



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**EM608 – Elementos de Máquinas
ES690 – Sistemas Mecânicos**

Embreagens e Freios

Prof. Gregory Bregion Daniel gbdaniel@fem.unicamp.br

Prof.^a Katia Lucchesi Cavalca katia@fem.unicamp.br

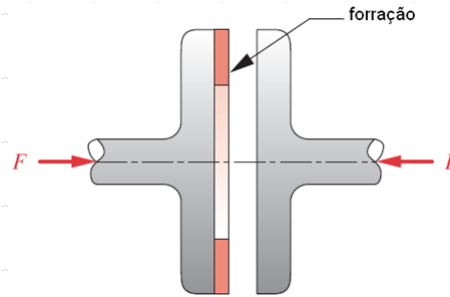
Campinas, 2º semestre 2020



INTRODUÇÃO

Embreagens e Freios são basicamente o mesmo dispositivo, permitindo um acoplamento mecânico entre dois elementos (por atrito, filme de fluido, campo magnético, engrenamento).

Se ambos os elementos giram, é chamado de embreagem. Se um elemento gira e o outro é fixo, é chamado de freio.



TIPOLOGIA

Freios e embreagens podem ser classificados de várias maneiras: pela natureza de sua atuação; pelo modo da transferência de energia entre os elementos; e pela natureza do acoplamento. Os modos de atuação podem ser: mecânico (atrito ou engrenamento), Por fluido (pneumático ou hidráulico), por campo (elétrico ou automático).



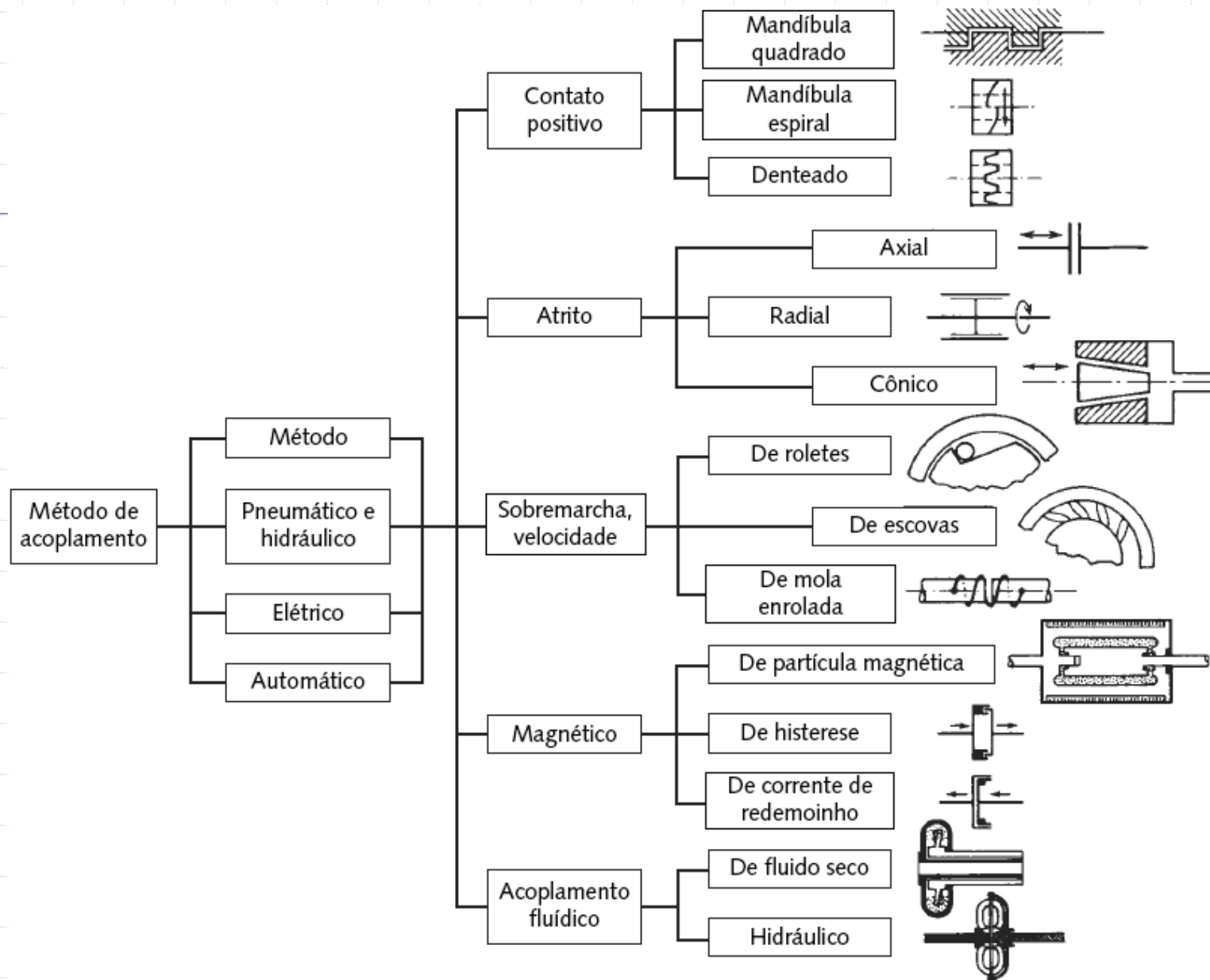


Figura 1 - Classificação e tipos de Embreagens e Freios.



Embreagem e Freios por Atrito

São os mais utilizados. Duas ou mais superfícies são pressionadas com uma força normal para criar um torque de atrito. Uma das superfícies de atrito é um metal (ferro fundido ou aço) e a outra é, geralmente, um material de alta fricção, aplicado como forro.

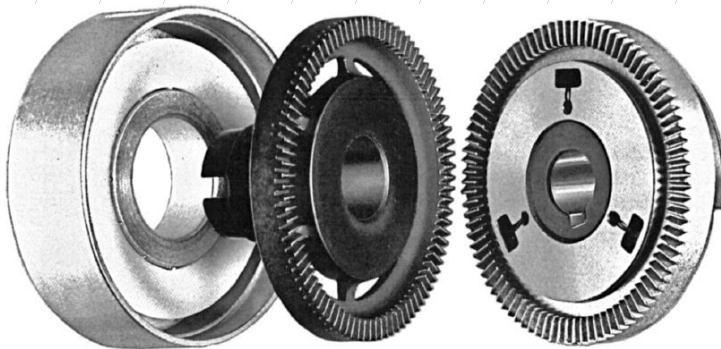


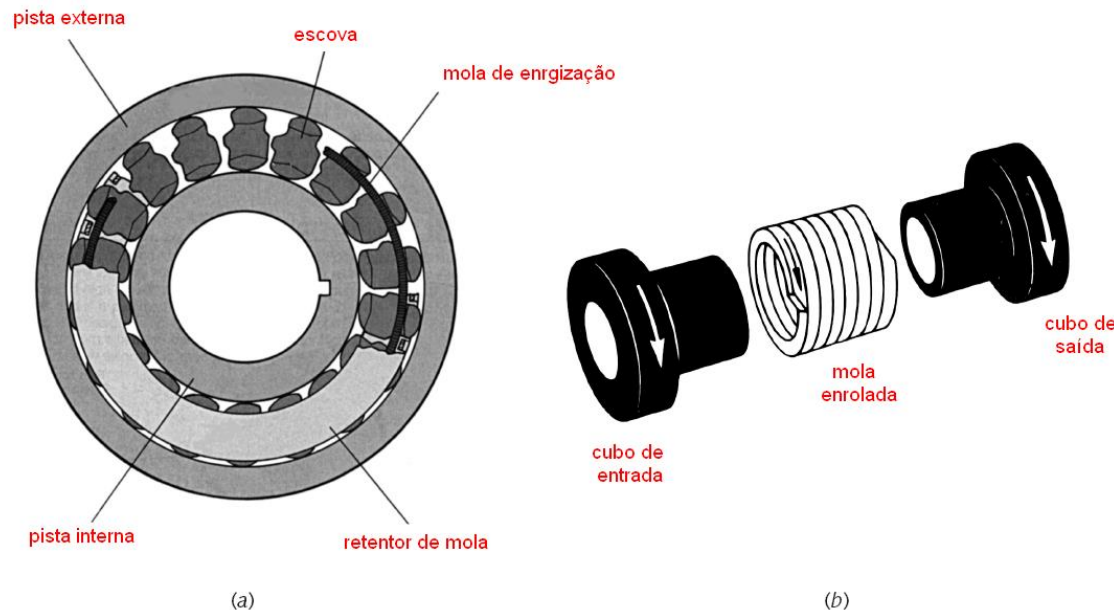
Figura 2 - Embreagem ou freio por fricção (ou atrito).

Embreagens de atrito podem ser a contato seco ou lubrificado (sob banho de óleo). Enquanto o óleo reduz o coeficiente de fricção, aumenta em muito a transferência de calor. O coeficiente de atrito das combinações de materiais embreagem/freio varia de 0,05 em óleo até 0,60 em contato seco.



Embreagens propulsoras e centrífugas

SOBREVELOCIDADE: Funcionam automaticamente baseadas na velocidade relativa dos dois elementos. São chamadas embreagens “one-way”, pois permitem rotação relativa apenas em uma direção, ou seja, a rotação for revertida, a geometria interna do mecanismo da embreagem trava.



CENTRÍFUGAS: engata automaticamente quando a velocidade do eixo atinge um certo valor. Elementos de fricção deslocam-se radialmente contra a parte interna de um tambor cilíndrico para engatar a embreagem.

Figura 3 – Embreagens de velocidade; (a) embreagem de escovas; (b) embreagem de mola espiral

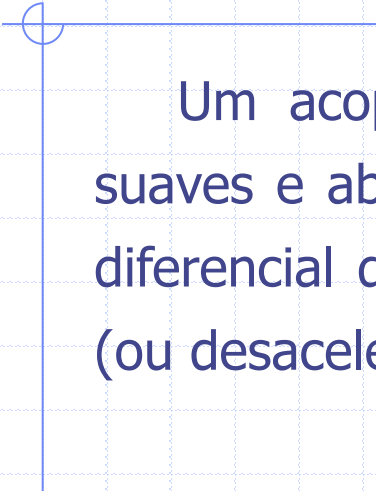
Acoplamentos por Fluidos

Transmitem torque através de um fluido, tipicamente um óleo. Um rotor com um conjunto de hélices gira sobre um eixo de entrada e transfere momento angular para o óleo em contato com a superfície.

Uma turbina semelhante é acoplada ao eixo de saída e é posta em movimento transmitido pelo fluido entre ambas. O princípio de funcionamento é similar ao de dois ventiladores face a face, com um deles acionado pelo motor elétrico.

Usar um óleo incompressível num volume confinado é muito mais eficiente do que duas hélices em ambiente aberto, especialmente quando o rotor e as lâminas da turbina são modulados para bombear o óleo.



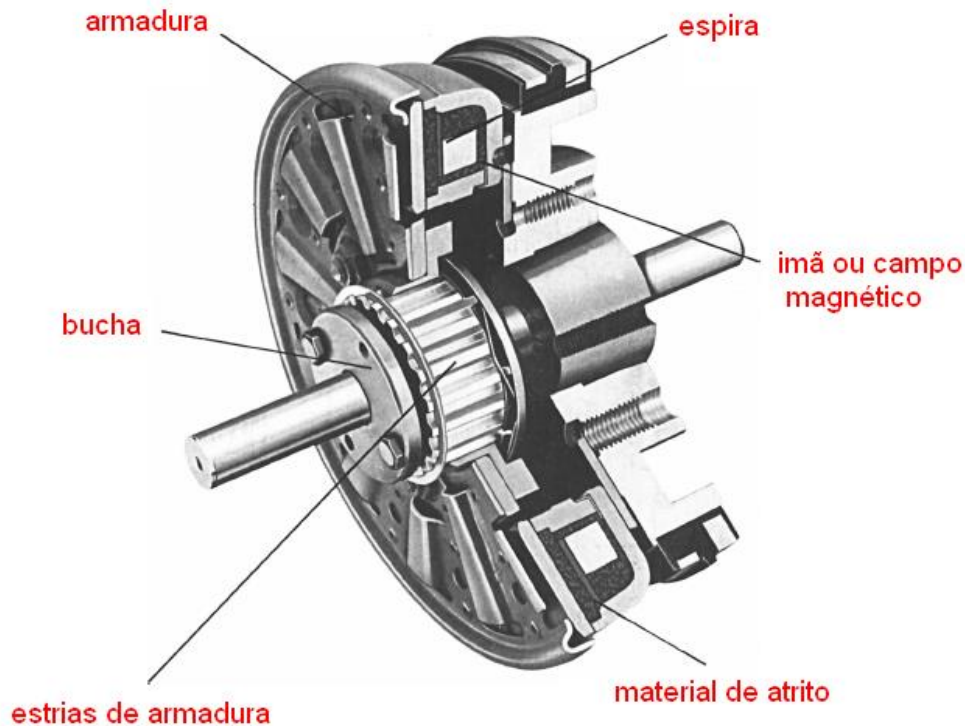


Um acoplamento por fluido proporciona partidas extremamente suaves e absorve impactos, visto que o fluido cisalha quando há um diferencial de velocidade. Assim, a turbina é gradualmente acelerada (ou desacelerada) até ajustar a velocidade do rotor.

Haverá sempre algum escorregamento, o que significa que a turbina movida nunca poderá atingir 100% da velocidade do rotor (0% de escorregamento), mas pode operar em 100% de escorregamento quando parada. Toda a energia de entrada será então transformada em calor, devido ao cisalhamento do óleo.



Embreagens e Freios Magnéticos



Embreagens de atrito podem ser operadas através de campo eletromagnético, tendo como: tempo de resposta rápida, fácil controle, partidas e paradas suaves, acionamento e desativação mais seguros. Existem versões de embreagens e freios, assim como um módulo combinado de embreagem-freio.

Figura 4 - Embreagem de atrito operando magneticamente.



Embreagens e Freios de Partículas Magnéticas

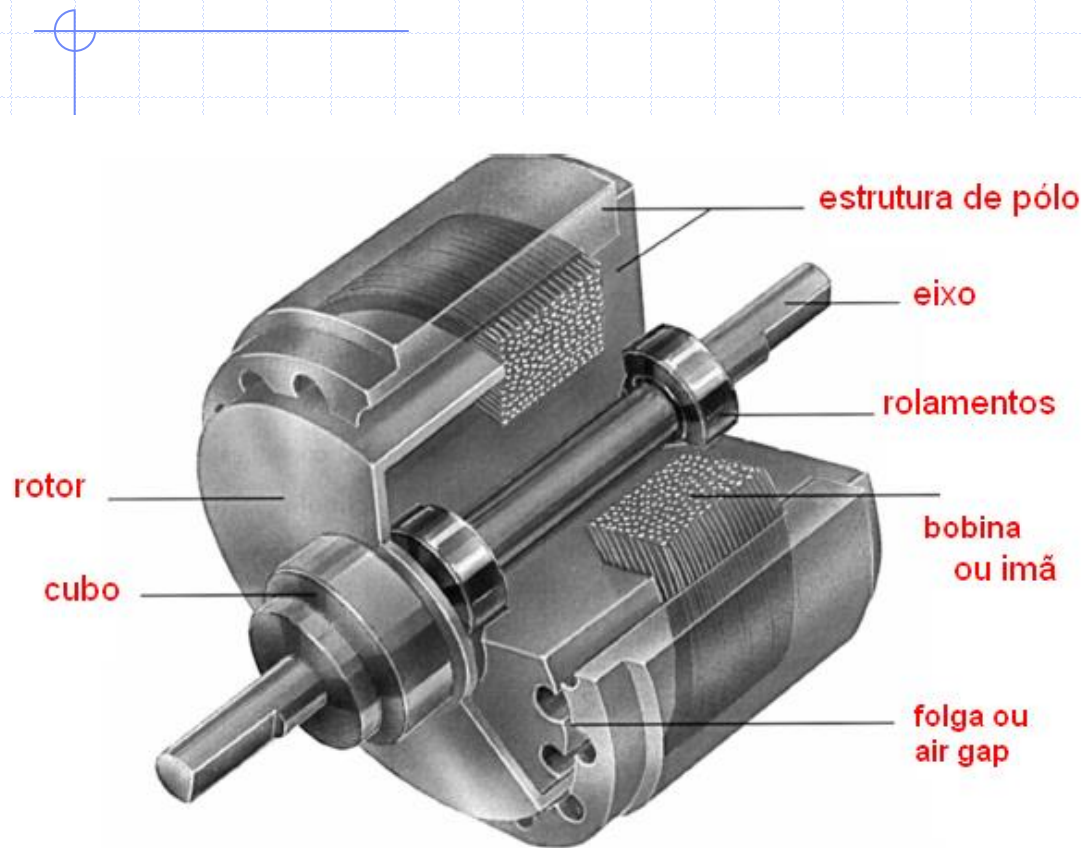
Não possuem material de atrito para desgaste e, conseqüentemente, não ocorre atrito direto entre os discos da embreagem e a armadura (carcaça).

A folga entre as superfícies é preenchida com pó de ferro. Quando a bobina é energizada as partículas do pó de ferro formam uma corrente através das linhas de fluxo do campo magnético e acoplam o disco com a armadura (carcaça) sem escorregamento.

O torque pode ser controlado variando a corrente na bobina e o dispositivo irá escorregar quando o torque aplicado exceder o valor ajustado pela corrente na bobina.



Embreagens e Freios por Campo Magnético



Não ocorre um contato mecânico entre os elementos e, assim, o atrito é nulo. O rotor é arrastado (ou freado) por um campo magnético ajustado pela bobina. Esses dispositivos são extremamente suaves, silenciosos, e possuem longa vida, uma vez que não há contato mecânico dentro da embreagem exceto nos mancais.

Figura 5 - Embreagem de histerese



EMBREAGENS – SELEÇÃO E ESPECIFICAÇÃO

Fabricantes de embreagens e freios definem procedimentos para seleção e especificação, geralmente baseados em torque e potência pré-definidos para aplicação, além de um fator de serviço, que tem como finalidade ajustar diferentes aplicações, instalações, ou fatores ambientais sobre os quais o produto é testado.



Fatores de Serviços

Um problema comum é a falha devido aplicação inadequada do fator de serviço. Isso pode ser, em parte, devido à falta de padronização do fator de serviço.

Um fabricante pode recomendar um fator de serviço 1,5 para uma condição particular, enquanto outro fabricante recomenda 3,0 para a mesma condição.

Ambos estarão corretos no projeto da embreagem, porque, em um caso, o fabricante pode ter considerado um fator de segurança 2,0 no projeto, enquanto o outro aplica-o no fator de serviço.



Embreagens subdimensionadas para uma carga aplicada irão escorregar e superaquecer.

Em contrapartida, uma embreagem superdimensionada para a carga aplicada adiciona inércia ao conjunto e pode sobrecarregar o motor na aceleração.

A principal preocupação do projetista de máquinas deve ser a exata definição da carga e das condições de operação, o que requer cálculos de momentos de inércia de todos os elementos do sistema movido pela embreagem ou freio.



Localização da Embreagem

O sistema necessita de uma embreagem quando uma máquina apresenta eixos de alta e baixa velocidade.

O torque (e qualquer carga de impacto) é maior nos eixos de baixa velocidade do que em eixos de alta velocidade por um fator igual a razão de transmissão ($P = T \cdot \omega$).

A potência deve ser aproximadamente a mesma em ambos os eixos (negligenciando perdas no trem de transmissão), mas a energia cinética no eixo de alta velocidade é maior por um fator igual ao quadrado da razão de transmissão.



A embreagem montada no eixo de baixa velocidade deve ser maior (e mais cara) para suportar o torque maior (maior carga).

Por outro lado, uma embreagem menor e mais barata no eixo de alta velocidade deve dissipar maior energia cinética e, portanto, pode superaquecer mais rapidamente (menor vida útil).

Alguns fabricantes recomendam usar sempre o eixo de alta velocidade para posicionar a embreagem, pois a economia inicial é maior.

Outros sugerem que um custo inicial elevado, colocando embreagens maiores no eixo de baixa velocidade, será compensado pelo baixo custo de manutenção durante o tempo de funcionamento.

O balanço parece pender para o posicionamento em alta velocidade, contudo cada situação deve ser analisada individualmente.



MATERIAIS DE ATRITO PARA EMBREAGEM E FREIOS

Tabela 1 - Propriedades dos Materiais Mais Comuns em Embreagens e Freios.

Propriedades de materiais comuns de forração para embreagens/freios

Material de atrito contra aço ou ferro fundido	Coeficiente de atrito dinâmico		Pressão Máxima		Temperatura máxima	
	Seco	Em óleo	psi	kPa	°F	°C
Moldado	0.25–0.45	0.06–0.09	150–300	1 030–2 070	400–500	204–260
Tecido	0.25–0.45	0.08–0.10	50–100	345–690	400–500	204–260
Metal sintetizado	0.15–0.45	0.05–0.08	150–300	1 030–2 070	450–1 250	232–677
Ferro fundido ou aço endurecido	0.15–0.25	0.03–0.06	100–250	690–720	500	260



EMBREAGENS DE DISCOS

A mais simples embreagem de disco é formada por dois discos, sendo um deles forrado com material de alta fricção, que é prensado (comprimido) por uma força normal, para gerar a força de atrito necessária para transmitir o torque.

A pressão entre as superfícies da embreagem pode aproximar-se de uma distribuição uniforme sobre a superfície, considerando que os discos são suficientemente flexíveis.

Em tais casos, o desgaste será maior em diâmetros maiores porque o desgaste é proporcional à pressão x velocidade ($p \times V$) e a velocidade tangencial aumenta linearmente com o raio ($V = \omega r$).



Embora os discos desgastem no sentido do raio externo para o interno, a perda de material mudará a distribuição de pressão para não uniforme e, neste caso, a embreagem pode ser aproximada para uma condição de desgaste uniforme $p \times V = \text{constante}$.

Assim, os dois extremos de projeto são: uma condição de pressão uniforme e uma de desgaste uniforme.

Uma embreagem flexível pode estar próxima de uma condição de pressão uniforme quando nova, mas tenderá para uma condição de desgaste uniforme com o uso. Uma embreagem rígida se aproximará mais rapidamente da condição de desgaste uniforme. Os cálculos para cada condição são diferentes e a suposição de desgaste uniforme fornece uma avaliação de embreagem mais conservativa, sendo mais aprovada por alguns projetistas.



Projeto para Pressão Uniforme:

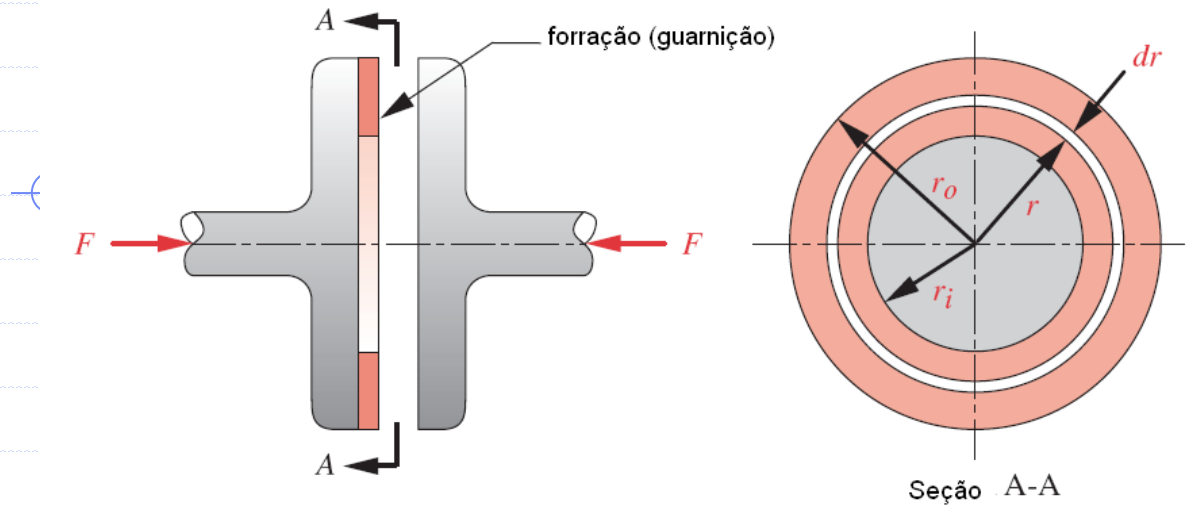


Figura 6 - Embreagem de disco axial de superfície simples.

Considere um anel de área diferencial dA na face da embreagem, com incremento radial diferencial dr .

$$dA = 2\pi r dr$$

A força diferencial agindo no anel é: $dF = 2\pi p r dr$

sendo r o raio e p pressão uniforme na face da embreagem.

A força total axial F na embreagem, por integração entre os limites r_i e r_o será:

$$F = \int_{r_i}^{r_o} 2\pi p r dr = 2\pi p \left. \frac{r^2}{2} \right|_{r_i}^{r_o} = \pi p (r_o^2 - r_i^2)$$



O torque de atrito no elemento de anel diferencial é:

$$dF_{at} = \mu dF = 2\pi\mu p r dr$$

$$dT = r dF_{at}$$

$$dT = 2\pi p \mu r^2 dr$$

sendo μ o coeficiente de fricção.

O torque total para um disco da embreagem é:

$$T = \int_{r_i}^{r_o} 2\pi p \mu r^2 dr = 2\pi p \mu \left. \frac{r^3}{3} \right|_{r_i}^{r_o} = \frac{2}{3} \pi p \mu (r_o^3 - r_i^3)$$



Para uma embreagem de discos múltiplos com N faces de fricção:

$$T = \frac{2}{3} \pi p \mu (r_o^3 - r_i^3) N$$

Combinando as equações obtemos uma expressão para o torque como uma função da força axial:

$$F = \pi p (r_o^2 - r_i^2)$$

$$\pi p = F / (r_o^2 - r_i^2)$$

PRESSÃO UNIFORME

$$T = N \mu F \frac{2}{3} \frac{(r_o^3 - r_i^3)}{(r_o^2 - r_i^2)}$$



Projeto para Desgaste Uniforme:

A taxa de desgaste W é proporcional ao produto da pressão p e da velocidade V :

$$W = p \times V = \text{constante}$$

A velocidade em qualquer ponto da face da embreagem é:

$$V = r\omega$$

$$W = p \times V = p \times \omega \times r$$



Combinando as equações e assumido uma velocidade angular constante ω :

$$p \times r = \text{constante} = K$$

A maior pressão p_{max} deve ocorrer no menor raio r_i :

$$K = p_{\text{max}} \cdot r_i = p \cdot r$$

Com base na equação acima, uma expressão para a pressão em função do raio r :

$$p = p_{\text{max}} \frac{r_i}{r}$$

sendo que a máxima pressão permissível p_{max} irá variar com o material de forro usado.



A expressão da pressão em função do raio r na condição de desgaste uniforme:

$$p = p_{\max} \frac{r_i}{r}$$

A força axial F é a integral da equação da força diferencial no anel substituindo a expressão para pressão:

$$F = \int_{r_i}^{r_o} 2\pi p r dr = \int_{r_i}^{r_o} 2\pi \left(p_{\max} \frac{r_i}{r} \right) r dr = 2\pi r_i p_{\max} (r_o - r_i)$$

O torque será:

$$T = \int_{r_i}^{r_o} 2\pi p \mu r^2 dr = \int_{r_i}^{r_o} 2\pi p_{\max} \frac{r_i}{r} \mu r^2 dr = \pi \mu r_i p_{\max} (r_o^2 - r_i^2)$$



$$F = 2 \pi r_i p_{\max} (r_o - r_i)$$

Rearranjando:

$$\pi r_i p_{\max} = F/2(r_o - r_i)$$

Combinado as equações relacionando torque e força axial:

$$T = N \mu \frac{F}{2(r_o - r_i)} (r_o^2 - r_i^2) = N \mu F \frac{(r_o + r_i)}{2}$$

sendo N o número de superfícies de fricção na embreagem.

Nota-se que o máximo torque para qualquer raio externo é obtido quando o raio interno é:

$$T = \pi \mu r_i p_{\max} (r_o^2 - r_i^2)$$

$$\frac{dT}{dr_i} = \pi \mu p_{\max} \left[r_i (-2r_i) + (r_o^2 - r_i^2) \right] = 0$$

$$\frac{dT}{dr_i} = \left[(-2r_i^2) + (r_o^2 - r_i^2) \right] = r_o^2 - 3r_i^2 = 0$$

$$r_i = \sqrt{\frac{1}{3}} r_o = 0.577 r_o$$

