

Atrito

Uma pequena esfera de aço é abandonada num recipiente contendo glicerina. Num referencial fixo no recipiente, a velocidade de queda da esfera cresce até um valor máximo e então permanece constante. Além do peso, atua sobre a esfera o empuxo e a força de resistência devido ao fluido. Um impulso faz uma moeda deslizar sobre uma mesa. Num referencial fixo na mesa, a velocidade da moeda diminui até zero. A aceleração da moeda tem sentido contrário ao de sua velocidade e é causada pela força de atrito cinético devido à superfície da mesa. Sobre uma caixa em repouso sobre o chão aplica-se uma força horizontal de pequena intensidade. Num referencial fixo no chão, a caixa não se move. Além da força aplicada atua, na horizontal, a força de atrito estático. Um cilindro rola sem deslizar (rolamento puro) sobre uma mesa. Num referencial fixo na mesa, a velocidade do cilindro diminui até zero. A aceleração do cilindro tem sentido contrário ao de sua velocidade e é causada pela força de atrito de rolamento.

As forças de atrito consideradas no primeiro exemplo (força de atrito viscoso ou força de resistência), no segundo exemplo (força de atrito cinético ou força de atrito de deslizamento) e no quarto exemplo (força de atrito de rolamento), existem porque existe movimento relativo entre os corpos considerados e estão associadas à dissipação de energia mecânica. A força de atrito considerada no terceiro exemplo (força de atrito estático ou de aderência) não está associada à dissipação de energia mecânica porque, a ela, não está associado qualquer trabalho e porque ela só existe se as superfícies em contato tendem a se mover uma em relação a outra. As forças de atrito estático e cinético estão associadas a superfícies secas. Caso contrário, a força de atrito teria, também, o caráter do atrito viscoso.

Força de Atrito Viscoso

A força de resistência que aparece durante o movimento de um corpo em um fluido depende da forma do corpo, da sua velocidade em relação ao fluido e da viscosidade do fluido. Também entre duas superfícies em movimento relativo separadas por uma fina película contínua de fluido existe atrito viscoso. Nos dois casos, se o módulo da velocidade relativa é pequeno, o fluido se separa em camadas paralelas.

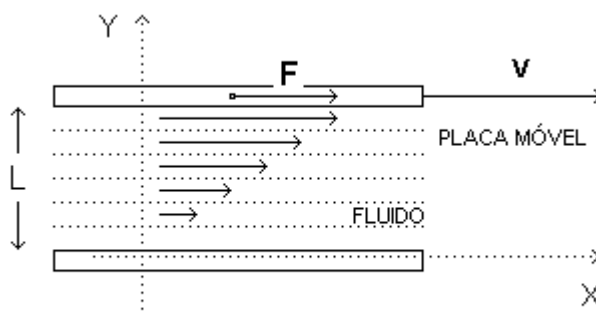


Fig.1

A viscosidade dos fluidos e, portanto, a força de resistência, vem do atrito interno. Para entender essa afirmativa, vamos considerar duas placas sólidas, planas, horizontais, uma sobre a outra, com certa quantidade de fluido entre elas (Fig.1).

Fixando o referencial numa das placas e aplicando uma força horizontal constante F na outra placa, a experiência mostra que esta última se move, durante certo intervalo de tempo, com aceleração não nula e, depois, com velocidade constante v , chamada velocidade limite ou velocidade terminal. O módulo da velocidade terminal é proporcional ao módulo da força aplicada, isto é, se a intensidade da força aplicada for duplicada, o módulo da velocidade terminal também duplica, se a intensidade da força aplicada for triplicada, o módulo da velocidade terminal também triplica e assim por diante.

Durante o movimento, o fluido entre as placas se separa em lâminas paralelas entre si e paralelas às placas. A primeira lâmina, adjacente à placa móvel, se move solidária a ela e, por isso, tem velocidade v . A segunda lâmina, adjacente à primeira, se move com velocidade de módulo menor. A terceira lâmina, adjacente à segunda, se move com velocidade de módulo ainda menor e assim por diante. A última lâmina, adjacente à placa imóvel, está solidária a ela e, por isso, tem velocidade nula. É fato experimental que os módulos das velocidades das lâminas variam linearmente entre os dois extremos, zero e v .

Como lâminas adjacentes se deslocam com velocidades de módulos diferentes, elas deslizam uma em relação à outra. A viscosidade vem do atrito entre lâminas adjacentes. Além disso, por causa desse atrito, existe transformação de energia mecânica em energia interna.

A viscosidade dos fluidos vem do atrito interno. Nos líquidos, isto significa que a viscosidade vem das forças de atração (coesão) entre moléculas relativamente juntas. Além disso, com o aumento da temperatura, maior se torna a energia cinética média das moléculas e, em consequência, menor se torna o intervalo de tempo médio durante o qual as moléculas passam umas nas proximidades das outras. Desse modo, as forças intermoleculares se tornam menos efetivas e a viscosidade diminui com o aumento da temperatura.

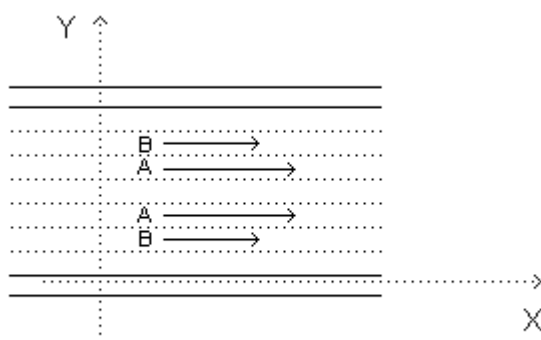


Fig.2

Em um gás, as moléculas estão, em média, muito longe umas das outras. Desse modo, as forças de atração (coesão) entre moléculas não são efetivas e, por isso, a viscosidade do gás não pode se originar dessas forças. A viscosidade de um gás vem da transferência de momentum, isto é, da transferência de quantidade de movimento entre camadas adjacentes que se movem com velocidades de módulos diferentes. Para compreender o fenômeno, vamos considerar um gás que escoar através de um tubo cilíndrico, com uma velocidade de módulo não muito grande num referencial fixo no tubo, de modo que o escoamento seja lamelar e estacionário.

Vamos supor que A e B sejam duas camadas cilíndricas adjacentes, com a camada A se movendo mais rapidamente que a camada B (Fig.2).

Então, o módulo da quantidade de movimento transferida quando moléculas da camada A passam para a camada B é maior do que o módulo da quantidade de movimento transferida quando moléculas da camada B passam para a camada A. O módulo da velocidade da camada mais rápida tende a diminuir e o módulo da velocidade da camada mais lenta tende a aumentar. Dito de outra maneira, o módulo da velocidade relativa entre as camadas tende a diminuir e é por isso que podemos dizer que existe atrito interno no gás.

Forças de Atrito Seco

Existem forças de atrito entre duas superfícies secas em contato quando existe movimento relativo entre elas (atrito cinético) ou quando não existe movimento, mas tendência de movimento relativo entre elas (atrito estático). As forças de atrito são paralelas às superfícies em contato.

As superfícies que, no nível macroscópico, parecem planas, têm, no nível microscópico, irregularidades e imperfeições. O contato entre duas dessas superfícies ocorre num número relativamente pequeno de pontos, onde as irregularidades se interpenetram e se deformam. As deformações causam o aparecimento de forças mútuas cujos efeitos coletivos são as forças normais. O número de pontos de contato e as intensidades das deformações e, portanto, das forças normais, dependem das intensidades das forças que aproximam as superfícies uma contra a outra. Nos pontos de contato existem ligações dos átomos de uma superfície com os átomos da outra, como se fossem soldas microscópicas.

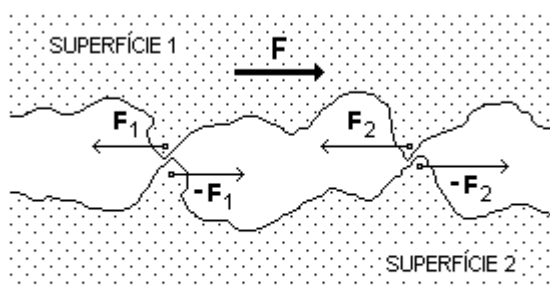


Fig.3

Se uma força externa horizontal F é aplicada na superfície 1 (Fig.3), passam a existir, nessa superfície, as forças horizontais F_1, F_2, \dots, F_n e aparecem, na superfície 2, as forças $-F_1, -F_2, \dots, -F_n$, associadas às deformações locais originadas pela tendência de movimento relativo entre as superfícies.

Se as superfícies permanecem em repouso relativo, a força de atrito estático sobre a superfície 1 e a força de atrito estático sobre a superfície 2 são, respectivamente:

$$F_{e1} = F_1 + F_2 + \dots + F_n$$

e

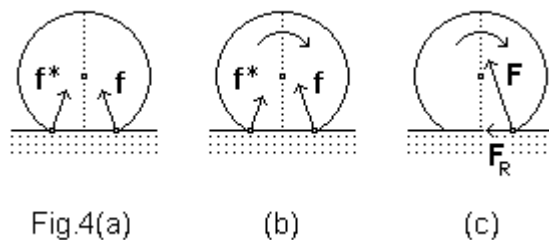
$$\mathbf{F}_{e2} = - (\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n)$$

Quanto maior for o módulo da força \mathbf{F} , maiores são as deformações locais e maiores os módulos das respectivas forças. Se o módulo da força \mathbf{F} é grande o suficiente para romper as soldas microscópicas nos pontos de contato, uma superfície desliza em relação à outra e o atrito deixa de ser estático para se tornar cinético. Nesse movimento, as irregularidades de uma superfície colidem com as irregularidades da outra e as forças que surgem devido a essas colisões se somam para dar as respectivas forças de atrito cinético. As colisões originam oscilações locais que se propagam e são amortecidas pelo resto do material. Assim, a energia mecânica associada ao movimento relativo das superfícies se transforma em energia interna, aumentando as temperaturas das superfícies.

Os dados referentes às forças de atrito estático e cinético são muito aproximados, dependendo dos diferentes graus de polimento das superfícies e/ou dos diferentes graus de contaminação com substâncias estranhas. Esses fatores é que realmente determinam os coeficientes de atrito e a dependência da força de atrito cinético com a velocidade relativa das superfícies em questão. Assim, não tem sentido tabelar coeficientes de atrito entre superfícies diversas, a menos que elas sejam padronizadas. O atrito nunca é entre uma superfície de cobre e uma de alumínio, por exemplo, mas entre uma superfície de cobre com certo polimento e com algumas impurezas e uma superfície de alumínio com outro polimento e com outras impurezas.

Força de Atrito de Rolamento

Um cilindro que rola sem deslizar sobre uma superfície horizontal termina por parar (num referencial fixo na superfície) porque atua sobre ele a força de atrito de rolamento. Essa força depende das propriedades das substâncias de que são feitos o cilindro e a superfície horizontal. O cilindro e a superfície se deformam pela ação das forças de deformação mútuas, mas para o argumento que se segue vamos supor que apenas o cilindro se deforma (Fig.4, onde a deformação foi exagerada para efeito didático).



Se o cilindro está em repouso em relação à superfície (Fig.4(a)), a cada força \mathbf{f} que a superfície exerce sobre o cilindro, existe uma força \mathbf{f}^* , simétrica em relação ao plano vertical que passa pelo centro do cilindro. A resultante de todas essas forças é a força normal que, nesse caso, é vertical e está no plano mencionado.

Se o cilindro está em movimento em relação à superfície (Fig.4(b)), a cada força \mathbf{f} que a superfície exerce sobre o cilindro adiante do plano vertical que passa pelo centro do cilindro, existe uma força \mathbf{f}^* , atrás desse plano, de módulo menor. Essa diferença aparece porque a região do cilindro onde aparece a força \mathbf{f} tem um

movimento local no sentido de se aproximar da superfície e a região do cilindro onde aparece a força f^* tem um movimento local no sentido de se afastar da superfície.

Como a aceleração linear do cilindro é negativa, a resultante \mathbf{F} de todas essas forças deve ser inclinada para trás (Fig.4(c)), isto é, deve ter uma componente horizontal dirigida no sentido contrário ao da velocidade, e como a aceleração angular também é negativa, o ponto de aplicação dessa resultante deve estar situado a frente do plano vertical que passa pelo centro do cilindro e mais, a linha de atuação dessa resultante deve passar por cima do centro do cilindro. A componente vertical dessa resultante é a força normal e a componente horizontal, \mathbf{F}_R , é a força de atrito de rolamento.