

# MAGNA

INSTITUCIÓN DE ESPECIALIZACIÓN PROFESIONAL

CURSO DE ESPECIALIZACIÓN

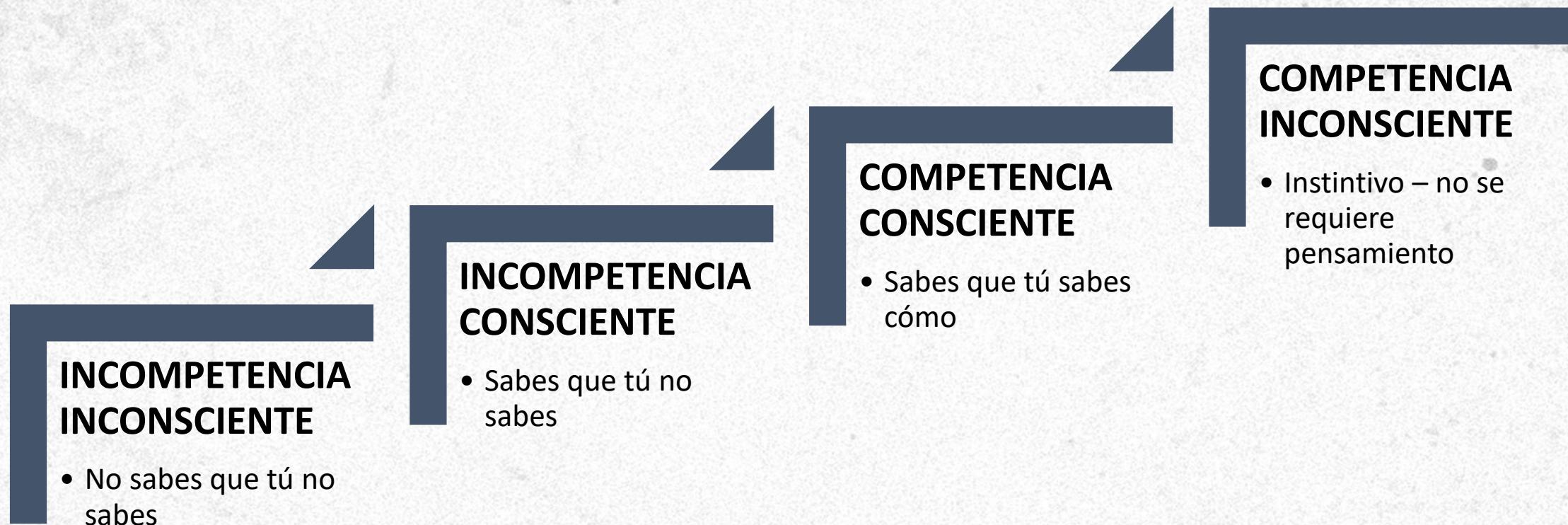


# GESTOR EN TRIBOLOGÍA & LUBRICACIÓN PARA EL MANTENIMIENTO

# Módulo I: Tribología

- Introducción a la tribología y sus aplicaciones en el mantenimiento industrial
  - . Principios de fricción, desgaste y lubricación
  - . Tipos de fricción.
  - . Tipos de desgaste de las superficies

# Escalera del conocimiento



La Tribología se centra en el estudio de tres fenómenos; la fricción entre dos cuerpos en movimiento, el desgaste como efecto natural de este fenómeno y la lubricación como un medio para evitar el desgaste.

## TRIBOLOGÍA

- La palabra Tribología tiene su origen del griego “tribos” que significa fricción, y se define como la ciencia y práctica de los fenómenos de fricción, desgaste y lubricación.



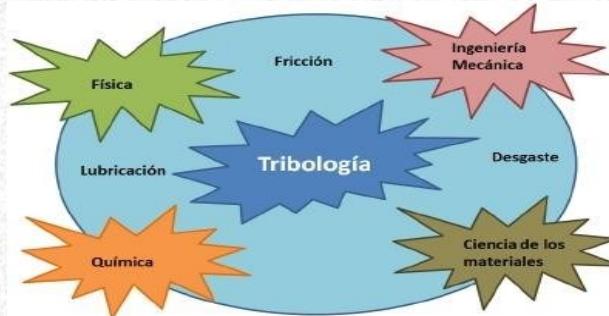
# LA TRIBOLOGIA DESDE UNA PERSPECTIVA EN LA ACTUALIDAD



## ¿ QUE INVESTIGA LA TRIBOLOGIA?

**La interacción entre dos superficies en contacto y en movimiento relativo, se manifiesta como fricción y está relacionada en forma implícita con el desgaste mecánico. Como consecuencia lógica el trabajo de mantenimiento industrial, por mucho tiempo considerado como una actividad secundaria en el sistema de producción.**

**La TRIBOLOGÍA aplica a problemas tales como confiabilidad, mantenimiento y desgaste de equipos, abarca desde la tecnología aeroespacial hasta aplicaciones domésticas. El entendimiento de las interacciones superficiales abarca conocimiento de varias disciplina incluyendo la física, química, matemáticas aplicadas, mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, termodinámica, transferencia de calor, ciencia de materiales, lubricación, diseño de máquinas.**



# OBJETIVOS DE LA TRIBOLOGIA



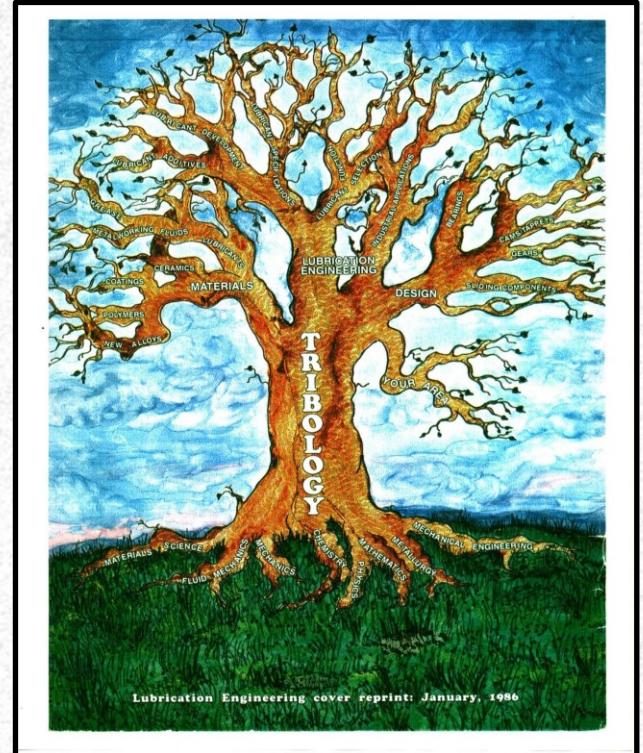
**El principal objetivo de la Tribología, es elevar la vida útil de las máquinas, mediante la disminución de la fricción y el desgaste; evitando un gasto en materiales, energía y tiempo.**

## AREAS DE INVESTIGACION DE LA TRIBOLOGIA

- **Cojinetes hidrodinámicos**
- **Tipos de Desgaste**
- **Aditivos y aceites base**
- **Lubricación elastohidrodinamica**
- **Fricción**
- **Transferencia tecnológica**
- **Recubrimientos y tratamientos superficiales**
- **Diseño de cojinetes**
- **Lubricación limite e Hidrodinámica**

# APLICACIONES DEL CONOCIMIENTO DE LA TRIBOLOGIA

- Motores eléctricos
- Motorreductores
- Motores de combustión (componentes y funcionamiento)
- Forja
- Turbinas y compresores
- Reductores de velocidad (Engranajes)
- Procesos de corte (herramientas y fluidos)
- Rodados
- Fundición
- Sistemas hidráulicos
- Sistemas de Transmisión
- Fundición
- Cadenas, cables y acoplos
- Rodamientos
- Cojinetes
- Sellos
- Embragues y frenos
- Prótesis articulares (cuerpo humano)



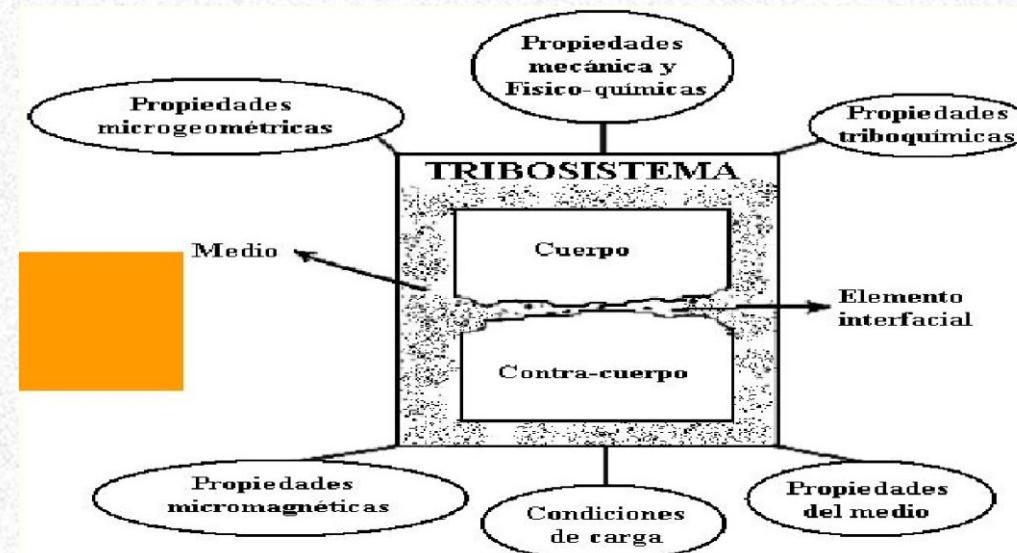
## SISTEMA TRIBOLOGICO:

En los estudios de fricción y desgaste el término más utilizado es la noción de sistema tribológico. Un sistema tribológico, se identifica como un par mecánico y se caracteriza por los siguientes parámetros:

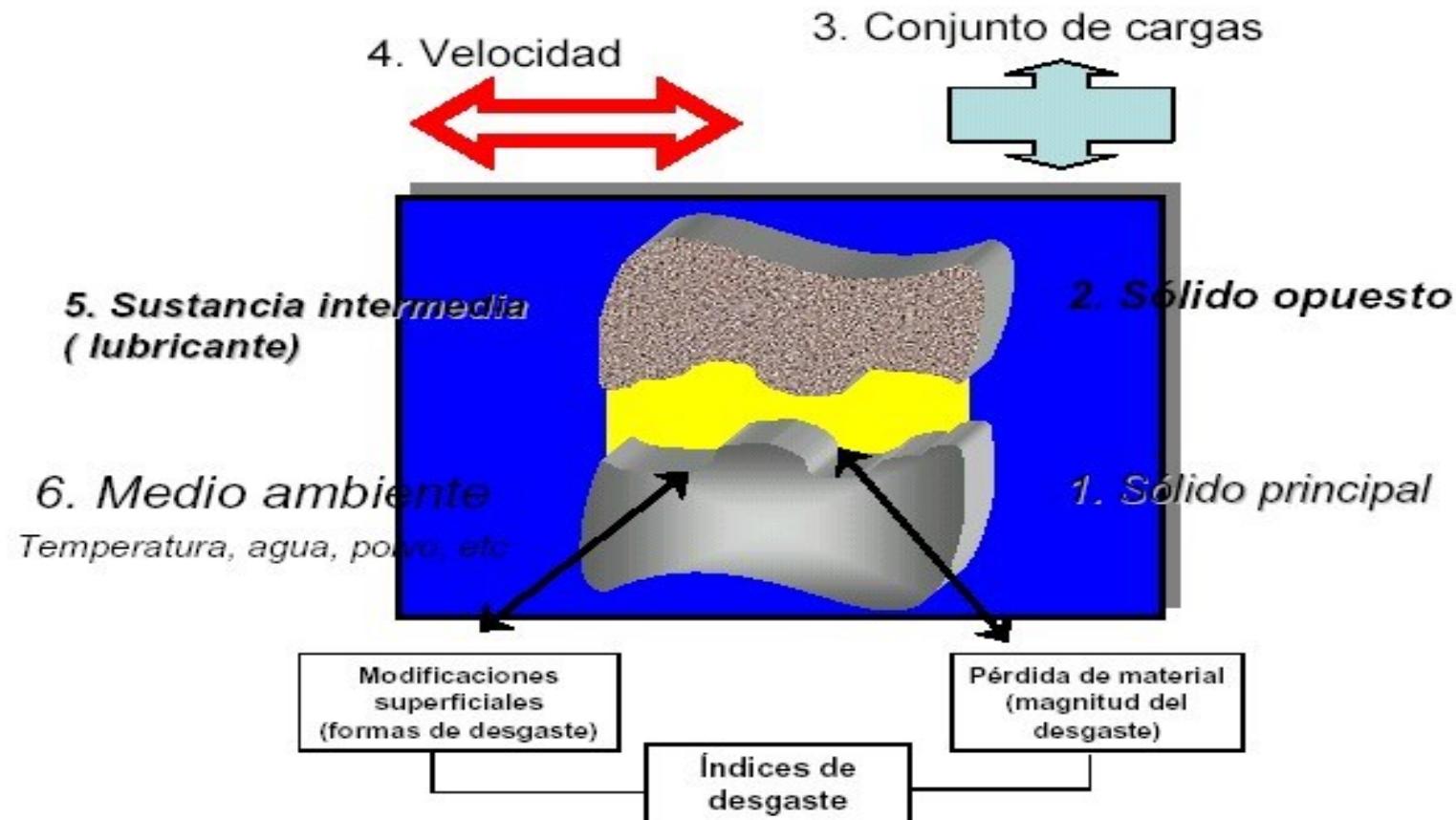
- **Características geométricas de las superficies en contacto**
- **Propiedades de los materiales de los constituyentes del tribo-sistema: cuerpos sólidos, lubricantes (si es el caso) y el ambiente**
- **Régimen cinemático, indicado por las velocidades relativas de los cuerpos en contacto**
- **Régimen dinámico (la carga normal sobre la superficie de contacto y la fuerza de fricción asociada)**

En cualquier situación donde se producen fenómenos de fricción y desgaste, están involucrados cuatro tribo componentes:

- 1) Entorno: oxígeno, humedad, temperatura, gas, atmósfera contaminada, agua de mar, electrolito, fluido biológico, etc.
- 2) Tribo - Elemento Cuerpo : materiales/recubrimientos
- 3) Elemento Interfacial: agua, aceite, grasa, aire, etc.
- 4) Tribo – Elemento Contra Cuerpo : materiales/recubrimientos

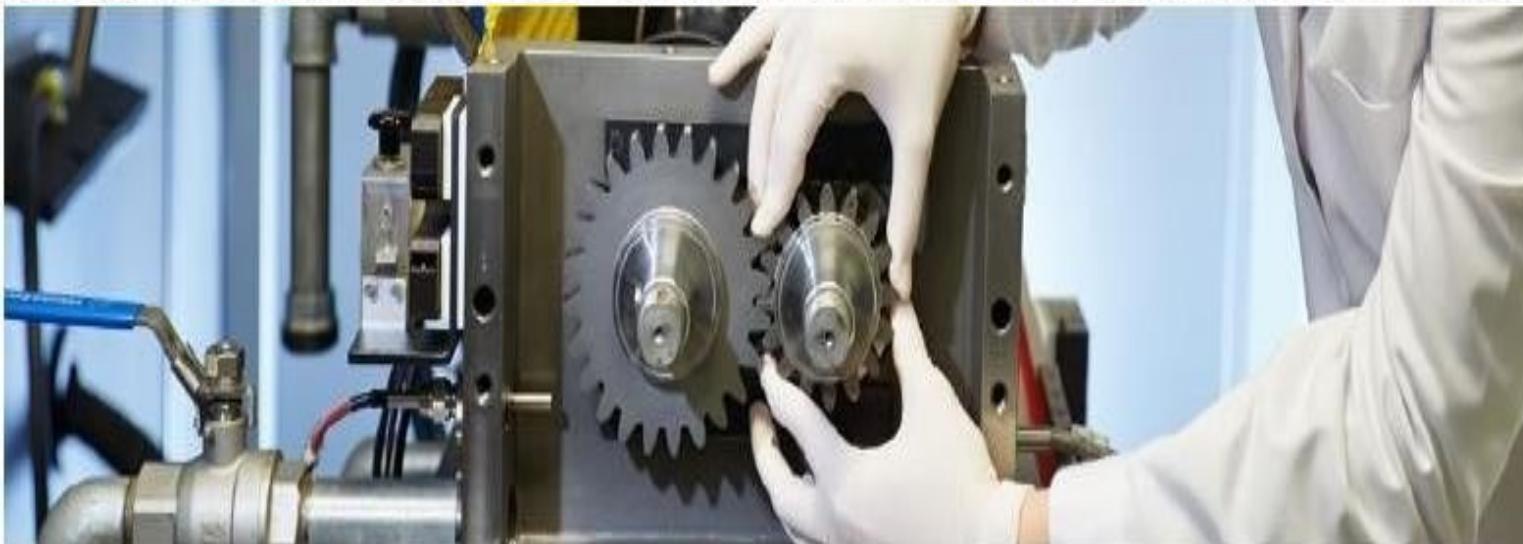


# SISTEMA TRIBOLÓGICO



# ANÁLISIS DE UN SISTEMA TRIBOLÓGICO

- **Comportamiento de diferentes materiales/tratamientos superficiales/lubricantes en las mismas o diferentes condiciones de trabajo**
- **Propuesta de materiales/tratamientos superficiales/lubricantes alternativos**
- **Análisis de las causas de fallo de un sistema mecánico**
- **Control de los parámetros que afectan al ensayo**



## EJEMPLOS DE SISTEMAS TRIBOLOGICOS

Sistema Tribológico	Función Técnica	Elementos de Sistema
<b>Mecanismo Aro-Camisa</b>	• Transmisión del movimiento	<b>Base:</b> Aro <b>Contracuerpo:</b> Camisa <b>Sust. Intermedia:</b> Lubricante <b>Medio Circundante:</b> Aire
<b>Sistema de freno</b>	<b>Detención del movimiento</b>	<b>Base:</b> Pastilla de freno <b>Contracuerpo:</b> Disco <b>Sust. Intermedia:</b> No tiene <b>Medio Circundante:</b> Aire
<b>Engranaje</b>	<b>Transmisión de Energía</b>	<b>Base:</b> Rueda conductora <b>Contracuerpo:</b> Rueda conducida <b>Sust. Intermedia:</b> Lubricante <b>Medio Circundante:</b> Aire
<b>Contactos eléctricos</b>	<b>Transmisión de electricidad</b>	<b>Base:</b> Contacto móvil <b>Contracuerpo:</b> Contacto Fijo <b>Sust. Intermedia:</b> Agente protector <b>Medio Circundante:</b> Aire

## ¿Como ayuda la Tribología y la Lubricación a incrementar la productividad?



## **FRICCION O ROZAMIENTO**

**La fricción se define como la resistencia al movimiento durante el deslizamiento o rozamiento que experimenta un cuerpo sólido al moverse sobre otro con el cual está en contacto. Esta resistencia al movimiento depende de las características de las superficies.**

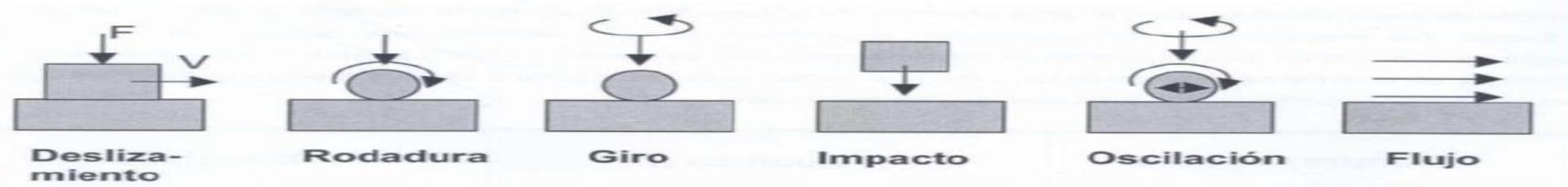
**Una teoría explica la resistencia por la interacción entre puntos de contacto y la penetración de las asperezas. La fricción depende de:**

- 1. La interacción molecular (adhesión) de las superficies**
- 2. La interacción mecánica entre las partes**
- 3. La fuerza de resistencia que actúa en una dirección opuesta a la dirección del movimiento se conoce como fuerza de fricción.**

**Existen dos tipos principales de fricción: fricción estática y fricción dinámica. La fricción no es una propiedad del material, es una respuesta integral del sistema.**

## Exigencias sobre la superficie del material

### - Mecánicas:



Desgaste  
Fricción

Pareja de materiales  
Movimiento relativo

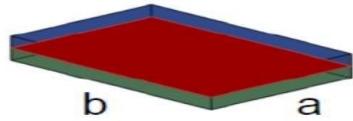
### - Electroquímicas:

Corrosión

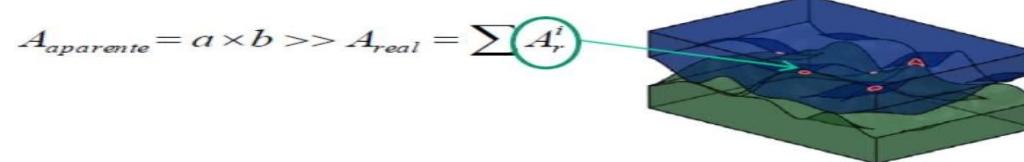
#### Fricción

#### Área real de contacto

La rugosidad superficial confina el contacto entre sólidos a una mínima fracción del área aparente de contacto.



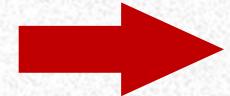
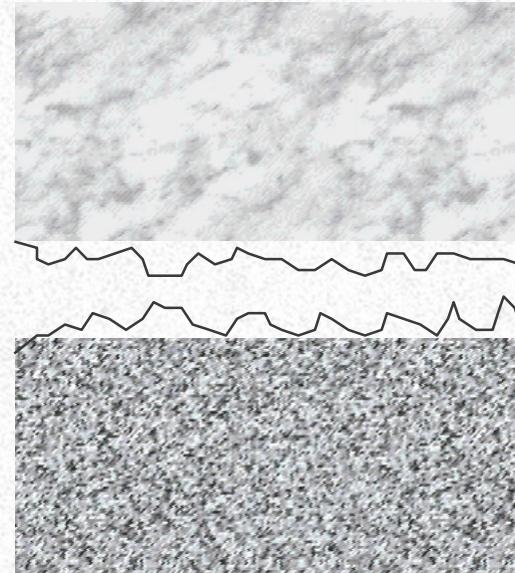
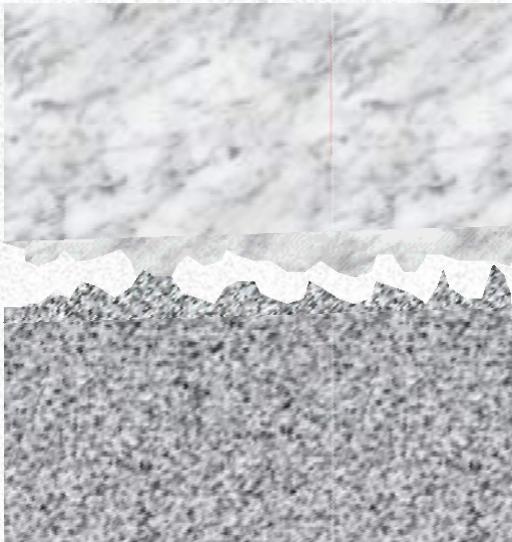
Contacto aparente



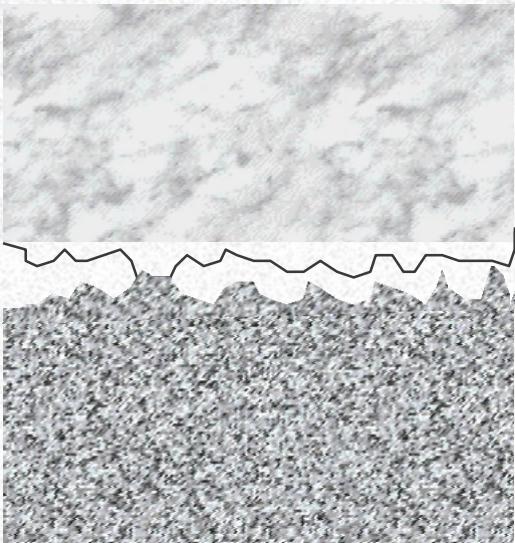
Contacto real

Independientemente de la calidad y acabado de las superficies, solamente se producirán contactos en las regiones en que las asperezas se toquen y éstos serán los que realmente soporten la totalidad de la carga aplicada

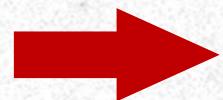
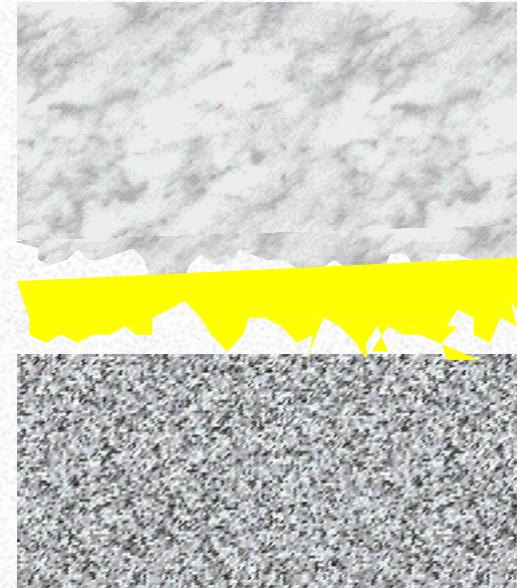
El área real de contacto normalmente varía entre  $10^{-2}$  y  $10^{-5}$  veces el área aparente



**La Fricción genera calentamiento,  
desgaste y perdida de potencia**



**Fricción Solida**



**Fricción Fluida**

## Parámetros que influyen en la fricción

### Materiales en contacto

- Tipos de materiales
- Parámetros superficiales
- Reactividad química
- Elasticidad, dureza
- Etc...

### Sistema Tribológico

### Condiciones ambientales

- Temperatura
- Humedad
- Etc...

### Lubricación

- Composición química
- Viscosidad
- Estabilidad
- Etc...

### Factores del sistema:

- Velocidad relativa
- Dirección del movimiento : unidireccional bi-, multidireccional
- Carga aplicada

# LA FRICCIÓN TIENE GRAUES CONSECUENCIAS...



# TIPOS DE FRICCIÓN (SOLIDA, MIXTA Y/O FLUIDA) Y COEFICIENTE DE FRICCIÓN

## FRICCIÓN:

De acuerdo con las condiciones operacionales de velocidad, carga dinámica, temperatura de operación y rugosidad de las superficies de fricción de los dientes de los engranajes, se puede presentar fricción sólida, mixta o fluida, dando lugar a ruido de baja o de alta intensidad(decibeles) y vibraciones, que hacen que la vida disponible de los engranajes, en horas de operación, sea reducida y no se alcance las horas especificadas por el fabricante.



Los tipos de Fuerza de fricción pueden ser:

1. Metal-metal.
2. Sólida permanente o transitoria.
3. Mixta permanente o transitoria.
4. Fluida.

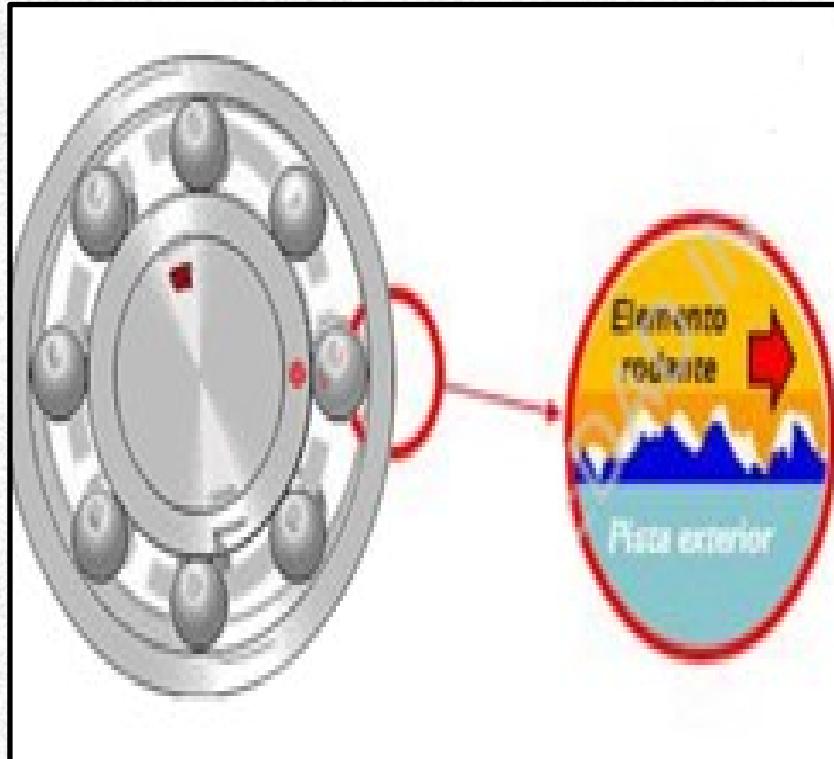
## FUERZA DE FRICTION METAL - METAL:

Tiene lugar cuando la rugosidad de una superficie metálica desliza directamente sobre la otra, puede ser de baja, mediana o de alta intensidad, dependiendo del tipo de materiales en contacto, rugosidad, carga dinámica, velocidad y temperatura.



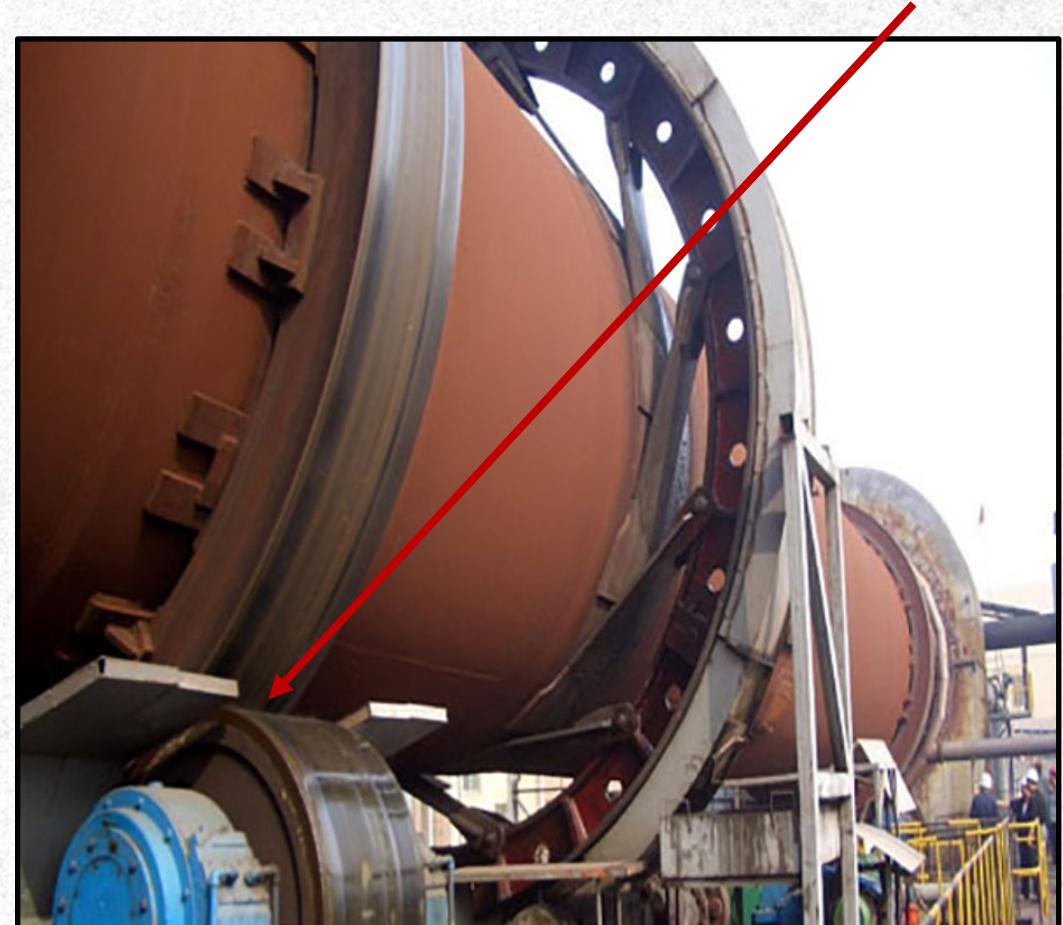
## FUERZA DE FRICTION SOLIDA – TRANSITORIA O PERMANENTE:

Puede ocurrir de manera transitoria cuando los mecanismos lubricados se ponen en operación o se detienen o de manera permanente cuando se queda en esta condición y los aditivos metálicos del lubricante forman un capa límite metálica, aislando las dos superficies de fricción.



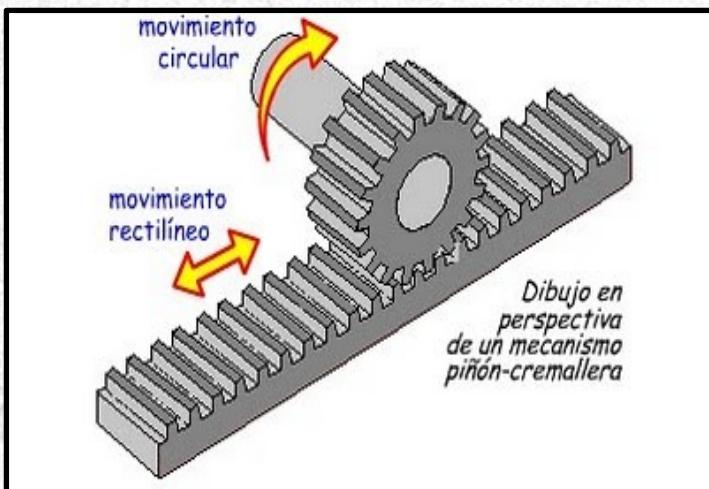
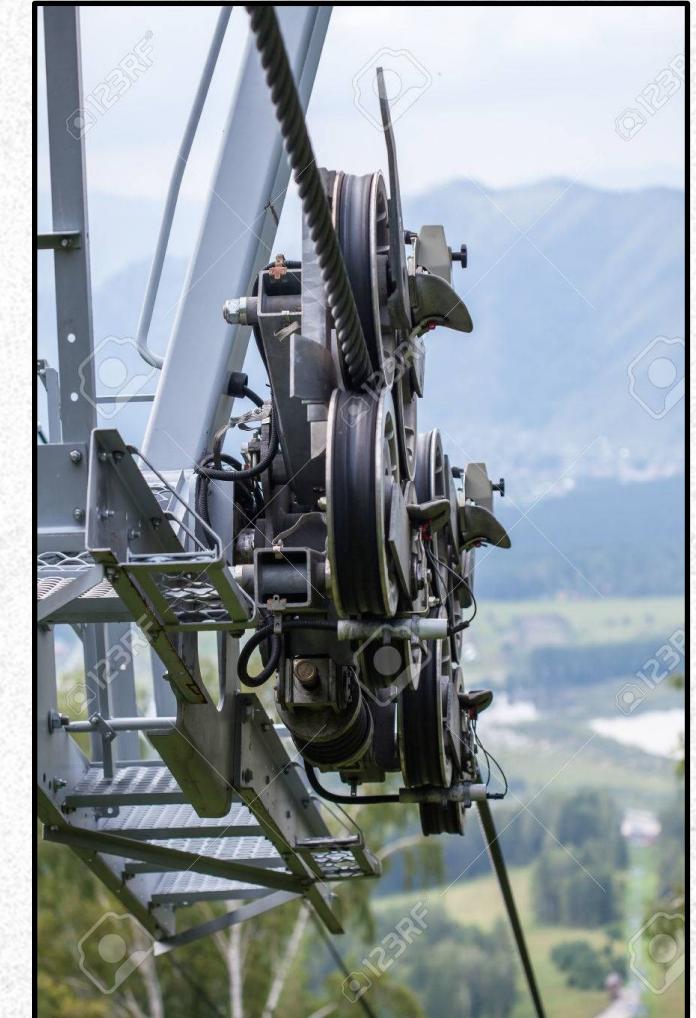
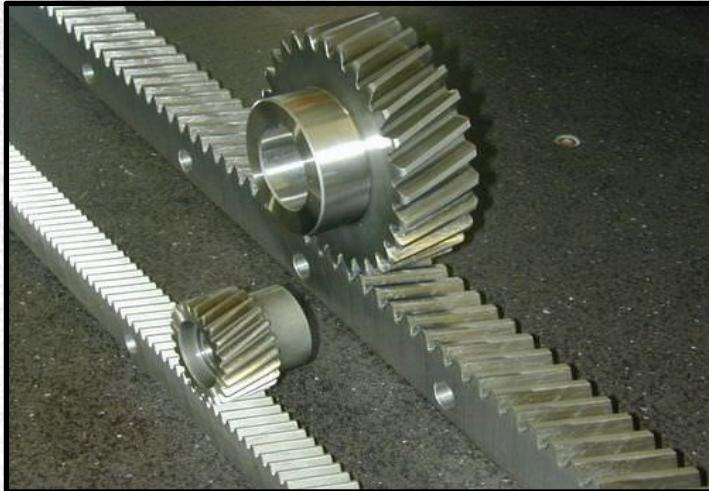
## FUERZA DE FRICTION SOLIDA – PERMANENTE LUBRICACION LIMITE:

**Se utiliza un lubricante sólido que forme la capa límite metálica de un espesor aproximado de 1 micra. En este caso el desgaste adhesivo es moderado y la lubricación es límite (LL).**



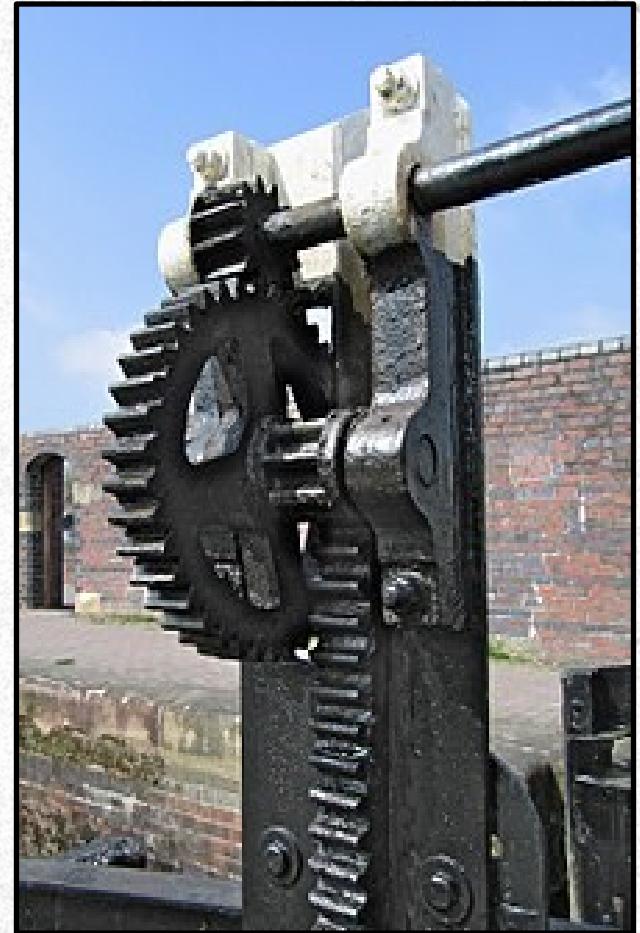
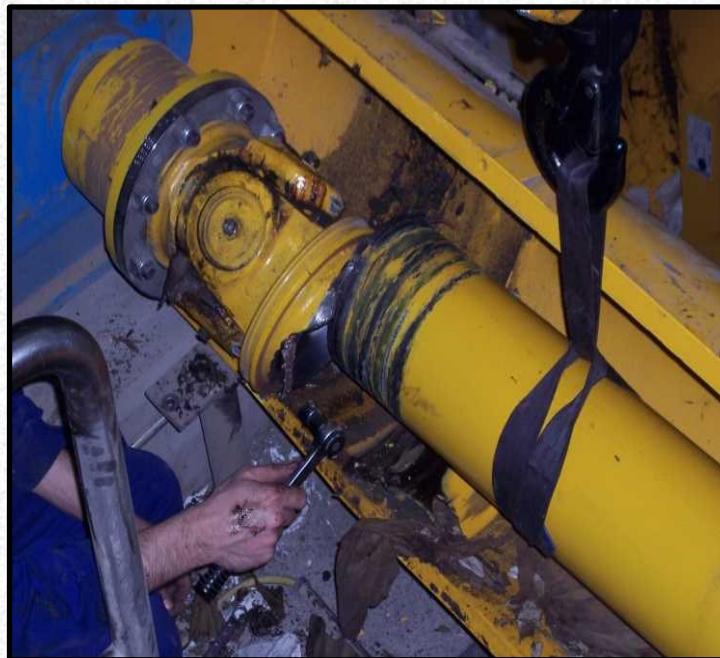
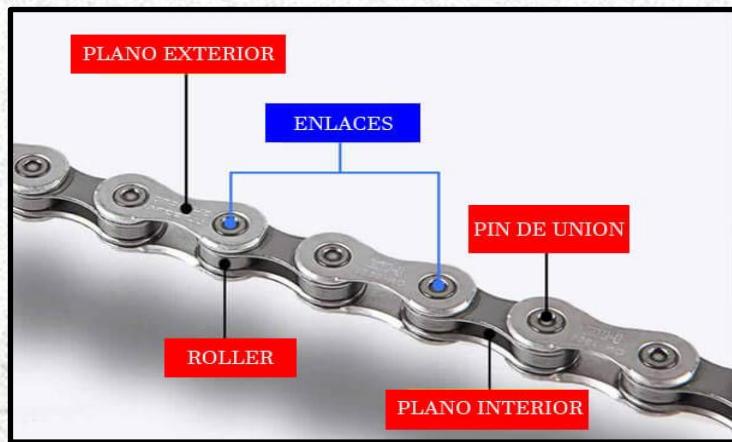
## FUERZA DE FRICTION SOLIDA – PERMANENTE LUBRICACION LIMITE:

Ocurre cuando el movimiento es intermitente giratorio o lineal a velocidades de 10 o menos rpms.



## FUERZA DE FRICTION SOLIDA – PERMANENTE LUBRICACION LIMITE:

En las cadenas de rodillos en las zonas de fricción del pasador, buje fijo, rodillo y dientes del piñón y del sprocket ; bujes y pasadores de acoples cardanicos y piñón cremallera



## FUERZA DE FRICTION SOLIDA TRANSITORIA:

Se presenta cuando la velocidad rotacional es tal que la fricción solida pasa a mixta y hay una combinación de fricción solida y fluida.



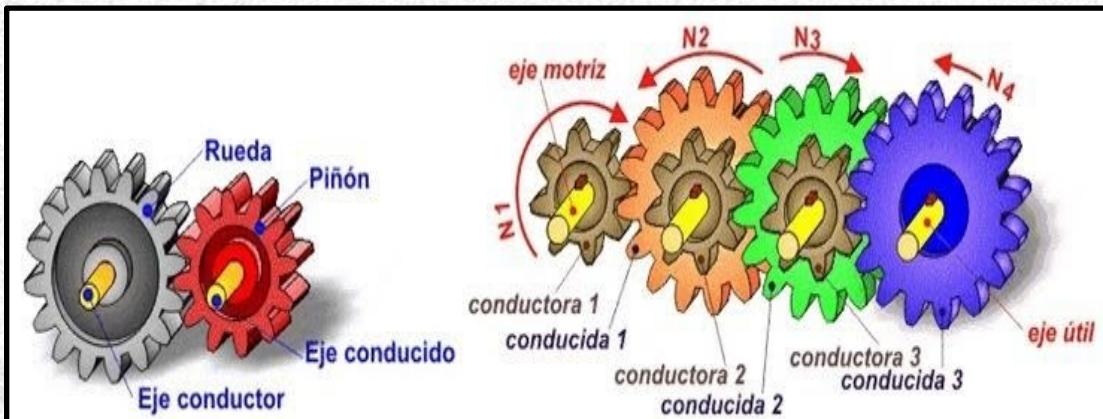
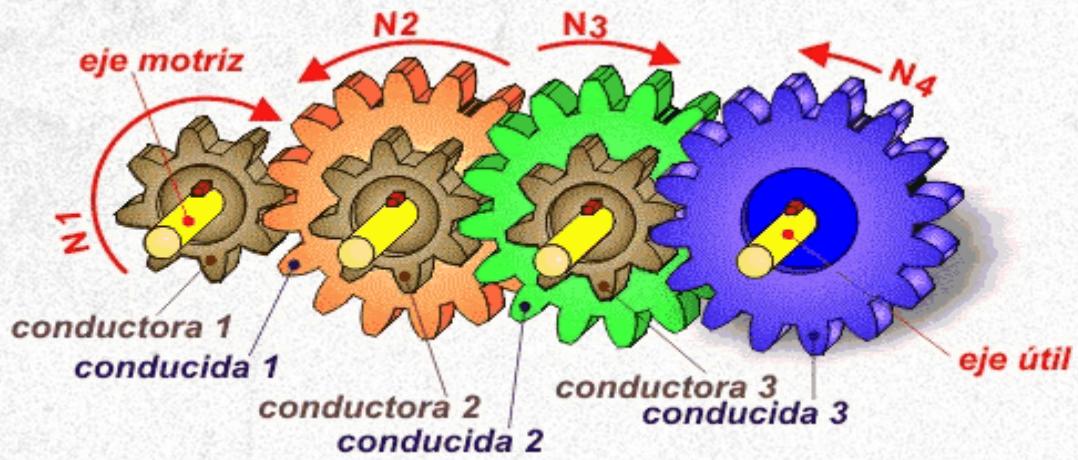
## Fricción Mixta en Reductores de Velocidad:

La fricción mixta ocurre cuando el reductor opera con velocidades y torques que permiten la presencia de capas metálicas y de un fluido en menor proporción. Esto provoca interacciones entre las crestas de rugosidad de las superficies, que se deforman elásticamente, generando un coeficiente de fricción moderadamente alto y temperaturas de operación alrededor de 60 °C. La condición puede ser permanente con lubricación elastohidrodinámica o transitoria si es hidrodinámica. A medida que aumentan la velocidad del eje y el flujo de aceite, la fricción sólida disminuye, transicionando a fricción mixta



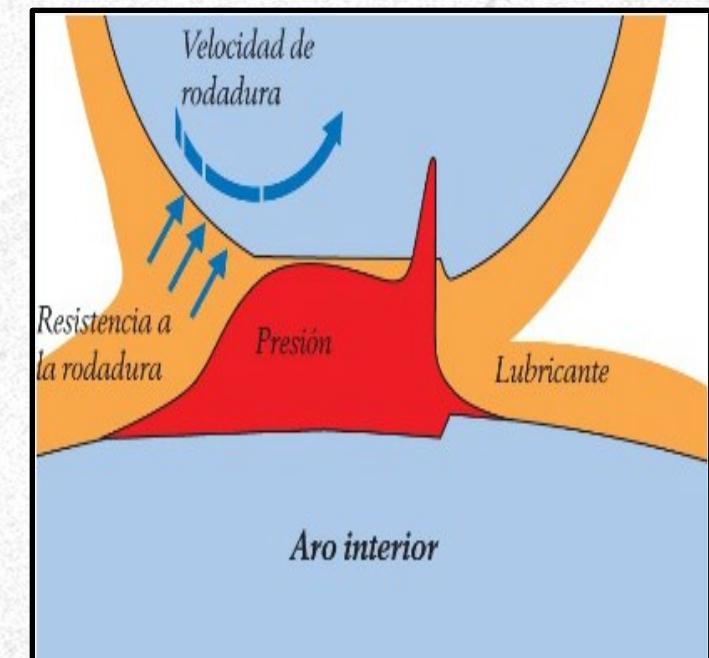
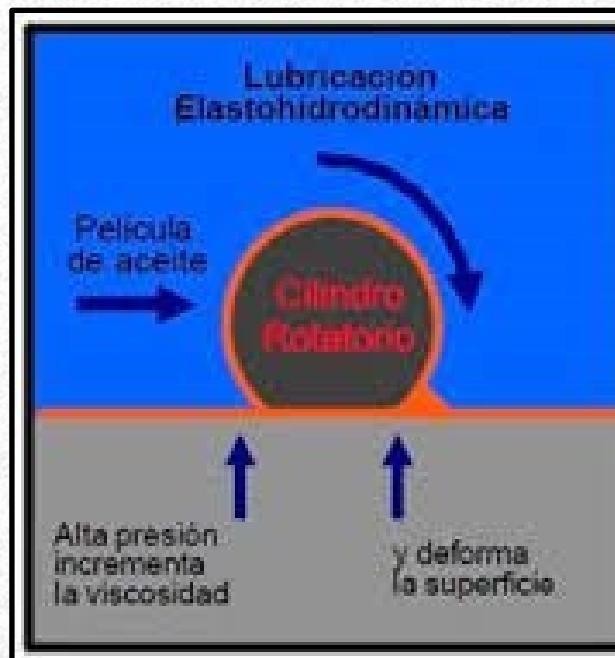
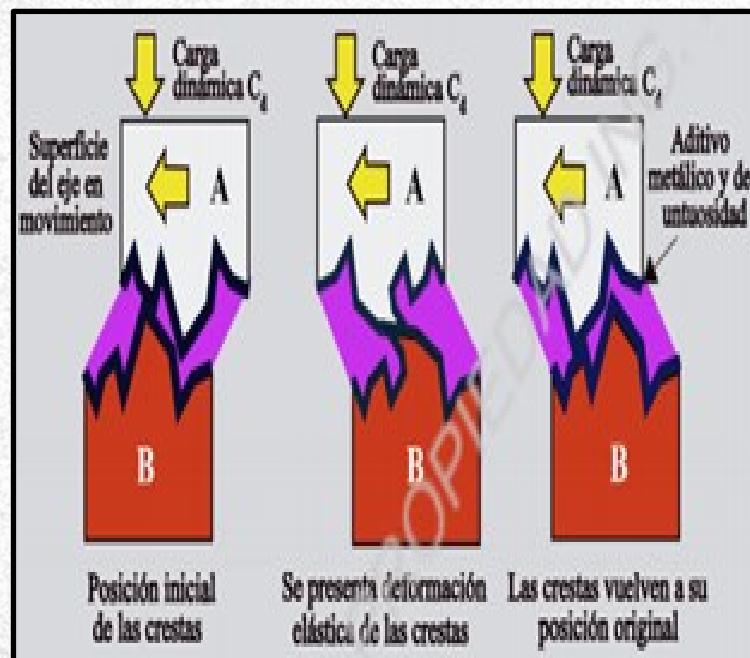
## FUERZA DE FRICTION MIXTA - PERMANENTE:

Se da normalmente para velocidades entre 10 a 450 rpm en donde el movimiento de los mecanismos es tal que logra que el flujo de aceite separe un porcentaje de las crestas mientras que otras interactúan permanentemente.



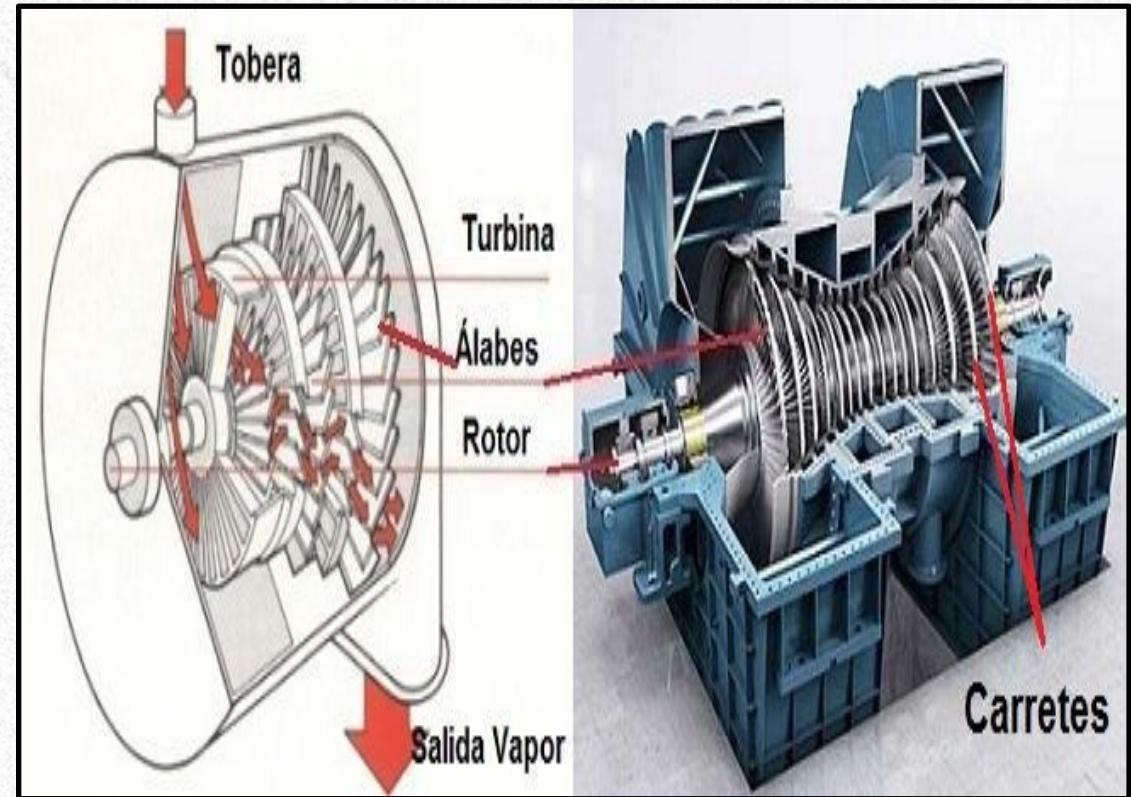
## Fricción Mixta - Lubricación Elastohidrodinámica (EHL):

En la fricción mixta, se forma una película lubricante elastohidrodinámica (EHL) donde las crestas en contacto se deforman elásticamente. Los aditivos EP del lubricante crean una capa límite metálica, evitando la soldadura de las superficies en contacto. Se usan aceites ISO 100+ según torque y velocidad, típicamente en reductores de velocidad con transmisiones de 1:4 o más, como en molinos azucareros con velocidades de 12 rpm y torques de 800,000 Nm



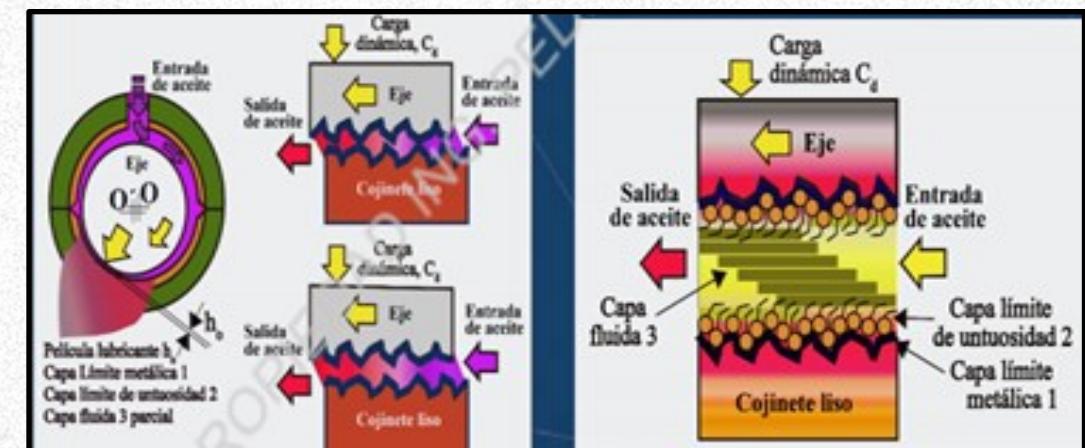
## FUERZA DE FRICTION MIXTA - TRANSITORIA:

Tiene lugar cuando la fricción mixta pasa a fluida debido a la acción de bombeo del lubricante en la superficies de fricción y la capa fluida esta presente en un 100 %, normalmente se da para velocidades superiores a 450 rpm. El caso mas representativo son los rotores de las turbinas de vapor.



## Fricción Fluida en Reductores de Velocidad:

**La fricción fluida ocurre cuando un reductor de velocidad opera en condiciones donde las superficies de los engranajes están completamente separadas por una película lubricante continua, manteniendo las rugosidades sin contacto.** Esto garantiza temperaturas de operación por debajo de 50°C y una fricción mínima, únicamente entre capas de lubricante. Es crucial que el lubricante, generalmente un aceite ISO 68 con aditivos antidesgaste, mantenga la limpieza según normas ASTM e ISO para preservar estas condiciones. La lubricación en este régimen es hidrodinámica, con un espesor de película aproximado de 5 micras



# COEFICIENTE DE FRICCIÓN

Es la relación existente entre la fuerza necesaria para mover un cuerpo sobre la superficie y la que dicho cuerpo ejerce sobre ella perpendicularmente. Si el cuerpo está en reposo, la fuerza necesaria para ponerlo en movimiento debe vencer la fricción estática, pero si se encuentra ya en movimiento, bastara que la fuerza impulsora sea igual a la fricción cinética. La fricción produce desgaste y la severidad de este depende de la naturaleza de las superficies, por lo tanto, La función primordial de un lubricante es disminuir el coeficiente de fricción.

## CONSERVACIÓN DE LA ENERGIA

The diagram shows a horizontal surface where a block of mass  $m_1$  is being pulled by a spring with stiffness  $k$  and initial velocity  $v_0$ . A friction force  $f_\mu$  acts on the block. To the right, a pulley system is used to lower a block of mass  $m_2$  from height  $h$ , which falls with final velocity  $v_f$ . The distance between the starting point of  $m_1$  and the vertical drop of  $m_2$  is labeled  $d$ .

$$\Delta E_{mec} = E_f - E_i = - f_\mu d$$

**Calcular el  
coeficiente de  
fricción  $k$**

**La fricción produce desgaste y la severidad de este depende de la naturaleza de las superficies, por lo tanto, la función primordial de un lubricante es disminuir el coeficiente de fricción.**

### **MEDIOS PARA REDUCIR LA FRICTION:**

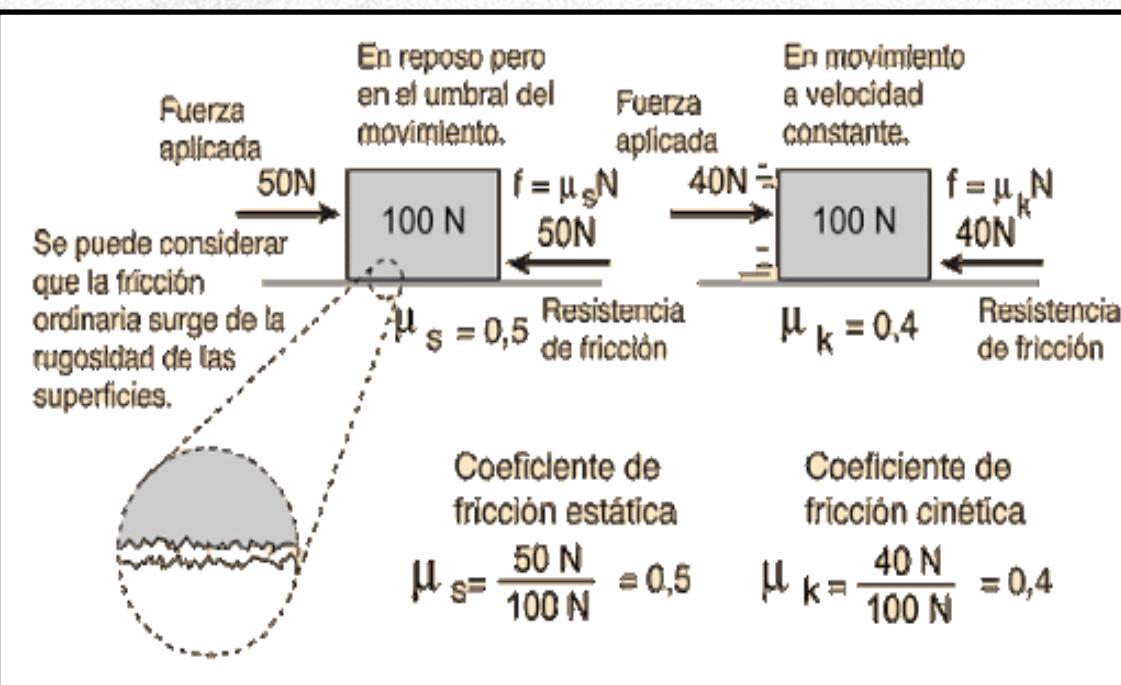
**La fricción y el desgaste se puede reducir por medio de:**

- a. Alisado o pulido de superficies**
- b. Sustitución del deslizamiento por rodamiento**
- c. Empleo de lubricantes**

**La manera más fácil de reducir la fricción consiste en interponer una película de lubricantes entre las dos superficies que pretenden deslizarse**

## COEFICIENTE DE FRICTION:

El coeficiente de fricción del lubricante (sólido, mixto o fluido) es clave para seleccionar lubricantes en reductores de velocidad, según el tipo de engranajes. Se debe consultar el catálogo del fabricante o tablas con valores típicos. Las ligeras desviaciones son aceptables en la práctica



Combinación de superficies	$\mu_s$	$\mu_k$
Articulaciones humanas	0.02	0.003
Acero // Hielo	0.028	0.09
Acero // Teflón	0.04	0.04
Teflón // Teflón	0.04	0.04
Hielo // Hielo	0.1	0.03
Esquí (encerado) // Nieve (0 °C)	0.1	0.05
Acero // Acero	0.15	0.09
Vidrio // Madera	0.25	0.2
Caucho // Cemento	1.0	0.7
Madera // Cuero	0.5	0.4
Caucho // Madera	0.7	0.6
Acero // Latón	0.5	0.4
Madera // Madera	0.7	0.4
Madera // Piedra	0.7	0.3

# TABLAS DE COEFICIENTE DE FRICTION DE MATERIALES

		Coeficiente de Fricción	
Material de la placa Superior	Material del Carril	No lubricado	Lubricado
Acero inoxidable o acero	Acero inoxidable o acero	0,35	0,20
Acero inoxidable o acero	UHMW	0,25	0,15
Plástico Dirigido	Acero inoxidable o acero	0,25	0,15
Plástico Dirigido	UHMW	0,25	0,12
Plástico Dirigido (Baja Fricción)	Acero inoxidable o acero	0,17	0,12
Plástico Dirigido (Baja Fricción)	UHMW	0,18	0,12

Coeficientes de rozamiento de algunas sustancias		
Materiales en contacto	$\mu_e$	$\mu_d$
Articulaciones humanas	0,02	0,003
Acero // Hielo	0,03	0,02
Acero // Teflón	0,04	0,04
Teflón // Teflón	0,04	0,04
Hielo // Hielo	0,1	0,03
Esquí (encerado) // Nieve (0°C)	0,1	0,05
Acero // Acero	0,15	0,09
Vidrio // Madera	0,2	0,25
Caucho // Cemento (húmedo)	0,3	0,25
Madera // Cuero	0,5	0,4
Acero // Latón	0,5	0,4
Madera // Madera	0,7	0,4
Madera // Piedra	0,7	0,3
Vidrio // Vidrio	0,9	0,4
Caucho // Cemento (seco)	1	0,8
Cobre // Hierro (fundido)	1,1	0,3

# TABLAS DE COEFICIENTE DE FRICTION DE MATERIALES

Materiales en contacto	Coeficiente de fricción estática	Coeficiente de fricción dinámica
Acero - Acero	0,74	0,57
Acero - Aluminio	0,61	0,47
Acero - Latón	0,51	0,44
Acero - Cobre	0,53	0,36
Acero - Teflón	0,04	0,04
Madera - Madera	0,37	0,20
Teflón - Teflón	0,04	0,04

En la tabla se listan los coeficientes de rozamiento de algunas sustancias donde

$\mu_e$  = Coeficiente de rozamiento estático,

$\mu_d$  = Coeficiente de rozamiento dinámico.

Los coeficientes de rozamiento, por ser relaciones entre dos fuerzas son magnitudes adimensionales.

<u>Caucho // Cemento</u> (húmedo)	0,3	0,25
<u>Madera // Cuero</u>	0,5	0,4
<u>Caucho // Madera</u>	0,7	0,6
<u>Acero // Latón</u>	0,5	0,4
<u>Madera // Madera</u>	0,7	0,4
<u>Madera // Piedra</u>	0,7	0,3
<u>Vidrio // Vidrio</u>	0,9	0,4
<u>Caucho // Cemento</u> (seco)	1	0,8
<u>Cobre // Hierro</u> (fundido)	1	0,3

# RUGOSIDAD ESTANDAR ISO 468

La rugosidad de las superficies de fricción de los mecanismos lubricados de los componentes de maquinas se especifica de acuerdo con los estándares ISO 468 – 1982.

TABLA 2.9 Estándares ISO 468-1982 para acabados superficiales					
Grado ISO estándar de la rugosidad	Rugosidad promedio superficial		Grado ISO estándar de la rugosidad	Rugosidad promedio superficial	
	μm	μμin/g		μm	μμin/g
N1	0,025	1	N7	1,60	63
N2	0,050	2	N8	3,20	125
N3	0,10	4	N9	6,30	250
N4	0,20	8	N10	12,50	500
N5	0,40	16	N11	25	1000
N6	0,80	32	N12	50	2000

Valor de la rugosidad Ra	Clase de rugosidad		Signo de mecanizado equivalente (antiguo)
	μm	μin	
50	2 000	N 12	~
25	1 000	N 11	
12,5	500	N 10	▽
6,3	250	N 9	
3,2	125	N 8	▽▽
1,6	63	N 7	
0,8	32	N 6	▽▽▽
0,4	16	N 5	
0,2	8	N 4	
0,1	4	N 3	
0,05	2	N 2	
0,025	1	N 1	▽▽▽▽

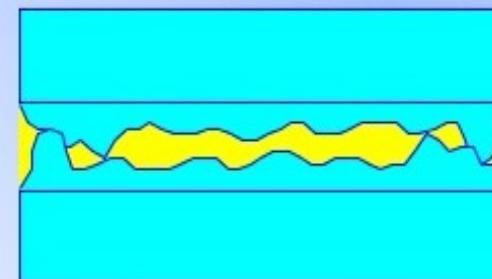
## REGIMEN DE LUBRICACION

**Los lubricantes son esenciales para reducir la fricción y el desgaste entre superficies rodantes y deslizantes, evitando el contacto directo y protegiendo contra la corrosión. También pueden enfriar y sellar rodamientos. La elección del lubricante depende de la carga, temperatura y velocidad operativa: a mayor carga y temperatura, y menor velocidad de giro, se requieren lubricantes con mayor viscosidad o grasa más consistente. Por el contrario, cargas y temperaturas menores, y velocidades más altas, requieren lubricantes con menor viscosidad. Usar una cantidad inadecuada de lubricante puede causar problemas: una cantidad insuficiente lleva al desgaste y fallos, mientras que el exceso puede provocar recalentamiento y deterioro de la película lubricante. En condiciones de choques o vibraciones, es fundamental utilizar lubricantes con aditivos EP (Extreme Pressure) para prevenir la corrosión y asegurar la protección de las superficies**



- **Lubricación Límite:**

- La película de lubricante es tan fina que existe un contacto parcial metal-metal.
- Puede pasarse de lubricación hidrodinámica a límite por caída de la velocidad, aumento de la carga o disminución del caudal de aceite.
- En este tipo de lubricación mas que la viscosidad del lubricante es mas importante la composición química.
- En los cojinetes hidrodinámicos en el arranque puede funcionar en condiciones de lubricación límite.

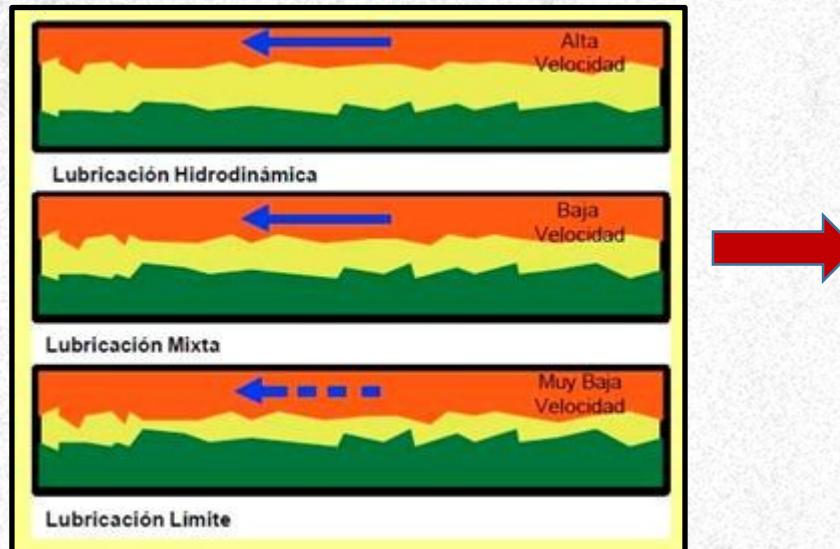




## LUBRICACIÓN INCOMPLETA O MIXTA:

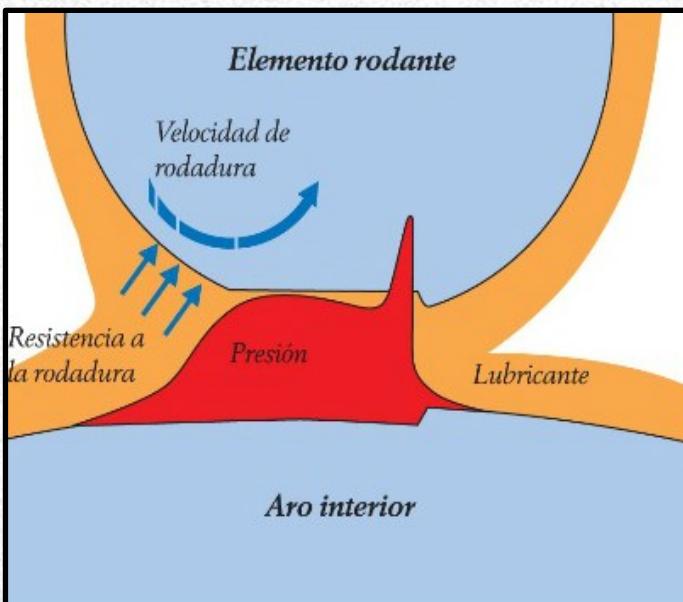
- Se tiene si la carga sobre las superficies que se frotan es soportada parcialmente por una película viscosa de fluidos y por otra parte, por zonas de lubricación límite. La fricción intermedia entre la de lubricación fluida y la límite.

## Desarrollo del tema: lubricación hidrodinámica.



La lubricación hidrodinámica o lubricación de película gruesa, se obtiene cuando las dos superficies están completamente separadas por una película coherente del lubricante. La lubricación hidrodinámica evita el desgaste de las partes en movimiento, ya que no hay contacto metálico entre ellas.





## ELASTOHIDRODINÁMICA

### LA DEFINICIÓN DE LA LUBRICACIÓN ELASTOHIDRODINÁMICA

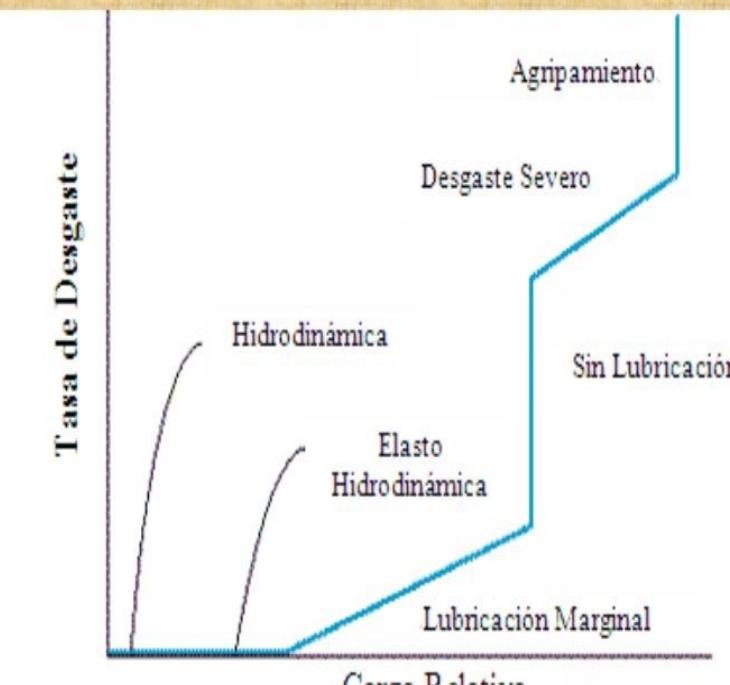
SE PUEDE EXPLICAR ASÍ:

- **ELASTO:** ELASTICIDAD, Ó SEA QUE LA CRESTA DE LA IRREGULARIDAD EN EL MOMENTO DE LA INTERACCIÓN CON LA CRESTA DE LA OTRA SUPERFICIE SE DEFORMA ELÁSTICAMENTE SIN LLEGAR AL PUNTO DE FLUENCIA DEL MATERIAL.

## Lubricación Elastohidrodinámica

- EN CIERTOS CASOS LA LUBRICACIÓN HIDRODINÁMICA ES AUMENTADA POR LA LUBRICACIÓN ELASTOHIDRODINÁMICA.
- LA LUBRICACIÓN ELASTOHIDRODINÁMICA SE PRESENTA EN MECANISMOS EN LOS CUALES LAS RUGOSIDADES DE LAS SUPERFICIES DE FRICCIÓN TRABAJAN SIEMPRE ENTRELAZADAS Y NUNCA LLEGAN A SEPARARSE. EN ESTE CASO EL LUBRICANTE SE SOLIDIFICA Y LAS CRESTAS PERMANENTEMENTE SE ESTÁN DEFORMANDO ELÁSTICAMENTE. EL CONTROL DEL DESGASTE Y EL CONSUMO DE ENERGÍA DEPENDE DE LA PELÍCULA ADHERIDA A LAS RUGOSIDADES.

## ELASTOHIDRODINÁMICA



Rapidez del desgaste para varios regímenes de lubricación

## EL EFECTO DE LA LUBRICACIÓN ELASTOHIDRODINÁMICA

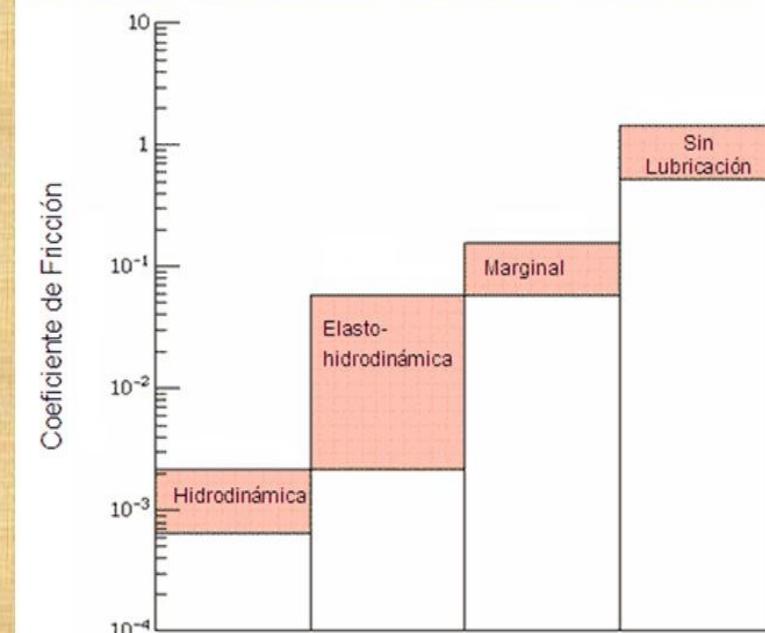


Diagrama de barras que muestra los coeficientes de fricción para varias condiciones de lubricación

## **RESISTENCIA DE LA PELICULA LUBRICANTE**

**Condiciones de película límite:**

**Interacciones entre superficies no lubricadas o sub lubricadas:**

- **Las superficies no son tan lisas como parecen**
- **El área de contacto real puede ser < 1 %**
- **Contacto en montañas microscópicas – asperezas**
- **Deformación elástica basada en la resistencia al cizallamiento (picos decapitados)**
- **El área de contacto aumenta a medida que aumenta la carga y el cizallamiento (distribución de carga menos concentrada)**
- **Así ocurre la fricción – Menos por la rugosidad y mas por los enlaces adhesivos a nivel atómico por contacto de las asperezas**
- **Generación de desgaste adhesivo – El endurecimiento por el trabajo localizado causa capas de fracturas debajo de la superficie creando partícula de desgaste adhesivo**

# CONDICIONES DE PELICULA LIMITE

## Factores que influyen:

- **Química de la superficie**
- **Dureza de la superficie**
- **Topografía de la superficie**
- **Contribuciones medioambientales**
- **Temperatura**
- **Cargas**
- **Velocidad relativa**
- **Contaminación con sólidos**
- **Contaminación con agua**
- **Otros contaminantes**

## Películas por suspensión sólida:

- **Borato**
- **Disulfuro de Molibdeno**
- **Grafito**
- **PTFE**

## Película química del aceite:

- **Agentes de lubricidad – ácidos grasos**
- **Dialquil ditiofosfato de zinc (AW)**
- **Tricresil fosfato (AW)**
- **Fosforo – Azufre (EP)**

## **RESISTENCIA DE LA PELICULA**

**Es la capacidad del lubricante para:**

- **Disminuir los efectos de la fricción**
- **Controlar el desgaste por medios distintos del espesor de la película**

**Es importante cuando:**

- **Los elementos que desarrollan el espesor de la película son insuficientes (Viscosidad, velocidad y carga)**
- **El contacto entre superficies es inminente (cargas de choque, velocidades lentes, cambios de dirección, etc.)**
- **Las temperaturas aumentan (perdida de espesor de la película)**

**Depende de:**

- **El trabajo colectivo de las películas químicas del aceite y de la viscosidad del básico lubricante**

# El impacto de las partículas contaminantes en los mecanismos

Principales mecanismos de desgaste

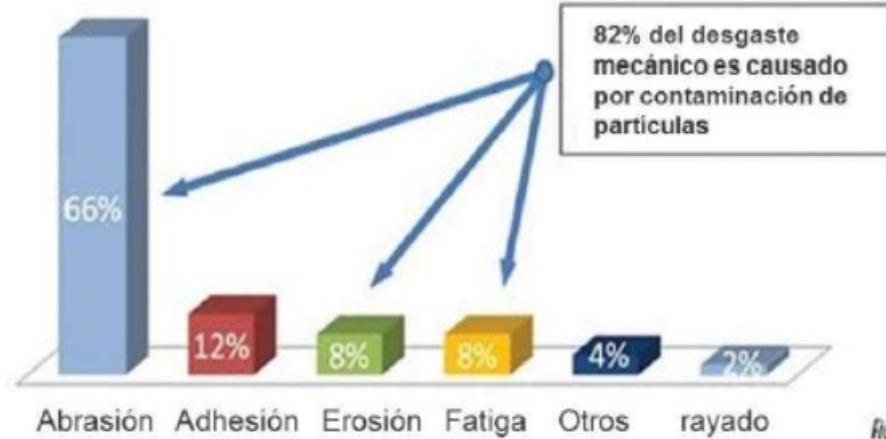
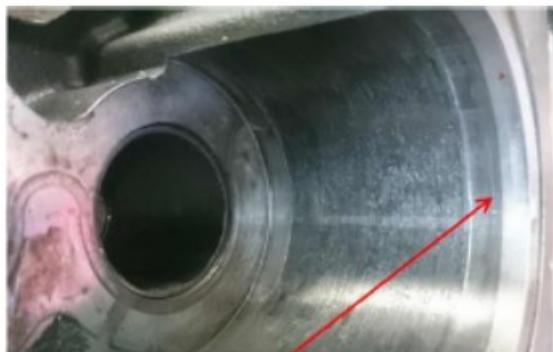


Figura 1



Abrasion por partículas atrapadas.



Grietas de falla por fatiga



Erosión en la superficie de fricción



Pérdida del material

# DESGASTE EN MECANISMOS

**El desgaste es la perdida progresiva del material de la superficie debido al movimiento relativo y del contacto de las superficies.**

**Los elementos de maquinas dentro de un sistema Tribológico se desgastan, y presentan una tasa de desgaste gradual a lo largo del tiempo, hasta que finalmente llega a un punto en el cual puede llegar a ser critico haciendo que los elementos mecánicos pierdan sus tolerancias y funcionen de una manera errática o que fallen catastróficamente quedando inservibles y causando elevados costos de mantenimiento y elevadas perdidas en el sistema productivo de la empresa.**

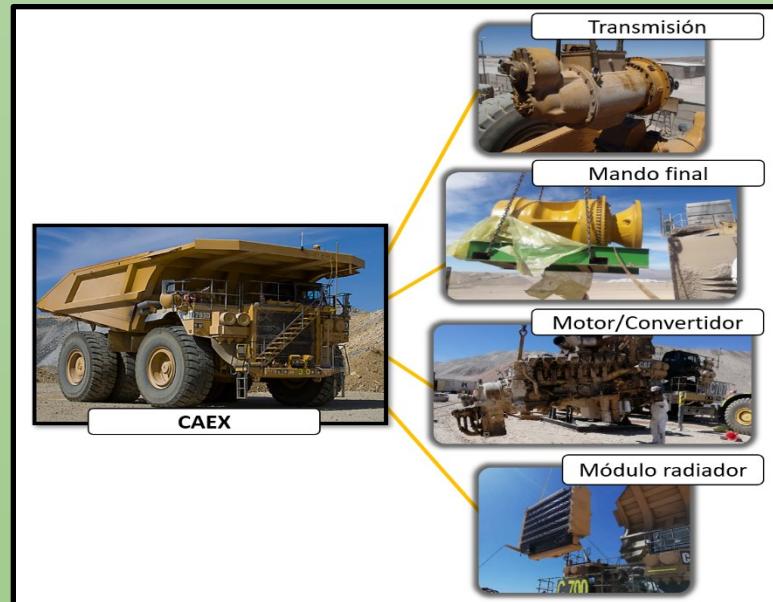
**Los distintos equipos tienen muchos componentes que se desgastan al hacer su trabajo, por lo que es necesario reemplazarlos periódicamente, sobre todo si tenemos una mala cultura de mantenimiento y no tenemos un adecuado control de contaminación de los lubricantes.**

**Las piezas al interior de los componentes se desgastan más lentamente si están “protegidas”.**

**Cuando las condiciones de operación o del medio ambiente son anormales y agresivas, las tasas de desgaste aumentan de manera significativa.**

## FACTORES QUE FAVORECEN EL DESGASTE:

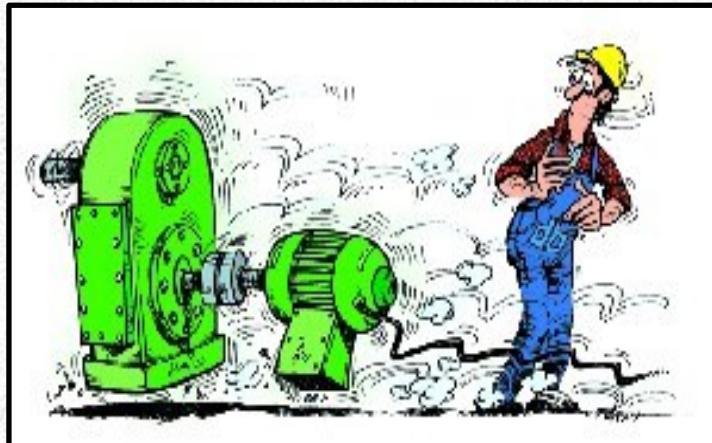
1. Disimilitud de las propiedades del par de materiales en contacto (dureza, composición química, acabado superficial,..)
2. Presencia de terceros cuerpos (partículas de desgaste, óxidos, productos de degradación del lubricante, polvo, gas y vapores agresivos, etc.)
3. Condiciones de servicio por encima de los límites:
  - Presión
  - Velocidad relativa
  - Temperatura
  - Carga
  - Lubricante ( ausente, inadecuado o degradado)



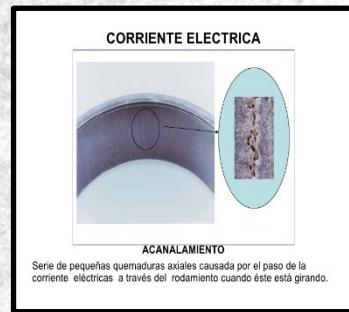
“CONTROLANDO TODOS ESTOS FACTORES SE PUEDE REDUCIR O CONTROLAR EL DESGASTE, PERO NO  
SE PUEDE ELIMINAR NUNCA POR COMPLETO”

## **VENTAJAS DE AUMENTAR LA VIDA DE LOS COMPONENTES EXPUESTOS AL DESGASTE:**

- 1. Se alarga la vida disponible de los elementos mecánicos**
- 2. Se aumenta la eficacia y el rendimiento**
- 3. Se reduce el tiempo de paradas improductivas por reparaciones no programadas**
- 4. Se reduce el tiempo y coste de montar y desmontar las piezas**
- 5. Se reduce también el coste de producción ya que se reduce el coste de los equipos**
- 6. Se reduce el stock de piezas de recambio**
- 7. Se alarga el ciclo de vida útil del activo**

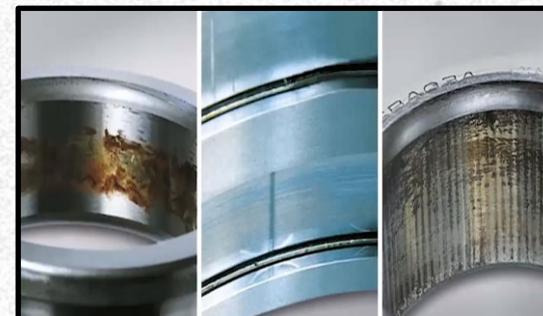
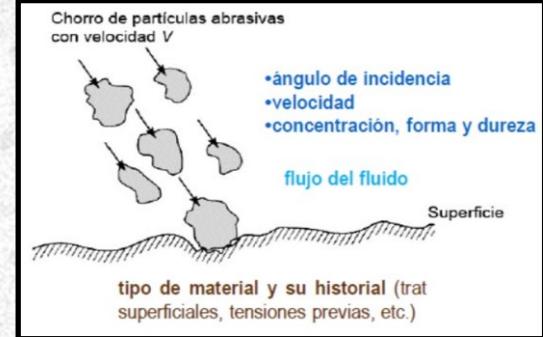
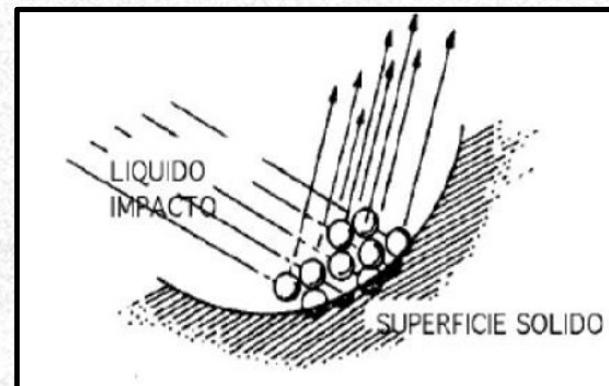


# TIPOS DE DESGASTE



EXISTEN 7 TIPOS DE DESGASTE QUE EXPLICAN LAS FALLAS EN COMPONENTES:

1. Desgaste Abrasivo
2. Desgaste Adhesivo
3. Desgaste por Fatiga superficial
4. Desgaste Erosivo
5. Desgaste por Corrosión
6. Desgaste por Cavitación
7. Corrientes Eléctricas



## 1. DESGASTE POR ABRASIÓN

- El desgaste abrasivo, se debe imaginar como la acción de corte entre dos cuerpos.
- Las superficies dañadas como resultado, son cortadas, acanaladas o ranuradas.
- En el desgaste abrasivo entre dos cuerpos, dos superficies se deslizan una contra la otra.
- En el de tres cuerpos, partículas quedan atrapadas entre dos superficies que están en movimiento.



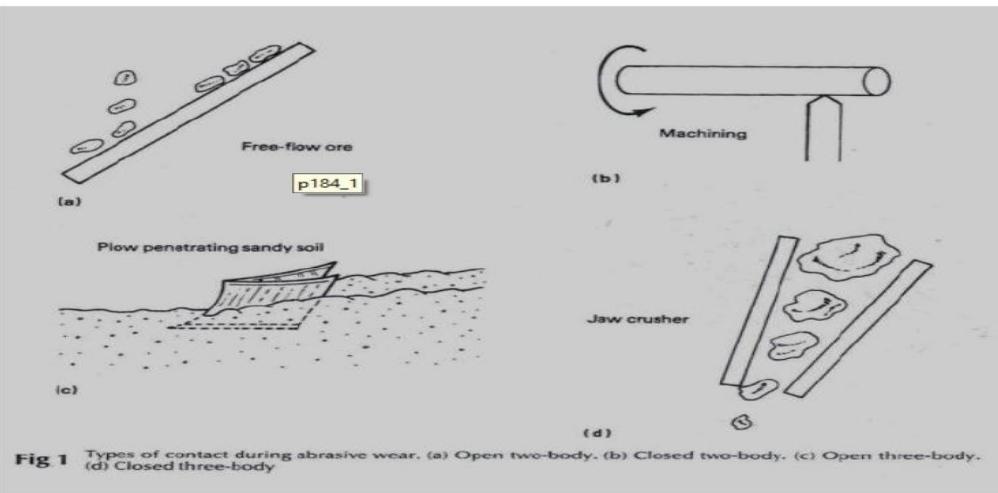
Desgaste abrasivo (de dos cuerpos), se produce cuando una superficie dura y áspera se desliza sobre una superficie más suave



*Desgaste abrasivo de dos cuerpos*

### Desgaste abrasivo (mat. dúctiles)

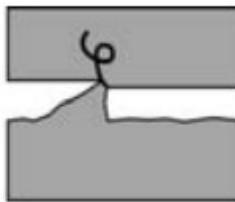
#### Abrasión de dos cuerpos



#### Abrasión de tres cuerpos

## Desgaste Abrasivo

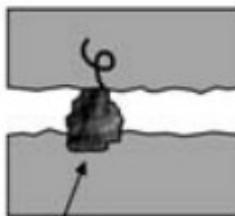
### Abrasion de dos cuerpos



Superficie "Suave"

Superficie "Dura"

### Abrasion de tres cuerpos

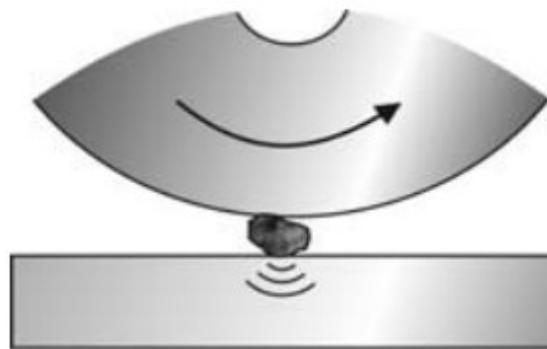


Superficie "Dura"

Superficie "Suave"

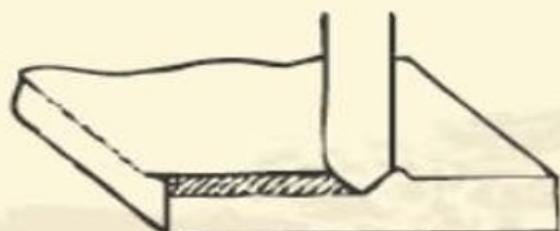
Abrasivo duro

## Fatiga de Superficie

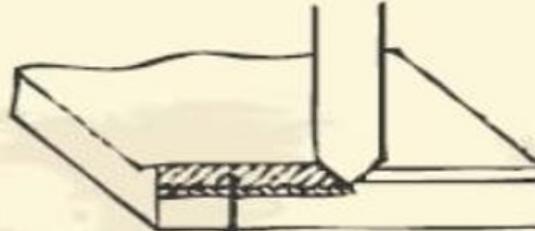


Pozo (pitting)

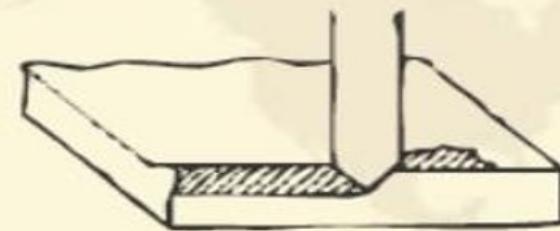
# TIPOS DE DESGASTE ABRASIVO



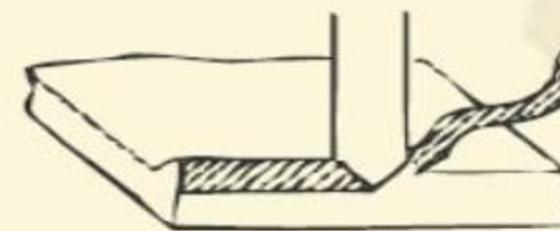
Efecto de "arado" (repujamiento)



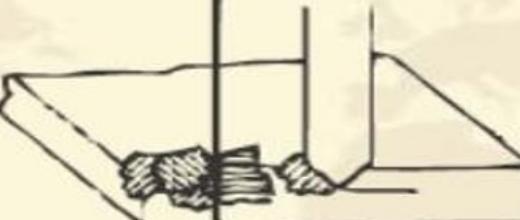
Micro-fatiga



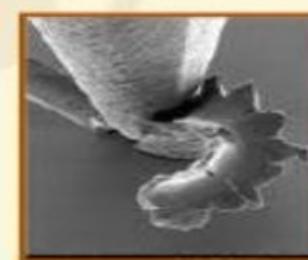
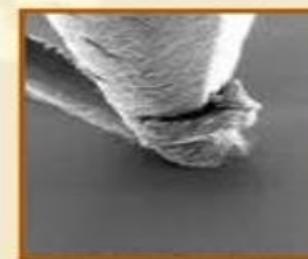
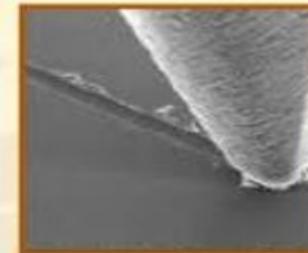
Cuña



Corte



Micro-crack



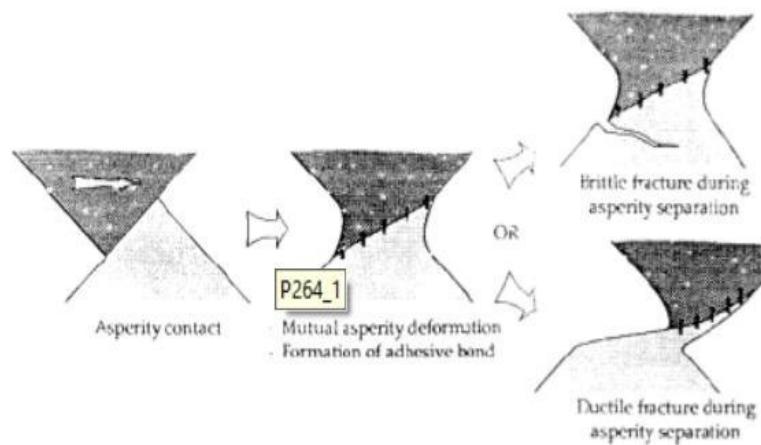
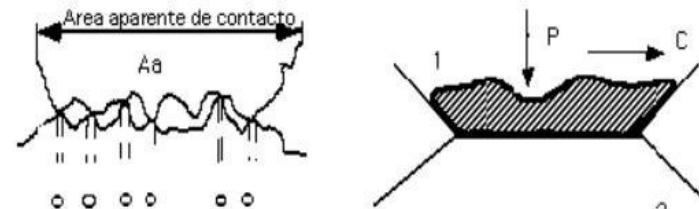
**05 procesos para el desgaste abrasivo**

## 2. DESGASTE PORADHESION

- El **desgaste comienza Adhesivo cuando asperezas o puntos elevados muy pequeños en superficies móviles hacen contacto entre ellos, generando calor de fricción hasta que uno de los puntos elevados se adhiere al otro y se separa de la superficie original.**
- Por ser puntos pequeños, este proceso se llama **soldadura microscópica**.
- Si se continua la operación del componente, el contacto de la superficie aumenta y áreas más amplias pueden fundirse y adherirse.
- Las temperaturas de adhesión se pueden alcanzar rápidamente con cargas elevadas.

## Desgaste adhesivo

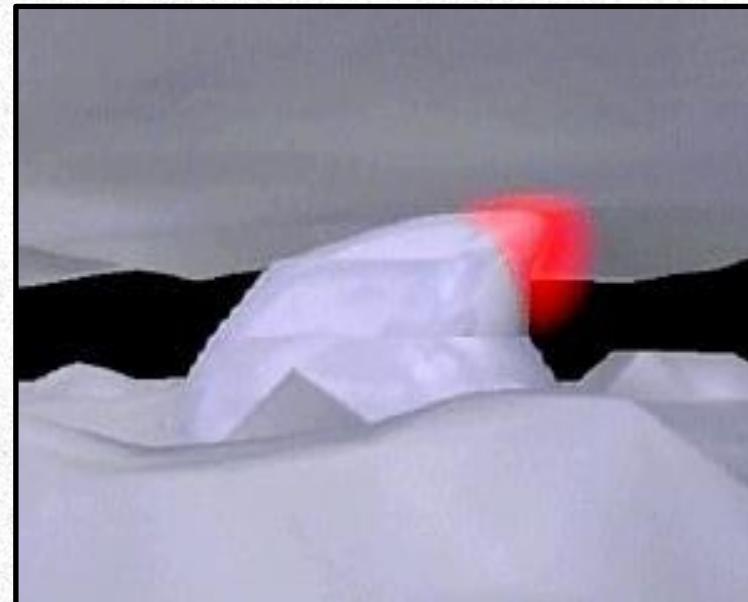
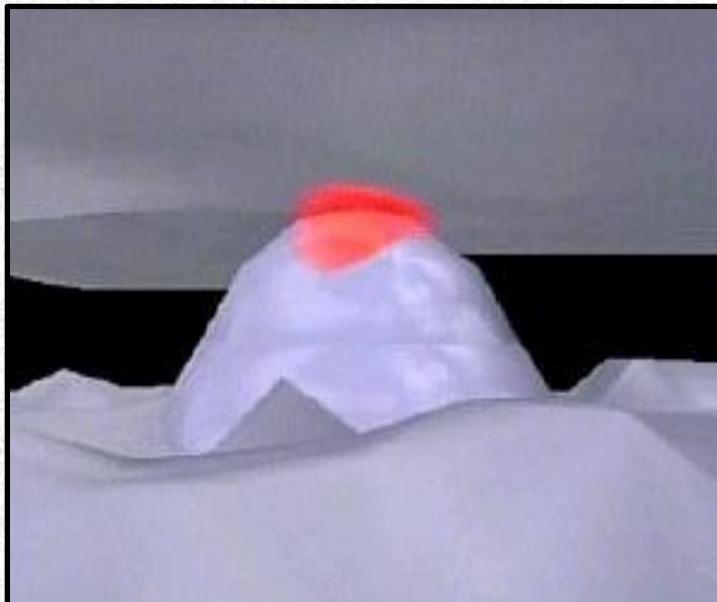
- ✓ La presión de contacto y la temperatura que causa la fricción en las pequeñas áreas reales de contacto, generan microsoldaduras en estos puntos
- ✓ Las fuerzas de adhesión físicas (fuerzas de atracción de Van der Waals y electrostáticas) y químicas (intercambio de electrones y átomos, reacciones metálicas y covalentes) contribuyen a incrementar este efecto
- ✓ El desgaste adhesivo tiene lugar cuando una superficie se adhiere a otra, produciéndose la rotura de uno de los materiales como consecuencia del movimiento relativo



No se rompe la soldadura recién formada en virtud del endurecimiento por deformación inducido en la región más próxima a la unión

## SOLDADURA MIROSCOPICA Y MACROSCOPICA

- Las superficies entran en contacto físico. Puntos elevados y pequeños hacen contacto, generan calor y se sueldan microscópicamente.
- Al faltar lubricante se acumula el calor produciéndose un fundido y adhesión generalizado.



### 3. DESGASTE POR EROSION

- El desgaste por erosión ocurre cuando partículas en movimiento en un fluido chocan con las superficies que las rodean.
- El desgaste por erosión puede explicarse como una acción de impacto.
- Las partículas son arrastradas por el fluido. Al cambiar la dirección en que se mueve el fluido, las partículas golpean contra esquinas y restricciones causando daño en la superficie.



- La Erosión consiste en que las partículas pequeñas y duras que se mueven con rapidez, golpean las superficies circundantes a alta velocidad causando daño abrasivo.
- Los filtros y la frecuencia de cambio de estos, debe controlar el desgaste por erosión dentro de ciertos límites.



## Desgaste erosivo

De naturaleza análoga a la abrasión, es producido por el **impacto de partículas abrasivas (sólidas o líquidas) en suspensión en un fluido (líquido o gas)**.

Es el mecanismo de desgaste típico de:

- Tuberías, turbinas hidráulicas y asientos de válvulas que están en contacto con el agua de los ríos con sólidos en suspensión
- Rodetes y carcasa de bombas centrífugas de fluidos abrasivos
- Ventiladores y válvulas que mueven gases con partículas sólidas en suspensión
- Palas de los helicópteros y álabes de los turbo-reactores de los aviones por la arena suspendida en el aire.
- Calderas de centrales térmicas, donde las cenizas y el propio carbón en forma de polvo impacta sobre las superficies interiores.



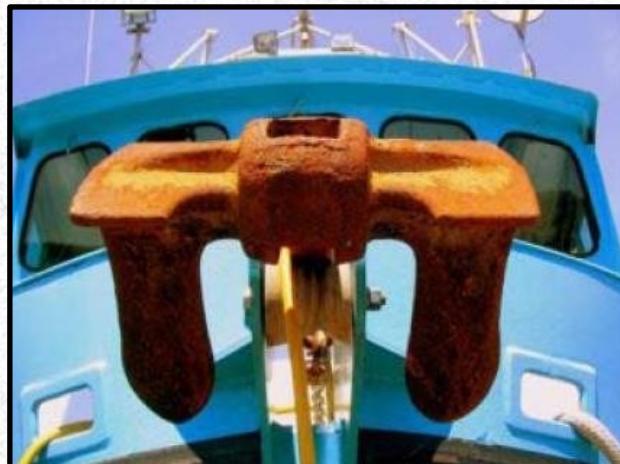
#### **4. DESGASTE POR CORROSION**

- Se entiende por corrosión la interacción de un metal con el medio que lo rodea, produciendo el consiguiente deterioro en sus propiedades tanto físicas como químicas.
- Una reacción de oxidación es una reacción anódica, en la cual los electrones son liberados dirigiéndose a otras regiones catódicas.
- En la región anódica se producirá la disolución del metal (corrosión) y, consecuentemente en la región catódica la inmunidad del metal.



## TIPOS DE CORROSION

- **Corrosión Uniforme:** Donde la corrosión o electroquímica actúa uniformemente sobre toda la superficie del metal
- **Corrosión Galvánica:** Ocurre cuando metales diferentes se encuentran en contacto, ambos metales poseen potenciales eléctricos diferentes lo cual favorece la aparición de un metal como ánodo y otro como cátodo, a mayor diferencia de potencial el material mas activo será el ánodo.



- **Corrosión por Picaduras:** Aquí se producen hoyos o agujeros por agentes químicos.
- **Corrosión Inter granular:** Es la que se encuentra localizada en los límites de grano, esto origina perdidas en la resistencia que desintegran los bordes de los granos.
- **Corrosión por Esfuerzo:** Se refiere a las tensiones internas luego de una deformación en frío.



- En el caso de los aceros que en su estado natural es óxido de hierro, evidentemente trata de volver a su estado natural cambiándose con el oxígeno del ambiente y comenzando el proceso de oxidación natural si este no se protege convenientemente.



- La corrosión de este nivel de severidad reduce la resistencia de las uniones. El material falló a 150 PSI, cuando el material nuevo resiste hasta 400 PSI.



- **Agujero a través de la soldadura resultante de la corrosión de ácido clorhídrico.**



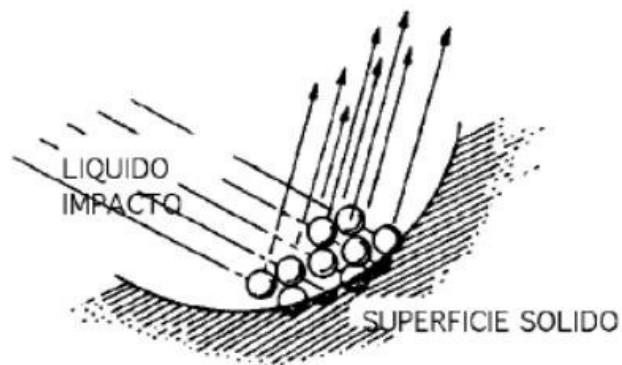
- **Corrosión severa del estanque, a menudo es el resultado del agua acumulada dentro del área de contención.**



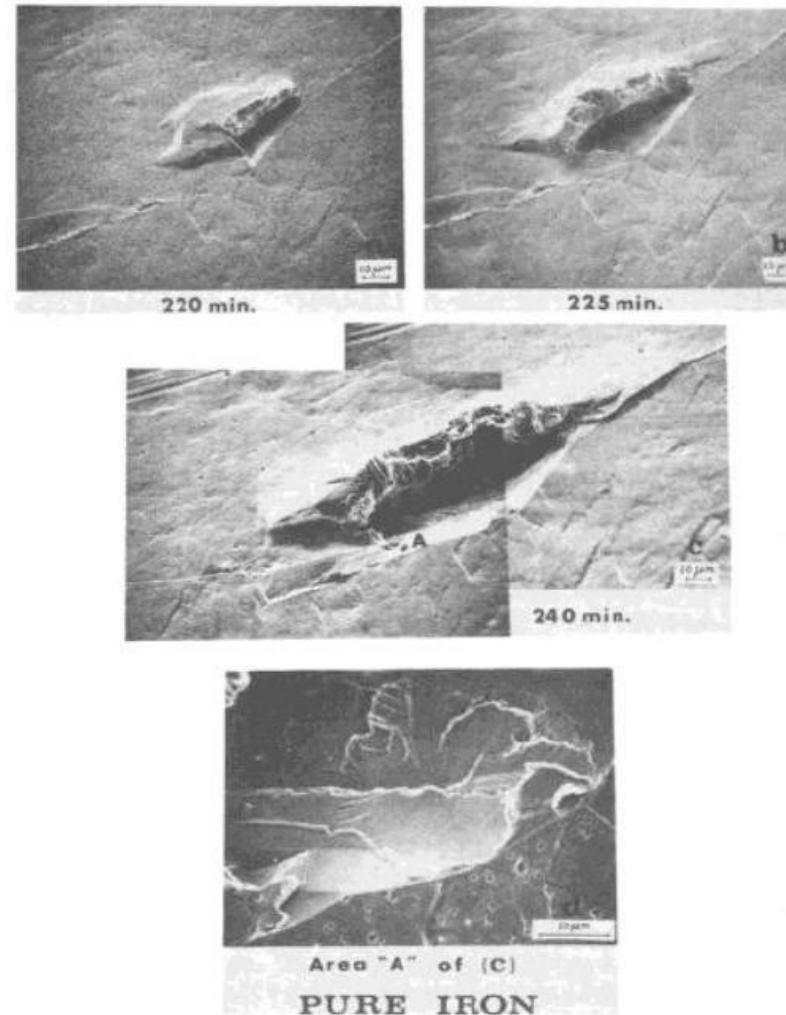
## 5. DESGASTE POR CAVITACION

### Desgaste por cavitación

Consiste en la formación de burbujas de gas en el seno del líquido cuando pasa por zonas donde la presión de éste es inferior a su presión de vapor. La corriente arrastra las burbujas hasta una zona de presión más alta, donde se vuelven inestables y se colapsan implosionando en o cerca de la superficie. Las ondas de presión golpean la superficie provocando esfuerzos locales que pueden ocasionar deformación plástica.

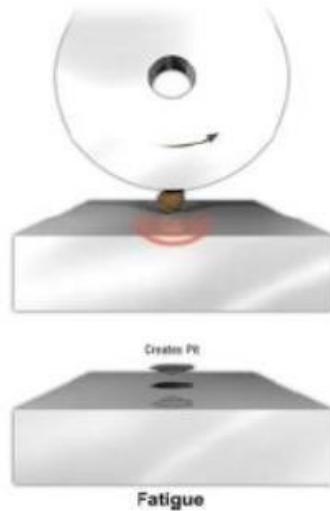


El recargue tendrá alto límite elástico (dureza) a fin de evitar la deformación plástica

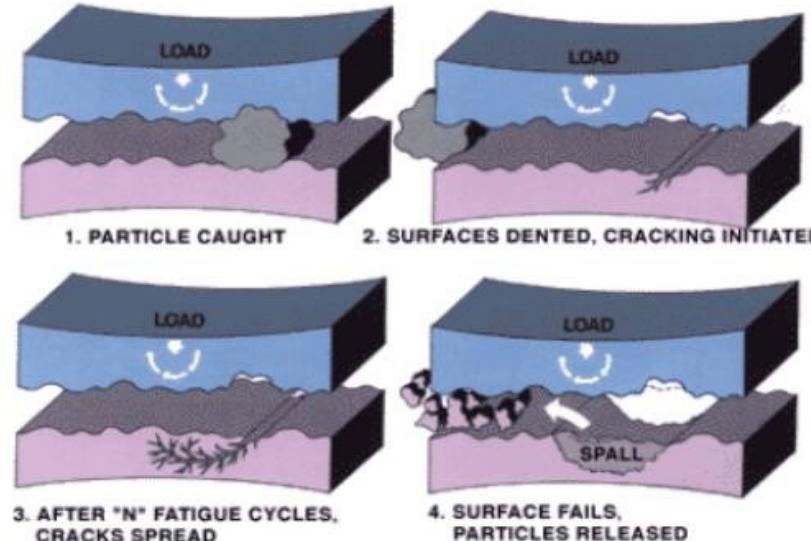


## 6. DESGASTE POR FATIGA SUPERFICIAL

### Desgaste por fatiga superficial



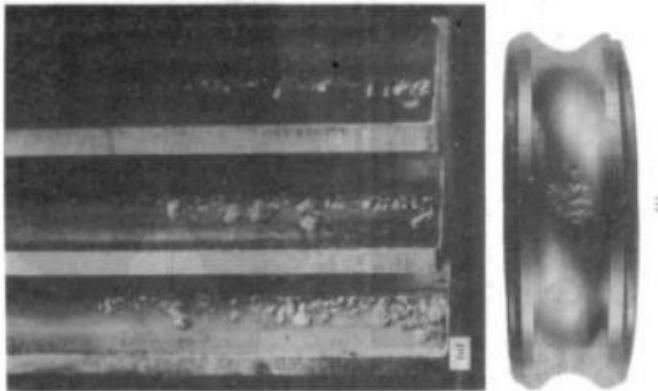
Es típico de  
los contactos  
por rodadura



En rodamientos, engranajes, levas y ruedas de metal que giran sobre rieles, se generan esfuerzos de contacto cílicos pulsatorios (con cada revolución de un cojinete o engrane).

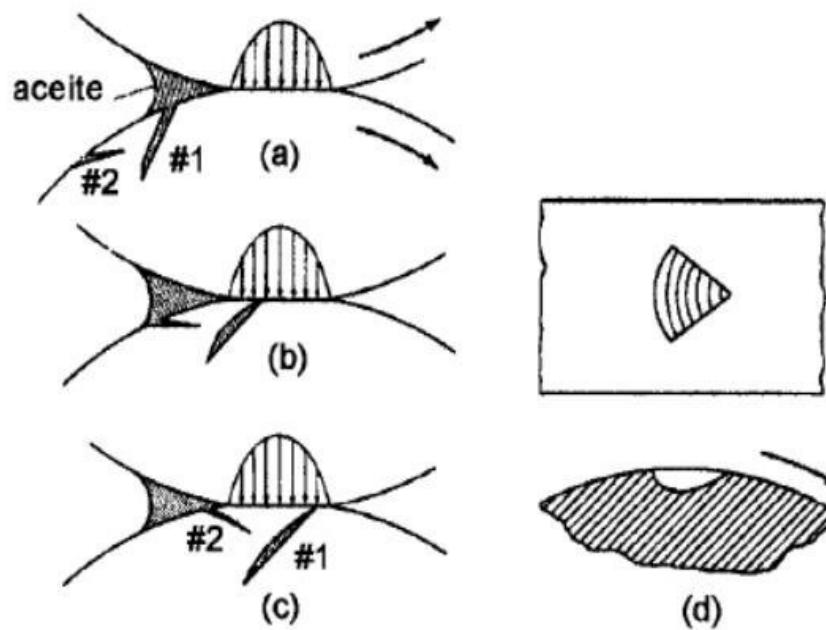
Aunque durante algún tiempo el material no parece verse afectado, las tensiones de Hertz pulsatorias acaban nucleando microfisuras que con el tiempo se propagan hasta la superficie, y se unen a otras grietas hasta que pequeñas porciones de material se desprenden, produciendo el picado de la superficie (“pitting”) o el desconchamiento de la misma.

# Desgaste por fatiga superficial



Este proceso de desgaste aparece incluso con la mejor lubricación posible

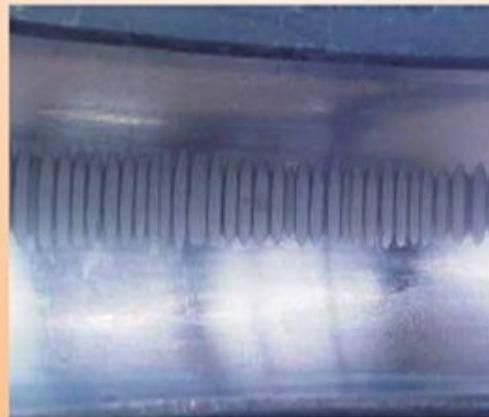
Las partículas de desgaste formadas suelen ser mayores que las formadas en el desgaste adhesivo ( $1000 \mu\text{m}$  frente a  $30 \mu\text{m}$ ) y pueden a su vez dar lugar a una "abrasión de tres cuerpos".



## 7. DESGASTE POR CORRIENTES ELECTRICAS

### DESCARGA ELÉCTRICA

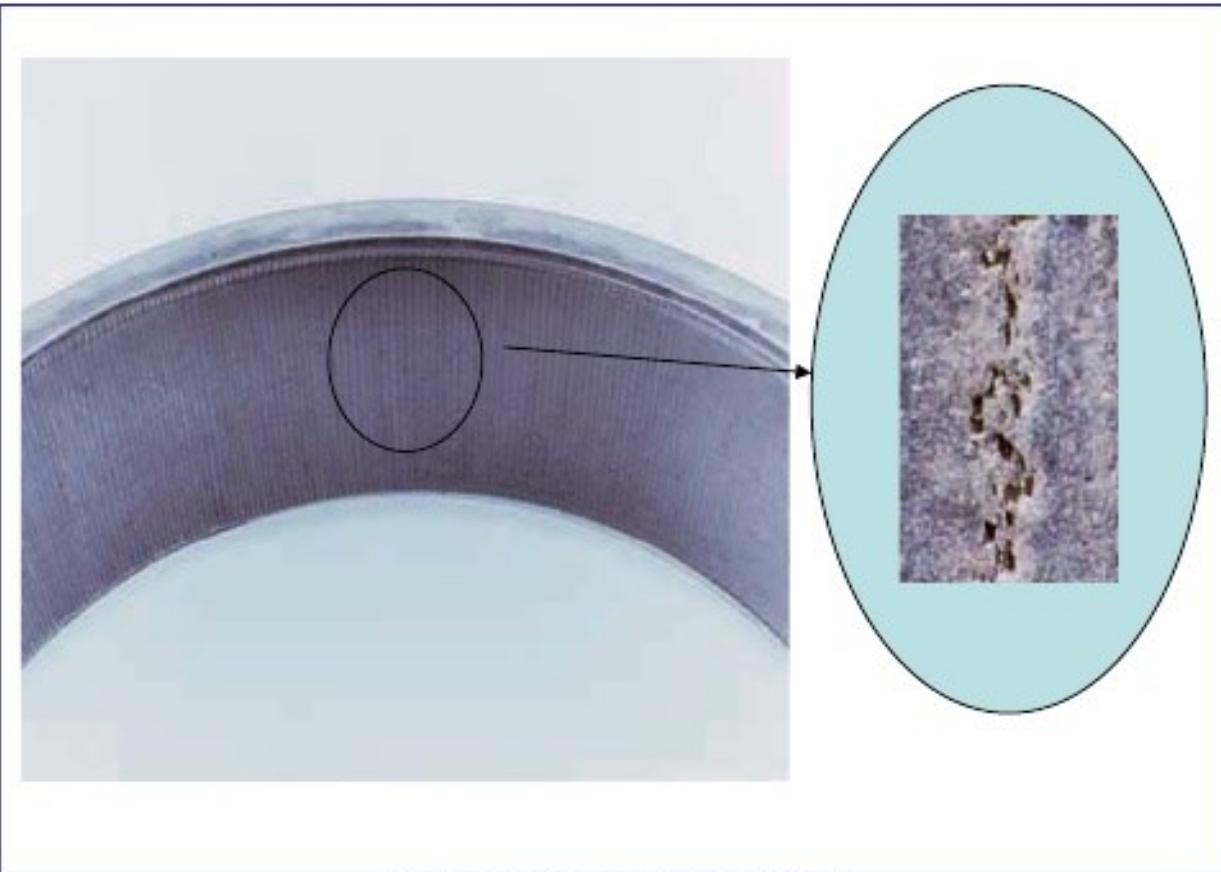
Por paso de corriente eléctrica AC o DC a través del rodamiento se generan arcos eléctricos entre los elementos rodantes, las pistas y las jaulas, que erosionan las superficies debido a fusión a pequeña escala. Producto de los arcos se pueden generar patrones de estriás o cráteres profundos si la corriente es alta.



### ALGUNAS CAUSAS

- Problemas en el aislamiento eléctrico, contaminación del lubricante con líquidos o partículas conductoras o ausencia de polo a tierra en maquinaria que lo requiera.
- No usar rodamientos con aislamiento eléctrico cuando la aplicación lo requiere.
- Proceso de reparación inadecuado por soldadura de una máquina, que haga circular la corriente a través de los rodamientos (inapropiada ubicación de la pinza o masa).

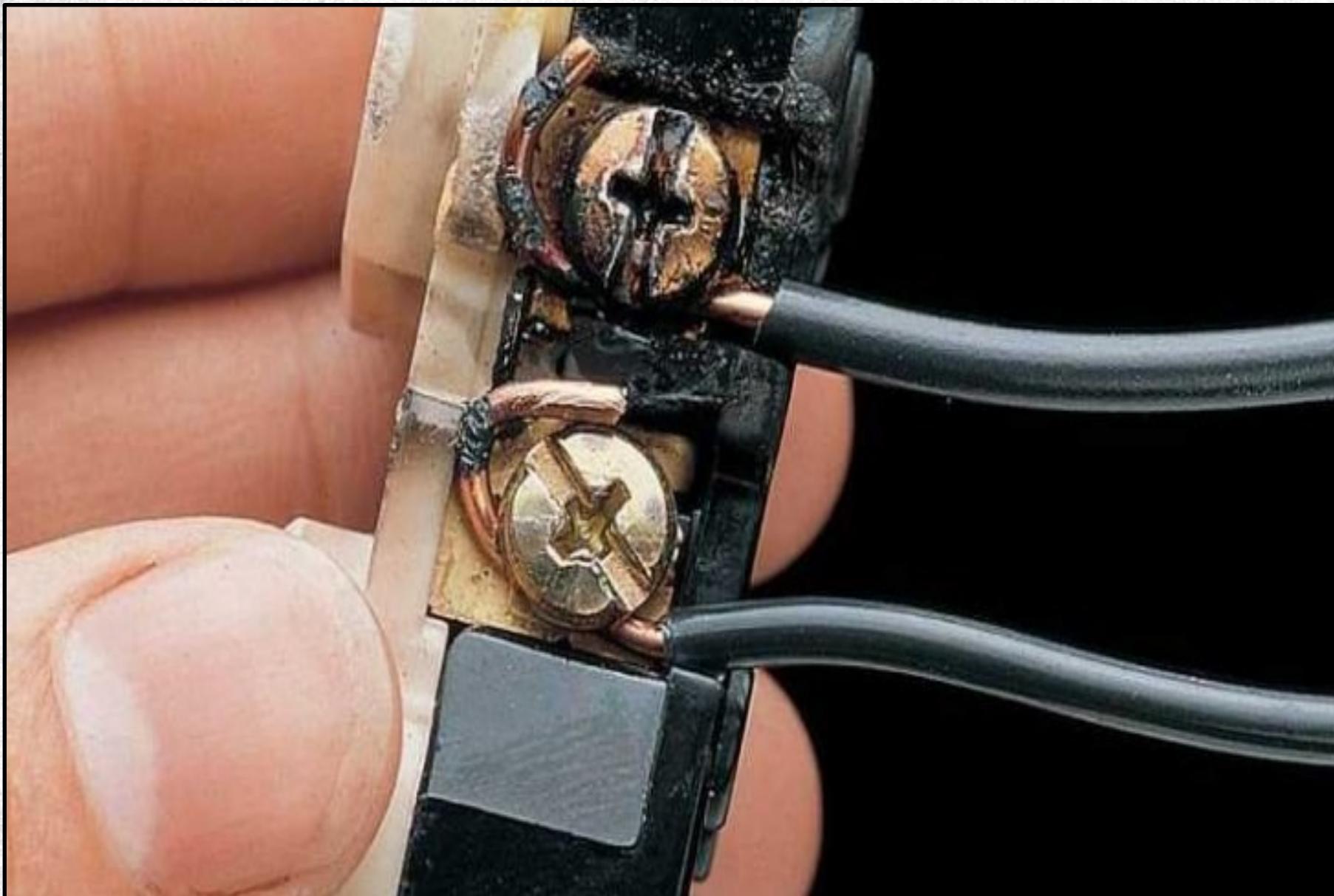
# CORRIENTE ELECTRICA



## ACANALAMIENTO

Serie de pequeñas quemaduras axiales causada por el paso de la corriente eléctricas a través del rodamiento cuando éste está girando.

# FALSO CONTACTO ELECTRICO

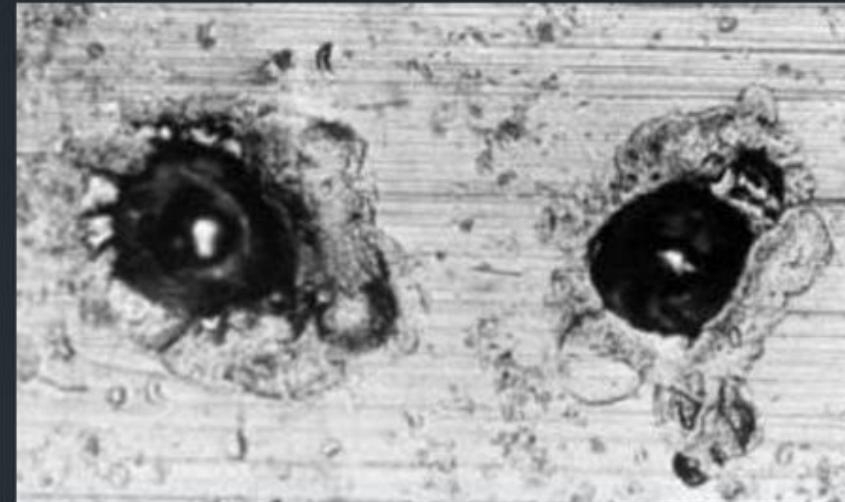


# Descarga eléctrica

- El paso de corriente eléctrica entre cojinetes y ejes a través de la película lubricante, genera finas picaduras similares a las de la fatiga superficial, producto de la fusión de pequeñas zonas por la acción del arco eléctrico. Este modo de falla es común en motores y generadores eléctricos.



# Corrosión eléctrica



Tipo de Falla	Causas Posibles	Acciones Correctivas
<ul style="list-style-type: none"><li>• La corrosión eléctrica ocurre cuando hay pasaje de corriente eléctrica por el rodamiento.</li><li>• La corriente eléctrica en forma de arco pasa del eje para los anillos y por las bolas derritiendo los componentes.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Diferencia de potencial entre los anillos interno y externo.</li><li>• Utilización de máquina de soldar conectada a tierra por medio de un equipo con rodamientos.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Diseñar circuitos eléctricos que previenen flujo a través de los rodamientos.</li><li>• Aislarn los rodamientos.</li><li>• No conectar a tierra máquinas de soldar en equipos con rodamientos.</li></ul>

# CORROSION ELECTRICA



# Desgaste por descargas eléctricas

- Esta falla es el daño que reciben los flancos de los dientes activos por descargas eléctricas a través de la película de lubricante, donde este daño se manifiesta como una superficie picada, en la microscopía electrónica de barrido se observan pequeños cráteres hemisféricos y esferas de metal fundido

