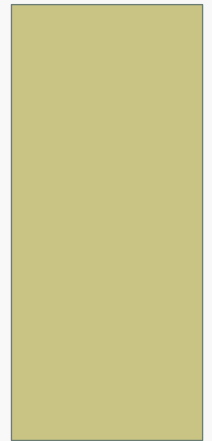




**Universidade Federal do Pará  
Instituto de Tecnologia  
Faculdade de Engenharia Mecânica**

**MECÂNICA GERAL**

**PROFESSOR: IGOR DOS SANTOS GOMES  
E-MAIL: IGOR.GOMES@ITEC.UFPA.BR**



# ATRITO

## 5.1. Características do atrito seco

## 5.2. Problemas envolvendo atrito seco

## 5.1. CARACTERÍSTICAS DO ATRITO SECO

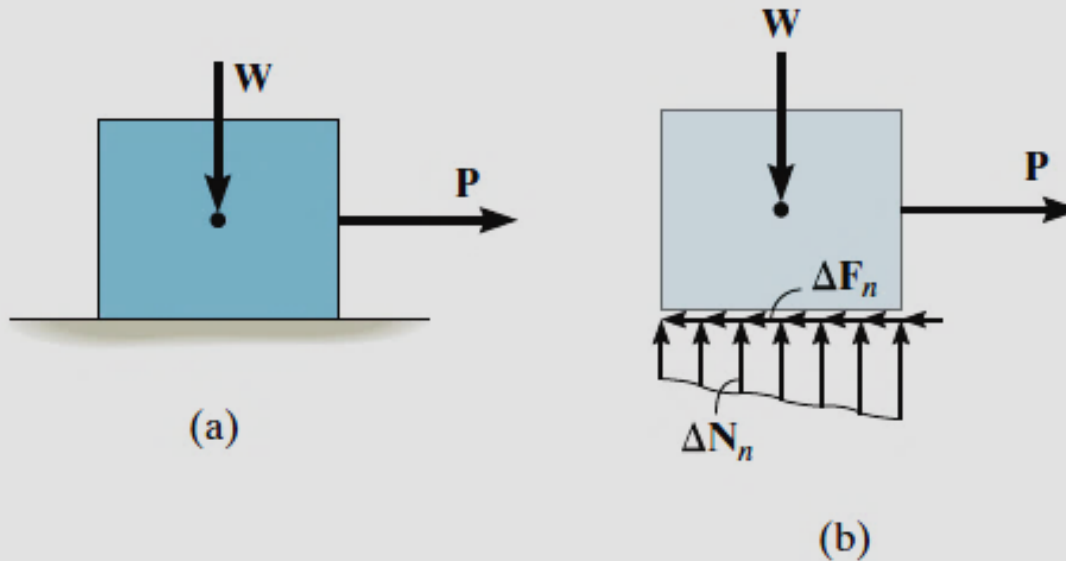
- **Atrito** é uma força que resiste ao movimento de duas superfícies em contato que deslizam uma em relação à outra;
- Essa força sempre atua na direção tangente à superfície nos pontos de contato e no sentido oposto ao movimento possível ou existente entre as superfícies.
- O **atrito seco** às vezes é chamado de *atrito de Coulomb*, pois suas características foram muito estudadas pelo físico francês Charles-Augustin de Coulomb em 1781;
- O atrito seco ocorre entre as superfícies de contato dos corpos quando não existe um fluido lubrificante.



## 5.1. CARACTERÍSTICAS DO ATRITO SECO

### Teoria do atrito seco:

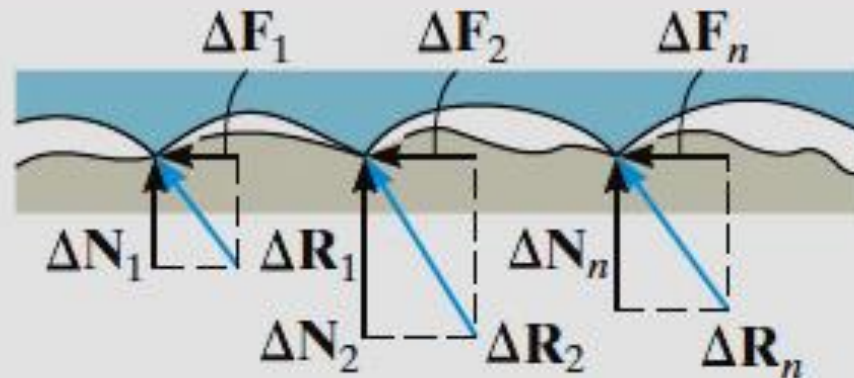
- A teoria do atrito seco pode ser explicada considerando-se os efeitos ao tentar puxar horizontalmente um bloco de peso uniforme  $W$  (Figura a) que está em repouso sobre uma superfície horizontal rugosa que seja *não rígida ou deformável*;
- A parte superior do bloco, porém, pode ser considerada rígida;
- Conforme o diagrama de corpo livre do bloco (Figura b), o piso exerce uma *distribuição* desuniforme da *força normal*  $\Delta N_n$  e da *força de atrito*  $\Delta F_n$  ao longo da superfície de contato.



## 5.1. CARACTERÍSTICAS DO ATRITO SECO

### Teoria do atrito seco:

- Para o equilíbrio, as forças normais devem atuar *para cima* para equilibrar o peso do bloco  $W$ , e as forças de atrito atuam para a esquerda, para impedir que a força aplicada  $P$  mova o bloco para a direita;
- Um exame detalhado das superfícies em contato entre o piso e o bloco revela como se desenvolvem essas forças de atrito e normal (Figura c);
- Pode-se ver que existem muitas irregularidades microscópicas entre as duas superfícies e, como resultado, as forças reativas  $\Delta R_n$  são desenvolvidas em cada ponto de contato;
- Conforme mostrado, cada força reativa contribui com ambas as componentes, a de atrito,  $\Delta F_n$ , e a normal,  $\Delta N_n$ .

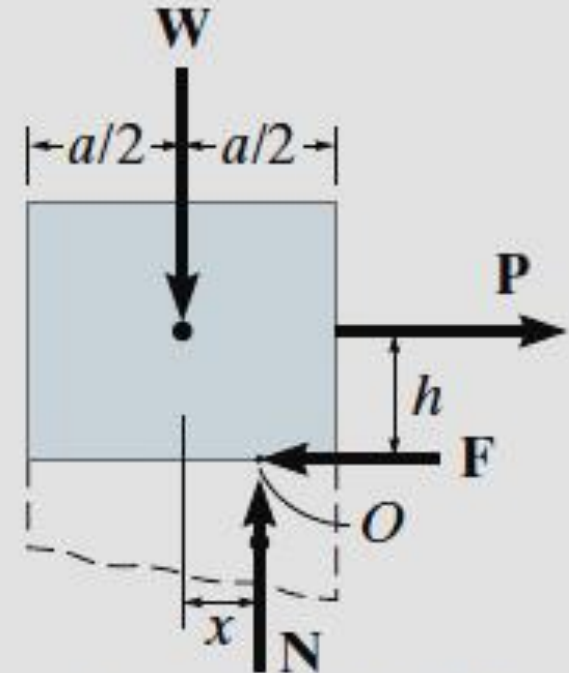


(c)

## 5.1. CARACTERÍSTICAS DO ATRITO SECO

### Equilíbrio:

- O efeito das cargas normais e de atrito *distribuídas* é indicado por suas *resultantes*  $N$  e  $F$  no diagrama de corpo livre (Figura d);
- Observe que  $N$  atua a uma distância  $x$  à direita da linha de ação de  $W$  ;
- Essa posição, que coincide com o centroide ou centro geométrico da distribuição de força normal, é necessária a fim de equilibrar o “efeito de tombamento” causado por  $P$ .
- Por exemplo, se  $P$  for aplicada a uma altura  $h$  da superfície, então o equilíbrio do momento em relação ao ponto  $O$  é satisfeito se  $Wx = Ph$  ou  $x = Ph/W$ .



Forças resultantes  
normal e de atrito

(d)

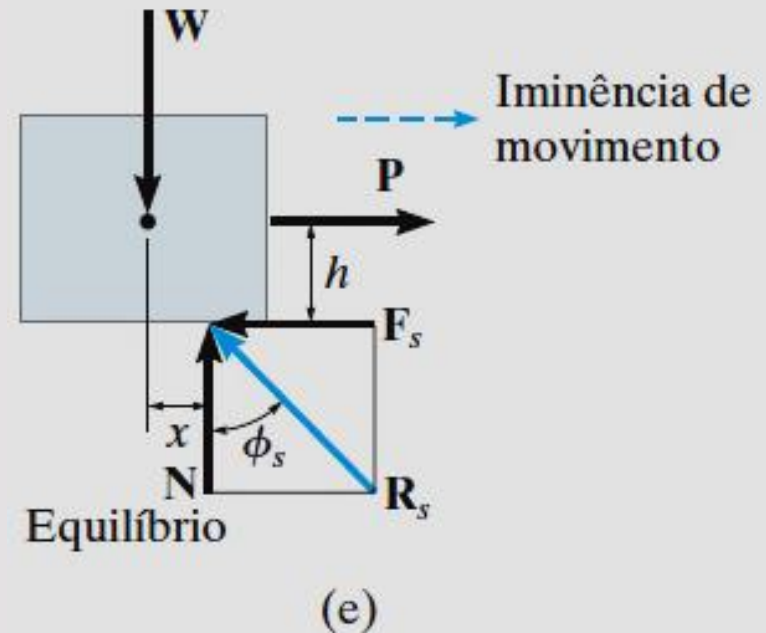
## 5.1. CARACTERÍSTICAS DO ATRITO SECO

### Iminência de movimento:

- Quando as superfícies de contato são muito “escorregadias”, a força de atrito  $F$  pode não ser grande o suficiente para equilibrar  $P$ , e conseqüentemente o bloco tenderá a deslizar;
- Ou seja, à medida que  $P$  aumenta lentamente,  $F$  aumenta de forma correspondente até que alcance um certo valor máximo  $F_s$ , chamado de **força de atrito estática limite**;
- Quando esse valor é atingido, o bloco está em equilíbrio instável, pois qualquer aumento adicional em  $P$  fará com que o bloco se mova;
- Determinou-se experimentalmente que essa força de atrito estática limite  $F_s$  é diretamente proporcional à força normal resultante  $N$ .

$$F_s = \mu_s N$$

- Onde  $\mu_s$  é o coeficiente de atrito estático.

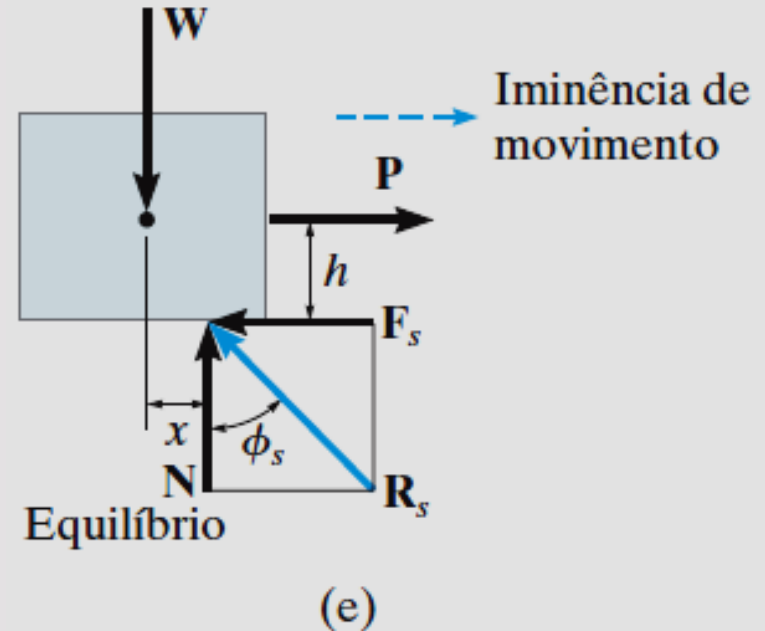


## 5.1. CARACTERÍSTICAS DO ATRITO SECO

### Iminência de movimento:

- Assim, quando o bloco está *no limiar* de deslizamento, a força normal  $N$  e a força de atrito  $F_s$  se combinam para criar uma resultante  $R_s$  (Figura e);
- O ângulo  $\phi_s$  que  $R_s$  faz com  $N$  é chamado de **ângulo de atrito estático**. Da figura,

$$\phi_s = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{F_s}{N}\right) = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\mu_s N}{N}\right) = \operatorname{tg}^{-1} \mu_s$$



**TABELA 8.1** Valores típicos para  $\mu_s$

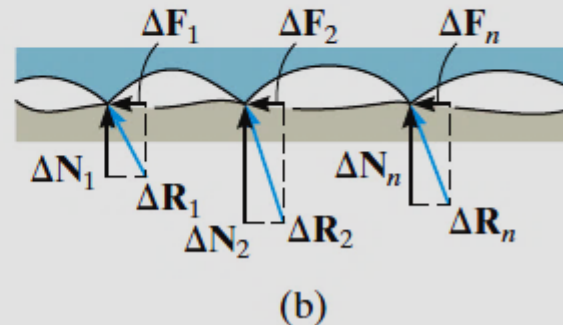
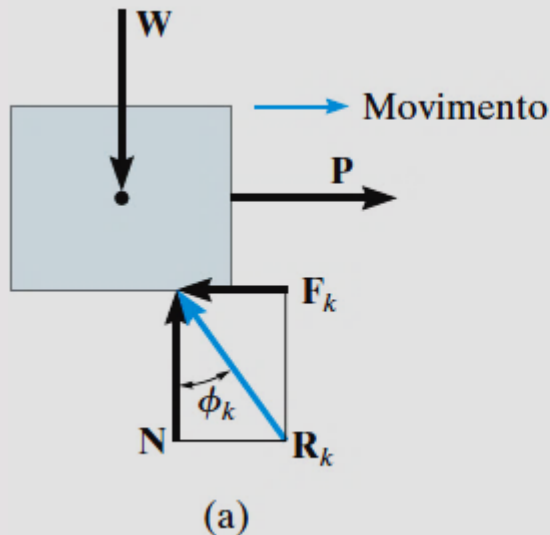
Materiais em contato	Coefficiente de atrito estático ( $\mu_s$ )
Metal com gelo	0,03–0,05
Madeira com madeira	0,30–0,70
Couro com madeira	0,20–0,50
Couro com metal	0,30–0,60
Cobre com cobre	0,74–1,21



## 5.1. CARACTERÍSTICAS DO ATRITO SECO

### Movimento:

- Se a intensidade de  $P$  que atua sobre o bloco for aumentada de modo que se torne ligeiramente maior que  $F_s$ , a força de atrito na superfície de contato cairá para um valor menor  $F_k$ , chamado *força de atrito cinética*;
- O bloco começará a deslizar com velocidade crescente (Figura a);
- Quando isso ocorre, o bloco “passará” sobre o topo desses picos nos pontos de contato (Figura b);
- A avaria continuada da superfície é o mecanismo dominante de criação do atrito cinético.



## 5.1. CARACTERÍSTICAS DO ATRITO SECO

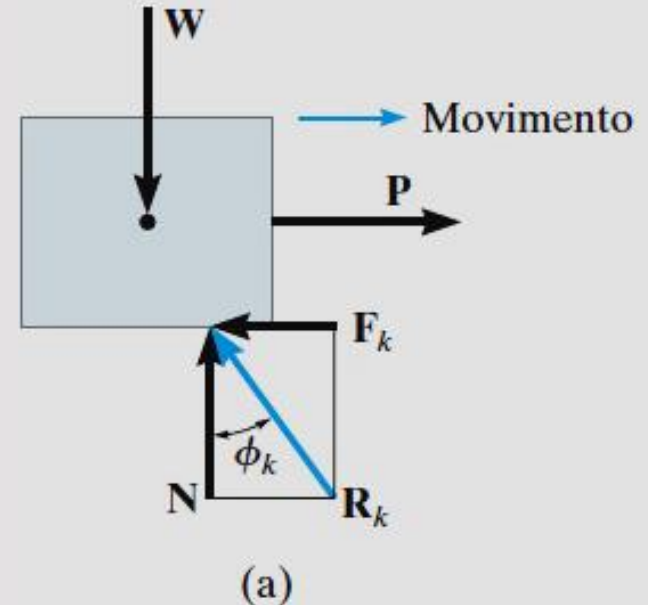
### Movimento:

- Experimentos com blocos deslizantes indicam que a intensidade da força de atrito cinético é diretamente proporcional à intensidade da força normal resultante, o que é expresso matematicamente como:

$$F_k = \mu_k N$$

- Aqui, a constante de proporcionalidade,  $\mu_k$ , é chamada de **coeficiente de atrito cinético**;
- Os valores típicos para  $\mu_k$  são, aproximadamente, 25% menores do que os listados na tabela anterior para  $\mu_s$ ;
- Conforme mostrado na Figura a, neste caso, a força resultante na superfície de contato,  $R_k$ , tem uma linha de ação definida por  $\phi_k$ . Esse ângulo é conhecido como **ângulo de atrito cinético**, em que

$$\phi_k = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{F_k}{N}\right) = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\mu_k N}{N}\right) = \operatorname{tg}^{-1} \mu_k$$



## 5.1. CARACTERÍSTICAS DO ATRITO SECO

### Movimento:

- O ângulo de atrito estático é:

$$\phi_s = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{F_s}{N}\right) = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\mu_s N}{N}\right) = \operatorname{tg}^{-1} \mu_s$$

- O ângulo de atrito cinético é:

$$\phi_k = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{F_k}{N}\right) = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\mu_k N}{N}\right) = \operatorname{tg}^{-1} \mu_k$$

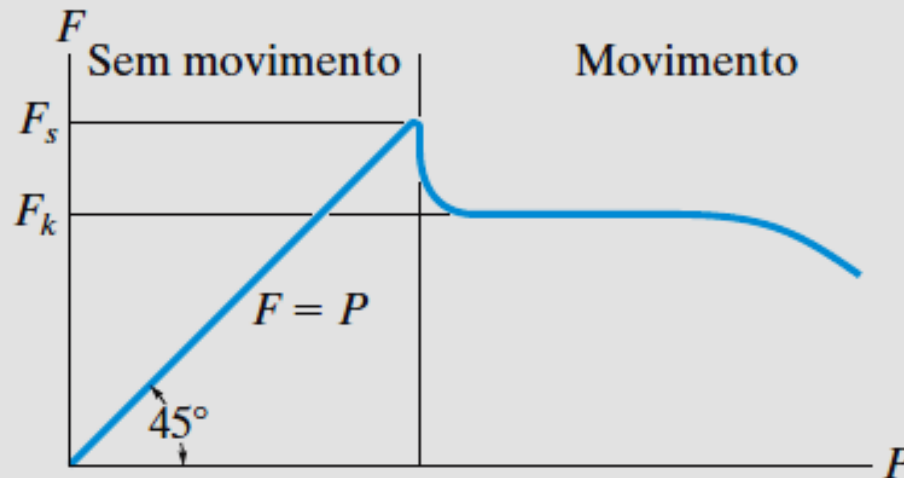
- Por comparação, temos:

$$\phi_s \geq \phi_k$$

## 5.1. CARACTERÍSTICAS DO ATRITO SECO

### Movimento:

- A força de atrito é categorizada em três maneiras diferentes:
- ❖  $F$  é uma força de atrito estática se o equilíbrio for mantido.
- ❖  $F$  é uma força de atrito estática limite  $F_s$  quando atinge um valor máximo necessário para manter o equilíbrio;
- ❖  $F$  é chamada de força de atrito cinética  $F_k$  quando ocorre deslizamento na superfície em contato.
- Observe também, pelo gráfico, que para valores muito grandes de  $P$  ou para velocidades altas, os efeitos aerodinâmicos farão com que  $F_k$  e, de modo semelhante,  $\mu_k$ , comecem a diminuir.



## 5.1. CARACTERÍSTICAS DO ATRITO SECO

### Características do atrito seco:

- A força de atrito atua na direção tangente às superfícies de contato e em sentido oposto ao movimento ou à tendência de movimento de uma superfície em relação a outra;
- A força de atrito estática máxima  $F_s$  que pode ser desenvolvida é independente da área de contato, desde que a pressão normal não seja muito baixa nem grande o suficiente para deformar ou esmagar seriamente as superfícies de contato dos corpos;
- A força de atrito estática máxima geralmente é maior que a força de atrito cinética para quaisquer duas superfícies em contato. Porém, se um dos corpos estiver se movendo com uma velocidade muito baixa sobre a superfície de outro,  $F_k$  torna-se, aproximadamente, igual a  $F_s$ , ou seja,  $\mu_s \approx \mu_k$ ;
- Quando o deslizamento na superfície de contato estiver para ocorrer, a força de atrito estática máxima é proporcional à força normal, de modo que  $F_s = \mu_s N$ ;
- Quando o deslizamento na superfície de contato estiver ocorrendo, a força de atrito cinética é proporcional à força normal, de modo que  $F_k = \mu_k N$ .

**ATÉ A PRÓXIMA!**