

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



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:

$$T_{máx} - T_i = \frac{5}{18} \frac{\frac{1}{2} P''_{(0)} t_s^{1/2}}{(\rho c k)^{1/2}}$$

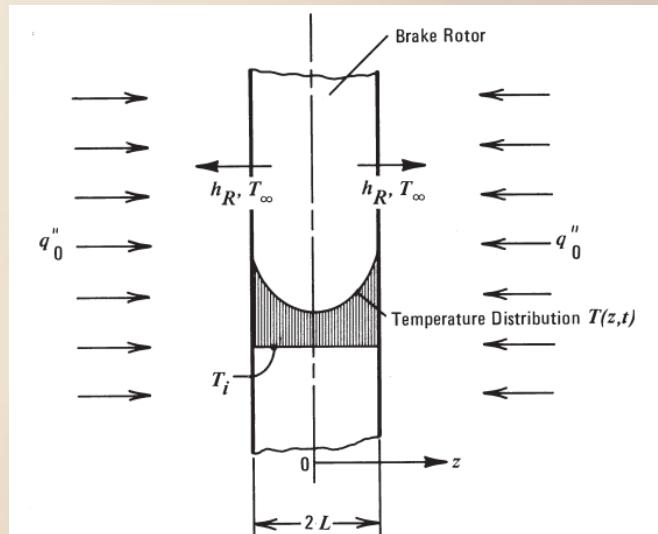
Onde:

- t_s é o tempo de frenagem.
- ρ é a massa específica do material.
- c é o calor específico.
- 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 seguinte valores considerando $z_1 = L$, $z_0 = 0$ e $t_s = 7,079$.

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

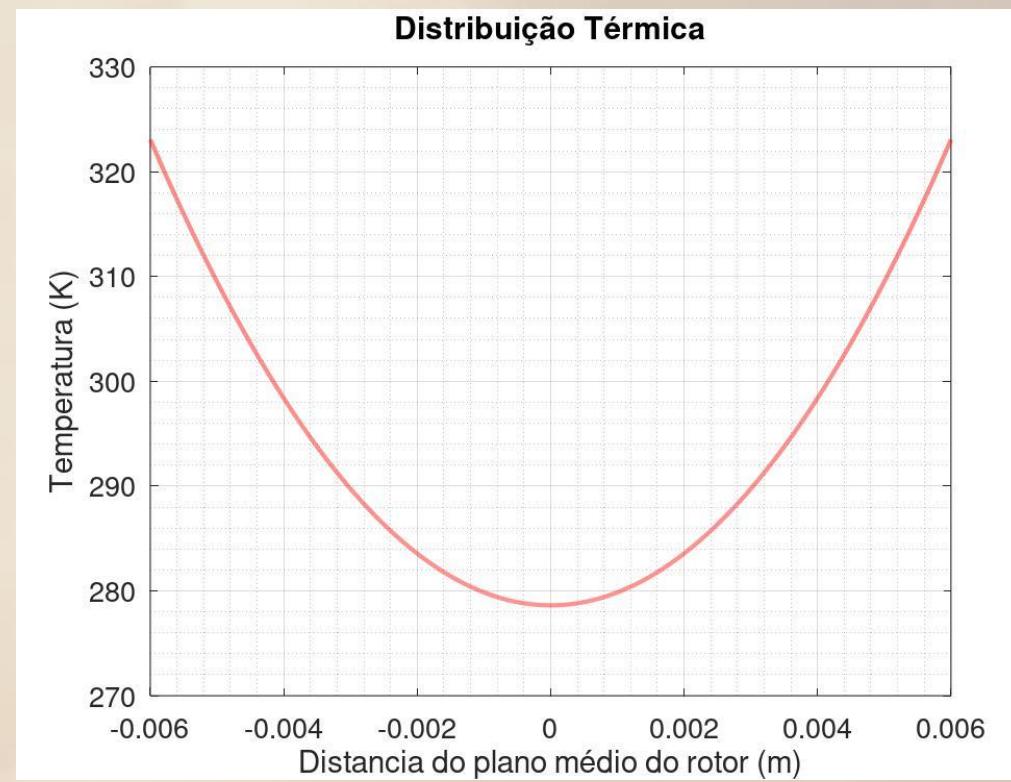


Ao calcular a tensão para um fluxo de calor constante, obtemos o seguinte valor considerando $z_1 = L$ e $t_s = 7,079$.

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

Resultados

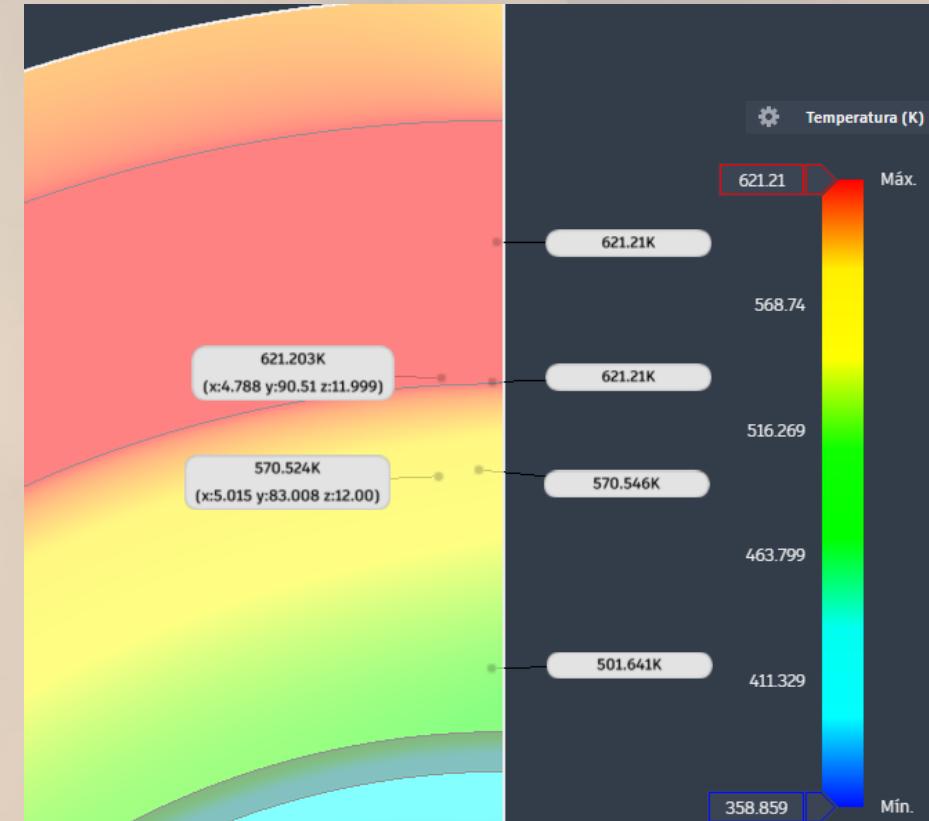
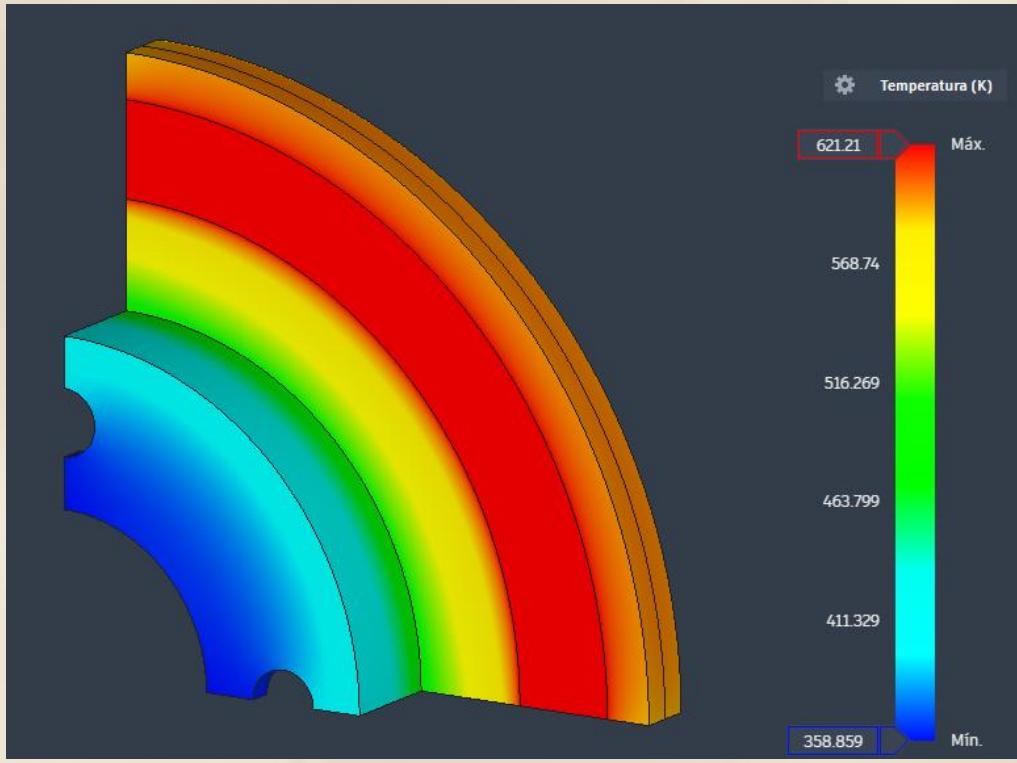
 Distribuição do aumento térmico no rotor ao longo da distância z (distância horizontal do rotor ao seu centro).



Resultados

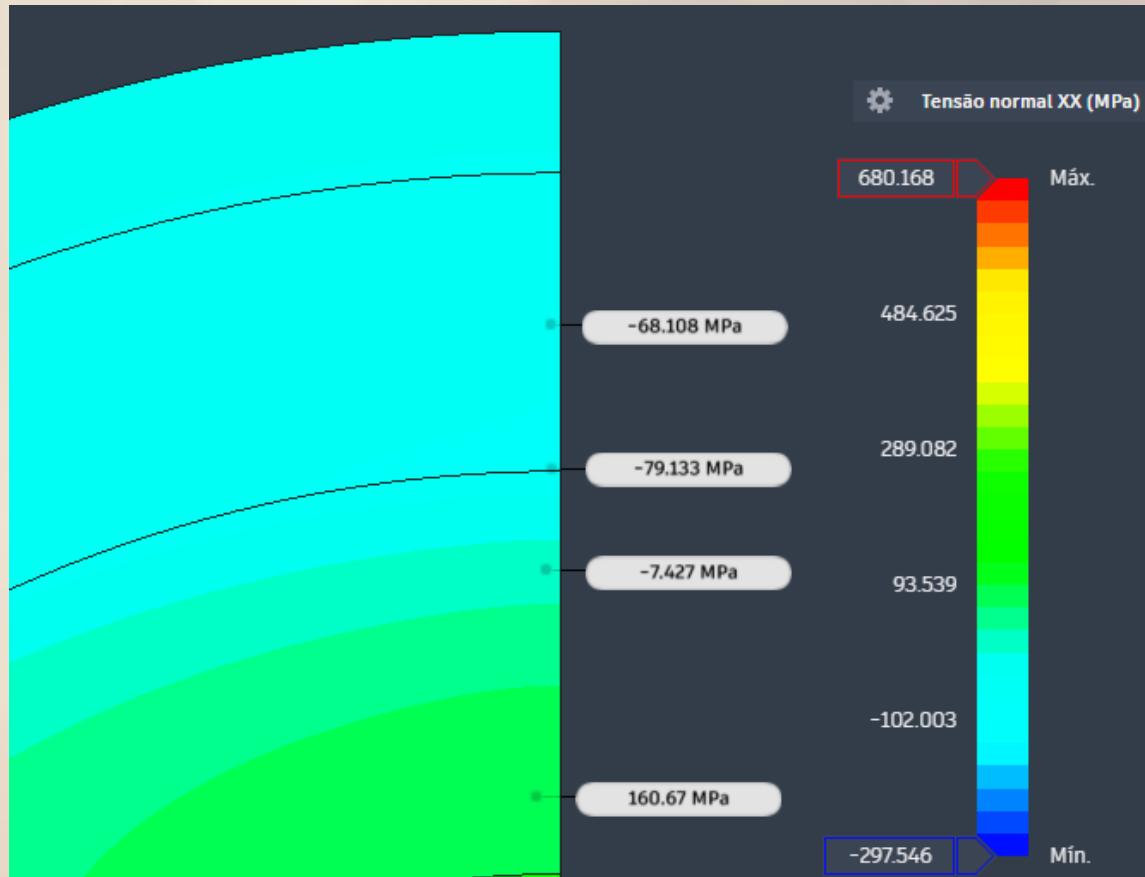


Resultado da simulação térmica no rotor.



Resultados

Resultado da simulação para tensão perpendicular ao eixo X.

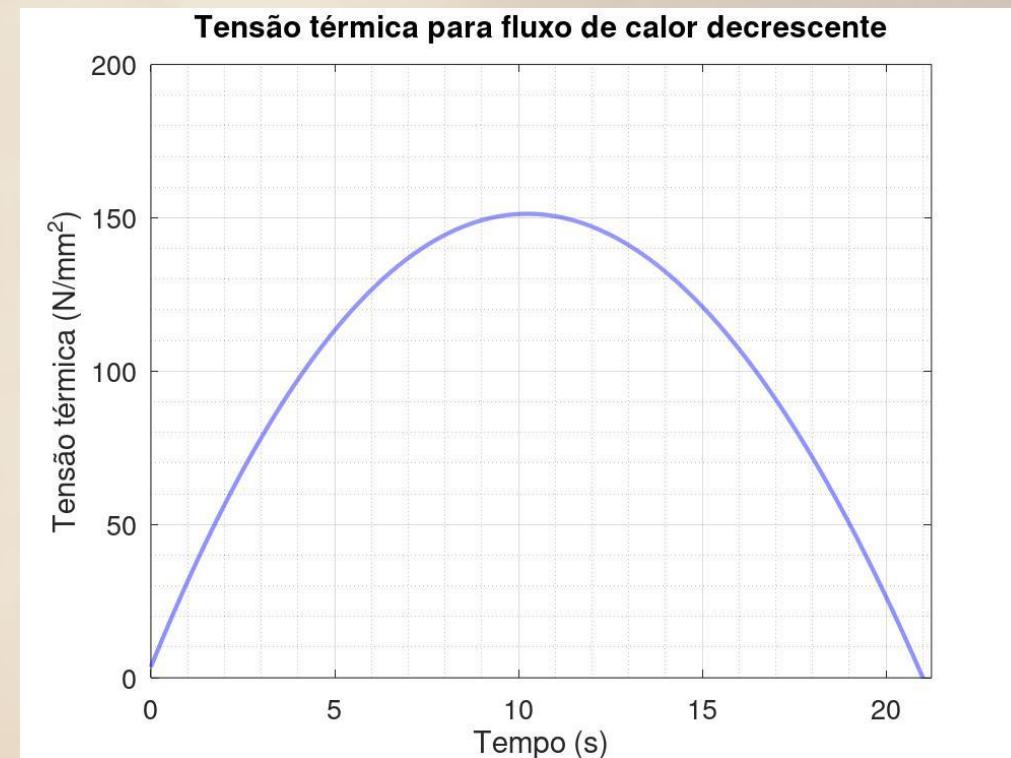




Resultados



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 ≈ 237 K (superfície do rotor).
 - Tensões compressivas máximas ≈ 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

