

Universidade Federal de Santa Maria
Coordenadoria Acadêmica
Cachoeira do Sul

Sistema de Freios Anti-Bloqueio - ABS



Cachoeira do Sul, RS, Brasil
2021

Sumário

1 Sistema de Freios Anti-Bloqueio - ABS	p. 3
1.1 Introdução	p. 3
1.1.1 Benefícios importantes do uso dos freios <i>ABS</i>	p. 3
1.2 Força de Atrito	p. 4
1.2.1 Força de Atrito Estático (μ_e) - Distância de Frenagem	p. 8
1.2.2 Força de Atrito Cinético (μ_c) - Distância de Frenagem	p. 10
1.2.3 Aumento da força normal nas rodas dianteiras	p. 11
1.3 Observação	p. 13
1.4 Referencias	p. 14

1 Sistema de Freios Anti-Bloqueio - ABS

1.1 Introdução

Os freios - Antilock Braking System- *ABS* são um sistema de controle que modula a pressão dos freios em resposta à desaceleração das rodas, mantendo o controle, evitando o bloqueio das mesmas e a perda de dirigibilidade do veículo. Este sistema é composto pelas seguintes partes:

1. **Sensores das rodas:** são componentes eletromagnéticos que fornecem um sinal digital com frequência proporcional à velocidade de cada roda;
2. **Unidade de controle eletrônico (*UCE*):** dispositivo eletrônico responsável pelos cálculos (velocidades das rodas, do veículo, torque, etc...) gerando os sinais de controle;
3. **Modulador de pressão de freio:** dispositivo eletro-hidráulico ou eletro-pneumático para reduzir ou manter a pressão nos freios, independente do esforço feito no pedal pelo motorista. Para freios eletromagnéticos, o modulador de pressão de freio não é necessário. Diferente dos freios de fricção, que possuem uma atuação mecânica, os freios eletromagnéticos podem ser controlados por corrente elétrica, proporcionando um maior controle do torque sobre os freios;
4. **Fios, relés, tubos hidráulicos e conectores** completam a instalação.

1.1.1 Benefícios importantes do uso dos freios *ABS*

- **Distância de parada:** o sistema ABS permite o emprego de uma força máxima sobre os freios sem o bloqueio das rodas, resultando em uma distância de parada

menor em relação aos freios que bloqueiam as rodas. A distância de parada vai depender dos coeficientes de atrito estático μ_e e cinético μ_c envolvendo o pneu e a pista. No entanto, o principal objetivo do sistema antibloqueio é a necessidade de estabilidade para a dirigibilidade do veículo.

- **Estabilidade:** pensando em situações onde temos, por exemplo: asfalto com e sem gelo. O sistema de frenagem comum acionado sobre essas superfícies emprega força de atrito maior nas rodas que estão no asfalto do que as rodas que estão sobre o gelo. Isto, levará a derrapagens e guinadas resultando na instabilidade do veículo. O sistema antibloqueio mantém as rodas rodando independentemente da superfície onde estão, minimizando a instabilidade do veículo.
- **Dirigibilidade:** é a principal característica do sistema de freios ABS. Como as rodas não deslizam sobre as superfícies, isto é, elas se mantêm em rotação durante o acionamento dos freios independente da intensidade da força aplicada sobre o pedal do freio, possibilitando que o motorista tenha controle sobre o veículo durante a frenagem. [01]

1.2 Força de Atrito

Quando falamos em força de atrito (F_{at}), fisicamente, nos remete a aplicação da segunda lei de Newton, empregada a exemplos simples de mecânica, tais como: puxar, empurrar blocos, planos inclinados, etc... Contudo, a aplicação deste conceito é vital para o nosso dia a dia, permitindo que as pessoas se movam, que os parafusos e lâmpadas não se desenrosquem, possibilitando a existência de toda a tecnologia mecânica. Uma destas tecnologias onde a força de atrito tem um papel importante é o sistema de freios *ABS*. [02-04]

Para uma discussão mais detalhada sobre o funcionamento dos freios *ABS* devemos compreender inicialmente como funciona a interação entre os pneus e a pista onde o veículo se move. Essa interação se dá por atrito, uma interação eletromagnética entre os átomos ou moléculas em contato. Considerando o movimento dos pneus, observamos a existência de dois tipos de movimentos distintos acontecendo, um de translação e outro de rotação. Pensando os movimentos em termos de atrito, o coeficiente de atrito (μ) terá, então, dependência tanto com o módulo da velocidade do centro de massa (v_{cm}) do veículo em

relação ao referencial fixo na pista quanto da velocidade angular (ω) relacionada à rotação dos pneus, assim sendo definido como $\mu(v_{cm}, \omega)$.

Considerando o caso de rolamento sem deslizamento, figura 1, adotando um referencial inercial para o qual a superfície em que a roda gira está em repouso, o ponto da roda em contato com a superfície está instantaneamente parado em relação ao referencial adotado, de modo que não escorrega. Portanto, a velocidade do ponto de contato (velocidade instantânea v_{inst} / tangencial v_t) em relação a um referencial fixo no centro de massa deve ser igual em módulo e com sentido contrário à velocidade v_{cm} . Sendo R o raio da roda e ω a velocidade angular, então o módulo da velocidade instantânea / tangencial no ponto é igual a [05]:

$$v_{cm} = R\omega \quad (1.1)$$

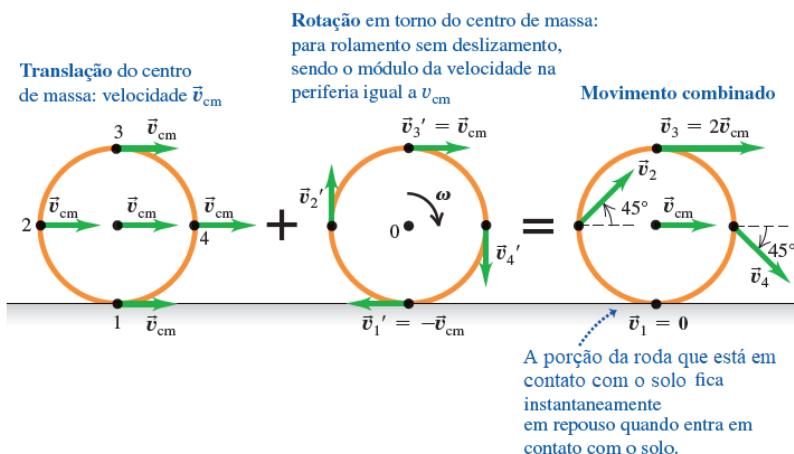


Figura 1: Soma do movimento de translação do centro de massa com o movimento de rotação da roda em torno do centro de massa [05].

Como mostra a figura 01, a velocidade em qualquer ponto sobre roda é a soma vetorial da velocidade do centro de massa com a velocidade do ponto em questão ao centro de massa. Portanto, quando o ponto 1 está em contato com a pista a roda está instantaneamente em repouso, o ponto 3 no topo da roda se desloca com o dobro da velocidade do centro de massa, e os pontos 2 e 4 nos lados da roda possuem velocidades formando um ângulo de 45º com a horizontal[05].

Durante o processo de frenagem, se a velocidade tangencial (v_t) for menor que a

velocidade angular (ω) teremos escorregamento / deslizamento, logo, o pneu passa do atrito estático (μ_e) para o atrito cinético (μ_c). Com isso podemos afirmar que o coeficiente de atrito $\mu(v_{cm}, \omega)$ tem dependência com o coeficiente de deslizamento s , dado por [03]:

$$s = \frac{v_t - v_{cm}}{v_t} \quad 0 \leq s \leq 1 \quad (1.2)$$

sendo agora, $v_{cm} = \omega R$, a velocidade da roda inteira.

A equação 1.2 mostra que o coeficiente de deslizamento s é máximo ($s = 1$) quando $v_t = 0$, (rodas travadas - temos deslizamento), e mínimo ($s = 0$) quando $v_t = v_{cm}$, (rodas rolando sem deslizar). Portanto, o coeficiente de atrito, agora, designado por μ_s , em função do coeficiente de deslizamento, atinge seu valor máximo para $s = 0$, (rodas rolam sem deslizar), e seu valor mínimo para $s = 1$ (rodas totalmente travadas).

Fazendo uma análise mais detalhada sobre a frenagem de veículos que utilizam sistema de freios *ABS*, considerando uma situação idealizada, onde temos um movimento unidimensional e a massa do veículo é distribuída uniformemente sobre os quatro pneus, a força normal \vec{N} será a mesma em todos os pneus. Aplicando a segunda lei de Newton ao movimento de translação, temos:

$$-n\vec{F}_{at} = M\vec{a} \quad (1.3)$$

onde n é o número de rodas, M massa total, \vec{a} a aceleração do centro de massa e \vec{F}_{at} é a força de atrito.

Aplicando a segunda lei de Newton para dinâmica de rotação de corpos rígidos:

$$\sum \tau_{ext} = I\alpha \quad (1.4)$$

onde $\sum \tau_{ext}$ é o módulo do torque externo, I é o momento de inércia e α é o módulo da aceleração angular.

Quando o motorista pisa no freio surge um torque de frenagem τ_F devido ao sistema de freios e um torque devido a \vec{F}_{at} entre os pneus e a estrada. Logo:

$$I\alpha = -\tau_F + \tau_{at} \quad \rightarrow \quad I\alpha = -\tau_F + RF_{at} \quad (1.5)$$

onde I é o momento de inércia da roda, α é a aceleração angular, R o raio total contendo aro e pneu), τ_F módulo do torque de frenagem e F_{at} módulo da força de atrito do pneu

com a estrada.

As equações 1.3 e 1.5 fornecem a descrição completa do movimento do veículo, basta fazer uma aproximação para F_{at} : estática ou cinética.

Força de atrito estático e cinético

Quando um corpo está deslizando sobre uma superfície, devido a ação de uma força externa aplicada paralela a superfície do movimento, temos a força de atrito cinético (f_c) agindo sobre este corpo, na mesma direção, mas em sentido contrário a força aplicada. Definido como,

$$f_c = \mu_c N \quad (1.6)$$

onde μ_c é o coeficiente de atrito cinético e N é a força normal. No entanto, quando esta força é aplicada sobre um corpo e este não se move, temos a ação da força de atrito estático (f_e) agindo sobre o corpo, também na mesma direção e sentido contrário a força aplicada. Definida como,

$$f_e = \mu_e N \quad (1.7)$$

onde μ_e é o coeficiente de atrito estático.

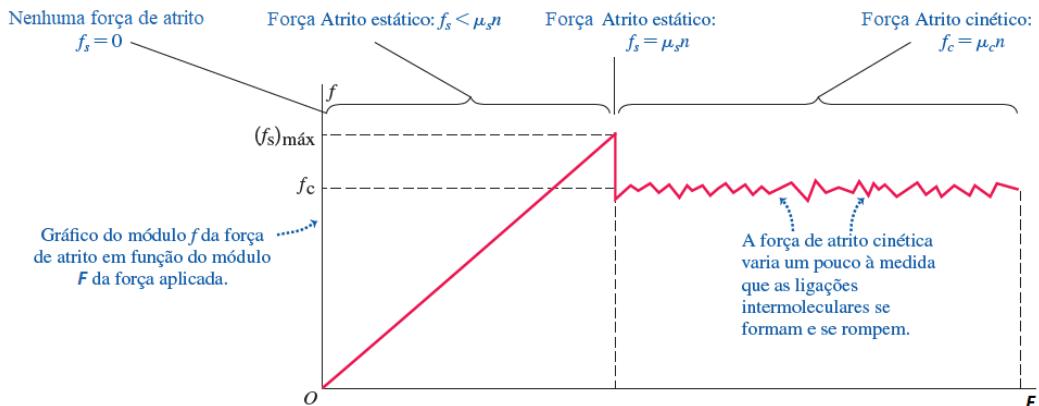


Figura 2: Diagrama das forças de atrito versus força \vec{F} aplicada [05].

Considerando um corpo em repouso, em relação ao referencial adotado, a força peso (\vec{P}) igual a força normal (\vec{N}). Se aplicarmos uma força (\vec{F}), sobre corpo em equilíbrio, na horizontal, e aumentarmos gradualmente esta força, o corpo permanecerá em repouso até que atinja a força \vec{F} seja igual ao módulo da força de atrito estático ($\vec{F} = \vec{f}_e$) conforme podemos observar na figura 02. Então a força \vec{F} quebra as ligações moleculares e o corpo começa a deslizar sobre a superfície. A partir deste ponto, temos a ação da força de atrito

cinético agindo sobre o corpo. A figura 02 mostra o diagrama das forças de atrito em relação a força \vec{F} aplicada. Vemos que, a força de atrito estático cresce linearmente em relação à força \vec{F} aplicada, até atingir a eminência de entrar em movimento. Após iniciado o movimento a força de atrito normalmente diminui, passando assim, para o atrito cinético, que permanece praticamente constante durante o movimento. Isto está relacionado aos coeficiente de atrito estático e cinético, o coeficiente de atrito estático normalmente é maior que o coeficiente de atrito cinético para um dado par de superfícies.

1.2.1 Força de Atrito Estático (μ_e) - Distância de Frenagem

Quando a combinação dos movimentos de rotação e translação como um todo não apresenta deslizamento dos pneus em relação a estrada o tipo de atrito é o estático[02-05].

Para determinarmos a distância que o veículo percorre durante a frenagem, isto é, do momento que os freios são acionados até parada total, devemos primeiramente encontrar a aceleração \vec{a} do veículo. Para isso vamos substituir a equação 1.1 e a força de atrito, encontrada através da equação 1.3, na equação 1.5:

$$a = -\frac{R}{I}\tau_F - \frac{R^2 Ma}{In} \quad (1.8)$$

Definindo algumas grandezas adimensionais,

$$\begin{aligned} \tau_r &= \frac{\tau_F R}{Ig} \\ \nu &= \frac{R^2 M}{In} \end{aligned} \quad (1.9)$$

sendo τ_r o torque reduzido e ν o momento de inércia reduzido. Observando as equações 1.9, vemos que: τ_r é diretamente proporcional a τ_F , logo, está relacionado ao torque feito pelo sistema de freio sobre as rodas, já ν é diretamente proporcional a massa total M do veículo.

Substituindo as equações 1.9 na equação 1.8, encontramos a aceleração do veículo em função de τ_r e ν :

$$a = -g \frac{\tau_r}{(1 + \nu)} \quad (1.10)$$

Para a aceleração angular, dada por $a = \alpha R$, temos:

$$\alpha = -\frac{g}{R} \frac{\tau_r}{(1 + \nu)} \quad (1.11)$$

E para encontrar o módulo da força de atrito F_{at} , substituímos a equação 1.10 na equação 1.3,

$$F_{at} = -\frac{\tau_F}{R} \frac{\nu}{(1 + \nu)} \quad (1.12)$$

A equação 1.10 mostra que a aceleração é diretamente proporcional ao torque reduzido e está relacionado ao torque de frenagem, isto é, depende da força que o motorista aplica sobre o freio. Se essa força for constante a aceleração (\vec{a}) também será. Assim podemos utilizar as equações do *MRUV* para encontrar a distância percorrida pelo veículo durante a frenagem. Aplicando a equação de Torricceli, encontramos:

$$d = \frac{v_0^2}{2|a|} \quad (1.13)$$

Substituindo a equação 1.10 na equação 1.13, chegamos,

$$d = \frac{v_0^2}{2g} \left(\frac{1 + \nu}{\tau_r} \right) \quad (1.14)$$

Para descrevermos a equação 1.14 em termo do coeficiente de atrito estático precisaremos encontrar o torque restaurador máximo, isto é, o torque na eminência de ocorrer o deslizamento dos pneus em relação a estrada, saindo do regime estático e ingressando no regime dinâmico. Sabemos que $F_{at} = \mu_e N$, onde a força normal é $N = Mg$ e é igualmente distribuída sobre as quatro rodas. A força normal considerando apenas uma das rodas é dada por $N_1 = \frac{Mg}{n}$. Então, o módulo da força de atrito estático para cada roda é

$$F_{at} \leq \mu_e \frac{Mg}{n} \quad (1.15)$$

Substituindo a equação (1.10) na equação (1.3) e comparando com a equação (1.15)

encontramos,

$$\mu_e \geq \frac{\tau_r}{1 + \nu} \quad (1.16)$$

Explicitando τ_r na equação anterior,

$$\tau_r = \mu_e(1 + \nu) \quad (1.17)$$

Substituindo este resultado na equação (1.14), encontramos a distância de frenagem quando temos atrito estático:

$$d_e = \frac{1}{\mu_e} \frac{v_0^2}{2g} \quad (1.18)$$

Quanto maior for o coeficiente de atrito estático (μ_e), menor será a distância percorrida (d_e).

1.2.2 Força de Atrito Cinético (μ_c) - Distância de Frenagem

Quando temos deslizamento entre os pneus e a estrada em questão, dizemos que o sistema está sob a ação de uma força de atrito cinético (F_c). Se $\tau_r > \tau_{cr}$, onde τ_{cr} é o torque crítico (quando as rodas estão na eminência de deslizar) e o módulo de $|a|$ é menor que αR , ocorre o travamento das rodas ocasionando o deslizamento dos pneus sobre a estrada antes do veículo parar por completo. Quando isto acontece, observa-se a diminuição na intensidade da força de atrito, permanecendo constante durante o restante do movimento [02-05]. O módulo da força de atrito cinético para o veículo é dada por:

$$F_{at} = \mu_c \frac{Mg}{n} \quad (1.19)$$

O módulo da aceleração do veículo e a aceleração angular das rodas é

$$a = -\mu_c g \quad (1.20)$$

Substituindo equação (1.20) na equação (1.13), encontramos a distância de frenagem para um sistema cinético, dado por:

$$d_c = \frac{1}{\mu_c} \frac{v_0^2}{2g} \quad (1.21)$$

Comparando as equações da distância de frenagem entre o sistema estático e o cinético, vemos que as equações são idênticas. Ambas são inversamente proporcionais aos coeficientes de atrito, a primeira ao μ_e e a segunda μ_c . Como na eminência de deslizamento o coeficiente estático é maior que o cinético, a distância de frenagem para o sistema estático é menor que para o sistema cinético.

1.2.3 Aumento da força normal nas rodas dianteiras

Até agora a discussão está baseada em uma distribuição contínua da massa (uniforme) do veículo sobre as quatro rodas, logo, a força normal sobre as rodas são iguais. Considerando casos mais reais de frenagens, onde o veículo se propaga no sentido positivo - esquerda para a direita - em relação ao referencial fixo na estrada é necessário levar em conta o aumento da força normal nas rodas dianteiras devido a existência de um torque inercial em torno do centro de massa do veículo.

Durante a desaceleração, as forças de atrito nas rodas dianteiras e traseiras produzem um torque no sentido horário no veículo em torno do centro de massa. Esse torque é equilibrado por um outro torque provocado pelo aumento da força normal nas rodas dianteiras e uma diminuição na força normal nas rodas traseiras. Aplicando a segunda lei de Newton para dinâmica de rotações sobre rodas dianteiras e traseiras, encontramos [02,06],

$$I_D\alpha_D = -\tau_D + R_D F_D \quad (1.22)$$

$$I_T\alpha_T = -\tau_T + R_T F_T \quad (1.23)$$

sendo F_D e F_T os módulos das forças de atrito para as rodas dianteiras e traseiras.

Durante o processo de frenagem, se supormos que o torque é igual sobre as quatro rodas, $\tau_D = \tau_T$, as forças de atrito também serão iguais, logo, as acelerações angulares também serão iguais $\alpha_D = \alpha_T$. Rearranjando as equações (1.22), (1.23) e aplicando a 2^a lei de Newton sobre o sistema, ($N_D + N_T = Mg$), e explicitando a força normal traseira (N_T),

$$N_T = \frac{Mg}{2(2 + \mu_e)} \quad (1.24)$$

A força de atrito estático máximo para as rodas traseiras,

$$F_T(\text{máx}) = \mu_e N_T = \frac{\mu_e}{2(2 + \mu_e)} Mg \quad (1.25)$$

sendo a força total $F_{at} = F_T + F_D$, dada por:

$$F_{total} = F_T + F_D = \frac{2\mu_e}{2 + \mu_e} Mg \quad (1.26)$$

Para encontrarmos a força atrito sobre cada roda basta dividir pelo número de pneus, assim,

$$F_{at} = \frac{2\mu_e}{2 + \mu_e} \frac{Mg}{n} \quad (1.27)$$

Substituindo a equação (1.26) na equação (1.3), podemos encontrar a aceleração do veículo,

$$a = \frac{-2\mu_e}{2 + \mu_e} g \quad (1.28)$$

Agora, então, podemos encontrar a distância percorrida, substituindo a equação (1.27) na equação (1.13),

$$d_{\text{mín}} = \frac{2 + \mu_e}{2\mu_e} \frac{v_0^2}{2g} \quad (1.29)$$

distância mínima para parar o veículo ($d_{\text{mín}}$), com as quatro rodas rolando, sem deslizamento e levando em conta o torque sobre o centro de massa.

Uma outra situação, levando em conta o deslocamento da força peso, devido ao deslocamento do centro de massa do veículo, quando as rodas traseiras travam por completo enquanto as dianteiras continuam em rotação. Neste caso, devemos levar em conta tanto o atrito estático como o cinético. As forças normais dos eixos traseiros e dianteiro ficam [02,06]:

$$N_D = \frac{2 + \mu_c}{4 + \mu_c - \mu_e} Mg \quad (1.30)$$

e

$$N_T = \frac{2 - \mu_c}{4 + \mu_c - \mu_e} Mg \quad (1.31)$$

Para calcularmos a distância mínima necessária para frenagem, devemos considerar o atrito estático das rodas dianteiras como valor máximo na eminência da roda travar.

Aplicando a 2^a lei de Newton,

$$Ma = \mu_e N_D + \mu_c N_T \quad (1.32)$$

Explicitando a aceleração "a" e substituindo os valores de N_D e N_T , encontramos:

$$a = \frac{2(\mu_c + \mu_e)}{4 + \mu_c - \mu_e} \quad (1.33)$$

A distância de frenagem,

$$d_{T_t} = \frac{4 + \mu_c - \mu_e}{2(\mu_c + \mu_e)} \frac{v_0^2}{2g} \quad (1.34)$$

A equação 1.34 mostra que não é trivial encontrar a distância de frenagem mínima, pois, esta depende tanto do coeficiente de atrito estático como do cinético. Esses, por sua vez, dependem das superfícies em contato e do ambiente onde se encontram (seco, umido, chuvoso).

1.3 Observação

O texto descrito acima é um compilado de artigos já publicados, para maiores informações sobre o assunto recomenda-se ler os artigos citados nas referências.

1.4 Referencias

- [01] Jitesh, S., **Antilock Braking System (ABS)**, Int. J. Mech. Eng. and Rob. Res., ISSN 2278 – 0149 (2014);
- [02] Abeid, L., Tort, A.C., **As forças de atrito e os freios ABS**, Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 36, n. 2, 2306 (2014);
- [03] Denny M., **The dynamics of antilock brake systems**, European Journal of Physics 26, 1007 (2005).
- [04] Tavares, J.M., **Dynamics of braking vehicles: from Coulomb friction to anti-lock braking systems**, European Journal of Physics 30, 697, doi:10.1088/0143-0807/30/4/004 (2009).
- [05] Young and Freedman, **Física 1**, 14 edição, Pearson Education, (2015);
- [06] Whitmire, D.P. and Alleman, T.J., **Effect of weight transfer on a vehicle's stopping distance** American Journal of Physics 47, 89, (1979).