

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
LABORATÓRIO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS



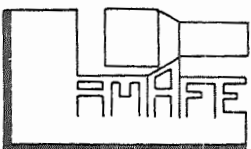
TRIBOLOGIA

I - HISTÓRICO

B. de M. Purquerio
M.Sc. (Tribologia), Ph.D.

SÃO CARLOS

1983



I - HISTÓRICO

1 - INTRODUÇÃO

A palavra TRIBOLOGIA apareceu pela primeira vez em março de 1966 com a publicação de um relatório do Departamento de Educação e Ciência da Inglaterra, sob o título "Lubrication (Tribology) Education and Research". Todavia, é o nome e não o assunto que é novo e os editores de dicionários estão incluindo a palavra nas edições mais recentes.

O que é Tribologia? A definição simples é a seguinte... "A ciência e tecnologia das superfícies que se interagem em movimento relativo e das práticas a elas relacionadas". A palavra inclui os tópicos relativos ao atrito, lubrificação e desgaste, ou sejam:

a) a física, química, mecânica e metalurgia das superfícies interagindo em movimento relativo incluindo os fenômenos de atrito e desgaste.

b) lubrificação com filme de fluido, como por exemplo, a hidrostática, hidrodinâmica, aerostática e aerodinâmica.

c) lubrificação além da com filme de fluido, como por exemplo, a lubrificação limite e a lubrificação sólida.

d) lubrificação em condições especiais como a que ocorre durante a deformação dos metais e os processos de corte.

e) as propriedades e comportamento operacional dos materiais para mancais.

f) a mecânica dos mancais e das superfícies dos mancais, como por exemplo, os mancais ordinários e os mancais de rolamento, anéis de pistão, guias de máquinas, dentes de engrenagens, etc., inclusive o seu projeto, fabricação e operação.

g) a mecânica do ambiente dos mancais.

h) as propriedades e comportamento operacional dos lubrificantes fluídos, semi fluídos, gasosos e sólidos, bem como os materiais a eles relacionados.

i) o controle de qualidade e inspeção de lubrificantes.



j) o manuseio, distribuição e aplicação de lubrificantes.

k) a administração e organização da lubrificação.

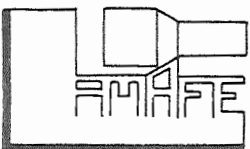
Agora que dispomos de uma definição mais acessível, passemos a analisar os tópicos relacionados com a história e o significado econômico da Tribologia.

2 - HISTÓRICO

A importância do atrito e a resistência ao movimento tem sido sobejamente reconhecida através do desenvolvimento da nossa civilização. Seria muito difícil e provavelmente até desnecessário, tentar determinar a época ou período em que o conceito de mancal foi desenvolvido. Todavia, podemos reconhecer os eventos registrados que demonstram que aquelas idéias e engenhos alcançaram um estágio de desenvolvimento bem definido.

Por exemplo, sabe-se que as brocas feitas durante o período paleolítico para a produção de fogo ou broqueamento de furos eram montados em mancais de chifres ou ossos (Davison - 1957). É possível supor com segurança que o desenvolvimento dos mancais progrediu a partir do momento em que o homem começou a empregar o movimento rotativo, porém é igualmente verdadeiro o fato de que também procurou adquirir a compreensão dos fatores que reduzem o atrito no movimento linear, antes dessa época. As brocas já mencionadas e a roda de oleiro (disco rotativo usado na confecção de vasos de cerâmica) constituem exemplos do desenvolvimento dos mancais, associados com o movimento rotativo.

O mais antigo registro do uso de rodas em veículos provém das tábuas encontradas na Suméria, um antigo distrito da Babilônia, datando cerca de 3500 AC (NAYLOR-1965). As rodas de oleiro certamente também datam dessa época e várias dessas rodas empregavam mancais de pedra polida. O mais antigo exemplo desse tipo de mancais datam de 20000 AC (Figura 1).



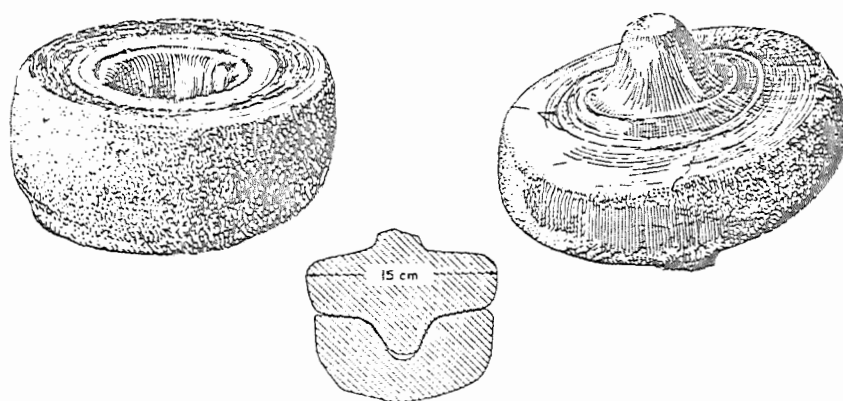


Figura 1 - Mancais de pedra polida de uma roda de oleiro datando de 2000 AC.

As furadeiras de arco eram empregadas pelos egípcios e os mancais das mesmas eram feitos de pedra ou madeira dura. (Figura 2).

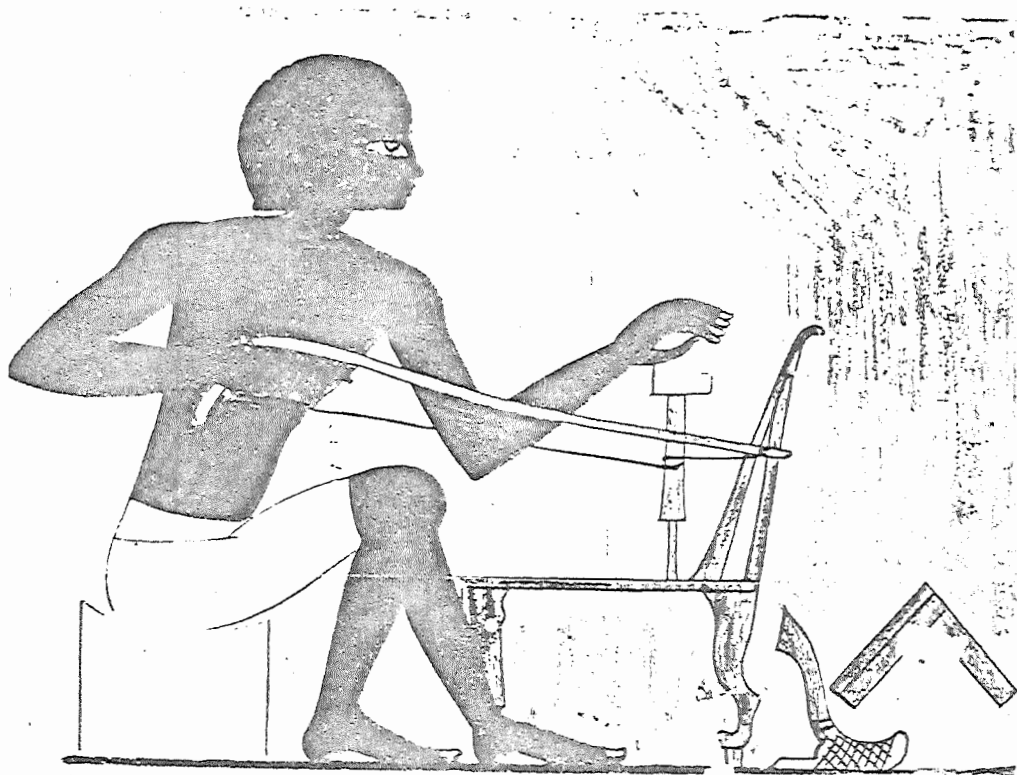
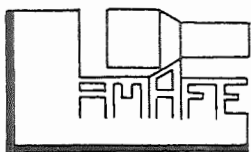


Figura 2 - Furadeira de arco egípcia.

Dois outros registros históricos provindos dos antigos egípcios são de grande significado triboló



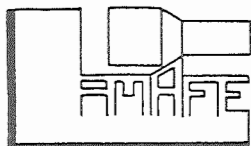
gico - os veículos com rodas tipo carruagem e o transporte de estátuas colossais, da ordem de 60 toneladas, e blocos de pe
dra para construção.

Em um túmulo aberto no Egito há alguns anos, uma das carruagens ainda tinha algum do lubrificante original no eixo (Parish-1929). O lubrificante foi constatado ser viscoso e levemente graxo e o ponto de fusão do mesmo sendo de 67°C levou a crer que foi feito com sebo de boi ou de carneiro. Fuller (1956) acredita que tal espécie de lubrificante tenha sido muito adequado para lubrificação de eixos em um país quente como aquele. É também interessante observar que o lu
brificante do eixo continha alguns resíduos de estrada na for
ma de areia de quartzo, compostos de alumínio, ferro e cal.

Torna-se claro portanto que o papel dos lubrificantes na redução do atrito e desgaste em mancais era muito bem apreciado naquela época.

O transporte de objetos pesados envolveu desde o simples arrasto, a possível utilização de toras ou rolos e o uso do trenô até o veículo com rodas mais moderno. Para ar
rastar os blocos de sessenta toneladas que usavam em suas construções os egípcios utilizavam muito mais potência humana do que a empregada em suas construções. Desde o desenvolvimento dos veículos com rodas era limitado aos carros e carruagens para serviço leve, torna-se claro porque os egípcios necessitaram da utilização de rolos ou trenôs. A solução desse problema foi discutida por vários historiadores e a sugestão origi
nal de Layard (1867) que empregavam roletes tem sido mais recentemente questionada por Davison (1961). Layard foi in
fluenciado pelo importante baixo-relevo que foi descoberto em Nineveh entre 1845 e 1851 o qual mostra um colosso assírio sendo movimentado sobre um trenô. O baixo relevo mostra multil
hões de escravos puxando o trenô através dos cabos e outros escravos colocando toras curtas a frente da prancha. Apesar de ser acreditado que as toras eram usadas como roletes para reduzir o atrito e permitir que a carga fosse movida sobre as irregularidades das superfícies, Davison discorda desse ponto de vista baseando-se nos seguintes pontos:- (Figura 3).

a) Os "roletes" são mostrados com seus eixos para
lelos a direção do movimento.



b) Os "roletes" são, sem dúvida, galhos de árvore e não são nem roliços nem retos.

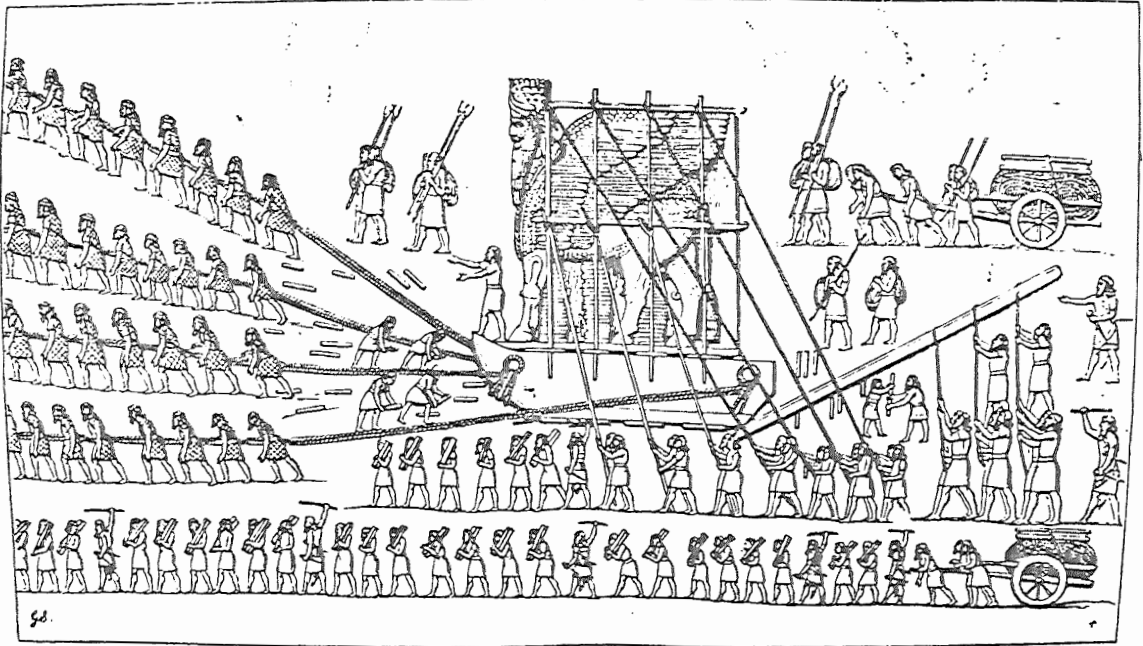
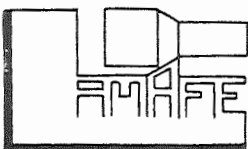


Figura 3 - A utilização de "Roletes" sob trenós assírios e egípcios. 700 AC.

Sugere-se, por outro lado, que os "roletes" são mostrados naquela direção devido a falta de conhecimento de perspectiva dos escultores. Porém, esse argumento parece ser não razoável quando os mínimos detalhes do relevo são considerados. Se os "roletes" foram colocados paralelos à direção do movimento, é evidente que o papel deles era reduzir o coeficiente de atrito de deslizamento entre o trenó e o solo.

Um caso semelhante é mostrado em um desenho egípcio dotado de 1880 AC. Nele, os rolos são utilizados sem qualquer orientação. (Figura 4).

A característica mais interessante desse desenho é que ele mostra um operário com um jarro colocando lubrificantes no solo imediatamente na frente do



trenô. Esta é provavelmente a primeira ilustração registrada de um "oleador" ou "engraxador" ou "lubrificador" ou Tribologista. O desenho mostra também homens carregando pranchas planas com cerca de 5m x 0,45m e outros carregando jarros extras - possivelmente contendo lubrificante.

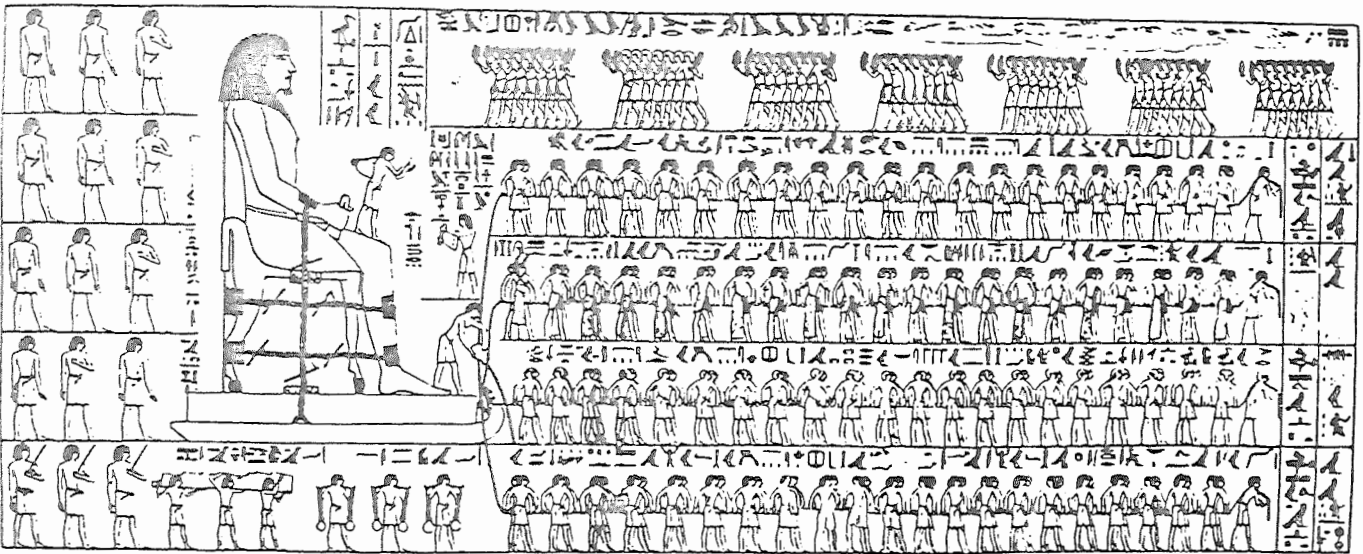


Figura 4 - Transporte de um colosso egípcio - 1880 AC.

2.1 - O Coeficiente de Atrito

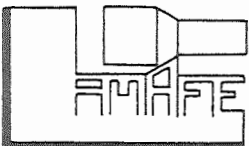
O desenho da Figura 5, mostra 172 homens puxando os cabos e estima-se que a força que um homem pode exercer está entre 534 a 1070 N. Considerando que o peso do colosso mais o trenô seja $W = 60$ toneladas e que um homem possa puxar 800 N, então a força total de atrito será

$$F = 172 \times 800 \text{ N}$$

e o coeficiente de atrito

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{172 \times 800}{60 \times 9964}$$

$$\mu = 0,23$$



Bowden e Tabor (1950) citam o coeficiente de atrito entre madeira e madeira como sendo:

0.2 para madeira molhada

0.25 a 0.5 para madeira seca e limpa

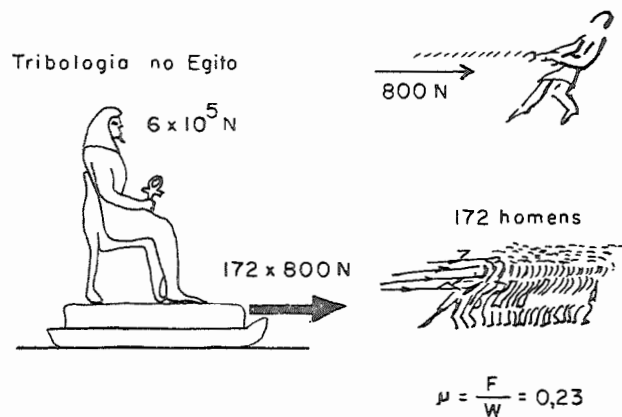


Figura 5 - Cálculo do coeficiente de atrito de deslizamento.

Comparando o coeficiente de atrito do trenô com os valores obtidos por Bowden e Tabor é possível sugerir que o trenô estivesse realmente deslizando sobre pranchas de madeira lubrificadas. Davison (1961) calculou que a pressão média de contato entre o trenô e as pranchas era provavelmente da ordem de $137,9 \times 10^3 \text{ N/m}^2$.

Um outro exemplo que demonstra a melhoria introduzida pelo movimento de rolamento é citada por Harris (1966) em seu livro sobre mancais de rolamento. Uma ilustração mostra Assírios movimentando um enorme bloco de pedra, puxando-o em pranchas sobre roletes. A fonte de informação relatada na ilustração é incerta e pode ser puramente um diagrama moderno, todavia a data é mencionada ser cerca de 1100 AC e o coeficiente de atrito pode ser calculado como segue.

Peso estimado do bloco de pedra $W = 7$ toneladas
e trenô

Força de tração/homem estimada = 800 N



Nº máximo de homens puxando obloco = 8

Portanto, máxima força aplicada = F = 8 x 800

Coefficiente de atrito $\mu = \frac{F}{W}$

$$\mu = \frac{8 \times 800}{7 \times 9964}$$

$$\mu = 0.09$$

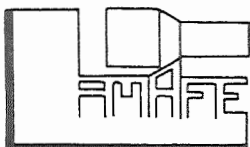
Se o número de homens envolvidos for seis, o coeficiente de atrito é 0.07.

Os valores numéricos obtidos para o coeficiente de atrito nesses dois exemplos sugerem que um desenvolvimento tribológico considerável, representado pela mudança do movimento de deslizamento para o de rolamento, teve lugar por volta de 1100 AC.

Naylor (1965) também comenta que os egípcios faziam uso das propriedades lubrificantes dos fluídos viscosos empregando camadas de argamassa nas quais faziam os enormes blocos de pedra flutuarem até a posição onde seriam fixados. Esta é sem dúvida, uma precursora do tipo de lubrificação hoje conhecida como esmagamento de película.

Se considerarmos o argumento de Davison como verdadeiro de que as toras empregadas no transporte de estátuas pesadas não foram utilizadas como rolos, então, o primeiro registro relativo a um mancal de rolamento trata dos aríetes de infantaria usado por Diades (Grécia) 300 AC. Era um mancal lineare empregando pequenos roletes entre o pesado aríete e a base estacionária. Uma espécie de gaiola era usada para separar os elementos rolantes. O aríete foi utilizado no cerco de Cadiz (Davison -1957).

Em 1928 foram encontrados sob as águas do Lago Nimi perto de Roma (Davison -1957), fragmentos que pareciam ter sido um mancal axial de esferas. As bolas eram de bronze e pivotadas e tem sido sugerido que este mancal que traz uma seme-lhança fantástica com os modernos mancais de escora, foi usado para carregar uma pequena estátua. O mancal datado de 12-40 AD., pode não ter sido usado como um verdeiro mancal de elementos rolantes. (Figura 6).

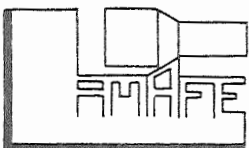


A idade média parece ter sido barrada tribologicamente, porém Leonardo da Vinci (1452-1519) desenvolveu algumas das primeiras idéias científicas sobre o atrito e desgaste. Ele reconheceu claramente as duas primeiras leis do atrito - que a força de atrito é proporcional ao carregamento e independente na área nominal de contato - e efetuou experimentos sobre atrito os quais o levaram a concluir que o coeficiente de atrito para todas as combinações de materiais era 0,25. Diz-se que Leonardo da Vinci inventou o mancal de rolos, mas esta observação a qual é baseada em esquemas que permaneceram não publicados até 1894 é, sem dúvida, invalidada pela descoberta no Lago Nimi. Convém lembrar também, que Aristóteles (383 AC) mencionou que a resistência ao atrito era menor para objetos redondos.

O desenvolvimento industrial iniciado nos séculos dezesseis e dezessete foi responsável pelo renovado interesse em assuntos tribológicos. Muitos mancais de madeira eram utilizados, todavia o desenvolvimento de equipamentos específicos como tornos e maquinária para mineração produziu um excelente estímulo aos desenvolvimentos empíricos mais adiantados. Os lubrificantes empregados eram ainda de origem vegetal ou animal. O desenvolvimento científico mais significativo no final do século dezessete o qual foi ampliado dois séculos depois para formar a base da teoria moderna da lubrificação com película de fluido foi o reconhecimento da lei do escoamento viscoso por Newton (1687).

O século dezoito foi notável no sentido tribológico por dois principais motivos. O entendimento do atrito sêco desenvolveu consideravelmente e o projeto e fabricação de mancais aperfeiçoou muito. Em 1769 Amontons fez o relato da primeira investigação experimental sobre atrito desde o trabalho de Leonardo e ele, independentemente descobriu as duas leis do atrito as quais estão agora associadas com o nome dele. É interessante notar que ele também concluiu que o coeficiente de atrito era o mesmo para todas as superfícies, e que ele chegou ao valor $\frac{1}{3}$, comparado com o $\frac{1}{4}$ obtido por Leonardo.

Amontons atribuiu o mecanismo do atrito sêco ao inter-travamento das asperidades. Euler testou as conclusões de Amontons e concordou com o valor



$\frac{1}{3}$ em 1750. Vários estudos sobre o atrito foram efetuados na última metade do século dezoito, sendo que o mais notável foi devido a Coulomb (1779 e 1781). Ele confirmou as duas leis do atrito de Amontons e adicionou uma terceira, ou seja, que a força de atrito é independente da velocidade de deslizamento. O trabalho de Coulomb foi efetuado para preencher as necessidades da engenharia e os seus resultados parecem ter sido de grande valor para as indústrias em expansão no fim do século

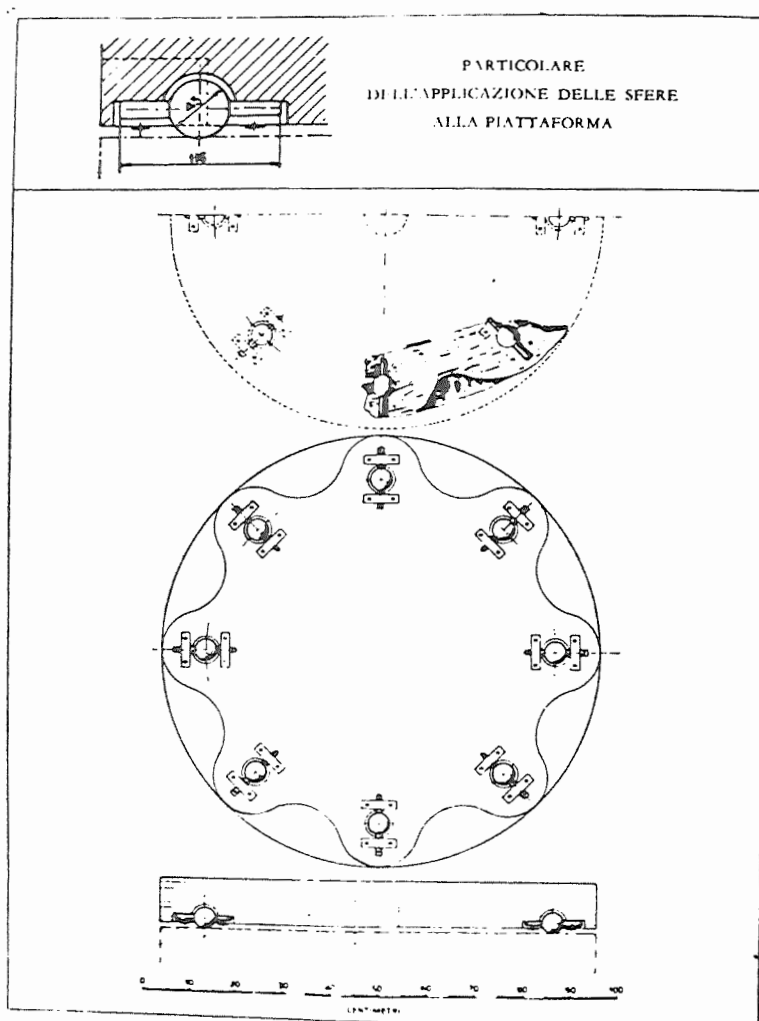
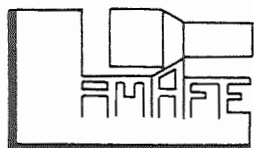


Figura 6 - Um mancal de rolamento primitivo.

dezoito. As três leis do atrito constituem uma aceitável primeira aproximação do comportamento de muitos contatos secos e a maioria do ensino nas escolas e universidades é baseado nelas. O tribologista, embora mais cauteloso em aceitar estas leis devido a sua apreciação em nível mais elevado do papel da textura superficial, as propriedades

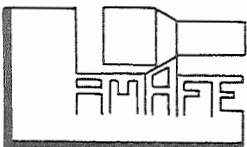


mecânicas dos materiais, a química e a física das superfícies, ainda acha conveniente reduzir a complexidade das interações superficiais a estas declarações mais amenas.

O segundo desenvolvimento importante do século dezoito está relacionado aos mancais propriamente. Os projetistas começaram a usar buchas bipartidas substituíveis em máquinas, como os tornos no começo do século, e o uso de metais não semelhantes foi substituindo os mancais de madeira na metade do século. Robert Hooke desenvolveu muito o desempenho dos mancais de carruagens de tração animal em 1684. Ele escreveu "... eixos de aço, e mancais de metal, são muito melhores que madeira, fixados ou calçados com ferro; e munhões de aço temperado, girando em mancais de metal, seriam ainda muito melhor, se existisse algo para impedir a entrada de poeira, e conseqüentemente supri-los com óleo, para evitar que se desgastem...". Hooke reconheceu claramente a importância da vedação dos mancais, e é interessante notar que os retentores constituem um assunto de interesse tribológico considerável nos dias de hoje.

Através do século dezoito as carruagens constituíram o principal estímulo para o desenvolvimento dos mancais, pois os equipamentos industriais e os motores a vapor de baixa velocidade desafiavam muito pouco o projetista da época. Contudo o desenvolvimento de maquinaria acionada a vapor e o conseqüente aumento da velocidade e da carga sobre os suportes rapidamente ultrapassou a capacidade dos relativamente rudes mancais de uso geral e, no final do século dezoito, estabeleceu-se um rápido progresso tribológico. O metal patente foi introduzido como material para mancal por volta de 1840.

O desenvolvimento das estradas de ferro no século dezenove solicitou melhores mancais para os eixos de rodas. É digno de se comentar que o primeiro trabalho do IME (Institution of Mechanical Engineers) em lubrificação, de Bridges Adams em 1853, era intitulado "sobre lubrificação de eixos de rodas de estrada de ferro". Adams reconheceu claramente a necessidade de separar as superfícies opostas dos mancais com uma película de lubrificante. Ele também canalizou a atenção para o fato de que os bem desenvolvidos mancais de eixos de roda de carruagens de auto estrada

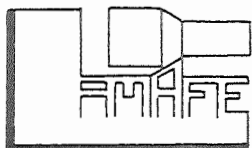


da podiam operar durante cerca de 8000 quilometros em estradas irregulares ao passo que as relativamente toscas caixas dos eixos das rodas de estrada de ferro tinham que ser engraxadas a cada 160 quilometros.

A necessidade de um suprimento adequado de lubrificante para mancais era sobejamente reconhecida pelos engenheiros na metade do século dezenove; fato este confirmado pela introdução de vários dispositivos projetados para levar o lubrificante de um reservatório até o mancal. Neste estágio, mancais ordinários relativamente satisfatórios foram desenvolvidos através de métodos empíricos, porém o projetista ainda não estava preparado para produzir um mancal digno de confiança para uma situação nova. Em muitos casos, era ambíguo os efeitos da carga e velocidade sobre o atrito no mancal.

2.2 - O Trabalho de Osborne Reynolds

Importantes revelações relativas ao entendimento do processo de lubrificação ocorreu durante o período de 1878 a 1886. Thurston investigou o efeito da velocidade, carga e temperatura no atrito de mancais radiais, porém seus resultados, publicados em 1878, pareceram ser inconsistentes. Na Rússia, Petroff estava também estudando a natureza do atrito de mancais radiais lubrificados e testou óleos vegetais, animais e minerais. Petroff, cujo trabalho foi publicado em 1883, concluiu que o atrito em mancais radiais podia ser explicado como um fenômeno hidrodinâmico assumindo que o lubrificante era cizalhado entre um eixo e mancal coaxiais. Na Inglaterra, o conselho do I.M.E., estabeleceu uma comissão para pesquisa experimental em 1878. A comissão recomendou duas áreas de pesquisa em 1879 e em um dos itens realçava a necessidade de estudar o atrito entre corpos sólidos em velocidade relativa elevada. Na ocasião, Beauchamp Tower foi comissionado para investigar a lubrificação de mancais radiais. O primeiro relatório de Tower apresentado à instituição em 1883, incluía duas remarcáveis observações. Foi observado que as medidas do momento de atrito obtidas eram consistentes e repetitivas somente quando abundante quantidade de lubrificante era suprida ao mancal - a primeira indica-

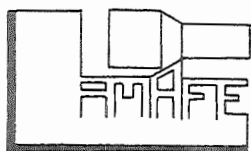


ção da necessidade de prover mais do que uma simples amostra de óleo para as superfícies do mancal. Em segundo lugar, os experimentos proveram a primeira evidência de pressões no filme lubrificante os quais estavam excedendo tanto a pressão ambiente como a pressão de alimentação. Os trabalhos de Tower e de Petroff ilustram o valor da investigação experimental cuidadosa no estudo de um fenômeno físico. É interessante notar que Tower tinha trabalhado com Lord Rayleigh e era muito conhecido como experimentador em outros campos.

O desenvolvimento simultâneo do conceito da lubrificação com película de fluido em duas partes diferentes do mundo coloca uma interessante questão histórica. Os principais fatores responsáveis por essa situação parece ser a exploração de poços de petróleo em várias partes do mundo com a conseqüente disponibilidade do óleo mineral em bruto, e a necessidade de otimizar a vida e eficiência da maquinaria. Particularmente, a expansão das estradas de ferro tiveram um efeito importante e tanto Petroff como Tower estavam ligados com esse problema.

Seguindo o trabalho experimental de Tower, os princípios básicos da lubrificação com película de fluido foram formulados por Osborne Reynolds em um extraordinário trabalho científico publicado em 1886. Aplicando os princípios hidrodinâmicos do escoamento laminar a uma geometria representativa da folga entre as superfícies de um mancal radial, Reynolds foi capaz de mostrar que o movimento da superfície do eixo podia gerar pressões na película de óleo o qual, por sua vez, podia suportar considerável carga. Basicamente Reynolds mostrou que quando um fluido viscoso é puxado para dentro de um espaço de altura decrescente pela imposição da velocidade superficial dos elementos do mancal, são geradas pressões capazes de suportar cargas. Esse importante conceito é conhecido como o efeito de cunha do lubrificante.

O clássico trabalho de Reynolds contém valiosas informações. Parece que Reynolds não era o único que achava que as leis da hidrodinâmica deviam ser aplicadas a película de óleo lubrificante descoberta por Tower, pois G.G. Stokes informou Tower em 1884 que ele tencionava investigar os resultados da aplicação das conhecidas equações



do movimento de um fluido viscoso ao problema. Ele notou em particular que as equações poderiam ser reduzidas "... desde que a inércia do lubrificante não é sensivelmente levada em consideração".

Uma consequência imediata do reconhecimento do conceito do efeito de cunha foi que o superior desempenho dos mancais radiais lubrificadas adequadamente sobre os mancais de escora pode ser explicada. O eixo excêntrico rotativo de um mancal radial produz automaticamente uma geometria da película de óleo que conduz a geração de pressão. O deslocamento axial relativo das superfícies paralelas de um mancal de escora não tem condição de produzir a cunha de lubrificação, devendo o projetista produzir a requerida forma através do projeto das superfícies.

O esclarecimento dos processos físicos envolvidos na lubrificação com película de fluido no espaço de poucos anos, no fim do século dezenove, proveu os projetistas com informações qualitativas necessárias para o projeto dos mancais ordinários. Durante os 50 anos seguintes muitas idéias juntaram-se a solução da equação de Reynolds para as várias formas de mancais.

Um exemplo extraordinário de criatividade em projeto de engenharia instigado pelo estudo analítico foi provido pelo quase simultâneo desenvolvimento do mancal de sapata articulada nos Estados Unidos (Kingsbury) e na Austrália (Michell) em 1910. A muito pequena inclinação necessária para o funcionamento ótimo de um mancal de escora é difícil de ser usinada bem como mantê-la no componente montado. Kingsbury e Michell decidiram prover um suporte para sapatas axiais livres e individuais cujas superfícies fossem capazes de ajustar-se por si mesmas automaticamente às condições de operação com um efeito ótimo. O engenheiro sempre tenta projetar um sistema que se auto ajusta quando encontra problemas com tolerâncias muito estreitas e usinagem precisa.

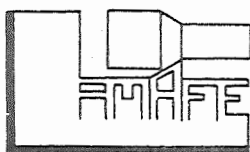
Cerca de meio século depois do trabalho fundamental da década de 1880 nota-se uma mudança na direção seguida pelo estudo de mancais lubrificadas com película de fluido. O processo fundamental da lubrificação com película foi reexaminado e muitos fatores não considerados sob nenhum aspecto por Reynolds tornaram-se objeto de



numerosas investigações. Tópicos como cavitação, efeitos térmicos e de alta pressão no lubrificante e nas partes sólidas do mancal, inércia e escoamento de fluidos não Newtonianos, a utilização de lubrificantes gasosos e o desenvolvimento dos mancais hidrostáticos começaram a ser todos considerados. Esta nova atividade tratando dos fundamentos da lubrificação continua e coloca novamente a questão - que acontecerá agora?

A resposta para esta pergunta é que o aumento das velocidades e cargas operacionais do mancal, a necessidade de mancais estarem operando em ambientes severos, juntamente com a segura melhoria do acabamento superficial dos componentes dos mancais, introduziu novos problemas e possibilidades. Embora existam muitos aspectos fundamentais da lubrificação de mancais com película de fluido que ainda requeiram investigação científica, estamos agora entrando em uma era onde o engenheiro projetista pode utilizar a informação existente para projetar novos tipos de mancais com muito mais confiança. Cem anos se passaram, desde os acontecimentos da década de 1880, para atingir essa posição.

Os mancais de elementos rolantes foram desenvolvidos seguramente para aplicações industriais desde 1700. O mancal de rolos foi o primeiro a ser utilizado devido a sua relativa facilidade de fabricação, porém os mancais de esferas foram introduzidos por volta do fim do século. Um dos primeiros modelos de mancais de esferas foi usado em um moinho de vento em Sprowston, Norwich em 1780. As esferas de $2 \frac{1}{4}$ polegadas de (57,15 mm) diâmetro eram de ferro fundido. A primeira patente para um mancal radial de esferas foi obtida por Philip Vaughan em 1794, e as esferas eram feitas pelo simples torneamento até cerca de 1895 quando a conformação a quente e a frio e conseqüente esmerilhamento foram introduzidos. A bicicleta promoveu considerável estímulo para o desenvolvimento dos mancais de esferas. As primeiras bicicletas equipadas com mancais de esferas foram produzidas em 1869 e os usuários da época ficaram aparentemente impressionados como a força para pedalar fora reduzida. Os processos para a retificação das esferas foram introduzidos entre 1885 e 1900 os quais promoveram o avanço necessário para a produção industrial em massa que vemos hoje. É também

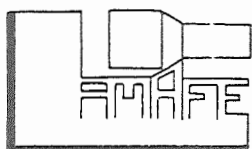


de interesse histórico: notar que esse desenvolvimento teve lugar na mesma época em que os mistérios dos mancais ordinários, que eram usados há centenas de anos, estavam sendo revelados.

O nível de atividades em tribologia cresceu seguramente desde a segunda grande guerra. O estímulo proveio do desenvolvimento de maquinárias de alta rotação, máquinas de movimento recíproco para serviços pesados bem como da necessidade de tais máquinas operarem em ambiente severo. Como o tamanho e a velocidade das turbinas aumentaram, dois fatores vieram complicar o problema dos mancais. Em primeiro lugar, as condições térmicas tornaram-se mais severas devido ao cisalhamento viscoso e a magnitude desse problema tornou-se aparente quando foi notado que os mancais em conjuntos geradores de potência grandes, dissipavam milhares de cavalos vapor. As altíssimas velocidades superficiais também causavam mudanças nas condições do escoamento na película lubrificante. O escoamento laminar usual degenerava nos vórtices de Taylor ou mesmo em escoamento turbulento.

A medida que a potência efetiva das máquinas recíprocas foi melhorada, também tornou-se maior e mais severa a carga nos mancais. Isso resultou na necessidade de melhorar os materiais e os projetos e hoje, a seleção de mancais apropriados é objeto de extensivos estudos computacionais. Em geral o engenheiro projetista tenta balancear as massas rotativas e de movimento recíproco nos motores de combustão interna para que o funcionamento seja suave, mas, recentemente, a limitação da vida do motor imposta pelo desempenho dos mancais tem sido reconhecida e em alguns casos o balanceamento ótimo tem sido dispensado a fim de reduzir a severidade do carregamento dos mancais.

O técnico em lubrificantes introduziu vários aditivos para os óleos minerais convencionais para permitir que o lubrificante se torne adequado para a maioria das necessidades da tecnologia moderna. Os óleos que eram usados há vinte anos atrás seriam, sem dúvida, inadequados para os modernos motores de combustão interna. Todavia, existem casos onde os lubrificantes convencionais não conseguem satisfazer a demanda do ambiente. Por exemplo, a radiação, condições de temperaturas muito altas ou muito baixas,

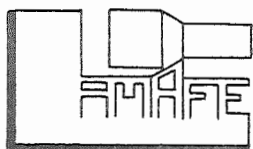


ambientes excessivamente poluídos e ambientes com pressão alta ou baixa. Lubrificantes sintéticos tem sido desenvolvidos para satisfazer algumas dessas necessidades e em alguns casos tem sido possível utilizar o próprio fluido do ambiente (gás ou água) como lubrificante. Os lubrificantes sólidos na forma de dispersões ou simplesmente como materiais para mancais sêcos tem também recebido considerável desenvolvimento.

Os computadores tem desempenhado um papel importante nos estudos da lubrificação e no desenvolvimento dos métodos de projeto de mancais. Tem sido utilizados para prover soluções numéricas das equações básicas as quais normalmente não se adaptam aos métodos analíticos para formas reais de mancais. Estamos agora entrando numa era em que o projeto de mancal pelo computador está se tornando uma possibilidade real. Uma das dificuldades tem sido que o projeto de mancais não era anteriormente reconhecido como um ítem carente de cuidados especiais. O mancal é, apesar de tudo, uma diminuta parte na maioria das máquinas e por isso é um decepcionantemente simples componente. Existem muito poucos produtos na tecnologia moderna que sejam mais simples em forma do que uma simples bucha circundando um eixo, os quais constituem um mancal radial, apesar do projeto e fabricação deste elemento serem resguardados por uma vasta experiência e conhecimentos científicos e tecnológicos. A imensa simplicidade dos mancais resultou na negligência dos mesmos e um dos principais requisitos odiernos é prover os projetistas de máquinas com a mais completa apreciação das características de operação e projeto dos mancais.

2.3 - O Desgaste.

Nos dias de hoje, o projeto baseado no desgaste constitui o maior desafio para os engenheiros projetistas. Tudo se desgasta. O engenheiro tende a classificar o desgaste em dois tipos: leve e severo. Os desgastes severos incluem as formas catastróficas de desgaste como o travamento de mancais ou de pistões nos cilindros e geralmente conduzem ao colapso instantâneo e dispendioso da máquina. Há quarenta anos atrás, o travamento dos motores de carros não era desconhecido; dez a quinze anos passados, o desgaste leve não era incomum e retificações dos cilindros eram necessá -



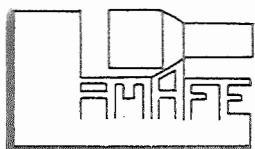
rias depois de 30-50000 kilometros. Hoje, a vida média de um motor é 160000 kilometros ou mais e partes do motor podem desgastar-se antes que o motor necessite retificação dos cilin - dros.

Ao tribologista é ocasionalmente apresentada novas e dispendiosas formas de desgaste severo - como por exemplo as falhas em turbo geradores de grande dimensão como os que são encontrados nos últimos anos podem custar milhões de cruzeiros para cada dia que o gerador fique fora de uso.

O desgaste, como o atrito entre sólidos e a forma limitante de lubrificação conhecida como "lubrificação limite", carecem de ser examinados do ponto de vista das interações moleculares fundamentais se o mecanismo necessita ser compendido.

3 - ASPECTOS ECONÔMICOS

Na história da tribologia houve várias ocasiões em que as características econômicas desempenharam um papel pre dominante no curso do seu desenvolvimento. Os egípcios sabiam o que significava o valor monetário dos seus escravos ou não teriam devotado tanta atenção à redução do atrito e à lubrificação na construção de suas vastas estruturas de pedra. O custo do atrito e do desgaste foi certamente levado em conta durante os desenvolvimentos industriais do século dezanove, e o reconhecimento de que os mancais dos eixos das rodas eram verdadeiramente uma limitação ao desenvolvimento satisfatório do serviço de estradas de ferro, conduziu diretamente às grandes descobertas da década de 1880. Robert Thurston, o primeiro presidente do ASME (American Society of Mechanical Engineers) estava estreitamente ligado com a necessidade de grande economia na utilização de energia e em 1879 ele publicou um livro a respeito do assunto (Friction and Lost Work in Machine ry and Mill Work - 1885). Hersey relatou os resultados de sua investigação sobre as perdas por atrito em usinas siderúrgicas (cilindros laminadores) em 1936. Descobriu que 90% da potência total necessária para os laminadores era usada para vencer o atrito - 40 a 50% sendo absorvida somente nos mancais dos cilindros. Em um trabalho ciên



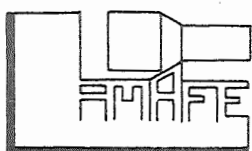
tífico para o Terceiro Congresso Mundial do Petróleo em Hague, em 1951, o professor Vogelpohl estimou que 1/3 a 1/2 da produção mundial de energia era consumida sob a forma de atrito.

Os dados são assustadores e com o crescente investimento em equipamento industrial através do mundo, é inevitável que a atenção seja focalizada na economia que pode ser feita através da melhoria dos aspectos tribológicos da maquinaria. Existe uma crescente apreciação da necessidade de preservar os recursos naturais em todo o mundo e um movimento igualmente importante para reduzir as perdas da produção mundial de energia.

Nos últimos anos, os países Europeus tem examinado os aspectos econômicos do atrito e desgaste excessivo. Na Alemanha Ocidental, as perdas resultantes de serviços tribológicos inadequados foram recomendados no início da década de 50, e medidas rigorosas foram tomadas para corrigir a situação. Em 1956 foi emitido um decreto estabelecendo que toda fábrica deve ter pelo menos uma pessoa especializada em lubrificação e lubrificantes. Institutos especiais foram criados para promover serviços e cursos de treinamento necessários à indústria e só no primeiro ano após a instalação, 1700 pessoas receberam instruções sobre tecnologia da lubrificação. A Polônia também mostrou um conhecimento semelhante da importância dos aspectos econômicos da tribologia e um recente estudo confirmou que cerca de 1/3 da energia produzida naquele país era para vencer o atrito. A perda direta de energia e o conseqüente desgaste na indústria de aço foi estimado em 5 a 6% da produção total de aço.

Na Grã-Bretanha os desenvolvimentos foram mais recentes. No final de 1964 Lord Bowden, o então Ministro do Estado para Educação e Ciência, convidou H.R. Jost para analisar, juntamente com outros especialistas em Engenharia de Lubrificação, a posição presente da educação e pesquisa em lubrificação no país e derivar uma opinião sobre as necessidades da indústria nesse campo. Um grupo de trabalho em Engenharia de Lubrificação foi formado e em março de 1966 foi publicado um relatório das descobertas e recomendações do grupo.

Durante uma investigação preliminar para estabelecer as razões para a enorme negligência no assunto no passado, a despeito da sua importância tec

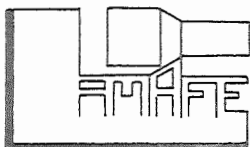


nológica e econômica, descobriu-se que a natureza interdisciplinar do assunto era uma das principais causas para esta negligência. Vários autores tem comentado através dos anos sobre o fato que o tópico que agora chamamos de Tribologia é um dos melhores exemplos de estudos interdisciplinares. Ele abraça vários aspectos da engenharia mecânica incluindo a fluído mecânica, termodinâmica, elasticidade, plasticidade e dinâmica, física, química, metalurgia e matemática juntamente com economia.

A segunda descoberta importante foi que o termo "lubrificação" tinha um significado diferente para diferentes pessoas. Para a maioria dos engenheiros o termo conduzia ao amplo significado que o Grupo de Trabalho tinha como referência, mas no seu sentido popular e terminologicamente escasso era usualmente associado com "a almotolia do operário não especializado". Esse significado popular tem impedido muita gente de entender completamente o significado científico, técnico e econômico do assunto. Foi por esta razão, que o Grupo de Trabalho, depois de consultar o departamento de inglês (dicionário) da Oxford University Press, recomendou a introdução do novo termo Tribologia (Tribology) na língua inglesa. A palavra originou-se do grego tribos, significando fricção, e ela engloba os tópicos lubrificação, atrito e desgaste. Talvez a parte mais significativa da definição dada anteriormente seja "... e das práticas a ela relacionadas". Esta característica da definição reconhece que a aplicação satisfatória dos aspectos científicos e tecnológicos do assunto devem ser resguardados pelo estudo das questões administrativas, organizacionais e econômicas associadas.

O aspecto mais notável do Relatório Jost foi a estimativa do efeito da tribologia aperfeiçoada na economia nacional. O Grupo de Trabalho concluiu que a economia poderia atingir a casa dos 515 milhões por ano (1966). A reação inicial de incredulidade usualmente desaparece quando o suporte aos itens individuais que participam do total são considerados.

A redução no consumo de energia devido a um menor atrito, foi estimada diretamente através da geração total de potência conhecida na Grã-Bretanha e estimada por especialistas, bem como a porcentagem de energia perdida em atrito desnecessário a qual poderia ser



economizada através do aperfeiçoamento da tribologia. A economia total neste ítem foi estimada em 28 milhões por ano. Foi estimado que a economia feita pela redução da mão de obra resultante de melhores projetos e procedimentos operacionais era da ordem de 10 milhões por ano. Estas e outras estimativas são mostradas na Figura 7.

Pode-se notar pela Figura 7 que os ítems mais significativos são a economia em manutenção e substituição (230 milhões), economia em perdas consequentes de colapsos (115 milhões) e economia em investimentos devido ao aumento da vida média das máquinas (100 milhões).

O Relatório Jost examinou a situação da educação e da pesquisa no assunto na época e foram feitas certas recomendações.

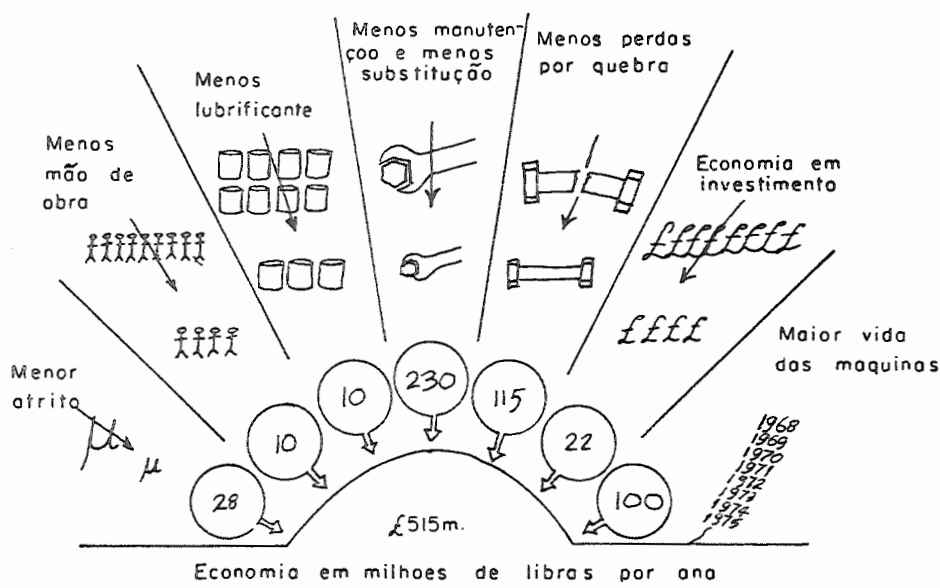
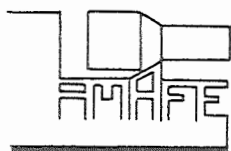


Figura 7 - Economia estimada - Relatório Jost (1966).

O ministro da tecnologia estabeleceu uma Comissão de Tribologia em 1966 para notificá-lo sobre o assunto e sub-comissões para tratar com pesquisa e educação. Foram estabelecidos três centros regionais de Tribologia com o objetivo de dar assistência a indústria e efetuar os vínculos necessários entre os especialistas das universidades e outros centros de pesquisas com meio indus -



trial.

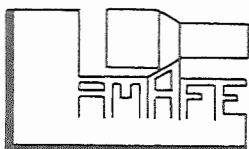
Foi necessário, certamente, algum tempo para que o impacto das atividades fosse totalmente apreciado pela indústria. Os processos educacionais não podem naturalmente serem ligados a toda potência de imediato, levando portanto algum tempo para ser reconhecido e trabalhos de pesquisas poderem ser iniciados nos pontos mais importantes. Todavia, cursos hoje são oferecidos (na Inglaterra) em todos os níveis e são encorajadas as pesquisas nos campos mais importantes. O. I.M.E. (Institution of Mechanical Engineers) respondeu prontamente e desempenhou um papel importante na implantação das recomendações que provê as atividades profissionais na esfera tribológica. Os regulamentos foram modificados para permitir que o recém batizado Grupo de Tribologia pudesse receber os benefícios da total participação dos membros dos Institutos e Sociedades de Física, do Instituto do Petróleo, do Instituto dos Metalurgistas e do Instituto de Química. Membros desses corpos científicos estão alocados agora na Comissão de Tribologia para representar o amplo espectro das disciplinas associadas com a Tribologia e existindo um espírito de unidade e propósito que seria muito difícil de conceber alguns anos atrás. Existe ainda muito para ser feito, mas os recentes desenvolvimentos tem marchado longo caminho em direção a transposição das barreiras ainda existentes em um verdadeiro tópicio interdisciplinar através dos sistemas de treinamento educacionais e vocacionais existentes.

É digno de notar-se como o reconhecimento dos aspectos econômicos de um assunto pode produzir consideráveis mudanças no mesmo e prover novos estímulos a instituições de educação, corporações profissionais, grandes unidades industriais e eventualmente departamentos governamentais.

4 - LEITURA COMPLEMENTAR

ADAMS, W.B.; - Railway axle lubrication. Proc. Inst.Mech. Engrs.: 57-60, 1853.

BOWDEN, F.R. e TABOR, D.; - The friction and lubrication of solids. 2 vol., 19 - 89, Oxford. Clarendon Press. 1950/64.



- DAVISON, C.St.C.; - Bearings since the stone age. Engineering: 2-5, 1957.
- DAVISON, C.St.C.; - Transporting sixty-ton stones in early Assyria and Egypt. Technology and Culture: vol.2,n91, 1961.
- FULLER, D.D.; - Theory and practice of lubrication for engineers. John Wiley and Sons Inc. 1956- 432p.
- HARRIS, T.A.; - Rolling bearing analysis. 89, New York - John Willey and Sons Inc. 1966.
- LAYARD, A.H.; - Nineveh and Babylon. London. 1867.
- LUBRICATION (TRIBOLOGY) EDUCATION AND RESEARCH (Report on the present position and industry's needs. H.M.S.O. (Her Majesty's Stationery Office). 1966.
- NAYLOR, H.; - Bearings and lubrication. The Chartered Mechanical Engineer: vol. 12: 642-647, 1965.
- NEWTON, I.; - Mathematical principles of natural philosophy, Lib. II, Sec. II, London. 1687.
- PARISH, W.F.; - Lubricants. Encyclopaedia Britannica, 14th Edit., vol. 14: 451-453, 1929.
- PETROFF, N.R.; - Friction in machines and the effect of the lubricant. Eng. I.St. Petersburg: 71-140, 228-79, 377-436, 535-64, 1883.
- REYNOLDS, O.; - On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp Tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil. Phil. Trans. Roy. Soc.: London. 157-234, 1886.
- TOWER, B.; - First report on friction experiments. Proc. Inst. Mech. Engrs: 632-659, 1883.
- DOWSON, D.; - History of Tribology. Longman. 1974.
- THURSTON, R.H.; - Friction and lubrication. The railroad gazette: New York, 1879.

