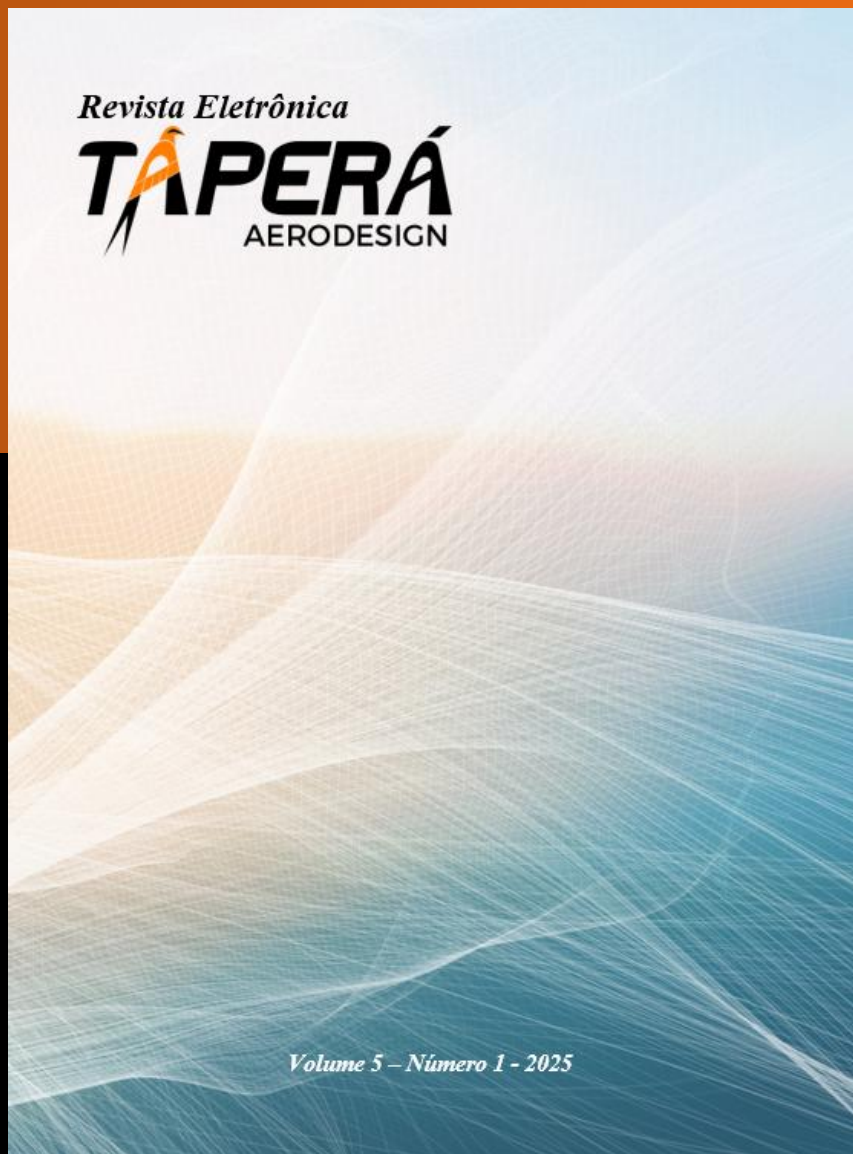







# Tensões Térmicas em Discos de Freio Automotivos: Estudo do Efeito da Variação de Temperatura em Componentes de Alta Rotação



**Matheus José Ferreira Borelli**  
**[borelli.matheus@aluno.ifsp.edu.br](mailto:borelli.matheus@aluno.ifsp.edu.br)**







# Introdução

-  O sistema de freios é essencial para a segurança veicular.
-  Converte energia cinética e potencial em calor por atrito.
-  O sistema de freios é essencial para a segurança veicular
-  Historicamente: freios a tambor dominaram devido a simplicidade e baixo custo.
-  Hoje: freios a disco encontram em ascensão por oferecer melhor desempenho, especialmente em condições severas.



# Introdução

-  Geração e dissipação de calor afetam todos os componentes:
  - Fluido de freio, Cilindros, Mancais, Selos.
-  Potência de frenagem:
  - Máxima no início da desaceleração
  - Reduz progressivamente até a parada
-  Temperaturas em frenagens severas (veículos comerciais): 300 °C a 400 °C no disco
-  Consequência crítica: fenômeno de fade que provoca perda de eficiência de frenagem



# Introdução

- ✈️ Materiais com alta condutividade térmica e calor específico, como fibra de carbono.
- ✈️ Otimização geométrica e uso de canais de ventilação nos discos





# Definições

- ✈ Segundo LIMPert, temos a seguinte equação para a energia de frenagem:

$$E_b = \frac{m}{2} \left( 1 + \frac{I}{R^2 m} \right) V_1^2 \approx \frac{kmV_1^2}{2}$$

- ✈ A partir de sua derivada ao tempo obtemos:

$$P_b = Kma(V_1 - at)$$

- ✈ Assim temos a potencia media, total e o fluxo de calor superficial:

$$P_{bav} = \frac{kmaV_1}{2}$$

$$P_{(0)} = 2P_{bav}$$

$$P''_{(0)} = \frac{P_{(0)}}{A_s}$$

- ✈ Para determinarmos a temperatura máxima da superfície do disco em uma única parada, sem considerarmos o resfriamento do ambiente, utilizaremos a seguinte equação:

$$T_{m\acute{a}x} - T_i = \frac{5}{18} \frac{1}{2} \frac{P''_{(0)} t_s^{1/2}}{(\rho ck)^{1/2}}$$

Onde:

- $t_s$  é o tempo de frenagem.
- $\rho$  é a massa especifica do material.
- $c$  é o calor especifico.
- $k$  é condutividade térmica do material.

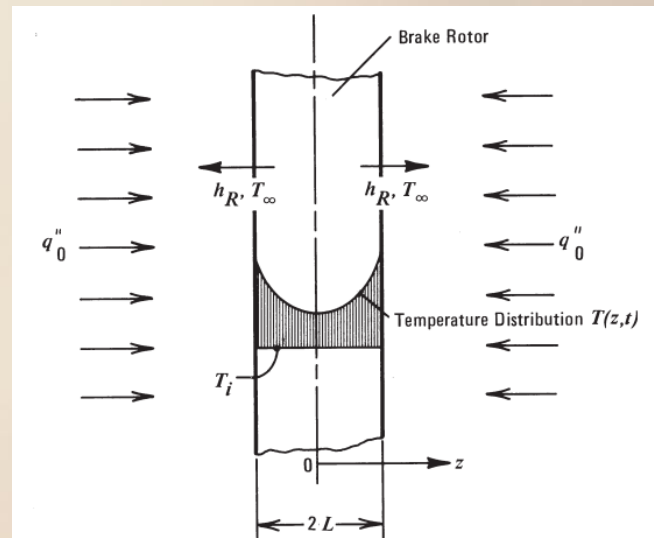


# Definições




LIMPert explica que para encontrar a fórmula da distribuição de calor ao longo do rotor para um fluxo de calor constante, é utilizado uma superposição  $\theta(z, t) = \Psi(z, t) + \Phi(z)$ , além de determinar suas condições iniciais. Por fim, obtemos a seguinte equação a qual representa o efeito físico da imagem abaixo:

$$\theta_0(z, t) = \left( \frac{q''_0}{h_r} \right) \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{\theta_i h_r}{q''_0} - 1 \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\lambda_n L)}{\lambda_n L + \sin(\lambda_n L) \cos(\lambda_n L)} \times e^{-a_t t \lambda_n^2} \cos(\lambda_n z) + 1 \right]$$






# Definições

 Abaixo temos a equação da tensão de compressão pelo aumento de temperatura:

$$\sigma = - \left( \frac{E}{1-\nu} \right) \alpha_T \Delta T$$

 Sendo ela utilizada para determinar a equação da tensão para um fluxo de calor constante e para um fluxo de calor decrescente ao tempo:

$$\sigma(z, t) = \frac{2a_T E q''_0}{(1-\nu)h_r} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sin(\lambda_n L) e^{-a_t \cdot t \cdot \lambda_1^2}}{\lambda_n L + \sin(\lambda_n L) \cos(\lambda_n L)} \times \left( \frac{\sin(\lambda_n L)}{\lambda_n L} - \cos(\lambda_n z) \right) \right\}$$

$$\sigma(z, t) = \frac{q''_{(0)}}{q''_0} \sigma_0(z, t) + \frac{2 \cdot q''_{(0)} \cdot a_T \cdot E}{t_s (1-\nu) h_r} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\alpha_1)}{\lambda_1 L + \sin(\alpha_1) \cos(\alpha_1)} \times \frac{1 - e^{-a_t \cdot \lambda_1^2 \cdot t}}{a_t \cdot \lambda_1^2} \cdot \left( \frac{\sin(\alpha_1)}{\lambda_1 L} - \cos \left( \lambda_1 z \cdot \frac{180}{\pi} \right) \right)$$





# Objetivo



Para definição do estudo, foi considerada uma situação de parada única, onde o veículo escolhido foi um Volkswagen Gol GL 1.8, pesando 950kg, o qual possui dois passageiros de 70kg e 10kg de bagagem. Sendo a desaceleração do veículo de 0.4g a uma velocidade 100 km/h (27.7 m/s), com porcentagem de frenagem de 75% nos freios dianteiros, fator de massa rotativa  $k = 1$ , distribuição de calor sobre os rotores de 0.90, e um deslizamento de 10% do pneu, e temperatura inicial nos freios de 333.15 K (60°C) e temperatura ambiente de 298.15 K (25°C).

Foi escolhido o modelo de freio a disco da *Brembo*, por ser similar e compatível com os freios a disco de carros como o Volkswagen Gol I, Gol II, Passat entre outros carros.

O material do rotor escolhido foi o **Ferro Fundido Cinzento ASTM A48 Classe 40**.





# Resultados



Ao calcular o aumento da temperatura para um fluxo de calor constante, obtemos os seguintes valores considerando  $z_1 = L$ ,  $z_0 = 0$  e  $t_s = 7,079$ .

$$\begin{aligned}\theta_0(z_1, t_s) &= T_0 - T_i = 237.68 \text{ K} \\ \theta_0(z_0, t_s) &= T_0 - T_i = 49.09 \text{ K}\end{aligned}$$



Ao calcular a tensão para um fluxo de calor constante, obtemos o seguinte valor considerando  $z_1 = L$  e  $t_s = 7,079$ .

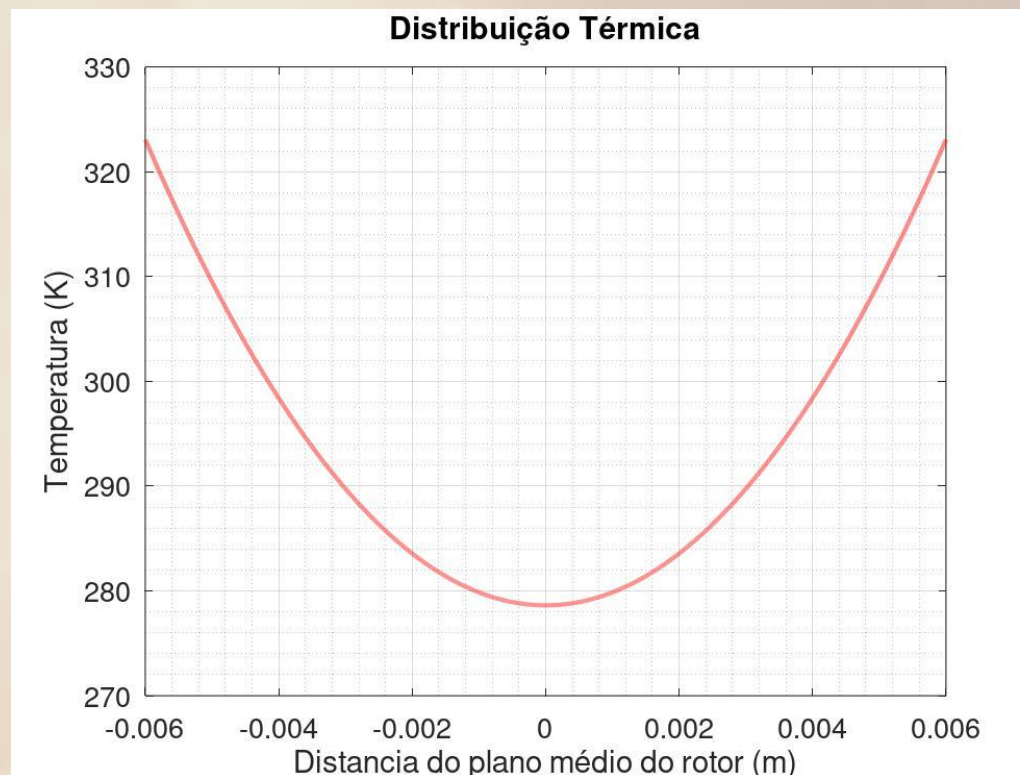
$$\sigma(z, t) = 65,375 \text{ MPa}$$



# Resultados



Distribuição do aumento térmico no rotor ao longo da distância  $z$  (distância horizontal do rotor ao seu centro).

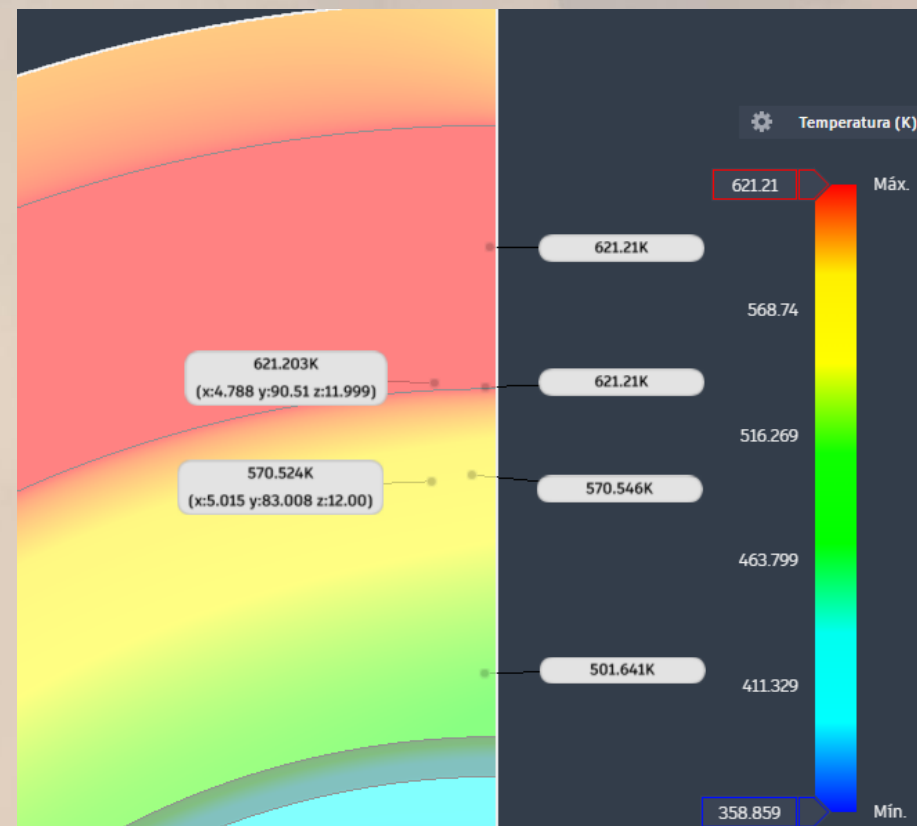
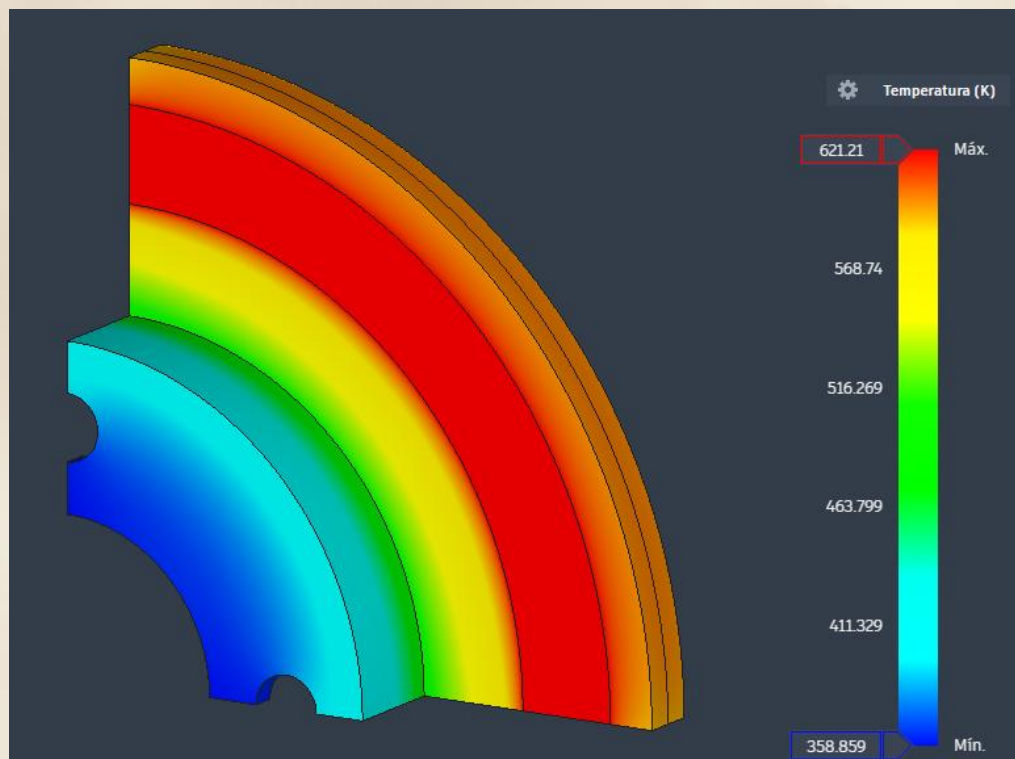




# Resultados




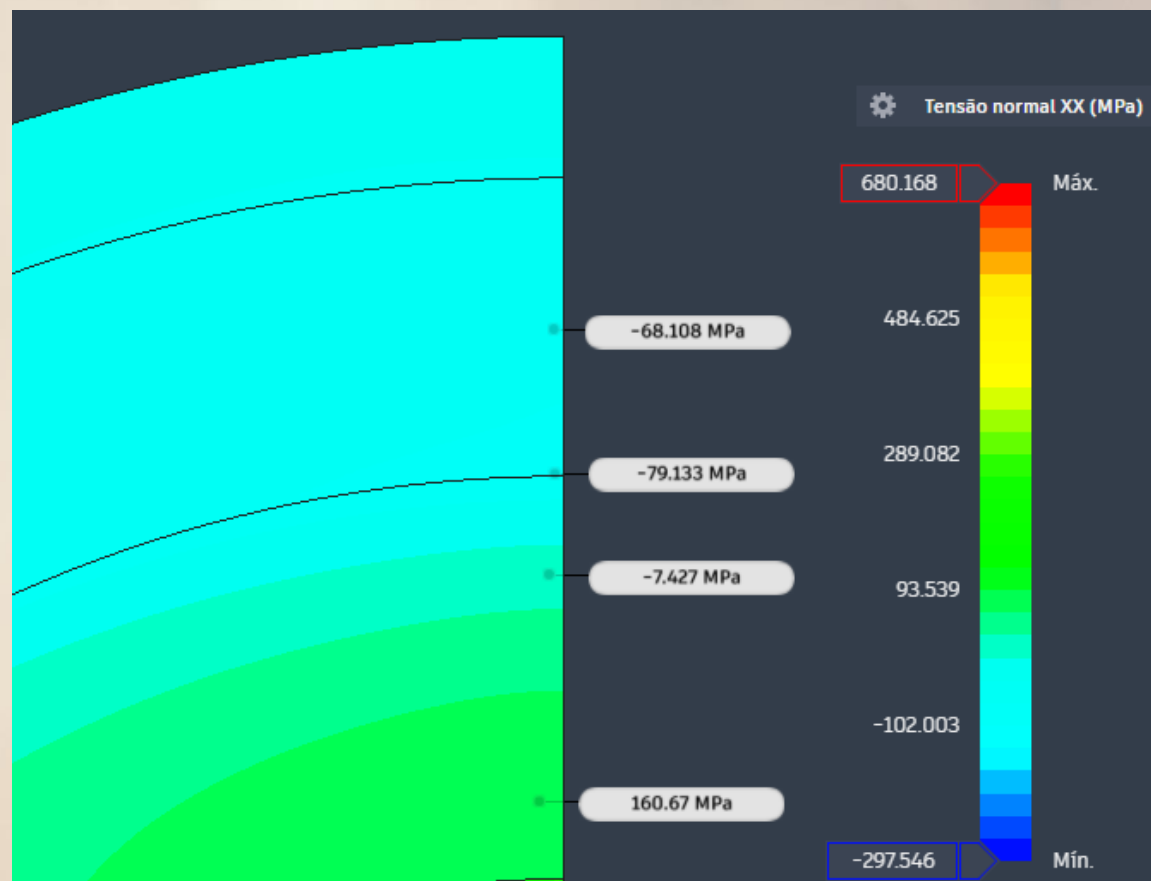
Resultado da simulação térmica no rotor.





# Resultados

 Resultado da simulação para tensão perpendicular ao eixo X.

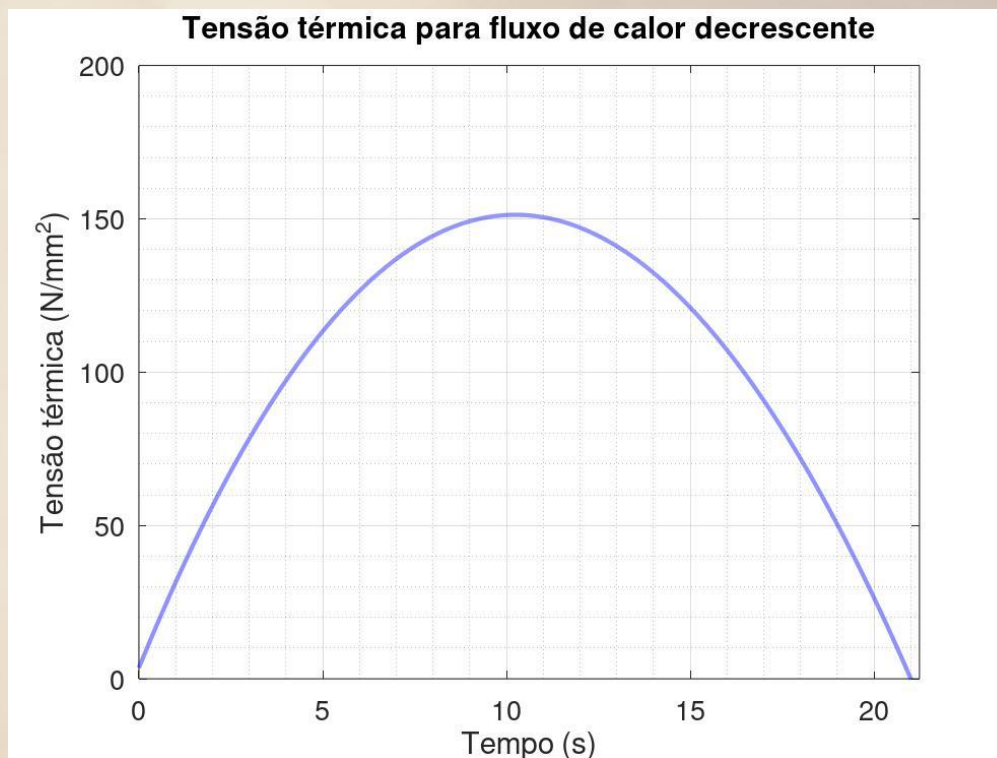




# Resultados








Simulação analítica da tensão térmica para um fluxo de calor decrescente ao tempo.





# Conclusões

-  Compreensão completa dos efeitos térmicos e mecânicos em discos de freio durante frenagens intensas.
-  Modelo analítico de Limpert mostrou-se eficiente para estimativa rápida de:
  - Variação da temperatura máxima  $\approx 237$  K (superfície do rotor).
  - Tensões compressivas máximas  $\approx 65$  MPa.
-  Validação da simulação CAD/CAE (Fusion 360) confirmou qualitativamente:
  - Distribuição térmica simétrica.
  - Gradiente radial esperado.
-  Temperatura máxima fortemente influenciada pela Energia dissipada e pelo Coeficiente de convecção (Re).
-  Fluxo de calor constante apresenta resultado mais conservadoras, enquanto no fluxo decrescente ao tempo representação mais realista da frenagem.



**Obrigado Pela Atenção**

