



LUBRICACIÓN. INTRODUCCIÓN.

HEMOS VISTO QUE EN BUENA PARTE DE LAS APLICACIONES MECÁNICAS, LA **FRICCIÓN** Y EL **DESGASTE** TIENEN EFECTOS NEGATIVOS QUE TENEMOS QUE EVITAR:

1. EL **DESGASTE** ES LA MAYOR CAUSA DE PÉRDIDA DE MATERIALES, POR LO QUE CUALQUIER REDUCCIÓN DEL MISMO PUEDE APORTAR GRANDES BENEFICIOS.
2. LA **FRICCIÓN O ROZAMIENTO** ES UNA DE LAS PRINCIPALES CAUSAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA, POR LO QUE SU CONTROL PUEDE TRADUCIRSE EN UN IMPORTANTE AHORRO ENERGÉTICO.

LA **LUBRICACIÓN** ES EL MODO MÁS EFECTIVO DE REDUCIR LA FRICCIÓN Y CONTROLAR EL DESGASTE.

EL PROPOSITO DE LA **LUBRICACIÓN O ENGRASE** ES EL DE INTERPONER UNA PELÍCULA DE UN MATERIAL FÁCILMENTE **CIZALLABLE**, DE MODO QUE EL **DESLIZAMIENTO SE REALICE EN SU SENO**, ENTRE ELEMENTOS DE MÁQUINAS CON MOVIMIENTO RELATIVO Y CARGADOS.

LA **SUSTANCIA FÁCILMENTE CIZALLABLE** PUEDE SER:

1. **GASEOSA**: POR EJEMPLO EL AIRE.
2. **LIQUIDA**: GENERALMENTE UN ACEITE.
3. **PASTOSA**: GRASA.
4. **SÓLIDA**: GRAFITO, BRONCE POROSO, TEFLÓN...



LUBRICACIÓN. INTRODUCCIÓN.

LAS FUNCIONES DEL LUBRICANTE SON:

- _ REDUCIR LA FRICCIÓN
- _ PROTEGER CONTRA EL DESGASTE Y LA CORROSIÓN.
- _ CONTRIBUIR A LA ESTANQUEIDAD.
- _ CONTRIBUIR A LA REFRIGERACIÓN.
- _ FACILITAR LA EVACUACIÓN DE IMPUREZAS.

EN FUNCIÓN DEL **ESPESOR DE LA PELÍCULA** DE LUBRICANTE QUE INTERPONGAMOS ENTRE LAS DOS SUPERFICIES Y DE LA **RUGOSIDAD SUPERFICIAL** DE LAS MISMAS, PODREMOS DISTINGUIR

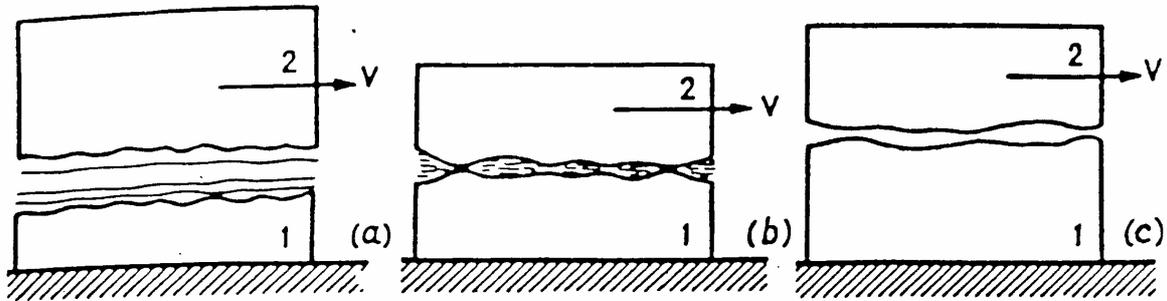
$$\lambda = \frac{\text{Espesor mínimo de película}}{\text{Rugosidad de las superficies}}$$

TRES TIPOS DE LUBRICACIÓN:

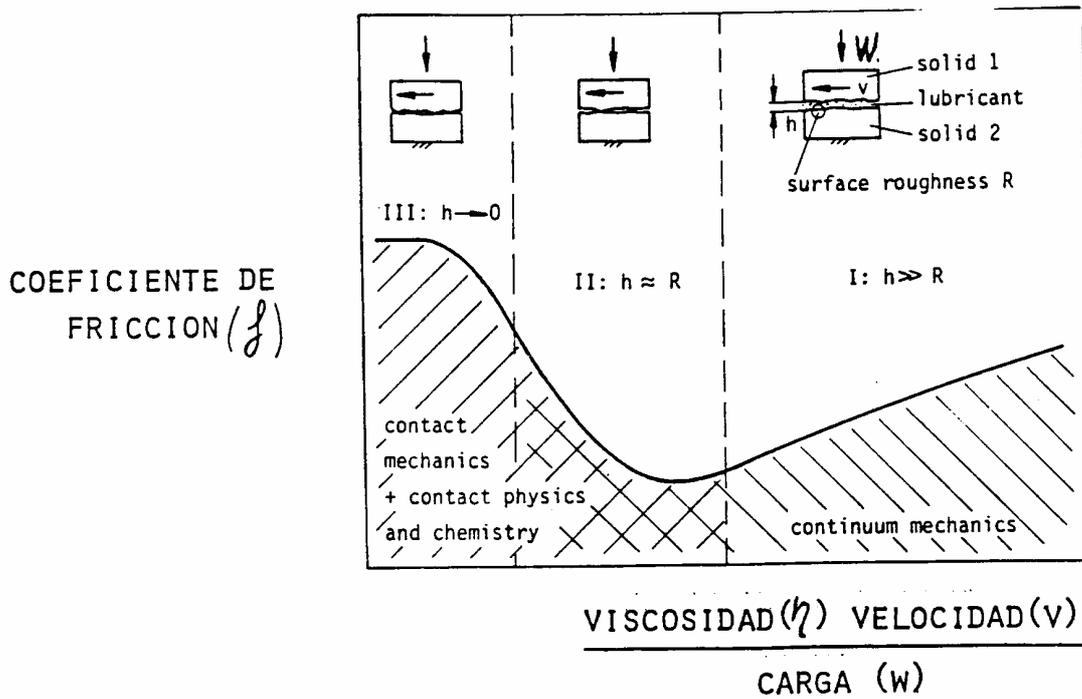
1. **LUBRICACIÓN PERFECTA:** $\lambda > 3.5$. LAS DOS SUPERFICIES SE SEPARAN POR LA INTERPOSICIÓN PERMANENTE DE UNA PELÍCULA DE LUBRICANTE DE FORMA QUE NO SE TOQUEN LOS DOS CUERPOS CON MOVIMIENTO RELATIVO EN NINGÚN PUNTO.
2. **LUBRICACIÓN MIXTA:** $1 < \lambda < 3.5$. LA PELÍCULA DE LUBRICANTE NO IMPIDE TOTALMENTE EL CONTACTO ENTRE RUGOSIDADES, PRODUCIENDOSE ESTE EN ALGUNAS ZONAS. LA CARGA ES SOPORTADA EN PARTE POR EL CONTACTO SÓLIDO-SÓLIDO Y EN OTRAS POR EL LUBRICANTE, SIENDO LA LUBRICACIÓN IMPERFECTA.
3. **LUBRICACIÓN LÍMITE O SECA:** $\lambda < 1$. LA PELÍCULA DE LUBRICANTE DESAPARECE COMPLETAMENTE O ESTE SE QUEDA ENTRE LAS RUGOSIDADES, SIENDO SOPORTADA TODA LA CARGA POR EL CONTACTO SÓLIDO-SÓLIDO.



LUBRICACIÓN. INTRODUCCIÓN.



Lubricación perfecta, imperfecta y seca.



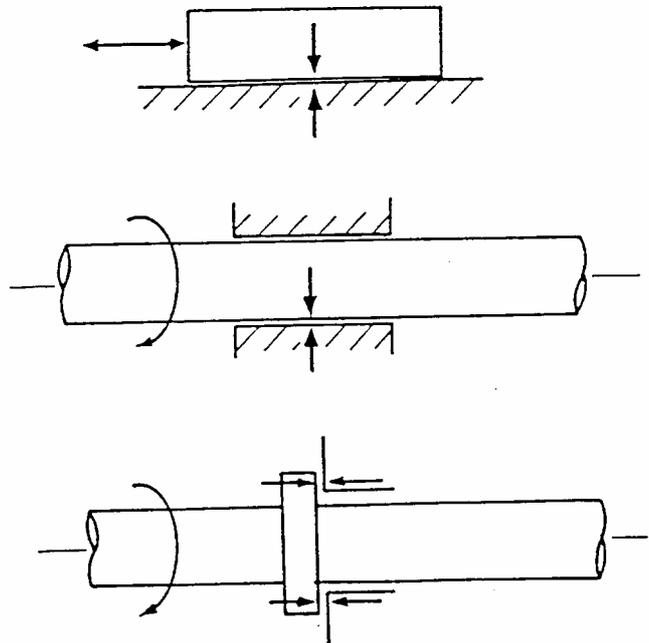
Coeficiente de fricción en función de la viscosidad dinámica del lubricante, velocidad relativa y carga, distinguiendo cada tipo de lubricación.

COJINETES.

EN LAS MÁQUINAS ES FRECUENTE ENCONTRAR INTERACCIONES ENTRE PIEZAS CON **DESLIZAMIENTO RELATIVO** EN LAS QUE ES NECESARIO **REDUCIR LA FRICCIÓN Y MINIMIZAR EL DESGASTE**. PARA ELLO SE UTILIZAN LOS **COJINETES**.

UN **COJINETE** ES UN DISPOSITIVO QUE PERMITE EL MOVIMIENTO RELATIVO EN UNO O DOS GRADOS DE LIBERTAD, IMPIDIENDO EN LOS RESTANTES, DE FORMA QUE SE **MINIMICE LA PERDIDA DE ENERGÍA Y EL DESGASTE DE LOS ELEMENTOS**.

EXISTEN DIFERENTES DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS PARA SATISFACER LOS **REQUERIMIENTOS CINEMÁTICOS Y DE CARGA** DE UN COJINETE, SIENDO LOS TRES ESQUEMAS BÁSICOS LOS REPRESENTADOS EN LA FIGURA.





COJINETES.

EN LO QUE SE REFIERE A COJINETES CILÍNDRICOS, EXISTEN BÁSICAMENTE TRES POSIBILIDADES:

- ① EJE Y COJINETE DESLIZAN **SIN LUBRICANTE**, LO QUE REQUIERE QUE LAS SUPERFICIES EN CONTACTO TENGAN PROPIEDADES ADECUADAS RELATIVAS A LA FRICCIÓN Y AL DESGASTE. EXISTE UNA VARIANTE DE ESTE TIPO DE COJINETES CONSTRUIDOS CON UN MATERIAL POROSO IMPREGNADO CON UN LUBRICANTE LIQUIDO.
- ② UTILIZACIÓN DE **ELEMENTOS RODANTES**, TALES COMO BOLAS O CILINDROS, QUE SE DISPONEN ENTRE LAS SUPERFICIES DE EJE Y COJINETE (RODAMIENTOS).
- ③ **SEPARAR LAS SUPERFICIES DE EJE Y COJINETE MEDIANTE UNA PELÍCULA DE LIQUIDO, VAPOR O GAS LUBRICANTE**, DE FORMA QUE LAS PERDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN NO SEAN CONSECUENCIA DE ROZAMIENTO ENTRE LAS SUPERFICIES SÓLIDAS SINO DE EFECTOS DE VISCOSIDAD EN EL FLUIDO LUBRICANTE DEBIDO A TENSIONES DE CORTADURA.

LA **PELÍCULA** DEL LUBRICANTE INTERPUESTO DEBE ESTAR CONVENIENTEMENTE **PRESURIZADA** PARA SOPORTAR LAS CARGAS QUE SE TRANSMITEN ENTRE EJE Y COJINETE.

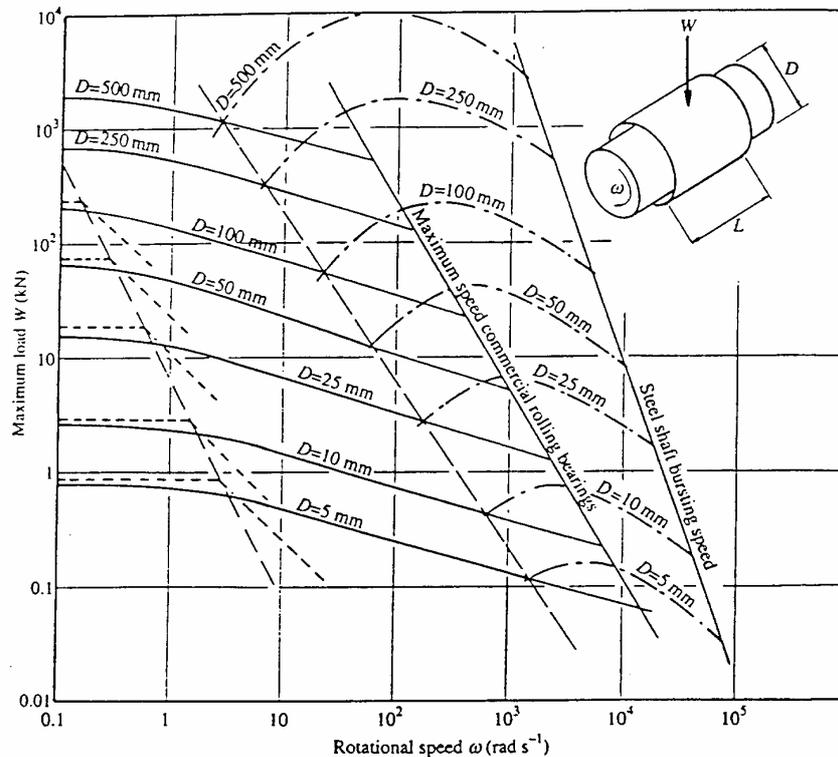
LA PRESURIZACIÓN DEL LUBRICANTE PUEDE CONSEGUIRSE MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UNA **BOMBA EXTERNA (COJINETES HIDROSTÁTICOS)**, O MEDIANTE **EFECTOS HIDRODINÁMICOS** QUE SE PRODUCEN COMO RESULTADO DE LA COMBINACIÓN DE UNA DISPOSICIÓN GEOMÉTRICA Y UN MOVIMIENTO RELATIVO ENTRE EJE Y COJINETE ADECUADOS, Y DEL CARÁCTER VISCOSO DEL FLUIDO (**LUBRICACIÓN HIDRODINÁMICA**).

LA UTILIZACIÓN DEL **LUBRICANTE** PERMITE, ADEMÁS DE REDUCIR LA FRICCIÓN, **EVACUAR CALOR**.

COJINETES.

PARA EL CASO MÁS SIMPLE DE UN **COJINETE CILÍNDRICO QUE SOPORTA UN EJE CON UNA CARGA TRANSVERSAL** A ESTE, LAS DOS VARIABLES FUNDAMENTALES QUE DEFINEN LAS CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO SON LA **CARGA RADIAL Y LA VELOCIDAD DE GIRO DEL EJE.**

EN LA SIGUIENTE FIGURA SE PRESENTAN LOS RANGOS TÍPICOS DE POSIBLES CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DE TRES TIPOS DE COJINETES: **DE FRICCIÓN, HIDRODINÁMICOS Y DE ELEMENTOS RODANTES (RODAMIENTOS).**



Rangos típicos de condiciones de funcionamiento de distintos tipos de cojinetes cilíndricos: cojinetes de fricción (-----); cojinetes hidrodinámicos (-.-.-.); rodamientos (————) [1].



COJINETES.

SUPONIENDO, EN EL CASO DE LOS COJINETES DE FRICCIÓN Y LOS HIDRODINÁMICOS, LONGITUD AXIAL DEL COJINETE IGUAL AL DIÁMETRO (**COJINETE CUADRADO**), PUEDE OBSERVARSE EN LA FIGURA:

1. PARA **BAJAS VELOCIDADES DE GIRO**, LOS **COJINETES DE FRICCIÓN PUEDEN SOPORTAR CARGAS SIMILARES A LOS RODAMIENTOS**, TENIENDO MAYOR CAPACIDAD DE CARGA ESTOS ÚLTIMOS AL AUMENTAR LA VELOCIDAD DE GIRO.
2. LOS **COJINETES HIDRODINÁMICOS SOPORTAN AUN MAYORES CARGAS QUE LOS RODAMIENTOS** PARA EL MISMO TAMAÑO DE COJINETE, A PARTIR DE VELOCIDADES DE GIRO QUE PERMITAN MANTENER UNA PELÍCULA DE LUBRICANTE.

EN MUCHAS OCASIONES, DETERMINADAS CONDICIONES OPERATIVAS IMPONEN OTROS REQUERIMIENTOS DISTINTOS A LA CAPACIDAD DE CARGA, QUE PUEDEN DETERMINAR LA ELECCIÓN DEL COJINETE:

Comparación cualitativa de distintos tipos de cojinetes cilíndricos [1].

	Tipo de cojinete			
	De fricción	Hidrodinámico	Hidrostático	Rodamiento
Precisión de la posición radial	Aceptable	Aceptable	Excelente	Buena
Capacidad de carga axial	Alguna	Ninguna	Ninguna	Alguna
Bajo par de arranque	Bueno	Aceptable	Excelente	Excelente
Prestaciones a altas temperaturas	Limitadas por los materiales	Limitadas por el lubricante	Limitadas por el lubricante	Buena. Limitadas por los materiales
Sistema de lubricación requerido	Simple	Usualmente requiere circulación	Complejo. Sistema de alta presión	Relativamente simple si hay estanqueidad
Tolerancia a la suciedad	Buena si hay estanqueidad	Requiere estanqueidad y filtrado	Estanqueidad y filtrado esenciales	Buena con estanqueidad

EL ENGRASE EN LOS COJINETES. REGÍMENES DE



LUBRICACIÓN.

HEMOS VISTO QUE PARA QUE EXISTA LUBRICACIÓN DEBE EXISTIR UNA **PELÍCULA DE LUBRICANTE** ENTRE LAS PIEZAS EN CONTACTO. LAS DISTINTAS FORMAS DE **CONSEGUIR LA FORMACIÓN DE ESA PELÍCULA**, DAN LUGAR A LOS DIFERENTES **REGÍMENES DE LUBRICACIÓN**:

1. LUBRICACIÓN HIDROSTÁTICA.

EN LA LUBRICACIÓN HIDROSTÁTICA LA CAPA DE LUBRICANTE SE GARANTIZA GRACIAS AL **SUMINISTRO DE UN FLUIDO A PRESIÓN** EN LA ZONA DE CONTACTO.

ESTE TIPO DE COJINETES PUEDE FUNCIONAR **CON O SIN VELOCIDAD RELATIVA** ENTRE MIEMBROS Y MANTENER EN CUALQUIER CONDICIÓN UNA **PELÍCULA DE LUBRICANTE UNIFORME**, GRACIAS A LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL DE SUMINISTRO DE LUBRICANTE.

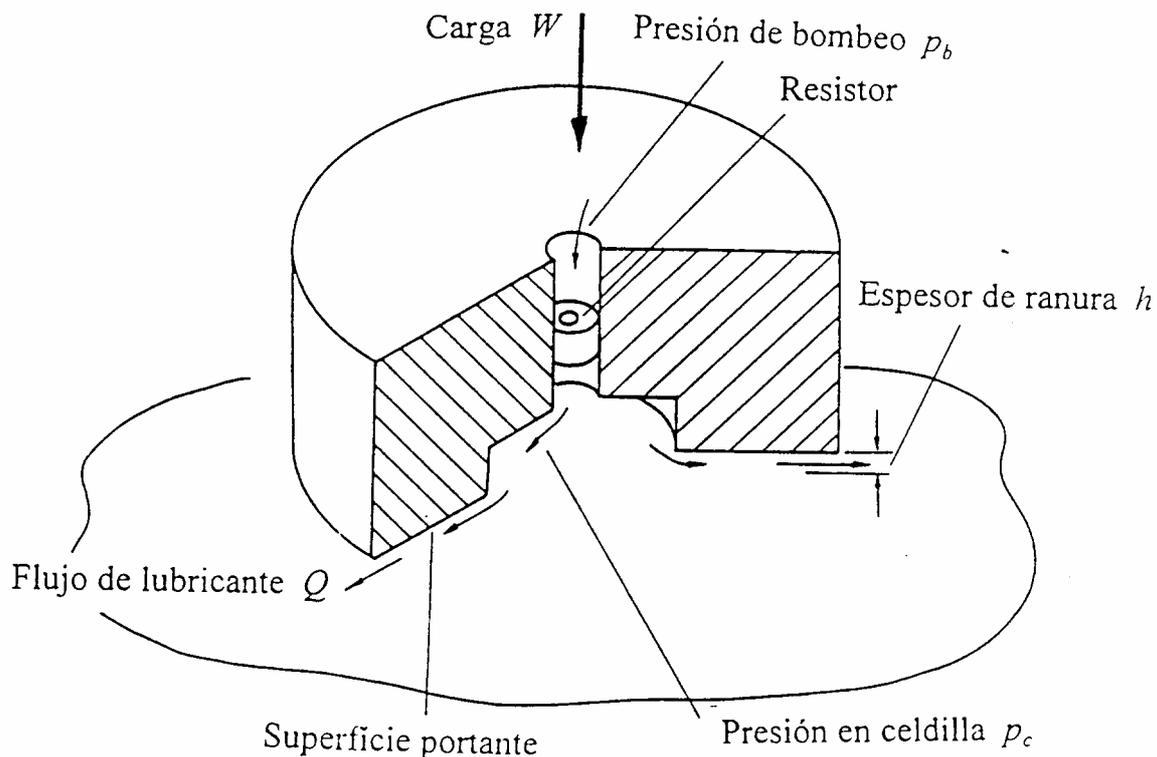
ESTO LES HACE MUY ADECUADOS PARA EL **MOVIMIENTO DE GRANDES CARGAS A BAJAS VELOCIDADES** (DISPOSITIVOS ALTAMENTE CARGADOS QUE REQUIEREN UN CONTROL POSICIONAL MUY PRECISO: TELESCOPIO DE MONTE PALOMAR) O PARA EL **ARRANQUE DE GRANDES MÁQUINAS** (TURBOGENERADORES...), MOMENTO EN EL QUE LAS BAJAS VELOCIDADES NO PERMITEN GARANTIZAR LA FORMACIÓN DE UNA PELÍCULA HIDRODINÁMICA QUE SOPORTE LA CARGA. SI ESTÁN CORRECTAMENTE DISEÑADOS, SUS SUPERFICIES NUNCA ENTRAN EN CONTACTO, POR LO QUE **EL DESGASTE Y EL DAÑO SUPERFICIAL SON NULOS** Y SU **PRECISIÓN** PUEDE MANTENERSE A LO LARGO DE TODA SU VIDA OPERATIVA.

LOS **INCONVENIENTES** DE ESTE TIPO DE COJINETES SON SU **TAMAÑO Y SU COSTE**, ADEMÁS DEL HECHO DE NO ESTAR INHERENTEMENTE LIBRE DE FALLOS, AL **DEPENDER** EL SUMINISTRO DE ACEITE DEL FUNCIONAMIENTO **DE LAS BOMBAS EXTERNAS**.

REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.

UN COJINETE HIDROSTÁTICO, ES AQUEL EN EL QUE LAS SUPERFICIES QUE SOPORTAN LA CARGA, SE ENCUENTRAN SEPARADAS POR UNA PELÍCULA PERMANENTE DE LUBRICANTE. LA PRESIÓN Y CAUDAL NECESARIOS PARA MANTENER LA PELÍCULA DE ACEITE, SE EFECTÚA MEDIANTE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO EXTERNO AL PROPIO COJINETE, SIENDO, POR TANTO, EL ESPESOR DE PELÍCULA INDEPENDIENTE DE LA VELOCIDAD RELATIVA DE DESLIZAMIENTO ENTRE AMBAS SUPERFICIES.

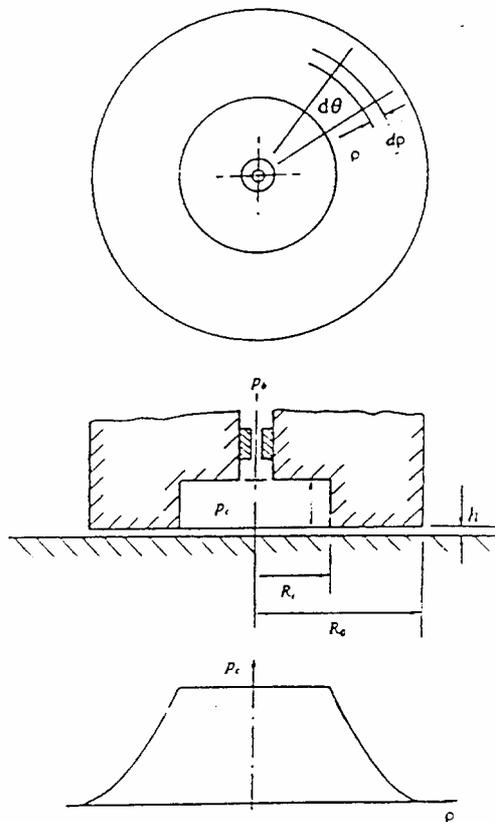
LAS CARACTERÍSTICAS ESENCIALES DE UN TÍPICO COJINETE HIDROSTÁTICO, SE MUESTRAN EN LA SIGUIENTE FIGURA:



AL COJINETE **SE LE PROPORCIONA FLUIDO A LA PRESIÓN p_b** , QUE ANTES DE ENTRAR EN LA CAVIDAD CENTRAL PASA A TRAVÉS DE UN COMPENSADOR O **RESISTOR**, EN EL QUE LA **PRESIÓN DESCENDE A p_c** . LA CAVIDAD, PRACTICADA EN UNA DE LAS DOS SUPERFICIES DESLIZANTES, ESTA RODEADA DE UNA **RANURA CAPILAR DE ESPESOR h** QUE SEPARA AMBAS SUPERFICIES ($20\mu\text{m} \leq h \leq 80\mu\text{m}$).

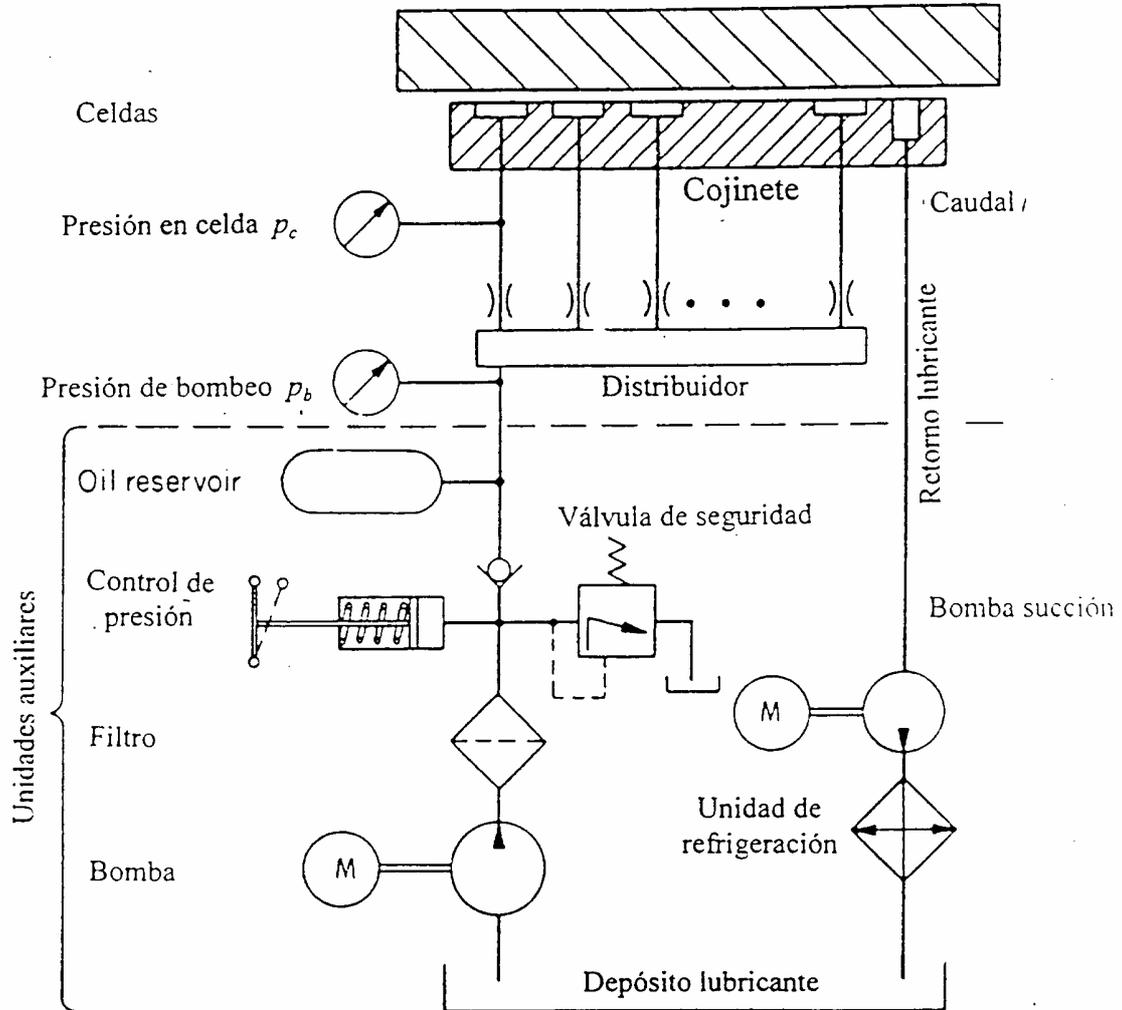
REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.

LA RANURA DE ESPESOR h DA LUGAR A UNA **RESISTENCIA HIDRÁULICA QUE DIFICULTA QUE EL FLUJO DE LUBRICANTE** CIRCULE POR ESTA RANURA, DANDO LUGAR A LA FORMACIÓN DE UN **PERFIL DE PRESIONES**, QUE VARIA DE LA PRESIÓN p_c EN LA CELDILLA A LA **PRESIÓN ATMOSFÉRICA** EN EL BORDE DEL COJINETE, CUYA RESULTANTE EQUILIBRA LA CARGA EXTERNA. LA BASE PARA EL ESTUDIO DE ESTE TIPO DE COJINETES ES LA **ECUACIÓN DE REYNOLDS**.



LA DISPOSICIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE SUMINISTRO DE LUBRICANTE, ESTA REPRESENTADA EN LA SIGUIENTE FIGURA. UNA **BOMBA** ASPIRA FLUIDO DE UN **DEPOSITO** A TRAVÉS DE UN **FILTRO** Y LO SUMINISTRA AL RESISTOR DEL COJINETE A LA PRESIÓN p_b , A TRAVÉS DE UN **FILTRO ANTIPARASITARIO**. DICHA PRESIÓN SE DETERMINA AJUSTANDO LA **VÁLVULA DE REGULACIÓN**. EN EL CIRCUITO SE INSTALA UNA **VÁLVULA DE SEGURIDAD** Y UN FILTRO EN EL **RAMAL DE RETORNO** DEL LUBRICANTE.

REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.



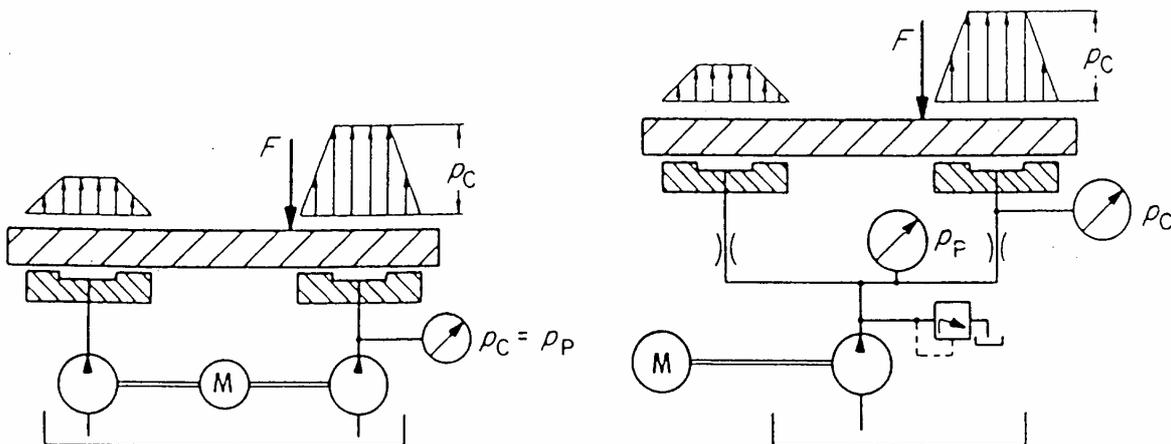
Circuito hidráulico y accesorios de un cojinete hidrostático.

REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.

PARA DAR SOPORTE A **CARGAS EXCÉNTRICAS**, LOS COJINETES HIDROSTÁTICOS SE CONSTRUYEN CON **MÚLTIPLES CELDAS**. EL **SUMINISTRO DEL ACEITE** A CADA CELDA DEBE SER **INDEPENDIENTE**, DE FORMA QUE PUEDAN CONSEGUIRSE PRESIONES p_c DISTINTAS EN LAS DIFERENTES CELDAS, EN RESPUESTA A LAS CONDICIONES CAMBIANTES DE EQUILIBRIO.

EXISTEN DOS POSIBLES SOLUCIONES TÉCNICAS:

1. **UNA BOMBA POR CELDA:** TIENE GRAN CAPACIDAD DE CARGA, YA QUE LA PRESIÓN DE LA CELDA ESTA SOLO LIMITADA POR LA MÁXIMA PRESIÓN DISPONIBLE EN LA BOMBA, PERO REQUIERE FUERTES INVERSIONES Y UN ALTO COSTE DE MANTENIMIENTO.
2. **BOMBA ÚNICA CON RESISTORES:** MUY UTILIZADO POR RAZONES ECONÓMICAS. LAS RESISTENCIAS DE COMPENSACIÓN SE OBTIENEN MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE TUBOS CAPILARES CALIBRADOS.

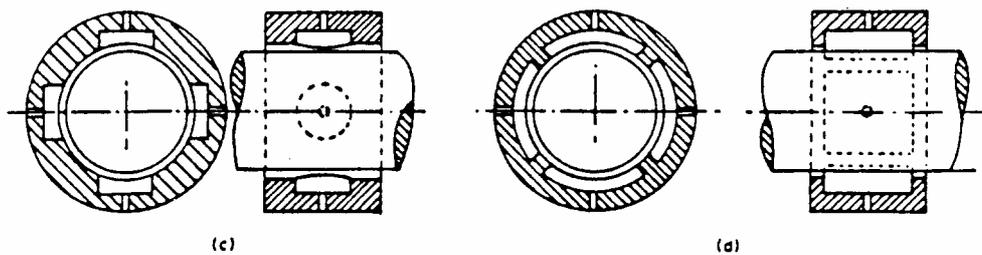
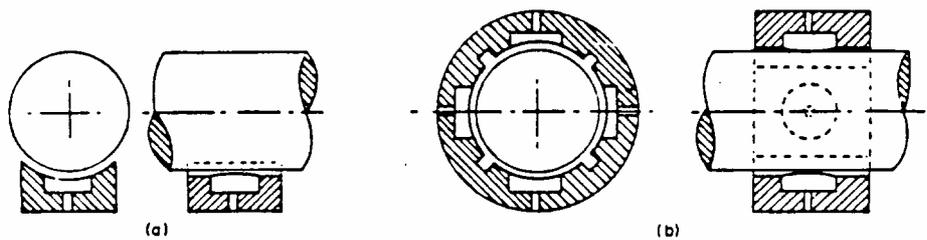
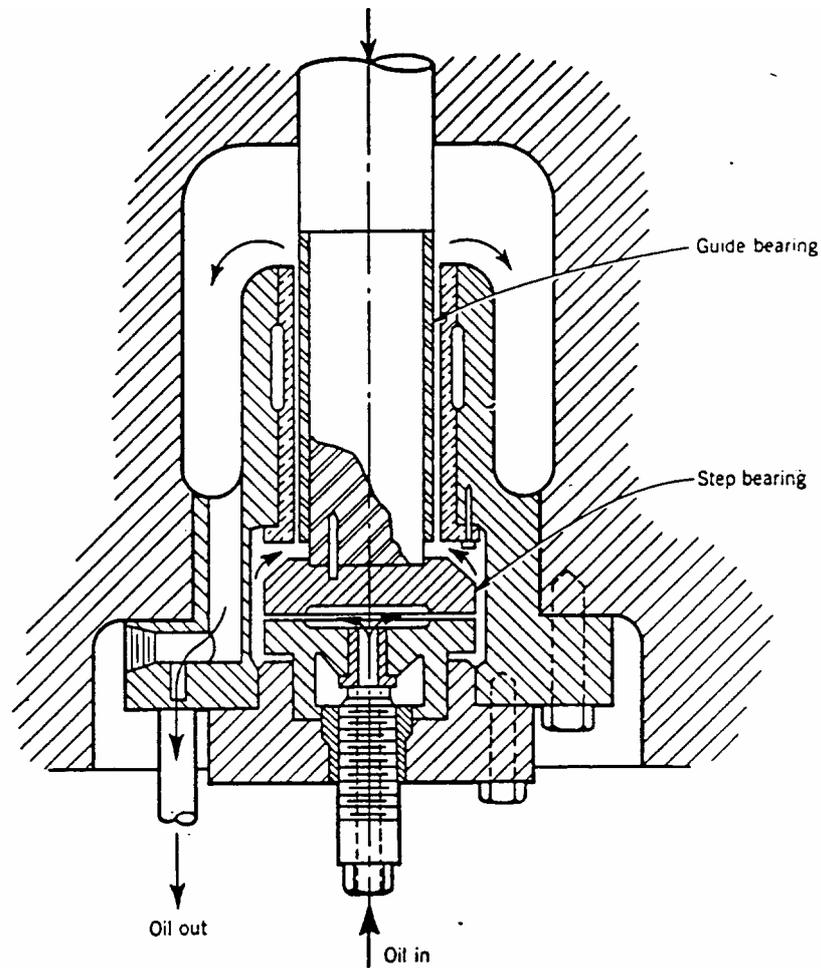


a.- Una bomba por celda.

b.- Bomba única con resistores.



REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.

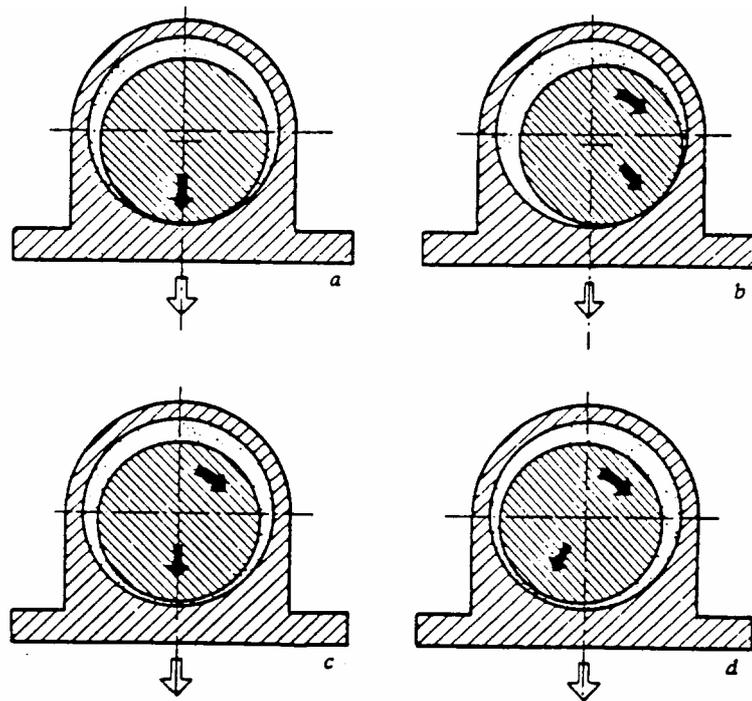


REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.

2. **LUBRICACIÓN HIDRODINÁMICA.**

LA LUBRICACIÓN HIDRODINÁMICA APARECE ENTRE **DOS SUPERFICIES EN MOVIMIENTO RELATIVO** QUE ARRASTRANDO A UN **FLUIDO** A UN ESPACIO CONVERGENTE, SON CAPACES DE CREAR UNA CUÑA DE FLUIDO A PRESIÓN CAPAZ DE SOPORTAR LA CARGA A LA QUE ESTÁN SOMETIDAS.

EN LA SIGUIENTE FIGURA PODEMOS OBSERVAR LAS FASES DE FORMACIÓN DE LA PELÍCULA HIDRODINÁMICA EN UN COJINETE CILÍNDRICO:

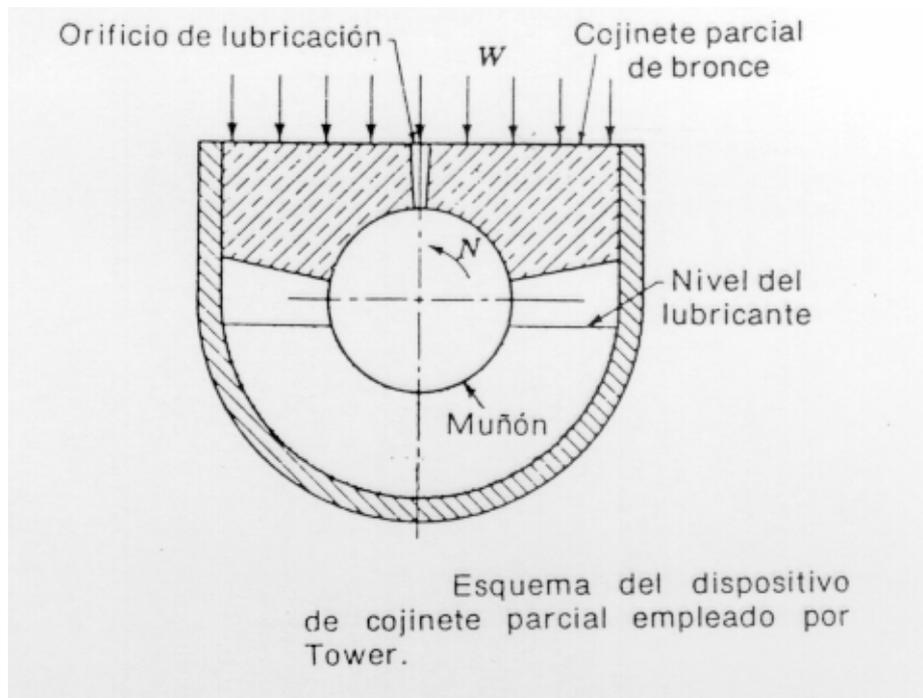


LAS CONDICIONES PARA QUE **SEA POSIBLE** LA FORMACIÓN DE LA PELÍCULA HIDRODINÁMICA SON LAS SIGUIENTES:

1. QUE LA HOLGURA ENTRE LAS SUPERFICIES SEA MAYOR QUE LAS RUGOSIDADES.
2. QUE LAS SUPERFICIES TENGAN MOVIMIENTO RELATIVO.
3. QUE LAS SUPERFICIES NO SEAN PARALELAS.
4. QUE EL FLUIDO SEA VISCOSO Y UNTUOSO.

REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.

LA **TEORÍA** ACTUAL DE LA LUBRICACIÓN HIDRODINÁMICA, TUVO SU ORIGEN EN EL LABORATORIO DE BEAUCHAMP **TOWER** EN LOS PRIMEROS AÑOS DE LA DÉCADA DE **1880**. ESTE INVESTIGADOR ESTABA ENCARGADO DE ESTUDIAR LA **LUBRICACIÓN EN LOS COJINETES DE LOS EJES DE VAGONES** DE FERROCARRIL Y DE DETERMINAR EL MEJOR MÉTODO PARA LUBRICARLOS.

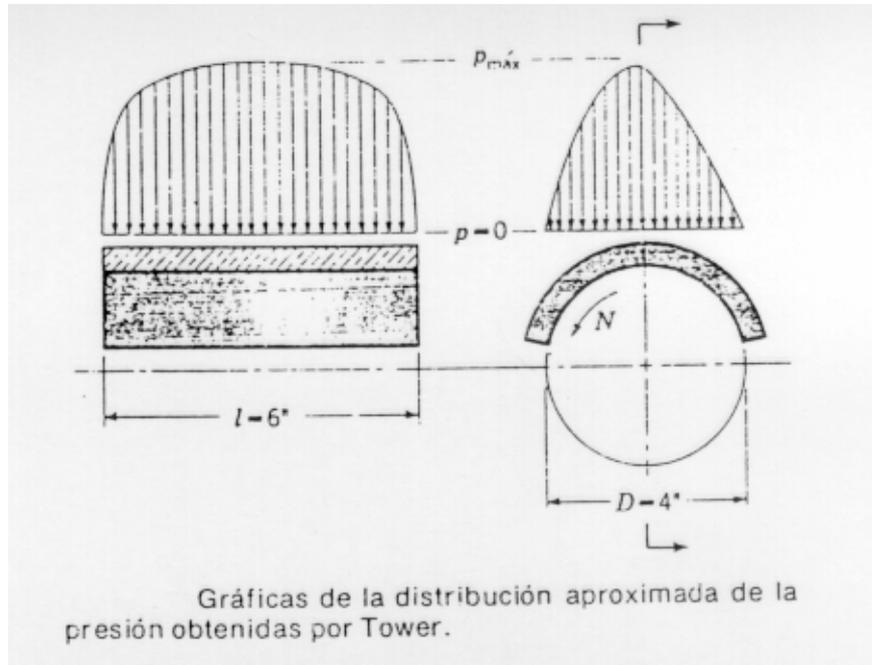


LA FIGURA NUESTRA UN ESQUEMA DEL COJINETE DE MUÑÓN QUE INVESTIGO TOWER, OBTENIENDO **COEFICIENTES DE FRICCIÓN MUY BAJOS**.

TRAS ENSAYAR EL COJINETE TOWER ABRIÓ UN **ORIFICIO** EN LA PARTE SUPERIOR PARA INTRODUCIR NUEVO ACEITE. PERO CUANDO PUSO EN MARCHA EL MUÑÓN, EL ACEITE BROTO POR DICHO ORIFICIO. INTENTO TAPONARLO, PRIMERO CON UN TAPÓN DE CORCHO Y LUEGO CON UNO DE MADERA, PERO EN AMBOS CASOS SALTABA EL TAPÓN. INSTALO UN MANÓMETRO Y COMPROBÓ QUE **LAS PRESIONES EXISTENTES ERAN MUY ELEVADAS**, LO QUE PERMITÍA AL COJINETE SOPORTAR CARGAS MUY ELEVADAS.

REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.

LAS GRÁFICAS DE DISTRIBUCIÓN DE LA PRESIÓN OBTENIDAS POR TOWER FUERON:



LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR TOWER, LLEVARON A OSBORNE **REYNOLDS** A PENSAR QUE DEBÍA EXISTIR UNA LEY DEFINIDA QUE RELACIONARA:

- ❑ LA PRESIÓN EN EL FLUIDO.
- ❑ EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN.
- ❑ LA VELOCIDAD RELATIVA.

OBTENIENDO UNA **ECUACIÓN DIFERENCIAL** QUE SIGUE SIENDO EL PUNTO DE PARTIDA PARA LOS ACTUALES ESTUDIOS DE LUBRICACIÓN.

REYNOLDS PROPUSO QUE EL LUBRICANTE SE **ADHERÍA A LAS DOS SUPERFICIES** Y ERA **IMPULSADO** POR LA SUPERFICIE EN MOVIMIENTO **HACIA UN ESPACIO EN FORMA DE CUÑA** CON ESTRECHAMIENTO PROGRESIVO, LO QUE DABA ORIGEN A UNA **PRESIÓN EN EL FLUIDO** SUFICIENTE PARA SOPORTAR LA CARGA EN EL COJINETE.



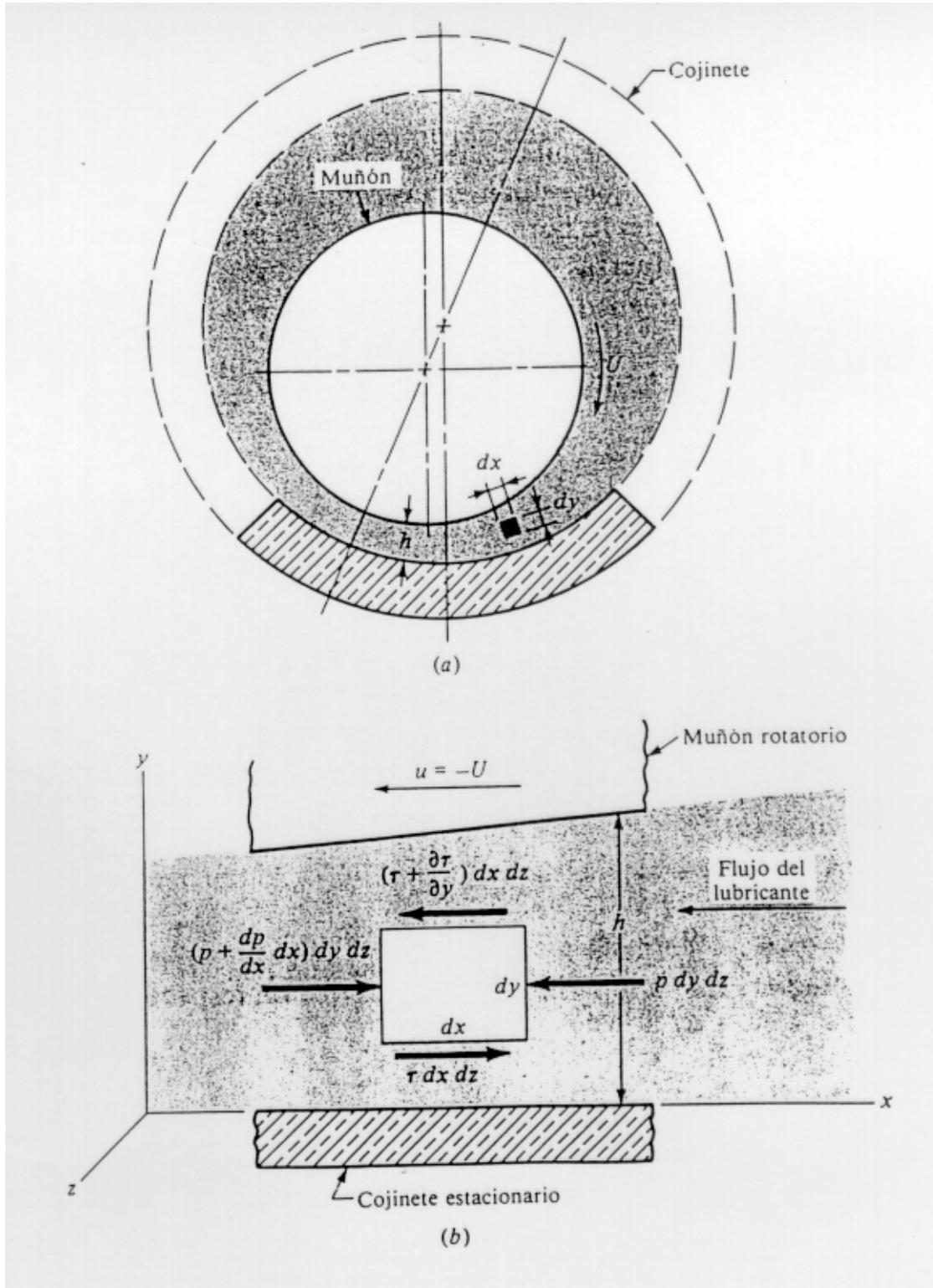
REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.

HIPÓTESIS DE LA TEORÍA HIDRODINÁMICA:

LA TEORÍA HIDRODINÁMICA DE REYNOLDS SE FUNDAMENTA EN UNA SERIE DE HIPÓTESIS DE ENTRE LAS QUE DESTACAN LAS SIGUIENTES:

1. LA **PELÍCULA DE FLUIDO ES MUY DELGADA** EN COMPARACIÓN CON LOS RADIOS DE CURVATURA DEL COJINETE, POR LO QUE EL COJINETE PODIA SUPONERSE PLANO, **DESPRECIANDO DICHO RADIO DE CURVATURA.**
2. EL **LUBRICANTE** RESPONDE A LA **LEY DE NEWTON** DE MOVIMIENTO DE UN FLUIDO VISCOSO.
3. SE DESPRECIAN LAS **FUERZAS DE INERCIA** DEL LUBRICANTE.
4. SE SUPONE QUE EL FLUIDO ES INCOMPRESIBLE.
5. LA **PRESIÓN ES CONSTANTE EN LA DIRECCIÓN AXIAL** (ESPESOR)
6. EL **FLUJO ES LAMINAR**
7. EL FLUIDO SE **ADHIERE** A LAS SUPERFICIES SÓLIDAS.
8. LAS **SUPERFICIES SON RIGIDAS.**

REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.



REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.

SEA UN MUÑÓN QUE GIRA EN SENTIDO HORARIO SOPORTADO POR UNA CAPA DE LUBRICANTE DE ESPESOR VARIABLE "h" SOBRE



UN COJINETE PARCIAL ESTACIONARIO.

ADMITIENDO LA HIPÓTESIS DE COJINETE PLANO, SE PLANTEA EL SISTEMA DE REFERENCIA DE LA FIGURA ANTERIOR, CON LAS SIGUIENTES CONSIDERACIONES:

- A. EL COJINETE Y EL MUÑÓN **SE PROLONGAN INDEFINIDAMENTE EN LA DIRECCIÓN "Z"**, LO QUE SIGNIFICA QUE EL FLUJO DEL LUBRICANTE EN ESA DIRECCIÓN ES NULO.
- B. LA **PRESIÓN DE LA PELÍCULA ES CONSTANTE EN LA DIRECCIÓN "Y"**, POR LO TANTO LA PRESIÓN SOLO DEPENDE DE "X".
- C. LA **VELOCIDAD** DE UNA PARTICULA DEL LUBRICANTE **DEPENDE SOLAMENTE DE LAS COORDENADAS "X" e "Y"**.

SUPONGAMOS UN ELEMENTO LUBRICANTE DE DIMENSIONES dx, dy, dz EN EL SENO DEL FLUIDO EN EL QUE CALCULAMOS LOS ESFUERZOS QUE ACTÚAN SOBRE SUS CARAS.

SOBRE LAS CARAS DERECHA E IZQUIERDA DEL ELEMENTO ACTÚAN **FUERZAS NORMALES DEBIDAS A LA PRESIÓN** Y SOBRE LAS CARAS SUPERIOR E INFERIOR ACTUAN **FUERZAS TANGENCIALES DEBIDAS A LA VISCOSIDAD Y A LA VELOCIDAD DEL FLUIDO**.

$$\sum F = \left(p + \frac{dp}{dx} dx \right) dy dz + \tau dx dz - \left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial y} dy \right) dx dz - p dy dz = 0$$

SIMPLIFICANDO:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\partial \tau}{\partial y}$$

REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.



POR TRATARSE DE UN **FLUIDO NEWTONIANO** (FUERZA TANGENCIAL PROPORCIONAL AL GRADIENTE DE VELOCIDAD EN EL SENO DEL FLUIDO. LA CONSTANTE DE PROPORCIONALIDAD ES LA VISCOSIDAD DINÁMICA, MEDIDA EN Pa.s)

$$\tau = \eta \frac{\partial u}{\partial y}$$

SUSTITUYENDO:

$$\frac{dp}{dx} = \eta \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

MANTENIENDO “x” CONSTANTE E INTEGRANDO LA EXPRESIÓN ANTERIOR DOS VECES RESPECTO A “y” SE OBTIENE:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} y + C_1$$

$$u = \frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dx} y^2 + C_1 y + C_2$$

PUDIENDO SER LAS CONSTANTES DE INTEGRACIÓN FUNCIONES DE “x”.

SI SUPONEMOS QUE NO EXISTE DESLIZAMIENTO ENTRE EL LUBRICANTE Y LAS SUPERFICIES DEL GORRÓN Y COJINETE:

$$y=0 \quad u=0 \quad ; \quad y=h \quad u=-U$$

TENIENDO EN CUENTA QUE h ES FUNCIÓN DE “x” PODEMOS OBTENER LAS CONSTANTES DE INTEGRACIÓN

$$C_1 = -\frac{U}{h} - \frac{h}{2\eta} \frac{dp}{dx}$$

$$C_2 = 0$$



REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.

ES DECIR:

$$u = \frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dx} (y^2 - h y) - \frac{U}{h} y$$

ECUACIÓN QUE ESTABLECE LA **DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD DEL LUBRICANTE** EN FUNCIÓN DE LA COORDENADA “y” Y DEL GRADIENTE DE PRESIÓN EN LA DIRECCIÓN “x”.

SE OBSERVA QUE LA DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD EN LA DIRECCIÓN “y” SE OBTIENE POR SUPERPOSICIÓN DE UNA DISTRIBUCIÓN PARABÓLICA Y UNA DISTRIBUCIÓN LINEAL.

SI “Q” ES EL FLUJO O CAUDAL EN LA DIRECCIÓN “x” POR

$$Q = \int_0^h u dy$$

UNIDAD DE ANCHO EN LA DIRECCIÓN “z”:

$$Q = -\frac{U h}{2} - \frac{h^3}{12\eta} \frac{dp}{dx}$$

SUSTITUYENDO EL VALOR DE “u” E INTEGRANDO:

DADO QUE EL FLUIDO SE SUPONE INCOMPRESIBLE Y LA CONTINUIDAD DE LA MATERIA, EL **CAUDAL QUE PASA POR CUALQUIER SECCIÓN TRANSVERSAL PERMANECE CONSTANTE:**

$$\frac{dQ}{dx} = -\frac{U}{2} \frac{dh}{dx} - \frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{dp}{dx} \right) = 0$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{dp}{dx} \right) = -6U \frac{dh}{dx}$$

ECUACIÓN CLÁSICA DE REYNOLDS PARA FLUJO UNIDIMENSIONAL, DESPRECIANDO LAS FUGAS LATERALES, ES DECIR EL FLUJO EN LA DIRECCIÓN “z”.



REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.

SI NO SE DESPRECIAN ESAS FUGAS Y MEDIANTE UN DESARROLLO SIMILAR:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = -6U \frac{\partial h}{\partial x}$$

LA ECUACIÓN ANTERIOR NO TIENE UNA SOLUCIÓN GENERAL.

SIN EMBARGO, A. A. **RAIMONDI** y JHON **BOYD**, DE LOS WHESTINGHOUSE RESEARCH LABORATORIES, EMPLEARON TÉCNICAS DE ITERACIÓN EN ORDENADOR PARA RESOLVER LA ECUACIÓN DE REYNOLDS. LOS RESULTADOS FUERON REPRESENTADOS EN FORMA DE **GRÁFICOS** QUE UTILIZAN FRECUENTEMENTE EN ABCISAS EL **NUMERO DE SOMMERFELD O NUMERO CARACTERISTICO DEL COJINETE**:

$$S = \left[\frac{r}{c} \right]^2 \frac{\eta N}{P}$$

DONDE:

- S: N° Característico del cojinete
- r: radio del muñón
- c: holgura radial
- η : viscosidad absoluta
- N: velocidad relativa entre muñón y cojinete
- P: carga por unidad de área proyectada.



REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.

EN EL DISEÑO DE COJINETES SE DISTINGUEN DOS GRUPOS DE VARIABLES:

1. CONTROLADAS POR EL DISEÑADOR:

- VISCOSIDAD
- CARGA POR UNIDAD DE AREA PROYECTADA DE COJINETE, P
- VELOCIDAD DE ROTACIÓN, N
- DIMENSIONES DEL COJINETE Y DEL MUÑO, r , c (holgura radial) y l (longitud del cojinete)

2. VARIABLES DEPENDIENTES QUE EL DISEÑADOR SOLO PUEDE CONTROLAR DE FORMA INDIRECTA:

- COEFICIENTE DE ROZAMIENTO, μ
- ELAVACIÓN DE LA TEMPERATURA, T
- FLUJO DE LUBRICANTE, Q
- ESPESOR MINIMO DE PELICULA, h_0

POR LO TANTO LA ESTRATEGIA GENERAL A SEGUIR EN EL DISEÑO DE COJINETES, CONSISTE EN DEFINIR LIMITES SATISFACTORIOS PARA EL SEGUNDO GRUPO DE VARIABLES Y DESPUES DECIDIR LOS VALORES DE LAS VARIABLES DEL PRIMER GRUPO DE FORMA QUE NO SE REBASEN DICHAS LIMITACIONES.



REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.

EL **NÚMERO DE SOMMERFELD** ENGLOBA TODAS LAS VARIABLE ESPECIFICADAS POR EL DISEÑADOR, POR LO QUE SE UTILIZA COMO **ABCISA EN LOS GRAFICOS DE RAIMONDI y BOYD.**

En los **gráficos** que se presentan a continuación pueden obtenerse los siguientes **parámetros adimensionales**:

- 1.- **Variable de fricción $f(r/c)$** , de la que se obtiene el **coeficiente de rozamiento equivalente "f"**.

El par de rozamiento en el cojinete, siendo "**W**" **la carga total sobre el cojinete.**

$$T = f W r$$

La **potencia perdida** en el cojinete:

$$N_p = T N$$

- 2.- **Variable de espesor mínimo de película h_0/c** . En la grafica se indican los limites óptimos para los dos criterios de diseño mas frecuentemente utilizados:
 - carga máxima admisible
 - perdida de potencia mínima
- 3.- **Localización del espesor mínimo de película**
- 4.- **Variable de flujo, $Q/rcNI$** , utilizada para calcular la cantidad de lubricante impulsada por el muñón hacia la cuña hidrodinámica
- 5.- **Relación de flujos, Q/Q_s** . Permite conocer el flujo de aceite que fluye hacia los extremos y se fuga del cojinete, **Q_s** .
- 6.- **Presión máxima desarrollada en la película, P/P_{MAX}** , donde en principio la presión de alimentación es la atmosférica
- 7.- **Localización de la presión máxima en la película** según el diagrama anterior.



Nomenclatura de una chumacera o cojinete deslizante

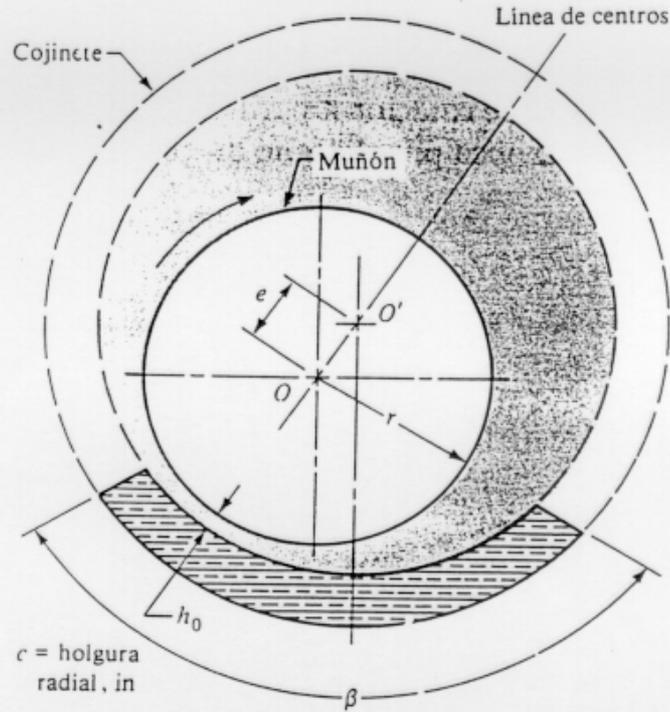
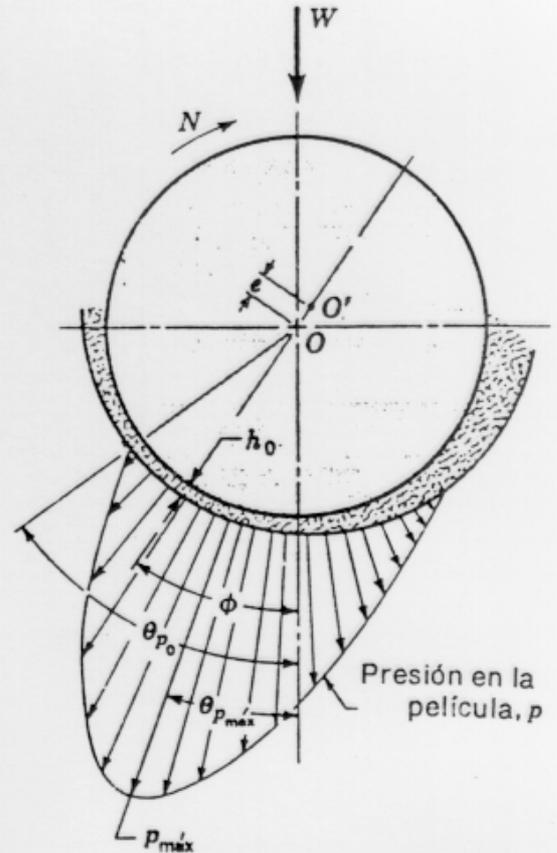


Diagrama polar de la distribución de la presión en la película, en el que se indica la notación utilizada. (Raimondi y Boyd.)





- 1.- Variable de fricción $f(r/c)$, de la que se obtiene el coeficiente de rozamiento equivalente "f".

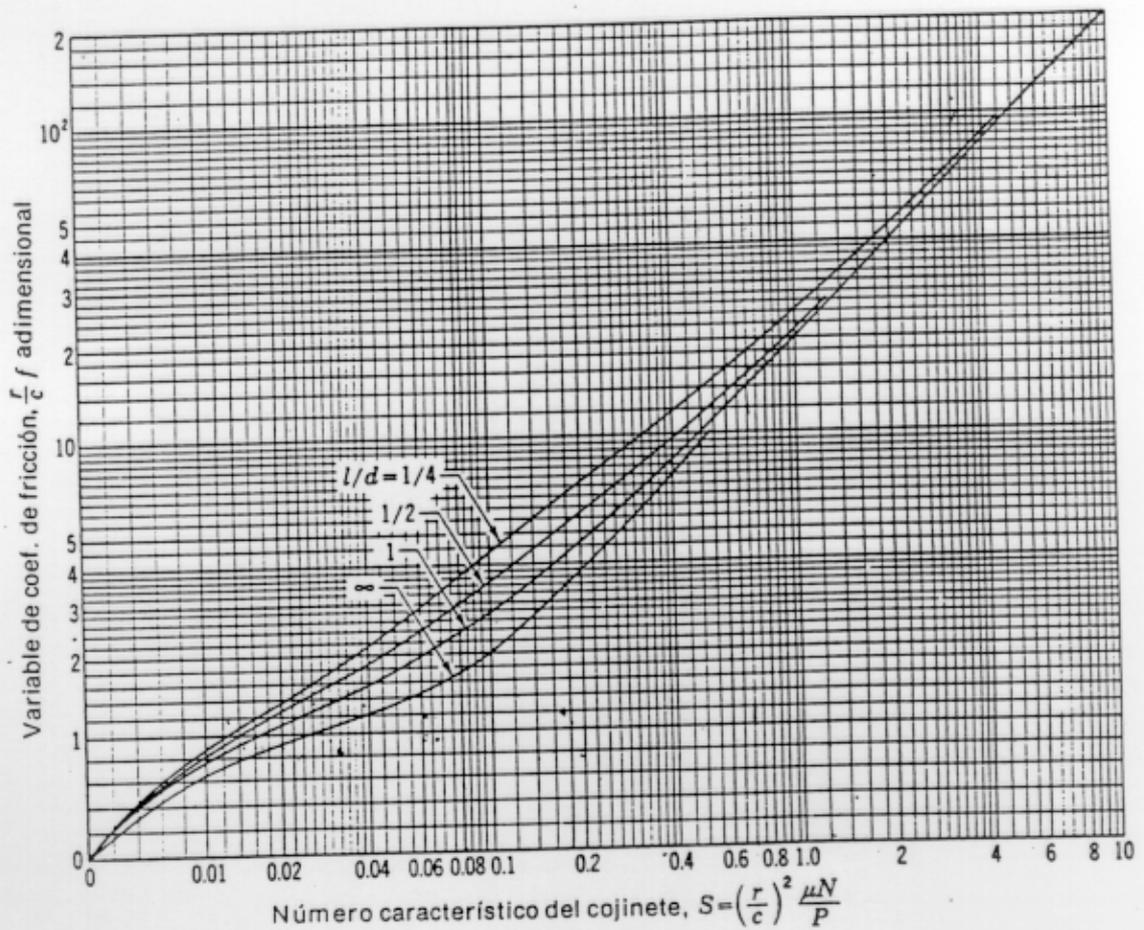
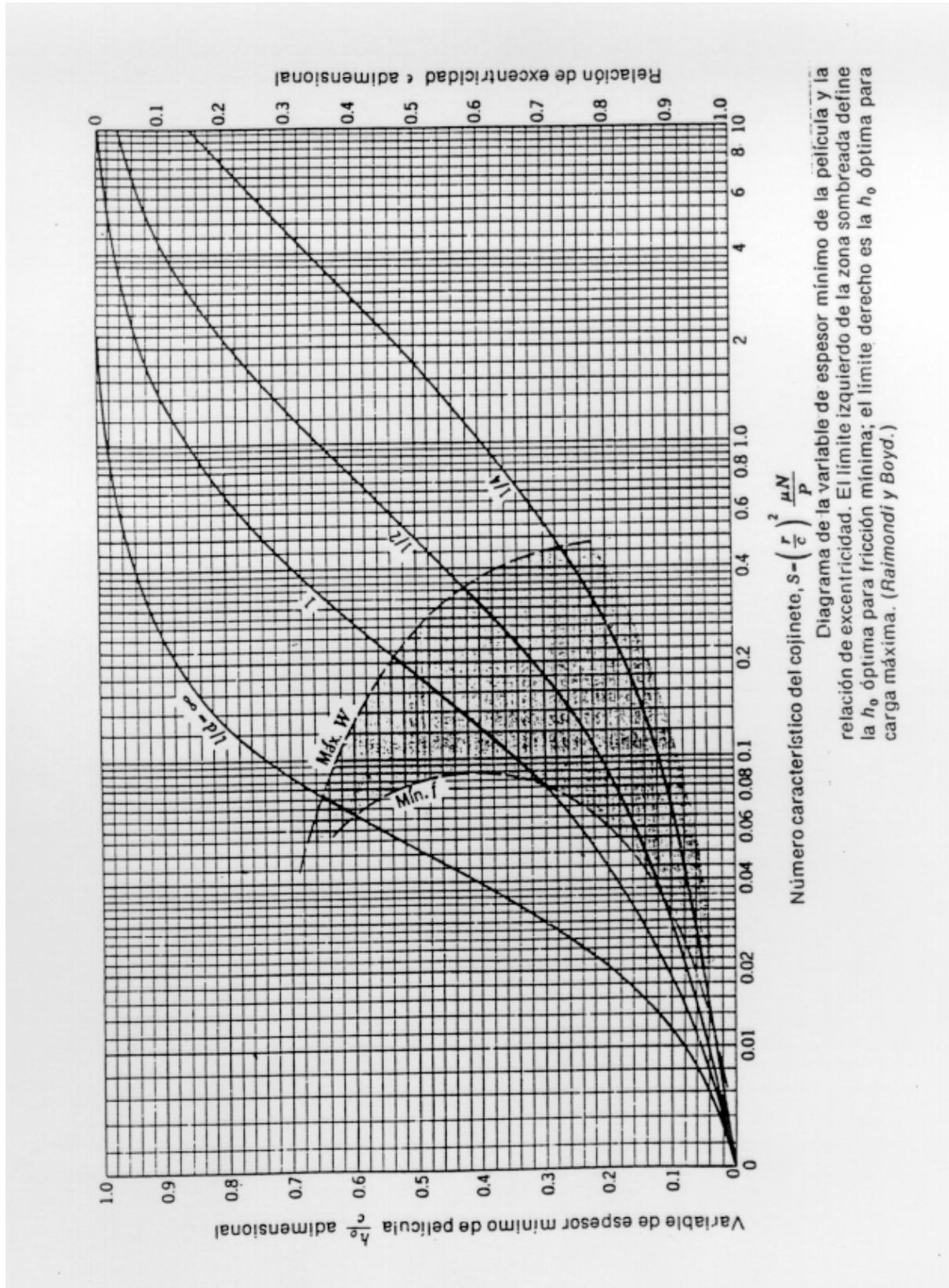


Diagrama para la variable de coeficiente de fricción. (Raimondi y Boyd.)

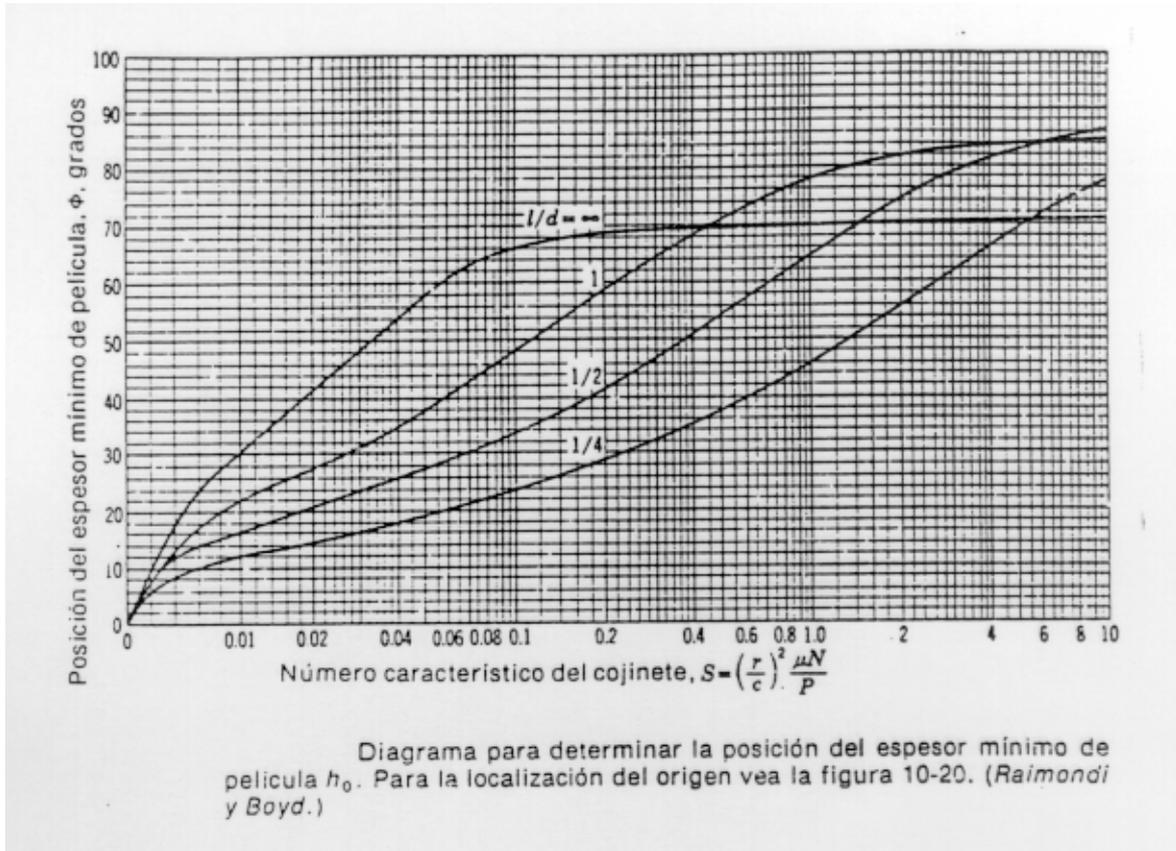


2.- Variable de espesor mínimo de película h_0/c .



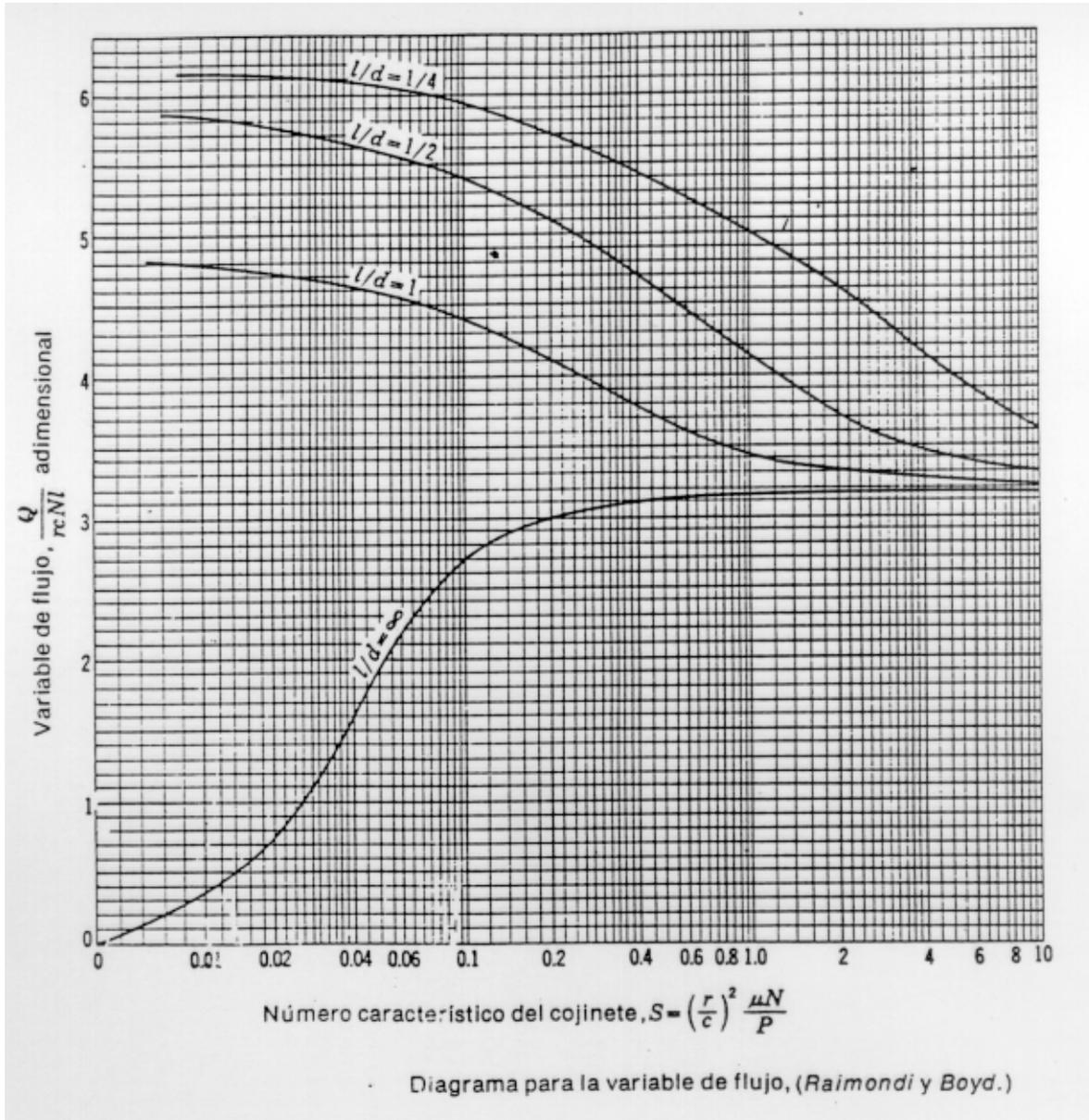


3.- Localización del espesor mínimo de película



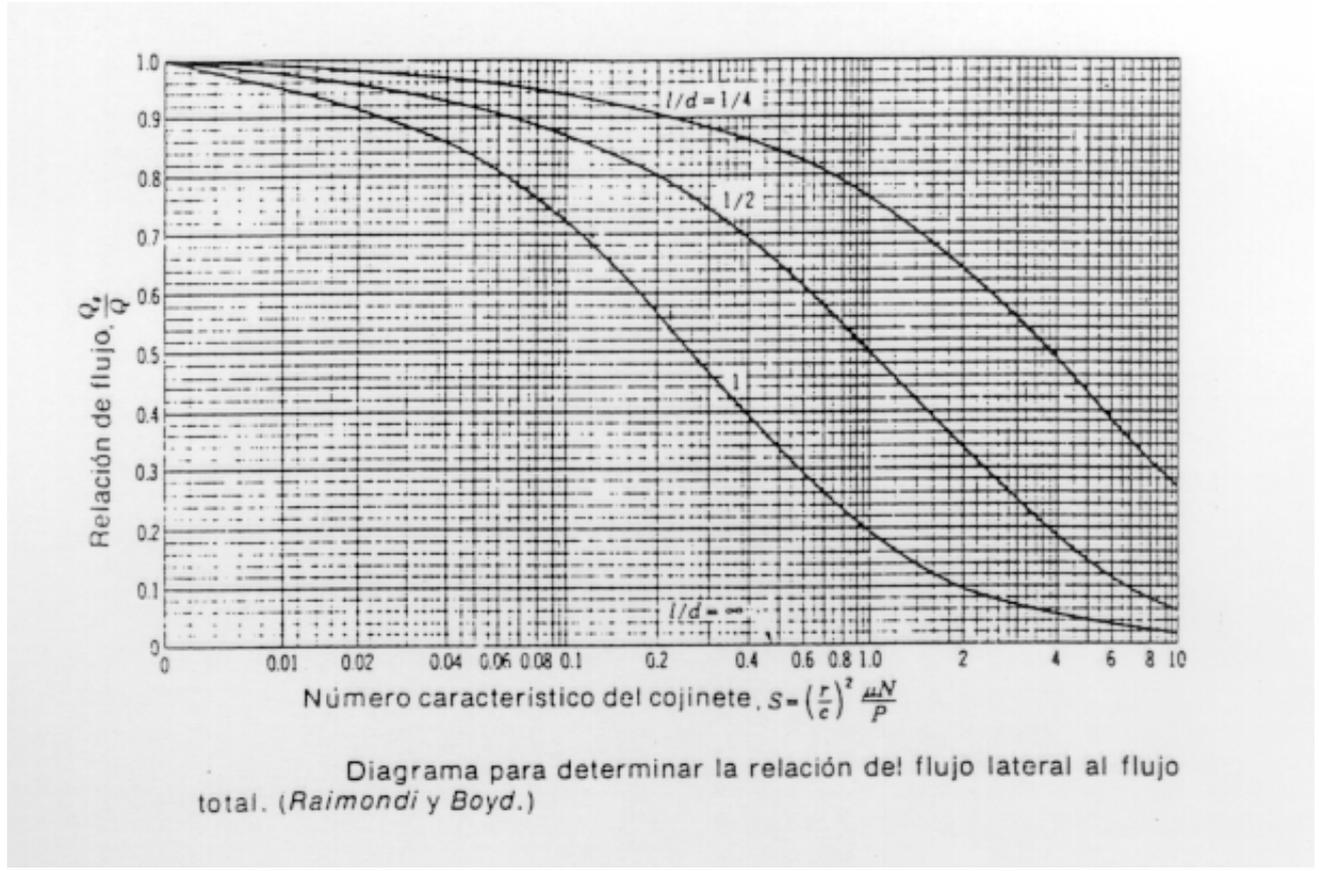


4.- Variable de flujo, $Q/rcNI$,



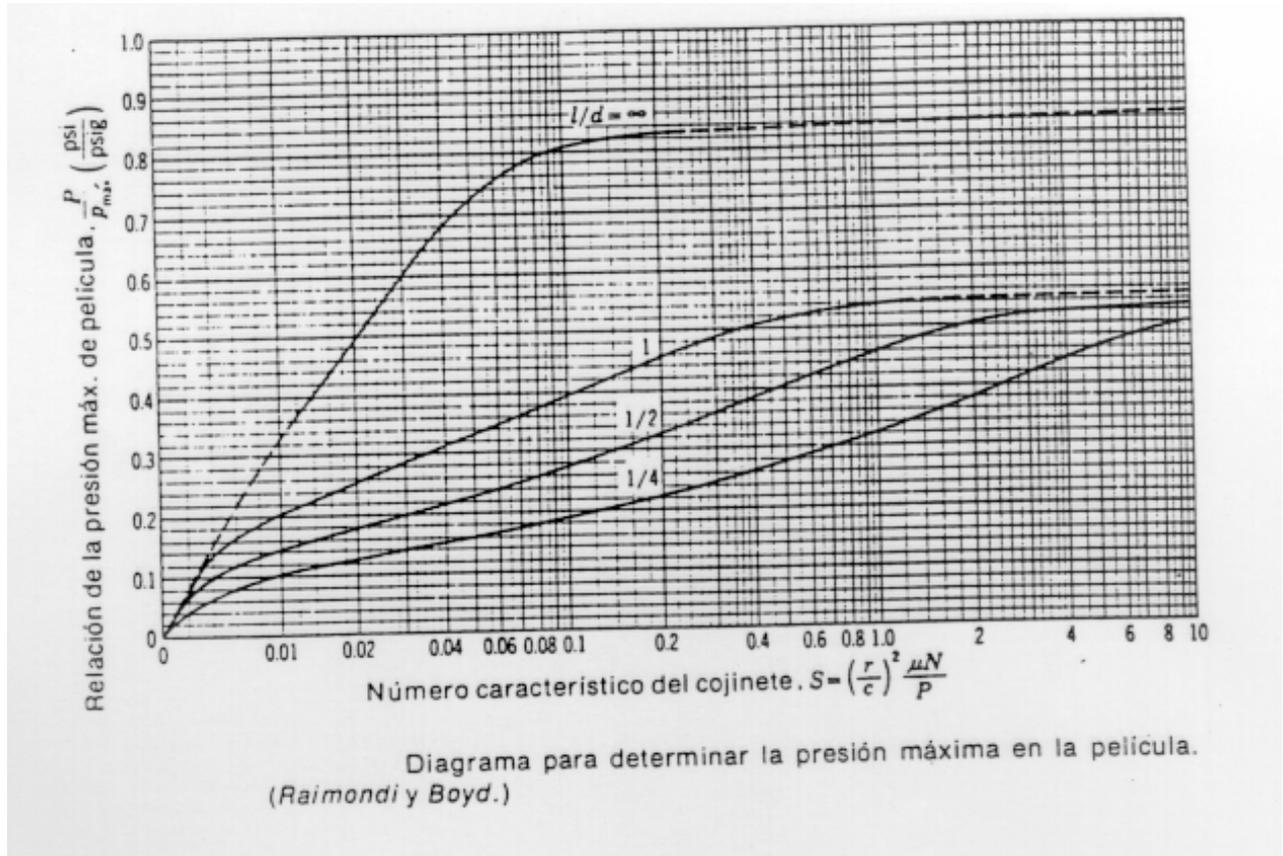


5.- Relación de flujos, Q/Q_S



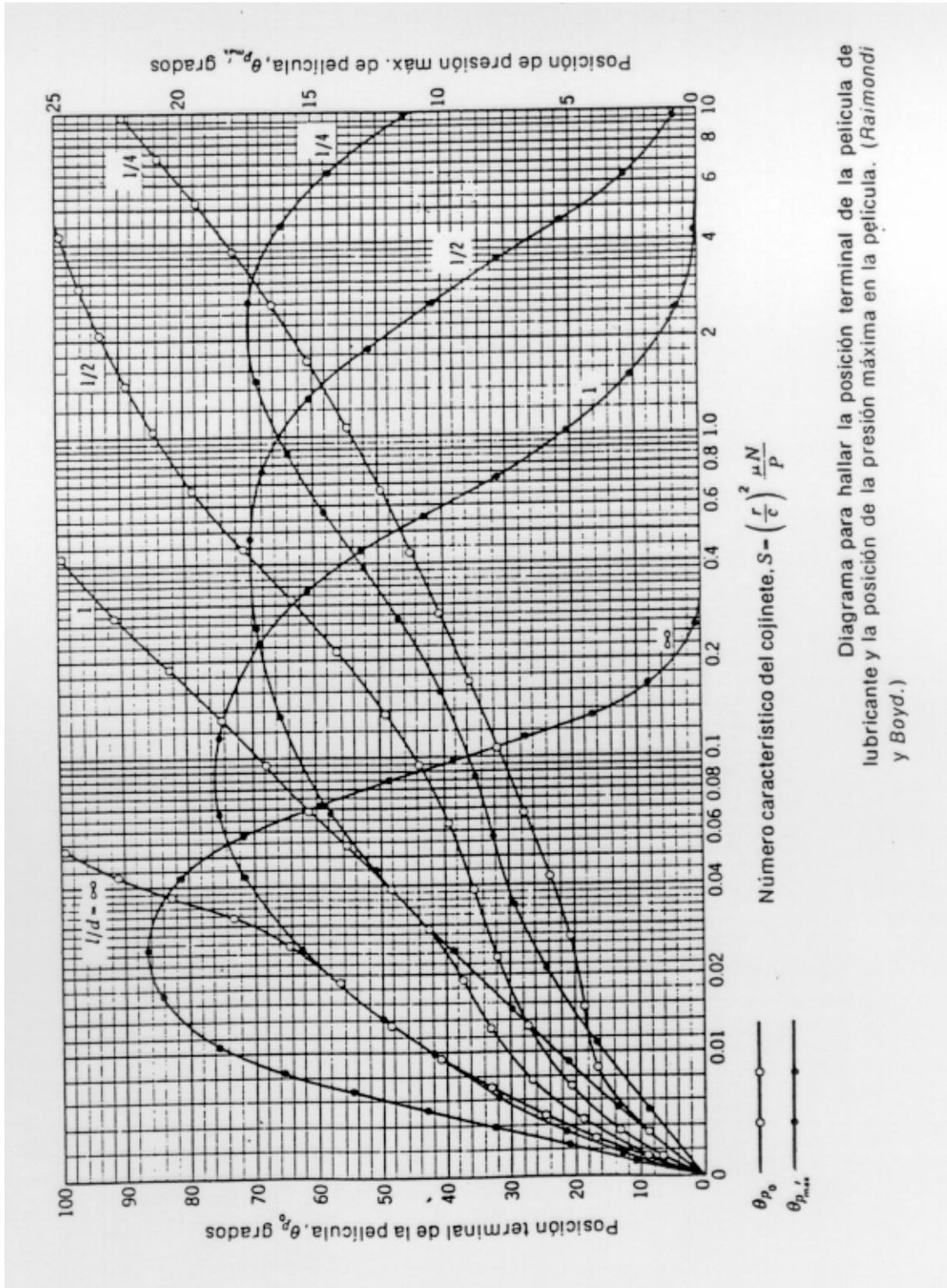


6.- Presión máxima desarrollada en la película, P/P_{MAX} ,





7.- Localización de la presión máxima en la película





REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.

3. LUBRICACIÓN ELASTO-HIDRODINÁMICA.

HEMOS DESCRITO EL ANÁLISIS MATEMÁTICO, ABORDADO POR REYNOLDS, DE LA CUÑA DE LUBRICANTE CREADA ENTRE DOS SUPERFICIES CON MOVIMIENTO RELATIVO, LLEGANDO A LA FAMOSA **ECUACIÓN DIFERENCIAL DE REYNOLDS BAJO UNA SERIE DE HIPÓTESIS SIMPLIFICATIVAS.**

ESTA ECUACIÓN SIGNIFICÓ EL NACIMIENTO DE LA **TEORÍA HIDRODINÁMICA**, DE AMPLIA APLICACIÓN EN NUMEROSOS TIPOS DE APOYOS DESLIZANTES.

SIN EMBARGO, EN EL CASO DE QUE LAS CARGAS ACTÚEN SOBRE ÁREAS DE CONTACTO RELATIVAMENTE PEQUEÑAS, HAY DOS HIPÓTESIS QUE NO FUERON CONSIDERADAS POR REYNOLDS:

1. **EL AUMENTO DE LA VISCOSIDAD DEL LUBRICANTE CON LA PRESIÓN:**

$$\eta = \eta_0 e^{\alpha p}$$

Siendo α el coeficiente viscosidad-presión y η_0 la viscosidad a presión atmosférica.

2. **LA DEFORMACIÓN ELÁSTICA DE LAS SUPERFICIES (HERTZ).**

AMBOS EFECTOS CONDUCEN A UN **AUMENTO DEL ESPESOR DE PELÍCULA** EN COMPARACIÓN CON EL PROPUESTO POR LA TEORÍA RÍGIDO-ISOVISCOSA.

EL MECANISMO DE GENERACIÓN DE LA PELÍCULA DEL LUBRICANTE EN ESTE CASO ES CONOCIDO COMO **LUBRICACIÓN ELASTO-HIDRODINÁMICA** Y SE APLICA A **CONTACTOS ALTAMENTE CARGADOS:**



REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.

1. **CONTACTOS LINEALES ENTRE LOS FLANCOS DE LOS DIENTES DE UN ENGRANAJE.**
2. **CONTACTOS PUNTUALES DE LAS BOLAS DE UN RODAMIENTO CON SUS CAMINOS DE RODADURA.**

CONTACTOS EN LOS QUE LOS VALORES DEL **ESPESOR MÍNIMO** DE PELÍCULA ARROJADO POR LA **TEORÍA HIDRODINÁMICA** ERAN LO SUFICIENTEMENTE PEQUEÑOS COMO PARA PREDECIR **IMPORTANTES DESGASTES**, LO QUE NO CONCORDABA CON LOS **RESULTADOS EMPÍRICOS** ENCONTRADOS, **EXENTOS DE DESGASTE**.

EN LA PRACTICA, EN UN CONTACTO ALTAMENTE CARGADO, EL **APLANAMIENTO DE LAS SUPERFICIES** EN LA ZONA DE CONTACTO DISTRIBUYE LA CARGA EN UNA ZONA MAYOR Y EL **AUMENTO DE LA VISCOSIDAD** POTENCIA LA CAPACIDAD DE CREACIÓN DE LA PELÍCULA DE LUBRICANTE.

PARA ANALIZAR ESTA SITUACIÓN ES NECESARIO HACER COMPATIBLES:

- **LA ECUACIÓN DIFERENCIAL DE REYNOLDS**
- **LA ECUACIÓN D DEFORMACIÓN ELÁSTICA BAJO CARGA.**
- **LA ECUACIÓN QUE RELACIONA LA VISCOSIDAD CON LA PRESIÓN.**

Y RECURRIR A TÉCNICAS DE CÁLCULO NUMÉRICO MEDIANTE ORDENADOR.

LA MADUREZ DEL ANÁLISIS ELASTO-HIDRODINÁMICO HAY QUE FECHARLO EN **1959** CON LA PUBLICACIÓN DE LOS RESULTADOS DE **DOWSON y HIGGINSON**.

REGÍMENES DE LUBRICACIÓN.

EN LAS SIGUIENTES FIGURAS SE MUESTRA LA **FORMA DE PELÍCULA** Y LA **DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES** PRESENTADAS POR DOWSON y HIGGINSON COMO SOLUCIÓN AL PROBLEMA:

- * OBSERVANDO LA **FORMA DE LA PELÍCULA** VEMOS LA **ZONA DE ENTRADA CONVERGENTE** SEGUIDA DE UNA **ZONA PRÁCTICAMENTE PARALELA**. A LA SALIDA HAY UN **ESTRECHAMIENTO** QUE REPRESENTA UNA REDUCCIÓN DEL ORDEN DEL 25% RESPECTO A LA ZONA DE ESPESOR CONSTANTE.
- * POR LO QUE RESPECTA A LA **CURVA DE PRESIÓN**, VEMOS QUE ES MUY PARECIDA A LA CORRESPONDIENTE A UN CONTACTO HERTZIANO SECO. RESPECTO A ELLA SE OBSERVA UNA **ELEVACIÓN A LA ENTRADA Y UN AGUDO PICO DE PRESIÓN A LA SALIDA**.

