

# Motores de combustión Interna

## Fricción

Pedro Curto-Risso, Santiago Martinez-Boggio, Lidio Braga

INSTITUTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y PRODUCCIÓN INDUSTRIAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

## Fuerzas de fricción

La fuerza que ejercen los gases al pistón no se transfiere totalmente al eje.

La diferencia entre el trabajo indicado y el trabajo al freno se conoce como el trabajo perdido por fricción:

$$W_{tf} = W_i - W_b \quad \longrightarrow \quad W_i = W_b + W_{tf}$$

Si se divide por el tiempo del ciclo, también se puede escribir como potencia:

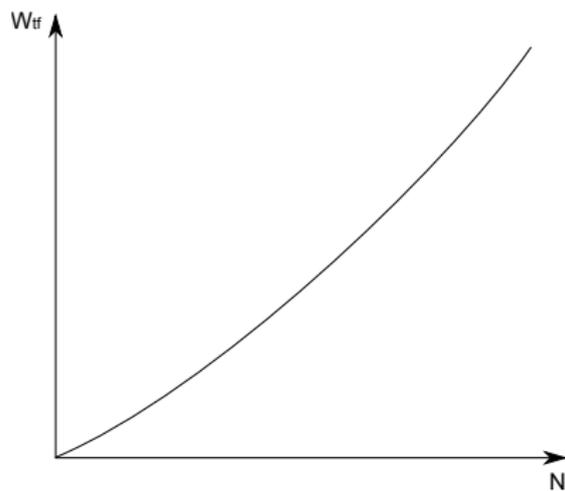
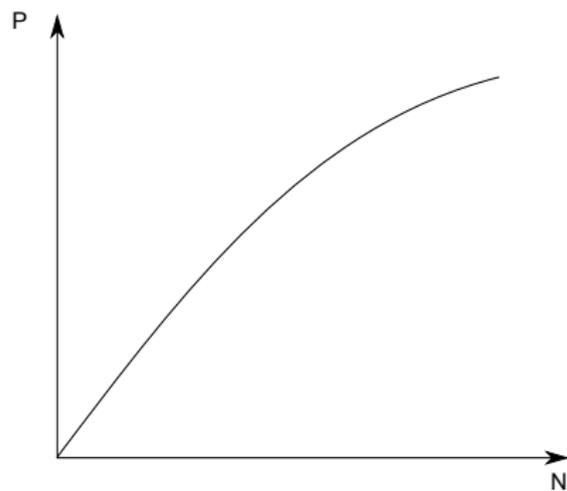
$$P_i = P_b + P_{tf}$$

Si se divide los trabajos entre  $V_d$ , se pasa al dominio de las presiones medias:

$$imep = bmep + fmep$$

## Pérdidas por fricción

Las pérdidas varían en función de la potencia indicada (vinculada principalmente por la velocidad de giro).



# Trabajo perdido por fricción

Componentes del trabajo perdido por fricción:

- 1 Trabajo de bombeo ( $W_p$ ): es el trabajo realizado por el pistón durante la admisión de la mezcla de gases y el escape. Se define para motores 4T.
- 2 Trabajo de fricción por rozamiento ( $W_{rf}$ ) es la energía disipada en las piezas del motor que tienen movimiento relativo una respecto a la otra.
- 3 Trabajo de auxiliares ( $W_a$ ) es el trabajo necesario para activar componentes auxiliares

$$W_{tf} = W_p + W_{rf} + W_a$$

# Disipación por velocidad relativa

## Fundamento de fricción:

La fricción es la resistencia al movimiento relativo.

Fricción estática: se da cuando la velocidad relativa entre dos superficies es nula.

Ejemplos en el motor:

- entre el cigüeñal y la bancada, al arranque.
- rodadura y engranajes.
- contacto entre aros y camisa de cilindro en el PMI y PMS.

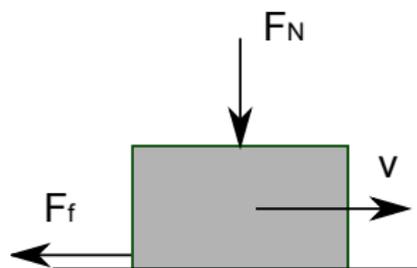
Fricción dinámica: se da cuando hay velocidad relativa entre las superficies.

Ejemplos en el motor:

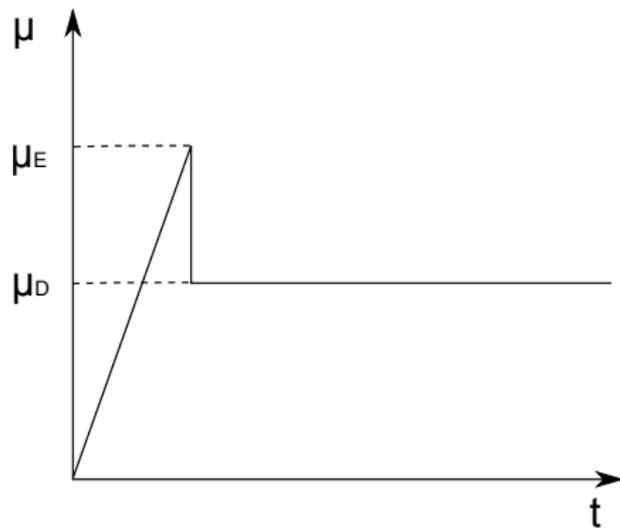
- contacto entre el eje y cojinetes con el motor en marcha.
- contacto entre aros y camisa a la mitad de la carrera.

# Fricción

## Coefficiente de fricción



$$|F_f| = \mu_D |F_N|$$



## Mecanismos y causas de la fricción

- 1 fricción mecánica (entre superficies sin lubricación)
- 2 fricción fluida (entre superficies con lubricación)

## Regímenes de lubricación

- 1 Hidrodinámico: la carga es soportada por el film de aceite.
  - 2 Mezcla (cuasi-hidrodinámico): la carga es soportada por el film y por parte del sólido en las asperezas (mala lubricación o funcionamiento lento).
  - 3 Lubricación límite: la carga es soportada por el contacto entre superficies sólidas por el contacto de asperezas.
- 
- Elasto-hidrodinámico: La carga es soportada por el film viscoso con deformación elástica en la zona de contacto (ejemplo: engranaje).

# Diagrama de Stribeck

Representa  $\mu$  en función de un adimensionado:

Cojinetes:

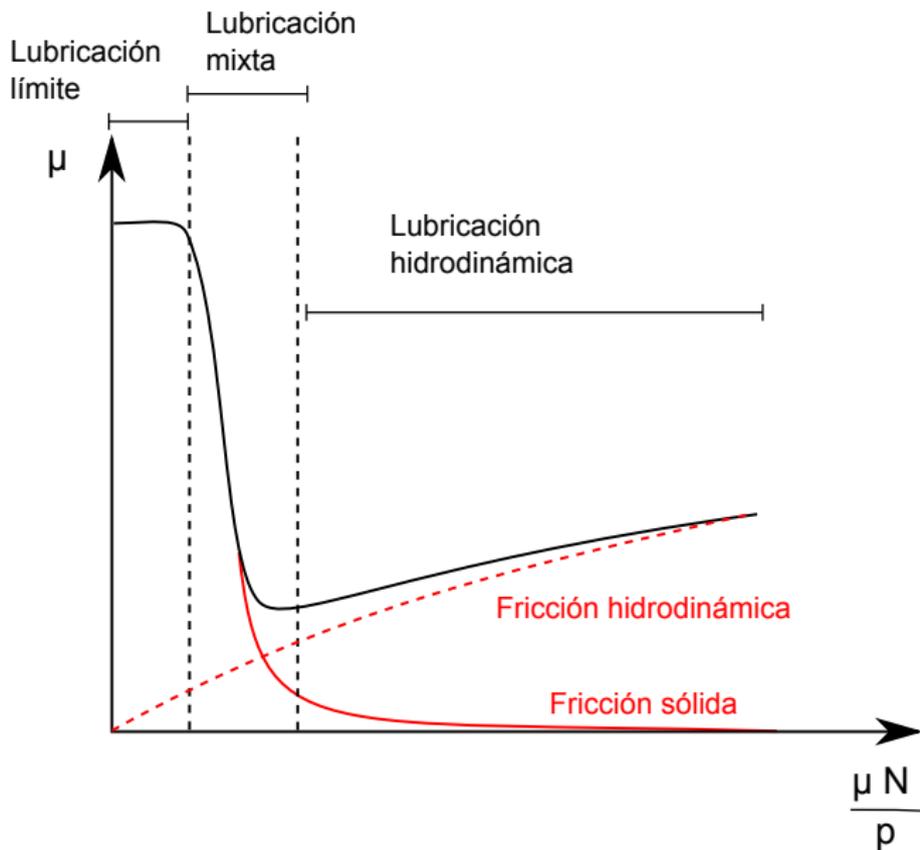
$$\pi = \frac{\nu \rho N}{p}$$

Placas planas:

$$\pi = \frac{\nu \rho v}{p b}$$

- $\nu$  : viscosidad cinemática
- $\rho$  : densidad
- $p$  : presión de carga o fuerza normal por unidad de superficie.
- $N$  : velocidad de giro del eje en el cojinete.
- $v$  : velocidad relativa entre placas.
- $b$  : longitud de contacto entre placas.

# Diagrama de Stribeck



## Disipación de turbulencia

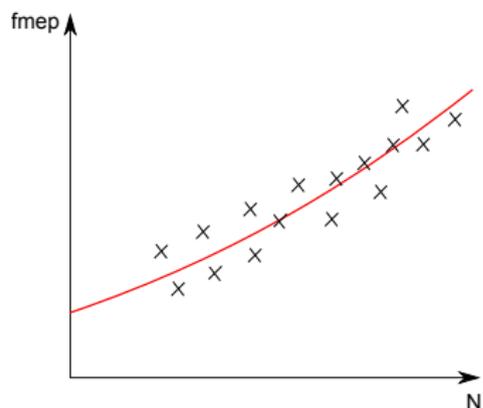
En los fenómenos en que intervienen fluidos, ej. bombeo de gases y líquidos, ventiladores, la disipación de energía es turbulenta.

El trabajo de bombeo es proporcional a  $v^2$  (velocidad representativa) y la proporcionalidad depende de la geometría.

En los motores de combustión interna las fuerzas de fricción para el bombeo de fluidos son proporcionales a  $N^2$  o  $S_p^2$ .

## Disipación de turbulencia: motores de ciclo Otto

Barnes y Moss (1980s) desarrollaron una ecuación empírica para motores de 4 cilindros con volúmenes entre 845 a 2000 cc.:



$$f_{mep}(\text{bar}) = 0,97 + 0,15 \left( \frac{N}{1000} \right) + 0,05 \left( \frac{N}{1000} \right)^2$$

$$[N] = \text{rpm}$$

Para motores más recientes Sandoval y Heywood (2003) proponen la siguiente fórmula (según ensayos en motor de 5.4 litros):

$$f_{mep}(\text{kPa}) = 57 + 15 \left( \frac{N}{1000} \right) + 5,5 \left( \frac{N}{1000} \right)^2$$

$$[N] = \text{rpm}$$

## Disipación de turbulencia: motores Diésel

Se ha estudiado el comportamiento del trabajo perdido por fricción para diferentes configuraciones.

Se observó que hay un factor que afecta linealmente el comportamiento: la vorticidad.

- Cámara con grandes vórtices.
- Cámara con pequeños vórtices.

$$fmep = C_1 + 48 \left( \frac{N}{1000} \right) + 0,4S_p^2$$

$$[fmep] = kPa$$

$$[S_p = 2LN/60] = m/s$$

$$[N] = rpm$$

	ID (inyección directa)	LS (Large swirl)	SS (small swirl)
$C_1(kpa)$	75	110	144

# Lubricación

Funciones:

- ➊ Reducir la resistencia de fricción para aumentar el rendimiento mecánico.
- ➋ Proteger el motor contra el desgaste
- ➌ Contribuir al enfriamiento del motor donde se disipan los trabajos de fricción en forma de calor.
- ➍ Remover impurezas perjudiciales de las regiones lubricadas.
- ➎ Sellar, mantener las pérdidas de gas a mínimos aceptables.