

AMILTON SINATORA

Tribologia:

*Um resgate histórico
e
o estado da arte*

Erudição apresentada como parte dos requisitos do Concurso para provimento de cargo de Professor Titular do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

São Paulo, 02 de Junho de 2005

Introdução

Tribologia é um termo que foi cunhado em 9 de maio de 1966 para definir “...*The science and technology of interacting surfaces in relative motion and the practices related thereto*” [DOWSON, 1979 p.1]. A palavra se forma do radical “tribos” (τριβη) que significa roçar-esfregar e do sufixo “logos” - estudo.

A tribologia se dedica, ao estudo do desgaste, do atrito e, por conseguinte, da lubrificação, como forma tradicional de minimizar aqueles dois fenômenos. A tribologia apóia-se na mecânica, física, química e ciências dos materiais, não trazendo, portando, nenhum conhecimento novo. O que se fez em 1966 foi conferir um foco, um fator unificador, que é a aplicação dos conhecimentos básicos para prever o comportamento de sistemas físicos, ou seja, de tribo-elementos que são utilizados em sistemas mecânicos [WINER, 1990].

Neste sentido, prossegue Winer, não são os princípios básicos que unificam a tribologia, como na física, por exemplo, mas sim a área de aplicação. Assim, como os campos do conhecimento que formam a tribologia existiam antes dela, os estudos dos fenômenos de lubrificação, atrito e desgaste antecedem de muito a 1966.

Uma análise dos impactos econômicos e ambientais inicia esta Prova de Erudição. A seguir, apresenta-se uma breve retrospectiva enfocando a ocorrência e a utilização da tecnológica dos fenômenos de atrito, desgaste e lubrificação, resgatando trabalhos de Leonardo da Vinci, até a formalização do conceito de tribologia em 1966, finalizando com os avanços atingidos no final do século XX e neste início do século XXI.

1. Considerações econômicas:

O primeiro estudo sobre os impactos econômicos do uso dos conhecimentos da tribologia foi realizado por Jost, considerado o marco de criação da tribologia [DOWSON, 1979, p 522]. As perdas econômicas totais estimadas na Inglaterra, em 1966, seriam de 515 milhões de libras, correspondendo a 0,5 % do PNB. Atualizando os dados [ALLEN, 2003 e CIA, 2004], verifica-se que aquele valor estava subestimado e que, na realidade, correspondia a aproximadamente 1,5 % do PNB da Inglaterra em 1966. Os detalhes das perdas podem ser vistos na Figura 1.

Dezoito anos depois, Rabinowicz [RABINOWICZ, 1984] verificou que os valores correspondentes a perdas devido ao desgaste estavam muito subestimados pelo relatório Jost. Ele comparou as perdas de 58 bilhões, apenas na indústria automotiva dos EUA, com o PNB naquele ano (1984), de aproximadamente 3 trilhões de dólares. Diante disto

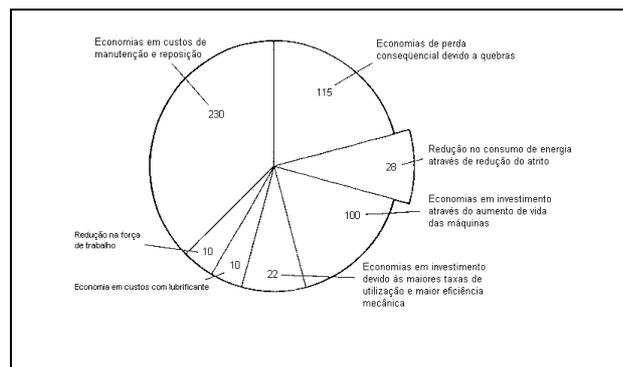


Figura 1 - Economias devidas a aplicação da tribologia Reino Unido 1966 [DOWSON, 1979].

fez nova estimativa de que as perdas por desgaste seriam de 180 bilhões de dólares (6 % do PNB), comparável, segundo aquele autor, às da antiga União Soviética. Estimativas recentes para a Alemanha mostram perdas de 5 % do PNB, ou 35 bilhões de Euros por ano [GESELCHAFT, 2005].

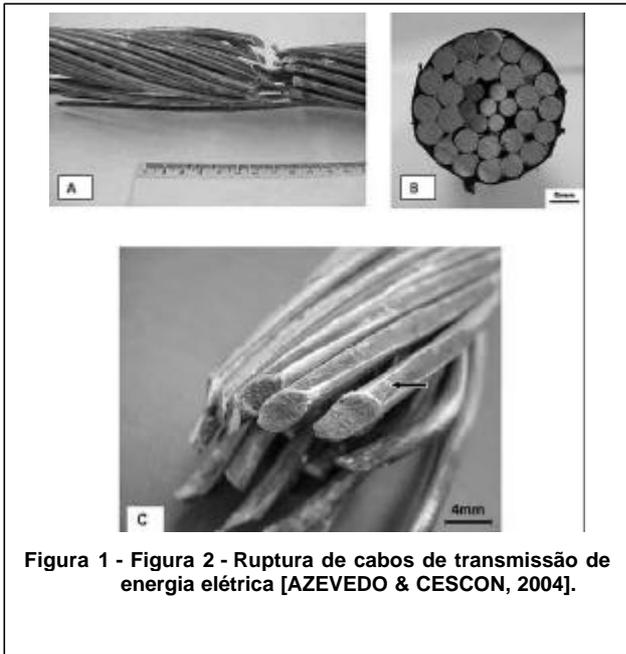
As estimativas de reduções de gastos apresentadas no relatório de 1966, reiteradas em 1990, [JOST, 1990] são de que apenas mediante o uso do conhecimento existente pode-se reduzir as perdas por desgaste em 20 %.

No Japão, em 1992, os custos de manutenção eram 3 % do PNB, contra cerca de 4% do PNB em 1970. Esta mudança foi atribuída ao decréscimo da atividade econômica japonesa nos anos 90, em contraste com a pujança da década de 70 [KIMURA, 1997].

Exemplos da eficácia do investimento no estudo da tribologia podem ser vistos na pesquisa realizada na China [JOST, 1990]. Ela mostra que os retornos sobre os investimentos foram de 1:40 na mineração de carvão contra 1:64 nos Estados Unidos. Na indústria siderúrgica os retornos calculados para a China foram de 1:76. Nas atividades desenvolvidas pelo Laboratório de Fenômenos de Superfície – LFS da Escola Politécnica da USP, para a Indústria Villares, o retorno dos investimentos em projetos específicos de desenvolvimento de produtos e processos não supera 18 meses, na maioria dos casos [CARVALHO, 2005].

Com base nestas informações, e considerando-se o PNB do Brasil em 2004 de 1,7 trilhões de reais, obtém-se estimativas de perdas por desgaste entre 17 (1 %) a 104 (6 %) bilhões de reais por ano. As economias nacionais possíveis (reduções de custos produtivos) apenas com a aplicação do conhecimento existente seriam de 3,4 a 20 bilhões de reais anuais.

As considerações acima não levam em conta as grandes perdas que podem ocorrer ocasionalmente e de forma catastrófica. Um exemplo que afetou diretamente as regiões sul e sudeste do Brasil no ano de 2002 foi o apagão devido à ruptura de cabos de transmissão cuja falha foi iniciada por desgaste, como mostra a Figura 2.



Outro aspecto muito importante da análise global das perdas por desgaste é o aspecto ambiental. As maiores perdas no motor de um automóvel, transitando em cidade, são devidas ao resfriamento e à exaustão [ANDERSON, 1991]. Apenas 12 % da potência do motor são transmitidas às rodas, o que é menor do que as perdas por atrito, que perfazem 15,3 %.

A Tabela 1 mostra os valores econômicos destas perdas devidas ao atrito, bem como os para a frota de veículos (supondo todos movidos à gasolina), na cidade de São Paulo.

Tabela 1 Perdas econômicas devidas ao atrito nos veículos da frota da Cidade de São Paulo.

Perdas mecânicas por veículo	15 %
Custo de combustível por litro	R\$ 2,0
Consumo veicular anual médio (10.000km/ano x 5.000.000 veículos/10km/l)	$5 \cdot 10^9$ (l/ano)
Volume de combustível devido a perda por atrito	$7,5 \cdot 10^8$ l
Valor perdido por ano por atrito na cidade de São Paulo (R\$/ano)	$1,5 \cdot 10^9$ reais/ano (~0,1% do PIB brasileiro)

Os dados para a frota inglesa em 1998 (25 milhões de veículos) mostravam um consumo de 45,4 bilhões de litros de combustível apenas devido às perdas mecânicas por atrito [TAYLOR, 1998], compatível com os valores calculados para a cidade de São Paulo. Anderson [ANDERSON, 1991] estima que uma redução em 10 % no atrito do acionamento do

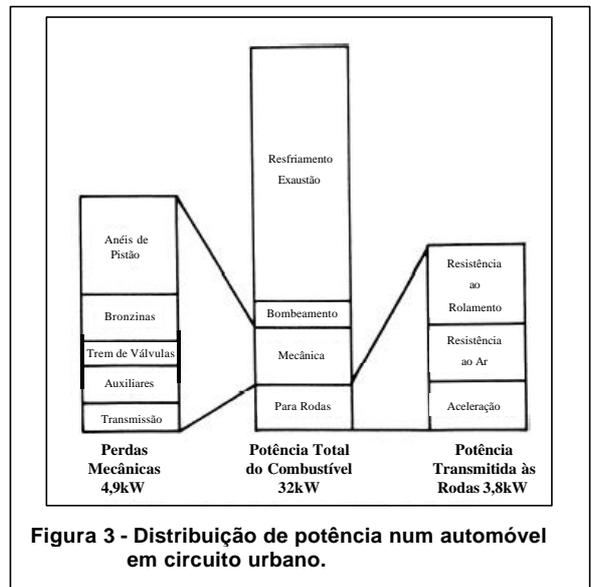
automóvel resulta em até 3 % de economia de combustível.

Com os dados da Tabela 1 pode-se estimar o impacto e os custos ambientais decorrentes diretamente das perdas por atrito nos veículos da cidade de São Paulo, conforme a Tabela 2. Nesta Tabela computa-se a emissão de CO₂, devida às perdas mecânicas, com o objetivo de chamar a atenção para este outro lado, não meramente econômico, mas também dos problemas tribológicos [de PAOLA, 2004].

Tabela 2 – CO₂ emitidos por veículos em S. Paulo.

CO ₂	250 g/l
CO ₂ total da frota $5 \cdot 10^9 \times 5g/l$	1.250.000 toneladas/ano
CO ₂ devido a atrito 15%	187.500 toneladas

Nesta análise não se considera a contribuição de poluentes como os compostos de nitrogênio, hidrocarbonetos e monóxido de carbono, uma vez que a formação e liberação destes se relacionam à falta de eficiência na combustão e não a eficácia dos sistemas mecânicos mostrados na Figura 3 [ANDERSON, 1991].



Para absorver as 187.500 mil toneladas de CO₂ emitidas anualmente, devidas às perdas por atrito, seria necessária a plantação de 41 quilômetros quadrados anuais de florestas de pinheiros ou, caso se optasse por refletir uma quantidade equivalente de calor, seria necessário cobrir de aço inoxidável áreas anuais maiores que de 1,27 km² [MOREIRA & SERRASQUEIRO, 1994] e [HU, 2002].

Estes números, embora expressivos, são, infelizmente, apenas uma pequena fração das perdas térmicas dos motores, devido à ineficiência dos mesmos. Por outro lado, se considerarmos que são de imediato possíveis

melhorias de 20 %, baseado apenas nos conhecimentos disponíveis, a economia seria de 300 milhões de reais por ano, para reduzir a emissão de CO₂ em 37.500 toneladas, apenas na cidade de São Paulo.

Finalmente, vale a pena mencionar que o impacto econômico resultante dos fenômenos tribológicos nem sempre decorrem do desconhecimento, mas de outro aspecto da natureza humana menos nobre que é o de superar dificuldades e promover o bem comum.

Em 10 de fevereiro de 1798, no reinado de George III, formou-se um comitê composto pelo Sir Henry Cavendish e Charles Hatchet, cuja preocupação era desgaste de moedas (“...considerable loss which the gold coin appeared to have sustained by wear within certain periods” [DOWSON, 1985]). A investigação por eles conduzida envolveu o estudo do deslizamento de moedas de mesmo metal (ouro contra ouro) e de moedas de metais distintos (prata contra cobre), bem como o estudo da ação dos pós abrasivos contra as moedas. Para isto desenvolveram três tribômetros (os primeiros de que se tem registro, segundo Dowson) mostrados na Figura 4; um moinho no qual moedas eram giradas por até 229 mil revoluções (160 h); um disco contra o qual as moedas eram pressionadas com a interveniência de abrasivo solto e um equipamento para o estudo do desgaste por deslizamento com movimento alternado (“reciprocating”) de moedas contra moedas.

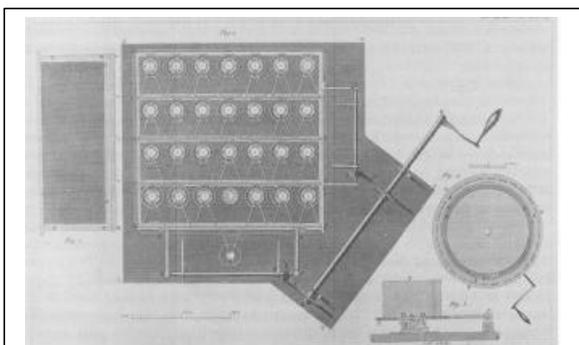


Figura 4 - Tribômetros desenvolvidos por C Hatchet. Esquerda, moinho de madeira revestido de couro (vist superior), centro (maquina para ensaio com movimentos alternados), direita disco giratório para ensaio com abrasivo solto

No trabalho de 1883 apresentaram algumas conclusões, como: o menor desgaste das moedas mais duras, a ação do abrasivo, a ocorrência de transferência de metal da moeda mais mole para a mais dura, as limitações dos ensaios acelerados de desgaste e o tédio decorrente dos ensaios de longa duração. Entretanto a conclusão mais importante, e que serve de fecho a este Capítulo, é que ***a perda total pelos mecanismos de desgaste descritos não poderia responder plenamente pela grande e rápida diminuição observada nas moedas de ouro do reino!***

A primazia do desenvolvimento de tribômetros foi, sem duvida, erroneamente atribuída a C. Hatchet por Dowson. Como se mostrará adiante e, é de conhecimento amplo, Leonardo da Vinci, cerca de 200 anos antes dos experimentos acima relatados já havia projetado, construído e empregado tribômetros na determinação da força de atrito no rolamento e no escorregamento. Também cabe a da Vinci a primazia na construção, uso e descrição de resultados de desgaste.

Conclusões.

- ❖ As estimativas do prejuízo provocado pelo desgaste, por si só, justificam investimentos em ensino, pesquisa e tecnologia antidesgaste, pois dão uma idéia da redução possível de custos produtivos nacionais.
- ❖ Quando se consideram investimentos privados, as estimativas permitem uma avaliação prévia dos retornos sobre os investimentos, bem como, das amplitudes possíveis de redução de custos.
- ❖ Nos setores de mineração e metalurgia, dos quais o Brasil depende fortemente, as melhorias nos materiais (e nos seus processos de fabricação) podem ser focalizadas na minimização das perdas por desgaste.
- ❖ As perdas e impactos ambientais são de grande monta, justificando plenamente um planejamento estatal no sentido de minimiza-los.

2. Fenômenos Tribológicos na Natureza.

Um dos fenômenos tribológicos comuns na natureza é a erosão, definida como “desgaste por perda progressiva de material de uma superfície sólida devido a interação mecânica com um fluido, um fluido multi-componente ou impacto (“impinging”) de líquido ou partículas sólidas.” [BLAU, 1995].

Todos têm a visão da erosão causando profundas mudanças no relevo e é bem conhecida a ação erosiva do vento carregando areia, como o que ocorre no Parque de Vila Velha, PR. Também é conhecida a ação da erosão das águas dos rios moldando vales ou “canyons”. Nestes casos, o ar e a água são os fluidos e as partículas são, em geral, a sílica. A ação erosiva pode se dar em escala maior ainda quando se considera a dimensão afetada.

As mudanças na superfície da Lua, por exemplo, se dão pelo sucessivo impacto de meteoros que, neste caso, podem ser consideradas “partículas” que interagem mecanicamente com uma superfície sólida. As partículas podem ter tamanhos milimétricos até dimensões apreciáveis, com quilômetros de diâmetro, como as que provocaram crateras na superfície da Lua ou da Terra.

Estes exemplos mostram as diferenças de escala nas quais o fenômeno ocorre. Considerando as dimensões da Lua ou da Terra, a escala de análise dos fenômenos seria de 10^6 m (raio da terra) a 10^{-3} m, correspondendo a um evento individual de desgaste de uma rocha por erosão.

Existe, também, semelhança na morfologia dos danos causada por erosão na natureza e no desgaste de materiais de engenharia. Chama a atenção, particularmente, a semelhança das crateras formadas por meteoros com as crateras formadas durante o processo de “*shot pennig*”, ou por erosão durante o jateamento para limpeza.

Entretanto, outros tipos de desgaste, como a abrasão também ocorrem na natureza. Segundo a norma ASTM G 40 o *desgaste abrasivo é aquele devido a partículas ou protuberâncias duras forçadas a mover-se contra uma superfície sólida*. Um dos exemplos mais espetaculares é o da movimentação de geleiras contra vales entre montanhas. As massas de gelo incorporam fragmentos de rochas e lentamente, sob enormes pressões, sulcam as paredes laterais e o fundo dos vales. Os danos são muitas vezes, como no caso da erosão, semelhantes aos que ocorrem nos componentes de engenharia, ou mesmo em ensaios de laboratório. Na Figura 5, apresentam-se os efeitos da abrasão causada por movimentação de geleiras em encostas de montanhas no Peru e os efeitos de um ensaio de esclerometria realizado em laboratório [ENGQVIST, 1999].

A peculiaridade deste exemplo é que “o gelo” desgasta a rocha, muito mais dura do que ele. Trata-se de um exemplo clássico do que ocorre em escala microscópica, brilhantemente descrita pela primeira vez por Leonardo da Vinci¹ [da VINCI, 1939].

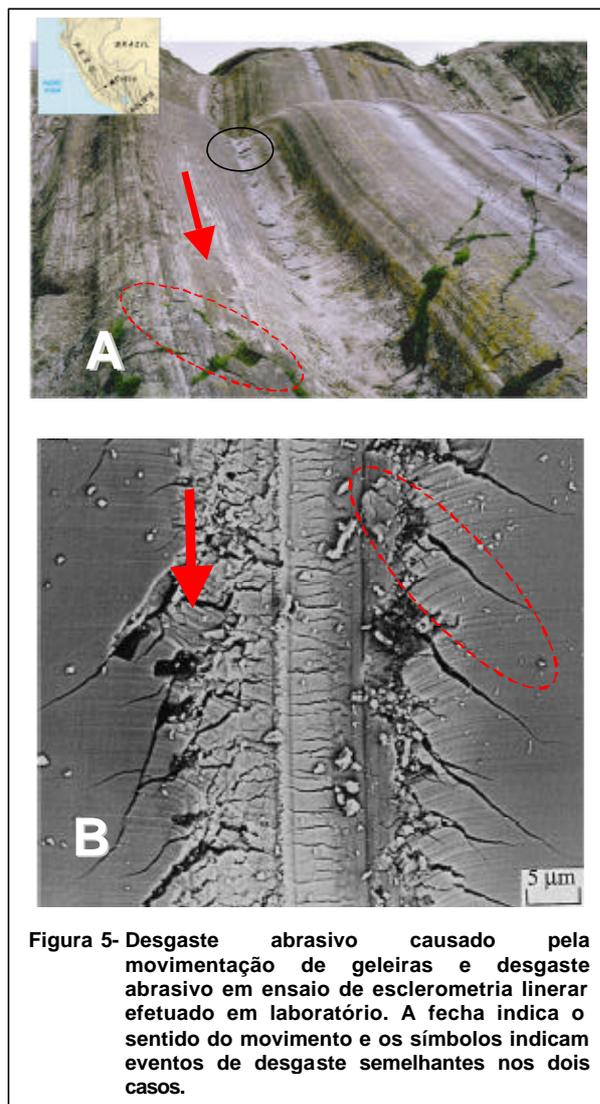


Figura 5- Desgaste abrasivo causado pela movimentação de geleiras e desgaste abrasivo em ensaio de esclerometria linear efetuado em laboratório. A fecha indica o sentido do movimento e os símbolos indicam eventos de desgaste semelhantes nos dois casos.

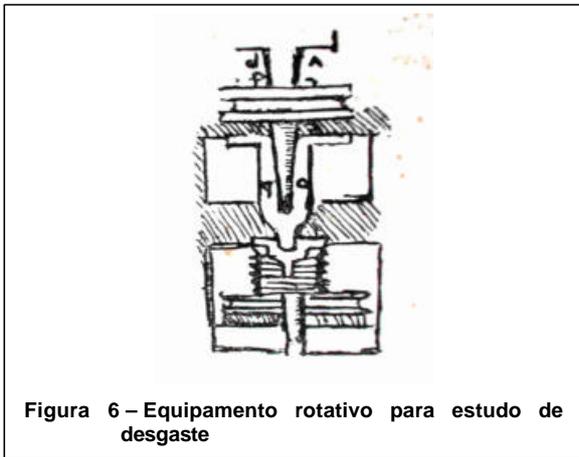
“Os esfregamentos² ocorrem de três maneiras, a saber: (corpo) duro com duro, mole com mole e mole com duro. E dessas três maneiras os esfregamentos variam de dois modos, sendo o primeiro esfregamento simples entre os corpos friccionados (esfregados) e o segundo composto. No esfregamento simples não há nenhuma matéria entre os corpos, e suas superfícies são apenas as que se tocam entre eles. Já no atrito composto, diversos materiais colocam-se entre as superfícies dos corpos em atrito, matérias essas que quanto mais consomem os ditos corpos, mais os deixam ásperos. Mas os corpos que se friccionam serão de várias durezas (diferentes tipos de resistência), o mais mole consome o mais duro e esse (desgaste) nasce da aspereza da matéria (interposta), a qual se fixa na matéria de menor dureza (resistência) e nele se incorpora, tornando-se uma (faz-se uso como) lima,

¹ Le confregazioni son fatte di tre modi, cioè: duro con duro, tenero con tenero e tenero con duro. E di questi tre modi li contatti si variano in due modi, de' quali il primo è semplice contatto delli corpi confregati, il secondo é composto. Nel contatto semplice non s'inframmette alcuna materia, ma le lor suprefizie sol son quelle che infra lor si toccano; ma nel contatto composto vi s'interpone diverse materia infra le superfície de' corpi confregati, le quali materie tanto più consumano li predetti corpi, quanto esse son più aspre. Ma li corpi confregati saran di varie durezza, del piú tenero cosuma il piú duro, e questo nasce dell'asprezza della materia interposta, la qual si ficca nella materia di men durezza, e in quella fermatasi, si fa ad uso di lima, colla qual poi consuma la materia piu dura. Ma se lê materia son d'equal durezza, allora la materia interposta macina sè stessa, s'ella è men dura che le cose confregate; ma se ella è piu dura, essa consuma tale confregazione, non altrimenti che due lime di pari potenza si faccino l'uno l'altra.

² Leonardo da Vinci não emprega a palavra atrito e sim confregazioni. Em português a palavra atrito é substantivo e verbo que indica ato de friccionar, esfregar [FERREIRA, 1975] e [BORBA, 2002]. No sentido em que a palavra é empregada ela indica a configuração do sistema tribológico, aqui, o que hoje chamamos de desgaste por deslizamento, “*sliding wear*”.

com a qual, mais tarde, a matéria mais dura será consumida.

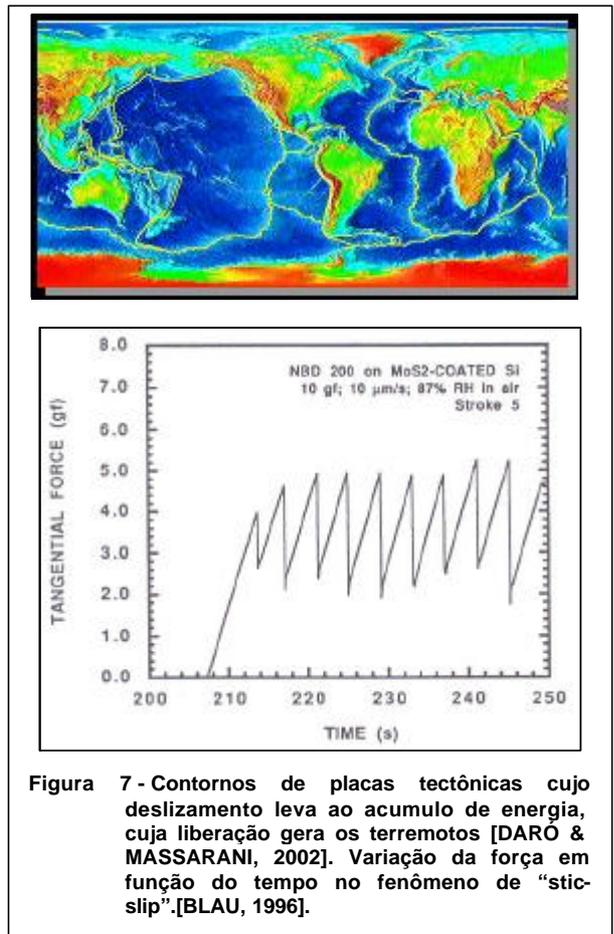
Mas se as matérias são de igual dureza (resistência), então a matéria interposta mói (destrói, desgasta) a si mesma, se ela é menos dura (resistente) do que os corpos em atrito; mas se ela é mais dura, essa consome o tal par (os corpos que esfregam), não diferentemente do que duas limas de igual potência fariam uma à outra [da VINCI, 1939]. É possível que para chegar a estas conclusões Leonardo da Vinci tenha empregado o primeiro (de fato) equipamento para estudo de desgaste, mostrado na Figura 6.



Outro exemplo grandioso de fenômeno tribológico, pela intensidade das forças liberadas e pelos danos que causam à crosta terrestre e aos seres vivos, são os terremotos. Estes são imensas liberações de energia acumulada entre placas tectônicas, pelo atrito (no sentido de se esfregar uma contra a outra) [PERSON1998]. A Figura 7 apresenta a localização destas placas. A configuração de movimentação das placas foi empregada num estudo do efeito de flexão devido ao peso de bacias sedimentares e montanhas, e o mesmo procedimento pode ser empregado para o estudo do atrito entre placas e, portanto, como um instrumento a mais para o estudo de terremotos [DARÓ & MASSARANI, 2002].

A movimentação da placas tectônicas é semelhante ao que ocorre no desgaste por deslizamento, ocorrendo adesão e desprendimento, conhecido como “stick-slip”, mostrado na Figura 7 [BLAU, 1996].

Há pouca troca de informação entre “tribologistas materialistas-mecânicos” (nós) e os “tribologistas-da-natureza” (geólogos e astrônomos). Parece intuitivo que aproximar estes pesquisadores deva reder bons frutos. O papel do atrito e a relação entre terremotos e fenômenos de “stick-slip”, assim como a grande semelhança entre a forma das crateras de erosão provocadas por impacto de meteoros, com as crateras formadas na operação de “shot peening”, são exemplos eloquentes da possível proximidade dos campos de pesquisa. Outro exemplo é a utilização do



modelo de propagação de microondas para telecomunicação e suas interações com os relevos geográficos, para a analisar resultados obtidos por elipsometria, reflexão da luz na superfície metálica rugosa [TANAKA, 1984].

Conclusão

- ❖ Desta pequena digressão pode-se antever que a extensão dos conceitos de tribologia para o estudo de fenômenos naturais, ou seu compartilhamento com pesquisadores de áreas distintas pode levar a novas abordagens de problemas clássicos e talvez a novas soluções.

3. Evolução do homem primitivo e a tribologia

The action of friction is divided into parts of which one is simple and all the others are compound. Simple is when the object is dragged along a plain smooth surface without anything intervening; this alone is the form that creates fire when it is powerful, that is it produces fire, as is seen with water-wheels when the water between the sharpened iron and this wheel is taken away. Leonardo da Vinci, Citado por Dowson.

Depois que o homem começou a exercer sua ação (trabalho) sobre a superfície da Terra, outros tipos de evidência de ações tribológicas passaram a fazer parte da vida do planeta. Foram as ações do homem sobre o

relevo em busca de proteção, ou na agricultura. Outra foi o desenvolvimento da capacidade de fazer fogo, provavelmente mediante a percussão de pedras de sílex (*flint stones*) ou esfregando pedaços de madeira uns contra os outros. Com isto, o homem diferenciou-se definitivamente de seus ancestrais hominídeos. Do ponto de vista da alimentação, adquiriu a possibilidade de assar e, como indicam estudos arqueológicos, de cozer seus alimentos, há cerca de 500 mil anos [PERLÈS, 1998].

Outro desenvolvimento foi a capacidade de furar, polir, cortar, ou seja, de trabalhar (usinar) madeira ou rochas nos períodos mais antigos da pré-história. Com isto, intensificou-se o poder físico do homem e, em especial, ampliou-se notavelmente o poder exclusivo do uso das mãos, que tiveram multiplicado seu natural papel de ferramentas. Além destas considerações, pouco se pode acrescentar ao monumental trabalho do prof. Dowson [DOWSON 1979], a não ser chamar atenção para eventos que ocorreram no Brasil ou na América Latina fora, evidentemente, do foco daquele autor.

Dowson prefere atribuir o desenvolvimento destas habilidades tribológicas, em especial à capacidade de furar, ao período posterior, coincidindo com a do desenvolvimento da escrita. Entretanto, a associação do período neolítico (idade da pedra polida) com a capacidade de melhorar o acabamento de minerais para uso como ferramentas merece ser lembrado como evento tribológico importante. Mesmo entre os nativos brasileiros, esta capacidade foi desenvolvida num estágio evolutivo bastante primitivo em relação ao desenvolvimento da escrita, como atestam os achados em sambaquis (*tabã'ki=amontoado de conchas*) brasileiros [MUSEU VIRTUAL DE SAQUAREMA, 2005] mostrados, na Figura 8.

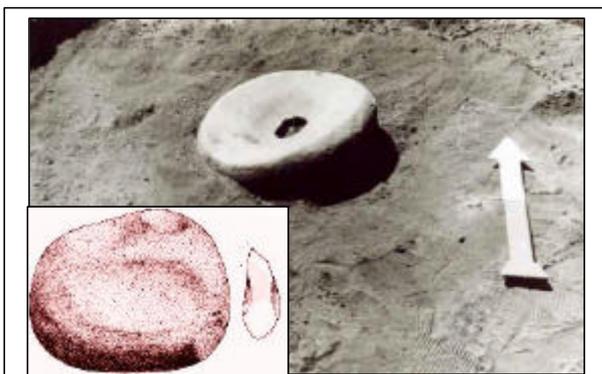


Figura 8- Almofariz feito de rocha adiabásica [Museu Virtual de Saquarema acesso 04-05-2005 18:48h]. Coleção Dra. Lina Maria Kneip.

O almofariz tem a característica peculiar de ter sido produzido por abrasão (ou erosão) e de ser usado como ferramenta (de abrasão) semelhante aos moinhos destinados à moagem de minérios. Ou seja, os almofarizes eram empregados como recipientes (de pedra) nos quais eram colocados frutos, peixes, grãos e carnes para serem triturados (cominuídos) por pressão manual de outro artefato de pedra ou madeira.

A capacidade de furar provavelmente desenvolveu-se girando uma haste de madeira entre as mãos e, posteriormente, produzindo este movimento com mais eficiência, por meio de um arco e uma corda. Os registros mais antigos deste processo são do trabalho de marceneiros egípcios furando móveis [DOWSON, 1979], mostrado na Figura 9.



Figura 9 Marceneiro egípcio fazendo um furo em um móvel 2500AC.[DOWSON, 1979] Realização de um furo de centro empregando o mesmo método em 1994 em Ouro Preto, Brasil.

Na mesma Figura pode-se ver outra aplicação, registrada na cidade de Ouro Preto, MG; a produção de furos de centro para torneamento de painéis de pedra sabão, processo que sobrevive há mais de 4 mil anos!

É possível que o ato de furar pedra sabão com madeira tenha se originado na pré-história, ou seja, é possível que nossos ancestrais tenham empregado o “mole” para furar o “duro”. A presença de sílica (areia, sílex) entre a madeira e a rocha a ser furada é prenúncio da incorporação desta à madeira e, portanto, da criação, quase que casual, de uma ferramenta semelhante a uma fresa de metal duro. Não deve ter escapado à percepção de Leonardo da Vinci a ação de moer farinha de trigo num almofariz onde o meio interposto é mais mole e “desgasta a si mesma” ou a ação de furar pedra com madeira, operação na qual a sílica se impregna na madeira, ou seja, uma operação na qual “o mais mole consome o mais duro”, uma vez que “a matéria (interposta), se fixa na matéria de menor dureza e nela se incorpora”. Senão, como explicar sua descrição da abrasão a dois corpos e o papel do terceiro corpo, no desgaste feito com quase 500 anos de antecedência em relação às descrições modernas?

Este breve apanhado sobre contribuições sobre tribologia não pode omitir a brilhante aplicação da tribologia em processos de fabricação encontrada no estudo dos artefatos da cultura Malagana (70–500 DC), na Colômbia. Estes ameríndios soldavam, por atrito, adornos como mostrado na Figura 10 [Museu Del Oro 1995].



Figura 10 - Adornos de ouro montados por soldagem por atrito. Cultura Malagana, Colômbia.

Com muitos séculos de antecedência eles se anteciparam ao moderno processo de soldagem por atrito, ilustrado na Figura 11 [PAES et al, 2005].

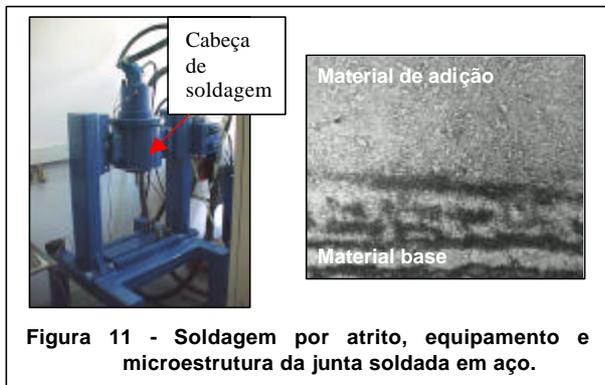


Figura 11 - Soldagem por atrito, equipamento e microestrutura da junta soldada em aço.

Cabe, ainda, considerar que é improvável que todos estes avanços tenham ocorrido sem que o homem tivesse observado a si mesmo, e em si, reconhecesse alguns fenômenos tribológicos. A formação de calos nos pés, durante as caminhadas nos tempos primitivos (e ainda hoje); a formação de calos nas mãos durante o trabalho de escavar, transportar, manipular, as bolhas de água, as lacerações no contato com superfícies duras e ponteadas, devem ter sido algumas das lições que o autoconhecimento impôs ao ser humano. Nestes eventos, modernamente e, talvez com maior discernimento, pôde identificar alguns fenômenos e soluções clássicas da tribologia.

Na formação de calos pode-se identificar uma solução clássica, cuja compreensão pode se apoiar no que é, sem dúvida, o modelo de desgaste mais difundido na

literatura, o modelo de Archard [ARCHARD, 1955], onde a taxa de desgaste (Q) é inversamente proporcional à dureza do corpo que se desgasta e diretamente proporcional à força (F) aplicada, na forma:

$$Q = (K F)/H ,$$

onde K é a constante de desgaste.

Ou seja, entende-se hoje por que da formação de uma região mais dura (calo). Da mesma forma pode-se entender a formação de bolhas como um recurso que leva à separação, evitando o contato direto entre o objeto de trabalho e o ponto do corpo sensível à dor, por meio da lubrificação dos corpos em contato.

A abrasão também é uma velha conhecida do ser humano. A farinha de trigo egípcia era produzida com a trituração dos grãos em um almofariz de pedra (semelhantes aos dos nossos nativos, mostrado na Figura 8), sendo em seguida moídos num plano inclinado de pedra (mais abrasão), sendo em seguida peneirados. Para uma moagem mais fina a farinha era secada e moída entre duas placas de pedra com movimentos alternados (*“reciprocating”*). Em decorrência, sempre acompanhava a farinha de trigo uma certa quantidade de rochas moídas, responsável pelo desgaste de dentes observados na maioria das múmias egípcias, da mesma forma que hoje se vê em alguns casos patológicos ou decorrentes do emprego de escovação inadequada, como se vê na Figura 12 [BRESCIANI, 1998].



Figura 12 - Formação do calo e desgaste patológico de dentes (bruxismo).

Diante destes exemplos é possível supor que deva ter havido uma interação entre as observações sobre eventos (tribológicos) que ocorriam no meio circundante aos nossos primitivos ancestrais e os fenômenos (tribológicos) pelos quais passavam seus corpos em função da realização de trabalho, da locomoção e da alimentação e que esta interação tenha gerado uma melhor compreensão do que se passava nestas duas esferas do ambiente humano.

4. Atrito.

4.1. Introdução

São inúmeros e muito antigos os exemplos da participação da tribologia na história do homem, especialmente para a redução do atrito. O livro *History of Tribology* [Dowson, 1979] apresenta uma extensa revisão sobre o tema. Desta, o aspecto mais citado é o do transporte de grandes massas no Egito, empregando esquis de madeira. Sob estes, com o intuito de diminuir mais o atrito, numa tumba egípcia, tem-se o que parece ser o primeiro registro pictórico de um tribologista em ação, aspergindo água como lubrificante, como mostra a Figura 13A.

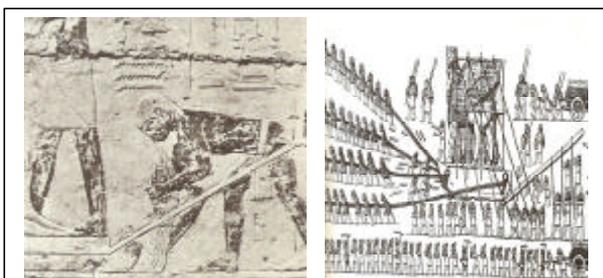


Figura 13 - . A) Aspersão de água para redução de atrito no Egito 2.400 AC B) Transporte empregando esquis e rodas (700 AC).

Ainda no Egito parece certo que o assentamento das grandes pedras das pirâmides era feito interpondo-se entre lama as pedras e, aproveitando o efeito de filme espremido (“*squeezed film*”), para ajustá-las uma contra as outras.

O emprego do movimento rotativo em substituição ao deslizamento no transporte parece derivar do emprego de troncos de árvores (mais tarde a roda), como se supõem terem sido usadas na ilha da Páscoa, o que representou uma diminuição significativa do atrito e estendeu-se por quase todas as civilizações. A Figura 13B mostra o emprego de esquí e rodas no transporte de objetos.

No livro do Prof. Dowson são abundantes os exemplos e explicações da ação da tribologia para movimentação de grandes massas. Entretanto, cabe acrescentar um exemplo proveniente da China, que complementa a gama de recursos para diminuição do atrito empregado ao longo da história. No ano de 1761, ocorreu o transporte de um enorme bloco de mármore, de aproximadamente 200 toneladas, para a pavimentação do “*Caminho do Imperador*” na entrada da Cidade Proibida em Pequim. O transporte foi feito durante o inverno, espargindo água adiante do bloco; esperavam que congelasse e o deslocavam. Relata-se, e é lícito

especular, que havia conhecimento do fenômeno de liquefação do gelo, por aumento de pressão, que gera baixo coeficiente de atrito, experimentado pelos esquiadores.

O estudo do atrito está documentado desde o final do século XIV nos trabalhos de Leonardo da Vinci. A cronologia abaixo foi, parcialmente, baseada no livro *History of Tribology* [DOWSON, 1979], obra de referência para trabalhos semelhantes como o de Budinsky [BUDINSKY, 1991] e nos trabalhos de Frêne [FRENE, 2001].

No entanto, ao longo desta revisão contactou-se que muitos dos trabalhos realizados por da Vinci não eram conhecidos ou estavam perdidos, e que estão sendo resgatados neste trabalho, conforme pode ser visto no próximo item.

4.2. Evolução histórica do atrito (Re-descobrimo Leonardo da Vinci)

A contribuição de Leonardo da Vinci para a tribologia foi ofuscada até o início do século XX, talvez pelo destaque dado à sua genialidade como artista, ou devido à dispersão dos seus trabalhos. O re-agrupamento destes teve grande impulso em 1938, às vésperas da segunda guerra mundial, quando se organizou uma grande exposição de seus trabalhos sob os auspícios do Instituto Geográfico De Agostini. Decorreu deste esforço uma grande coletânea dos trabalhos de Leonardo da Vinci, que foi traduzida para o inglês [LEONARDO, SD] que incluiu suas atividades de engenharia, que foram destacadas e sistematizadas logo depois [da VINCI, 1938]. Ambas as obras, bem como o trabalho do prof. Dowson [DOWSON, 1979], resgatam parte das obras de Leonardo registradas no *Codex Atlanticus*. A outra parte de suas obras, re-descoberta em 1967 (*Madrid Codex*), acrescenta pouco sobre suas anotações sobre tribologia.

Como em outros campos de conhecimentos, Leonardo da Vinci antecipou, em séculos, algumas descobertas não aproveitadas por seus contemporâneos e seguidores. Dentre as mais significativas para a tribologia são suas contribuições sobre rolamentos, determinação da força de atrito entre objetos em superfícies horizontais e inclinadas (Figura 14a), o efeito da área aparente na força de atrito (Figura 14b), o emprego de polia para medida da força de atrito (Figura 14c) e o torque devido ao atrito num cilindro (meio mancal) (Figura 14d). Estes, sem dúvida constituem-se nos primeiros tribômetros documentados na história da civilização.

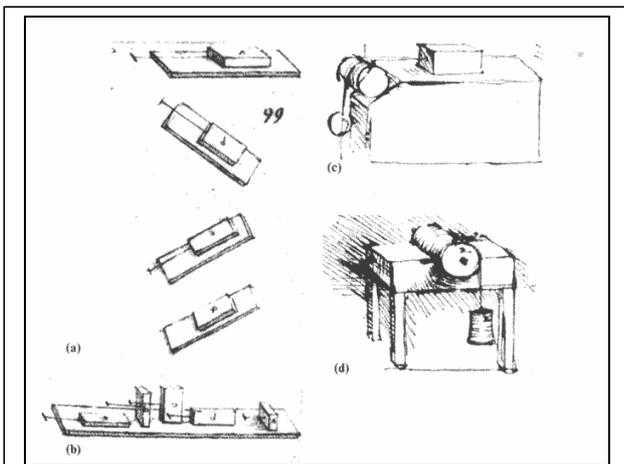


Figura 14 - Tribômetros para determinação da força de atrito desenvolvidos por Leonardo da Vinci ca. 1490.

Outras contribuições muito importantes do grande engenheiro e arquiteto foram estabelecer a importância dos lubrificantes para diminuir a força de atrito, diferenciar atrito por deslizamento do por rolamento, considerar que superfícies mais lisas têm menor resistência ao deslizamento do que superfícies com maior rugosidade e que a interposição de esferas, ou “*coisas como estas*”, entre corpos em movimento, diminuíam a resistência ao movimento. Talvez por isto tenha sido o idealizador dos “cilindros de encosto”, hoje extensamente utilizados nos laminadores de todo o mundo, e das gaiolas para rolamentos, como mostradas na Figura 15.

Além das contribuições acima, extremamente relevantes, Leonardo da Vinci formulou o que se convencionou chamar as *duas primeiras leis do atrito*, a saber [DOWSON 1979]:

1. A força de atrito é diretamente proporcional à carga aplicada³
 (“*The friction force is directly proportional to the applied load.*”)
2. A força de atrito é independente da área aparente de contato.

Entretanto, segundo outra fonte [LEONARDO, SD] Leonardo da Vinci estabeleceu *cinco* princípios:

- A. A força de atrito depende da natureza dos materiais em contato
- B. A força de atrito depende do grau de acabamento das superfícies em contato
- C. A força de atrito depende da presença de um fluido ou outro material interposto entre as superfícies
- D. A força de atrito aumenta com a pressão de um corpo contra o outro⁴

³ As interpretações têm variado de acordo com autores. Alguns interpretam como sendo força, outros como carga (força sobre área), o que pode levar a resultados totalmente opostos.

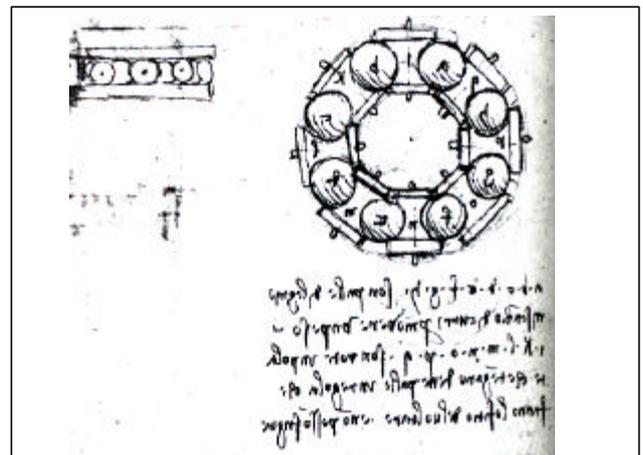


Figura 15 - Projeto de gaiolas de para rolamentos feito por Leonardo da Vinci. B) Gaiolas de rolamento atuais.

(“Frictional resistance increases with the pressure urging one body against the other”)

- E. A força de atrito independe da área de contato

Nota-se que a abordagem desenvolvida por da Vinci considera a natureza dos corpos em contato e a topografia das superfícies dos mesmos. Considerando que em outros trabalhos ele atribuiu importância à presença dos restos de desgaste e à dureza relativa entre os materiais, pode-se considerar que da Vinci tinha uma visão sistêmica dos fenômenos de atrito e de desgaste, formulação que só se materializou plenamente no século XX. A diferença na formulação da segunda lei pode não existir se considerarmos que a variação de carga era feita sobre uma mesma área, entretanto permanece a observação. Não há, no âmbito deste trabalho, como solucionar a questão. Também é importante observar que Leonardo da Vinci emprega o termo *confreggazzioni* (rubbing, esfregamento) [da VINCI, 1939] e não *attrito* (friction, atrito).

Adicionalmente, Leonardo explicitou também a existência de atrito entre líquido e líquido, bem como a existência de atrito de um peso no início do seu movimento, ou seja, do atrito estático [da VINCI, SD]. Estas observações escaparam ao estudo do prof. Dowson [DOWSON, 1979], obra de referência entre os tribologistas.

⁴ Nesta referência o autor explicita *pressão* que é força sobre área de contato.

É especialmente relevante o emprego da palavra “forza” por Leonardo da Vinci, cerca de 200 anos antes de Newton. Muito mais curioso, entretanto, é o defensivo comentário do prof. Dowson [DAWSON, 1979, pg 99]: “Leonardo discutiu a natureza da força em algum detalhe, mas o uso do termo “forza” parece estar mais relacionado ao conceito para o qual foi usado, isto é, para manter uma velocidade constante de um objeto contra alguma resistência. É mais a moderna visão da energia, ou trabalho, do que força”. Chamam a atenção dois aspectos do comentário. O primeiro é que a entidade física capaz de manter uma velocidade constante de um objeto contra alguma resistência é uma forma de definir força! O segundo é expressar que os empregos dos conceitos de energia, ou trabalho, seriam contribuições menores em relação ao emprego do conceito de força!

Como se verá mais adiante, nas “modernas” definições de atrito, a abordagem mais geral é exatamente a que trata do atrito como parte do balanço de energia do sistema. Na seqüência, o Prof. Dowson recorda que estas duas leis eram conhecidas como leis de Amontons (uma vez que os trabalhos de da Vinci eram desconhecidos) e propõem que se chamem estas leis de Amontons-da Vinci e, aqui, sugere-se *da Vinci-Amontons*, respeitando a primazia do primeiro em c.a. 1495!

Para finalizar esta revisão parcial das atividades tribológicas de Leonardo da Vinci cabe reconhecer a ele a primeira formulação do conceito de coeficiente de atrito como relação entre a força de atrito (F) e a força normal (P), na forma:

$$\mu = F/P ,$$

bem como a determinação do coeficiente de atrito como tendo um valor aproximadamente constante de 1/4, referindo-se, provavelmente, ao atrito de madeira contra madeira [DOWSON, 1979]. O valor de 1/3 foi determinado, em 1699, por Amontons e entre 0,25 e 0,50 em 1964 por Bowden e Tabor, para o deslizamento a seco de madeira contra madeira, podendo-se considerar o resultado do estudioso italiano como um valor experimental perfeitamente válido [DOWSON, 1979; PERSON, 1998].

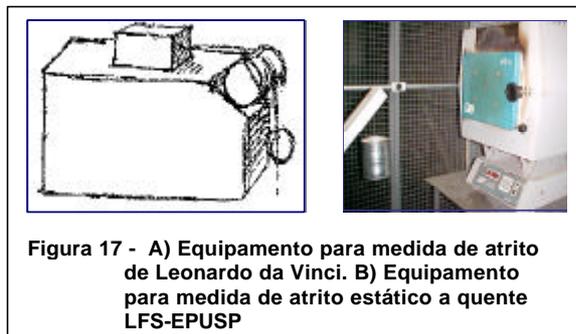
Sobre este resultado de $\mu = 0,25$ pode-se ainda fazer os seguintes comentários: Leonardo atribui este valor de coeficiente de atrito a superfícies lisas e não a qualquer superfície, como se generalizou posteriormente. Provavelmente Leonardo [da VINCI, SD] adotou este valor para simplificar seus cálculos.

Um segundo comentário se refere à utilidade atual dos equipamentos idealizados por Leonardo da Vinci. As

medidas de atrito estático de mancais de leme de navio (de celeron bobinado) foram realizadas num plano inclinado mostrado na Figura 16, deslizando-se o celeron (a seco ou após imersão em água do mar por 24h) contra aço AISI 1020, com rugosidade média controlada. Os resultados foram, por amostra (seis repetições) $0,28 \pm 0,01$ e $0,33 \pm 0,04$; [SILVA, 1999].



O emprego da configuração da Figura 17 permitiu a determinação do coeficiente de atrito entre placas de aço e entre placas de aço com camadas de óxido, e a diferenciação estatística dos resultados, como mostra a Tabela 3.



Em ambos os experimentos, os valores obtidos, e suas incertezas, permitem verificar que os tribômetros e a metodologia desenvolvidos por Leonardo da Vinci, continuam tendo aplicação e produzindo resultados de engenharia.

O extenso trabalho do Prof. Dowson relata que o trabalho de Amontons foi justificado “pela crescente importância das máquinas e pela importância do atrito no desempenho das mesmas”. Amontons estabeleceu e verificou que as leis da resistência causada pelo “rubbing” é a mesma para o ferro, chumbo, cobre e madeira, em qualquer combinação, desde que separados por banha, com força de atrito valendo aproximadamente 1/3 da força normal. Cabem aqui as mesmas observações sobre as limitações experimentais daquele período histórico.

Tabela 3 - Coeficiente de atrito aço AISI 1045 x aço H13. b) Coeficiente de atrito a 750 °C carga de 783 g [VILLABÓN 2005].

Parâmetro	T ambiente	750 °C
μ	0,25 ± 0,1	0,83 ± 0,16
Espessura do óxido	nd	24,3 μm

Amontons destacou o papel das asperezas na força de atrito, conforme já fizera Da Vinci, definindo, entretanto, claramente asperezas trabalhando no campo elástico (Figura 18), representando-as como mola.

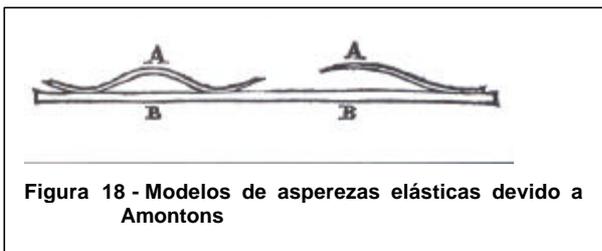


Figura 18 - Modelos de asperezas elásticas devido a Amontons

Vale notar que nos seus trabalhos Amontons aplicou forças, tanto por molas quanto por peso morto, e não há na literatura consultada, referência às possíveis diferenças resultantes destes modos de carregamento, provavelmente pelas imprecisões das medidas feitas naquela época, 1699.

Neste breve retrospecto sobre a evolução do conceito de atrito cabe acrescentar contribuições de Desaguliers, de Bélidor, de Euler e de seu aluno Kotyel'nikov. Desaguliers, francês radicado na Inglaterra, introduziu o conceito de adesão, mediante experimentos, nos quais sustentava (contra a ação da gravidade) esferas de chumbo como mostra a Figura 19.

A contribuição de Belidor, mais familiar aos tribologistas, consistiu na representação de superfícies rugosas por meio de esferas idênticas, como se vê na Figura 19 [DOWSON, 1979, pg160].

O estudo das forças de contato, empregando este modelo de topografia de superfícies, constituiu-se na primeira tentativa de relacionar área real de contato com a força normal [ARCHARD, 1953] :

$$A \mu (P)^{2/3},$$

que veio posteriormente permitir que a primeira lei do atrito fosse deduzida a partir do crescimento das áreas reais de contato, com o aumento da força aplicada [GREENWOOD & WILLAMSON, 1966].

A representação de superfície proposta por Belidor hoje faz parte de textos de referência para o estudo da tribologia [HUTCHINGS 1992], e textos de tribologia dos polímeros [UETZ; WIEDERMEYER, 1984] (Figura 20b).

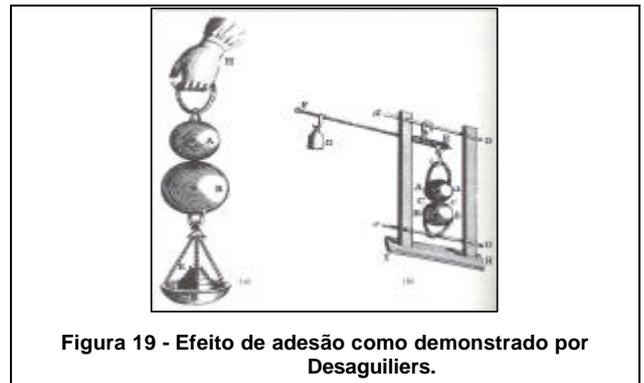


Figura 19 - Efeito de adesão como demonstrado por Desaguliers.

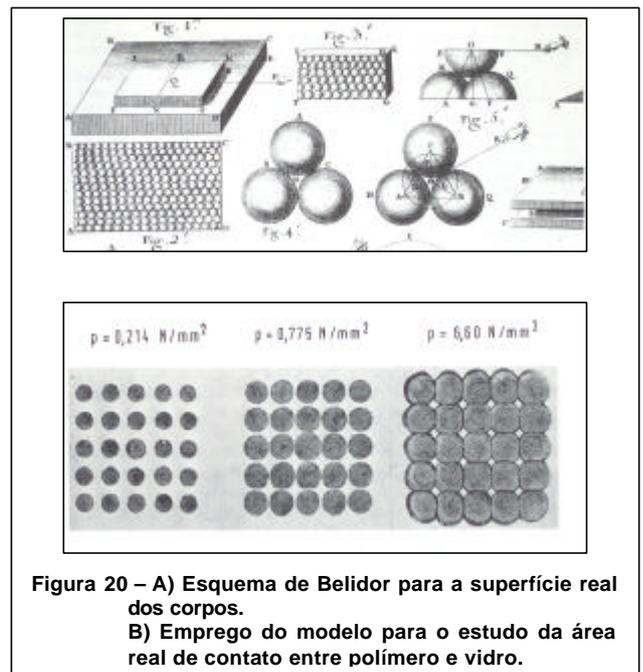


Figura 20 – A) Esquema de Belidor para a superfície real dos corpos. B) Emprego do modelo para o estudo da área real de contato entre polímero e vidro.

A mais conhecida contribuição de Euler foi a clara distinção entre atrito estático e atrito cinemático. É notável também sua contribuição para o entendimento das asperezas. Euler eliminou a restrição de que as asperezas necessitassem ter a mesma geometria e fez uma boa estimativa do valor da inclinação média das asperezas, com base nos valores de força de atrito. A estimativa, de cerca de 19 graus é, aproximadamente, o dobro, do que se estima hoje como razoável, de 10 graus [HUTCHINGS, 1992]. Mais uma vez, cumpre recordar a genialidade de Leonardo da Vinci, cujo coeficiente de atrito de superfícies lisas [da VINCI, SD] resulta numa inclinação média de asperezas de 14 graus, mais próximos do valor que se estima hoje.

Euler adotou o a letra m para simbolizar o coeficiente de atrito e Kotel'nikov estabeleceu a relação entre força normal e tangencial para a definição do coeficiente de atrito como:

$$m = F_t/F_n,$$

numa formulação idêntica a que foi proposta cinquenta anos depois por Coulomb.

A contribuição de Coulomb (1785) parece ser, segundo Dowson [DOWSON, 1979], a mais bem estruturada das aqui relatadas, e a que mais se aproxima da forma atual de apresentar os experimentos científicos. Talvez por isto, e pela extensão dos experimentos realizados e pelos cuidados experimentais, sirva de base para as formulações atuais de atrito, em que pese as ressalvas inevitáveis.

Coulomb estudou a natureza dos materiais em contato e seus recobrimentos, a extensão da área de contato, a força de contato e o tempo de repouso das superfícies em contato. Cumpre acrescentar seus estudos sobre o efeito da velocidade de deslizamento, especialmente porque a Coulomb se atribui a chamada *terceira lei do atrito*, que diz da independência do valor da força de atrito com a velocidade de deslizamento.

Os postulados de Coulomb continuam sendo de grande utilidade e é a base para grande número de estudos e projetos de pesquisa, especialmente os que se referem aos materiais e recobrimentos. Como os materiais são empregados para alguma aplicação, estuda-se, freqüentemente, o efeito de sua natureza em associação à força aplicada e à velocidade de movimentação relativa.

As principais conclusões devidas a Coulomb são:

- 1) A força de atrito inicialmente se eleva atingindo um valor máximo e, por isto, é proporcional à carga para a madeira deslizando a seco contra madeira.
- 2) Para madeira deslizando contra madeira, a força de atrito é proporcional à força, para qualquer velocidade, mas o atrito cinético é muito menor do que o estático medido após longos períodos de contato.
- 3) Para metais deslizando contra metais, sem lubrificação, a força de atrito é proporcional à carga e não há diferença entre atrito estático e atrito cinético.
- 4) Para metais sobre madeira, sem lubrificação, o coeficiente de atrito estático se eleva lentamente, podendo levar até cinco dias para atingir seu valor máximo. Para o par metal-metal este limite é atingido quase instantaneamente e, para pares madeira-madeira, alguns minutos. Para madeira contra madeira ou metal contra metal, sem lubrificação, a velocidade tem muito pouco efeito no atrito cinemático. Entretanto, no caso do par metal-madeira o atrito cinemático aumenta com a velocidade.

Coulomb desenvolveu formulações analíticas para estes resultados. Para a evolução do atrito estático, estabeleceu, com base em experimentos, que:

$$F = A + m t^m,$$

onde: $A=502$, $m \sim 2700$ e $\mu=0,2$.

Considerando as limitações desta relação, para tempos muito longos de contato e em repouso, Coulomb propôs a relação:

$$F = (A + m t^m)/(C + m t^m),$$

sendo A/C o atrito estático inicial.

Para o atrito cinemático desenvolveu a equação:

$$F = A_d + P/m.$$

O termo A_d computa a contribuição da adesão (ou coesividade) e o termo considerando a contribuição da deformação ou ação de sulcamento (*ploughing action*). Ou seja, foi o primeiro pesquisador a considerar uma equação de dois termos para o atrito, como veio a ser retomado, em meados do século XX, na grande obra de Bowden e Tabor [BOWDEM & TABOR, 1966].

As explicações para estes resultados podem ser resumidas no esquema da Figura 21 apresentado por Coulomb.

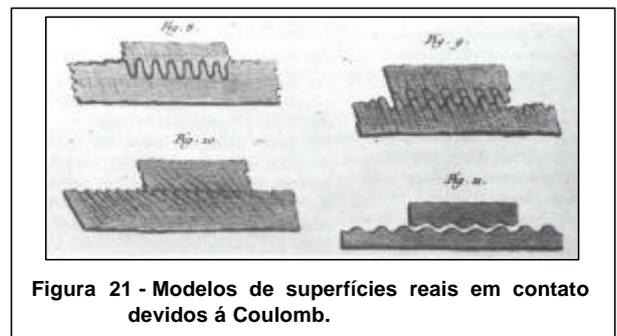


Figura 21 - Modelos de superfícies reais em contato devidos á Coulomb.

Coulomb considerava pequeno o efeito da adesão e adicional ao efeito de intertravamento de asperezas. No caso das madeiras, ele supunha que as asperezas ou fibras em repouso iriam, como as cerdas de uma escova, se interpenetrarem, ou seja, requerendo um tempo para completar seu ajuste, e assim atingir o maior valor do coeficiente de atrito estático.

No caso de metais, cujas superfícies seriam, segundo Coulomb, formadas de partes, angulares, globulares, duras e inflexíveis, não haveria pressão suficiente para mudar a forma das partes que compõem a superfície dos metais.

É surpreendente que somente 200 anos após o trabalho de Coulomb, Bowden e Tabor [BOWDEM & TABOR, 1966] demonstraram experimentalmente o efeito de histerese na deformação do bálsamo por penetradores esféricos, cujo efeito é crescente com a carga aplicada (ou com o tempo), e o efeito de dissipação de energia apóia-se numa nova base, a analogia da interpenetração (com o tempo) dos “fios de escova” de Coulomb.

Em todas estas contribuições e, mais explicitamente na contribuição de Coulomb, nota-se a necessidade de se explicitar mais detalhadamente a condição em que foi estudado o atrito. Nota-se, também, a importância dada

a descrição de que pares de materiais que estão em contato, isto é, se estão em movimento ou parados (há quanto tempo), bem como, do emprego ou não de um meio lubrificante. Trata-se, como já se apresentou anteriormente, de mais uma *re-descoberta* do que já havia sido feito por Leonardo da Vinci.

Sabe-se que a delimitação e a descrição das condições experimentais é muito importante, mesmo quando se trata de propriedades mecânicas “mais tradicionais”, como a tensão de escoamento. Para esta última (tensão de escoamento), sabe-se que é importante conhecer as dimensões da amostra, a velocidade com que foi feito o ensaio e, nos casos de ferros fundidos, a dimensão do molde que deu origem a amostra ensaiada [NBR 6589/1986]. Entretanto, como na padronização dos ensaios raramente se explicitam estas condições, aceita-se que a propriedade em questão é uma propriedade “do material”.

No caso do atrito (e do desgaste), desde há muito, como se apresentou acima, os investigadores perceberam ser *imprescindível* descrever detalhadamente as condições sob as quais se determinou o atrito.

Curiosamente, foi apenas no último quarto do século XX que esta condição do atrito depender fortemente do par tribológico e de outras circunstâncias, foi levada em conta na forma conceitual, *o conceito de sistema tribológico*.

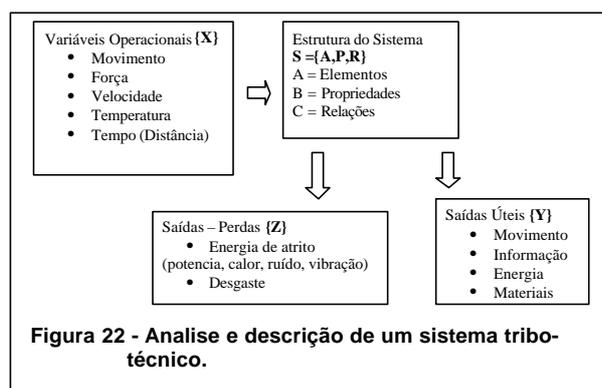
5. Sistema tribológico ou tribossistema

Sistema tribológico é um conceito introduzido por Czichos [CZICHOS 1980], que ao estabelecer os fundamentos, considerou que a abordagem sistêmica se aplica adequadamente devido à complexidade, e que os mesmos não podiam ser tratados pela mecânica clássica e, ao mesmo tempo, eram demasiadamente organizados para serem abordados estatisticamente.

Ele propôs uma estruturação do sistema tribológico, como a mostrada na Figura 22.

São exemplos de sistemas tribológicos: o anel deslizando contra a parede de um cilindro de motor de combustão interna, uma ferramenta forjando aço, um pino contra um disco num ensaio em laboratório.

Esta análise foi detalhada posteriormente por Zum Gahr [ZUM GAHR, 1987], que explicitou que tanto as saídas úteis de um sistema tribológico quanto as suas perdas, dentre elas “o atrito”, dependem fortemente de todas as variáveis operacionais {X} e estruturais $S=\{A,P,R\}$ do tribossistema. De uma forma simplificada e, em outras palavras, a força ou energia de atrito depende fortemente do sistema tribológico, assim como o desgaste.



Destaca-se na Figura 22 que o autor trata “atrito” como energia e não como força. Esta opção não parece ser a única, como se verá a seguir.

5.1. O atrito no século XX

Apresentam-se a seguir, em ordem cronológica, algumas das definições de atrito encontradas em livros renomados. Estas definições formaram gerações de estudantes de engenharia, merecendo por isto uma análise mais detalhada.

Conforme mencionado no item anterior, as definições e os conceitos relativos ao atrito não evoluíram significativamente desde os postulados por da Vinci e, séculos depois, por Coulomb, passando pela re-definição de Amontons.

No século XX, os avanços foram mais significativos a partir de meados da década de 1960, no sentido de explicitar o significado físico do atrito, conforme resumido na Tabela 4.

As sete definições encontradas têm, sem dúvida, muitos pontos em comum. Entretanto, o que chama a atenção é que nenhuma delas é exatamente igual à outra, o que, para uma definição de um fenômeno tão importante, indica haver, no mínimo, muitas dúvidas sobre a natureza do fenômeno, sobre sua interpretação e como medi-lo.

Tabela 4 Definições de atrito

Referência	Original	Tradução	Unidade “do atrito”
RABINOWICZ 1965 (I)	Friction is the <u>resistance to motion</u> , which exists when a <u>solid object</u> is <u>moved tangentially</u> with respect to the surface of another which <u>it touches</u> , or when an <u>attempt</u> is made to <u>produce such motion</u> .	Atrito é a resistência ao movimento que existe quando um objeto sólido é movido tangencialmente em relação à superfície de um outro que ele toca, ou quando se faz uma tentativa de produzir este movimento.	Força (N)
DIN 50281, 1977 UETZ, 1986] (II)	Reibung ist die Größe, die einer <u>Relativbewegung</u> sich berührender Oberflächen entgegenwirkt. Aufgrund der Wechselwirkung ist zur Aufrechterhaltung der Bewegung eine <u>Energie</u> erforderlich, die zwischen den Elementen übertragen und von kinetischer in andere Energieformen ungewandelt wird. Eine der Auswirkungen ist Verschleiß	Atrito é a grandeza que se contrapõe ao movimento relativo de superfícies que interatuam (se tocam, interagem). Devido a esta interação, para a manutenção do movimento requer-se uma energia. Esta energia é transmitida entre os elementos e transformada de energia cinética para outras formas. Uma das (destas) conseqüências é o desgaste.	Preconiza a ocorrência de desgaste em decorrência do atrito. Energia (W)
MIKHIM 1986 (III)	External friction of solids is a complex phenomenon depending on various processes that occur in the real areas of contact and in thin surfaces layers during relative tangential movement of the bodies. By the frictional force T is meant the force of resistance to relative displacement of solids, which is directed oppositely to this displacement.	Atrito externo de sólidos é um fenômeno complexo dependente de vários processos que <u>ocorrem nas áreas reais de contato</u> e em camadas superficiais delgadas durante o movimento relativo de corpos. Entende-se por força de atrito tangencial (T) a resistência ao deslocamento relativo de sólidos a qual está direcionada no sentido oposto ao do deslocamento.	Introduz a área real de contato. Distingue o fenômeno da sua grandeza de medida. Força (N)
HUTCHINGS 1992 (IV)	The force known as friction may be defined as the resistance encountered by one body moving over another. This broad definition embraces two important classes of relative motion: sliding and rolling.	A força conhecida como atrito pode ser definida como a resistência encontrada por um corpo que <u>se move sobre</u> outro. Esta definição ampla compreende duas importantes classes de movimento, deslizamento e rolamento	Define que força de atrito se aplica a deslizamento e rolamento. Força (N)

Tabela 4 Definições de atrito – Continuação

Autor	Original	Tradução	Unidade “do atrito”
WILLIAMS 1994 (V)	Friction is the resistance encountered when one body moves tangentially over another with which is in contact	Atrito é a resistência encontrada quando um corpo se move tangencialmente sobre outro com o qual ele está em <u>contato</u> .	Requer que o movimento seja tangencial Força (N)
METALS HANDBOOK v.18, 1995 -(p. 8-9). (VI)	The resisting force tangential to the common boundary between two bodies when, under the action of an external force, one body moves or tends to move relative to the surface of the other. Note. The term friction is also used, incorrectly, to denote <i>coefficient of friction</i> . It is vague and imprecise unless accompanied by appropriate modifiers, such as <i>dry friction</i> or <i>kinetics friction</i> .	Atrito é a força resistiva tangencial à <u>interface comum</u> entre dois corpos quando, sob a ação de uma força externa, um corpo se move ou tende a se mover em relação à superfície do outro. Nota. O termo atrito é também usado incorretamente para denotar coeficiente de atrito . Isto é vago e impreciso a não ser que acompanhado pelos modificadores adequados como <i>atrito a seco</i> ou <i>atrito cinético</i> .	Requer que a força seja paralela a interface (macroscópica) entre os dois corpos Força (N)
STACHCHOWIACK & BATCHELOR, 2001 (VII)	Friction is the dissipation of energy between sliding bodies	Atrito é a dissipação de energia entre dois corpos deslizantes	Supõem deslizamento Energia (W)

Um breve exame do significado da palavra atrito em dicionários [(Aurélio) FERREIRA, 1975; BARBOSA, 2002] indica que a palavra tem dois significados que podem ser relacionados à tribologia. Atrito tem o sentido de verbo (atritar) indicando ato de friccionar, esfregar. Neste sentido, entende-se o neologismo empregado por aqueles que fazem moagem de alta energia em moinhos “atritores”. Atrito pode ser empregado também como substantivo indicando aquilo que causa resistência ao movimento (rolamento incluído), e os dicionários não entram (sem demérito) na análise da natureza desta resistência. Ou seja, é legítimo, em português, em que pese a advertência da referência VI da Tabela 4, empregar atrito para indicar ação.

Em inglês, o dicionário Pons [PONS, 1994] define atrito como: (1) “*Friction (N) is the force that prevents things from moving freely when they are touching each other*”. Aponta a palavra *resistance*

como sinônimo, por isto, na Tabela 4 atribuiu-se à “resistência” a unidade de força. (2) “*the rubbing of one thing against another*” Neste texto, para evitar confusão adicional, se empregará, sempre que possível, as palavras esfregar ou deslizar (no sentido de explicitar a forma de movimento de um corpo sobre o outro).

A seguir serão analisadas algumas particularidades das definições apresentadas na Tabela 4.

5.1.1. Força ou energia

A Tabela 4 mostra que “o atrito” pode ser associado com a **força** ou com a **energia**. Parece não haver conflito entre estas duas definições e a equivalência pode ser feita pelo trabalho, o que requer associar a força a um deslocamento.

Quer se considere uma definição ou outra, o emprego da noção de coeficiente de atrito implica, necessariamente, em adotar a versão de força, uma vez que coeficiente de atrito é a relação

adimensional entre a força de atrito entre dois corpos e a força normal que os pressiona [METALS HANDBOOK, 18, 1995 -(p.5)]⁵, conforme a expressão:

$$m = F_T/F_N.$$

Em outras palavras, o coeficiente de atrito dependerá da definição de força de atrito mostrada na Tabela 4 e das particularidades da definição do coeficiente de atrito.

Outro aspecto, além da complexidade referente à força de atrito, é a necessidade de identificá-la como uma das forças fundamentais da natureza, que são quatro: *a força gravitacional, a força eletromagnética e as forças de interação atômica forte e fraca*. Ou seja, quando se faz referência à força de atrito, a qual força fundamental da natureza ela está relacionada? Parece que está pergunta não tem resposta simples. Mesmo os experimentos empregando microscópio de força atômica descrevem os fenômenos envolvidos no contato por meio dos conceitos de adesão e tensões de escoamento [PERSON, 1998].

Provavelmente, com o intuito de analisar a força de atrito, com o apoio de propriedades características dos materiais, passou-se a empregar a relação entre a força de atrito e a superfície de contato, mais especificamente entre as componentes de adesão e a componente de formação da força de atrito, e a área real de contato destas forças. Disto decorreram os modelos de Bowden e Tabor [BOWDEM & TABOR, 1964].

Com isto, de um lado foi possível introduzir na modelagem da força de atrito propriedades como tensão de cisalhamento e tensão de escoamento (do material mais mole do par tribológico). Por outro lado, como se verá mais adiante, esta abordagem trouxe para o problema a dificuldade da determinação da área real de contato.

5.1.2. Atrito entre corpos sólidos

As definições de atrito da Tabela 4 parecem considerar que é necessário que os dois corpos em contato sejam sólidos, explicitamente (definições I e III) ou não (definições II, IV, IV e V), devido à conotação do emprego da palavra *corpo*.

Esta restrição exclui da análise pelo menos dois importantes fenômenos tribológicos. O desgaste causado por partículas de líquidos (*impingement*) e a cavitação. O desgaste causado por partículas de líquidos é uma importante causa de dano em aeronaves e é estudada extensivamente na tribologia [FIELD, 1987]. Atualmente esta forma de desgaste é utilizada como processo de fabricação no qual um jato de água, sob altas pressões, é usado para corte de metais e rochas [de PAOLA, 2005].

Sem dúvida, em ambos os exemplos há dissipação de energia e há forças aplicadas pelo movimento da gota ou do jato líquido durante o fluxo contra as paredes do material que está sendo cortado. Entretanto, aparentemente, não há como aplicar as definições acima estritamente. O atrito do líquido contra as paredes de vasos (dutos) é um clássico e importante problema de engenharia (e na medicina).

Na figura 23 pode-se ver um exemplo da alteração na forma de células de aorta bovina, devido à variação da tensão de cisalhamento [BESSA, 2004].

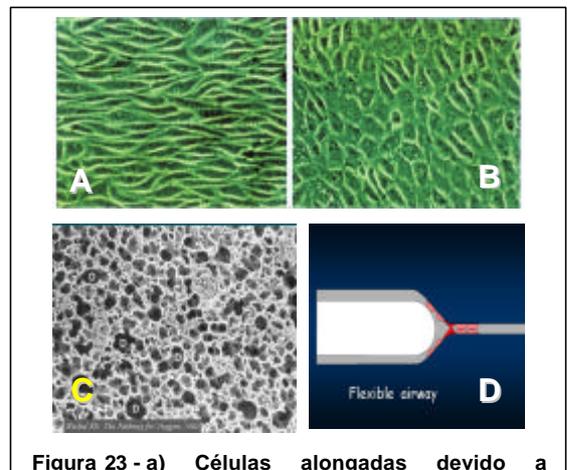


Figura 23 - a) Células alongadas devido a escoamento com tensão de cisalhamento maiores que 1,5 Pa b) Células poligonais devido a escoamento com tensão de cisalhamento menores que 0,4 Pa c) alvéolos pulmonares (vista de topo) d) alvéolo sendo desobstruído por fluxo de ar (ou surfactante artificial) mostrando a adesão das paredes dos alvéolos à direita.

Para tensões de cisalhamento maiores, as células têm geometria alongada, na direção do escoamento, enquanto com tensão de cisalhamento de até 0,4 Pa, têm forma poligonal, mais favorável à ocorrência de lesões vasculares. Este problema, quase com a mesma formulação, se repete na análise do fluxo do ar, durante a abertura de

⁵ “Coefficient of friction. In tribology, the dimensionless ratio of the friction force (F) between two bodies to the normal force (N) pressing the bodies together.”

alvéolos vedados, devido à falta de surfactante pulmonar [AMATO, 2003]. Neste caso para reabilitação de pacientes, busca-se reduzir a tensão superficial do líquido em relação às paredes do pulmão, visando não danificar as paredes dos alvéolos na reabertura.

O desgaste por cavitação constitui-se em grande fonte de perdas econômicas em sistemas hidráulicos. Neste caso, os mecanismos de dano mais conhecidos são a formação de ondas de choque e a propagação de jato do fluido quando as bolhas implodem próximas às superfícies sólidas. Um exemplo deste tipo de dano na superfície, e os recursos empregados para verificar os esforços exercidos sobre a microestrutura, podem ser vistos na Figura 24 [CUPPARI, 2005].

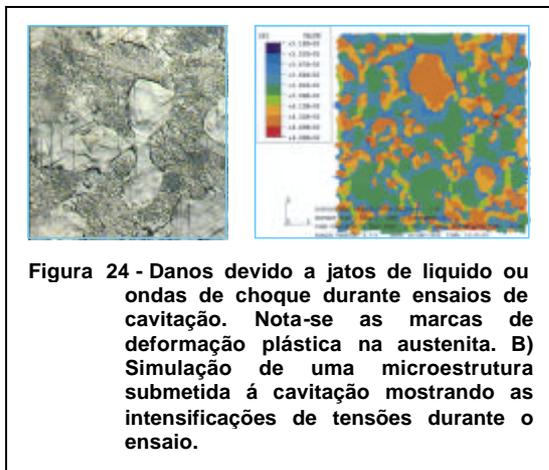


Figura 24 - Danos devido a jatos de líquido ou ondas de choque durante ensaios de cavitação. Nota-se as marcas de deformação plástica na austenita. B) Simulação de uma microestrutura submetida à cavitação mostrando as intensificações de tensões durante o ensaio.

A dissipação de energia da cavitação decorre da propagação e do trabalho que as ondas de choque, ou os jatos de líquido, exercem contra o próprio líquido, ou contra o material, que está sendo danificado.

Recentemente [FAPESP, 2005] verificaram-se enormes elevações da temperatura nas bolhas de cavitação, sendo este aquecimento uma fonte adicional de dissipação de energia do sistema. Como no caso anterior, não se aplicam estritamente as definições de atrito da Tabela 4.

Considerando ainda os estudos de atrito entre fluidos, realizados por da Vinci [da VINCI, SD], bem como os estudos do atrito entre superfícies lubrificadas (no regime hidrodinâmico), onde o coeficiente de atrito, m , varia (linearmente) com a carga aplicada (viscosidade do meio), verifica-se que para uma definição rigorosa e ampla, não há necessidade de contato direto entre corpos sólidos. No entanto, quando se fala de atrito, as definições da Tabela 4 subentendem sistemas não lubrificados, ou na ausência de fluidos na interface

entre sólidos com movimento relativo sob a ação de uma força ou de uma carga (tensão) atuante e, neste caso, também ficam implícitas a existência de um corpo sólido. Trata-se, como se viu, de uma restrição muito forte e desnecessária.

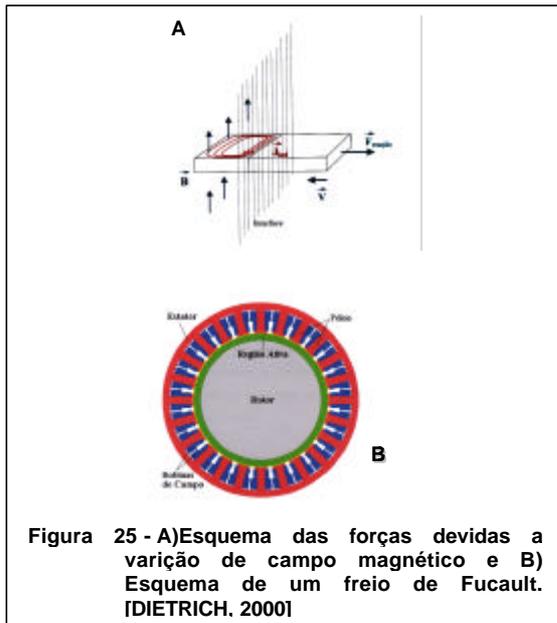
5.1.3. Atrito entre corpos em contato

Outra peculiaridade das definições da Tabela 4 é supor explicitamente que seja necessário o contato entre os corpos (definições I, III, V e VI), ou implicitamente (definições IV e VII). Estas definições deixam de fora o efeito que a gravidade da lua exerce sobre os mares (e sobre a crosta terrestre). Devido a esta atração, ocorre, também, um deslocamento da massa líquida (considerando apenas as massas de água) e um retardamento de seu movimento em relação à crosta. Com isto, o atrito, ocorre uma diminuição (mínima) da rotação da terra e para manter a quantidade de movimento do par (tribológico) lua - terra, ocorre um pequeno, mas de modo contínuo, um afastamento anual de 3 cm entre os dois astros. [EM MARÉS, 2005] e [MARÉS, 2005].

Outro exemplo de interesse, no qual o corpo e o contra-corpo não estão em contato, é o caso dos freios de Foucault ou de correntes parasitas. São dispositivos eletromecânicos que convertem energia mecânica de movimento (linear ou rotativo) em calor.

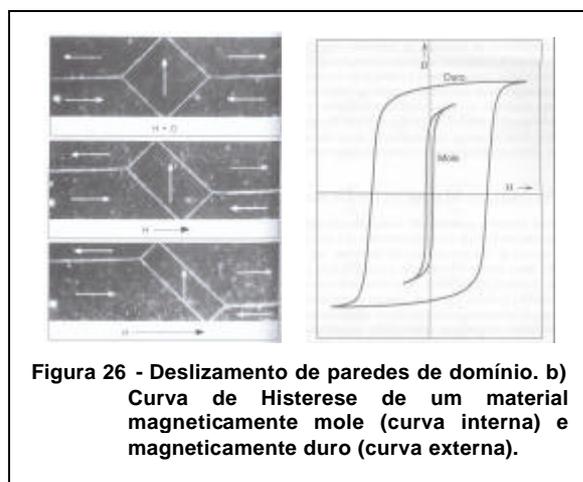
Seu princípio de funcionamento baseia-se no seguinte fenômeno. Ao submeter um meio condutor maciço a uma variação de campo magnético (por exemplo, um degrau) ocorre indução de correntes nesse meio que se opõem à penetração do campo, de acordo com a Lei de Lenz [DIETRICH, 2000]. Caso a variação do campo seja provocada pela movimentação do meio em direção a uma região do campo, como na Figura 25, a energia dissipada por efeito Joule no material será fornecida pela força que realizou o movimento [DIETRICH, 2000]. Verifica-se nesta Figura que a força de reação, que se opõem ao movimento (talvez por se tratar de um freio), e neste caso apenas o modelo II (Tabela 4) que trata de corpos que “inter-atuam”, permite considerar este tipo de frenagem como um fenômeno relacionado a atrito.

Uma outra forma de dissipação de energia, também devida a interação de campo magnético, ocorre durante a movimentação de paredes de domínios magnéticos. Se esta movimentação de paredes ocorresse sem perdas, o fenômeno seria



reversível. Entretanto, na realidade, esta dissipação ocorre e a energia dissipada pode ser estimada pela área dentro da curva de histerese.

Na figura 26 mostra-se a direção de deslizamento das paredes de domínio, bem como uma curva de histerese [CALISTER, 2002].



Esta movimentação de domínios pode, até frequências de excitação magnética de 150 Hz, ser detectada na forma de ruído Barkhausen. Também neste caso não há necessidade de contato entre os corpos que geraram a movimentação de paredes de domínio, ou mesmo, não há necessidade de existir um outro corpo, apenas um campo magnético ou uma corrente elétrica.

5.1.4. Atrito estático e cinemático

O significado dos atritos estático e cinemático já foi discutido anteriormente.

No entanto, vale ressaltar um aspecto importante nas definições de atrito cinemático, que é a necessidade aparente, em todas elas, de que os corpos estejam explicitamente em movimento relativo (II, IV, V e VII) ou que estejam com tendência a este (I, III e VI).

É evidente que nenhum dos autores renega o atrito estático e apenas parece que não foi enfatizado explicitamente em algumas das definições empregadas. No caso de juntas e selos não há tendência para a movimentação do centro de massa e, no entanto, é a força de atrito (estático?) que garante as vedações dos sistemas. Para tratar da situação de juntas Mikhim [MIKHIM, 1986] emprega a noção de “força parcial do atrito estático externo” para tratar de deslocamentos parcialmente reversíveis, uma possível menção ao “fretting”. A noção do fenômeno de atrito estático parece ser adequada ao estudo destes componentes.

Sobre a distinção entre as duas formas do fenômeno, parecem não haver dúvidas. Entretanto, cabe perguntar por que o mesmo fenômeno tem valores diferentes?

A análise devida a Coulomb, sobre o efeito do tempo de repouso sobre o valor da força de atrito estático, pode ser apreciada sob a óptica do crescimento da área real de contato, como mostrado na Figura 20 [UETS & WIEDERMEIER, 1984].

Nesta Figura, observa-se o aumento da área de contato com o aumento da pressão, mas pode-se considerar que o mesmo aumento ocorrerá com taxas menores com o tempo, como no conhecido fenômeno de fluência.

Outra explicação (análoga) foi a aventada por Bowden e Tabor [BOWDEM & TABOR, 1964] e descrita no comentário ao trabalho de Coulomb em tópico anterior.

A diferença de valores entre força de atrito estático e cinemático deve ser discutida diante de novas evidências experimentais. Em alguns casos, particularmente nos sistemas lubrificados, como se vê na Tabela 5, os valores do coeficiente de atrito estático e cinemático podem ser iguais.

Os resultados desta Tabela podem ser explicados considerando-se que alguns lubrificantes “solidificam-se” quando submetidos a pressões e podem se liquefazer durante o deslizamento [PERSON, 1998]

Tabela 5. Coeficientes de atrito estático μ_s e cinemático μ_c para alguns sistemas tribológicos [PERSON, 1998]

Sistema	Lubrificante	μ_s	μ_c	μ_s/μ_c
Aço sobre babbit	“Atlantic spindle oil”	0,25	0,13	0,52
	Óleo de rícino (de mamona)	0,12	0,06	0,50
	Banha	0,10	0,05	0,50
	Óleo de rícino	0,15	0,08	0,53
Aço sobre aço	Estearato de dietilenoglicol	0,089	0,083	0,93
	Estearato de cálcio	0,113	0,107	0,95
	Estearato de alumínio	0,113	0,107	0,95
	Estearato de 1,2-hidóxilitio	0,218	0,211	0,97
Aço sobre aço	Bissulfeto de molibdênio	0,053	0,05	0,94
	Hidróxido de bário	0,163	0,151	0,93
	Iodeto de prata	0,245	0,231	0,94
	Borax (Tetraborato de sódio)	0,226	0,210	0,93
Diamante sobre Diamante		~ 0,1	~ 0,1	~ 1
Teflon sobre teflon		~ 0,05	~ 0,05	~ 1

A Figura 27 [GARNICK 1999] apresenta resultados de modelagem, que mostram o alinhamento de moléculas confinadas no espaço entre asperezas.

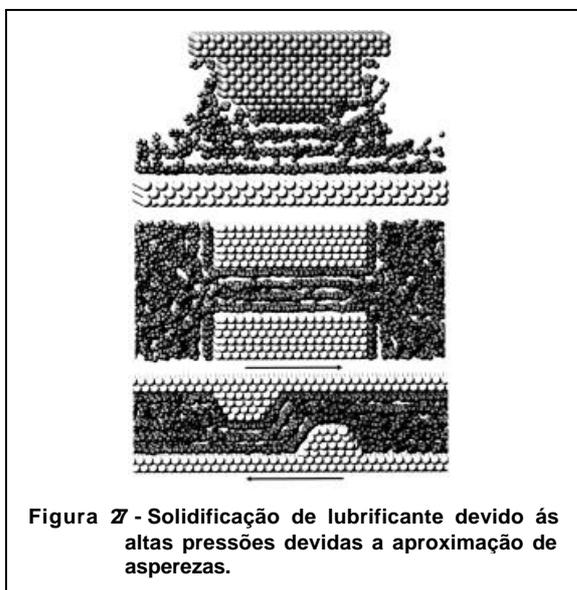


Figura 27 - Solidificação de lubrificante devido às altas pressões devidas a aproximação de asperezas.

Os resultados da Tabela 5 podem ser divididos em quatro grupos:

O primeiro refere-se a experimentos feitos com lubrificantes orgânicos naturais (animais e vegetais). Estes lubrificantes têm uma interação relativamente fraca com as superfícies e passam de um estado sólido (fixo), no repouso, para um estado fluido no deslizamento.

Para o segundo grupo a adesão dos lubrificantes ao substrato é tão alta (quemissorção) que não varia com o estado de repouso ou movimentos, e em decorrência, os valores de ambos os coeficientes de atrito são semelhantes.

Para o terceiro grupo, que consiste em lubrificantes sólidos inorgânicos, a semelhança dos valores de coeficiente de atrito estático e cinemático depende do escorregamento entre lamelas das moléculas dos lubrificantes, que independe do estado de repouso ou movimento. No caso do diamante, seu módulo de rigidez é tão elevado que expulsa qualquer lubrificante das áreas reais de contato enquanto que o teflon, por sua vez, é tão inerte que não é molhado por quase nenhum lubrificante, minimizando o efeito dos mesmos.

Estes fatos indicam a importância da necessidade de se definir claramente o tribossistema envolvido, inclusive dos mecanismos de atrito, e por decorrência, do mecanismo de atuação dos lubrificantes e, com destaque, ao regime de lubrificação.

5.1.5. Atrito entre corpos em movimento relativo tangencial

A direção do movimento ou da força de atrito é outro aspecto importante nas definições de atrito.

Nas definições I, III, V e VI, da Tabela 4, esta relação geométrica é explícita.

Entretanto, quando se consideram dois componentes tribológicos bastante conhecidos, os coxins e os pneus, a movimentação alternada da borracha apenas na direção da força normal gera dissipações de energia devido à histerese deste material. Na Tabela 6 mostra-se a variação dos módulos de elasticidade devidos ao aquecimento com a profundidade da camada de borracha em relação à superfície do pneu [TANAKA, 2000].

Tabela 6. Módulo real, módulo imaginário e tan δ para uma mesma borracha mantida pelo mesmo tempo em temperaturas diferentes.

T (°C)	E (MPa)	E' (MPa)	Tan δ
0	105,8	12,8	0,121
20	94,4	8,1	0,086
70	80,6	4,3	0,054

Esta variação, para as borrachas, é muito importante para o coeficiente de atrito, uma vez que, especialmente para pneus, a energia dissipada é considerável e está associada às diferenças entre os módulos, pois o coeficiente de atrito, é dado pela relação:

$$m = \tan \delta = E'/E ,$$

onde $\tan \delta$ é a relação entre os módulos de elasticidade real e imaginário do composto de borracha e não com as forças tangenciais e normais.

Neste caso nota-se que o avanço da vulcanização secundária da borracha (envelhecimento termomecânico) leva à diminuição do coeficiente de atrito. Observa-se que esta definição de coeficiente de atrito está longe da convencionalmente aceita e, apesar disso, mantém boa aderência com os resultados experimentais (apontando corretamente o sentido de variação do coeficiente de atrito) [PERSON, 1998].

Nestes dois casos, coxins e pneus, o deslocamento “tangencial” (à superfície de contato) não desempenha papel significativo e também não contribui na dissipação da energia. A maior porção da energia dissipada decorre do atrito interno no material.

Um outro aspecto do papel desempenhado pela liberação de energia internamente ao material pode se encontrar na conformação plástica. Neste caso, em particular em metais, a energia é despendida

em duas frentes: uma para vencer o deslocamento do material junto às paredes dos moldes, Figura 28a [WEISHEIMER, 2005], e outra para vencer a resistência interna à movimentação de discordâncias dos materiais.

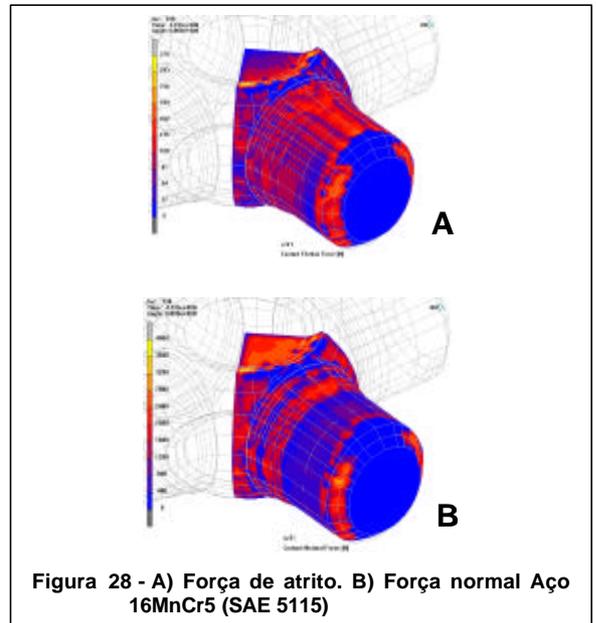


Figura 28 - A) Força de atrito. B) Força normal Aço 16MnCr5 (SAE 5115)

A fração da energia dissipada por atrito contra as paredes das ferramentas varia de 13 a 87 % da energia empregada no processo para a estampagem e trefilação, respectivamente [VARGAS, 2003].

Apenas na definição II (da Tabela 4) é que se distingue explicitamente o atrito externo das diversas formas de dissipação de energia interna aos materiais, inclusive do atrito interno e, parece, por estes exemplos que esta separação não é sempre adequada. Ou seja, para a adequada descrição do atrito pode ser necessário incorporar os fenômenos que ocorrem na interface (externamente ao(s) corpo(s)) dos fenômenos dissipativos que ocorrem na subsuperfície, ou mesmo em todo o volume do material, quando for o caso.

Esta formulação nada mais faz do que formalizar o que parcialmente já se descrevia em modelos anteriores, como no modelo proposto por Coulomb e, mais recentemente, no modelo de Bowden e Tabor, que consideram a ação de sulcamento (*ploughing action*). Neste, se explicita que o coeficiente de atrito contém dois termos, um devido à adesão entre as superfícies, exatamente como descrito por Coulomb, e outro devido à deformação plástica da superfície, na forma:

$$m = mA_d + mD .$$

O papel da dissipação de energia na sub superfície, ou mesmo em regiões mais extensas dos materiais, devido ao trabalho da força normal, é mais facilmente perceptível nos polímeros. Um exemplo é o que ocorre com os materiais poliméricos pesquisados por Silva [SILVA, 2003].

Nesse trabalho estudou-se o desgaste e o coeficiente de atrito do polietileno de ultra alto peso molecular em função da velocidade, da força normal, da rugosidade do contra-corpo e de sua natureza (aço inoxidável ou alumina). A medida da força tangencial, para determinação do coeficiente de atrito, foi feita num equipamento pino contra disco, com medidas da força de reação do braço que sustenta o pino polimérico, enquanto que o desgaste era medido pelo deslocamento vertical do pino. Nestes experimentos, entretanto, observou-se que se atingia temperaturas elevadas, o suficiente para que o polietileno de ultra alto peso molecular sofresse fluência. Em outras palavras, havia uma diminuição da altura do pino, sem que houvesse desgaste (no sentido de perda de matéria), mas a força vertical realizava trabalho para o deslocamento do pino. Esta dissipação de energia não era, evidentemente, percebida pela célula de carga que media a reação da força tangencial ao movimento. Ou seja, a forma de medida subestimava os valores do “*coeficiente de atrito*”.

Este exemplo ilustra claramente a importância de se incorporar o trabalho da força normal no conto do **atrito**, bem como de analisar o sistema para considerar, quando for o caso, a liberação de energia internamente ao material.

5.1.6. O atrito e a evolução do sistema tribológico

Uma hipótese subjacente a todas as definições de atrito é a de que as condições não se alteram ao longo do tempo num sistema tribológico.

Curiosamente esta omissão não impede que os pesquisadores definam precisamente em que região do ensaio serão adquiridos os dados para o cálculo do coeficiente de atrito, ou seja, em geral espera-se o sistema tribológico atingir um regime permanente, no qual a força tangencial medida seja relativamente estável, e é nesta região que se faz a coleta dos valores da força tangencial para o cálculo do coeficiente de atrito.

A evolução do sistema pode se dar de várias formas. No caso da borracha, como já se viu, pode ocorrer uma progressiva e contínua mudança dos seus módulos de elasticidade devido à formação de

ligações bissulfídicas, induzida pelo calor, em substituição às ligações polisulfídicas da vulcanização original [TANAKA, 2000]. Neste caso ocorre mudança da energia liberada (atrito) sem que ocorra, necessariamente, mudança do mecanismo pelo qual esta energia é liberada (mecanismo de atrito). Assim, os mecanismos de adesão e de liberação de calor por histerese se mantêm, alterando-se, entretanto, a contribuição relativa de cada um deles face a diminuição do atrito devido a dissipação interna.

A mesma alteração da influência relativa dos mecanismos pode ocorrer, por exemplo, na abrasão. A Figura 29 mostra a variação do coeficiente de atrito em função do teor de elemento de liga (vanádio).

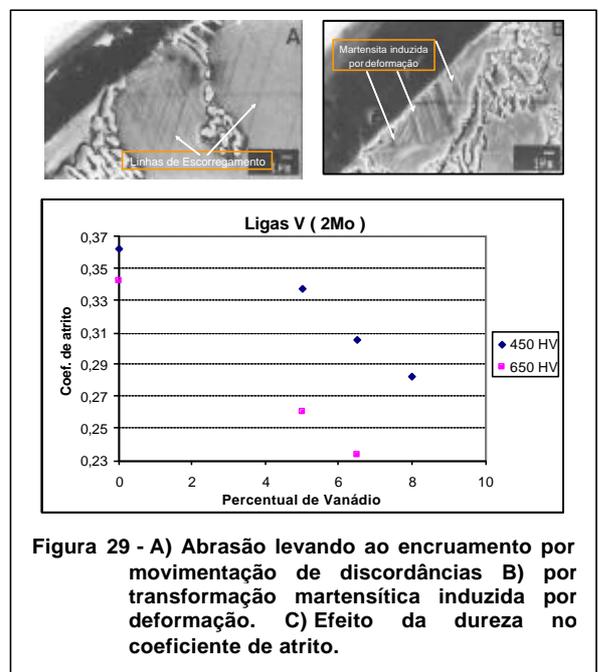


Figura 29 - A) Abrasão levando ao encruamento por movimentação de discordâncias B) por transformação martensítica induzida por deformação. C) Efeito da dureza no coeficiente de atrito.

A Figura 29A mostra que ao lado do sulco de desgaste formam-se linhas de escorregamento, por deformação plástica, e na Figura 29B agulhas de martensita induzida pela deformação [SINATORA 1995].

Nestes casos, se esta superfície for novamente exposta à ação de abrasivos ela estará mais dura, mas o mecanismo que definirá a intensidade do atrito será essencialmente o mesmo: deformação plástica associada a adesão, variando apenas a intensidade de um ou de outro. O resultado, sem dúvida, pode ser a mudança no valor do coeficiente de atrito, como se vê na Figura 29c [BERNARDES, 2005].

Em outros casos, entretanto, o sistema tribológico se altera profundamente com mudanças na

natureza do fenômeno que dá origem à força ou a energia de atrito. É o caso clássico de formação de filmes interfaciais durante o processo de deslizamento entre corpos sólidos.

A Figura 30A [FARIAS, 1999] mostra a deformação do cavaco, influenciado intensamente pela movimentação na interface.

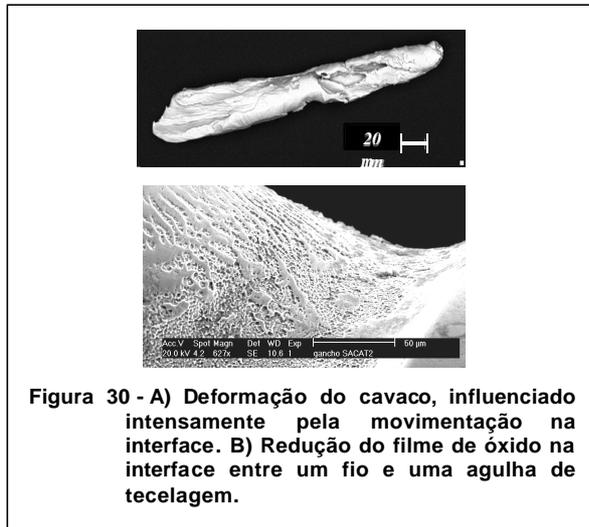


Figura 30 - A) Deformação do cavaco, influenciado intensamente pela movimentação na interface. B) Redução do filme de óxido na interface entre um fio e uma agulha de tecelagem.

Na Figura 30B [GOLDENSTEIN & SINATORA, 2001] observa-se a redução do filme de óxido na região de contato de um fio contra uma agulha de tecelagem. Neste caso, a mudança do sistema tribológico foi tão radial que mudou a natureza dos corpos em contato, de fio-óxido para fio-metal.

Um exemplo especialmente dramático de mudança dos valores de atrito com a mudança de mecanismos pode ser visto na Figura 31 [SHUITEC, 2004]. Nesta se observa a variação da força tangencial, em função do tempo de ensaio, no qual uma ponta de rubi sintético deslizava sobre um disco de aço AISI 8620, temperado e revenido.

Na primeira etapa, a observação microscópica e topográfica não mostra alteração da superfície e o valor da força tangencial e do atrito parecem ser determinados pela adesão entre os corpos.

Na segunda etapa verifica-se a elevação progressiva da força tangencial. Nesta etapa observa-se a formação de óxidos esparsos na superfície e a diminuição da dureza da mesma, ou seja, ocorrem duas reações metalúrgicas importantes, a oxidação e o revenido do material.

Na última etapa, o rubi penetra e corta o aço. Neste caso, em particular, o sistema tribológico alterou-se significativamente e se pode dizer que, em cada etapa mencionada anteriormente, os fenômenos desenvolvem-se em tribossistemas distintos.

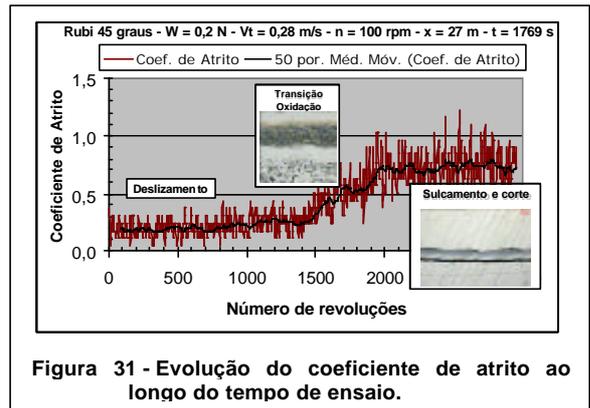


Figura 31 - Evolução do coeficiente de atrito ao longo do tempo de ensaio.

Também podem ocorrer alterações no sistema tribológico devido a razões mecânicas e não às transformações nos materiais em contato. Selecionou-se dois exemplos, cujos resultados mais expressivos estão na Figura 32.

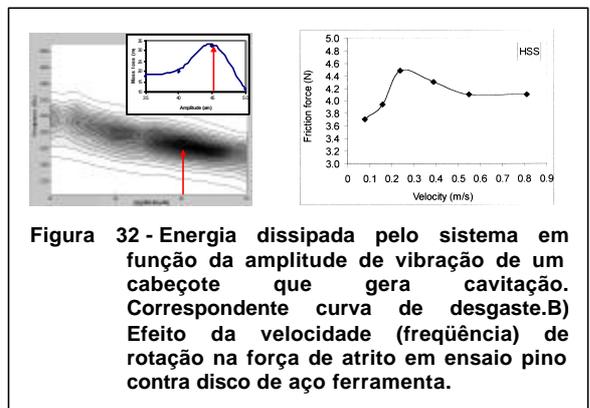


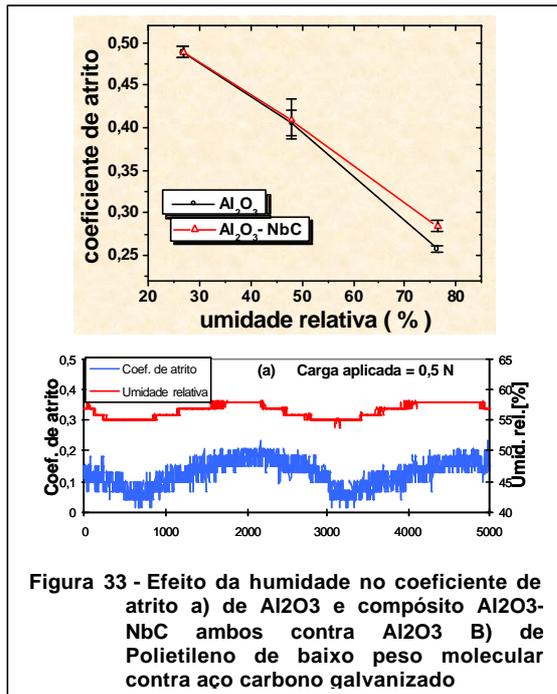
Figura 32 - Energia dissipada pelo sistema em função da amplitude de vibração de um cabeçote que gera cavitação. Correspondente curva de desgaste. B) Efeito da velocidade (frequência) de rotação na força de atrito em ensaio pino contra disco de aço ferramenta.

Na Figura 32A mostra-se o efeito da amplitude de vibração no desgaste por cavitação de alumínio.

Os experimentos mostraram que este desgaste é máximo para a amplitude de 45 µm, [CUPPARI, 1999].

Na Figura 32B mostra-se que o valor de atrito (e desgaste) no ensaio pino contra disco atinge um máximo para 0,3 m/s. Este valor de velocidade coincide com a frequência natural de vibração do equipamento tanto na direção tangencial quanto na direção normal ao movimento [BERGANTIN, 2003].

Uma última família de variações que pode sofrer o tribossistema é a devida a mudanças no meio ambiente. Na Figura 33 mostram-se os efeitos da variação da umidade do ambiente no coeficiente de atrito de cerâmicas [FERREIRA, 2001] e de polímeros [SILVA, 1999].



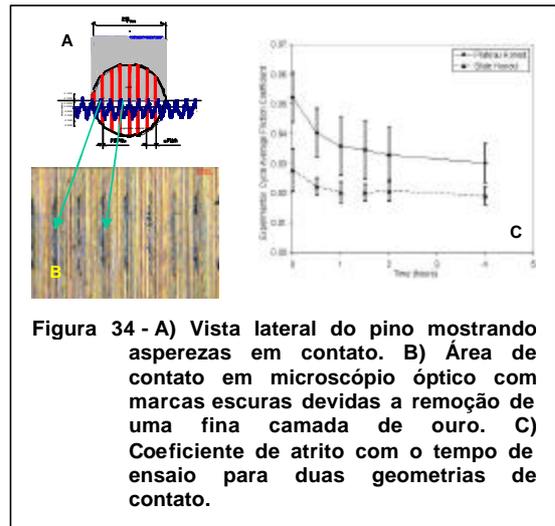
5.1.7. Atrito e área de contato

O problema do contato entre corpos e a sua relação com a força de atrito é antigo, como já foi visto. É explicitado apenas na definição III, apresentada por Mikhim [MIKHIM, 1986], da Tabela 4.

Este autor expressa que o fenômeno de atrito ocorre na área real de contato. A área real de contato é expressivamente menor do que a área aparente entre duas superfícies sólidas. Considerando um experimento pino contra disco, se o pino tiver 2,5 mm de diâmetro, sua área aparente de contato será de 4,91 mm². Num ensaio no qual se aplique uma força de 400 N e considerando um aço com tensão de escoamento de aproximadamente 1.650 MPa, a área necessária para sustentar aquela força será de apenas 0,24 mm², ou seja, 20 vezes menor do que a área aparente (considerando um comportamento rígido-elástico). Esta relação pode chegar a ser de 1:10⁵, tanto maior quanto menor for a massa ou a força aplicada no corpo.

No exemplo em questão a Figura 34A mostra que o contato se dá em poucos picos de rugosidade, enquanto que a Figura 34B mostra, numa superfície de aço recoberta com ouro (por “sputtering”), que a área real decorrente de um incipiente deslocamento tangencial do pino. A medida aproximada desta área é muito próxima da área real calculada.

A alteração da topografia devida aos fenômenos de desgaste deve aumentar a área real de contato,



atingindo dimensões para as quais o contato real entre os corpos seja perfeitamente plástico. O modelamento da área real de contato ocorreu apenas em 1966, por Greenwood e Willamson, com o emprego de modelos estatísticos para descrever a alturas dos picos [GREENWOOD & WILLAMSON, 1966].

Eles apresentaram um conceito de se expressar por meio do índice de plasticidade (Ψ) dado por:

$$y = (E/H)(s/r)^{-1/2}$$

Nesta equação E é o módulo de elasticidade combinado das superfícies, H é a dureza do material mais mole, S é o desvio padrão da altura de asperezas e r , o raio médio das mesmas.

O crescimento do índice de plasticidade ao longo do processo de desgaste indica um deslocamento do contato para o campo elástico.

De acordo com uma das leis do atrito, esta mudança de área não deveria trazer alterações no coeficiente de atrito. Entretanto apenas a análise detalhada de cada sistema tribológico permitirá a avaliação da evolução da força de atrito com o tempo [TOMANIK, 2000], como mostra a Figura 34C [JOCSAK, 2005].

Esta Figura mostra dois aspectos interessantes e pertinentes a esta discussão. O coeficiente de atrito depende da área de contato, uma vez que depende da forma de acabamento empregado na usinagem, sendo maior para a usinagem na forma de “platôs”. O coeficiente de atrito diminui com o andamento do ensaio e, conseqüente, ocorre a mudança da área real de contato e da natureza (elástica/plástica) deste contato.

A alteração de topografia tem também como consequência a formação de um meio intermediário entre os corpos. Este pode aderir a um deles, ou a ambos, ou ainda permanecer solto entre eles, fragmentar-se, etc, e são inúmeras as descrições destes fenômenos. Por outrolado, a compreensão de porquê a força de atrito atinge algum determinado valor depende do entendimento do mecanismo atuante. A compreensão do papel deste meio interfacial tem permitido que se obtenham valores de coeficientes de atrito menores que 0,002 [XU, KATO & HIRAYAMA, 1997].

A criação de novas superfícies devido à ação de desgaste é outro aspecto que não é considerado nas análises sobre a força de atrito. Com isto, desconsidera-se a criação de interfaces com o meio, como a formação de óxidos ou filmes interfaciais. Em outras palavras, descarta-se nas análises correntes sobre a natureza do atrito, a energia de superfície do corpo ou dos corpos em contato. Um exemplo desta análise é a energia necessária para a criação de superfícies durante a propagação de trincas no fenômeno de fadiga de contato. Este exemplo será detalhado no item atrito e desgaste, a seguir.

Por fim, o último aspecto sobre área de contato é o fato de que nenhuma das forças da natureza (gravitacional, eletromagnética, e atômicas) necessita de contato no sentido estrito para atuarem. Todas são forças que atuam a distância, como no caso das forças atômicas. Nos casos onde os coeficientes de atrito são da ordem de milésimo, o modelo vigente é o da interação eletrostática entre moléculas solvatadas de água (um exemplo evidente da ação a distância no sentido de reduzir “a resistência ao movimento”).

5.2. Atrito e desgaste

A definição da norma alemã de atrito [UETZ, 1986] conclui que um dos efeitos do atrito é o desgaste. Este raciocínio parece lógico e convincente no caso de contato entre dois corpos.

Nestes casos o desgaste pode ser relacionado à ação da força normal e da força tangencial resultante da força de atrito. Nos casos onde o contato ocorre diretamente entre dois corpos o coeficiente de atrito varia de 0,05 (Tabela 5), no caso de teflon contra teflon, e de até 2,0 no caso de ouro deslizando sobre ouro [HUTCHINGS, 1992], ou seja uma variação de 40 vezes.

No caso do desgaste não lubrificado o coeficiente de desgaste pode ser dados por:

$$K=HQ/W,$$

onde H é a dureza do material desgastado, Q, a taxa de desgaste e W a força normal aplicada, variam de 7×10^{-3} para aço deslizando contra aço, até $1,3 \times 10^{-7}$ de polietileno deslizando contra polietileno; uma diferença de aproximadamente 50.000 vezes! Ou seja, no desgaste por deslizamento a seco a variação do coeficiente de desgaste é mil vezes superior à variação do coeficiente de atrito.

Na Figura 35 [SILVA, 2003] a taxa de desgaste linear para o polioxi metileno (POM) variou quase três ordens de grandeza enquanto que os valores do coeficiente de atrito oscilaram entre 0,19 e 0,6 aproximadamente. Caso fosse empregado o coeficiente de desgaste para esta análise, suas variações seriam um pouco menores, cerca de duas ordens de grandeza.

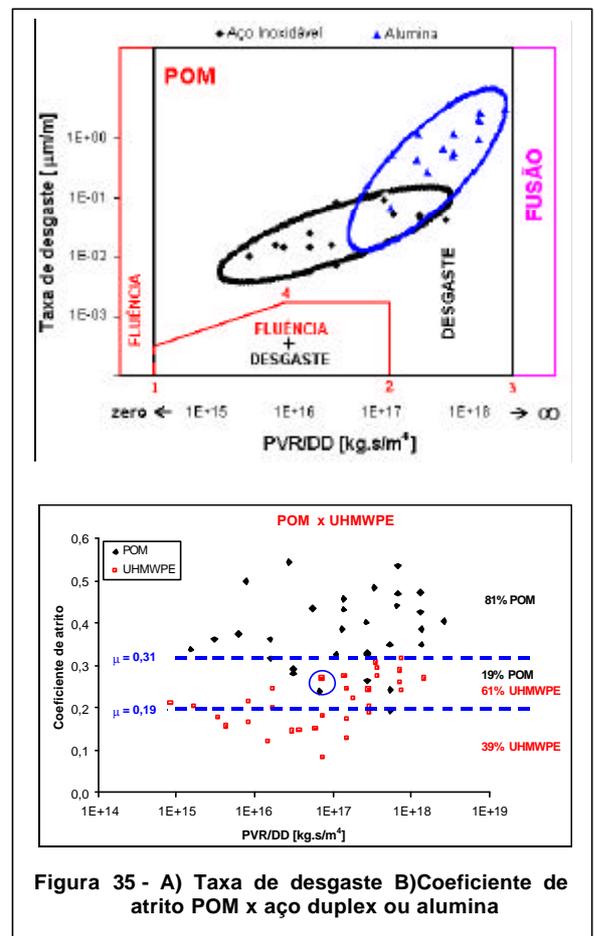


Figura 35 - A) Taxa de desgaste B) Coeficiente de atrito POM x aço duplex ou alumina

A discrepância entre coeficientes de atrito e de desgaste fica mais dramática no caso de desgaste lubrificado. Neste caso, o coeficiente de desgaste pode atingir valores tão pequenos quanto 10^{-9} , enquanto que, apenas em condições muito especiais, o coeficiente de atrito alcança valores de 0,002 [XU, KATO & HIRAYAMA, 1997].

Estas discrepâncias não impedem, entretanto, que, mediante uma descrição detalhada dos eventos que contribuem para a liberação de energia durante o processo (força ou energia de atrito), não se possa chegar a uma explicação do fenômeno de desgaste, ainda que sem relacionar os valores de um com os valores do outro.

No caso da fadiga de contato, por rolamento entre esfera e plano, o fenômeno pode se iniciar com a deformação das asperezas da superfície (dependendo do acabamento da mesma e da carga aplicada), elevando a área de contato até que o contato seja essencialmente elástico entre esfera e plano. O crescimento da área exposta (do plano e da esfera) e, portanto, da área de contato em cada ciclo, bem como o encruamento, são as primeiras parcelas da energia dissipada no sistema.

Outra que se manifesta simultaneamente, com estas duas, é a liberação de energia devido ao atrito interno no *estrito senso*, ou seja, defeitos pontuais interagindo com campos elásticos de discordâncias. Esta parcela de energia permanece sendo liberada até o fim do processo. Considerando a presença (inevitável) de inclusão sobre a superfície, ao redor dela ocorre o encruamento, cuja energia pode ser descrita qualitativamente pela integral sob a curva tensão deformação.

Em torno de outras inclusões esta parcela de energia pode estar sendo, ou pode vir a ser, liberada.

Assim que ocorrer a fratura, numa região como a descrita anteriormente, tem-se o crescimento da trinca por solitação cíclica, gerando novas interfaces (novas áreas, neste caso dentro do material). Este fenômeno pode ser descrito pelos modelos de propagação cíclica de trincas e, com eles, pode se relacionar os esforços macroscópicos com a energia de interface, por meio da tenacidade à fratura. Por fim, a trinca atingindo a superfície, ou o tamanho crítico, a amostra falhará.

Os restos de desgaste (cavacos) podem permanecer entre os corpos em contato e, neste caso, haverá

consumo de energia para deformá-los ou fraturá-los novamente, por deformação plástica ou criação de superfície. A Figura 36 ilustra as áreas criadas durante um ensaio de fadiga de contato.

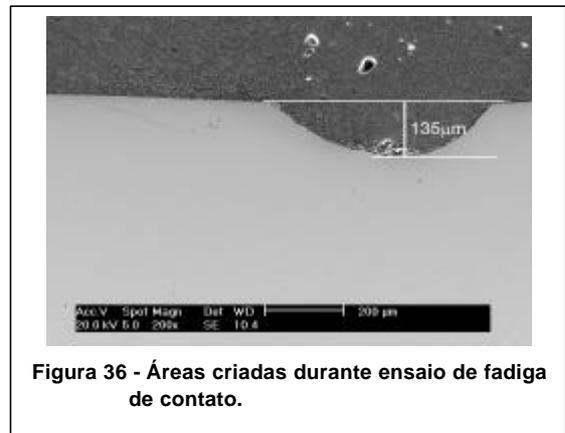


Figura 36 - Áreas criadas durante ensaio de fadiga de contato.

Uma das propostas para a descrição detalhada do tribossistema pode ser encontrada no trabalho de Blau [BLAU 2001] e está apresentada na Tabela 6.

A Tabela, por sua extensão, dá a idéia da magnitude da tarefa para efetuar um estudo de boa qualidade sobre atrito.

Por omitir explicitamente os materiais na coluna das “categorias” e, em decorrência, sua natureza (cerâmicos, metálicos, poliméricos ou compostos), diferenciação microestrutural (ou amorfismo), de estrutura cristalina, de “efeitos dissipativos” devidos à instabilidade mecânica, de sua estrutura atômica ou molecular, da “coluna dos fatores” a Tabela permite concluir que a tarefa de descrição dos fenômenos envolvidos na explicação do fenômeno de atrito não é trivial.

Pode ser que a abordagem de se compreender os mecanismos atuantes e os diversos fatores que os afetam não explique o que é (em cada caso) o atrito, mas ao menos oferece um quadro mais rico do que substituir o fenômeno, sua percepção e o significado por um símbolo quer seja: F (força) ou E (energia) ou m.

Tabela 6 Fatores que afetam o comportamento atritante (frictional behavior).

Categoria	Fator
Geometria do contato	Conformidade dos componentes (macro escala das superfícies em contato)
	Rugosidade da superfície (aspectos microscópicos – forma e distribuição de tamanho de asperezas)
	Ondulação da superfície
	Direcionalidade da superfície com respeito ao movimento relativo
Propriedades do fluido e do fluxo	Regime de lubrificação (limite, misto, hidrodinâmico, elastohidrodinâmico – espessura do filme e pressão)
	Características de viscosidade do fluido e como estas afetam o fluxo newtoniano ou não newtoniano
	Efeitos de temperatura e pressão na viscosidade
	Efeitos da tensão de cisalhamento na viscosidade em filmes ultrafinos
Propriedades químicas dos lubrificantes	Formação ou alteração dos filmes devido ao atrito
	Estabilidade dos modificadores do coeficiente de atrito com o tempo
	Oxidação e acidificação dos lubrificantes
Movimento relativo	Movimento unidirecional ou alternado
	Constância do movimento (acelerações, pausas, paradas-partidas)
	Magnitude da velocidade relativa à superfície
Forças aplicadas	Magnitude da força normal (pressão de contato)
	Constância das forças aplicadas
Terceiro corpos	Características das partículas que entram nos lubrificantes
	Características da relação entre as partículas na interface (partículas de desgaste, contaminantes externos, camadas de pós lubrificantes)
Temperatura	Efeitos térmicos sobre os materiais (instabilidades termoelásticas)
	Efeitos térmicos nas propriedades dos lubrificantes (viscosidade, fluxo, possibilidade de cavitação)
	Combinação da temperatura induzida “por atrito” e da temperatura ambiente
Rigidez e vibração	<i>Complância</i> de contato (stick-slip)
	Amortecimento de vibração ou vibrações externas
	Realimentação entre estímulo “por atrito” e resposta estrutural.

6. Considerações finais

6.1. O fenômeno, sua percepção e o significado...

Entre todas as definições de atrito apenas Mikhim [MIKHIM, 1986] preocupou-se em distinguir o fenômeno do seu modelo. Vale a pena reproduzi-la:

“Atrito externo de sólidos é um fenômeno complexo dependente de vários processos que ocorrem nas áreas reais de contato e em camadas superficiais delgadas durante o movimento relativo de corpos”.

Esta definição permite que se coloque a discussão da distinção entre o fenômeno físico, sua representação, e a linguagem que se emprega para descrevê-los.

No caso do **atrito**, as definições, exceto a acima citada, não se preocupam com considerações sobre o **fenômeno físico** nem com sua **representação**, ou

seja, com a **percepção** (compartilhada ao menos por um setor da comunidade científica). Sobre este aspecto da relação do fenômeno físico, ou seja, do que “de fato acontece na natureza”, e sua representação ou percepção compartilhada (modelo) há uma longa tradição de discussão filosófica que talvez possa ser resumida pelas afirmações de Niels Bohr, a respeito da mecânica quântica, relatados por M Pracontal [PRACONTAL, 2002].

“Não existe mundo quântico, só existe uma descrição quântica abstrata”, diz Bohr. “É errôneo pensar que o objeto da física é mostrar com a natureza é. A física se refere ao que nós podemos dizer a respeito da natureza”.

A perspectiva que se adota neste texto (e que tem sido a minha durante a vida recente) é de que o melhor que podemos fazer enquanto cientistas é ter uma representação (que expresse nossa percepção do fenômeno físico) e **que possa ser testada!** Esta

representação, no caso do atrito, seria o emprego constante da noção de tribossistema e da descrição dos mecanismos atuantes na região entre os corpos, no interior dos mesmos (ou de um deles), especialmente na subsuperfície (“camadas superficiais delgadas” cf. Mikhim) na maioria dos casos.

6.2. Sobre a pesquisa em atrito (suas perspectivas...)

O compartilhamento da compreensão de que o fenômeno de atrito requer análises sobre o sistema tribológico, que vão desde a sua estrutura (enquanto máquina ou grande estrutura), passam pela sua microestrutura, ou estrutura amorfa (enquanto material de engenharia), e chegam na sua constituição (enquanto substância), implica em reconhecer que o estudo do fenômeno atrito envolve multidisciplinalidade de conhecimentos.

Mais do que isto, a abordagem aqui apresentada propõe a cooperação entre estudiosos de diversas áreas, devido ao inevitável *sinergismo* das abordagens, que decorrem de formações e ópticas diferentes.

Esta **importância da necessidade de interação** fica clara se examinarmos obras como: “*Tribology on abrasive machining process*” [MARINESCU, 2004] ou “*Tribology in metworking*” [SCHEY, 1984] nos quais, em que pese a excelência nos campos

específicos e aplicação, a abordagem do fenômeno de atrito é claramente *unilateral*, restringindo-se não apenas à compreensão dos fenômenos nos processos de fabricação, mas *limitando* ao campo de soluções de problemas tecnológicos e de inovação científica. Uma exceção é o texto “*Tribology in particulate technology*” [BRISCOE & ADAMS, 1988] pela sua abrangência, combinando com objetividade a *abordagem multidisciplinar* do fenômeno de atrito, com o inteligente uso dos fundamentos científicos, como vetor de desenvolvimento tecnológico.

Também parece claro que o estudo do fenômeno de atrito, por si só, pode levar a saltos importantes no conhecimento.

Um exemplo é a micro e nano tecnologia, onde os componentes tem elevada relação de área, em relação ao seu volume, ou na aplicação do calor gerado por histerese na busca de sistemas mais eficazes de refrigeração [SHIR, 2005].

Por fim, e talvez o mais importante no momento, é o emprego dos conhecimentos tribológicos para redução de perdas energéticas e de poluição, cujo exemplo mais dramático é o da indústria automotiva, cujas perspectivas para redução do atrito são nacional e internacionalmente reiteradas [PRIEST & TAYLOR, 2000].

7. BIBLIOGRAFIA

- ABNT - NBR 6589, **Peças em ferro fundido cinzento classificadas conforme a resistência à tração** ABNT, 2005
- ALLEN, G. Inflation: the value of the pound 1750 – 2002. **House of the Commons, Research Paper** 03/82. 20p. Disponível em: <<http://www.parliament.uk/commons/lib/research/rp2003/rp03-082.pdf>> Acesso em: 30 mai. 05.
- AMATO, M. P. Projeto Temático FAPESP **Novas estratégias em ventilação artificial: diagnóstico e prevenção do barotrauma/biotrauma através da tomografia de impedância elétrica (tie)** Coordenador subprojeto de engenharia (Raul Gonzales Lima, Agenor de Toledo Fleury, Emilio Carlos Neli Silva, Marcos Guerra Tsuzuki) subprojeto de matemática aplicada Joyce S Bevilacqua, Nelson M. Kuhl.
- ANDERSON, B. S. Company Perspective in Vehicle Tribology – Volvo. In: **17th Leeds-Lion Symposium on Tribology**, Elsevier Science Pub Co, 1991. p. 503-506 (Elsevier Technology Series 18).
- ARCHARD, J. F. Elastic deformation and the laws of friction. **Proceedings of the Royal Society of London Series A – Mathematical and Physical Sciences**, v. A 243 (1233), p. 190-205, 1957.
- AS FORÇAS DAS MARÉS, Centro de divulgação científica e cultural da Universidade de São Paulo [on line]. Disponível em <<http://www.cdcc.sc.usp.br/cda/aprendendo-basico/forcas-de-mares/forcas-de-mares.htm>>. Acesso em 30 mai. 05.
- AS MARÉS, ROTAÇÃO SINCRONIZADA DA LUA E A EVOLUÇÃO DO SISTEMA TERRA-LUA, Departamento de Astronomia do Instituto de Física da UFRGS [on line]. Disponível em <<http://astro.if.ufrgs.br/fordif/node6.htm>>. Acesso em 30 mai. 05.
- ASSOCIAÇÃO DE TURISMO ECOLÓGICO INTEGRADO A ARQUEOLOGIA. Disponível em <www.ateia.org.br/ver>. Acesso em 30/05/2005.
- AZEVEDO, C. R. F.; CESCÓN, T. Failure analysis of aluminum cable steel reinforced (ACSR) conductor of the transmission line crossing the Paraná River. In: JONES, D. R. H. **Failure Analysis Case Studies III**. Elsevier Science Pub Co, 2004. p. 345-366.
- BORBA, F. S. **Dicionário de usos do português do Brasil**, São Paulo: Ática, 2002. 1674 p.
- BERGANTIN, R.; MARU, M. M.; FARIAS, M. M. C.; PADOVESE, R. L. Dynamic signal analyses in dry sliding wear tests. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering**, v. XXV, n. 3, p. 285-292, 2003.
- BERNARDES, F. G. Relatório final de bolsa FAPESP de mestrado. março 2005. 98 p.
- BESSA, K. L. **Análise comparativa de fluxo em fístula arteriovenosa**. 2004. 169 f. (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- BLAU, P. J. Glossary of Terms. In: ____ **Metals Handbook v. 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology**. ASM International, 1995.
- BLAU, P. J. **Metals Handbook v. 18: Friction Lubrication and Wear Technology**. 10 ed. Philadelphia: ASM International, 1995. 942pp.
- BLAU, P. J. The significance and use of friction coefficient. **Tribology International**, v. 34, p. 585-591, 2001.

- BLAU, P. J.; DEKKER, M.; **Friction science and technology**, Marcel Dekker, 1995. 399 p.
- BOWDEN, F. P., TABOR, D. **The friction and lubrication of solids part II**. London: Oxford Press, 1964. 544pp.
- BRESCIANI, E. Alimentos e bebidas do antigo Egito. In: FLANDRIN, J. L.; MONTANARI, M. **História da Alimentação**. São Paulo: Estação Liberdade, 1998. p. 68-79.
- BRISCOE, B. J., ADAMS, M. J. **Tribology in particulate technology**, Adam Hilger, 1988. 496 p.
- BUDINSKY, K. G. Friction in machine design. In: LUDEMA, K. C.; BAYERS, R. D. **Tribological modeling for mechanical designers** (ASTM Special Technical Publication 1105.) Philadelphia: American Society for Testing Materials, 1991.
- CALLISTER, W. D., JR., **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2002. 589 p.
- CARVALHO, M. A. Comunicação pessoal. Abril de 2005.
- CASARINI, M.; VILLABÓN, L. R.; SINATORA, A. Determinação do coeficiente de atrito em altas temperaturas usando ensaios de deslizamento. In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO (COBEF), 2005, Joinville. **Anais...** Joinville: Associação Brasileira de Engenharia de Fabricação, 2005 (CDROM).
- CUPPARI, M. G. Di V.; PADOVESE, L. R.; ORAGGIO, A. F.; CASTANHO, F. O. Correlation between collapse pressure and cavitation erosion resistance. In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM), 1999, Águas de Lindóia. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1999 (CDROM).
- CZICHOS, H. Systems approach to wear problems,. In: PETERSON, M. B.; WINNER, W.O. **Wear control handbook**. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1980. p. 17-34.
- da VINCI, Leonardo– **Il libri di Meccanica**. Compilado e comentado por UCCELLI, A. Milão: Ulrico Hoepli, 1939. 673 p.
- LEONARDO da Vinci. New York: Reynal Company & William Morrow Company, SD. 534 p.
- DARÓ, F. R., MASSARANI, M. Uso do FEM em caso particular de flexão de placa litosférica, **Boletim Técnico do Departamento de Engenharia Mecânica**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo 2002. 22 p.
- de PAOLA, J. C. C. **Análise ambiental de aços forjados**. 2004. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- de PAOLA, J. C. C., SINATORA, A., CORTÉS, G. R. M., LAUAND, C.T., HENNIEL, W. T. **Brazilian focus tubes and abrasives researches for rock cutting in AWJ systems**. In: American Waterjet Conference (WJTA), 2005. **Anais...** Houston: AWJ, 2005.
- DIETRICH, A. B. **Um estudo de correntes induzidas em meios maciços ferromagnéticos – aplicação no projeto de freios de correntes parasitas**. 2000. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- DOWSON, D. **History of tribology**, London: Longman, 1979. 677 pp.
- DOWSON, D. Wear oh where? **Wear**, v. 103, p. 189-203, 1985.
- EM MARÉ DE ASTROLOGIA. CEPO – Associação de cépticos de Portugal. [on line]. Disponível em <<http://www.cepo.interacesso.pt/Artigos/Astrol/Gravid.htm>>. Acesso em 30 mai. 05.
- ENGQVIST, H.; EDERYD, S.; AXÉN, N.; HOGMARK, S. Grooving wear of single-crystal tungsten carbide. **Wear**, v. 230, p. 165-174, 1999.

- FAPESP. **Pesquisa FAPESP**, Junho 2005, 112, p3. **A imagem do mês**.
- FARIAS, M. C. M.. **Desgaste por deslizamento de aços inoxidáveis austeníticos**. 1999. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- FERREIRA, A. B. H. **Novo Dicionário da Língua Portuguesa (dicionário Aurélio)**. São Paulo: Nova Fronteira, 1975. 1517 p.
- FERREIRA, V.; SILVA, C. H. S.; BRESSIANI, J. C.; SINATORA, A.; **Influência da umidade relativa no coeficiente de atrito da alumina e do compósito Al₂O₃ - YAG-NbC**. In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM). Uberlândia, 2001. **Anais...** São Paulo Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, v. 3, p. 218- 224, 2001.
- FIELD, J. E. Liquid impact and cavitation erosion processes. In: BRISCOE, B. J.; ADAMS, M. J. **Tribology in particulate technology**. The Institute of Physics, 1988. p. 416-438.
- FRÊNE, J. La tribologia de l'antiquité a nos jours. **Mecanique Industrielle et Materiaux**. v. 2, p. 263-282, 2001.
- GESELCHAFT für Tribologie [on line]. Disponível em <<http://www.gft-ev.de>>. Acesso 13-05-2005.
- GOLDENSTEIN, H.; SINATORA, A. **Relatório técnico de análise de desgaste prematuro de agulhas Groz-Beckert de máquinas de tecer malhas tipo “disco e cilindro” Mayer**. (Relatório técnico realizado para Fibra Dupont Sudamérica S.A em 2001).
- GRANICK, S. Soft Matter in a tight spot. **Physics today**, v. 52, n. 7, p. 26-31, jul. 1999.
- GREENWOOD, J. A., WILLIAMSON, J.B.P. Contact of nominally flat surfaces. **Proceedings of the Royal Society of London Series A – Mathematical and Physical Sciences**, v. A 295 (1442), p. 300-319, 1966.
- HU, E. CO₂ credit or energy credit in emission trading? **Energy policy**, v. 30, p. 263-265, 2002.
- HUTCHINGS, I. M. **Tribology – friction and wear of engineering materials**. London: Edward Arnold Publishers Ltd., 1992. 269p.
- JOCSAK, J.; WONG, V.; W., TIAN, T.; TOMANIK, E. **The characterization and simulation of cylinder liner surface finishes**. In: ASME INTERNAL COMBUSTION ENGINE DIVISION 2005 SPRING TECHNICAL CONFERENCE, 2005, Chicago - IL, USA, **Proceedings...** Philadelphia: American Society of Mechanical Engineers, 2005. paper ICES 2005-1080.
- JOST, H. P. Tribology – origin and future. **Wear**, v. 136, p. 1-17, 1990.
- KIMURA, Y. Maintenance tribology: its significance and activity in Japan. **Wear**, v. 207, 1997, p.63-66.
- MARÉS. Faculdade de Letras da Universidade do Porto, [on line]. Disponível em <<http://www.lettras.up.pt/geograf/seminario/Aula4.htm>>. Acesso em: 30 mai. 05.
- MARINESCU, I. D.; ROWE, W. B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I.; ROWE, W. B. **Tribology of abrasive processes**. Noyes Publications, 2004, 650 p.
- MUSEU VIRTUAL de SAQUAREMA [on line]. Disponível em <http://www.saquarema.com.br/museu/indice.htm>. Acesso em 30 mai. 05.
- MIKHIM, N.M. Calculation of external friction and preliminary displacement. In: KRAGELSKY, I. V.; ALISIN, V. V. **Friction, wear, lubrication – tribology handbook**. Moscou: Mir Publisher, 1986. p. 54-99.

- MOREIRA, J. R. SERRASQUEIRO, M. A. A bun paper: strategies for biomass implementation. Network News – Biomass Users Network, v. 8, n. 1, p. 9-10, jan-feb, 1994.
- MUSEU DEL ORO **Los Tesoros de los señores de Malagna** Banco de la República –, 1996, 2ª ed. p. 34.
- PAES, M. T. P.; FORMOSO, C. M.; JARDIM, M. P.; FERREIRA, T. C.; FRANCO, V. L. D. S. and FRANCO, S. D. Development and implementation of a control software for a friction hydro pillar processing machine. In: 2nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MULTIBODY SYSTEMS AND MECHATRONICS, 2005. **Anais...** Uberlândia: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 2005.
- PERLÈS, C. **As estratégias alimentares nos tempos pré-históricos**. In: FLANDRIN, J. L.; MONTANARI, M. **História da Alimentação**. São Paulo: Estação Liberdade, 1998. p. 36-53.
- PERSON, B. N. J. **Sliding friction**, Berlin: Springer, 1998. 462 p.
- PINTAUDE, G.; TANAKA D. K.; SINATORA A. The effects of abrasive particle size on the sliding friction coefficient of steel using a spiral pin-on-disk apparatus. **Wear**, v. 255, n. 1-6, p. 55-59, 2003
- PONS English Learner's Dictionary**. Collins Birmingham University International Language Database, Harper Collins Publishers 1994.
- PRIEST, M.; TAYLOR, C. M. Automobile engine tribology – approaching the surface. **Wear**, v. 241, p. 193-203, 2000.
- RABINOWICZ E. **Friction and Wear of Materials**, John Wiley & Sons, 1965. 244 p.
- RABINOWICZ E. The least wear. **Wear**, v. 100, p. 533-541, 1984.
- SCHEY, J. A. Tribology in metalworking. Philadelphia: ASM, 1984. 736pp.
- SHIR, F., MAVRIPLIS, C., LAWRENCE, H. B., DELLA TORRE, E. Analysis of room temperature magnetic regenerative refrigeration. **International Journal of Refrigeration**, v. 28, p. 616–627, 2005.
- SILVA, C. H., PADOVESE, L. R., TANAKA, D. K. **Determinação do coeficiente de atrito estático**. São Paulo: POLI-USP-PME, 1999. 6 p. (Relatório técnico LFS 05-1999 de 09-08-1999).
- SILVA, C. H.; TANAKA, D. K.; SINATORA, A. The effect of load and relative humidity on friction coefficient between high-density polyethylene on galvanized steel – preliminary results. **Wear**, v. 225, n. 9, p. 339-342, 1999.
- SILVA, C. H. **Degradação de UHMWPE e de POM devido à ação tribológica contra aço inoxidável e alumina**. 2003. 255 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- SINATORA, A.; POHL, M.; WALDHER, E.U. Wear induced martensite in high chromium cast iron. **Scripta Metallurgica et Materialia**, v. 32, p. 857- 861, 1995.
- SOCIEDADE DA TERRA REDONDA [on line]. Disponível em <<http://www.str.com.br/principal.php>>. Acesso em 30 mai. 05.
- STACHOWIACK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. Butterworth-Heinemann, 2001. 748 p.

- SCHUITEK, A. J., MARU, M. M., HIOKI, D., SINATORA, A. Desgaste abrasivo do aço AISI 8640 por meio de ensaios de riscamento circular repetido. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, v. I, n. 1, p. 34-38, Julho 2004.
- SU, J., KATYO, K., HIRAYAMA, T. The transition of wear mode during the running –in process of silicon nitride sliding in water. *Wear* v. 205, p. 55-63, 1997.
- TANAKA, D. K. **Estudo do desgaste irregular de compostos de borracha**. São Paulo: POLI-USP-PME, 2000.
- TANAKA, D. K. **Corrosão do aço carbono pelo etanol**. 1984. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.
- TAYLOR, C.M. Automobile engine tribology – design considerations for efficiency and durability. *Wear*, v. 221, p. 1-8, 1998.
- THE WORLD FACTBOOK. Disponível em www.cia.gov/cia/publications/factbook/geos/uk.html. Acesso em 13/04/2005.
- TOMANIK, E. **Modelamento do desgaste por deslizamento em anéis de pistão de motores de combustão interna**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- UETZ, H. **Abrasion und Erosion**, Grundlagen Betriebliche Erfahrungen Verminderung. Berlin: Carl Hansen Verlag, 1986. 829 p.
- UETZ, H.; WIEDERMEYER, J. **Tribologie der Polymere**. Berlin: Carl Hanser Verlag, 1984. 378 p.
- VARGAS, R. T. **Formulação e implementação de uma lei constitutiva de atrito**. 2003. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- WEISHEIMER, G. K., RAMOS, L. V., SINATORA, A. Simulação do forjamento a frio de cruzeta de pequeno porte utilizando os aços 1020 e 16MnCr5. In: VI ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2005, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Laboratório de Fenômenos de Superfície PME-EPUSP, pp 15-18.
- WILLIAMS J. A. **Engineering Tribology**, Oxford University Press, 1995. 488p.
- WINER, W. O. Future trends in tribology. *Wear*, v. 136, p. 19-27, 1990.
- ZUM-GAHR, K. H. **Microstructure and wear of materials**, Elsevier, 1987. 560pp.