

# ***TRIBOLOGIA***

*Fricción, Desgaste y Lubricación*



# ***El éxito en la operación de un equipo***

🔥 **Solo es posible a través de adecuados :**

- ◆ Diseños
- ◆ Materiales
- ◆ Instalación
- ◆ Condiciones Operativas
- ◆ Mantenimiento
- ◆ Lubricación

# ***Por qué se rompen las cosas?***

- Las fallas de los equipos pueden ser causadas por cualquiera de los aspectos precedentes, pero a menudo se deben a combinaciones de diversos factores
- El conocimiento de los principios de lubricación lleva a una mejorar el entendimiento de la operación de los equipos....
- Nos enfocaremos entonces en los Principios de Lubricación

# *Principios de Lubricación*

- ❖ Constituyen la base para entender los Problemas de Lubricación.
- ❖ Se aplican a todo tipo de elementos de máquina lubricados e incluyen :
  - ❖ Engranajes
  - ❖ Cojinetes de elementos Rodantes
  - ❖ Cojinetes planos o simples
  - ❖ Anillos de Pistón y Camisas de Cilindros
  - ❖ Levas y sus Seguidores

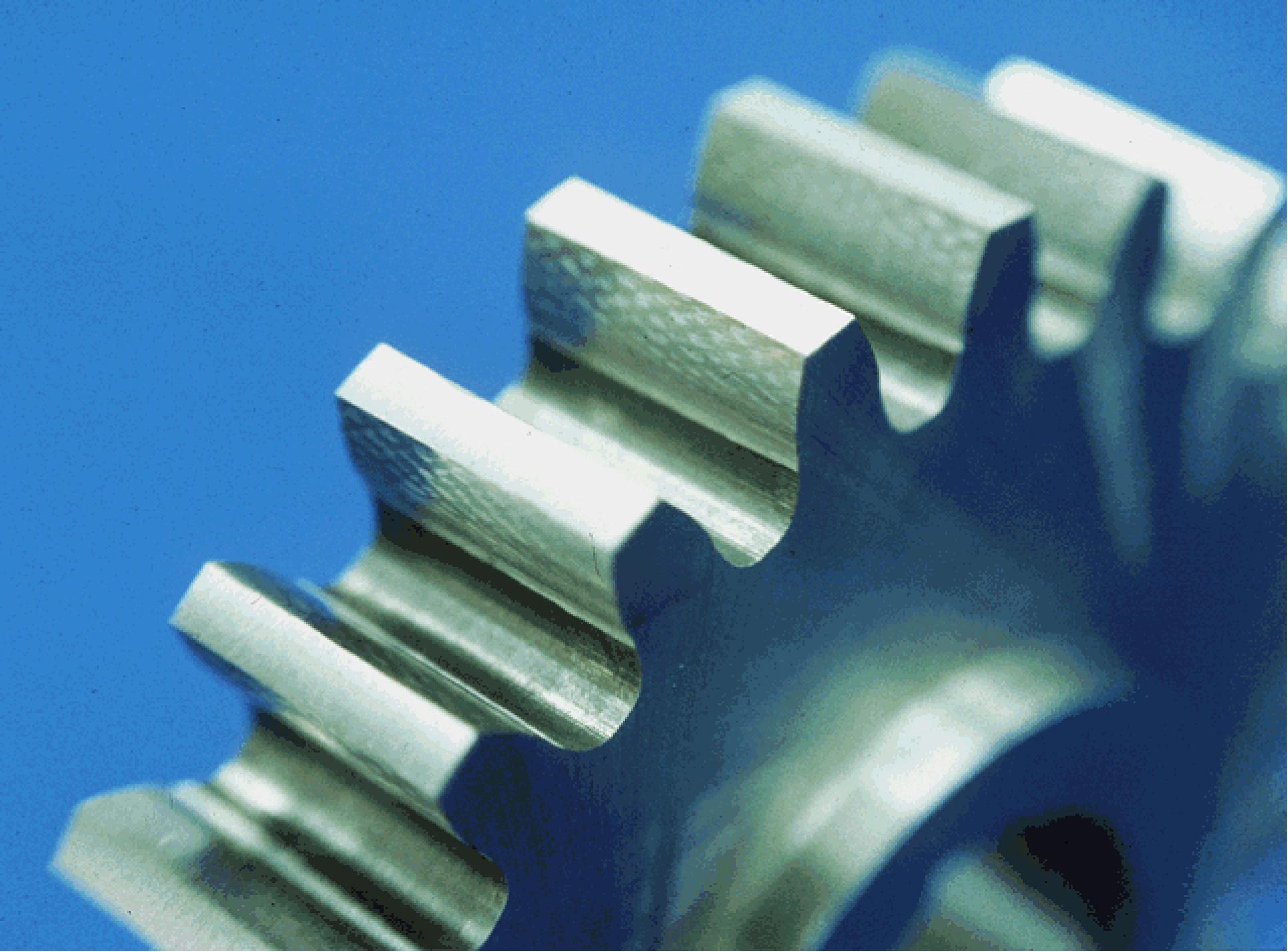
# *Principios de Lubricación*

🔴 También se aplican a todo tipo de lubricantes

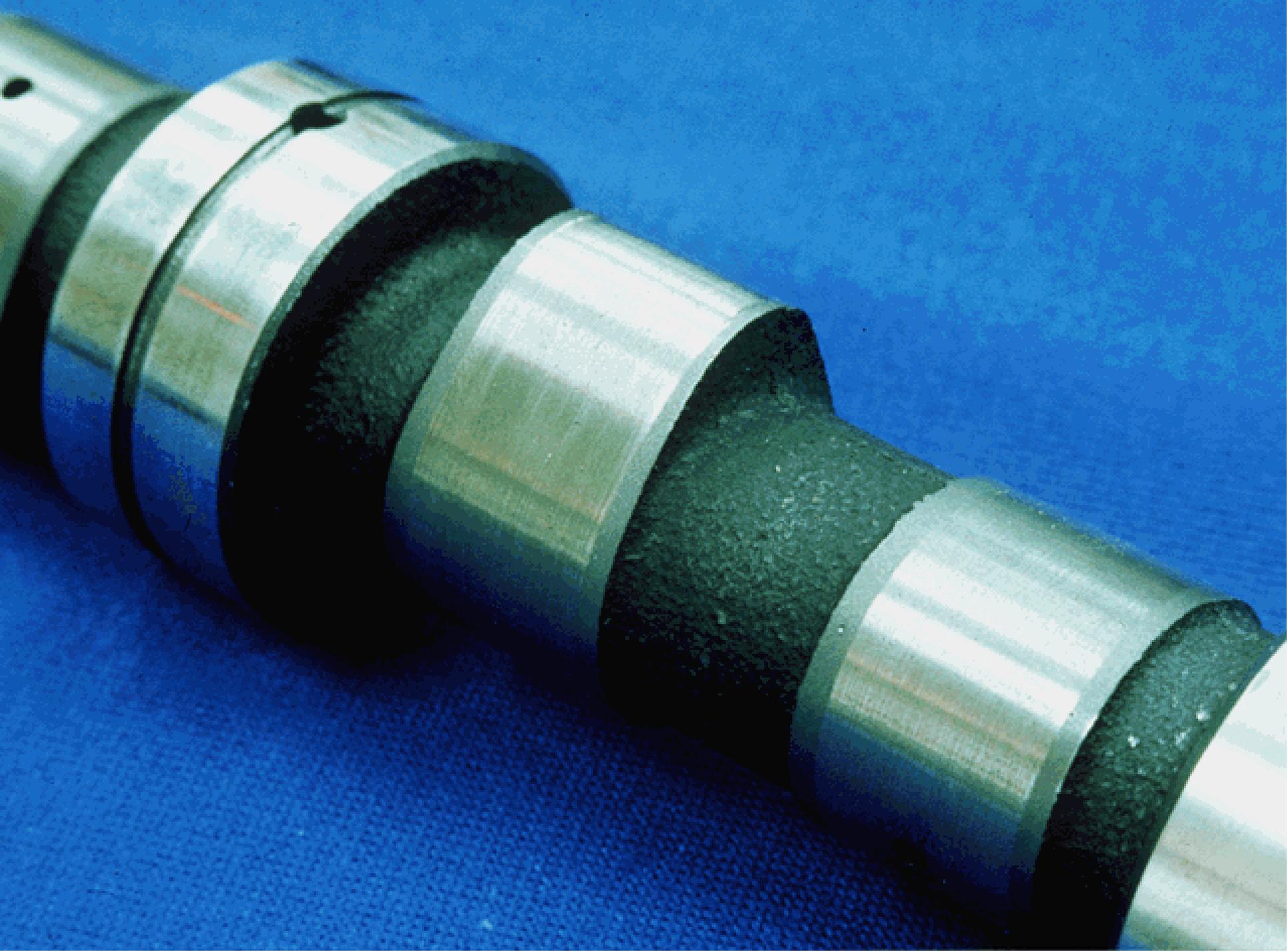
- ❖ Aceites Sintéticos
- ❖ Aceites Minerales
- ❖ Grasas
- ❖ Gases

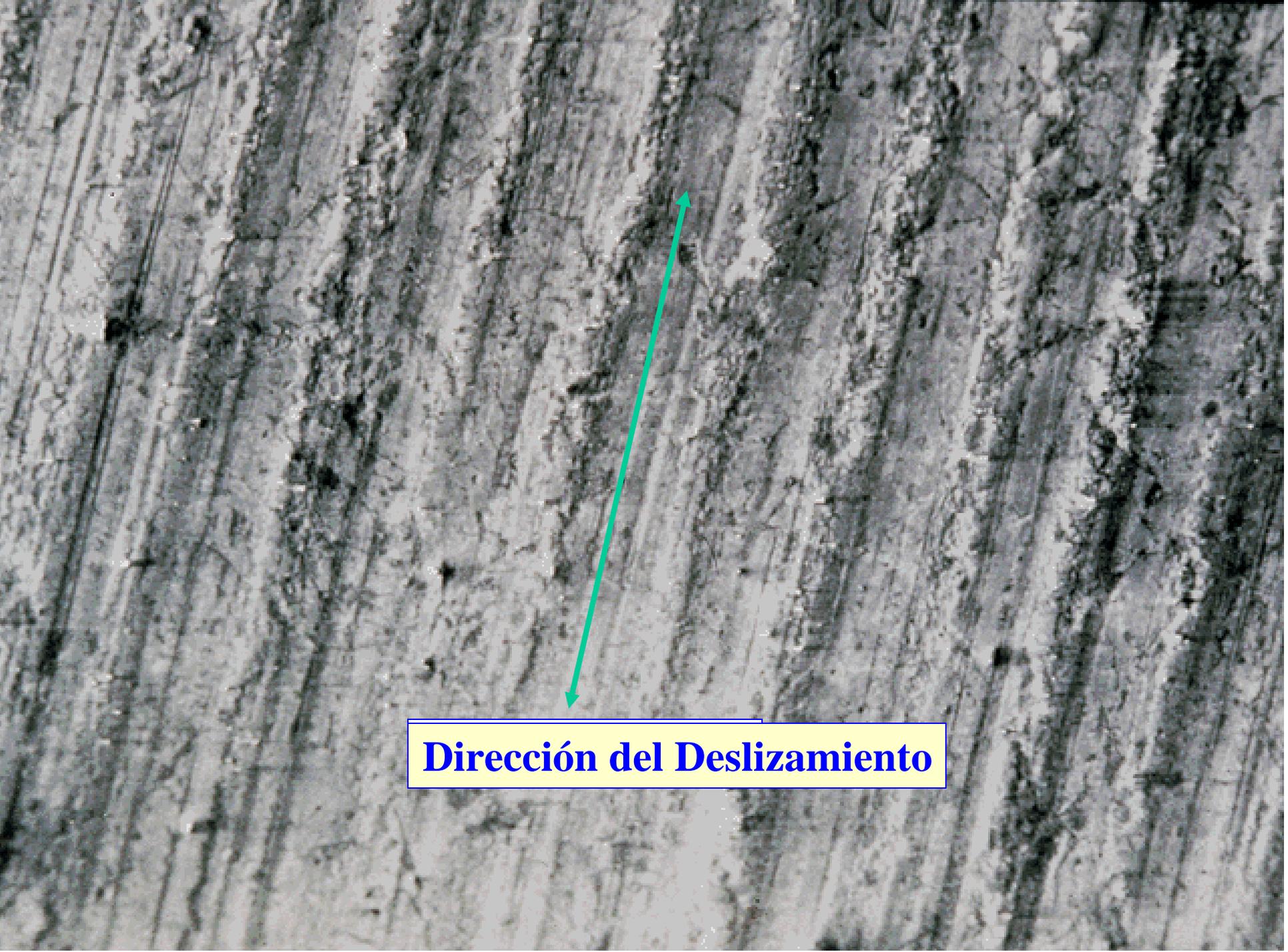
# ***Cuán pulido es el pulido?***

- 🔥 Los equipos modernos se elaboran a partir de metales, utilizando una gran variedad de técnicas de maquinado.
- 🔥 De un primer vistazo, una superficie maquinada es muy lisa, pulida
- 🔥 Pero miremos más detenidamente

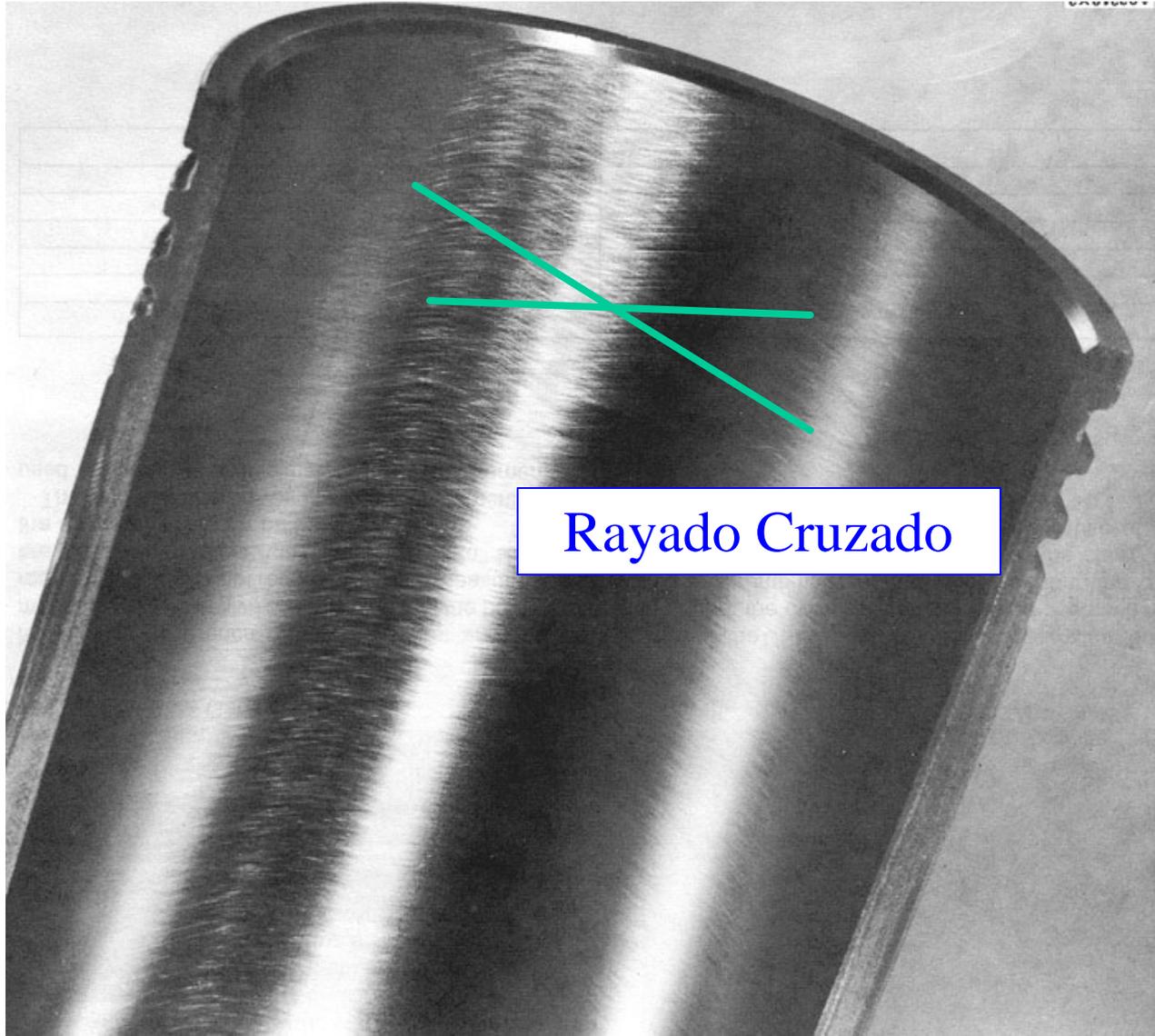




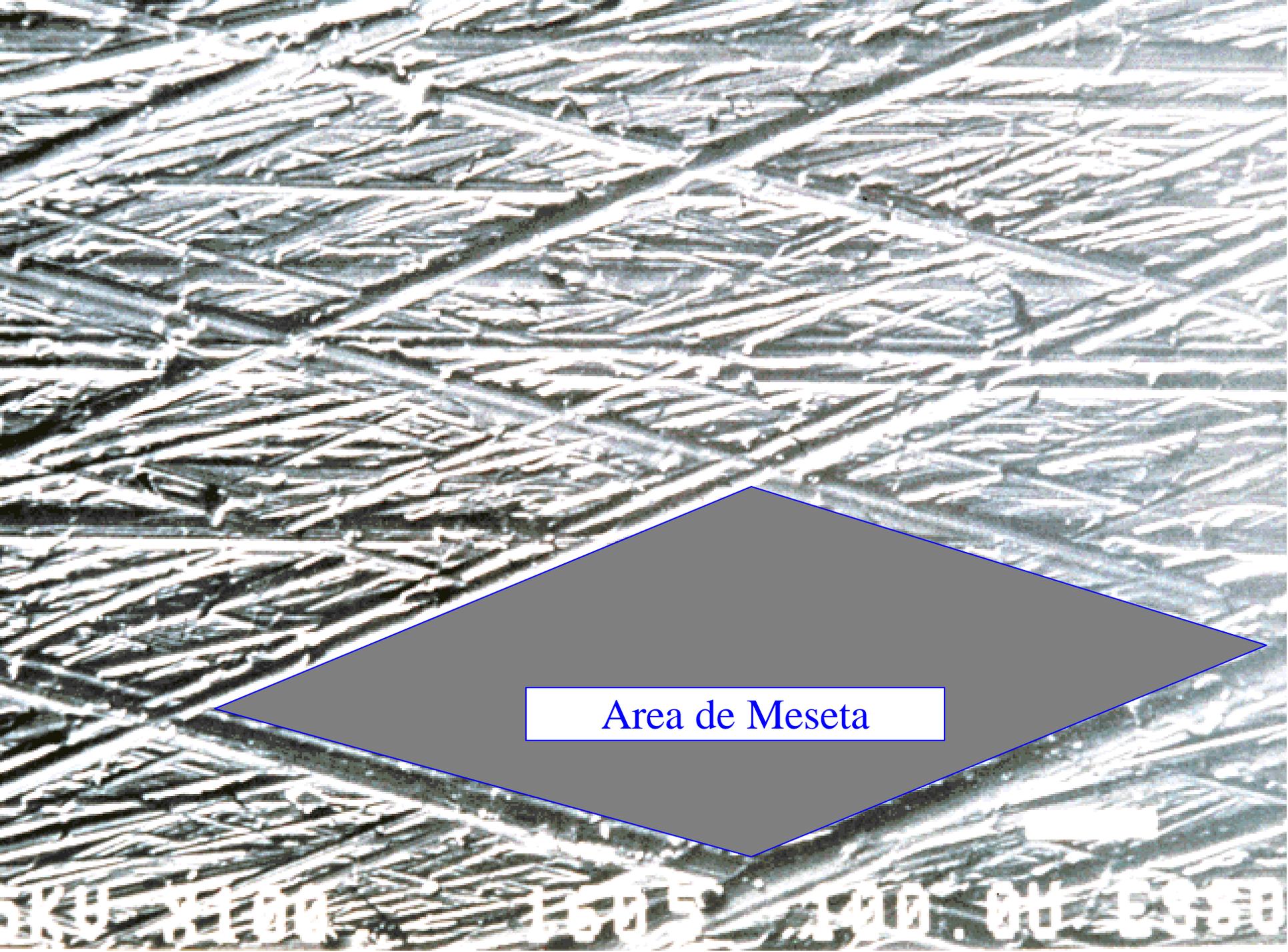




**Dirección del Deslizamiento**



Rayado Cruzado



Area de Meseta

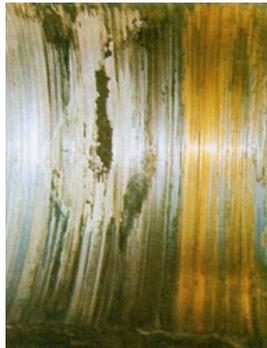
00550 00 1400 1505 8100 0000

# Desgaste



- Es un proceso de destrucción superficial por frotamiento de sólidos
- El desgaste provoca cambios en dimensiones y eventual rotura del elemento de máquina y aún la máquina misma
- Diversos cambios que ocurren en la capa de contacto dan lugar a varios tipos de desgaste

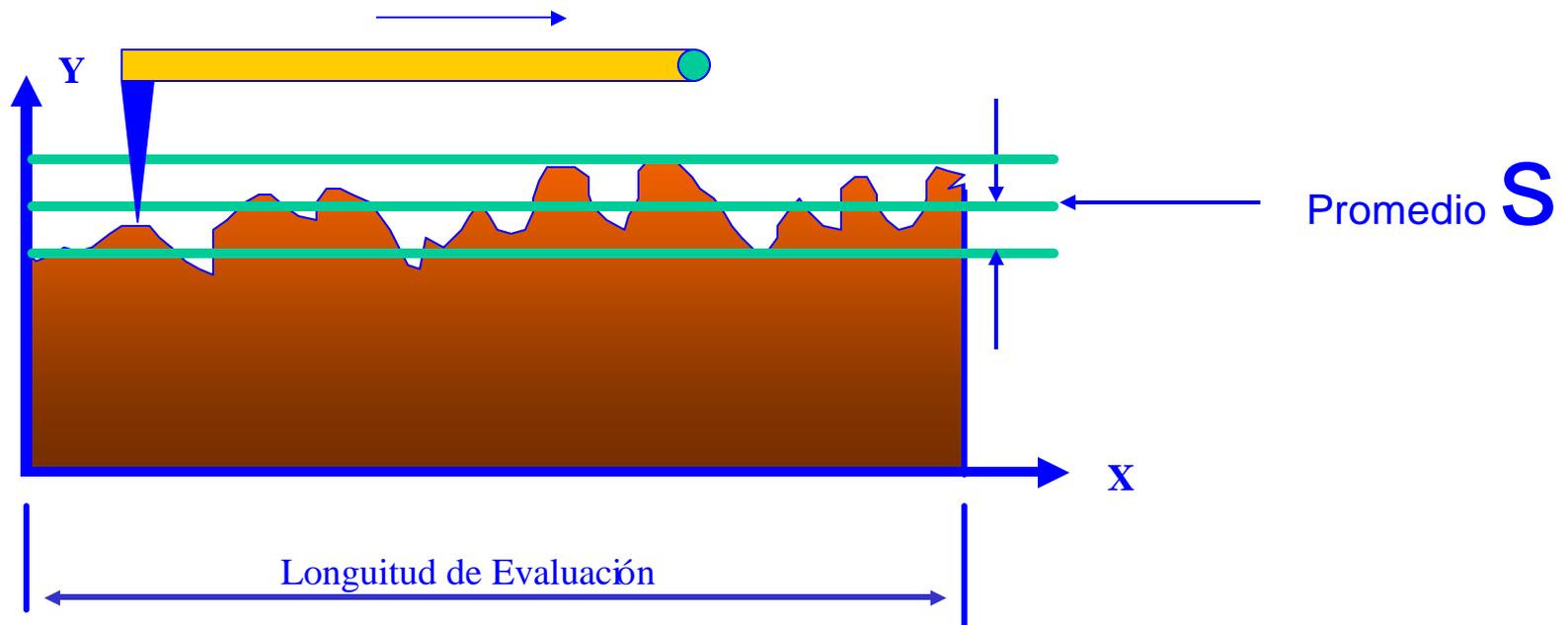
# Mecanismos de desgaste



- 🔥 **Desgaste corrosivo** --Ocorre cuando el material de la superficie reacciona químicamente con su ambiente formando una película límite
- 🔥 **Desgaste por fatiga** -- Involucra la fractura de asperezas por cargas cíclicas elevadas
- 🔥 **Desgaste abrasivo** -- Ocorre cuando una aspereza dura o un cuerpo extraño raya la superficie
- 🔥 **Desgaste adhesivo** -- partículas que son removidas de una superficie se adjuntan a la otra en fase sólida

# Rugosidad Superficial

A niveles microscópicos, la estructura superficial aparece como una serie de montañas, con picos (asperezas) y valles (rayaduras, ranuras)



- Hay muchas maneras de medir la rugosidad, la rugosidad como raíz cuadrada media  $S$  (rms) es común

# ***Rugosidades Superficiales Típicas***

## **🔥 Rodamientos**

- Bolas .05– .073 mm. rms
- Anillos/Pistas .15–.25 mm. rms
- Rodillos 0.2–0.3 mm. rms
- Pistas de Rodillos 0.25–0.5 mm. rms

## **🔥 Partes de Motor**

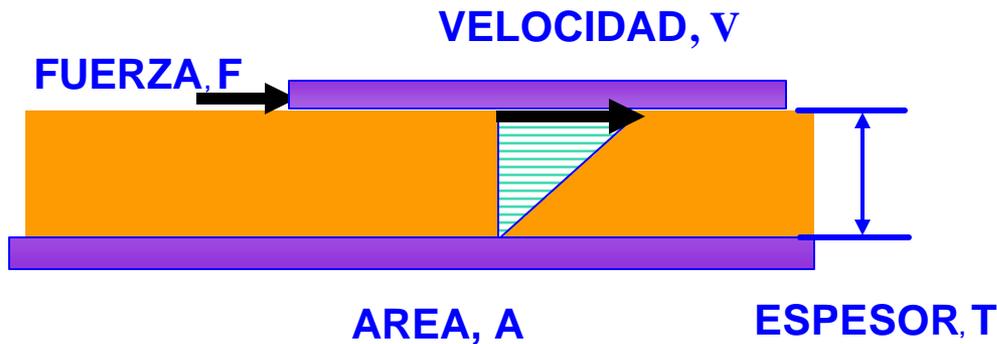
- Camisas de Cilindros 0.66 - 0.88 mm. rms

## **🔥 Superficies de Sistemas Opticos**

- Espejo de Telescopio 0.008 mm. rms

# Condiciones de Lubricación

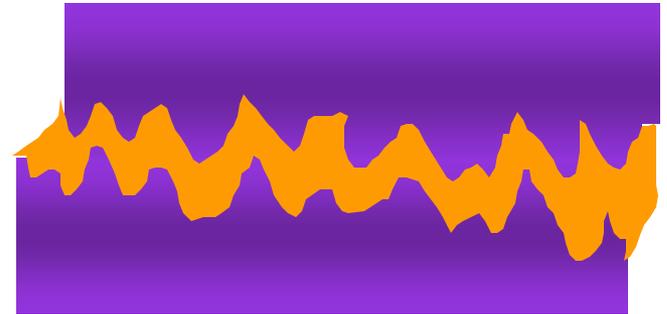
## Lubricación Liviana o Suave



$$\begin{aligned} \text{VISCOSIDAD} &= \frac{\text{ESFUERZO DE CORTE}}{\text{TASA DE CORTE}} \\ &= \frac{(F/A)}{(V/T)} \end{aligned}$$

Gobierna la Fluidomecánica

## Lubricación Severa



Gobierna la Mecánica + la Química

# ***Dos Condiciones de Lubricación Principales***

## **🔴 Condiciones Suaves de Lubricación**

- ◆ Las Superficies de Trabajo están totalmente separadas una de otra por una película lubricante consistente**
- ◆ La Viscosidad del Lubricante es la UNICA propiedad importante**

## **🔴 Condiciones de Lubricación Severas**

- ◆ Las Superficies de Trabajo están presionadas entre sí como para alcanzar contacto directo, metal a metal**
- ◆ Se tornan muy importantes los aditivos AntiDesgaste o de Extrema Presión del Lubricante!**

# ***Superficies Asperas en Contacto***

El tipo de Lubricación en el contacto, y su eficacia está determinado por el espesor de la película relativo a la rugosidad superficial.

## **Lambda**

**Espesor Específico de Película**

$\lambda$

=

**Espesor de Película**

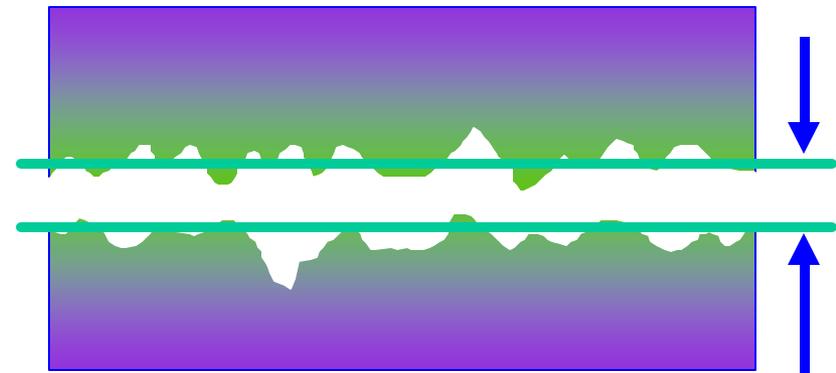
**Rugosidad Superficial**

# Superficies Asperas en Contacto



$\lambda = \text{Grande}$

Películas lubricantes gruesas o  
Baja rugosidad resultan en  
Condiciones Livianas  
de Lubricación



$\lambda = \text{Pequeño}$

Películas lubricantes delgadas o  
Alta rugosidad resultan en  
Condiciones Severas  
de Lubricación

# Que determina al $\lambda$ ??

- Para un contacto lubricado,  $\lambda$  está determinando por:
- El Equipo (material, geometría)
  - Condiciones Operativas (carga, velocidad)
  - Lubricación (viscosidad, temperatura)
- El Equipo opera en una variedad de condiciones (carga, velocidad, temperatura, etc.) que pueden llevar a ambas condiciones de lubricación, dependiendo de como se está usando en ese momento

# Regímenes de Lubricación

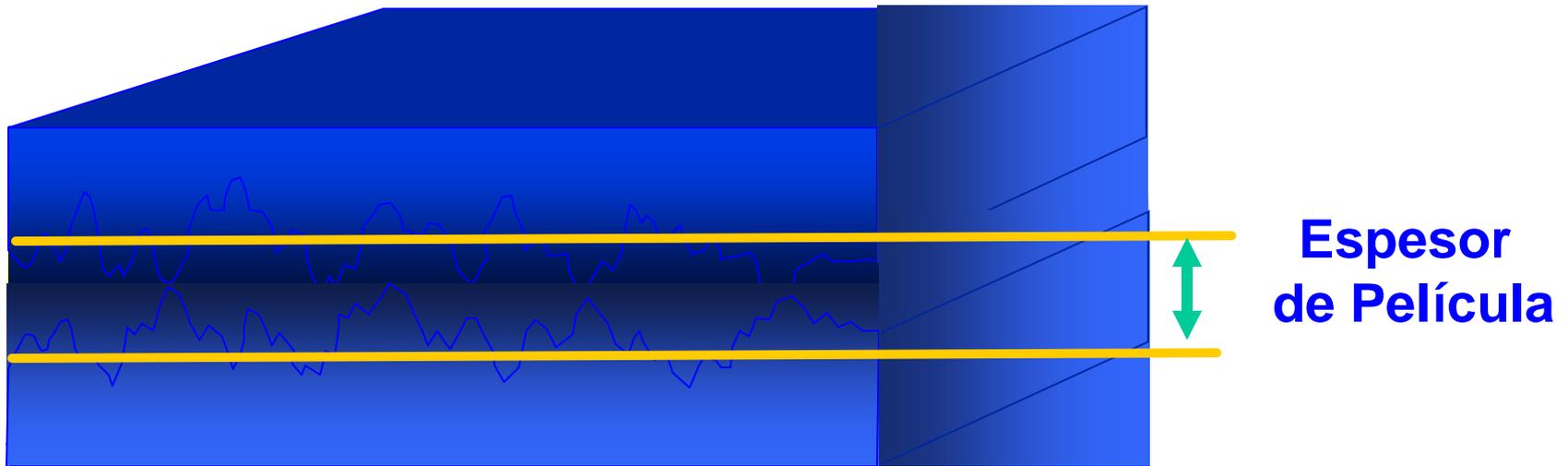
➤ Las condiciones de Lubricación se pueden clasificar además en tres regímenes de lubricación

➤ El valor de  $\lambda$  determina al régimen de lubricación



➤ Todos los contactos lubricados caerán dentro de estos tres regímenes de lubricación

# Lubricación Límite



Casi no hay película lubricante entre las dos superficies

$$\lambda < 1$$

# Lubricación Límite

- 🔴 Hay pequeños bolsillos de lubricante atrapado por las asperezas que están en contacto
- 🔴 Hay contactos superficie-a-superficie Extensos
- 🔴 La carga está soportada totalmente por el contacto superficie-a-superficie; no hay carga soportada por el lubricante
- 🔴 El Deslizamiento provoca Desgaste
  - ◆ Deformación Plástica
  - ◆ Desgaste Abrasivo
  - ◆ Desgaste Adhesivo
- 🔴 Alta fricción debida a una deformación superficial significativa

# *Ejemplos de Lubricación Límite*

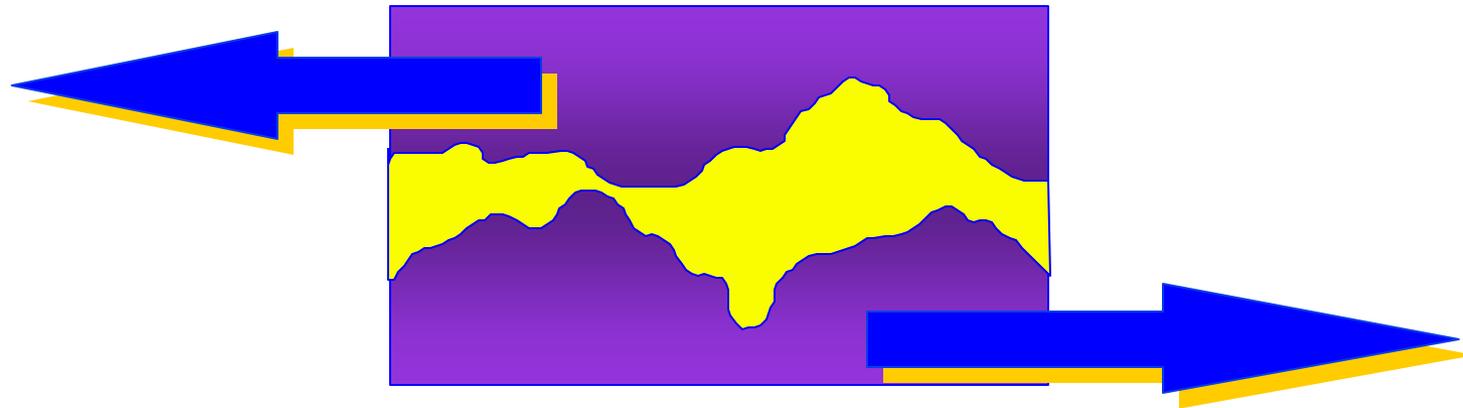
## 🔥 **Engranajes Funcionando bajo condiciones severas**

- ❖ **Alta Carga o Temperatura**
- ❖ **velocidades muy Bajas**
- ❖ **Suministro de Lubricante Limitado**

## 🔥 **Arranque de la mayoría de los equipos !!!**

# La interacción de las asperezas lleva al desgaste

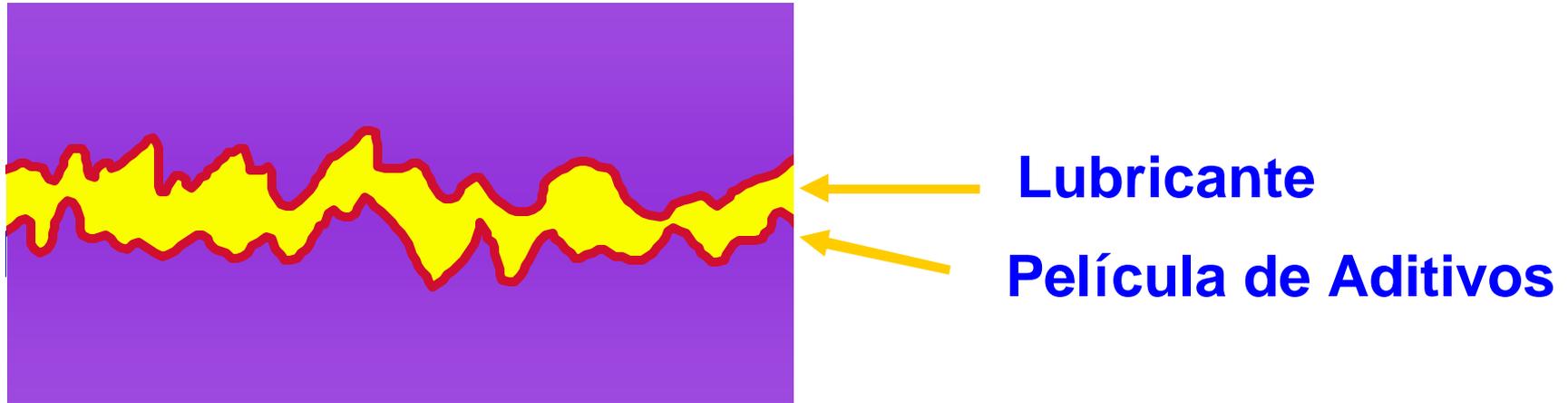
DESLIZAMIENTO



DESLIZAMIENTO

- El deslizamiento causa el contacto de las asperezas y el desgaste

# El Desgaste es controlado por los Aditivos

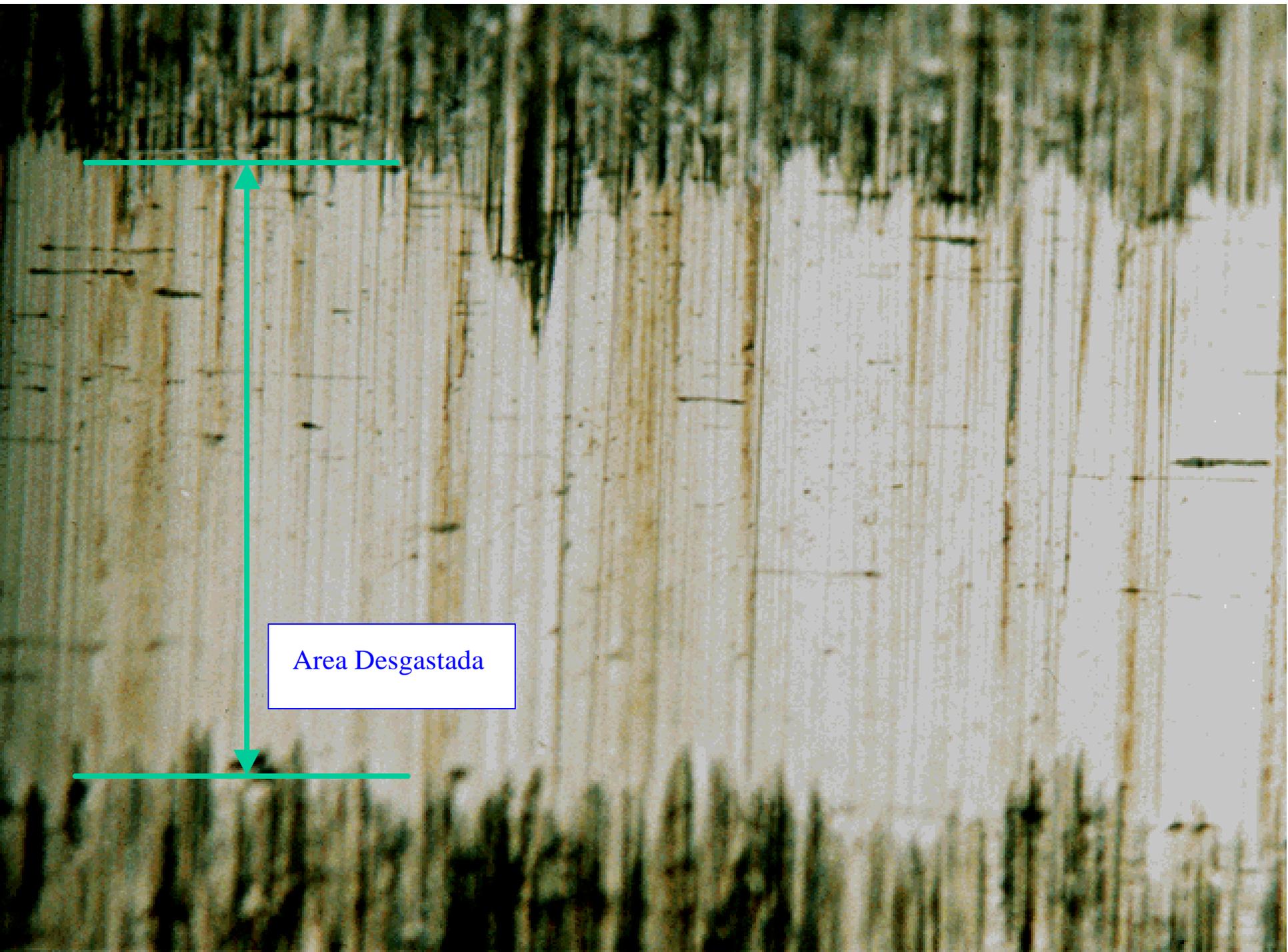


- Los aditivos Antidesgaste /Extrema Presión son polares, significa que se adhieren a las superficies metálicas
  - Antidesgaste - Zinc/Fósforo
  - Extrema Presión (EP) – Azufre/Fósforo
- The class of additive is determined by the loading of the two surfaces

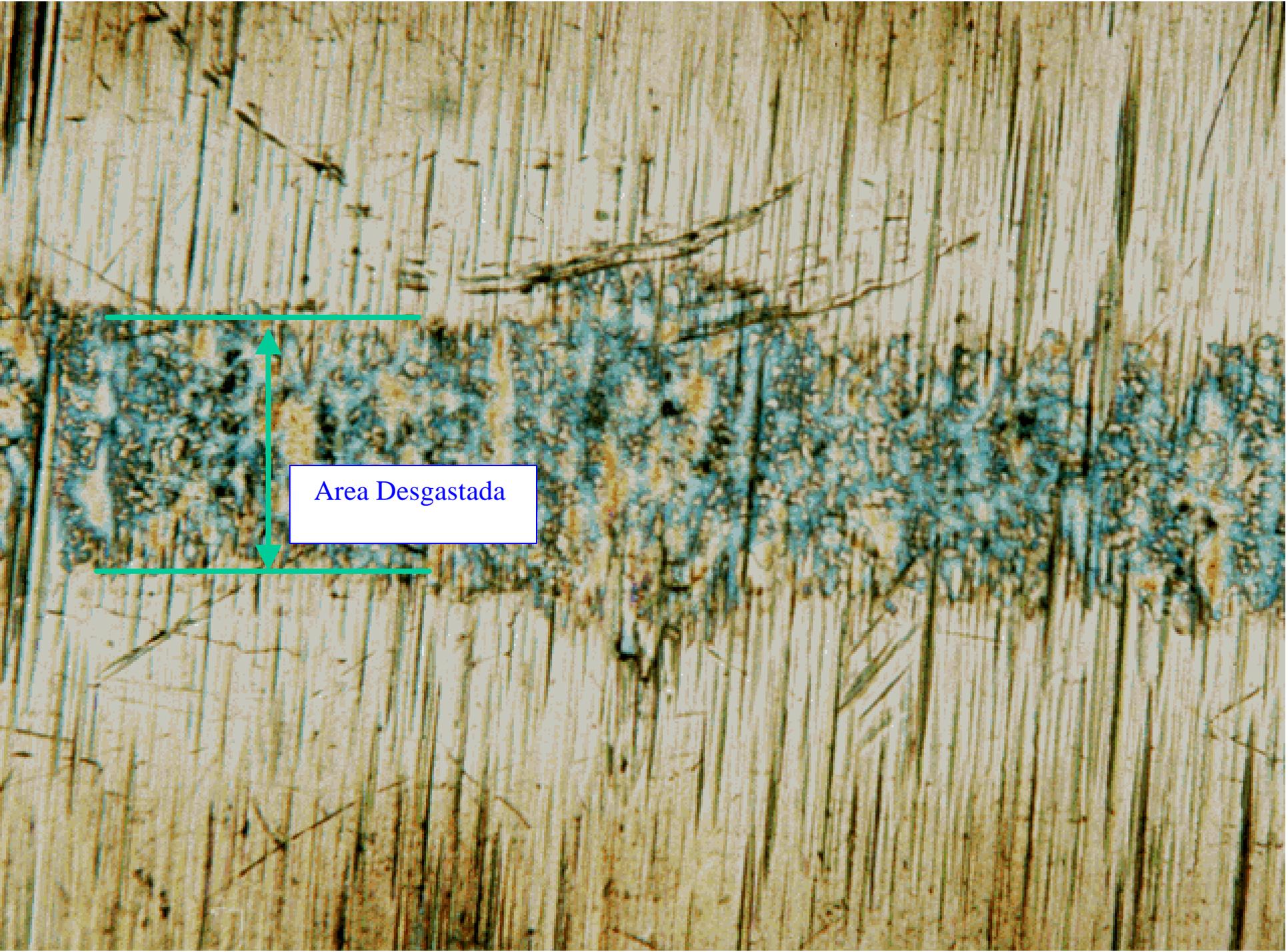
# ***El Desgaste es controlado por los Aditivos***

## 🔥 Películas de Aditivo Antidesgaste:

- Baja resistencia al corte /depósitos de sacrificio
- Actúa como un “buffer” al distribuir la carga sobre un área más grande
- Reduce la fricción minimizando la soldadura superficie-a-superficie
- Es Activado por el calor del contacto entre las asperezas
- Aplica sólo a metales de alta dureza (no en el plomo, aluminio, etc)



Area Desgastada



Area Desgastada

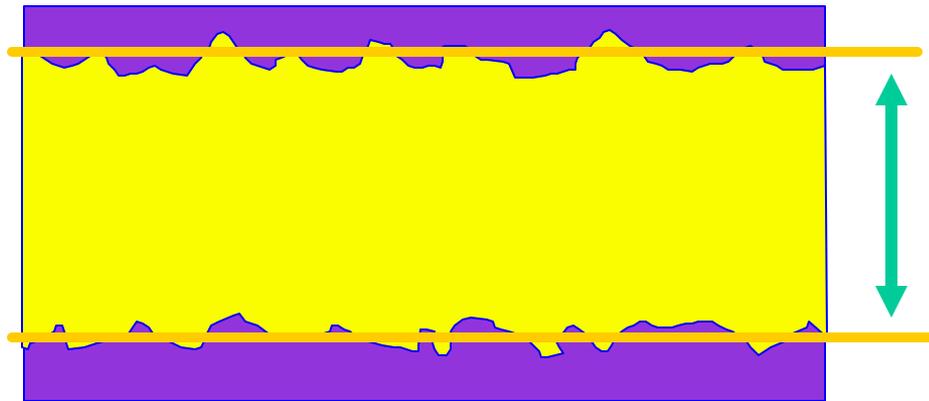
# Lubricación Mixta

- Las superficies solo están parcialmente separadas por la película lubricante
- Las cargas son soportadas por la película lubricante y el contacto superficie-a-superficie (de aquí el nombre de lubricación mixta)
- Algún Desgaste ... Fricción Moderada

$$1 < \lambda < 4$$

- 🔥 El comportamiento en el contacto está definido por todas las propiedades físicas del lubricante y por la reactividad química de sus aditivos
- 🔥 Ejemplos Típicos
  - ◆ Anillo de Pistón / camisa de cilindros en los puntos muertos superior e inferior
  - ◆ Perfil de la leva /Seguidor durante la apertura de la válvula
  - ◆ Engranajes fuertemente cargados, velocidades bajas
  - ◆ Cojinete plano durante el arranque

# Lubricación a película completa



Buen espesor de película!

- Las superficies están separadas por una gran luz de aceite

$$\lambda > 4$$

# ***Lubricación a película completa***

🔥 **Las superficies están separadas por una película de aceite**

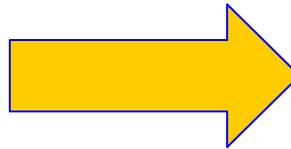
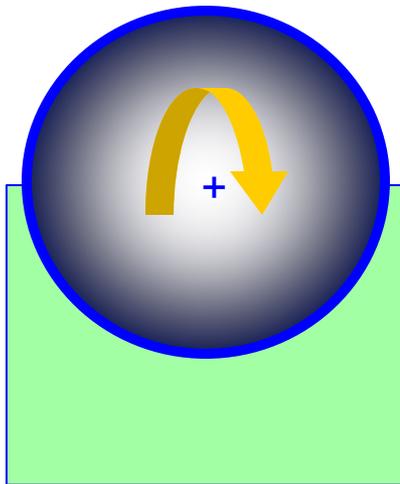
**consistente**

- ◆ No hay contacto superficie-a-superficie
- ◆ La carga está soportada totalmente por la película lubricante
- ◆ Desgaste muy bajo o inexistente
- ◆ Baja Fricción

🔥 **El tipo de lubricación a película completa está determinado por la**

**conformidad de contacto**

# ***Alta Conformidad de Contacto***



Lubricación  
Hidrodinámica

- Las superficies se tocan en grandes áreas
- Baja Presión de Contacto <400 MPa (50 kpsi)
- La Película lubricante está generada por el movimiento entre las piezas -

***Sin Movimiento NO hay Película !***

# ***Lubricación Hidrodinámica***

●  $\lambda > 4$

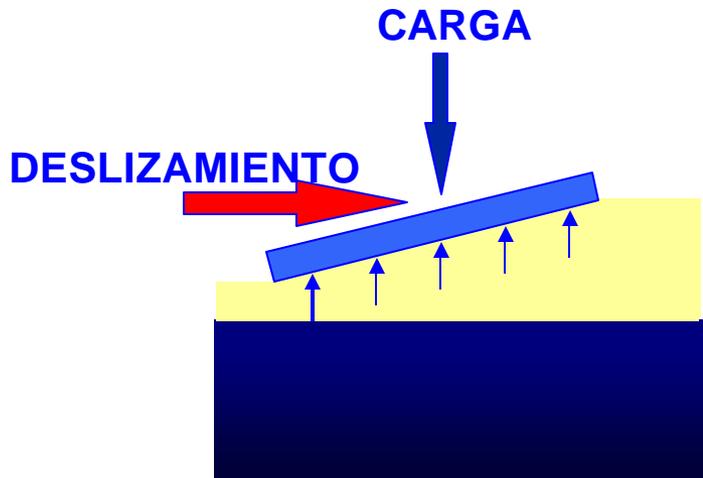
- La forma de lubricación más deseable
- Muy bajo desgaste y fricción
- Las características de fricción aparecen determinadas unicamente por la resistencia al corte del lubricante viscoso

## 🔥 Ejemplos típicos

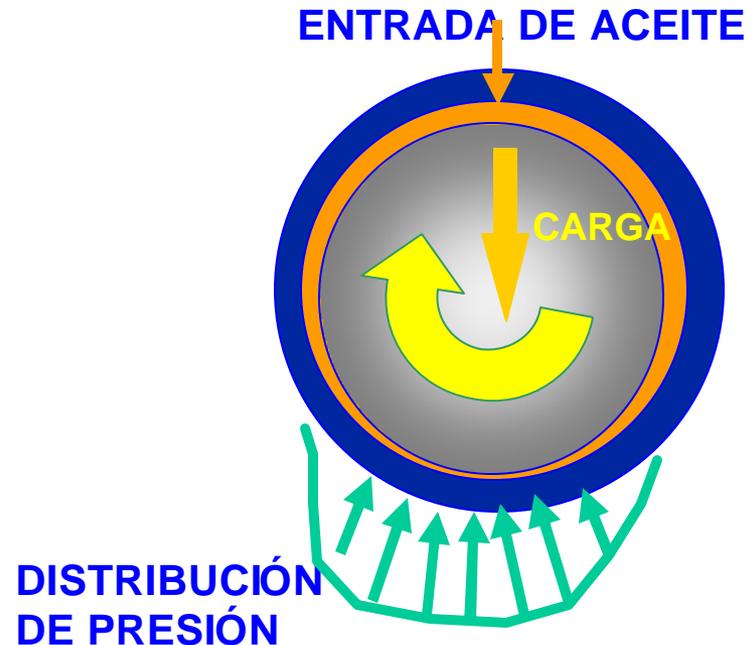
- ◆ Cojinetes planos o simples
- ◆ Cojinetes de apoyos oscilatorios (Kingsbury)
- ◆ Generalmente hay superficies de cojinetes amplias
  - ❖ **Baja carga por unidad de area**
  - ❖ **Se asume un generoso flujo de aceite!**
- ◆ Cojinetes Hidrostáticos??

# Ejemplos de Lubricación Hidrodinámica

## COJINETE DE APOYO OSCILATORIO

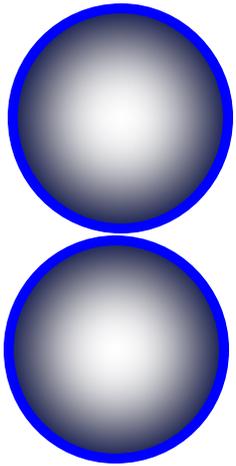


## COJINETE PLANO



La viscosidad del aceite a la temperatura operativa es un factor Crítico para lograr una lubricación satisfactoria

# Contactos de Baja Conformidad

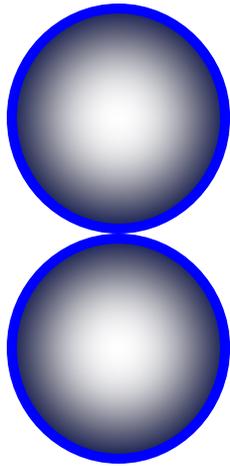


Lubricación ElastoHidrodinámica

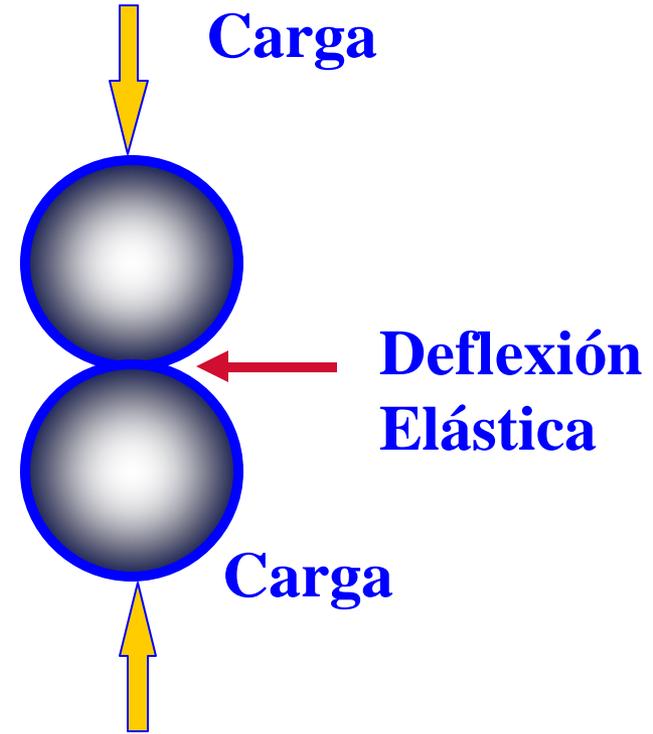
## Baja Conformidad de Contacto

- Las superficies se tocan en un área muy pequeña
- Altas Presiones de Contacto 1-3 GPa (400kpsi)

# Deflexiones Elásticas Localizadas



Tocando apenas



Bajo Carga

- Las presiones de contacto crean deflexiones elásticas significativas en la interfase

# ***Lubricación ElastoHidroDinámica (EHL)***



Mayor que 4 (usualmente menor a 10)

- Una forma de lubricación muy deseable
- El comportamiento del contacto está determinado por:
  - Propiedades del lubricante
  - Viscosidad
  - Características Presión-Viscosidad del Lubricante
  - Materiales de las superficies-Módulo Elástico

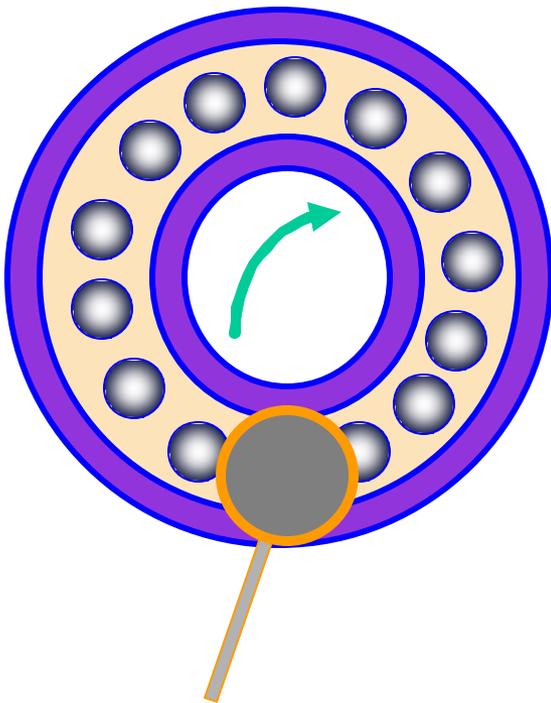
# ***Lubricación ElastoHidroDinámica (EHL)***

## Ejemplos Típicos

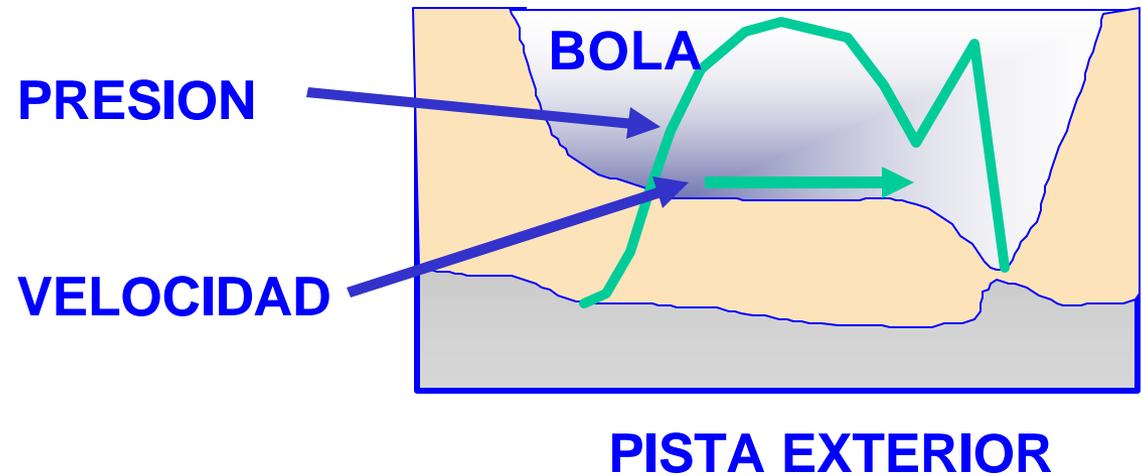
- 🔴 Engranajes
- 🔴 Elementos Rodantes de los Cojinetes
- 🔴 Levas / Seguidores

# Ejemplo de EHL

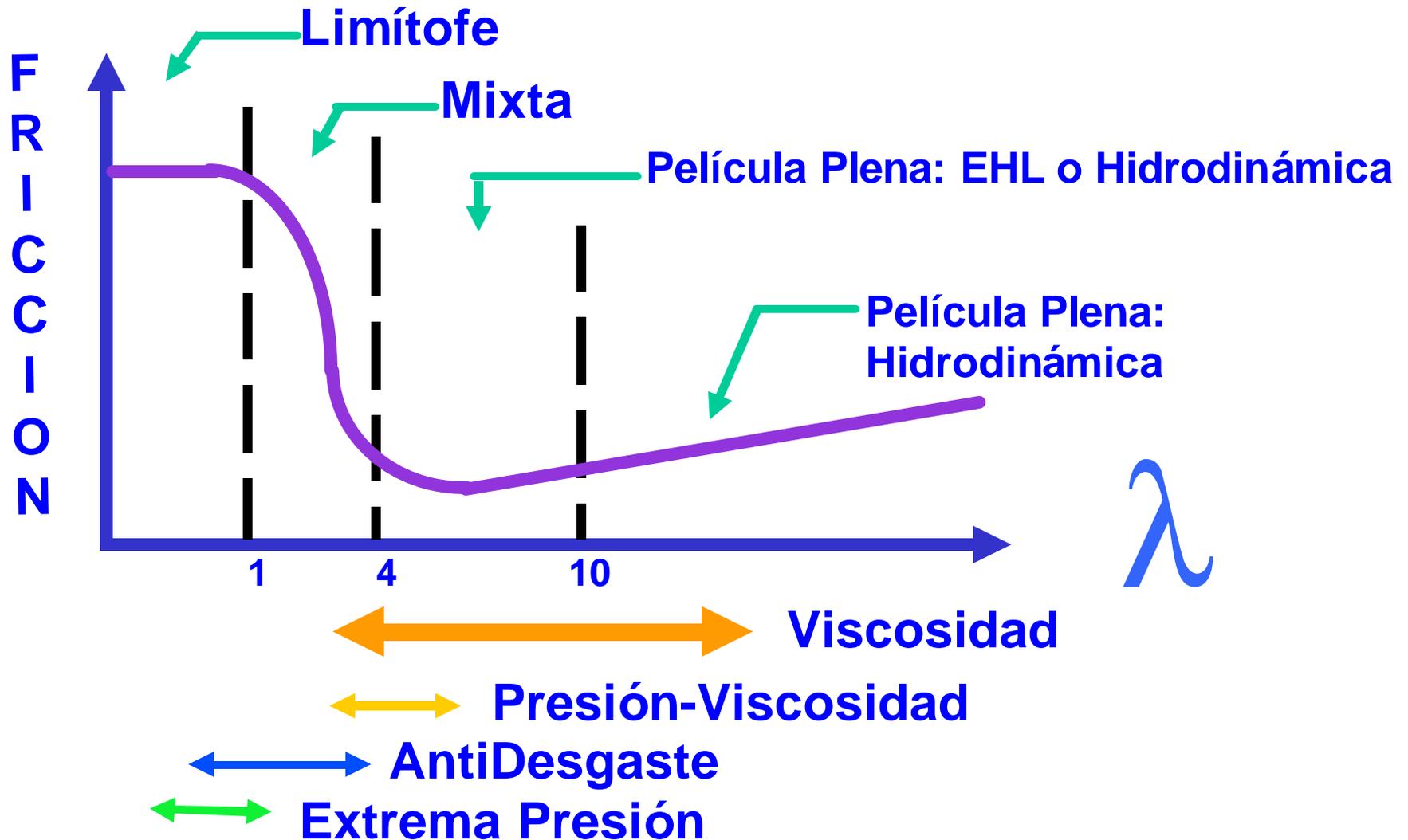
Elemento Rodante de Cojinete



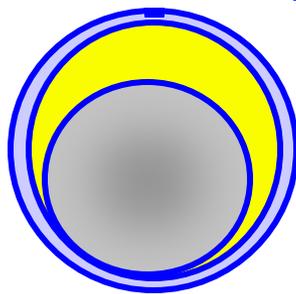
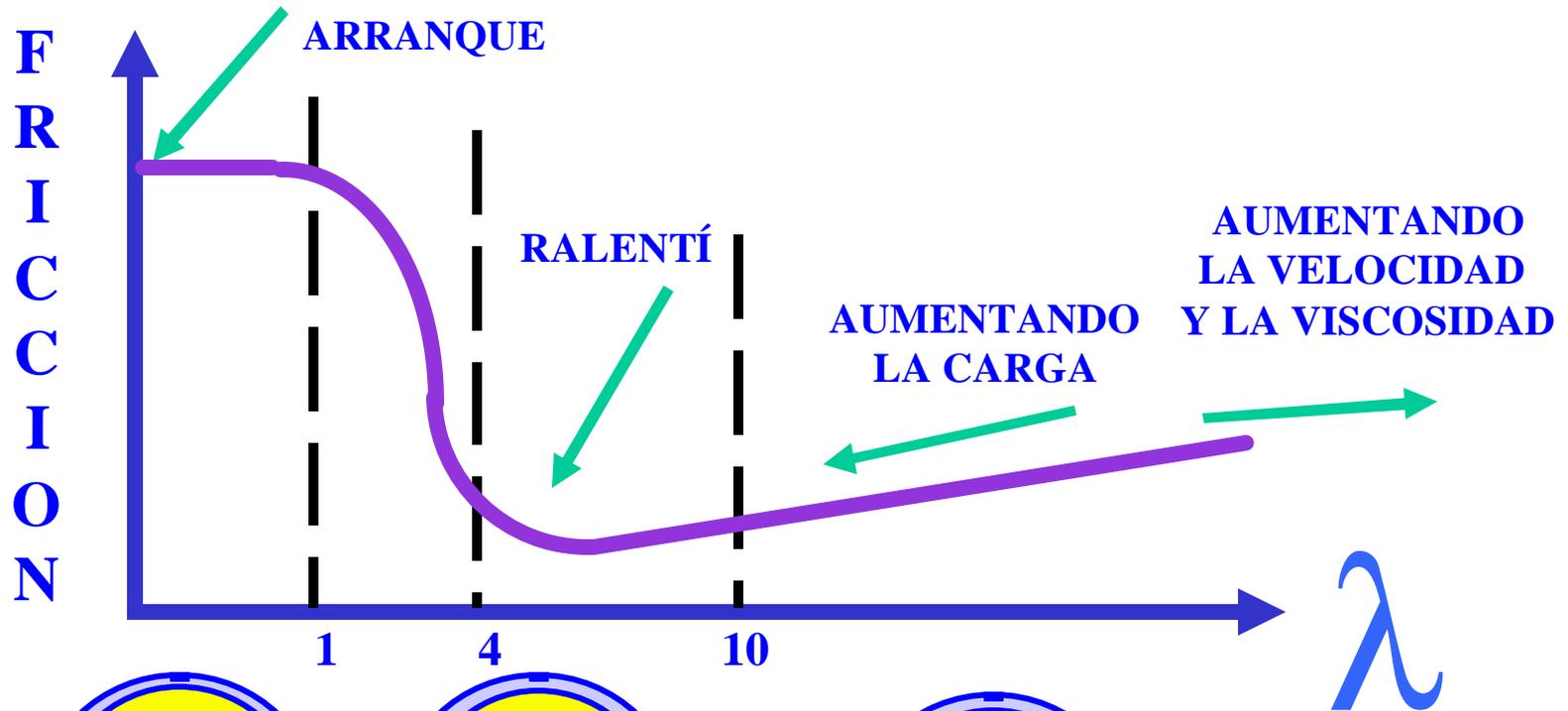
Contacto Bolas/Pista  
Vista Ampliada



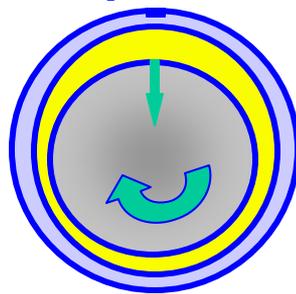
# Régimen de Lubricación y curva de Stribeck



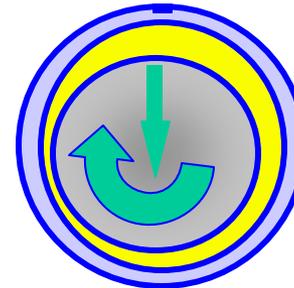
# Cojinete de Cigüeñal de Motor



Arranque (no hay película)



Ralentí (película delgada)



Operación Intermedia