhecimento de variações dos mancais. De forma simples, pode-se considerar três mecanismos principais para a atuação de um lubrificante em um mancal: adsorção das moléculas, modificação química e separação física das superfícies. Os dois primeiros tendem a reduzir a resistência ao movimento relativo gerada pelo crescimento de junções no contato metal-metal e o último tende a reduzir o número de junções.

Entre os efeitos secundários da lubrificação, pode-se citar a eliminação de debris, o aumento da convecção no sistema e a modificação do campo de pressões no contato. A separação física entre as superfícies – principal característica do mancal hidrodinâmico – é resultante da resposta mecânica do fluido ao ser submetido à condição de velocidade relativa entre as partes. De uma forma geral, ao gerar esse efeito o fluido lubrificante adquire o formato de uma cunha, como é representado na Figura 3.2

Figura 3.2.

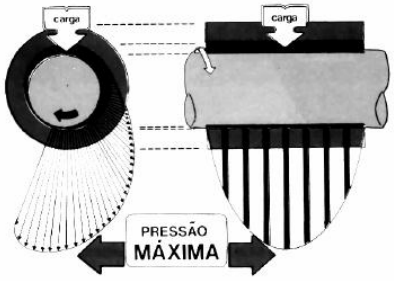


Figura 3.2 - Representação da distribuição de forças no mancal.

3.4.2 Formação de Filme Lubrificante

A lubrificação entre mancal e eixo ocorre com base em sete características específicas do sistema, sendo parcialmente ditadas pelo mancal e parcialmente pelo conjunto da aplicação. Essas características são: viscosidade do fluido (μ); velocidade entre as partes rotativas (U); carregamento suportado pelo mancal (W); módulo de elasticidade (E); excentricidade (ε); raio de aspereza (R) e formato do mancal.

Cada um dessas sete características influencia o mancal de modo diferente, dependendo do tipo de lubrificação predominante. Para tornar mais clara cada influência, a análise dos componentes não será feita de modo separado, mas com base nos regimes de lubrificação esperados. Como forma de não avançar em propriedades específicas de cada fluido – como o tipo e a eficiência que os aditivos influenciam o sistema – somente serão tratados os regimes hidrodinâmico (HL) e o elasto-hidrodinâmico (EHL).

A excentricidade do mancal pode ser considerada como uma resposta do sistema aos demais componentes que a regem e seu valor é obtido com base na equação 3.1. Essa característica é importante, pois avalia de forma indireta a menor espessura do filme de óleo.

$$\varepsilon = \frac{e}{c} \quad [3.1]$$

Onde,
e: distância entre os centros geométricos do eixo e do mancal [m];
c: folga radial do mancal [m].

Analisando as características em conjunto, com base em Stoeterau, mancais curtos[1] em regime hidrodinâmico são satisfatoriamente descritos pela equação 3.2.

$$W = \frac{U\mu_0 L^3 \pi \varepsilon}{4c^2(1-\varepsilon^2)^2}\left[\left(\frac{16}{\pi^2}-1\right)\varepsilon^2+1\right]^{\frac{1}{2}} \quad [3.2]$$

Onde, além das grandezas definidas anteriormente,
L: largura do mancal [m].

Dessa forma, percebe-se que para o regime hidrodinâmico a carga suportada é basicamente uma função de outros três parâmetros – folga radial, excentricidade e velocidade de operação. Contudo, para um dado valor de carregamento, existem infinitas combinações para os outros parâmetros. Dessa forma, a análise da carga suportada permite dimensionar os outros parâmetros, quando esses não são imposições do sistema.

Além disso, cabe-se ressaltar que esse equacionamento despreza as eventuais deformações que o eixo e o mancal possam ter em decorrência de grandes pressões. Em determinadas condições – grandes carregamentos –, uma pressão suficientemente grande pode ser produzida no fluido, de tal maneira que a superfície sólida pode ser deformada, resultando em mudanças locais na geometria. Esse mecanismo tende a melhorar a formação do filme e a habilidade do fluido em suportar a carga externa aplicada. Essa mudança de formato do mancal, aliada a concepções construtivas diferentes – como a quantidade, ou formato, de entradas de óleo, reservatórios de óleo ou mesmo ranhuras direcionais para o lubrificante – podem influenciar bastante a capacidade de carga suportada pelo mancal.

A velocidade do sistema, por sua vez, é uma imposição da aplicação e seu conhecimento é importante para intuir se o sistema conseguirá gerar uma pressão suficientemente grande para manter o fluido qualquer um dos regimes de lubrificação.

Analisando a viscosidade, sabe-se que para a maior parte das aplicações, os fluidos de trabalho podem ser considerados newtonianos e, dessa forma, possuem características bastante comportadas para uma boa faixa de valores de temperatura e pressão. Contudo, para a consideração de condições extremas é necessária a utilização de modelos adicionais. Dessa forma, inicia-se o refinamento do modelo considerando que o fluido lubrificante não possui mais a viscosidade independente da pressão. Assim, pelo modelo fornecido em Hutchings (1992), tem-se que a variação da viscosidade com a pressão é dada pela equação 3.3.

$$\mu = \mu_0 exp(\alpha P) \quad [3.3]$$

Onde,
μ: viscosidade na pressão de trabalho P [Pa.s];
μ_0: viscosidade padrão à pressão de referência [Pa.s];
P: pressão [Pa];
α: fator de correção da viscosidade [Pa^{-1}].

Com base nessa consideração, é possível intuir que à medida que a pressão de trabalho aumentar – que pode ser traduzida como efeito do carregamento – a viscosidade do fluido aumentará e, logo, o atrito do sistema também será aumentado. Por outro lado, ao se analisar as componentes do carregamento para o fluido em regime hidrodinâmico, um aumento significativo na pressão causa um aumento da capacidade de carga do mancal.

Grandes aumentos da pressão são gerados quando a excentricidade apresentada pelo mancal começa a crescer, de tal forma que o regime hidrodinâmico passa a não suportar mais todo o carregamento, gerando contato entre asperezas. Para avaliar a mudança de regime, outro equacionamento deve ser considerado. Assim, com base em Hutchings (1992), tem-se a equação 3.4 como a nova equação para determinação da espessura mínima de filme do óleo.

$$h_{min} = 1{,}79R^{0{,}47}\alpha^{0{,}49}\mu_0^{0{,}68}U^{0{,}68}E^{-0{,}12}W^{-0{,}07} \quad [3.4]$$

Onde,
h: espessura do filme de óleo [m];

[1] Mancais curtos são os que apresentam razão L/D (largura/diâmetro) menores que 0,25

R: raio das asperezas [m].
Sendo,

$$\frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad [3.5]$$

Onde,
E_1: módulo de elasticidade do material [Pa];
E: módulo de elasticidade combinado [Pa];
ν: coeficiente de Poison
Esse cálculo do módulo de elasticidade combinado (1/E) decorre da consideração do sistema se deformar e, dessa forma, tentar conformar elasticamente os materiais do mancal e do eixo para aumentar a camada de fluido lubrificante.

No regime hidrodinâmico a excentricidade fornece o valor da espessura de filme de modo indireto. Já no modelo para o regime EHL, o valor mínimo da espessura é importante para a avaliação da quantidade de contatos existentes e do desgaste dos componentes, caso a espessura de filme atinja valores marginais na ordem de alguns micrômetros. O limite do EHL é dado em carregamentos extremamente grandes e a baixas velocidades, de tal forma que o filme formado possua espessura muito reduzida e cause danos à superfície (*scuffing*). No regime EHL, o filme terá a maior parte de seus efeitos dada pelos aditivos inseridos no lubrificante.

4. CONCEITO E PRÉ-DIMENSIONAMENTO

Como ponto de partida, a máquina para ensaio de mancais foi concebida com base na fixação de um dos quatro parâmetros de interesse indicados no item 2. Analisando os parâmetros em conjunto, nota-se que a espessura do filme gera variação sensível em todos os outros parâmetros.

Construtivamente, um fato a considerar quanto à fixação da espessura do filme de óleo refere-se ao aquecimento do conjunto. Dependendo da temperatura que o óleo atinge durante o ensaio, a máquina pode ter dilatações térmicas na ordem da medição. O coeficiente de dilatação térmica dos metais é da ordem de 10^{-6} µm/(mºC), o que pode gerar variações dimensionais perto de 1µm para cada 1ºC de variação da temperatura do equipamento.

Por outro lado, analisando o funcionamento, caso a espessura não fosse mantida fixa, alguns ensaios poderiam resultar em uma diminuição muito grande, podendo haver contato direto entre eixo e mancal, o que implicaria no descarte do teste, pela alteração da geometria do mancal (riscamento de superfície) e pelo eventual dano que o eixo pudesse sofrer.

Com base nas ponderações realizadas, adotou-se a espessura do filme de óleo como parâmetro fixo, pois se acreditou que fixar esse parâmetro simplificaria o projeto.

5. DETALHAMENTO DO PROJETO

5.1 Transmissão de Potência

Polias e correias não foram usadas do projeto, pois a movimentação da correia geraria mais uma fonte de incerteza – histerese e mudança de tamanho da correia ao longo dos ensaios – além de, eventualmente, poder escapar e paralisar o ensaio. Além disso, o movimento da correia na polia geraria vibrações ao sistema, de tal forma que seria gerada mais uma fonte de erro e de instabilidade para a fixação da espessura de filme de óleo.

Soma-se a esse fato a necessidade de se empregar mais peças ao conjunto e assim aumentar os custos de fabricação e montagem, além de propiciar mais um componente para a troca – durante as manutenções – sem que haja uma necessidade real do componente.

5.2 Caixa de Rolamentos e Fixação do Eixo

Como forma de evitar que o eixo possua movimentação longitudinal, adotou-se que o modo de fixação seria por meio de mancais de rolamentos cônicos em sentidos opostos. Essa preocupação se faz necessária devido à necessidade de troca do conjunto eixo e capa do mancal para ensaiar famílias diferentes de mancais. Para a troca, toda a porção oposta ao motor será removida, de tal forma que os mancais de rolamento cônico servem como anteparos para o posicionamento longitudinal do eixo de forma correta, assim como de todas as outras partes envolvidas.

5.3 Paralelismo entre Eixos de Simetria

O paralelismo entre os eixos de simetria é extremamente importante para manter o sistema de lubrificação uniforme e evitar o contato entre eixo e mancal em pontos específicos, o que pode danificar as peças, invalidando o ensaio. Dessa forma, estudaram-se maneiras para fazer o alinhamento entre os eixos, de forma que a solução de mancal livre (eixo fixo e movimentação do mancal) pudesse ser mantida, sem grandes perdas de rigidez para o sistema.

A partir de um plano de referência tomado em relação à mesa e ao centro do mancal, projetaram-se calços para serem colocados entre estruturas rígidas. Além disso, tomou-se o cuidado para que as caixas de rolamento tivessem em

sua base furos que aceitassem diversas posições de encaixe para os parafusos, de tal modo que, com os acertos dos calços, a estrutura fosse, novamente, rigidamente presa à mesa.

5.4 Medição de Torque

Os itens a seguir apresentam as alternativas para medição de torque que foram estudadas ao longo do projeto da bancada para ensaio de mancais.

5.4.1 Medição por Telemetria

A principal vantagem do método de telemetria é a não necessidade de contato eixo-sensor, pois um sensor de torque baseado em *strain-gages* fica ligado ao eixo e é constituído de uma ponte de Wheatstone e um emissor em alta frequência do sinal lido. De forma a evitar interferências elétricas, o receptor do sinal é colocado a uma distância pequena do emissor, sem que haja contato com o eixo, permitindo a sua livre movimentação. Essa característica é muito útil ao projeto, pois praticamente não há interferência do sensor no comportamento do mancal.

Com base no sensor de torque da Binsfeld Engineering Inc (www.binsfeld.com), o qual é representado em destaque na Figura 5.1, analisou-se uma alternativa de projeto do eixo e sua fixação, incluindo a distância entre os rolamentos cônicos. Para um carregamento semelhante ao qual se espera medir, a Figura 5.1 revela o comportamento desta alternativa quanto aos deslocamentos na direção vertical, considerando todo o comprimento livre previsto. Pelos resultados nota-se que a deformação do eixo para grandes carregamentos ocasiona um deslocamento da ordem de 7µm, o qual, para o projeto, foi considerado muito elevado.

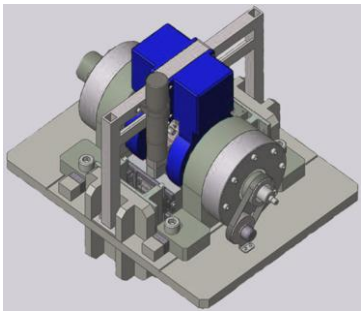
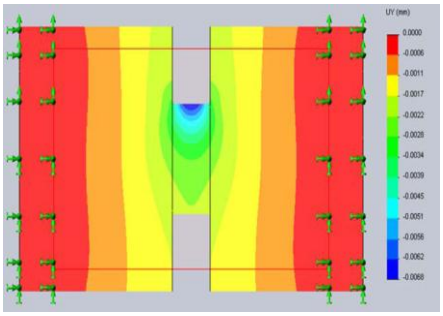
(a)  (b) 

Figura 5.1 – (a) Em destaque o sistema de medição de torque por telemetria; (b) previsão dos deslocamentos verticais no eixo,.

5.4.2 Medição Diferencial

Como alternativa para análise do torque estudou-se a possibilidade de medição diferencial com base na medida de duas células de carga colocadas simetricamente em relação ao eixo vertical da capa que recobrirá o mancal e terá os sensores, como pode ser visto na Figura 5.2a. O princípio de funcionamento do método consistena iteração do fluido com o mancal e com o eixo, a qual gerará um torque que tentará rodar a estrutura de suporte do mancal. O binário gerado pelo lubrificante gerará forças de reação nos apoios – onde residem as células de carga – de tal modo que em um dos lados haverá uma descompressão da célula de carga e do outro haverá uma compressão de mesmo valor em módulo.

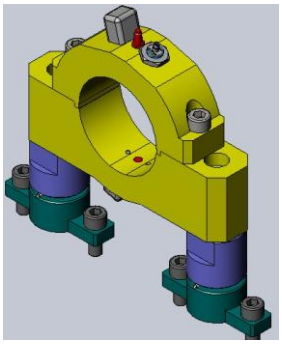
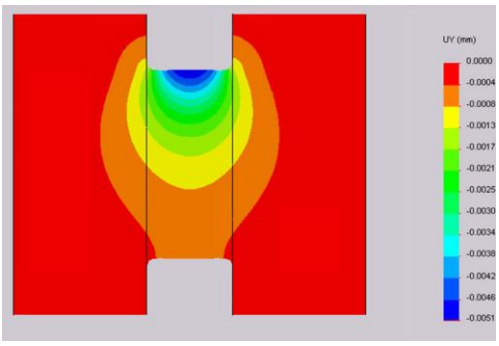
(a)  (b) 

Figura 5.2 – (a) Esquema de montagem para medição diferencial; (b) Previsão de deformações para o eixo com medidor de torque diferencial.

Dessa forma, as leituras das células de carga indicam, cada uma, valores correspondentes à metade do binário resultante. Como a rotação do eixo é conhecida, sabe-se a potência gasta para tentar rodar o mancal e, assim, a potência perdida em decorrência da presença do mancal e do fluido lubrificante no eixo.

Analisando-se o comportamento do eixo sob a carga esperada , chega-se à Figura 5.2, que revela valores de deslocamento vertical na região do mancal na ordem de 5µm. Mesmo que este valor ainda possa ser considerado elevado, esta foi a alternativa selecionada para a bancada de testes de mancais.

5.5 Sistema de Movimentação

O principal requisito do sistema de movimentação é comparável à principal característica de uma máquina de usinagem de ultra-precisão, ou seja, a capacidade de movimentação em baixíssimas velocidades (na ordem de alguns milímetros por minuto) com uma suavidade tal que seja isenta de vibração.

A isenção de vibração e a precisão são fundamentais para o bom funcionamento do dispositivo, devido à proporcionalidade entre a carga e a espessura de filme de óleo (conforme as equações 3.2 e 3.4), pois a vibração na movimentação pode induzir no sistema cargas maiores que as previstas e mesmo danos ao mancal ensaiado.

O sistema de movimentação é composto basicamente por: uma base fixa à mesa; duas guias lineares paralelas; um fuso de esferas recirculantes e um sistema de acionamento com redutor. A Figura 5.3 apresenta o arranjo de fuso e guias para o sistema de movimentação. A configuração descrita foi escolhida com base no princípio de manter um baixo atrito e evitar que os componentes que suportassem o carregamento sofressem grandes deformações ou eventuais rotações.

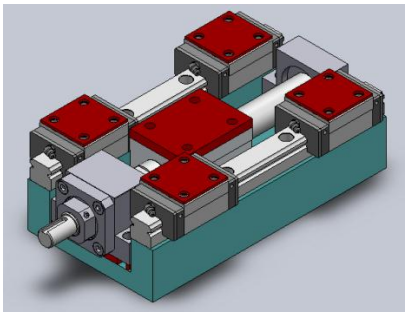


Figura 5.3 - Representação do arranjo de fuso e guias para o sistema de movimentação.

5.5.1 Guias Lineares e Fuso de Esferas

As guias lineares foram colocadas para impedir a rotação da plataforma que eleva o conjunto da capa do mancal em torno do eixo do fuso e para manter um plano idealmente perpendicular à mesa. Além disso, elas têm a função de propiciar a movimentação relativa entre a parte fixa na mesa e a parte que se movimenta, conforme a necessidade de aproximação ou afastamento para a imposição da espessura do filme de óleo.

O fuso de esferas foi selecionado em detrimento de outros métodos de movimentação, em razão dos seus baixos coeficientes de atrito e sua elevada capacidade de torque. Dessa forma, as forças necessárias para o acionamento do conjunto são reduzidas e as medidas fornecidas pelo sistema de acionamento são mais próximas da força realmente aplicada ao conjunto que abriga o mancal.

5.5.2 Sistema de Acionamento

Três formas de acionamento foram consideradas viáveis para o sistema: manual; motor de passo; e servo-motor. A decisão final a ser tomada baseia-se na comparação entre as alternativas disponíveis (Tabela 5.1). Para a aplicação, é imprescindível que o atuador apresente suavidade de movimentação (e variação de velocidade) e baixo *ripple* no torque desenvolvido, para evitar a introdução de vibrações prejudiciais ao processo de movimentação.

Tabela 5.1 - Comparação entre os candidatos a sistema de movimentação.

Propriedades	Manual	Motor de Passo	Servo-motor
Custo	Moderado	Moderado a Elevado	Elevado
Redução Base por volta	1:10.000	1:18.000	1:3.000
Malha de Controle	Nenhuma	Aberta	Fechada
Componentes	Redutor de rosca sem-fim, redutor helicoidal e volante para dar o ajuste	Motor de passo e redutor auxiliar	Servo-motor e redutor auxiliar

5.6 Sistema de Posicionamento

Foi estabelecido o objetivo de medir a distância entre o eixo e o mancal durante os ensaios, para garantir que o lubrificante mantenha-se no regime desejado. Para essa medição, foi determinado que são necessários dois sensores, a ser instalados na capa onde estará alojado o mancal ensaiado, de modo a possibilitar a triangulação para melhor determinar a posição do mancal em relação ao eixo fixo. A triangulação é importante, pois cada conjunto de parâmetros gera um ângulo de atitude no mancal. Como o mancal não tem uma posição fixa em relação ao plano vertical, a menor espessura do filme de óleo não se encontra sempre na mesma posição. Para a correta determinação da espessura é necessária a localização espacial do mancal, quando instalado no eixo, de forma a garantir a condição de espessura estabelecida.

Os itens abaixo apresentam alternativas de sistema de posicionamento analisadas para a bancada de ensaio de mancais.

5.6.1 Sensor de Proximidade a Laser

Inicialmente, foi sugerida a utilização de sensores a laser para medir a distância entre o mancal e o eixo, devido à sua excelente resolução e linearidade. No entanto, o meio pouco homogêneo ocupado pelo lubrificante poderia interferir nas medições. Além disso, a necessidade de um alvo fixo tornava-se um problema, por demandar uma medição indireta (a medida não poderia ser feita diretamente no alojamento do mancal), de tal forma que deformações gerariam erros entre a leitura e a medida exata. Para cada condição de espessura, o carregamento resultante será diferente e dessa forma a deformação de cada parte da estrutura assumirá um comportamento diferente, impedindo que uma correção padrão seja aplicada.

5.6.2 Sensor de Proximidade Capacitivo

Sensores de proximidade com princípio de funcionamento por percepção da diferença de capacitância devido à variação de distância entre o sensor e seu alvo são bastante utilizados nesse tipo de aplicação. No entanto, a maior parte dos usos encontrados na literatura apoia-se em medidas indiretas para determinação da espessura mínima de filme ou medem espessuras cerca de 50 vezes maiores que as tratadas nessa aplicação.

Distâncias entre eixo e mancal superiores a 50 μm permitem regime hidrodinâmico em mancais, de tal forma que as variações de distância em decorrência da topografia são pequenas e praticamente não afetam a medição. Para o ensaio em estudo, os regimes de operação residem nas zonas de lubrificação elasto-hidrodinâmica e limítrofe. Para estas condições, não se conhecem métodos quantitativos que prevejam a quantidade de contatos entre superfícies, com base nas medidas de potência e altura medida. Dessa forma, não se consegue avaliar se o valor registrado é uma condição real de operação de uma média local ou se é um erro decorrente de um adensamento ou diminuição dos contatos.

5.6.3 Sensor de Proximidade Indutivo

Com base em Stachowiak, percebe-se que esse tipo de sensor é largamente utilizado para a realização de posicionamento de objetos em ambientes de difícil acesso, devido ao método de medição por variação do campo eletromagnético. Dessa forma, os ambientes em que esse sensor é colocado são geralmente imunes de outros campos eletromagnéticos, situação que será bastante próxima da situação da bancada no momento de operação.

Para o bom funcionamento, o alvo do sensor indutivo deve ser de aço – material do eixo – como forma de extrair a melhor eficiência da variação do campo magnético. Contudo, não se conseguiu saber, com base na literatura, se o movimento do eixo e, por conseguinte, as variações de altura em decorrência das asperezas, irá influenciar a medida do campo magnético e como a taxa de aquisição irá se comportar.

5.7 Projeto Final da Máquina

A concepção final da bancada foi planejada de forma a facilitar a usinagem de cada componente, dispensando grandes restrições geométricas e necessitando de tolerâncias de usinagem menos apertadas. Além disso, foram consideradas as saídas para os cabos dos sensores, assim como a possibilidade de aprisionamento deles na estrutura, de forma a não colidirem com nenhuma parte móvel.

Para o acionamento, o motor de passo foi escolhido, devido à possibilidade de movimentação controlada com base em um software, de tal forma que o sistema tenha uma correção da posição, conforme os dados de saída dos sensores. Contudo, ainda não está descartada a utilização de um sistema de controle em malha aberta, no qual o operador corrige a posição do mancal conforme a leitura apresentada na tela e as características do ensaio. A solução em malha aberta necessita de uma menor implementação de rotinas de cálculo para prever eventuais deformações que distorçam o valor imposto ou a rotina deve ser projetada para comparar o valor do sinal com uma referência e com a movimentação do motor, de tal forma a fornecer uma quantidade maior de informações sobre o funcionamento do equipamento para o usuário.

6. CÁLCULOS ESTRUTURAIS

6.1 Estrutura Principal

Para mostrar a validade das dimensões e geometria de projeto de alguns componentes, elaborou-se o cálculo das tensões e deformações equivalentes por meio da ferramenta de elementos finitos. A

Figura 6.1 mostra o resultado obtido para a simulação da base da bancada sob condição de carregamento máximo esperado, considerando o peso da própria estrutura. Nota-se que os deslocamentos (a esquerda) em decorrência do carregamento são cerca de 47 vezes maiores que a espessura mínima de óleo a ser medida. Mesmo assim, este valor não introduz erros aleatórios de medição, ou seja, a carga gerada pelo movimento do mancal terá comportamento aproximadamente constante para o regime de operação, enquanto as diferenças indicadas pelos sensores podem ser decorrentes de pequenas variações da força, por exemplo, em função da topografia das superfícies.

Na Figura 6.1 percebe-se que a maior parte da deformação percebida pela bancada irá ocorrer na parte superior da mesa, onde estão apoiados todos os suportes para a acomodação e movimentação do eixo.

Além disso, verifica-se que a tensão máxima de von Mises (a direita na figura) está abaixo da tensão de escoamento do material, o que implica que os elementos da bancada sempre trabalharão em regime elástico e a bancada não sofrerá deformações permanentes em nenhum dos casos de operação.

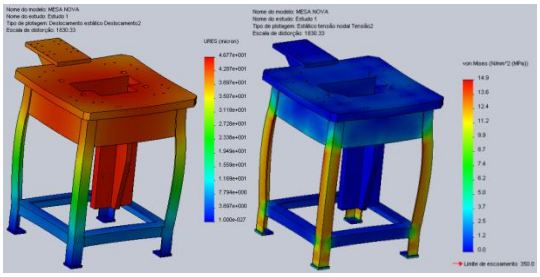


Figura 6.1 - Valores previstos para os deslocamentos da base da bancada (esq.); valores previstos para as tensões equivalentes em decorrência do carregamento (dir.).

6.1.1 Peça de Movimentação Vertical

Para a elaboração dos cálculos da placa de movimentação vertical foi considerado que a peça seria submetida a um carregamento associado basicamente aos quatro furos ligados ao fuso de esferas e à força decorrente do posicionamento do mancal, distribuído de forma equitativa sobre toda a superfície superior da peça. Esse carregamento do mancal pode ser visualizado na Figura 6.2 (esquerda), assim como as tensões equivalentes aplicadas sobre toda a placa.

Como esperado, as concentrações de tensão residiram nas proximidades dos parafusos de fixação ao fuso, em decorrência da necessidade de aplicação de grandes cargas localizadas em um espaço relativamente pequeno em comparação com o resto da peça. Além disso, nota-se que as tensões na maior parte da placa são baixas. Como forma de avaliar o erro introduzido pela deformação da peça, analisaram-se os deslocamentos da placa sob carregamento, Figura 6.2 (direita). Nota-se que a deformação na região central da peça é menor que 1µm. Além disso, na região do mancal observam-se deslocamentos da ordem de 2,5µm, que são menores que os observados na estrutura principal como um todo (Figura 6.1).

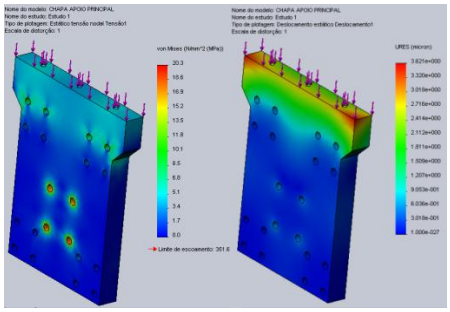


Figura 6.2 - Tensão na placa de sustentação do conjunto de suporte dos sensores (esq.); deformação prevista para a placa de sustentação do conjunto de sensores (dir.).

Analisando os resultados das simulações em elementos finitos como um todo, percebe-se que as estruturas secundárias possuem deslocamentos significativamente menores que os da estrutura principal. Esse fenômeno é justificado pela geometria da mesa, pois a parte que sofre o carregamento diretamente, apesar da estrutura reforçada,

não possui fixação direta ao solo. Dessa forma, a estrutura principal atua de forma semelhante a um modelo de viga bi-apoiada, a qual possui deformações significativas no meio do vão. Por sua vez, as estruturas secundárias suportam carregamentos mais concentrados e suas dimensões apresentam espessuras significativas para impedir grandes deformações de cada um dos elementos.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conceito elaborado para gerar a solução final pareceu atender a cada um dos critérios elaborados.

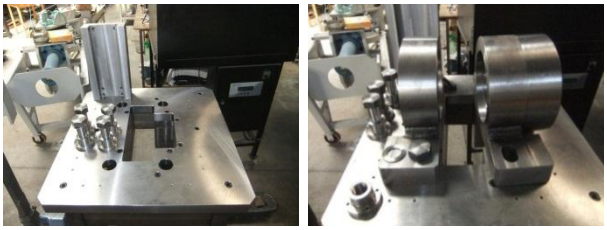


Figura 7.1 - Bancada construída, juntamente com parafusos de fixação e peça de suporte (esq.); Semi-montagem da bancada completa (dir.).

Como resultado do trabalho de projeto e cálculo, elaboraram-se os desenhos de fabricação do conjunto e foi liberada a ordem de fabricação de todas as peças. A Figura 7.1 apresenta fotografias de alguns dos componentes já fabricados.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. Great Britain 1992, Edward Arnold Publication Ltd.

LASTRES. Luiz Fernando. **Redução do Atrito Melhorando o Desempenho**. Disponível em: <http://www.lubes.com.br/revista/ed16n02.html>. Acesso em: 27 out. 2011.

STOETERAU, Rodrigo Lima. **Notas de Aula do Curso de Lubrificação de Mancais**. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

SUNADA, Marcelo Massayuki. **Acionamento de um Posicionador Linear de Ultra-Precisão Empregando uma Redução Harmonic Drive com Controle de Velocidade**. 2007. p133. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2007.

STACHOWIAK, Gwidon W.; BATCHELOR, Andrew. Engeneering Tribology. 2001. Butterworth-Heinemann (BH). Woburn.

DEVELOPMENT OF TEST BENCH FOR SLIDING BEARINGS

Luigi Carvalho Greco
waxmen1@gmail.com

Philip Von Pritzelwitz
philip.pritzelwitz@gmail.com

Roberto Martins de Souza
roberto.souza@poli.usp.br

Rodrigo Lima Stoterau
rlstoeterau@googlemail.com

Abstract: The increasing demand for more economical engines and with better power density creates the need to study the specific behavior of each component of these engines. In this area it has been analyzed the development of a test bench to study sliding bearings under specific operation conditions. In order to elaborate the test bench the values provided by ThyssenKrupp have been evaluated, then a solution that best complied with the desired operation settings and that could assess and distinguish several bearing profiles has been formulated. The solution obtained consists of a bench, duly instrumented, enabled to quantify the following parameters: oil film thickness, oil temperature and pressure, power loss and side oil flow on the bearing. This text presents theoretical aspects of bearings, a general description of the test bench, calculations pertinent to sizing and selection of components, finite elements simulations for the critical parts, preparation of the blueprint and information on machining and assembly.

Keywords: Machine design. Machining. Bearings.