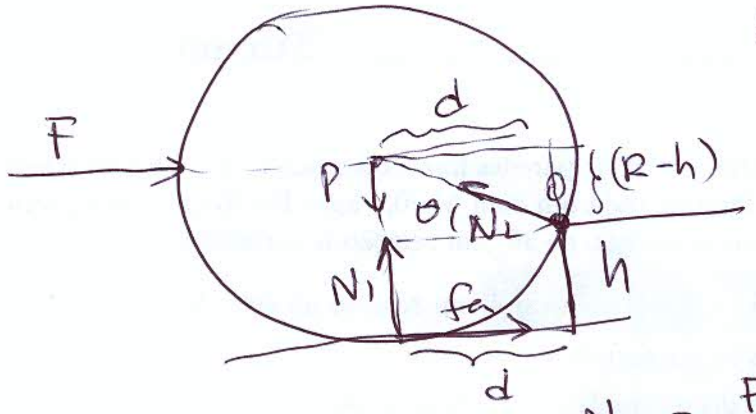
Roda subindo degrau



$$\boxed{\operatorname{tg}\theta = \frac{R-h}{d}}$$

$$\begin{cases} F + f_a = N_2 \cos\theta \Rightarrow N_2 = \dfrac{F+f_a}{\cos\theta} \\ N_1 + N_2 \operatorname{sen}\theta = mg \Rightarrow N_1 = mg - N_2 \operatorname{sen}\theta \end{cases}$$

$$\Downarrow$$

$$\boxed{N_1 = mg - (F+f_a)\operatorname{tg}\theta}$$

Note que esta relação só é válida se $mg > (F+f_a)\operatorname{tg}\theta$. Caso contrário, $N_1 = 0$ (nunca negativo!)

Torque em relação a O no equilíbrio:

$$F(R-h) + N_1 \cdot d = mgd + f_a \cdot h$$

$$F(R-h) + \cancel{mgd} - (F+f_a)\cdot \underbrace{d\operatorname{tg}\theta}_{R-h} = \cancel{mgd} + f_a \cdot h$$

$$\cancel{F(R-h)} - \cancel{F(R-h)} - f_a R + \cancel{f_a h} = \cancel{f_a h}$$

$$f_a \cdot R = 0 \Rightarrow \boxed{f_a = 0} \Rightarrow \boxed{N_2 = \frac{F}{\cos\theta}}$$

$$\boxed{N_1 = mg - F\operatorname{tg}\theta}$$

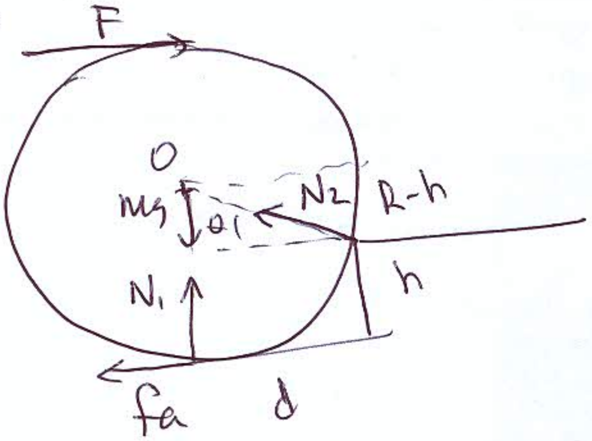
e o equilíbrio ocorre sempre que $N_1 > 0$, ou seja, se $\boxed{F\operatorname{tg}\theta < mg}$

$\Rightarrow$ F_{min} p/ subir: $F_{min} = \dfrac{mg}{\operatorname{tg}\theta} = mg / \left(\dfrac{R-h}{d}\right)$

$d = \sqrt{2Rh - h^2}$

Note que escolhendo-se o centro da roda para o cálculo do torque, vê-se que a única força que produz torque em relação a esse ponto é a força de atrito e portanto $fa=0$ sai imediatamente.

Agora, para F aplicada na extremidade da roda:



$\cos\theta = \frac{d}{R}$ $\quad tg\theta = \frac{R-h}{d}$

$sen\theta = \frac{R-h}{R}$

$d = \sqrt{2Rh-h^2}$

(não sabemos a direção de fa!)

$F = fa + N_2 \cos\theta$ (1)

$N_1 + N_2 \, sen\theta = mg$

τ (em relação ao centro da roda):

$F.R + fa.R = 0$ (fa e F produzem torque na mesma direção!!)

$\Rightarrow \boxed{fa = -F}$ → valor negativo p/ fa ⇒ sua direção é a oposta à escolhida.

de (1): $F + F = N_2 \cos\theta \Rightarrow N_2 = \frac{2F}{\cos\theta} = \frac{2FR}{d}$

$N_1 = mg - \frac{2FR \, \cancel{sen\theta}}{d} \; mg - \frac{2FR}{d} \cdot \frac{R-h}{R} = \boxed{mg - 2F\frac{R-h}{\sqrt{2Rh-h^2}}}$

Note que há um valor máximo de F à partir do qual a roda começa a patinar. Como

$$f_a = F \quad e \quad f_a^{max} = \mu_e N_1$$

$$F_{max} = \mu_e N_1$$

$$\frac{F_{max}}{\mu_e} = N_1 = mg - F_{max} \cdot \frac{2(R-h)}{\sqrt{2Rh-h^2}}$$

$$F_{max}\left(\frac{1}{\mu_e} - \frac{2(R-h)}{\sqrt{2Rh-h^2}}\right) = mg$$

$$\Rightarrow \boxed{F_{max} = \frac{mg}{\left(\frac{1}{\mu_e} - \frac{2(R-h)}{\sqrt{2Rh-h^2}}\right)}}$$

Nota Ao fazermos N_2 na direção radial, estamos considerando que não há atrito entre a roda e a quina do degrau.