

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Patín de rodadura sin engrase



Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

Autor: Garcia de Albizu Martinez, Patxi

Director/es: Garcia, Francisco Javier

Pamplona, 27 de Junio de 2016

## **Resumen:**

El objetivo del proyecto actual es el desarrollo de un “patín de rodadura” que no tenga la necesidad de ser engrasado exteriormente (al modo de los rodamientos sellados con engrase interior). El autoengrase de los patines se consigue mediante la incorporación de un dispositivo impregnado en aceite que aplique a los elementos rodantes la mínima cantidad necesaria para que el sistema funcione.

Es importante que el dispositivo a incorporar pueda recoger la máxima cantidad de aceite posible. Esto se consigue con un diseño optimizado y la incorporación de materiales porosos capaces de almacenar un gran volumen de aceite.

El elemento clave del sistema es el material que compone la cámara de aceite. Se trata de un material poroso, capaz de absorber una gran cantidad de aceite (entre un 40 y un 50 % de su volumen) y con una gran estabilidad térmica y gran resistencia al desgaste.

Es por ello que se ve la necesidad de hacer un estudio de diferentes materiales. Esto va a llevar a la compra de diferentes materiales y a la fabricación de un simulador para la comparación de diferentes materiales (de una forma sencilla y acelerada).

El material utilizado es Polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMW-PE). Se han realizado varios ensayos para su validación.

## **Palabras clave:**

- Patín de rodadura
- Material poroso o absorbente
- Pastilla
- Lubricación Elastohidrodinámica
- Sinterizado

# **INDICE:**

**Pág**

1.- AGENTES.....	1
1.1.- Autor del encargo.....	1
1.2.- Autor del proyecto.....	1
2.- INTRODUCCIÓN.....	2
2.1.- Motivación y lugar de realización del proyecto.....	2
2.2.- Objetivos del proyecto.....	2
2.3.- Descripción técnica del proyecto.....	3
2.4.- Plan de desarrollo del proyecto.....	4
3.- LUBRICACIÓN.....	7
3.1.- Lubricación en sistemas mecánicos.....	7
3.1.1.- Perspectiva histórica.....	7
3.1.2.- Antecedentes de la curva de Stribeck.....	8
3.1.3.- La curva de Stribeck.....	10
3.1.4.- Regímenes de lubricación.....	12
3.1.4.1.- Lubricación límite.....	15
3.1.4.2.- Lubricación mixta.....	19
3.1.4.3.- Lubricación (Elasto)hidrodinámica.....	20
3.2.- Lubricación hidrodinámica.....	20
3.3.- Lubricación elastohidrodinámica.....	25
3.3.1.- Introducción a la teoría EHD: Límites de la lubricación EHD.....	25
3.3.2.- Desarrollo histórico.....	26
3.3.3.- Formulación del problema elastohidrodinámico.....	30
3.3.3.1.- Cálculo del espesor de película.....	30
3.3.3.2.- Distribución de presiones.....	34

3.3.4.- Zona de trabajo. Ecuaciones aplicables.....	36
3.3.4.1.- Carta de Johnson.....	37
3.3.4.2.- Mapa de Hamrock-Dowson.....	41
3.3.4.3.- Parámetros adimensionales de Moes.....	44
<b>4.- PATÍN DE RODADURA.....</b>	<b>47</b>
4.1.- Introducción.....	47
4.2.- Patín de rodadura.....	47
4.2.1.- Introducción.....	47
4.2.2.- Lubricación.....	50
4.2.3.- Ficha técnica.....	50
4.2.4.- Precarga.....	51
4.3.- Patín de rodadura sin engrase.....	52
4.3.1.- Introducción.....	52
4.3.2.- Modificaciones.....	52
4.3.3.- Montaje.....	54
4.3.4.- Componentes para el montaje de patines.....	55
4.3.5.- Ventajas e inconvenientes.....	60
<b>5.- MATERIALES POLIMÉRICOS.....</b>	<b>61</b>
5.1.- Clasificación de los polímeros.....	61
5.1.1.- Según su origen.....	61
5.1.2.- Según el tipo de monómeros.....	61
5.1.3.- Según su forma.....	62
5.1.4.- Según sus propiedades mecánicas.....	63
5.1.5.- Según su comportamiento frente al calor.....	63
5.2.- Procesos de transformación de materiales poliméricos...64	
5.2.1.- Introducción.....	64

5.2.2.- Métodos de procesado de polímeros.....	65
5.2.3.- Etapas de los procesos de transformación de polímeros...	70
5.2.4.- Sinterización.....	71
5.2.5.- Propiedades de los productos sinterizados.....	72
5.3.- Generalidades del Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW-PE).....	73
5.3.1.- Introducción.....	73
5.3.2.- Propiedades del UHMW-PE.....	73
5.3.3.- Sinterización del UHMW-PE.....	75
5.3.4.- Aplicaciones del UHMW-PE.....	76
<b>6.- DESARROLLO DEL PROCESO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>78</b>
6.1.- Introducción.....	78
6.2.- Optimización del proceso de producción.....	78
6.2.1.- Materiales utilizados.....	78
6.2.1.1.- Material polimérico.....	78
6.2.1.2.- Lubricante.....	82
6.2.2.- Etapas del proceso de producción.....	84
6.2.3.- Ensayos realizados.....	85
6.3.- Ensayo de duración del lubricante.....	85
6.3.1.- Materiales utilizados.....	85
6.3.2.- Descripción del ensayo.....	87
6.3.3.- Muestras.....	89
6.3.4.- Resultados obtenidos.....	91
6.4.- Equipos utilizados.....	92
6.4.1.- Equipos utilizados en el proceso de producción.....	92
6.4.2.- Equipo utilizado en el ensayo de duración del lubricante..	96

7.- ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	106
7.1.- Estudio de la optimización del proceso de sinterización	
7.1.1.- Tiempo de sinterizado.....	106
7.1.2.- Temperatura del proceso de sinterizado.....	107
7.1.3.- Compactación de las muestras (presión ejercida).....	107
7.1.4.- Otros aspectos.....	108
7.2.- Estudio de la duración del lubricante.....	108
8.- CONCLUSIONES.....	112
9.- ANEXOS.....	114
9.1.- Resultados del ensayo de optimización del proceso de sinterizado.....	114
9.2.- Resultados del ensayo de duración del lubricante.....	122
9.3.- Cálculos.....	139
9.3.1.- Régimen de lubricación.....	139
9.3.2.- Cálculo del espesor mínimo de película lubricante.....	144
9.4.- Programa para contador de distancia y vueltas en el Banco de pruebas.....	149
9.5.- Planos.....	157
10.- BIBLIOGRAFÍA.....	165

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES:

- **CAPÍTULO 3: LUBRICACIÓN:**

Ilustración 1: Transporte de una estatua colosal de la XVIII dinastía (El Bersheh, 1880 a.C.)(Pág. 8)

Ilustración 1: Dispositivo para medir la fricción en cojinetes (Tower, 1884)(Pág. 9)

Ilustración 2: Medidas de presión en cojinetes (Tower, 1883)(Pág. 9)

Ilustración 3: Aparato de medida de fricción utilizado por Kingsbury (Pág. 10)

Ilustración 4: Fricción para cojinetes como función de la velocidad de rotación y para diferentes cargas (Stribeck, 1902)(Pág. 11)

Ilustración 5: Representación debida a Gümbel y Hersey para cojinetes (Spikes, 2005)(Pág. 12)

Ilustración 6: Regímenes de lubricación en la curva de Stribeck (Pág. 13)

Ilustración 7: Valores orientativos del coeficiente de fricción para los distintos regímenes (Linares, 2005, basado en Hamrock, 1991) (Pág. 14)

Ilustración 8: Tasa de desgaste para los distintos regímenes (Linares, 2005, basado en Beerbower, 1972) (Pág. 14)

Ilustración 9: Capa adsorbida en régimen de lubricación límite (Faraon, 2005) (Pág. 15)

Ilustración 10: Coeficiente de fricción en función de la relación de esfuerzos cortantes entre película y superficie metálica (Jones, 1985) (Pág. 16)

Ilustración 11: Modelo de contacto en lubricación límite (Hironaka, 1984) (Pág. 16)

Ilustración 12: Relación entre la fricción y la temperatura para dos hidrocarburos y el caso de contacto seco (J.A. Russell, 1965) (Pág. 17)

Ilustración 13: Influencia del espesor de película (film thickness) sobre el coeficiente de fricción (Kragelski, 1965) (Pág. 18)

Ilustración 14: Variación de la fricción con la carga (Witehead, 1950) (Pág. 18)

Ilustración 15: Relación entre la velocidad y la fricción en lubricación límite (Clayton, 1951) (Pág. 19)

Ilustración 16: Geometría de las superficies y distribución de presiones en un contacto hidrodinámico (Hue, 2006) (Pág. 21)

Ilustración 17: Equilibrio en un elemento diferencial. (Pág. 22)

Ilustración 18: Curva de Stribeck que relaciona el coeficiente de fricción ( $f$ ) con la velocidad, presión y viscosidad (Echávarri, 2005) (Pág. 23)

Ilustración 19: Cojinete axial (Pág. 24)

Ilustración 20: Distribución de presión en un cojinete axial (Pág. 24)

Ilustración 21: Distribución de presión en un cojinete radial (Pág. 25)



Ilustración 22: Modelo de cilindros paralelos bajo carga empleado por Martin en su estudio (P. Lafont, 1984) (Pág. 26)

Ilustración 23: Modelo del análisis de Grubin para contactos lineales elastohidrodinámicos (Dowson, 1995) (Pág. 27)

Ilustración 24: Representación de la distribución de presión y el espesor de película en contactos lineales elastohidrodinámicos (Dowson, 1995) (Pág. 28)

Ilustración 25: Interferograma en un contacto puntual elastohidrodinámico (Wedeven, 1970) (Pág. 29)

Ilustración 26: Ecuaciones del problema elastohidrodinámico (EHD) (Pág. 30)

Ilustración 27: Efecto de la deformación elástica de los sólidos sobre el espesor de película (Stachowiak y Batchelor, 2001) (Pág. 31)

Ilustración 28: Aproximación de Grubin al espesor de película dentro del contacto elastohidrodinámico (Stachowiak y Batchelor, 2001) (Pág. 33)

Ilustración 29: Distribución de presión en un contacto hertziano no lubricado. (Pág. 34)

Ilustración 30: Distribución de presión y de espesor de película en un contacto elastohidrodinámico (Stachowiak y Batchelor, 2001) (Pág. 35)

Ilustración 31: Representación esquemática de la interferometría de un contacto elastohidrodinámico (Foord, Hammann y Cameron, 1968) (Pág. 36)

Ilustración 32: Carta de Johnson (Johnson, 1970) (Pág. 39)

Ilustración 33: Líneas de isoespesor de película sobre la Carta de Johnson (Johnson, 1970) (Pág. 41)

Ilustración 34: Mapa de Hamrock y Dowson (1981) para  $k=1$  (Stachowiak y Batchelor, 2001) (Pág. 43)

Ilustración 35: Espesor de película para contactos puntuales EHD (Moes, 1997) (Pág. 45)

- **CAPÍTULO 4: PATÍN DE RODADURA EISENOR:**

Ilustración 37: Patín con recirculación de rodillos con cuña y recto (Pág. 47)

Ilustración 38: Patín de rodadura sin una de las tapas laterales (Pág. 52)

Ilustración 369: Tapa lateral de la mochila del patín sin engrase (parte interior) (Pág. 53)

Ilustración 370: Cartucho portapastillas de la mochila del Patín sin engrase (Pág. 54)

Ilustración 41: Patín sin engrase (Pág. 54)

Ilustración 42: Cuerpo del patín (Pág. 57)

Ilustración 43: Cuña del patín (Pág. 57)

Ilustración 44: Pletina de cierre superior del patín (Pág. 58)

Ilustración 45: Pletina de apriete del patín (Pág. 58)

Ilustración 46: Medialuna del patín (Pág. 59)

Ilustración 47: Rodillos con separador entre medio (Pág. 59)

Ilustración 48: Rascadores elásticos del patín (Pág. 59)

- **CAPÍTULO 5: MATERIALES POLIMÉRICOS:**

Ilustración 49: Polímeros: a)Lineal, b)Ramificado y c)Entrecruzado (Pág. 62)

Ilustración 50: Proceso de Extusión (Pág. 65)

Ilustración 51: Proceso de Moldeo por Inyección (Pág. 66)

Ilustración 52: Proceso de Moldeo por soplado (Pág. 66)

Ilustración 383: Proceso de Moldeo Rotacional (Pág. 67)

Ilustración 54: Proceso de Termoformado (Pág. 68)

Ilustración 56: Proceso de Calandrado (Pág. 68)

Ilustración 57: Proceso de Moldeo por compresión (Pág. 69)

- **CAPÍTULO 6: DESARROLLO DEL PROCESO EXPERIMENTAL:**

Ilustración 58: Resinas y cauchos fabricados en MIPELON (Pág. 79)

Ilustración 59: Materiales autolubricantes de MIPELON (Pág. 79)

Ilustración 60: Filtros porosos de MIPELON (Pág. 80)

Ilustración 61: Distribución de tamaños de partícula XM-220 (Pág. 81)

Ilustración 62: Aspecto del MIPELON XM-220 en el microscopio electrónico (Pág. 81)

Ilustración 63: Pastilla de material absorbente impregnada en aceite (Pág. 85)

Ilustración 64: Recortes para preparar muestra de Capilub (Pág. 90)

Ilustración 65: Mandos de la estufa de desecación (Pág. 92)

Ilustración 66: Estufa de desecación (Pág. 93)

Ilustración 67: Molde de acero (Pág. 93)

Ilustración 68: Molde de Hormigón polímero (Pág. 94)

Ilustración 69: Báscula digital (Pág. 94)

Ilustración 70: Bomba y líquido auxiliar (Pág. 95)

Ilustración 71: Recipiente en el que se hace vacío (Pág. 95)

Ilustración 72: Base del banco de pruebas (Pág. 97)

Ilustración 73: Pieza 1 del banco de pruebas (Pág. 98)

Ilustración 74: Pieza 2 del banco de pruebas (Pág. 98)

Ilustración 75: Pieza 3 del banco de pruebas (Pág. 99)

Ilustración 76: Rodillo del banco de pruebas (Pág. 100)

Ilustración 77: Pletina lateral del banco de pruebas (Pág. 100)

Ilustración 78: Tapa del banco de pruebas (Pág. 101)

Ilustración 79: Rodamiento banco de pruebas (Pág. 101)

Ilustración 80: Características Motor banco de pruebas (Pág. 102)

Ilustración 81: Estructura de secado para el banco de pruebas (Pág. 103)

Ilustración 82: Ventilador banco de pruebas (Pág. 103)

Ilustración 83: Arduino (Pág. 104)

Ilustración 84: Banco de Pruebas (Pág. 105)

Ilustración 85: Banco de pruebas funcionando (Pág. 105)

- **CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS:**

Ilustración 86: Pastilla sinterizada (blanda en el interior) (Pág. 106)

Ilustración 87: Muestras de MIPELON XM-220 utilizadas en el ensayo (Pág. 111)

## **ÍNDICE DE TABLAS:**

Tabla 1: Régimenes de Lubricación según parámetro de película. (Pág. 13 – Capítulo 3)

Tabla 2: Componentes Patín de rodadura Eisenor (Pág. 56 – Capítulo 4)

Tabla 3: Datos Técnicos Polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMW-PE) (Pág. 75 – Capítulo 5)

Tabla 4: Propiedades Físicas MIPELON XM-220 (Pág. 80 – Capítulo 6)

Tabla 5: Propiedades aceite Mobil Vactra N°2 (Pág. 82 – Capítulo 6)

Tabla 6: Características lubricante Mobil Vactra N°2 (Pág. 83 – Capítulo 6)

Tabla 7: Características Polifilter PE 01 (Pág. 86 – Capítulo 6)

Tabla 8: Condiciones iniciales Ensayo de duración del lubricante (Pág. 88 – Capítulo 6)

## **1.- AGENTES:**

### **1.1.- Autor del encargo:**

La justificación de este proyecto se debe a la realización del Trabajo Fin de Grado en los estudios universitarios de Grado en Ingeniería Mecánica de la Universidad Pública de Navarra.

### **1.2.- Autor del proyecto:**

El autor del proyecto que se presenta a continuación es el estudiante: Patxi Garcia de Albizu Martinez con DNI: 44645721-F, alumno de cuarto curso del Grado en Ingeniería Mecánica impartido por la Universidad Pública de Navarra.

## **2.- INTRODUCCIÓN:**

### **2.1.- Motivación y lugar de realización del proyecto:**

La idea del presente proyecto es aplicar los conocimientos adquiridos durante los estudios universitarios de Grado en Ingeniería Mecánica mediante la realización conjunta de las prácticas curriculares y el Trabajo Fin de Estudios en la empresa Eisenor S.A.

Gracias tanto a la Universidad Pública de Navarra como a la empresa Eisenor, he podido formar parte de un grupo con el reto de **diseñar un "patín de rodadura" con autolubricación** para el movimiento de elementos sobre las guías lineales de Eisenor.

EISENOR, S.A. es una empresa situada en el polígono Mocholí de Noain que se constituyó en 1.989 con el objetivo de diseñar y fabricar sistemas de DESPLAZAMIENTO Y GUIADO destinados a ser incorporados en Máquina Herramienta.

La tecnología que permitió implantarse, y diferenciarse en aquellos años, a Eisenor fue el empleo de temple por inducción para la fabricación de estos sistemas.

De este modo, se creó una estructura de producción específica para la fabricación mediante este método de endurecimiento.

Otra característica de Eisenor es tener todo el proceso productivo integrado. Realizando todo el proceso desde el acero en planchón hasta las guías terminadas.

Básicamente son 3 procesos:

- Mecanizado: Mediante fresadoras de control numérico
- Tratamiento: Temple por inducción ó másico en el caso de piezas de pequeñas dimensiones.
- Rectificado: Mediante rectificadoras planas.

A esta maquinaria le acompaña una diversidad de maquinaria auxiliar: Sierras, roscadoras, hornos para diferentes procesos, centros de mecanizado etc.

Posteriormente, en el año 1999 y tras un proyecto de desarrollo, Eisenor incorporó a su catálogo las "guías de rodadura", complemento a las guías lineales ya que, en muchos casos, son los elementos móviles que circulan sobre éstas.

### **2.2.- Objetivos del Proyecto:**

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) consiste en el diseño, la descripción del proceso de fabricación y el estudio de las tecnologías llevadas a cabo para la realización de una pieza polimérica impregnada en aceite para la autolubricación de los "patines de rodadura".

El objetivo del proyecto actual es el desarrollo de un patín que no tenga la necesidad de ser engrasado exteriormente (al modo de los rodamientos sellados con engrase interior). Este proyecto se inició a comienzos del año 2014 bajo la petición de alguno de los clientes de Eisenor.

El objetivo principal del proyecto es seleccionar el material, la técnica de procesado y las condiciones de tratamiento que nos permitan la optimización del comportamiento tribológico en condiciones de desgaste con lubricación de materiales poliméricos porosos para su aplicación en la autolubricación de los "patines de rodadura" de Eisenor, aunque también se podría utilizar para lubricar otros componentes. En consecuencia, debemos realizar un adecuado seguimiento de sus propiedades físicas y mecánicas, así como de su comportamiento frente al desgaste. Para ello, se trabajará con Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) en polvo de tamaño de partícula diferente.

Además, se trabajará con diferentes presiones de compactación con objeto de obtener diferentes grados de porosidad que den lugar a diferentes propiedades y, por tanto, diferente comportamiento y resistencia frente al desgaste y diferente poder de absorción del lubricante (capacidad para almacenar lubricante).

### **2.3.- Descripción Técnica del Proyecto:**

Como se ha mencionado, el objetivo de este proyecto es conseguir el autoengrase de los "patines de rodadura" y esto se consigue mediante la incorporación de un dispositivo impregnado en aceite que aplique a los elementos rodantes la mínima cantidad necesaria para que el sistema funcione.

Los patines actuales necesitan una lubricación continua debido al rozamiento entre sus partes en movimiento (rodillos entre sí, rodillos con sus separadores y rodillos con las superficies de apoyo).

Esta lubricación se viene realizando habitualmente con un sistema centralizado de engrase dotado de una bomba, un sistema de tubos que tienen que ir por toda la máquina, la conexión a los patines y el sistema de recogida de aceite sobrante.

Actualmente se tiende en la máquina herramienta a reducir al máximo posible el empleo de aceites y grasas para lubricar piezas en movimiento. Esto es debido tanto para reducir las emisiones de productos contaminantes como para evitar acciones de mantenimiento (o averías por falta de éste).

Al ser los patines elementos móviles con un tamaño relativamente pequeño y, en principio, no ser posible el aumento significativo de éste, es muy importante que el dispositivo a incorporar pueda recoger la máxima cantidad de aceite posible. Esto se consigue con un diseño optimizado y la incorporación de materiales porosos capaces de almacenar un gran volumen de aceite.

Se ha realizado una continua vigilancia tecnológica tanto a materiales desarrollados para otras aplicaciones y posiblemente implementables en ésta, como a materiales desarrollados para aplicaciones semejantes pero muy novedosos y difíciles de acceder (sujetos a patentes en vigor).

Es por ello que hay la necesidad de hacer un estudio de diferentes materiales. Esto nos va a llevar a la compra de diferentes materiales, al análisis de éstos en un centro tecnológico, y a la fabricación de un simulador para la comparación de diferentes materiales (de una forma sencilla y acelerada).

Desde hace algunos años, la empresa japonesa de guías lineales IKO viene desarrollando y comercializando patines de rodadura compactos sin engrase. En estos momentos aseguran que el sistema puede funcionar durante 10 años ó 20.000 Km sin la aplicación de aceite (lo que viene a ser la vida completa de una máquina).

Este no es exactamente el producto que se trata de desarrollar en el presente proyecto. Son sistemas muy cerrados en los que es relativamente sencillo el aprovechamiento del aceite aplicado (no hay pérdidas). Sin embargo, es el producto en el que nos hemos basado para saber que es una tecnología viable.

El elemento clave del sistema es el material que compone la cámara de aceite. Se trata de un material poroso, capaz de absorber una gran cantidad de aceite (entre un 40 y un 60% de su volumen) y con una gran estabilidad térmica, gran resistencia al desgaste, etc.

Otro de los puntos determinantes es el diseño del patín para instalar el máximo volumen del material en cuestión, el punto de contacto entre el material y los elementos móviles.

En estos momentos se prevé la posibilidad de un estudio para conocer mejor las necesidades mínimas de engrase entre los elementos móviles.

Otros parámetros en juego pueden ser el uso de aditivos, tanto en el material como en el aceite para lograr otras cualidades (mejorar la capilaridad, el agarre a las superficies metálicas, la eliminación del aceite en el plástico, etc).

Dependiendo del conocimiento adquirido y viendo que la implementación de sistemas sin necesidad de engrase puede extenderse a prácticamente cualquier ámbito, se podría aplicar la tecnología desarrollada a una diversidad de productos.

Por último, se estudiarán los tipos de lubricación presentes en el desempeño de la autolubricación de los "patines de rodadura" de Eisenor, haciendo especial hincapié en la lubricación Elastohidrodinámica (EHD). La lubricación EHD tiene lugar en elementos que ruedan entre sí o con respecto a una superficie plana. El aumento de la viscosidad del aceite, debido a la presión; y el aplastamiento de la superficie, se combina para "atrapar" el lubricante en el momento en que éste penetra en la zona de contacto. El espesor mínimo de la película lubricante oscila entre 0,05 y 2  $\mu\text{m}$  y es menor que en el caso de la teoría clásica hidrodinámica. La viscosidad del aceite puede llegar a límites de magnitud mayor que la viscosidad de entrada y la película lubricante puede desarrollar presiones de hasta 350000 psi.

El espesor de película es una función de tres parámetros: carga, velocidad y coeficiente piezo-viscoso. Este espesor de película también es limitado porque si es muy grande, se incrementa la fricción entre diferentes capas del lubricante, produciéndose un incremento de temperatura que provocaría, de forma inevitable, un descenso en la viscosidad del aceite y por tanto, del espesor de la película lubricante entre las superficies.

## **2.4.- Plan de Desarrollo del Proyecto:**

### **1ª ETAPA: Diseño del nuevo "patín de rodadura".**

En primer lugar, habrá que realizar modificaciones en el "patín de rodadura" de Eisenor para poder ubicar las pastillas de material poroso y que lubrique la cadena de rodamientos cilíndricos.

Las modificaciones consistirán en añadir en ambos extremos del patín unos alojamientos para ubicar las piezas de material poroso, sin modificar el cuerpo del mismo para permitir que sea intercambiable con otros modelos del mercado.



## **2ª ETAPA: Definir el material de trabajo (Material poroso y Lubricante).**

En segundo lugar, habrá que definir los materiales con los que se va a trabajar, así como su composición química y sus propiedades (mecánicas, químicas, etc.).

En el caso del material poroso se ha trabajado con tres tipos de polvos: Polietileno de ultra alto peso molecular de diferentes tamaños de partícula (XM-220), Pórex y Polifluor y Thodacom. Además, se ha trabajado con el material empleado por la competencia (IKO) a modo de comparativa con el resto de materiales.

En el caso del lubricante se ha optado por el aceite Mobil Vactra No.2 por petición del cliente que ha encargado el proyecto a Eisenor y debido a que sus propiedades se ajustan a la finalidad del proyecto. Además, es la utilizada por la competencia en un modelo similar, aunque con diferente utilidad de patín autolubricado.

## **3ª ETAPA: Obtención del Molde.**

Después de tener diseñado el "patín de rodadura", este condicionará la forma de la pastilla de material poroso y por tanto el diseño del molde.

Se trata de un molde con forma cúbica de unos 20 mm de lado con una pequeña cavidad rectangular curvada con un pequeño radio, que es la que roza con el tren de rodamientos cilíndricos. El molde se ha fabricado en acero.

Además, también se ha empleado un molde de resina Epoxi con la cavidad igual que el anterior, con la forma de la pieza.

## **4ª ETAPA: Diseño y optimizado del proceso de sinterización.**

Se hace un estudio de todas las variables de influencia en el proceso de conformado y sinterización de materiales poliméricos en polvo. Se acondiciona el molde y las condiciones de compactado (cantidad de polvo, condiciones de compactación, etc.), se pone a punto el horno de sinterización estableciendo los parámetros de sinterizado óptimos relativos a temperatura, tiempo de sinterización y tiempo de enfriamiento.

## **5ª ETAPA: Procesos y Ensayos a realizar en la pastilla de polímero impregnada.**

De lo que se trata en esta etapa es de estudiar la microestructura y el comportamiento del material en diferentes condiciones de trabajo. Para ello se llevarán a cabo ensayos que permitirán obtener resultados que servirán para ver la influencia de los diferentes materiales frente al desgaste. Se someterán a los materiales a los siguientes procesos:

- Estudio microestructural por microscopía óptica para el estudio de la porosidad y caracterización microestructural de los diferentes materiales.
- Ensayos de duración del lubricante en los diferentes materiales.

En los ensayos de duración del lubricante se ha utilizado un procedimiento de ensayo diseñando un banco de pruebas para simular el roce de la cadena de rodamientos cilíndricos con la pastilla de material poroso. En este ensayo se han comparado los diferentes materiales.

### **6ª ETAPA: Resultados y Conclusiones.**

Recogida de resultados, análisis de los mismos. Estudio de la influencia de las variables en el proceso de sinterización polimérica en estudio. Enunciado de las diferentes conclusiones sacadas del estudio de los resultados obtenidos. De todo lo anteriormente tratado se extraerán las conclusiones oportunas.

### **3.- LUBRICACIÓN:**

Fernández Ruiz Morón, D. Luis (2012). Desarrollo de un procedimiento para el cálculo de la fuerza de fricción en un contacto EHD. Validación experimental del procedimiento (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. (p. 13-p. 57).

#### **3.1. Lubricación en sistemas mecánicos:**

Mediante la lubricación modificamos el contacto entre dos cuerpos, introduciendo entre ambos una película de material con baja resistencia a la cizalla. La fricción es fuerza necesaria para lograr el desplazamiento relativo de ambas superficies por deslizamiento del material intermedio, denominado lubricante.

Las principales funciones del lubricante son las siguientes:

- Reducción de la fricción
- Protección contra el desgaste y la corrosión química
- Contribución a la estanqueidad
- Refrigeración
- Evacuación de impurezas

Antes de entrar a estudiar la lubricación con más profundidad, se realizará una pequeña introducción a su historia.

##### **3.1.1.- Perspectiva histórica:**

La Historia de la Lubricación se corresponde en buena manera con los grandes hitos de la Humanidad. El progreso científico y técnico ha precisado siempre de la lubricación como un complemento ante la aparición de nuevos mecanismos, el aumento de la severidad en el funcionamiento y los consecuentes problemas relacionados con la fricción y el desgaste.

La primera gran revolución coincide con el nacimiento de la agricultura en el Neolítico, hacia el 8.000 a.C. Ha quedado documentado el empleo de lubricantes en la construcción por parte de egipcios y asirios hacia el 3.000 a.C. Un buen ejemplo lo constituyen las pinturas en El Bersheh (Egipto), que datan del 1.880 a.C. En ellas se observa el transporte de una gran estatua por parte de esclavos y como un “ingeniero” vierte líquido lubricante en los raíles sobre los que se desliza la carga. A partir de la Figura 2, Duncan Dowson (1998) calculó que los 172 esclavos dibujados aplicaban cada uno una fuerza de 800 N sobre la estatua, de un peso total de 60 toneladas. Con estos datos se puede hallar el coeficiente de fricción:

$$\mu = \frac{172 \times 800}{6 \times 10^5} = 0.23$$

Este valor demuestra que efectivamente existía lubricación, aunque fuera ineficiente.



*Ilustración 1: Transporte de una estatua colosal de la XVIII dinastía (El Bersheh, 1880 a.C.)*

La civilización romana empleó lubricantes de origen animal para el engrase de los cojinetes de los carros. La lubricación seca o por grasa siguió siendo estudiada durante muchos siglos por Leonardo da Vinci (1508), Amontons (1699), Euler (1748) y Coulomb (1809).

Para la lubricación de superficies con velocidades elevadas se precisaba de película hidrodinámica. Estas superficies con alto deslizamiento llegan en la Revolución Industrial y al mismo tiempo se va avanzando en el estudio teórico del comportamiento del aceite. Von Pauli (1849), Hirn (1854) y Petroff (1883).

Aunque los autores que pusieron los pilares en el estudio de la lubricación Hidrodinámica fueron Beauchamp Tower (1885) y Osborne Reynolds (1886). Tower observó las enormes presiones existentes en la lubricación de los cojinetes. Por su parte, Reynolds realizó un análisis matemático de la cuña de aceite y obtuvo la Ecuación de la Hidrodinámica, que lleva su nombre.

Tras esta breve perspectiva histórica, se procederá a explicar la existencia de distintos regímenes de lubricación y las características propias de cada uno de ellos.

### **3.1.2.- Antecedentes de la curva de Stribeck:**

La Institución de Ingenieros Mecánicos de Inglaterra propuso en 1882 a Beauchamp Tower el estudio de la fricción lubricada en cojinetes, quien publicó al año siguiente unos resultados sorprendentes, especialmente en lo referente a la distribución de presión (Ilustración 2).

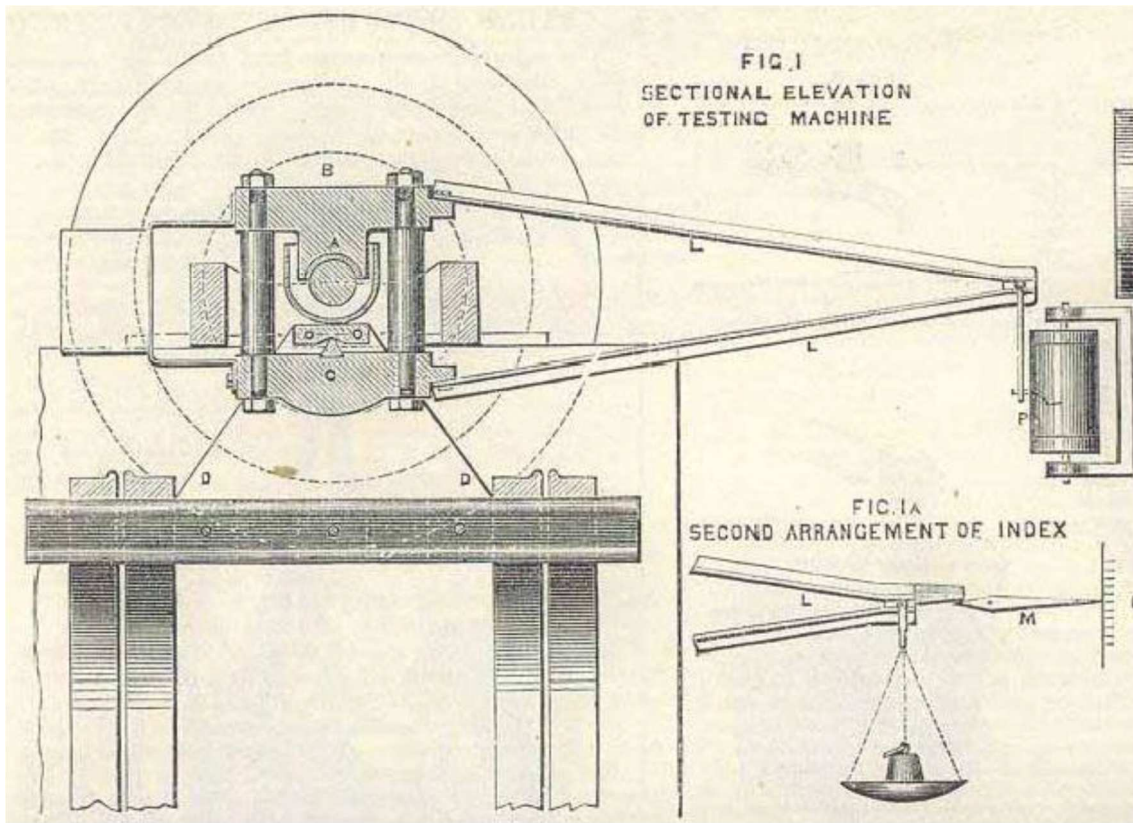


Ilustración 2: Dispositivo para medir la fricción en cojinetes (Tower, 1884)

La explicación teórica la aportó en 1886 el profesor Osborne Reynolds, de la Universidad de Manchester. Se había descubierto la lubricación total de película, y la teoría desarrollada por Reynolds se conoció como Teoría Hidrodinámica.

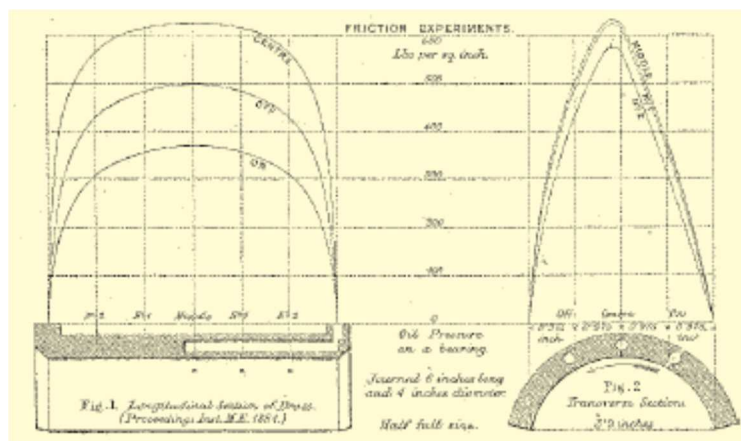
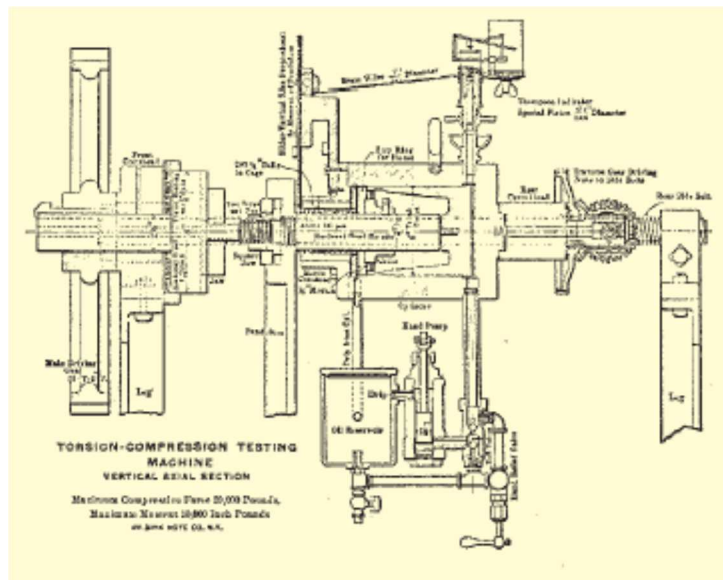


Ilustración 3: Medidas de presión en cojinetes (Tower, 1883)

Mientras, en EEUU se desarrollaban investigaciones paralelas a las anteriores. Las leyes de Amontons sobre el rozamiento seco se vieron refutadas por los ensayos del norteamericano Robert Henry Thurston (1879). Sus investigaciones con cojinetes demostraron que el coeficiente de fricción decrecía al aumentar la carga hasta alcanzar un mínimo. Después, aumentaba rápidamente la fricción de forma casi asintótica. Albert Kingsbury, alumno de Thurston, continuó las investigaciones tratando de seleccionar materiales que minimizaran la fricción (Ilustración 4).



*Ilustración 4: Aparato de medida de fricción utilizado por Kingsbury*

El mínimo de fricción hallado por Thurston fue el primer paso hacia unas curvas fricción-velocidad (o fricción-carga).

### **3.1.3.- La curva de Stribeck:**

Como se expuso anteriormente, la interposición de una capa de material de baja resistencia a la cizalla entre las superficies en contacto reduce notablemente la fricción y el rozamiento. Éste es el fenómeno conocido como lubricación. El término es aplicado a dos situaciones diferentes:

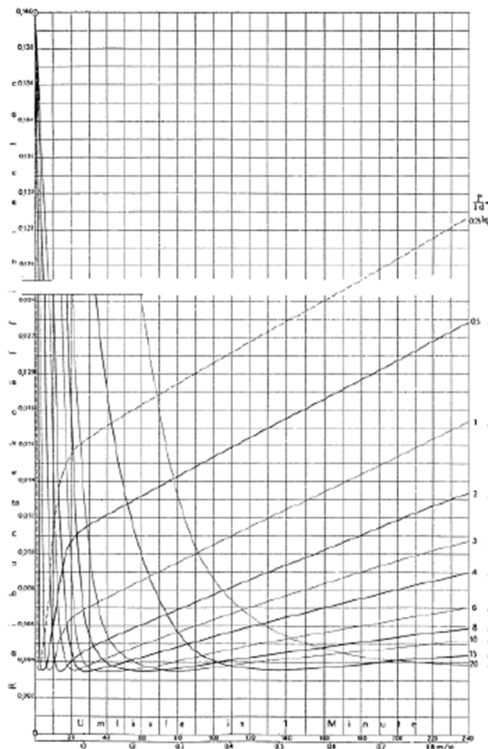
- Lubricación sólida
- Lubricación fluida (líquida o gaseosa)

A partir de este punto, se considerará sólo lubricación fluida, la más extendida en la Tribología, y de interés en la industria y aquella que se tratará en la teoría y experimentación de este trabajo.

Para superficies en movimiento relativo, los diferentes regímenes de lubricación se pueden distinguir a partir de la curva de Stribeck (1902). Esta gráfica representa el coeficiente de fricción como función del producto de la viscosidad absoluta ( $\eta$ ) y la velocidad de rotación en revoluciones por segundo ( $N$ ) dividido por la carga ( $W$ ). La curva tiene un mínimo, lo que permite identificar diferentes mecanismos de lubricación.

La representación original de la curva representa la fricción para cojinetes como función de la velocidad de rotación y para diferentes cargas (Stribeck, 1902), tal y como puede verse en la Ilustración 5. El método utilizado por Stribeck para calcular la capacidad de carga es aún muy empleado en la actualidad. Las medidas de fricción son muy exactas. Aunque la mayor parte de los tipos de cojinetes y rodamientos analizados por Stribeck ya no se utilizan hoy día, se ha podido analizar por ejemplo la fricción en los rodamientos de bolas. Para el mismo tipo de rodamiento, Stribeck midió  $\mu=0.0015$ , el mismo valor que facilita el fabricante SKF en su catálogo de 1989.

El gran hallazgo de estos trabajos fue la representación gráfica fricción-velocidad para cada nivel de carga, que permitía encontrar un punto de mínima fricción para distintas aplicaciones. Aunque para el ingeniero alemán estas curvas sólo fueron consideradas como otra más de sus observaciones, con el tiempo se mostrarían como la forma más útil y gráfica de mostrar los distintos regímenes de lubricación en el funcionamiento de cualquier máquina.



*Ilustración 5: Fricción para cojinetes como función de la velocidad de rotación y para diferentes cargas (Stribeck, 1902)*

Stribeck no advirtió la utilidad de sus curvas ni su representación incluía en el eje de abscisas la influencia de la viscosidad. Por ello, la representación moderna de la llamada “curva de Stribeck” es algo diferente de la original.

Ludwig Gümbel y Mayo Hersey (1914) mostraron por separado que la forma más apropiada de representar la llamada “curva de Stribeck” era incluyendo en el eje de abscisas la velocidad adimensionalizada ( $\frac{\eta U}{W}$ ) (Ilustración 6). Este parámetro incluye la viscosidad del lubricante ( $\eta$ ), la velocidad de deslizamiento ( $U$ ) y la carga ( $W$ ). De esta manera, se manejaban también la influencia de la viscosidad del aceite, la velocidad y la carga del contacto.

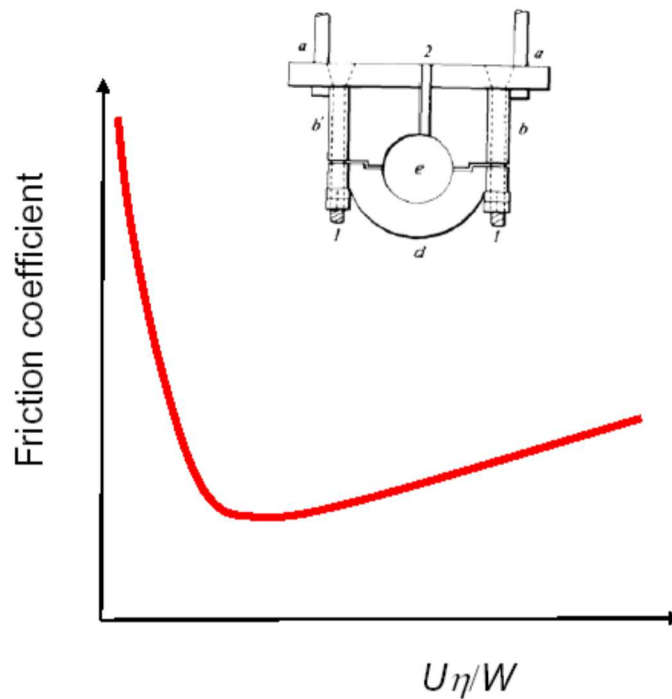


Ilustración 6: Representación debida a Gümbel y Hersey para cojinetes (Spikes, 2005)

Los procesos tribológicos están directamente relacionados con las interacciones físicas (a nivel molecular) entre las superficies en contacto. Estos procesos pueden ser influidos o modificados por la lubricación. El propósito de la lubricación es separar las superficies en movimiento relativo con una película de un material que oponga menor resistencia a ser deformado tangencialmente y evite que las superficies sean dañadas. Dependiendo del espesor de la película de lubricante (desde el rango de los nanómetros hasta algunas decenas de milímetros), se pueden diferenciar distintos modos o regímenes de lubricación. Estos regímenes pueden discutirse a partir de la curva de Stribeck.

### **3.1.4.- Regímenes de lubricación:**

A partir de la curva de Stribeck, los regímenes de lubricación se identificarán por un coeficiente adimensional conocido como parámetro de película ( $\lambda$ ). Este parámetro relaciona el espesor de película ( $h$ ) con la rugosidad media de las superficies ( $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ ).



$$\lambda = \frac{h}{\sigma} = \frac{h}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}$$

Ciertos valores del parámetro de película marcan los límites aproximados entre los regímenes de lubricación. Este hecho se ilustra en la siguiente tabla:

Lubricación límite	$\frac{h_0}{\sigma} < A$
Lubricación mixta	$A < \frac{h_0}{\sigma} < B$
Lubricación (elasto)hidrodinámica	$\frac{h_0}{\sigma} > B$

Tabla 1: Régimenes de lubricación según parámetro de película

Los valores  $A$  y  $B$  difieren ligeramente según el autor o incluso la aplicación o contacto concreto sobre el que se emplee esta clasificación. Generalmente  $A$  suele tomar un valor de 1 y  $B$  un valor entre 2 y 3,5 (Bautista, 1984). Aunque el parámetro lambda se puede calcular para cualquier espesor de película, habitualmente se usa el espesor mínimo, y de esta forma es posible determinar si puede haber contacto metálico.

En la Ilustración 7 se indican los distintos regímenes de lubricación en función del parámetro de película, pudiendo distinguirse tres zonas diferenciadas:

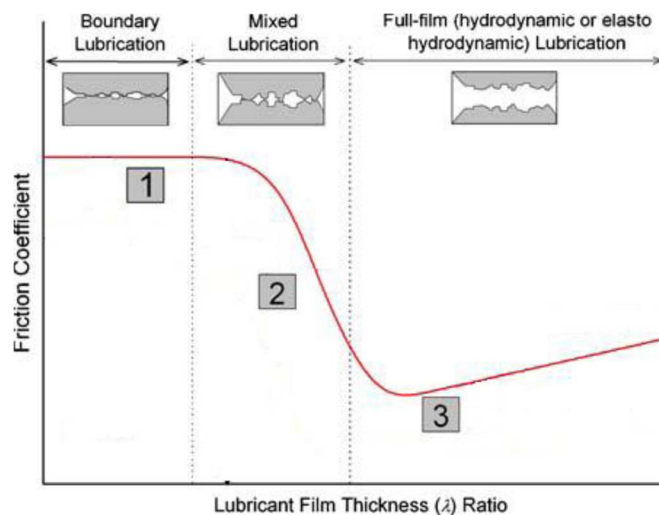


Ilustración 7: Régimenes de lubricación en la curva de Stribeck

**Lubricación Límite (Zona 1):** la película de lubricante es mínima y se producen contactos entre las superficies, originando microsoldaduras.

**Lubricación Mixta (Zona 2):** se produce una situación intermedia con contactos ocasionales que coexisten con otras zonas con suficiente espesor de película.

Lubricación (Elasto)Hidrodinámica (Zona 3): el fluido realiza una lubricación total, no existiendo contactos entre las superficies.

Los cambios de régimen se manifiestan especialmente en las variaciones en la fricción y la tasa de desgaste. En la Ilustración 8 se aporta un orden de magnitud del coeficiente de fricción para cada régimen (depende del lubricante o los materiales).

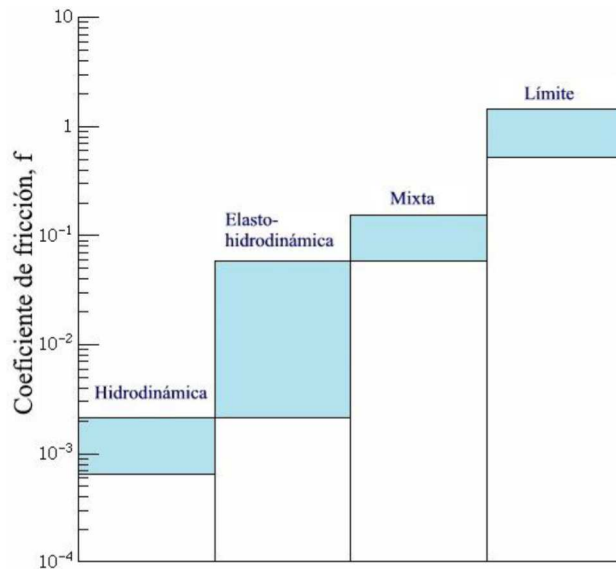


Ilustración 8: Valores orientativos del coeficiente de fricción para los distintos regímenes (Linares, 2005, basado en Hamrock, 1991)

En la Ilustración 9 se muestran las variaciones en el desgaste. De esta figura se deduce la idoneidad de situarse en los regímenes de mayor espesor de película, pues presentan tasas de desgaste mucho menores o casi nulas. De igual manera, se muestra que la zona de Lubricación Límite es muy desfavorable para la conservación de los materiales.

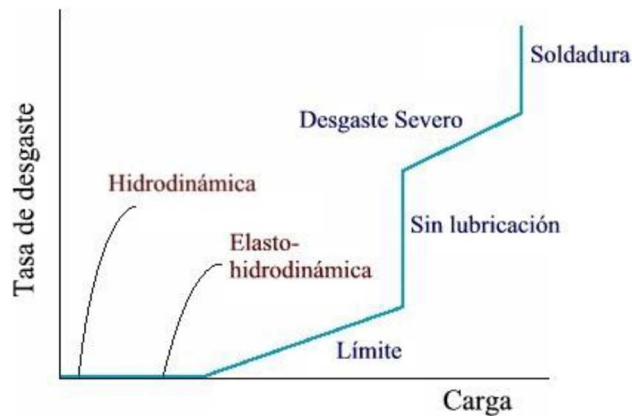
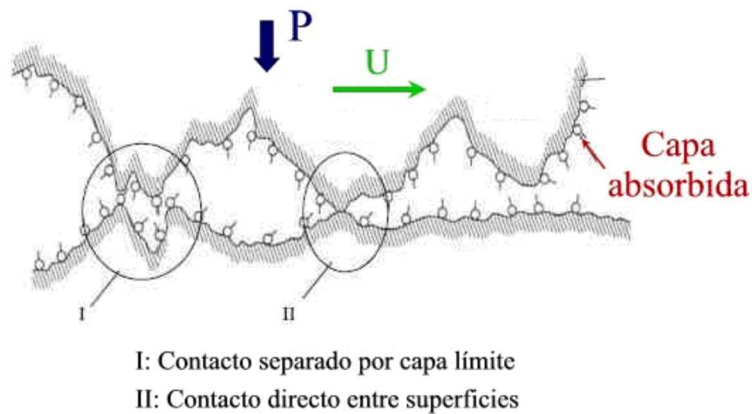


Ilustración 9: Tasa de desgaste para los distintos regímenes (Linares, 2005, basado en Beerbower, 1972)

### 3.1.4.1.- Lubricación límite:

Cuando la velocidad decrece o la carga se incrementa, nos situamos a la izquierda de la curva de la Ilustración 7 (Zona 1). Las condiciones del contacto son las más parecidas a un contacto no lubricado, manifestándose muchos de los fenómenos del rozamiento seco, combinados con la química del lubricante y las superficies. La Lubricación Límite (*boundary lubrication*) se caracteriza por los siguientes hechos (Jones, 1985):

El régimen tiene una alta complejidad y está gobernado por materias como la metalurgia, la adsorción química o la cinética de las reacciones.



*Ilustración 10: Capa adsorbida en régimen de lubricación límite (Faraon, 2005)*

El aspecto más importante es la formación de una capa superficial de lubricante (Ilustración 10) que protege a los materiales del desgaste y los daños en las superficies en contacto.

La formación de estas películas se regula por la química entre las películas y las superficies (presencia de compuestos polares, que se adhieren o reaccionan químicamente con las superficies sólidas).

La efectividad en la minimización del desgaste se determina por algunas propiedades físicas de la película: el módulo elástico transversal, el espesor, la adhesión a las superficies, la cohesión del fluido, la temperatura de descomposición térmica o la solubilidad. Estas cualidades se agrupan tradicionalmente bajo la denominación de **untuosidad** (*oiliness* o *lubricity*).

Las características viscosas del fluido juegan un papel secundario en este régimen de lubricación.

A continuación, se discute la influencia de algunas de estas propiedades en la película límite:

El **módulo transversal de la película** (*shear strength*) está directamente reflejado en el coeficiente de fricción. Interesan películas con poca resistencia a cortante en comparación con el metal, para que la mayor parte del esfuerzo sea absorbida por el lubricante (Jones, 1985). Esto se ilustra en la Ilustración 11.

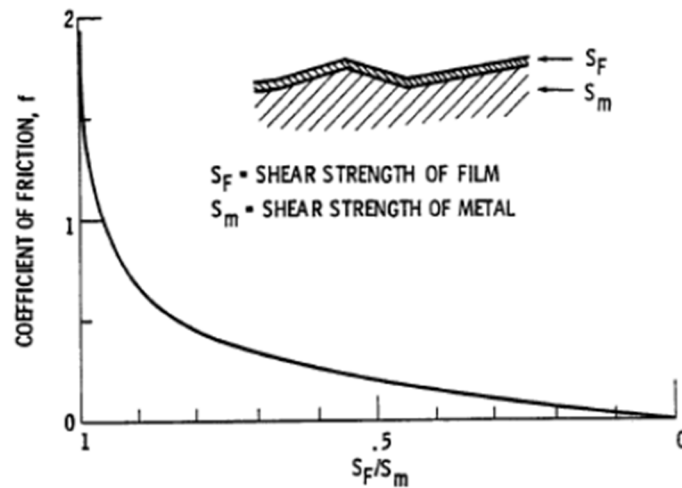


Ilustración 11: Coeficiente de fricción en función de la relación de esfuerzos cortantes entre película y superficie metálica (Jones, 1985)

La manifestación cualitativa de este hecho viene dada por la siguiente ley (Hironaka, 1984) para la fuerza de fricción:

$$F_{\mu} = A \cdot [\alpha \cdot S_m + (1 - \alpha) S_F]$$

siendo  $A$  el área total de contacto,  $\alpha$  el tanto por uno de contactos efectivos (tal y como se observa en la Ilustración 12),  $S_m$  el esfuerzo cortante del metal y  $S_F$  el de la película lubricante. De la ecuación anterior se entiende la necesidad de que la relación  $S_F/S_m$  sea lo más reducida posible, por lo que el objetivo debe ser la reducción de los contactos (minimización del coeficiente  $\alpha$ ).

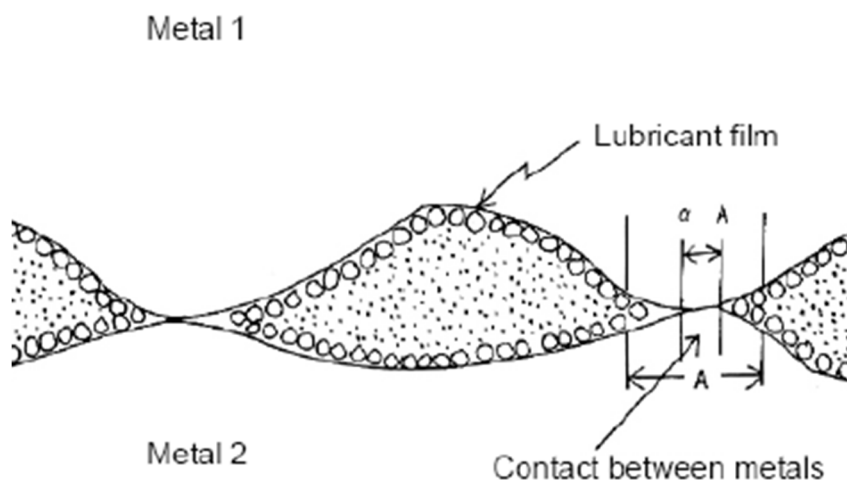


Ilustración 12: Modelo de contacto en lubricación límite (Hironaka, 1984)

La **temperatura de descomposición térmica** (*melting point*) es la propiedad más relacionada con el fallo de la película. Este fenómeno se puede observar en la Ilustración 13, en la que dos hidrocarburos presentan un gran aumento de fricción al alcanzar sus temperaturas de descomposición térmica. Esto indica que a esta temperatura se produce precisamente el mencionado fallo de la película protectora.

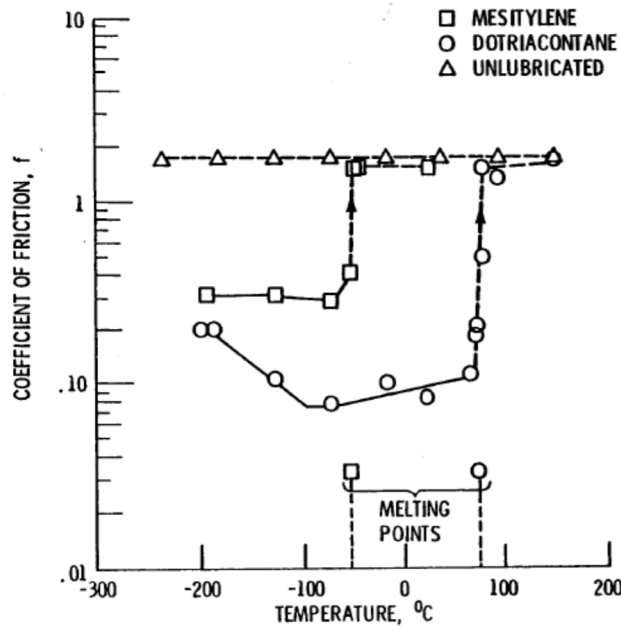


Ilustración 13: Relación entre la fricción y la temperatura para dos hidrocarburos y el caso de contacto seco (J.A. Russell, 1965)

El espesor de la película tiene una influencia notable en la fricción, aunque menor que en otros regímenes. En general, un incremento del espesor reduce la fricción, aunque para elevados espesores y altas rugosidades, esta tendencia se puede invertir. Esta relación se explica en la Ilustración 14.

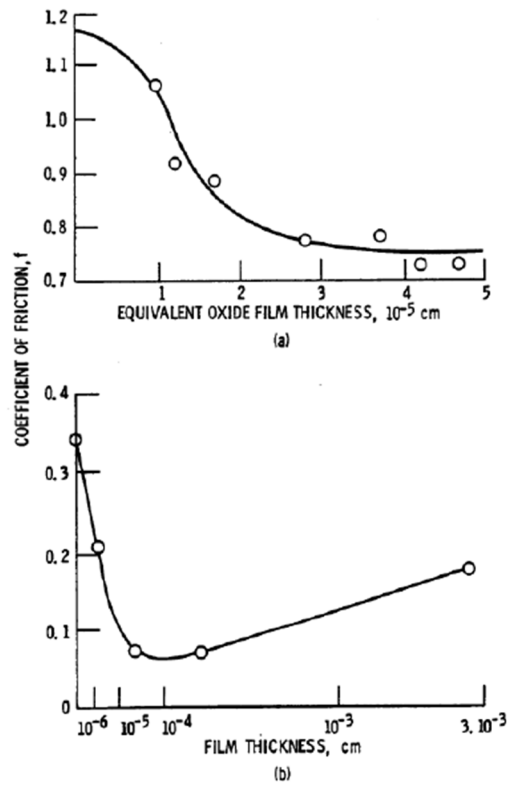


Ilustración 14: Influencia del espesor de película (film thickness) sobre el coeficiente de fricción (Kragelski, 1965)

También las variables operativas tienen influencia sobre la fricción en esta región de lubricación límite. Las principales variables son la carga, la velocidad, la temperatura y la atmósfera que rodea la película.

En principio, la variación de la carga no debería afectar al coeficiente de fricción según las leyes del rozamiento seco (ley de Amontons), condiciones asimilables a la lubricación límite. En la Ilustración 15 se observa cómo para cargas representativas (a partir de 10 g) este principio se cumple. Para cargas muy pequeñas, la caída del coeficiente de fricción se explica mediante fenómenos moleculares de adhesión, diferentes para cada lubricante.

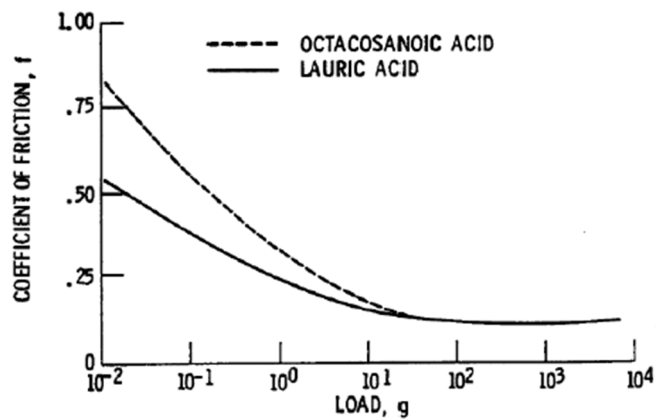


Ilustración 15: Variación de la fricción con la carga (Witehead, 1950)

Para valores reducidos de velocidad, su variación influye poco sobre el coeficiente de fricción. En el caso de aceites minerales, la fricción se incrementa ligeramente a velocidades extraordinariamente bajas (Ilustración 16).

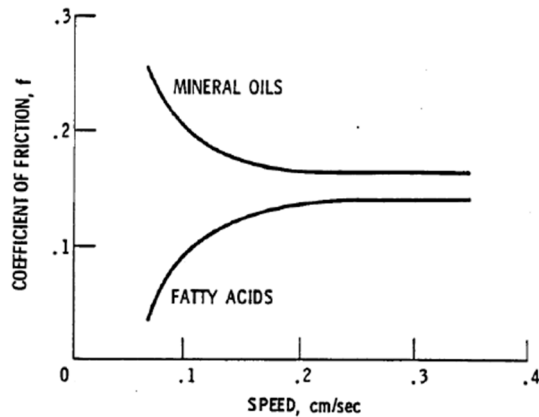


Ilustración 16: Relación entre la velocidad y la fricción en lubricación límite (Clayton, 1951)

Diferentes investigadores no han conseguido generalizar acerca del efecto de la temperatura en la fricción (Jones, 1985). Altas temperaturas pueden causar la degradación del lubricante y el fallo de película, tal y como se avanzó mediante el concepto de la temperatura de descomposición térmica.

La presencia en la atmósfera circundante de vapor de agua u oxígeno puede variar de forma importante el proceso de reacciones químicas de formación de la película.

### **3.1.4.2.- Lubricación mixta:**

La transición entre el régimen de Lubricación Límite y el de Lubricación (Elasto)hidrodinámica, ocupa una amplia zona de la curva en la que se combinan las características de ambos regímenes (Zona 2 en la Ilustración 7). Aunque se producen frecuentes contactos entre las microasperezas, en la mayor parte del área de contacto existe película de lubricante.

Por tanto, en Lubricación Mixta coexisten los conocidos mecanismos de la película límite (interacciones químicas entre el sólido y el fluido) con los propios de la zona (Elasto)hidrodinámica (propiedades reológicas o viscosas del aceite). El esfuerzo cortante es absorbido tanto por la película de lubricante como por la superficie, lo que reduce notablemente la fricción y el desgaste.

A medida que se va incrementando la velocidad (o reduciendo la carga), el coeficiente de fricción se reduce hasta alcanzar un mínimo. Aproximadamente en este mínimo se produce el cambio de régimen hacia la Lubricación (Elasto)hidrodinámica.

### **3.1.4.3.- Lubricación (Elasto)hidrodinámica:**

Tras alcanzarse un mínimo de fricción, existe un espesor suficiente de película ( $\lambda > 2-3,5$ ) para garantizar la lubricación. Dejan de existir contactos entre los sólidos y se forma una película uniforme de lubricante entre las superficies, lo que reduce el desgaste hasta niveles casi inapreciables (Ilustración 9).

Dentro de esta Zona 3 (Ilustración 7), si aumenta el parámetro  $\frac{\eta U}{W}$ , la fricción interna en el fluido incrementará el coeficiente de fricción. Por el contrario, una disminución de  $\frac{\eta U}{W}$  disminuye la fricción hasta el mencionado mínimo, aunque nos aproxima al régimen de Lubricación Mixta.

Como se verá en los siguientes apartados, esta región de comportamiento puede ser conocida como hidrodinámica o elastohidrodinámica. El segundo de ellos es un caso específico de la Hidrodinámica, existente en caso de contactos altamente cargados, como rodamientos de bolas o rodillos y engranajes. La elastohidrodinámica da lugar a películas muy finas de lubricante y áreas de contacto muy reducidas altamente cargadas, por lo que deben incorporarse en la formulación hidrodinámica los efectos de la deformación de los sólidos y el incremento de la viscosidad del aceite a altas presiones.

## **3.2. Lubricación hidrodinámica:**

El concepto de Lubricación Hidrodinámica se explica generalmente mediante dos superficies en movimiento relativo arrastrando un fluido viscoso a un espacio convergente. De esta forma, la cuña de fluido a presión es capaz de soportar la carga a la que se halla sometido el contacto.

Este régimen corresponde a la zona 3 de la Ilustración 7, en donde se supone un valor alto de la relación  $\frac{\eta U}{W}$ , y al existir un espesor suficiente de película (valores típicos de 5 a 500  $\mu\text{m}$ ; Bhushan, 2002) no hay contacto entre las superficies (con acabados superficiales de magnitud menor a una micra, en la mayoría de las aplicación de interés industrial). El coeficiente de fricción es muy reducido en esta zona ( $\mu \sim 0,001$ ). El comportamiento en el contacto está gobernado por las propiedades físicas del lubricante, especialmente la viscosidad, mientras que la fricción viene dada también por el esfuerzo cortante que es capaz de absorber el fluido.

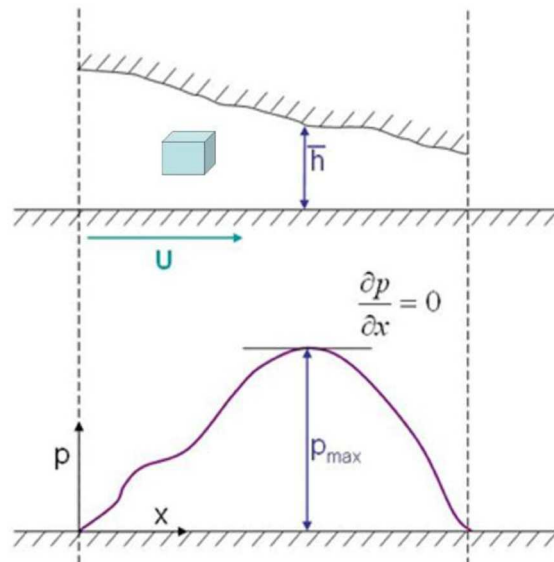
La viscosidad dinámica se define como la relación existente entre el esfuerzo contante realizado (fuerza de fricción) y el gradiente de velocidad existente entre las superficies en movimiento.

En la Lubricación Hidrodinámica se parte de la Ecuación de Reynolds, se consideran los sólidos indeformables y la viscosidad del aceite a presión ambiente. La Teoría Hidrodinámica responde a una lubricación ideal, pero está demostrado que para cargas no muy elevadas es una buena aproximación al problema.

El origen de la Teoría Hidrodinámica son los estudios de Beauchamp Tower (1882) con cojinetes de vagones de ferrocarril, detallados en el apartado 2.1.1.-. Como se ha comentado anteriormente, aunque Tower obtuvo la distribución de presión en el contacto, las bases teóricas de la Teoría Hidrodinámica se deben a Osborne Reynolds, quien publicó en 1886 una ecuación diferencial que respondía a los resultados empíricos: la conocida como Ecuación de Reynolds. Esta expresión, en sus diferentes formas, es aplicable a un gran rango de problemas de fluidodinámica.



Reynolds supuso que el lubricante se adhería a las superficies de cojinete y eje, formando una cuña a presión en el sentido del deslizamiento que soporta la carga del cojinete. El proceso de obtención de la Ecuación de Reynolds es laborioso y sólo se pretende en este apartado mencionar los pasos necesarios en la deducción.



*Ilustración 17: Geometría de las superficies y distribución de presiones en un contacto hidrodinámico (Hue, 2006)*

Las hipótesis de Reynolds, necesarias a lo largo de todo el proceso, son las siguientes:

1. **El peso y la inercia del fluido se desprecian.** Se consideran despreciables el resto de fuerzas que actúan sobre el fluido, como pueden ser el peso, la inercia o las fuerzas magnéticas.
2. **La presión del fluido es constante a lo largo del espesor de la película.** Como el espesor de película es muy pequeño, la variación de presión dentro de ese espesor se considera despreciable. Esta consideración puede dejar de ser cierta cuando se tienen en cuenta las propiedades elásticas del fluido.
3. **Las superficies se consideran planas.** La curvatura de las superficies es mucho mayor que el espesor de película. Por tanto, se considera que la velocidad de las superficies no cambia de dirección.
4. **El fluido se adhiere a las superficies sólidas.** Es decir, la velocidad de la capa de lubricante adyacente a cada superficie, coincide con la velocidad de ésta.
5. **El fluido es Newtoniano.** Como se deriva de la propia definición de viscosidad, la relación entre la tensión cortante y el gradiente de velocidad es una recta (cuya pendiente es la viscosidad).
6. **El flujo es laminar.** Suponer que no se producen turbulencias resulta acertado salvo para cojinetes muy grandes y velocidades muy elevadas.

7. **El fluido es incompresible.** La densidad del fluido y su viscosidad se consideran constantes a lo largo del espesor de película.

8. **Las superficies son rígidas.** No se deforman bajo la presión del contacto.

A partir del equilibrio en un elemento diferencial (Ilustración 18) de las que se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes, se pueden obtener las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \eta \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}$$

Que relacionan el gradiente de la presión ( $p$ ) con las segundas derivadas espaciales de las velocidades en las direcciones  $X$  e  $Y$  ( $u, v$ ).

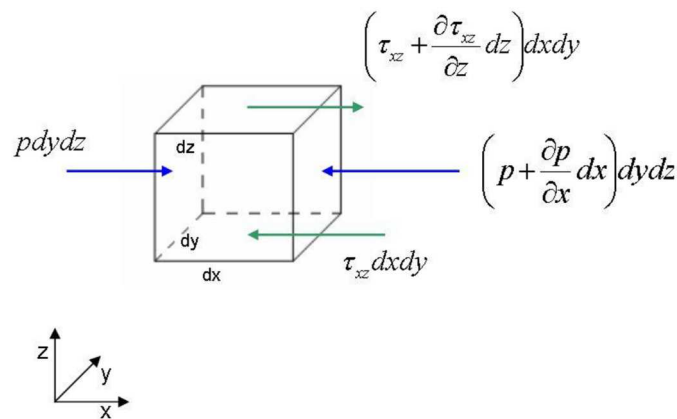


Ilustración 18: Equilibrio en un elemento diferencial.

A continuación, utilizando las hipótesis anteriores y la continuidad del fluido en un elemento diferencial y en una columna, se obtiene la Ecuación de Reynolds completa:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6 \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (U_1 + U_2) h + \frac{\partial}{\partial y} (V_1 + V_2) h + 2(w_1 - w_2) \right\}$$

siendo  $h$  el espesor de película y  $w$  la velocidad en la dirección  $Z$ . Los subíndices  $1$  y  $2$  hacen referencia a las dos superficies en movimiento relativo.

Una forma frecuentemente empleada de la ecuación de Reynolds es la ecuación de Reynolds en una dimensión:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 6U\eta \frac{h - \bar{h}}{h^3}$$

donde  $\eta$  es la viscosidad,  $U$  es la velocidad de la superficie inferior (la superficie superior no se desplaza) y  $\bar{h} = \overline{\frac{\partial h}{\partial x} x}$ , es decir, donde  $dp/dx=0$ .

La solución de la Ecuación de Reynolds conduce al conocimiento de las siguientes magnitudes en el contacto:

- Distribución de presión
- Espesor de película
- Capacidad de carga
- Fuerza de fricción

Sobre la fuerza de fricción es conveniente explicar la forma de la curva de Stribeck en la región hidrodinámica, que es la que se indica en la Ilustración 19.

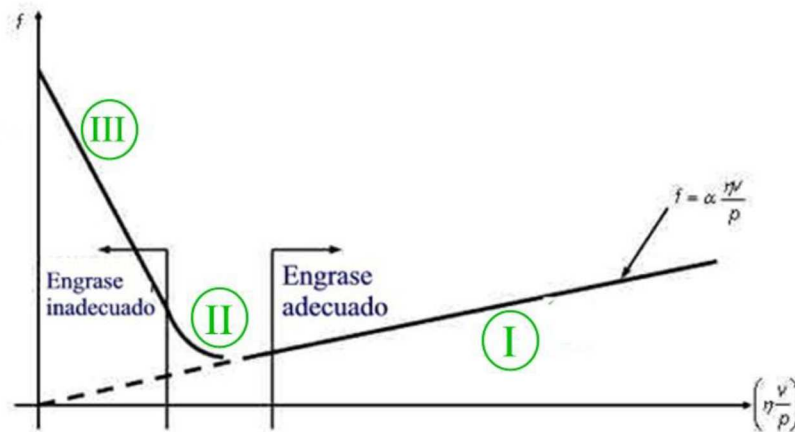


Ilustración 19: Curva de Stribeck que relaciona el coeficiente de fricción ( $f$ ) con la velocidad, presión y viscosidad (Echávarri, 2005)

El coeficiente de rozamiento ( $\mu$ ), que relaciona la fuerza de fricción ( $F\mu$ ) con la fuerza normal en el contacto ( $W$ ), responde a la ley de Newton para fluidos viscosos (Bhushan, 2002):

$$\mu = \frac{F_{\mu}}{W} = k\eta \frac{A}{W} v \approx k\eta \frac{A}{W} u = k \frac{\eta u}{p}$$

donde  $k$  es una constante de proporcionalidad,  $\eta$  es la viscosidad dinámica,  $A$  la superficie de contacto y  $v$  la velocidad normal al deslizamiento, que en primera aproximación se puede

asemejar a la velocidad  $u$ . La última simplificación incluye la presión  $p$ . Por tanto, en Lubricación Hidrodinámica, la curva de Stribeck se aproxima a una recta que pasa por el origen (Ilustración 19). La velocidad de deslizamiento y la viscosidad del lubricante favorecen la formación de película, mientras que la presión disminuye el espesor de aceite.

El régimen de lubricación hidrodinámica es más frecuente en elementos de máquinas en los que se produce un contacto de tipo superficial como cojinetes axiales (Ilustración 20 y Ilustración 21) o radiales (Ilustración 22).

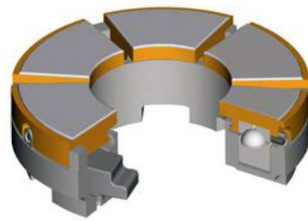


Ilustración 20: Cojinete axial

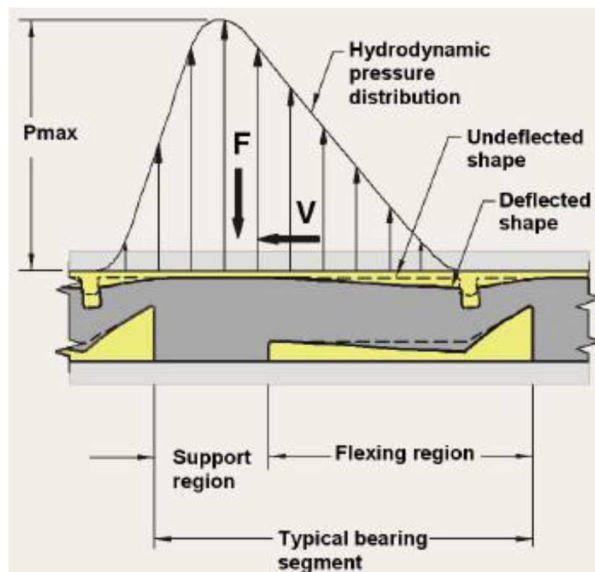
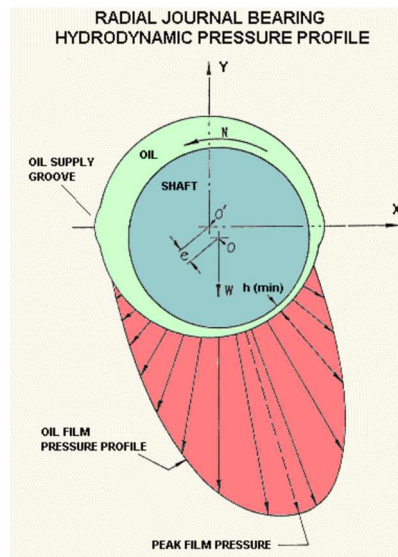


Ilustración 21: Distribución de presión en un cojinete axial



*Ilustración 22: Distribución de presión en un cojinete radial*

### **3.3. Lubricación elastohidrodinámica:**

#### **3.3.1.- Introducción a la teoría EHD: Límites de la lubricación HD:**

La teoría de la lubricación elastohidrodinámica nace de la imposibilidad de la hidrodinámica para predecir el espesor de la película en contactos altamente cargados. Como se explicará en su desarrollo histórico (apartado 2.3.2.-), la elastohidrodinámica reconsideró algunas de las hipótesis de Reynolds. Concretamente, se incorporan a la Ecuación de Reynolds los efectos de la presión sobre el lubricante y las deformaciones de las superficies.

El lubricante varía su viscosidad con la presión y, a muy altas cargas, las presiones pueden alcanzar el orden de los gigapascals. Por tanto, esta relación presión-viscosidad debe sustituirse en la Ecuación de Reynolds. Para ello, debe conocerse en profundidad el comportamiento del lubricante en condiciones de presión elevada, para lo que ha sido necesario el desarrollo de nuevas técnicas de reología.

Reynolds había considerado las superficies rígidas e indeformables. Sin embargo, los sólidos experimentan una cierta deformación cuando son sometidos a compresiones muy elevadas (características de rodamientos de bolas, engranajes, y multitud de elementos en máquinas). Será necesaria la elección del modelo más adecuado para describir esta deformación y, tradicionalmente, el modelo elegido ha seguido la Teoría de Hertz. Sin embargo, tal y como se verá a lo largo de este capítulo, pueden ser más adecuadas otras teorías según las características de los materiales y las cargas.

A continuación, se emprende un breve repaso histórico a las investigaciones que han hecho posible el descubrimiento y estudio de la elastohidrodinámica lo largo del pasado siglo.

### 3.3.2.- Desarrollo histórico:

El problema de la lubricación de engranajes promovió los estudios que llevaron hacia la identificación de una modificación de la teoría de Lubricación Hidrodinámica, que se denominaría elastohidrodinámica.

En su trabajo "Lubrication of gear teeth" (1916), el ingeniero británico H.M. Martin aplicó la hidrodinámica al modelo de dos discos en rodadura y deslizamiento altamente cargados (Ilustración 23).

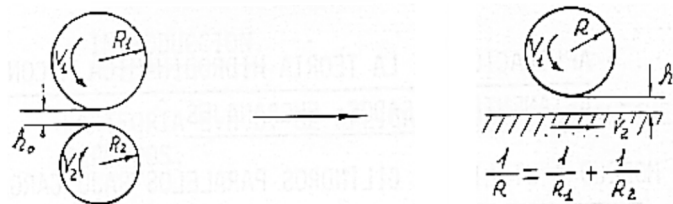


Ilustración 23: Modelo de cilindros paralelos bajo carga empleado por Martin en su estudio (P. Lafont, 1984)

Martin obtuvo la siguiente expresión para el mínimo espesor de película adimensionalizado:

$$H = 4.9 \frac{U}{WL}$$

Donde  $U$  y  $WL$  son, respectivamente, la velocidad y la carga por unidad de longitud adimensionalizadas. Introduciendo los valores típicos en engranajes (Dowson, 1995):

$$H = 4.9 \frac{10^{-10}}{10^{-4}} \approx 10^{-6}$$

El espesor de película se adimensionaliza con el radio de contacto ( $R \sim 10^{-2}$  m):

$$H \equiv \frac{h_0}{R} \Rightarrow h_0 = H \cdot R = 10^{-8} \text{ m} = 10^{-2} \text{ } \mu\text{m}$$

Comúnmente el acabado de las superficies proporciona rugosidades del orden  $Ra \sim 0.4-0.8 \mu\text{m}$ , muy superiores al espesor calculado, nos encontraríamos en condiciones de lubricación límite. Sin embargo, la experiencia demostraba que había suficiente espesor de película, lo que indicaba que el modelo teórico era incorrecto.

Los esfuerzos de los investigadores se centraron en distinguir las hipótesis erróneas en el planteamiento de Reynolds y los estudios se dedicaron a dos de ellas: la rigidez de los sólidos en contacto y la viscosidad constante del fluido. Parecía posible que las deformaciones de las superficies y la influencia de la alta presión sobre la viscosidad de lubricante ejercieran un importante efecto sobre la resolución de la Ecuación de Reynolds.

Peppler (1936, 1938) y Meldahl (1941) analizaron la deformación de los sólidos. Éste último realizó una interesante resolución simultánea de las ecuaciones de la elasticidad y la hidrodinámica, aunque todavía resultaba insuficiente. A mediados de los años 50, Dörr acometió de nuevo el problema sin éxito.

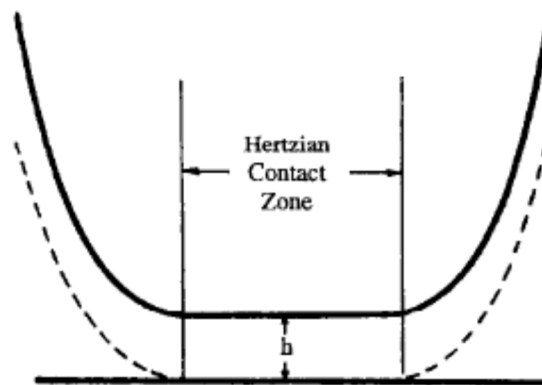
En cuanto a la influencia de la relación viscosidad-presión en el lubricante, fue considerada por Gatcombe a finales de la Segunda Guerra Mundial y por Hersey y Lowdenslager en 1950. El espesor de película calculado se incrementaba al considerar este efecto de la presión, por lo que las investigaciones parecían marchar por buen camino.

Hasta este momento, el principal problema consistía en que se habían integrado simultáneamente las ecuaciones de la hidrodinámica y la elasticidad o de la hidrodinámica y la relación viscosidad-presión del aceite. El paso definitivo lo daría aquél que combinara la elasticidad y la ecuación viscosidad-presión.

En 1949, los científicos soviéticos Grubin y Vinogradov realizaron una aproximación analítica a la solución del problema elastohidrodinámico en contactos lineales. Asumía que los sólidos se deforman como contactos hertzianos en seco, pero quedando separados por una película de lubricante fina y uniforme (Ilustración 24). El espesor de ésta venía dado por la siguiente expresión:

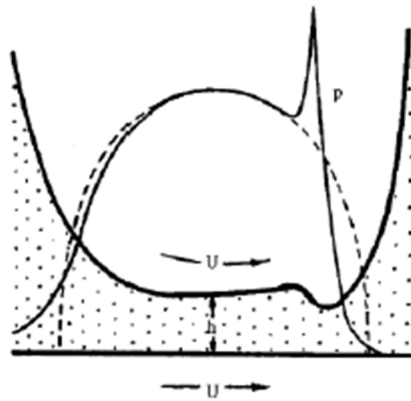
$$H = 1.95 \frac{U^{8/11} G^{8/11}}{W_L^{1/11}}$$

Donde  $G = \alpha E^*$  incorpora el coeficiente presión-viscosidad del lubricante ( $\alpha$ ) y el módulo de elasticidad de los materiales ( $E^*$ ).



*Ilustración 24: Modelo del análisis de Grubin para contactos lineales elastohidrodinámicos (Dowson, 1995)*

Comparando la ecuación de Grubin con la de Martin, la razón entre ambas puede ser de uno o dos órdenes de magnitud. En años posteriores, Cameron atribuyó a Ertel la ecuación de Grubin, por lo que es actualmente conocida como Ecuación de Ertel- Grubin. Una medida de su importancia la da el hecho de que hoy en día se emplea para calcular el espesor central de película en contactos lineales. Grubin también anticipó la existencia de un pico de presión a la salida del contacto, motivado por un estrangulamiento de la película de aceite en esta región (Ilustración 25).



*Ilustración 25: Representación de la distribución de presión y el espesor de película en contactos lineales elasto-hidrodinámicos (Dowson, 1995)*

La solución definitiva en contactos lineales fue introducida por Dowson y Higginson en 1959. Observaron que los procedimientos iterativos basados en sucesivas soluciones de la Ecuación de Reynolds podían ser tediosos y sólo ligeramente convergentes. Así que desarrollaron una técnica inversa en la que utilizaban la Ecuación de Reynolds para calcular el espesor de película asociado a una distribución de presión dada. Esta película de aceite era comparada con la obtenida a partir de las ecuaciones de la elasticidad, hasta que ambos resultados coincidían. El procedimiento iterativo convencional se mantuvo en la región de entrada, mientras que el método inverso fue adoptado para la zona central, de presión máxima.

Se encontraron soluciones numéricas para un rango de variables independientes  $U$ ,  $G$  y  $WL$  y en 1961, Dowson y Higginson publicaron que el espesor mínimo de película respondía a la siguiente ecuación:

$$H = 1.6 \frac{U^{0.7} G^{0.6}}{W_L^{0.13}}$$

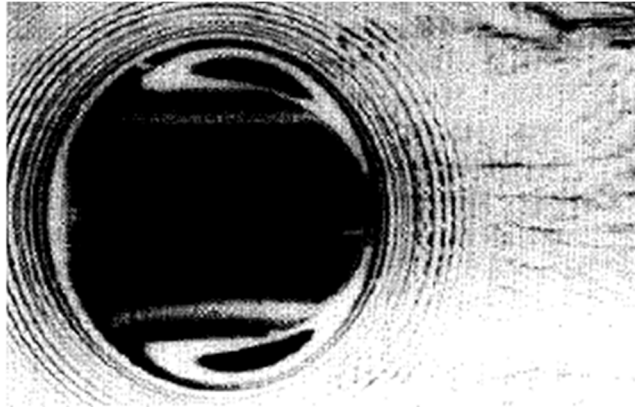
Esta ecuación ha sufrido pequeñas variaciones a lo largo del tiempo y aún hoy se considera una buena predicción del espesor mínimo de aceite en contactos lineales.

En cuanto a los contactos puntuales, se obtuvieron correlaciones similares en los siguientes años. La expresión más conocida en contactos puntuales se debe a Hamrock y Dowson (1977) y quedaba en función de un parámetro de elipticidad del contacto.

En cuanto a los métodos experimentales, han resultado muy útiles a lo largo de los años para confirmar las predicciones teóricas. Los métodos capacitivos permitieron por primera vez la observación de la película (Crook, 1958 y 1960). La máquina más utilizada estaba basada en dos discos cargados uno contra otro, y el método más frecuentemente aplicado fue la medida de la variación de la capacidad eléctrica de la película actuando como dieléctrico entre ambos discos fabricados en material aislante sobre los que se había depositado material conductor. En cuanto al pico de presión a la salida, fue por primera vez observado en el osciloscopio por Kannel (1966) (Ilustración 26).



Aunque la técnica que ha aportado más información sobre la distribución de espesores de la película es la interferometría óptica, especialmente para contactos puntuales. Gracias a las experiencias de Archard y Kirk (1961 y 1963) y Cameron y Gohar (1966) se observó que el espesor mínimo de película en contactos puntuales se localiza en unos “lóbulos laterales” en los bordes del contacto hertziano. Por el contrario, en los contactos lineales el espesor mínimo se encuentra en la zona de salida (Ilustración 25).



*Ilustración 26: Interferograma en un contacto puntual elastohidrodinámico (Wedeven, 1970)*

La aparición de nuevos métodos de cálculo numérico, así como el desarrollo de los ordenadores, ha permitido mejorar mucho los procedimientos establecidos por estos autores. Asimismo, se han abierto nuevos campos de estudio, como pueden ser (Dowson, 1995):

- Efectos térmicos: las soluciones anteriormente mencionadas consideran condiciones isotermas en el contacto. Actualmente se trabaja considerando los fenómenos de transmisión del calor o disipación energética (Bhushan, 2002).
- Reología de los lubricantes: en condiciones de alta presión, el modelo newtoniano del lubricante y la Ley de Barus pueden no ser suficientes para calcular sus propiedades viscosas y la fricción resultante en el contacto (Bair, 2004)
- Microelastohidrodinámica: incorpora los efectos de la rugosidad de las superficies y realiza las mismas consideraciones de la elastohidrodinámica a nivel de las microasperezas (Bhushan, 2002).

### **3.3.3.- Formulación del problema elastohidrodinámico:**

#### **3.3.3.1.- Cálculo del espesor de película:**

Se ha expuesto cómo el problema elastohidrodinámico se explica mediante la inclusión de la deformación de los sólidos y el incremento de viscosidad del lubricante en las ecuaciones de la hidrodinámica. Una vez se han estudiado la Ecuación de Reynolds, la Teoría de Hertz y la relación viscosidad-presión en los lubricantes, nos hallamos en disposición de analizar la conjugación de los tres fenómenos en la lubricación elastohidrodinámica. El planteamiento del problema es por tanto el indicado en la siguiente figura:



*Ilustración 27: Ecuaciones del problema elastohidrodinámico (EHD)*

En la lubricación Hidrodinámica, la geometría del contacto y la viscosidad del lubricante son función de la presión hidrodinámica. Por tanto, es imposible especificar una geometría de la película de aceite y una viscosidad sin haber resuelto la Ecuación de Reynolds. Por esta razón, los intentos de Martin (1940) de estimar el espesor de película en contactos elastohidrodinámicos utilizando una geometría predeterminada, dieron resultados erróneos (un espesor de película demasiado bajo, ver apartado 2.3.2.-).

Para todos los materiales y en función de su módulo de elasticidad, las superficies en un contacto hertziano se deforman elásticamente. El principal efecto de la deformación elástica en la medida de la película de lubricante se indica en la Ilustración 28, para el contacto bola-plano. El espesor total de la película ( $h$ ) es suma del espesor constante de aceite ( $h_f$ ), la deformación elástica combinada de los sólidos ( $h_e$ ) y la separación debida a la geometría de los cuerpos sin deformar ( $h_z$ ). Para este caso:

$$h_z = \frac{x^2}{2R}, \text{ siendo } R \text{ el radio de la esfera.}$$

$$h = h_f + h_e + h_z$$

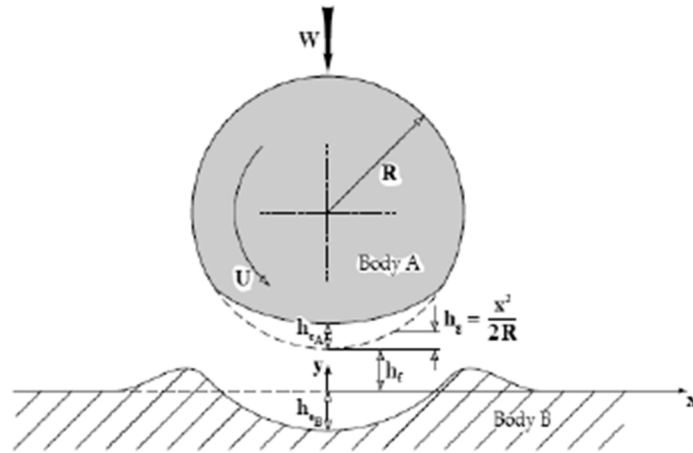


Ilustración 28: Efecto de la deformación elástica de los sólidos sobre el espesor de película (Stachowiak y Batchelor, 2001)

En cuanto a la relación presión-viscosidad del aceite, la Ley de Barus (apartado 2.4.1.4.-) responde bastante bien al comportamiento a las presiones típicas de la elastohidrodinámica:

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

donde  $\eta$  y  $\eta_0$  son las viscosidades a alta y baja presión respectivamente,  $\alpha$  el coeficiente presión-viscosidad y  $p$  la presión en el contacto.

A continuación, se va a seguir el proceso desarrollado por Grubin (1949) para obtener una solución aproximada a la Ecuación de Reynolds incorporando de forma simultánea la deformación elástica de los sólidos y el aumento de viscosidad del lubricante. Aunque las soluciones numéricas obtenidas posteriormente (apartado 2.3.4.-) son más exactas, el desarrollo de Grubin resulta lo suficientemente ilustrativo como para entender la naturaleza del problema matemático.

El proceso arranca a partir de la Ecuación de Reynolds en 1 dimensión:

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

donde  $p$  es la presión hidrodinámica,  $x$  la coordenada en la dimensión horizontal (Ilustración 28),  $U$  la velocidad media de las superficies,  $\eta$  la viscosidad del lubricante,  $h$  el espesor de película y  $\bar{h}$  el espesor para el cual el gradiente de presión es nulo.

Sustituyendo la viscosidad en función de la Ley de Barus dentro de la Ecuación de Reynolds, nos queda:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 6U\eta_0 e^{\alpha p} \left( \frac{h - \bar{h}}{h^3} \right)$$

Grubin introdujo una variable auxiliar para resolver esta ecuación, denominada presión reducida ( $q$ ).

$$q = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha p})$$

cuya derivada tiene la forma:

$$\frac{dq}{dx} = e^{-\alpha p} \frac{dp}{dx}$$

Por lo que la Ecuación de Reynolds se puede expresar en función de esta presión reducida:

$$\frac{dq}{dx} = 6U\eta_0 \left( \frac{h - \bar{h}}{h^3} \right)$$

ecuación totalmente análoga a la inicial cambiando la presión ( $p$ ) por la presión reducida ( $q$ ). Ahora existen dos variables independientes ( $x$  y  $h$ ), por lo que todavía se precisa una función que las relacione, del tipo  $x=f(h)$ .

Grubin observó que a la entrada del contacto, la presión de contacto crece de forma parabólica, tal y como predice la Ley de Hertz. Si se establece una película hidrodinámica de aceite, entonces la presión hidrodinámica a la entrada también debería crecer según la distribución hertziana. Grubin compara este crecimiento con un escalón de presión lo bastante importante como para hacer la siguiente aproximación:

$$e^{-\alpha p} \ll 1 \Rightarrow q \approx \frac{1}{\alpha}$$

Es decir, a la entrada se alcanza de forma lo bastante rápida una presión tan alta como para que la presión reducida ( $q$ ) se pueda considerar constante en todo el contacto. Esto implica que:

$$q \approx \frac{1}{\alpha} = \text{cte.} \Rightarrow \frac{dq}{dx} = 0$$

Y para que la ecuación anterior se cumpla, el término de la Ecuación de Reynolds debe ser nulo:

$$6U\eta_0 \left( \frac{h - \bar{h}}{h^3} \right) = 0$$

Como no pueden ser nulas ni la velocidad, ni la presión ni el espesor de película es infinito, sólo puede suceder que:

$$h - \bar{h} = 0 \Rightarrow h = \bar{h}$$

Es decir, que el espesor de película en todo el contacto sea el mismo que el espesor de presión máxima. Esto indica que el espesor de película es aproximadamente constante (Ilustración 29).

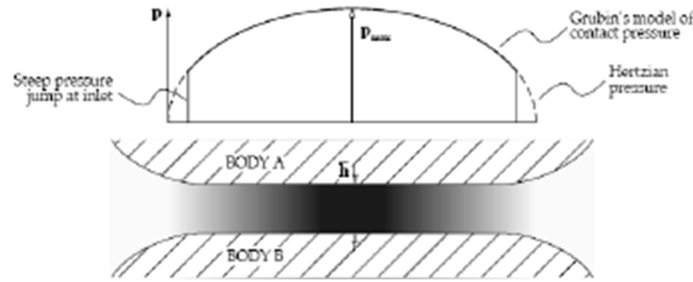


Ilustración 29: Aproximación de Grubin al espesor de película dentro del contacto elastohidrodinámico (Stachowiak y Batchelor, 2001)

Efectivamente, parece coherente que si hay un escalón de presión a la entrada, casi alcanzando ésta el valor máximo, esto sucede porque el espesor de película es prácticamente constante.

A continuación, Grubin procedió a integrar la presión reducida a lo largo del eje  $x$  entre la entrada (espesor de película  $h_1$ ) y una distancia infinita (espesor  $h_\infty$ ), planteando la integral como sigue:

$$q = \frac{1}{\alpha} = 6U\eta_0 \int_{h_\infty}^{h_1} \left( \frac{h - \bar{h}}{h^3} \right) dx$$

Expresando  $x$  en función de  $h$ , la integral se puede resolver numéricamente recordando que el espesor total de película es igual a la distancia de separación en un contacto hertziano no lubricado más el espesor de película si no existiera deformación de los sólidos. En cuanto a la constante de integración, se estima que a una distancia infinita la presión ( $p$ ) y, por tanto, la presión reducida ( $q$ ) son nulas.

Para un contacto lineal, Grubin calculó numéricamente la siguiente aproximación:

$$\int_{h_\infty}^{h_1} \left( \frac{h - \bar{h}}{h^3} \right) dx = 0.131 \left( \frac{W}{2LE^*R} \right)^{-0.625} \left( \frac{a}{R^2} \right) \left( \frac{\bar{h}}{R} \right)^{-1.375}$$

siendo  $W$  la carga aplicada,  $2L$  la longitud del contacto,  $E^*$  y  $R$  el módulo elástico y el radio reducidos y  $a$  la semianchura de contacto.

Volviendo a la integral para la presión reducida:

$$\frac{1}{\alpha 6U\eta_0} = \int_{h_\infty}^{h_1} \left( \frac{h - \bar{h}}{h^3} \right) dx$$

valor por el que podemos sustituir la integral en la solución numérica:

$$\frac{1}{\alpha 6U\eta_0} = 0.131 \left( \frac{W}{2LE^*R} \right)^{-0.625} \left( \frac{a}{R^2} \right) \left( \frac{\bar{h}}{R} \right)^{-1.375}$$

Simplificando:

$$1.275 \frac{R^2}{a\alpha U\eta_0} \left( \frac{W}{2LE^*R} \right)^{0.625} = \left( \frac{\bar{h}}{R} \right)^{-1.375}$$

Y despejando para h/R:

$$\left( \frac{\bar{h}}{R} \right) = 1.193 \left( \frac{R^2}{a\alpha U\eta_0} \right)^{-0.7273} \left( \frac{W}{2LE^*R} \right)^{-0.4545}$$

Ésta es ya una ecuación para calcular el espesor de película en el contacto. Podemos simplificarla un poco más sustituyendo la semianchura de contacto ( $a$ ) por el valor calculado para un contacto lineal:

$$a = \sqrt{\frac{4WR}{\pi LE^*}}$$

Con lo que, agrupando en términos adimensionales, se obtiene la expresión de Grubin para el espesor de película en contactos lineales:

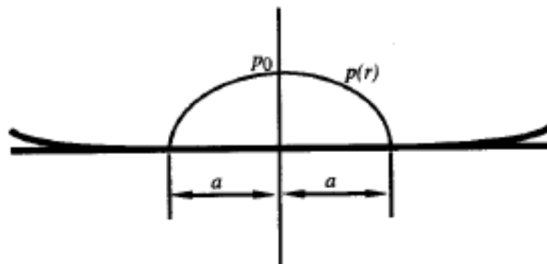
$$\left( \frac{\bar{h}}{R} \right) = 1.657 \left( \frac{U\eta_0\alpha}{R} \right)^{-0.7273} \left( \frac{W}{LE^*R} \right)^{-0.0909}$$

Esta ecuación predice de forma muy aproximada el espesor de película y el efecto que causan sobre éste las variaciones de los parámetros de influencia (carga, longitud, radio, módulo elástico, viscosidad, coeficiente presión-viscosidad y velocidad). Posteriores refinaciones del método con medios de cálculo más avanzados han corroborado la sorprendente exactitud de la ecuación de Grubin.

### **3.3.3.2.- Distribución de presión:**

En un contacto estático, la distribución de presión sigue el modelo parabólico descrito por Hertz (apartado 2.1):

$$p(r) = p_0 \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}}$$



*Ilustración 30: Distribución de presión en un contacto hertziano no lubricado.*

Sin embargo, la distribución de presión varía si existe movimiento relativo y, además, el contacto comprime una película de aceite con propiedades piezoviscosas. Como se ha visto, los mayores cambios se producen en las regiones de entrada y salida del contacto.

El efecto combinado de la rodadura y la interposición de la película de lubricante da como resultado un ligero aumento de la semianchura de contacto ( $a$ ). Por tanto, en la región de entrada la presión hidrodinámica es menor que la predicha por la Teoría de Hertz para un contacto seco. Las medidas experimentales han corroborado esta afirmación (Stachowiak y Batchelor, 2001).

Como mostraron las hipótesis establecidas por Grubin, las superficies permanecen aproximadamente paralelas y el espesor de película es aproximadamente constante a lo largo del contacto, pudiendo tomarse el valor del espesor central de película para toda esta zona ( $h_c$ ). A la salida del contacto, para mantener la continuidad de flujo y compensar la pérdida de viscosidad del lubricante, se produce una reducción pronunciada del espesor de película (Ilustración 31). Esta constricción da lugar al espesor mínimo de película ( $h_0$ ), un importante parámetro que es preciso controlar para reducir el contacto en este punto entre las microasperezas superficiales.

Por tanto, en la zona de entrada la presión aumenta de forma menos pronunciada que en un contacto hertziano seco. En la zona central, la presión elastohidrodinámica prácticamente coincide con la presión hertziana. En la región de salida, se produce un pico de presión antes de la constricción del lubricante, para luego descender de manera rápida hasta la presión ambiente. El pico de presión es a menudo mayor que la presión máxima o presión de Hertz ( $p_0$ ) (Dowson, 1995; Stachowiak y Batchelor, 2001), aunque su tamaño y amplitud depende fuertemente de las características del lubricante.

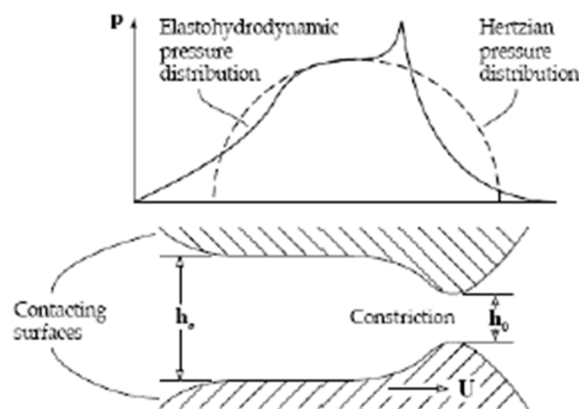


Ilustración 31: Distribución de presión y de espesor de película en un contacto elastohidrodinámico (Stachowiak y Batchelor, 2001)

El pico de presión a la salida es diferente en un contacto puntual, pues al tratarse de un área circular la constricción del aceite se asemeja a una herradura (*“horse-shoe” effect*), tal y como se muestra en la Ilustración 32. La entrada se sitúa a la derecha de la imagen y la salida, con la contracción de la película en oscuro, a la salida.

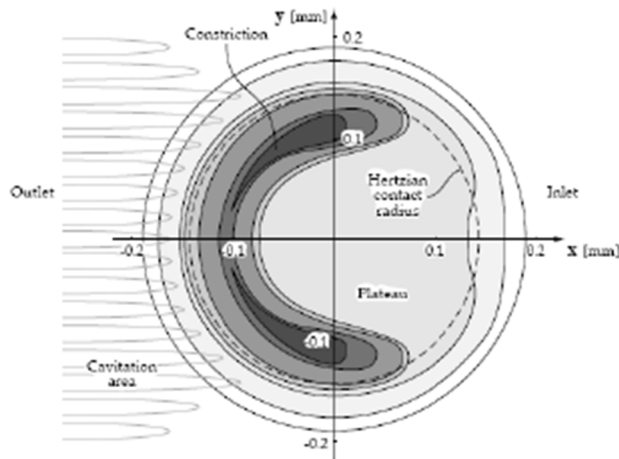


Ilustración 32: Representación esquemática de la interferometría de un contacto elastohidrodinámico (Foord, Hammann y Cameron, 1968)

Todas estas características del contacto elastohidrodinámico se han observado experimentalmente mediante métodos capacitivos, con osciloscopios o utilizando interferometría óptica (apartado 2.3.2.-).

### **3.3.4.- Zona de trabajo. Ecuaciones aplicables:**

Ya se ha descrito anteriormente, en el apartado 2.1 la importancia del parámetro específico de espesor de película,  $\lambda$ . En este apartado se describe la Carta de Jonson, el mapa de Hamrock-Dowson y los parámetros de Moes, presentando las ecuaciones de comportamiento EHD involucradas. Estos mapas son de aplicación, por tanto, en situación de  $\lambda$  dos o tres veces superior a la rugosidad combinada de las superficies en contacto.

Las correlaciones para el espesor de película, aunque han adquirido una mayor exactitud con el paso de las décadas y la mejora de los medios de cálculo, siguen teniendo las características descritas a partir de la ecuación de Grubin.

Son expresiones en función de las características de los materiales (módulo elástico reducido), del lubricante (viscosidad, coeficiente presión-viscosidad), geométricas (radio de contacto y, en caso de contacto lineal, longitud del mismo), de velocidad y carga. A su vez, el espesor de película se expresa adimensionalizado y en función de una serie de términos también adimensionales que se definen de la siguiente forma:

$$\bar{U} = \frac{\eta_0 U}{E^* R} \equiv \text{velocidad adimensionalizada}$$

$$\bar{G} = \alpha E^* \equiv \text{parámetro de los materiales}$$

$$\bar{W} = \frac{W}{E^* R^2} \equiv \text{parámetro de carga (contacto puntual)}$$

$$\bar{W} = \frac{W/L}{E^* R} \equiv \text{parámetro de carga (contacto lineal)}$$



A partir de estos parámetros, la ecuación de Grubin se suele expresar para el espesor mínimo de película (Bhushan, 2002):

$$\frac{h_0}{R} = 2.08 \bar{U}^{8/11} \bar{G}^{8/11} \bar{W}^{-1/11}$$

Como la obtención de estas correlaciones precisa de la introducción de resultados experimentales, las condiciones en las que se hayan obtenido éstos determinarán el rango de validez de la ecuación obtenida. Por ejemplo, Hamrock (1994) obtuvo expresiones diferentes para contactos con materiales de elevado módulo elástico (*hard elastohydrodynamics*) o de bajo módulo elástico (*soft elastohydrodynamics*). Las primeras son de aplicación para materiales metálicos mientras que las segundas se utilizan para contactos que emplean elastómeros u otros polímeros (Bhushan, 2002).

Por tanto, con el fin de verificar el caso en el que nos encontramos, será necesario introducir el concepto de régimen de lubricación dentro del propio régimen elastohidrodinámico. El primer mapa de regímenes dentro de la elastohidrodinámica lo elaboró Johnson (1970) y tiene aplicación a contactos lineales. Para contactos puntuales se suele utilizar el elaborado por Hamrock y Dowson (1981).

### **3.3.4.1.- Carta de Johnson:**

Se conoce por Carta de Johnson al diagrama que muestra los distintos regímenes de lubricación elastohidrodinámica para contactos lineales. Fue elaborado por K.L. Johnson en su artículo *Regimes of Elastohydrodynamic lubrication* (1970) y, cambiando ligeramente los parámetros, es directamente extrapolable a contactos puntuales.

Otros investigadores como Archard, Greenwood o Moes habían establecido parámetros adimensionales para la elasticidad de los materiales y la viscosidad del lubricante. Como resultado, obtenían resultados numéricos del espesor de película de lubricante, también adimensionalizado. La ligera discrepancia de resultados se debía a que cada autor utilizaba parámetros algo diferentes, aunque siempre bajo las condiciones más habituales de trabajo: materiales metálicos y aceites minerales, con contactos sometidos a cargas exigentes. Por ello, surgían las siguientes preguntas: ¿en qué condiciones deja de ser aplicable la hidrodinámica y se precisa de las hipótesis de la elastohidrodinámica? ¿Cómo influyen las condiciones del material o del aceite para que se produzca este cambio de régimen? Y, por supuesto, ¿qué condiciones había utilizado cada autor para obtener sus resultados de espesor de película?

Johnson dio respuesta a todos estos interrogantes utilizando los siguientes parámetros adimensionalizados:

$$g_1 = \left( \frac{\alpha^2 (W/L)^3}{\eta_0 U R^2} \right)^{1/2}$$

$$g_3 = \left( \frac{(W/L)^3}{\eta_0 U E^* R} \right)^{1/2}$$

Donde  $g_1$  se conoce como el **parámetro de viscosidad** y  $g_3$  como el **parámetro de elasticidad**. A continuación, se detallan las variables involucradas para los sólidos 1 y 2:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right] \equiv \text{módulo de elasticidad reducido}$$

$E_1, E_2 \equiv$  módulos de elasticidad de los materiales 1 y 2

$\nu_1, \nu_2 \equiv$  coeficientes de Poisson de los materiales 1 y 2

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \equiv \text{radio del contacto}$$

$R_1, R_2 \equiv$  radio de las superficies cilíndricas 1 y 2

$W/L \equiv$  carga por unidad de longitud

$$U = \frac{U_1 + U_2}{2} \equiv \text{velocidad media del contacto}$$

$U_1, U_2 \equiv$  velocidad de las superficies cilíndricas 1 y 2

Colocando en el eje de abscisas el parámetro de elasticidad ( $g_3$ ) y el parámetro de viscosidad ( $g_1$ ) en el eje de ordenadas, Johnson representó los distintos regímenes de lubricación (Ilustración 33).

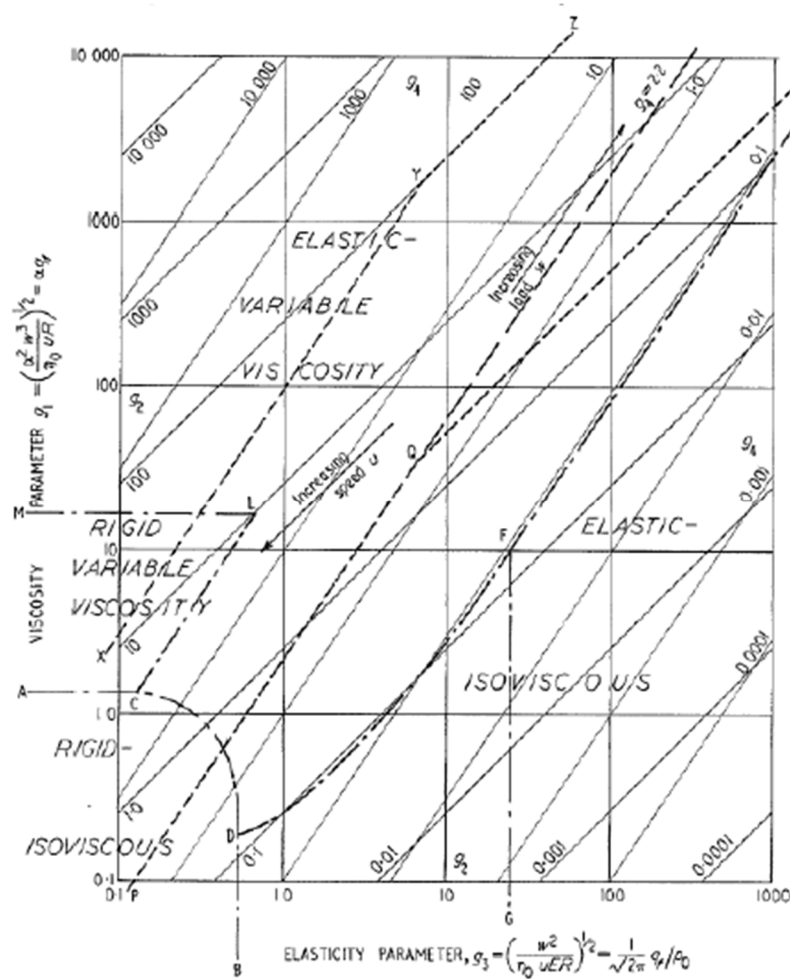


Ilustración 33: Carta de Johnson (Johnson, 1970)

Como se observa en el diagrama, hay dos parámetros independientes, representados en las curvas de  $g_2$  y  $g_4 = \text{ctes}$ . Estos parámetros adimensionales mostrarán la influencia de las condiciones de carga ( $g_2$ ) y velocidad ( $g_4$ ).

$$g_2 = \left( \frac{\alpha^2 (W/L) E}{2\pi R} \right)^{1/2}$$

$$g_4 = \left( \frac{\alpha^4 E^3 \eta_0 U}{R} \right)^{1/4}$$

Para valores reducidos de  $g_1$  y  $g_3$ , el efecto de la variación de viscosidad y elasticidad puede despreciarse. La línea ACDB marca el límite de esta zona denominada por Johnson **rígida-iso-viscosa**.

Manteniendo constante  $g_3$  pero incrementando  $g_1$ , nos desplazamos al régimen de lubricación **rígida-viscosidad variable**. Si es el parámetro de viscosidad ( $g_1$ ) el que se mantiene en valores reducidos y el de elasticidad ( $g_3$ ) el que se aumenta, nos encontramos con la lubricación **elástica-iso-viscosa**.

Por encima de la línea *MLCDFE*, tenemos condiciones **elásticas-viscosidad variable** en las que hay que tener en cuenta tanto  $g_1$  como  $g_3$ . Es decir, se producen condiciones típicas de lubricación elastohidrodinámica: materiales metálicos y aceites minerales.

Por último, la Carta de Johnson aporta información sobre las condiciones operativas: velocidad y carga. Un incremento de velocidad ( $U$ ) causa una caída hacia la región rígida-isoviscosa siguiendo las líneas de  $g_4=\text{cte}$ . Mientras, un aumento de la carga aplicada por unidad de longitud ( $W/L$ ) tiene un efecto aproximadamente opuesto, en paralelo a las líneas de  $g_2=\text{cte}$ .

Además, Johnson estableció la zona en la que había trabajado cada uno de los autores anteriores y, a la vez, situó sobre el diagrama líneas de espesor mínimo de película ( $h_0$ ) constante. Para ello empleó el siguiente parámetro adimensional:

$$\bar{h} = \frac{h_0 \frac{W}{L}}{\eta_0 UR}$$

De todas estas condiciones, es importante el llamado *régimen de Grubin*. Éste se produce cuando el incremento de viscosidad con la presión lleva a un pico de presión antes de la salida del contacto. Esta situación se corresponde con valores de  $g_1 > 100$  y  $g_2 > 2,2$ . Para esta zona, Greenwood estableció que el espesor de película sólo depende del parámetro de viscosidad:

$$\bar{h} \approx 2.1 g_1^{0.6}$$

Sólo hay una zona del diagrama en la que se carece de soluciones numéricas. Se trata de la existente entre el régimen *elástico-isoviscoso* y el *de Grubin* ( $0,1 < g_4 < 2,2$ ). En este intervalo se produce un rápido cambio de comportamiento y se puede aplicar a materiales poliméricos lubricados por un aceite mineral.

Otra representación habitual de la Carta de Johnson es la de la siguiente figura, en la que muestran las líneas de isoespesor de película de lubricante.

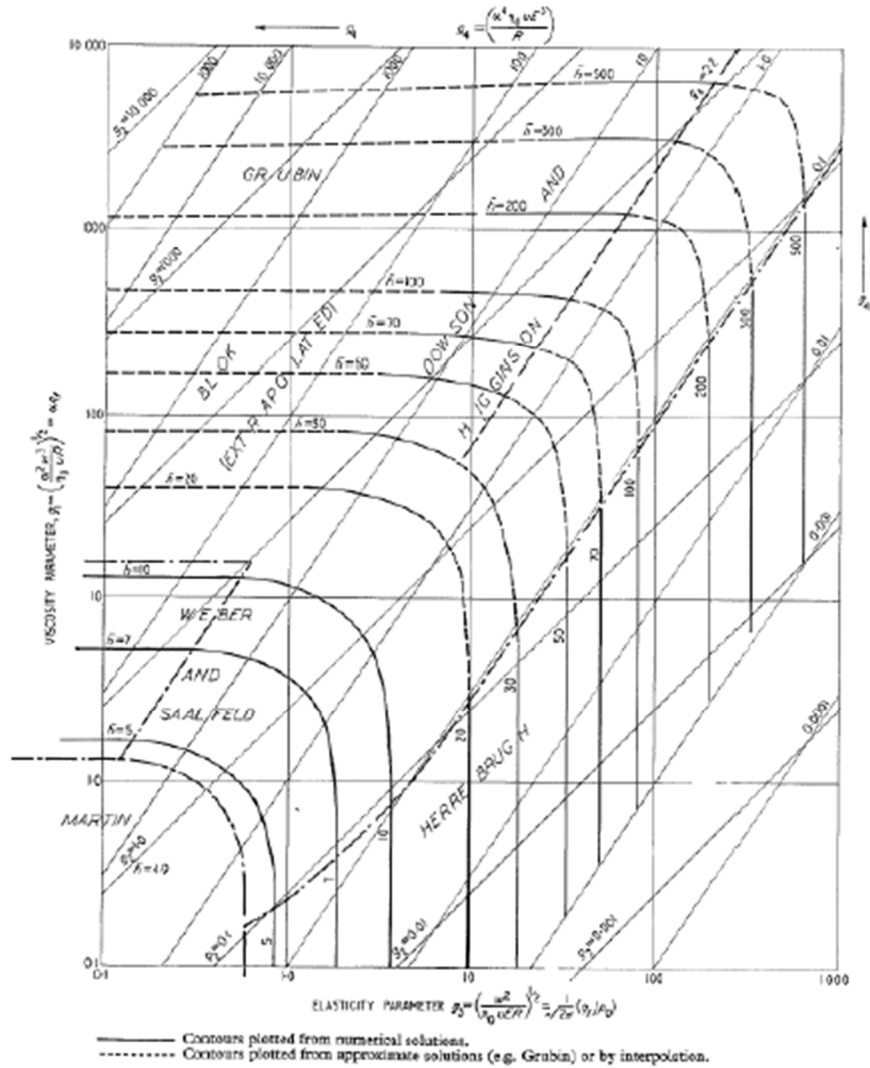


Ilustración 34: Líneas de isoespesor de película sobre la Carta de Johnson (Johnson, 1970)

### 3.3.4.2.- Mapa de Hamrock-Dowson:

La Carta de Johnson (1970) supuso un importante avance en el estudio de los distintos regímenes elastohidrodinámicos para contactos lineales. Sin embargo, la extensión de esta teoría a los contactos puntuales no llega hasta el Mapa de Hamrock y Dowson (1981).

El desarrollo es análogo al descrito en el apartado anterior. Cada uno de los regímenes de lubricación elastohidrodinámica está definido por las condiciones operativas y por las características del material. En algunos regímenes la deformación elástica o los efectos viscosos del aceite son casi despreciables, mientras que en otros casos alteran de forma importante la teoría hidrodinámica. En el Mapa de Hamrock-Dowson se pueden distinguir los siguientes regímenes:

- **Rígido-isoviscoso:** comparable al régimen hidrodinámico clásico. Ni la deformación ni los efectos presión-viscosidad en el fluido son apreciables.
- **Rígido-piezoviscoso:** los materiales apenas se deforman, aunque los efectos piezoviscosos en el aceite sí deben tenerse en cuenta en la formulación del problema elastohidrodinámico.
- **Elástico-isoviscoso:** contrariamente al caso anterior, los materiales sí presentan una deformación apreciable pero el aceite puede considerarse a viscosidad constante a pesar del incremento de presión.
- **Elástico-piezoviscoso:** éste es el caso habitual en lubricación elastohidrodinámica y el analizado en el apartado 2.3.3.-

A continuación, se definen, al igual que en el apartado anterior, una serie de parámetros adimensionales:

$$G_V = \frac{\overline{GW}^3}{\overline{U}^2}$$

$$G_E = \frac{\overline{W}^{8/3}}{\overline{U}^2}$$

donde  $G_V$  se conoce como parámetro de viscosidad y  $G_E$  como parámetro de elasticidad. Ambos son función de otros parámetros adimensionales (de velocidad, carga y material) descritos en el apartado 2.3.4.-.

También es preciso describir otros dos nuevos coeficientes: el espesor de película  $\overline{H}$  elipticidad ( $k$ ) del contacto puntual:) del contacto puntual:

$$\overline{H} = H \left( \frac{W}{U} \right)^2$$

$k = \frac{a}{b}$ , donde  $a$  y  $b$  son los semiejes mayor y menor de la elipse de contacto.

A partir de estos parámetros adimensionales, Hamrock y Dowson proporcionan una correlación para el espesor de película en cada uno de los cuatro regímenes de lubricación descritos.

Para el **régimen rígido-isoviscoso**, tanto el espesor central como el mínimo de la película de aceite se pueden calcular mediante:

$$\overline{H}_0 = \overline{H}_c = 128 \alpha_a \lambda_b \left[ 0.121 \tan^{-1} \left( \frac{\alpha_a}{2} \right) + 1.683 \right]^2$$

$$\text{donde } \alpha_a \approx 0.955k \text{ y } \lambda_b = \left( 1 + \frac{0.698}{k} \right)^{-1}$$

Se puede observar como el espesor de película sólo es función de la geometría del contacto.

En cambio, en el **régimen rígido-piezoviscoso** sí que tiene influencia la variación de viscosidad del lubricante a altas presiones, a través del parámetro de viscosidad ( $G_v$ ). La expresión para el espesor de película, mínimo y central, es la siguiente:

$$\bar{H}_0 = \bar{H}_c = 1.66G_v^{2/3}(1 - e^{-0.68k})$$

En condiciones de **régimen elástico-isoviscoso**, el espesor de película será únicamente función de la geometría y el parámetro de elasticidad ( $G_E$ ). En este caso, las expresiones para el espesor mínimo y central de película son, respectivamente:

$$\bar{H}_0 = 8.70G_v^{0.67}(1 - 0.85e^{-0.32k})$$

$$\bar{H}_c = 11.15G_E^{0.67}(1 - 0.72e^{-0.28k})$$

Por último, en el ya conocido **régimen elástico-piezoviscoso**, el espesor de película está controlado por los parámetros de elasticidad y viscosidad:

$$\bar{H}_0 = 3.42G_v^{0.49}G_E^{0.17}(1 - e^{-0.68k})$$

$$\bar{H}_c = 3.61G_v^{0.53}G_E^{0.13}(1 - 0.61e^{-0.73k})$$

Una vez se han definido los distintos regímenes y sus correlaciones para el espesor de película, es el momento de tratar la identificación de cada régimen a partir de los parámetros de elasticidad y viscosidad. Hamrock y Dowson (1981) desarrollaron el gráfico representado en la Ilustración 35. Mapa de Hamrock y Dowson (1981) para  $k=1$  (Stachowiak y Batchelor, 2001). Éste es el ejemplo para un parámetro de elipticidad  $k=1$ , es decir, un contacto circular.

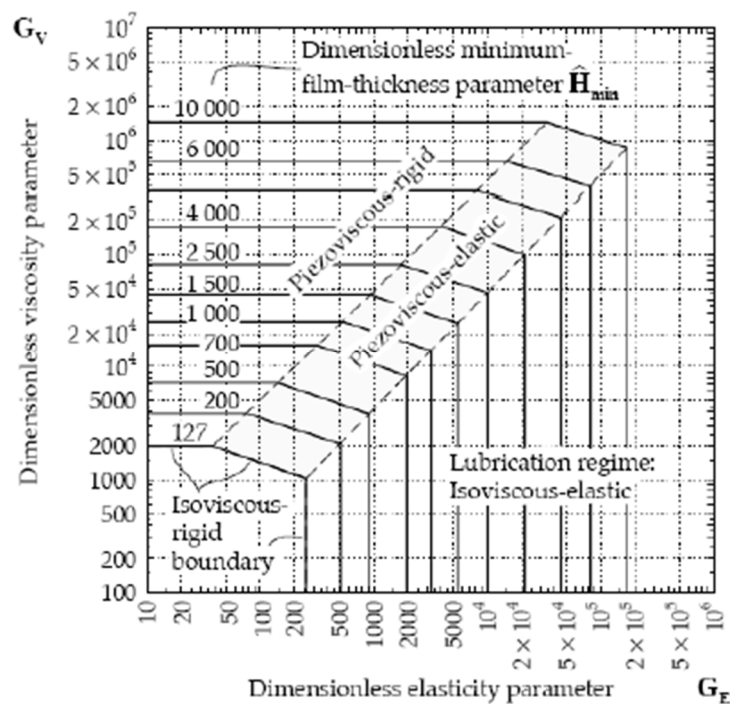


Ilustración 35: Mapa de Hamrock y Dowson (1981) para  $k=1$  (Stachowiak y Batchelor, 2001)

Introduciendo las condiciones de funcionamiento concreto mediante los parámetros de elasticidad y de viscosidad en la carta de Hamrock-Dowson. Este mapa nos permite situar los puntos de funcionamiento del equipo (régimen de lubricación) y las ecuaciones a considerar.

### **3.3.4.3.- Parámetros adimensionales de Moes:**

Como hemos visto los parámetros adimensionales permiten caracterizar y clasificar cada uno de los regímenes de lubricación del contacto EHD. Todos estos parámetros adimensionales son muy parecidos entre sí; los planteados por Moes y Bosma para analizar los contactos puntuales son los que se muestran a continuación:

$$\text{Parámetro de la carga } M = \frac{W}{E^* R^2} \left( \frac{\eta_0 U_s}{E^* R} \right)^{-3/4}$$

$$\text{Parámetro del material } L = \alpha E^* \left( \frac{\eta_0 U_s}{E^* R} \right)^{1/4}$$

$$\text{Espesor de película } H^M = \frac{h}{R_x} \left( \frac{\eta_0 U_s}{E^* R} \right)^{-1/2}$$

donde

$$U_s = U_1 + U_2$$

$$U_1 = \left( 2 + \frac{SRR}{100} \right) \frac{U_m}{2}$$

$$U_2 = 2U_m - U_1$$

$U_1$  y  $U_2$  Velocidades de los elementos en contacto

$W$  la carga aplicada

$R$  : radio reducido del contacto

$E^* = 2 \cdot E^*$  : módulo de Young reducido

$\alpha$  : coef. viscosidad - presión

$\eta_0$  : viscosidad a presión ambiente

Al igual que sucedía con los parámetros adimensionales de Hamrock y Dowson, los parámetros de Moes permiten conocer el espesor de película y el régimen de lubricación según las condiciones de funcionamiento del contacto, definidas por  $M$  y  $L$ .



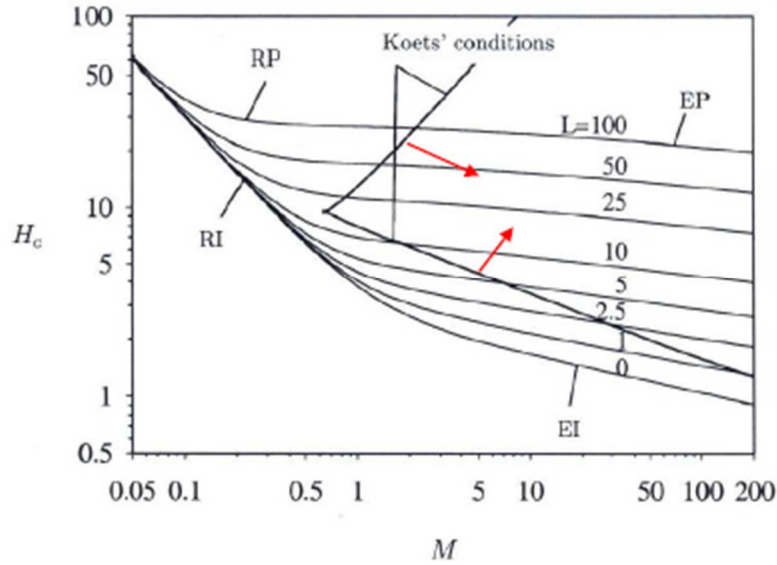


Ilustración 36: Espesor de película para contactos puntuales EHD (Moes, 1997)

Una fórmula para predecir el espesor central de película para contactos circulares, representada en la figura anterior, puede ser obtenida mediante las siguientes aproximaciones asintóticas:

$$\text{Rígido-Isoviscoso (RI): } H_{ri}^M = 41.4M^{-2}$$

$$\text{Rígido piezoviscoso (RP): } H_{rp}^M = 0.91L^{2/3}$$

$$\text{Elástico-Isoviscoso (EI): } H_{ei}^M = 2.42M^{-2/15}$$

$$\text{Elástico Piezoviscoso (EP): } H_{ep}^M = 1.25M^{-1/12}L^{3/4}$$

Introduciendo un parámetro  $s$  que permite suavizar la transición entre los diferentes regímenes se puede expresar el espesor central de película como una expresión única:

$$H_c^M = \left\{ \left[ (H_{ri}^M)^{3/2} + \left[ (H_{ei}^M)^{-4} + 0.1 \right]^{3/8} \right]^{2s/3} + \left[ (H_{rp}^M)^{-s} + (H_{ep}^M) \right]^{s/8} \right\}^{1/s}$$

Donde

$$s = \frac{3}{2} \left[ 1 + \exp \left( -\frac{6 H_{ei}^M}{5 H_{ri}^M} \right) \right]$$

Como se puede observar en la Ilustración 36 existe una línea que delimita la zona de comportamiento elasto-piezovisco (zona indicada por las flechas rojas de la figura) del contacto

que fue determinada por Koets' (1962) y que queda definida por que simultáneamente se cumplan las dos condiciones siguientes:

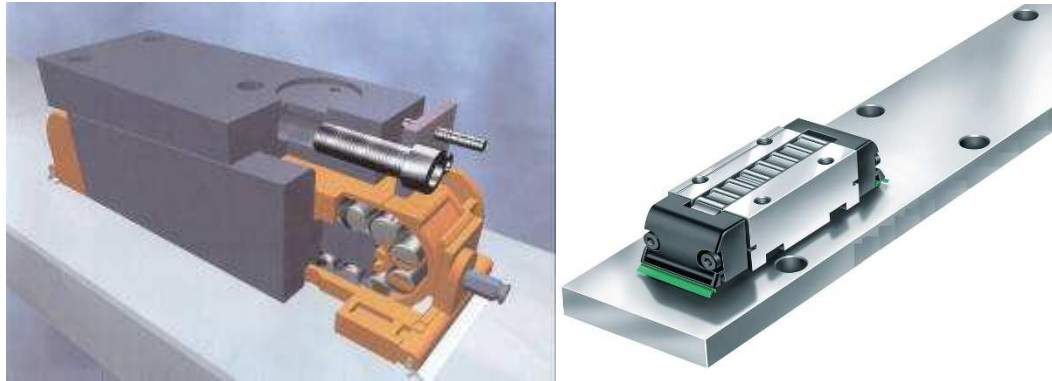
$$L\sqrt{M} > 13.3$$

$$M > 0,1 \cdot L^{2/3}$$

## 4.- PATÍN DE RODADURA EISENOR:

### 4.1.- Introducción:

Los patines de rodadura son unos elementos con una cadena de recirculación de rodillos cilíndricos (rodamientos) adecuadamente lubricados con aceite y separados por unos plásticos (separadores), dentro de un cuerpo compacto, con los cuales se permite el movimiento longitudinal de elementos de máquina herramienta.



**Ilustración 37: Patín con recirculación de rodillos con cuña y recto**

Son elementos de alta precisión, diseñados para facilitar el movimiento de elementos de Máquina Herramienta que requieran la mayor suavidad, rigidez, capacidad de carga con una adecuada absorción de vibraciones y un bajo costo de mantenimiento. Eisenor desarrolló un “patín de rodadura” en el año 1999, con posteriores modificaciones en el modelo inicial para estandarizarlo lo máximo posible con otros modelos en el mercado (y permitir, de este modo que sea intercambiable). Se trata de una pieza con un “tren” de rodillos que le permiten moverse por las guías endurecidas de Eisenor.

### 4.2.- Patín de Rodadura:

#### 4.2.1.- Introducción:

Los patines con recirculación de rodillos están formados por una guía de acero templado (con mecanizado de alta precisión y en forma de H, que garantiza la máxima rigidez) y por un tren de rodillos que constituyen los cuerpos rodantes.

Tienen que **soportar enormes cargas (en el orden de 110 KN)**, con una **gran precisión (por debajo de 0.01mm)** y para unas velocidades lo más elevadas posibles.

Existen dos tipos de patines como se muestra en la ilustración 1. El cuerpo del patín es igual, lo único que cambia es que el primero dispone de una cuña de regulación de la altura mediante un tornillo con un desplazamiento de  $\pm 0.25$  mm, que desplaza la cuña en un sentido o en otro elevando o descendiendo la altura de este.

Su capacidad de carga es de 108 KN y su velocidad máxima alrededor de 100 m/min. Además, los patines se pueden equipar con rascadores elásticos, compuestos por un labio doble, que funciona como protección contra eventuales impurezas externas y sirve también para la retención del lubricante.

Los caminos de rodadura (guías), para lograr un rendimiento lo más elevado posible, deberán tener una dureza comprendida entre 58 HRC y 64 HRC. En lo que respecta a la precisión es necesario puntualizar que la misma está supeditada a la alineación de las guías. Si están perfectamente alineadas y tienen la misma longitud se pueden alcanzar óptimos resultados en cuanto a la precisión de deslizamiento y a la silenciosidad.

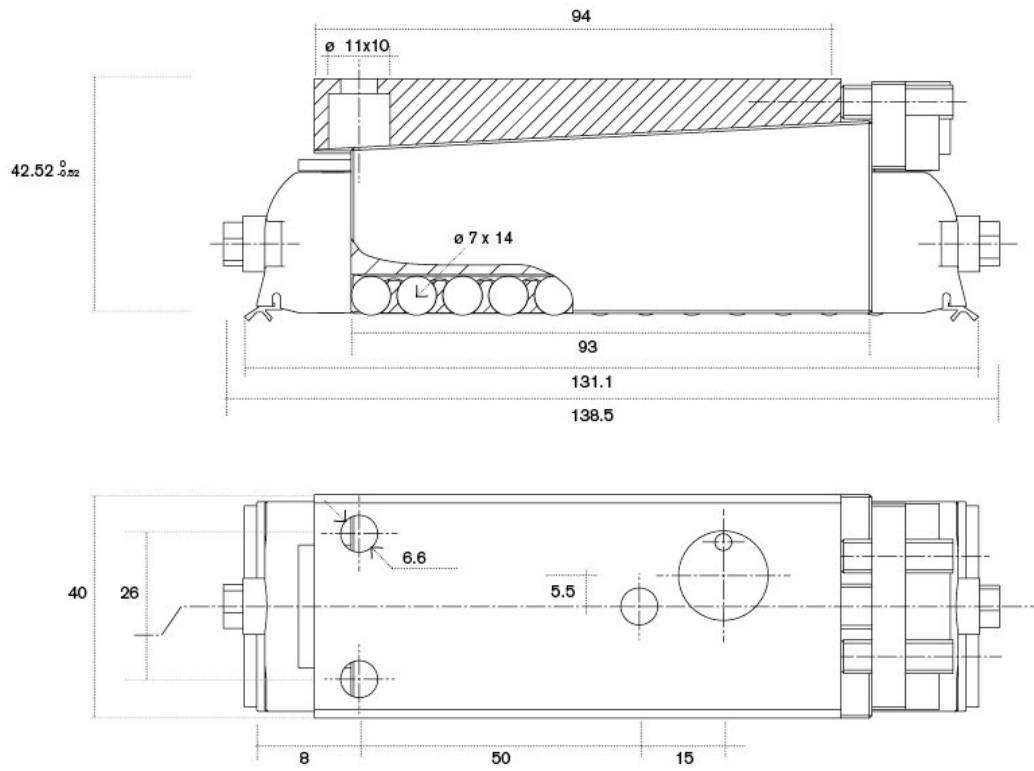
Las guías son la superficie por la que se desplazan los patines de rodadura, de ahí que sea muy importante su planitud y precisión. Las guías postizas de EISENOR, en comparación con las guías prismáticas comerciales, aportan a la Máquina Herramienta mayor rigidez y absorción de vibraciones. Además, aportan importantes ventajas que le permiten un funcionamiento con mayor garantía de éxito, como las señaladas a continuación:

- Mayor capacidad de mecanizado, en especial en materiales duros.
- Mayor rigidez.
- Mayor absorción de vibraciones.
- Aumento de la vida las herramientas empleadas.
- Mayor duración de guías, contribuyendo a una mayor robustez en la máquina y unos menores costes de mantenimiento.
- Capacidad de carga más elevada, permitiendo realizar trabajos con mayor precisión y fiabilidad.

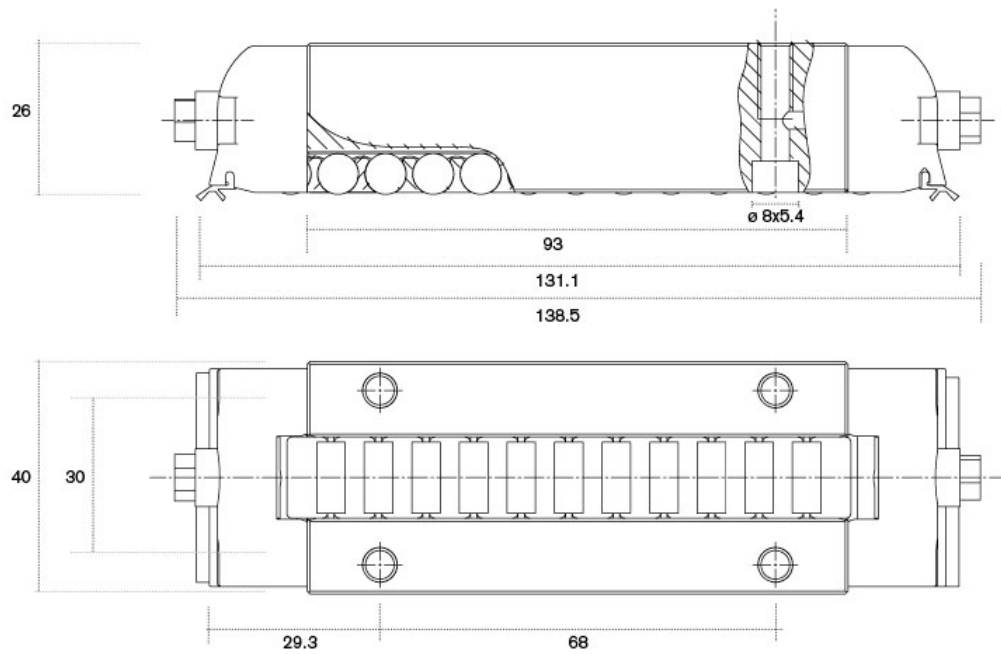
En la mayor parte de los casos, las guías de Eisenor están realizadas con material 1.0503, tratadas mediante temple por inducción, con una dureza de 58-62 HRC. Para reducir las deformaciones y dotar a las piezas de una mayor estabilidad, el tratamiento suele aplicarse en caras opuestas al mismo tiempo.

A continuación, se muestra con más claridad la representación de los dos tipos de patines de rodadura con sus respectivas mediadas y características principales. Por un lado está el “patín de rodadura” con cuña, con referencia Ref.210.005 y por otro lado el patín recto con referencia Ref.210.006.

-Patín con Cuña (Ref.210.005):



- Patín Recto (Ref.210.006):



### **4.2.2.- Lubricación:**

Estos patines necesitan una **lubricación continua** debido al rozamiento entre sus partes en movimiento (rodillos entre sí, rodillos con sus separadores y rodillos con las superficies de apoyo).

Esta lubricación se viene realizando habitualmente con un **sistema centralizado de engrase dotado de una bomba, un sistema de tubos a lo largo de toda la máquina, colocando en cada ramal un pistón de distribución para dosificar la cantidad de aceite que se requiera, la conexión a los patines y el sistema de recogida de aceite sobrante**. La conexión a los patines se realiza mediante tubos que entran por los extremos del patín.

Estos tubos son flexibles debido a que la máquina se va a mover a lo largo de las guías y desde un extremo al otro de la bancada variará la longitud de estos.

El tipo de aceite es muy variable, **sirviendo viscosidades desde 10 a 60 cP**. Como se supone que este aceite es el mismo que va a lubricar el conjunto de la máquina, se elige el que mejor convenga a las necesidades globales de la misma.

La cantidad de aceite debe ser suficiente para mantener ligeramente húmeda la superficie de las guías sin que llegue a salir por los cierres de los extremos. Esta cantidad depende de la frecuencia de los movimientos, longitud de las guías, etc. Puede regularse fácilmente actuando sobre el dosificador que se ha mencionado anteriormente.

### **4.2.3.- Ficha Técnica:**

– CAPACIDAD DE CARGA

Estática  $Co=108.000$  N

– VELOCIDAD MÁXIMA

100 m/min.

– RIGIDEZ

Min=1,3 kN/um, para  $Co=30$  kN.

Max=1,6 kN/um, para  $Co=100$  kN.

– REGULACIÓN DE ALTURA

0,052 mm/ vuelta

0,52 mm regulación total

– COEFICIENTE DE ROZAMIENTO

F=0,004

– TEMPERATURA DE TRABAJO

Desde -40°C a 90°C y hasta 110°C por breve tiempo.

– PESO

Ref. 210.005: 1,3 Kgs.

Ref. 210.006: 0,8 Kgs.

– LUBRICACIÓN

Engrasadores DIN 3405 AM 6x1 o desde la superficie de asiento. Puede emplearse tanto aceite (DIN 51502) como grasa (tipo KP2K per DIN51825)

– CUERPO

Acero DIN 1.3505 templado a 60-62 HRc.

Cuerpo templado al núcleo y rectificado de alta precisión.

– RODILLOS PORTANTES

Acero DIN 1.3505.

Fabricados por SKF según DIN 5403 (ISO 1101)

– LIMPIADORES DE DOBLE LABIO

Poliuretano

#### **4.2.4.- Precarga:**

Existen bloques hidráulicos con sensor de fuerza que permiten medir con un comparador la apertura conveniente en el hueco en que se aloja el PATÍN. No obstante, es poco frecuente su empleo y los fabricantes prefieren basarse en su experiencia.

Nuestro principal cliente realiza el montaje aplicando una precarga determinada mediante el control del par de apriete del tornillo M8x100 de regulación de la cuña. Este par es de 65 a 75 Kgm.

No obstante, cada usuario puede estimar, por propia experiencia si la precarga así obtenida le conduce a una rodadura algo forzada o suficientemente suave. Depende, como siempre, de las condiciones de trabajo particulares de cada máquina.

## **4.3.- Patín de Rodadura sin engrase:**

### **4.3.1.- Introducción:**

La incorporación a la actual versión del patín ha obligado a un rediseño del dispositivo anterior; aprovechando para cambiar algunos aspectos mejorables que se han observado durante las pruebas. La referencia de este patín es Ref. 210.009.

Las modificaciones más significativas van encaminadas a realizar un habitáculo para ubicar el dispositivo impregnado en aceite que aplique a los elementos rodantes la mínima cantidad necesaria para que el sistema funcione. El cuerpo del Patín es igual que el del Patín con cuña con lubricación exterior mediante sistema de tubos a lo largo de toda la máquina. Además, los patines se equipan con rascadores elásticos, compuestos por un labio doble, que funciona como protección contra eventuales impurezas externas y sirve también para la retención del lubricante.

Al ser los patines elementos móviles con un tamaño relativamente pequeño y, en principio, no ser posible el aumento significativo de éste, es muy importante que el dispositivo a incorporar pueda recoger la máxima cantidad de aceite posible. Esto se consigue con un diseño optimizado y la incorporación de materiales porosos capaces de almacenar un gran volumen de aceite.

### **4.3.2.- Modificaciones:**

Los patines sin engrase 2.0 (Ref. Eisenor 210.009), están compuestos por cuerpo, rodillos, pletina de apriete, tapa superior y separadores iguales a los de la Ref. Eisenor 210.005 (Patín con engrase exterior), los extremos de recirculación de Zamac, se sustituyen por las 2 piezas de prototipaje rápido fabricadas en "quipplan". En vez de estas tapas, se sustituyen por una especie de "mochilas" con un hueco con forma cúbica de unos 20 mm de lado para ubicar las pastillas de material poroso impregnado en aceite.



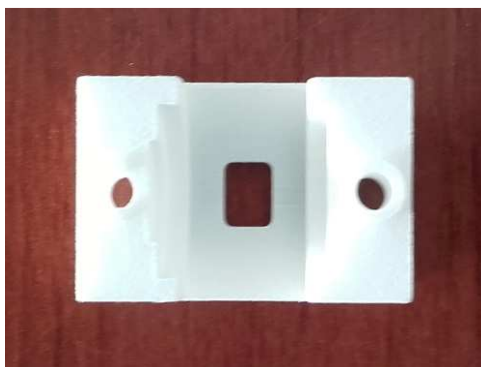
**Ilustración 38: Patín de rodadura sin una de las tapas laterales**



Las piezas de prototipaje rápido o “mochilas” para ubicar la pastilla de material poroso, consta de dos piezas.

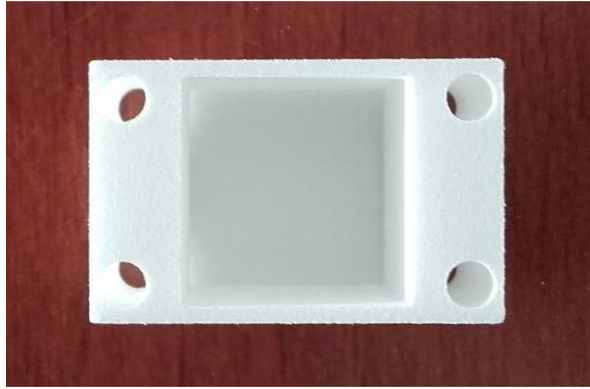
La primera de ellas llamada **tapa lateral** se atornilla en el extremo del patín, una en cada extremo, por medio de dos tornillos de M4x20 mm de cabeza reducida. Es la encargada de cerrar el patín y tapar el tren de rodillos cilíndricos que asoman en los extremos del patín, guiarlos y hacerlo compacto. Tiene en la zona por donde pasa el tren de rodillos cilíndricos un orificio rectangular del tamaño de la muesca de la pastilla de material poroso. Este orificio hace que la pastilla de material poroso contacte con el tren de rodillos cilíndricos del patín lubricando los mismos. Además, tiene 4 agujeros roscados en las esquinas para poder atornillar la segunda de estas piezas de la mochila, llamada **cartucho portapastillas**, y que esta quede fijada al patín de rodadura.

Además, en la parte interior de la pieza tiene un rebaje en forma de semicilindro por donde pasa el tren de rodillos cilíndricos y los guía en su movimiento.



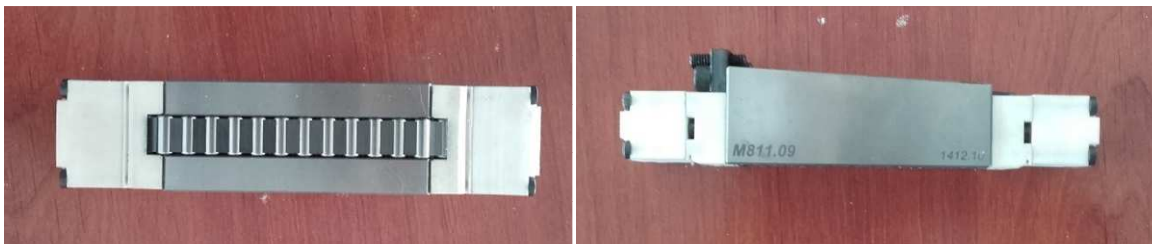
**Ilustración 19: Tapa lateral de la mochila del patín sin engrase (parte interior)**

Por otro lado, la segunda de estas piezas, llamada **cartucho portapastillas**, es un prisma rectangular recto con un hueco cúbico en medio de este con las dimensiones de la pastilla de material poroso. Esta pieza es la encargada de ubicar la pieza de material poroso y presionarla contra el orificio de la primera pieza para que la muesca que tiene la pastilla de material poroso entre por el orificio y lubrique el sistema de rodillos cilíndricos de manera óptima. Como se puede apreciar en la Ilustración 40, esta pieza tiene 4 agujeros pasantes para ubicar 4 tornillos de M4x25 y así atornillarla a la **tapa lateral** de la mochila y que quede sujeta a esta y al patín de rodadura sin engrase.



**Ilustración 20: Cartucho portapastillas de la mochila del Patín sin engrase**

Así pues, como se había mencionado, las modificaciones realizadas sobre el patín con lubricación exterior van encaminadas a ubicar la pastilla del material impregnado en aceite. A continuación, se muestra una imagen del "patín de rodadura" sin engrase con las mochilas ubicadas en sus extremos, por donde se lubrica el tren de rodillos cilíndricos. Si observamos la ilustración 2 y la ilustración 4, se aprecia que el patín de rodadura es el mismo y solo cambia las mochilas para ubicar la pieza de material poroso.



**Ilustración 41: Patín sin engrase**

### **4.3.3.- Montaje:**

El montaje del "patín de rodadura" es sencillo, pero debe ir con extrema precisión. Hay que seguir los siguientes pasos:

1. **Se coge el cuerpo del patín.**
2. **Se inserta en la parte superior del patín**, en el canal que tiene para ubicar los rodillos dejando hueco para los mismos, **la pletina de cierre superior**. Va encajada con unas pequeñas muescas.
3. **Colocación de la pletina de apriete**. Esta va introducida en una muesca de la pletina de cierre superior, perpendicular a ella y atornillada, mediante 2 tornillos M6x16 mm, a la parte superior del cuerpo del patín en uno de sus extremos (el que tiene más altura). Además, esta pieza tiene 2 pasadores roscados, espárragos de 6x20 mm, para regular la

altura de la cuña del patín y un tornillo, M8 / 100x25 mm, que se inserta en la cuña del patín para fijarlo a este.

4. **Colocación del tren de rodillos y medialunas de recirculación.** Se van montando los rodillos separados entre sí por unos plásticos llamados separadores. En los extremos del patín, se montan por debajo del tren de rodillos unas piezas con forma de semicilindro, una en cada extremo del patín, llamadas Medialunas de recirculación para guiar al tren de rodillos cilíndricos, ya que los extremos del cuerpo del patín son planos.
5. **Colocación de la tapa lateral y cartucho portapastillas (mochilas).** Una vez montado todo lo anterior se montan las mochilas que constan de dos piezas. La primera de ellas, tapa lateral, es la que se atornilla mediante 2 tornillos (M4x20 mm) a los extremos cuerpo del patín, una en cada extremo. Esta pieza cierra el patín y mediante un rebaje que tiene en forma de semicilindro en su parte interior guía el tren de rodillos e impide que se muevan de su ubicación. La segunda de estas piezas de la mochila, cartucho portapastillas, es la encargada de ubicar la pastilla de material absorbente y va atornillada a la pieza 1 de la mochila mediante cuatro tornillos M4x25 mm. Así, el cuerpo del patín queda cerrado.
6. **Colocación de la cuña de regulación de altura.** Se introduce por el canal que tiene el cuerpo del patín en su parte superior y se atornilla a la pletina de apriete mediante un tornillo M8 / 100x25 mm.
7. **Colocación de barredores.** Se trata de unas gomas que van insertadas a presión en la parte inferior del **cartucho portapastillas**. Son rascadores elásticos, compuestos por un labio doble, que funciona como protección contra eventuales impurezas externas y sirve también para la retención del lubricante.

El montaje para el patín con engrase exterior es similar a este, lo único que cambia es que en vez de poner Tapa lateral y el cartucho portapastillas, se coloca una tapa lateral de otro material y con una boquilla para introducir el aceite por medio de los tubos.

La tapa lateral y el cartucho portapastillas del patín sin engrase está fabricado en material de prototipado rápido, mientras la tapa lateral del patín de lubricación exterior es de Zamak como las medialunas de recirculación. El cuerpo del patín y la cuña están fabricados en acero rectificadas, ya que necesita gran precisión. La cara superior de la cuña, la parte superior del “patín de rodadura”, debe tener una precisión en la centésima.

#### **4.3.4.- Componentes para el montaje de patines:**

A continuación, se muestra un listado de los componentes necesarios para montar un “patín de rodadura”. Además, se indica la cantidad de cada una de las piezas que componen el patín y la referencia de cada componente

LISTADO COMPONENTES PARA EL MONTAJE DE PATINES				
Producto	Número	Unidades / patín	Para patines	Comentarios
CUERPO CUÑA	210,101	1	210.005, 210.009	
TAPA SUPERIOR	210,102	1	210.005, 210.009	
MEDIALUNAS RECIRCULACIÓN	210,103	2	210.005, 210.009	
TAPA LATERAL	210,104	2	210,005	
ENGRASADORES	210,105	2	210,005	
PLETINA DE CIERRE SUPERIOR (LONG. NORMAL)	210,106	1	210.005, 210.009	Dependiendo de la longitud del cuerpo se montará una referencia u otra
PLETINA DE CIERRE SUPERIOR (LONG. MAYOR)	210,107	1	210.005, 210.009	
PLETINA DE APRIETE	210,108	1	210.005, 210.009	
TAPA LATERAL (PROT. RÁPIDO)	210,109	2	210,009	
CARTUCHO PORTAPASTILLAS (PROT. RÁPIDO)	210,110	2	210,009	
PASTILLAS MATERIAL ABSORBENTE	210,111	2	210,009	
ACEITE MOBIL VACTRA N° 2	210,112	0,01	210,009	La cantidad se indica en litros. Aproximadamente 5 ml por patín
TORNILLO M6x16 mm	210,121	2	210.005, 210.009	
ESPARRAGO 6x20 mm	210,122	2	210.005, 210.009	
TORNILLO M4x20 mm CABEZA REDUCIDA	210,123	4	210.005, 210.009	
TORNILLO M8 / 100x25 mm	210,124	1	210.005, 210.009	
TORNILLO M4x25 mm CABEZA REDUCIDA	210,125	8	210,009	
RODILLOS	210,141	30	210.005, 210.009	
SEPARADORES DE RODILLOS NORMAL	210,142	30	210.005, 210.009	30 unidades es la suma por patín de los tres tipos de separadores. Dependiendo de la longitud del cuerpo se montará un número determinado de separadores de cada referencia
SEPARADORES DE RODILLOS MAYOR	210,143	30	210.005, 210.009	
SEPARADORES DE RODILLOS MENOR	210,144	30	210.005, 210.009	
BARREDORES	210,145	2	210.005, 210.009	

Tabla 2: Componentes Patín de rodadura Eisenor

Los diferentes componentes del “patín de rodadura” mencionados en el montaje tienen el siguiente aspecto:

- Cuerpo del patín:

Es el cuerpo del patín. Todos los demás elementos se insertan en este, es la parte principal del patín. Tiene un canal alrededor de todo su contorno por donde circula el tren de rodillos cilíndricos.



**Ilustración 42: Cuerpo del patín**

- Cuña:

Es el elemento que se inserta en la parte superior del cuerpo del patín. Es el encargado de regular la altura del patín una vez colocado. El saliente que se aprecia en la ilustración en la parte inferior de la cuña va insertado en el canal del cuerpo del patín, encima de la pletina de cierre superior. Se atornilla por un extremo a la pletina de apriete para sujetarlo al patín.



**Ilustración 43: Cuña del patín**

- Pletina de cierre superior:

Esta pletina va insertada en la parte superior del cuerpo del patín, tapando el tren de rodillos cilíndricos. En la muesca que se ve en la ilustración a la derecha va insertada la pletina de apriete, perpendicular a esta.



**Ilustración 44: Pletina de cierre superior del patín**

- Pletina de apriete:

Esta pieza es la encargada de regular el paso de la cuña para regular su altura y fijarla una vez que la altura es la deseada. Los espárragos roscados que se ven en la ilustración son los encargados de regular el paso de la cuña. Los 2 agujeros de la parte inferior de la pieza son para fijarla al cuerpo del patín mediante tornillos M6x16 mm. La muesca que tiene en su parte inferior es donde se inserta en la pletina de cierre superior y mediante los tornillos mencionados anteriormente quedan ambas piezas fijadas al cuerpo del patín. El agujero central es para fijar la cuña en la posición deseada, mediante un tornillo M8/100x25 mm, una vez regulada con los espárragos.



**Ilustración 45: Pletina de apriete del patín**

- Medialuna de recirculación:

Esta pieza es la encargada de facilitar el guiado del tren de rodillos cilíndricos en sus extremos. Se coloca en ambos extremos del cuerpo del patín, por debajo del tren de rodillos cilíndricos.



**Ilustración 46: Medialuna del patín**

- Rodillos:

Conjunto de piezas encargadas de proporcionar movimiento al patín. Se trata de un cuerpo cilíndrico de diámetro 7 mm y longitud 14 mm. Se introducen en el canal del cuerpo del “patín de rodadura” recirculando junto con los separadores.

- Separadores:

Elementos encargados de separar los rodillos unos de otros y proporcionar sujeción entre ellos. Tienen en los lados forma cilíndrica para que los rodillos inserten de manera óptima y se sujeten unos a otros.



**Ilustración 47: Rodillos con separador entre medio**

- Barredores o rascadores elásticos:

Rascadores elásticos, compuestos por un labio doble, que funciona como protección contra eventuales impurezas externas y sirve también para la retención del lubricante. Esta pieza va introducida a presión en la parte inferior del cartucho portapastillas.



**Ilustración 48: Rascadores elásticos del patín**

#### **4.3.5.- Ventajas e inconvenientes:**

El nuevo diseño del Patín sin engrase tiene multitud de ventajas pero también inconvenientes, a continuación se nombran algunas de ellas:

- Ventajas:
  - Menor cantidad de lubricante empleado.
  - Mayor comodidad en la lubricación al prescindir del sistema de tubos a lo largo de toda la máquina.
  - Se prescinde de una bomba para hacer circular el lubricante a lo largo de toda la máquina.
  - Ahorro de dinero al utilizar menor cantidad de lubricante.
  - Mochilas y pastilla de material poroso reemplazables.
  - Facilidad en la sustitución de las mochilas o las piezas de material poroso.
  - Optimización del lubricante, ya que lubrica la cantidad mínima requerida.
  
- Inconvenientes:
  - Material poroso caro.
  - Mayor tamaño del patín.
  - Dificultad para saber cuándo se ha gastado el lubricante de la pastilla polimérica, hay que desmontarlo.



## **5.- MATERIALES POLIMÉRICOS:**

Los polímeros se definen como macromoléculas compuestas por una o varias unidades químicas (monómeros) que se repiten a lo largo de toda una cadena.

Un polímero es como si uniésemos con un hilo muchas monedas perforadas por el centro, al final obtenemos una cadena de monedas, en donde las monedas serían los monómeros y la cadena con las monedas sería el polímero.

La parte básica de un polímero son los monómeros, los monómeros son las unidades químicas que se repiten a lo largo de toda la cadena de un polímero, por ejemplo el monómero del Polietileno es el Etileno, el cual se repite "x" veces a lo largo de toda la cadena.

Polietileno = Etileno-Etileno-Etileno-Etileno-.....

### **5.1.- Clasificación de los Polímeros:**

Los polímeros pueden clasificarse de diferentes maneras, y a su vez, esas clasificaciones, pueden subdividirse en otras. Partiremos de lo más básico a lo más complejo:

#### **5.1.1.- Según su origen:**

Se distinguen en Naturales y Sintéticos:

- **Naturales:** son todos aquellos que provienen de los seres vivos, y por lo tanto, dentro de la naturaleza podemos encontrar una gran diversidad de ellos. Las proteínas, los polisacáridos, los ácidos nucleicos son todos polímeros naturales que cumplen funciones vitales en los organismos y por tanto se les llama biopolímeros. Otros ejemplos son la seda, el caucho, el algodón, la madera (celulosa), la quitina, etc...
- **Sintéticos:** son los que se obtienen por síntesis ya sea en una industria o en un laboratorio, y están conformados a base de monómeros naturales, mientras que los polímeros **semisintéticos** son resultado de la modificación de un monómero natural. El vidrio, la porcelana, el nailon, el rayón, los adhesivos son ejemplos de polímeros sintéticos, mientras que la nitrocelulosa o el caucho vulcanizado, lo son de polímeros semisintéticos.

#### **5.1.2.- Según el tipo de monómeros:**

Se distinguen en Homopolímeros y Copolímeros:

- **Homopolímeros:** son macromoléculas que están formadas por monómeros idénticos, la celulosa y el caucho son homopolímeros naturales, mientras que el PVC y el polietileno son sintéticos.
- **Copolímeros:** están constituidos por 2 o más monómeros diferentes, como por ejemplo, la seda como copolímero natural, y la baquelita como sintético.

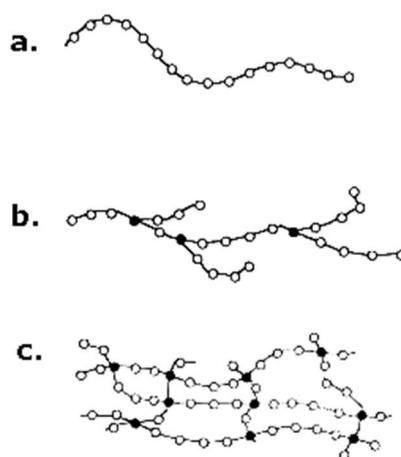
Ahora bien, en los copolímeros encontramos una subclasificación, que depende de la forma en que estén ordenados los monómeros:

- **Al azar:** Es cuando los monómeros no presentan orden alguno, por tanto presentan un patrón azaroso.
- **Alternado:** Se observa un patrón de monómeros alternados.
- **En bloque:** Son los que presentan un patrón alternado, pero bloques o “paquetes”.
- **Injertado:** Es cuando se ve una cadena principal formada por un solo monómero, y contiene ramificaciones formadas por el otro monómero unidas a la cadena principal.

### **5.1.3.- Según su forma:**

Los monómeros al unirse pueden dar diferentes formas de polímeros, lo que influye en sus propiedades, por ejemplo, el material blando y moldeable tiene una forma lineal con cadenas unidas por interacciones (fuerzas) débiles, mientras que un polímero rígido y frágil tiene una estructura ramificada, y así vemos muchas otras características.

- **Lineales:** se forman cuando el monómero que lo origina tiene 2 puntos de “ataque” (de unión), de modo que la polimerización ocurre en una sola dirección, pero en ambos sentidos.
- **Ramificados:** se forman debido a que, a diferencia del lineal, estos tienen 3 o más puntos de “ataque”, de tal forma que la polimerización ocurre en forma tridimensional, en las 3 direcciones del espacio. Dentro de los polímeros ramificados encontramos 3: los con forma de estrella, de red y de dendritas.
- **Entrecruzados:** poseen estructura tridimensional, donde las cadenas están unidas unas a otras por enlaces químicos. El grado de entrecruzamiento puede ser pequeño o grande.



*Ilustración 49: Polímeros: a)Lineal, b)Ramificado y c)Entrecruzado*

#### **5.1.4.- Según sus propiedades mecánicas:**

Un polímero puede ser **resistente** a la compresión o al estiramiento, es decir, puede soportar golpes sin perder su forma o no estirarse con facilidad, respectivamente. También hay ciertos polímeros que son resistente al impacto, y por tanto no se destruyen al golpearlos; a su vez hay otros que presentan resistencia a la flexión: los doblamos con facilidad; y finalmente podemos encontrar resistencia a la torsión, que son los que recuperan su forma luego de haberlos torcido.

Un ejemplo de resistencia al estiramiento son las cuerdas (específicamente sus fibras), ya que por lo general están sujetadas a tensión y es necesario que no se extiendan al aplicarles esta fuerza. En sí, la resistencia es la medida de la cantidad de tensión necesaria para romper el polímero.

En cuanto a **dureza**, un polímero puede ser rígido o flexible. El primer tipo suelen ser resistentes y casi no sufren deformaciones, pero al no ser duros, se quiebran con facilidad; el segundo tipo, por el contrario, aguantan bastante bien la deformación y no se rompe tan fácilmente como los rígidos.

En lo que a **elongación** respecta, los polímeros llamados elastómeros pueden ser estirados entre un 500% y un 1.000% y aun así volver a su longitud original sin haber sufrido rotura alguna. Al fin y al cabo, la elongación es el cambio de forma que sufre un polímero cuando es sometido a tensión; es la capacidad de estiramiento sin que se rompa.

#### **5.1.5.- Según su comportamiento frente al calor:**

El efecto de la temperatura sobre los polímeros permite realizar la clasificación siguiente:

- Termoplásticos: Hacen referencia al conjunto de materiales que están formados por polímeros que se encuentran unidos mediante fuerzas intermoleculares o fuerzas de Van der Waals, formando estructuras lineales o ramificadas.

Si el material termoplástico dispone de una alta concentración de polímeros con estructuras amorfas, dicho material presentará una pobre resistencia frente a cargas pero una excelente elasticidad, si por el contrario el material termoplástico dispone de una alta concentración de polímeros con una estructura cristalina, el material presentará unas altas propiedades de resistencia frente a cargas y esfuerzos superando incluso a materiales termoestables, por otro lado presentará unas pobres propiedades elásticas aportándole su característica fragilidad.

- Termoestables: Los **termoestables** hacen referencia al conjunto de materiales formados por polímeros unidos mediante enlaces químicos adquiriendo una estructura final altamente reticulada.

La estructura altamente reticulada que poseen los materiales termoestables es la responsable directa de las altas resistencias mecánicas y físicas (esfuerzos o cargas, temperatura...) que presentan dichos materiales comparados con los materiales termoplásticos y elastómeros. Por contra es dicha estructura altamente reticulada la que aporta una baja elasticidad, proporcionando a dichos materiales su característica fragilidad.

Uno de los parámetros característicos de los materiales termoestables es el punto de gelificación o punto de gel, el cual se refiere al momento en el que el material pasa de una manera irreversible de un estado líquido-viscoso a un estado sólido durante el proceso de curado o reticulado, una vez se ha traspasado dicho punto de gelificación el material deja de fluir y no puede ser moldeado o procesado de nuevo.

- Elastómeros: La principal característica de los elastómeros es su alta elongación o elasticidad y flexibilidad que disponen dichos materiales frente a cargas antes de fracturarse o romperse.

En función de la distribución y grado de unión de los polímeros, los materiales elastómeros pueden disponer de unas características o propiedades semejantes a los materiales termoestables o a los materiales termoplásticos, así pues podemos clasificar los materiales elastómeros en:

- o Elastómeros termoestables: Son aquellos elastómeros que al calentarlos no se funden o se deforman.
- o Elastómeros termoplásticos: Son aquellos elastómeros que al calentarlos se funden y se deforman.

## **5.2.- Procesos de transformación de Materiales Poliméricos:**

### **5.2.1.- Introducción:**

La tecnología de la transformación o procesado de polímeros tiene como finalidad obtener objetos y piezas de formas predeterminadas y estables, cuyo comportamiento sea adecuado a las aplicaciones a las que están destinados.

Una de las características más destacadas de los materiales plásticos es la gran facilidad y economía con la que pueden ser procesados a partir de unas materias primas convenientemente preparadas, a las que se les han añadido los pigmentos, cargas y aditivos necesarios para cada aplicación. En algunos casos pueden producirse artículos semiacabados como planchas y barras y posteriormente obtener la forma deseada usando métodos convencionales tales como mecanizado mediante máquinas herramientas y soldadura.

Sin embargo, en la mayoría de los casos el producto final, que puede ser bastante complejo en su forma, se obtiene en una sola operación, con muy poco desperdicio de material, como por ejemplo la fabricación de tubería por extrusión (proceso continuo) o la fabricación de teléfonos por moldeo por inyección (ciclo repetitivo de etapas).

Los polímeros termoplásticos suelen trabajarse previamente fundidos o reblandecidos por efecto simultáneo de la aplicación de calor, presión y esfuerzos de cizalla.

Las técnicas más utilizadas son la de extrusión y la de moldeo por inyección.

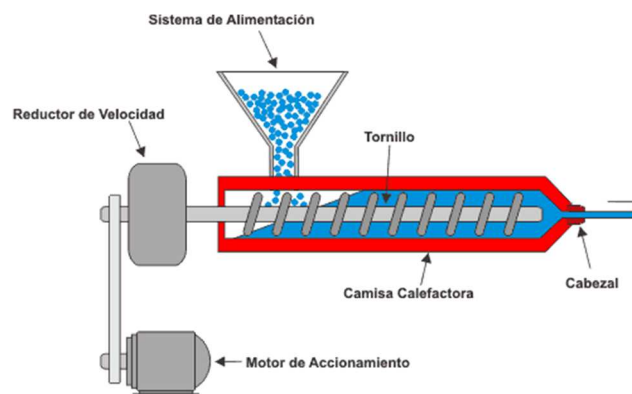
## **5.2.2.- Métodos de Procesado de Polímeros:**

Existen multitud de métodos de procesado de materiales poliméricos dependiendo de las propiedades de cada material, algunos de ellos son:

### **Extrusión:**

En la extrusión el material plastificado fluye por una boquilla que lo conforma y el enfriamiento se efectúa a la salida de la misma, en contacto con el aire, agua o una superficie fría. El método es continuo y proporciona perfiles macizos o huecos de sección transversal constante, que se cortan en largos estandarizados.

La función de la máquina de extrusión (Ilustración 50), es fundir y mezclar la alimentación (pelets) y bombearla o empujarla hacia fuera a través de una boquilla o dado a velocidad uniforme. El producto debe ser enfriado tan rápidamente como sea posible, por lo general en un baño de agua.



*Ilustración 50: Proceso de Extrusión*

### **Moldeo por inyección:**

En el moldeo por inyección el material fundido fluye a través de unas boquillas que comunican con uno o varios moldes cerrados en los que el material se enfría y adquiere la forma definitiva. El método es discontinuo por la necesidad de abrir los moldes y extraer las piezas.

Igualmente, un tornillo de extrusión es usado para fundir y mezclar la alimentación, que a continuación se alimenta en un segundo cilindro. Cuando se tiene la cantidad de material requerida, el émbolo de inyección empuja el material hacia delante para que entre en el molde. La temperatura del molde está, considerablemente, por debajo de la del fundido para asegurar un rápido enfriamiento del material.

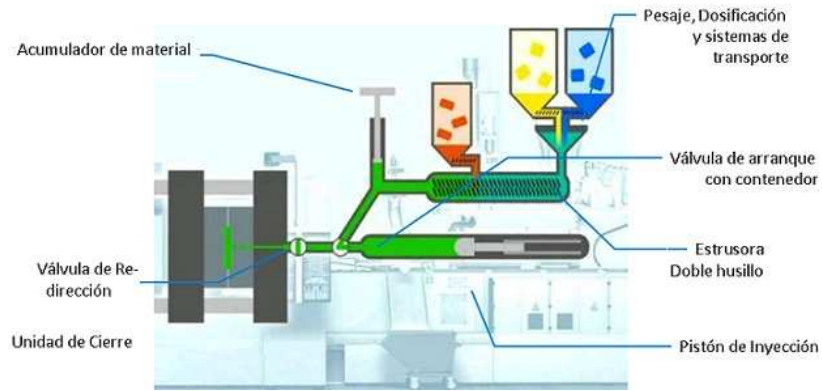


Ilustración 51: Proceso de Moldeo por Inyección

**Moldeo por soplado:**

En este proceso, un tubo obtenido por extrusión (parison) es encerrado en un molde abierto, que a continuación se cierra y el parison es inflado para adquirir la forma de la superficie del molde. Alternativamente, el parison puede ser moldeado por inyección antes de su inflado. Como en el caso del moldeo por inyección, el molde está frío en relación con el polímero fundido, de modo que el producto moldeado sea enfriado rápidamente. Este proceso es usado para producir componentes huecos como botellas, contenedores grandes y depósitos de gasolina de automóviles.

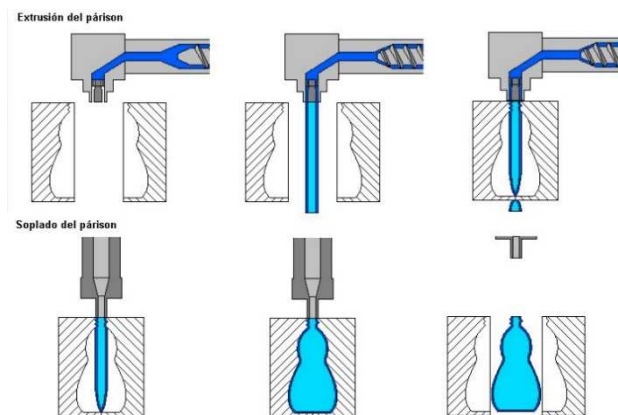
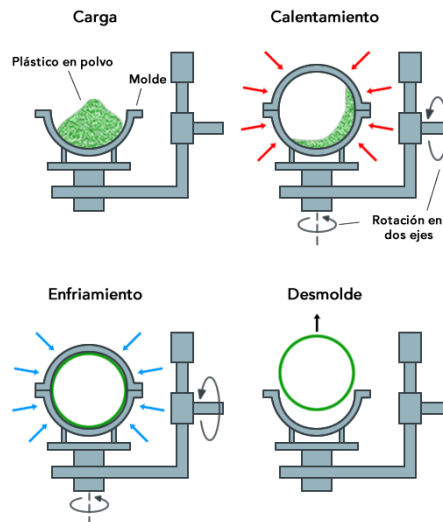


Ilustración 52: Proceso de Moldeo por soplado

**Moldeo rotacional:**

Los artículos huecos también pueden ser producidos por moldeo rotacional, que implica el giro de un molde calentado, que contiene el polímero en polvo, de modo que el polímero fundido forma una capa homogénea sobre la superficie del molde. El molde entonces se enfría mientras todavía está girando. Aunque es un proceso más lento que el moldeo por soplado, esta técnica es capaz de producir grandes componentes con un espesor muy uniforme de la pared, de hasta 10 mm.



*Ilustración 13: Proceso de Moldeo Rotacional*

Termoformado:

El termoformado es una técnica muy antigua. Los antiguos egipcios observaron que se podían calentar las astas de animales y los caparazones de las tortugas para moldear recipientes y figuras. Cuando se empezó a disponer de plásticos sintéticos, el termoformado fue una de sus primeras aplicaciones.

Hoy en día estamos rodeados de este tipo de artículos: señales, accesorios de lámparas, cubiteras, conductos, cajones, cuadros de instrumentos, porta-herramientas, vajillas, juguetes, paneles de refrigeradores, cabinas transparentes de aviones, parabrisas de barcos, etc. La industria de envasados se basa en el termoconformado. Galletas, pastillas y numerosos productos más se suelen envolver en cápsulas de plástico, al igual que las tarrinas individuales de mantequilla, mermelada y otros alimentos. Las piezas de recambio y los artículos de ferretería ofrecen otro ejemplo de este tipo de paquetes plastificados.

Pre calentando láminas u hojas de termoplásticos, estas pueden ser conformadas entre moldes emparejados vía presión diferencial (Conformado bajo presión o bajo vacío). Este proceso es muy popular en la fabricación de materiales para embalaje y para productos moldeados de gran tamaño, como baños y revestimientos refrigerantes.

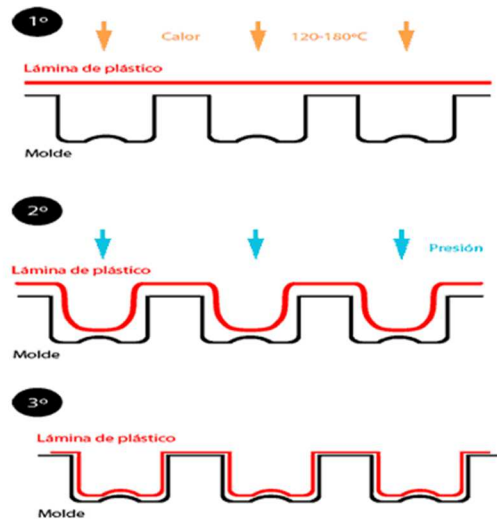


Ilustración 54: Proceso de Termoformado

Calandrado:

La película plástica y la hoja pueden ser producidas comprimiendo el polímero fundido entre rodillos contra-rotativos. Este proceso se prefiere a la extrusión, cuando hay que trabajar con materiales sensibles al calor, como es el caso del cloruro de polivinilo (PVC). Es capaz de producir hojas con velocidades de hasta 2 m/s.

A través de este método se pueden producir películas y formas en lámina gofradas o texturizadas. Este tipo de películas se emplea sobre todo en la industria textil. Las películas gofradas o con una textura especial se emplean para fabricar prendas de vestir, bolsos, zapatos y materiales de imitación de piel.

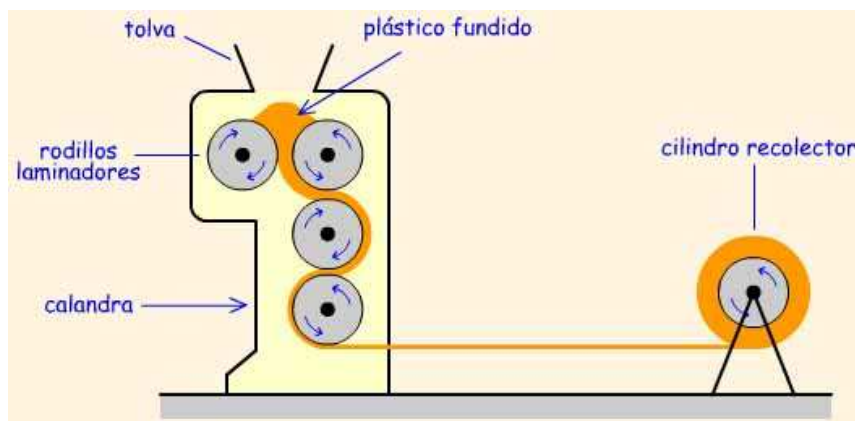


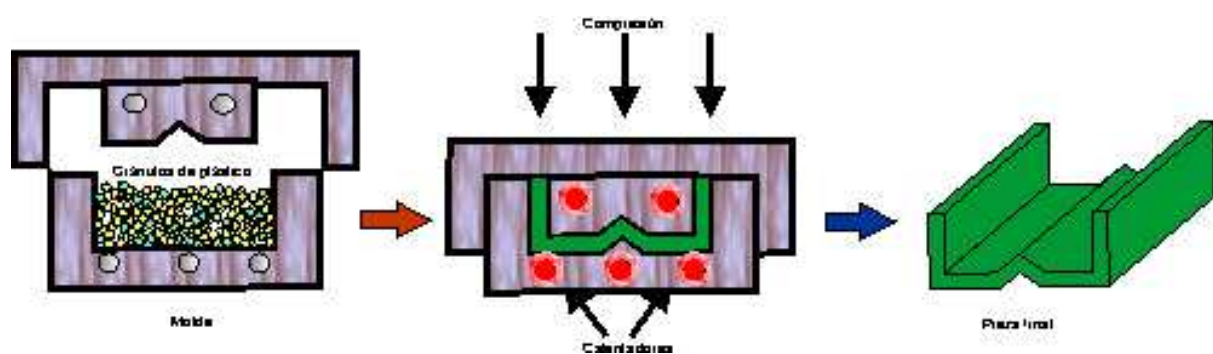
Ilustración 56: Proceso de Calandrado



### Otros procesos:

Existe un gran número de procesos alternativos, por lo general desarrollados para tipos de material específicos.

El moldeo por compresión, que es uno de los procesos de moldeo más antiguos que se conocen, es popular en el conformado de compuestos de poliéster empleándose compuestos de moldeo de volumen termoendurecibles (abreviados comúnmente por BMC, siglas de bulk molding compounds). BMC es una mezcla de cargas, resinas, agentes de endurecimiento y otros aditivos. Las preformas extruidas calientes de este material se pueden cargar directamente en la cavidad fría o la chimenea de alimentación.



*Ilustración 57: Proceso de Moldeo por compresión*

Otros materiales de moldeo populares son los plásticos fenólicos, compuestos de urea-formaldehído y malamina. Al igual que los BMC, normalmente se preconforman para facilitar la automatización y elevar la velocidad. Se emplean compuestos de moldeo de lámina reforzada y muy cargada, que se pueden colocar en capas alternas para conseguir propiedades más isótropas o en una sola dirección si se desean propiedades anisótropas.

También puede ser usado para el conformado de polvo de plástico, por ejemplo, de PTFE. Este proceso también se usa para el moldeo de las superficies de rodadura de los neumáticos.

Los plásticos más duros y resistentes pueden ser procesados por mecanizado, de una manera similar a los metales. Para formas complejas o para pequeños volúmenes de producción, el proceso de unión es, a menudo, la ruta más práctica. Esto, por lo general, se logra, por soldadura o mediante adhesivos.

Algunos materiales termoplásticos se degradan si permanecen mucho tiempo a temperaturas relativamente altas, a las que hay que mantenerlos para que su viscosidad no dificulte su flujo a través de boquillas o hileras de muy pequeña sección, como es el caso del hilado de ciertas fibras sintéticas. Para evitar lo anterior, se recurre a disolver el polímero previamente a la extrusión, procediéndose a evaporar el disolvente tan pronto sale el material de la hilera.

En otras ocasiones, cuando se quieren obtener láminas continuas de pequeño espesor de polímeros plastificados (pieles), se recurre a un proceso similar al de laminación de los metales, mediante calandrias de rodillos (calandrado), calientes primero y fríos al final. La fabricación de artículos de muy

pequeño espesor se consigue muy ventajosamente a partir de láminas de material termoplástico previamente ablandadas por calentamiento, que son obligadas a adaptarse a moldes mediante presión de aire, o aplicando vacío. Esta es la técnica de termoconformado.

Los materiales termoestables o duroplásticos se trabajan, en general, por compresión en moldes de la forma adecuada, que se cargan con la cantidad exacta de resina, agente y/o catalizador de curado y aditivos, y a los que se aplica calor para facilitar las reacciones de reticulación o curado. De la misma manera se obtienen piezas de materiales elastómeros, que también admiten las técnicas de transformación de los termoplásticos cuando la velocidad de las reacciones de vulcanización se mantiene lo suficientemente lenta.

En todos los casos, cualquiera que sea la técnica de transformación utilizada, las piezas y objetos fabricados deben enfriarse convenientemente para que su forma permanezca estable. La velocidad de enfriamiento es casi siempre un parámetro crítico que puede influir en las propiedades y comportamiento del material y, en consecuencia, de los objetos fabricados, sobre todo cuando en el proceso de transformación han estado sometidos a importantes esfuerzos de tracción y/o de cizalla, que proporcionan a las macromoléculas un deslizamiento y estirados en la misma dirección.

Al procesar estos esfuerzos el material comienza a relajarse (sus moléculas tienden a adoptar la posición ovillada correspondiente al mínimo de energía, o a empaquetarse formando cristalitos) tanto más lentamente, cuanto más próxima se encuentre la temperatura de transición vítrea. Si la masa se endurece antes de que la relajación se complete, como ocurre en la mayoría de los casos, las tensiones quedan congeladas y dan lugar a una cierta anisotropía. Algunas veces se provoca deliberadamente este efecto, como en el caso de los filmes biorientados y en las fibras, en las que durante el enfriamiento (o evaporación del disolvente, en las fibras acrílicas, por ejemplo), se procede a un estirado; pero en general es indeseable.

La velocidad de enfriamiento afecta también al crecimiento de las estructuras cristalinas, que tanta influencia tienen en las propiedades y comportamiento de los materiales termoplásticos. En los duroplásticos y elastómeros un enfriamiento lento proporciona un mayor grado de reticulación, que también afecta a la rigidez y demás características del producto final.

### **5.2.3.- Etapas de los procesos de transformación de polímeros:**

Las etapas principales en todos los procesos de elaboración de los materiales plásticos son:

- 1.- Fusión
- 2.- Mezclado y homogenización
- 3.- Transporte del fundido.

Las tres etapas anteriores, usualmente, se logran por medio de un tornillo de Arquímedes que implica la dispersión de estabilizantes, pigmentos y otros aditivos, exclusión del aire y los volátiles y transformación de la alimentación en forma de polvo o gránulos en un fundido uniforme.

- 4.- Conformado primario

Este puede ser logrado, en dos dimensiones, por el flujo del fundido a través de un dado o boquilla y en tres dimensiones por el flujo en un molde de varias partes o por prensado en un molde abierto. Algunos termoestables son procesados, simplemente, por vertido en un molde abierto.

#### 5.- Conformado secundario

Este puede implicar el corte o el arrastre de una masa de polímero, como ocurre en la producción de fibras, películas o el moldeo por soplado.

#### 6.- Estabilización de la forma

Para los termoplásticos esto consiste en el proceso de enfriamiento (y de ahí la solidificación), mientras que para los termoestables y elastómeros es el proceso de curado (Entrecruzado de las cadenas).

#### 7.- Operaciones de acabado

Estas pueden incluir el templado, el mecanizado o el recubrimiento.

### **5.2.4.- Sinterización:**

El término sinterización designa los cambios geométricos que se producen cuando un conjunto de partículas es llevado a una temperatura elevada, cercana o superior a la temperatura de fusión, y dejado a ésta durante un tiempo suficientemente largo con el propósito de aumentar su resistencia.

En la sinterización, las partículas coalescen por difusión atómica al estado sólido a muy altas temperaturas, pero por debajo del punto de fusión o vitrificación del compuesto que se desea sinterizar. En el proceso, se produce difusión atómica entre las superficies de contacto de las partículas, lo que provoca que resulten químicamente unidas.

La sinterización es uno de los métodos de fabricación más antiguos de metales y materiales cerámicos. Actualmente se usa para obtener cuerpos sólidos compactando polvos metálicos o cerámicos, y aún más recientemente, para obtener algunas formas de polímeros a partir de sus partículas. Constituye a veces el único método por el cual puede impartirse a un material propiedades adecuadas para ser utilizado con una determinada finalidad.

La adaptabilidad de un material dado a la fabricación por sinterizado depende de las propiedades de su polvo y del modo de manufactura. Las propiedades de los polvos que tienen fundamental importancia, son: el tamaño de las partículas, la distribución de tamaños, la forma, la compresibilidad, la pureza y la densidad aparente.

Muchas de estas propiedades se hallan ligadas al procedimiento de fabricación del polvo. El tamaño de partículas que normalmente se emplea en el sinterizado oscila entre 0,5  $\mu\text{m}$  y 200  $\mu\text{m}$ .

La distribución de tamaño afecta el comportamiento y las propiedades del material una vez sinterizado. Por ejemplo, el volumen de una masa de polvo de tamaño de partícula uniforme es aproximadamente la mitad del volumen total ocupado por el polvo, ya que la otra mitad está vacía, debido a los espacios que quedan entre las partículas. Cuando se añaden partículas de menor diámetro, éstas tienden a llenar los huecos, incrementando el volumen ocupado. En general, un polvo con tamaño de partícula mixto da un producto final, después del sinterizado, de mayor densidad.

Cuando se busca un producto final poroso, por ejemplo un filtro, es conveniente partir de un polvo con partículas esféricas y de un tamaño que fluctúe en un intervalo pequeño. Una vez elegido el polvo adecuado, es necesario realizar, en la mayoría de los casos, el prensado del mismo a fin de colocar las partículas adyacentes en contacto íntimo y conseguir la rotura de las capas superficiales. En algunas

ocasiones se sinteriza el polvo sin previo prensado, como cuando se quieren fabricar, por ejemplo, filtros de gran porosidad.

La microestructura final de un material sinterizado depende de las características del proceso de sinterización. Es por eso que, para poder obtener un material con determinadas propiedades, es necesario comprender los aspectos básicos fundamentales de dicho proceso. De esta forma, el mismo podrá ser controlado con el fin de obtener los resultados deseados. Por ejemplo, si un material sinterizado debe ser utilizado en aplicaciones ópticas, es necesario que ese material tenga una porosidad extremadamente baja, que el tamaño de los poros sea menor que la longitud de onda de la luz visible y que no existan partículas precipitadas de segunda fase. Todo esto debe ser controlado durante la sinterización.

#### **Factores que afectan en el proceso:**

- Temperatura
- Tiempo
- Atmosfera
- Composición del material
- Método de aleación
- Contenido de lubricante
- Velocidades de calentamiento y enfriamiento

#### **5.2.5.- Propiedades de los productos sinterizados:**

Dado que las propiedades de los productos sinterizados dependen de tantas variables (tipo y tamaño del polvo, cantidad y tipo de lubricante, presión de prensado, temperatura y tiempo de sinterización, tratamientos de acabado, etc.) es difícil exponer una información de validez general. Las propiedades abarcan todos los valores desde los correspondientes a las piezas porosas de baja densidad hasta los de las piezas de alta densidad y porosidad mínima. En general, las propiedades mecánicas muestran una fuerte dependencia con la densidad, dependencia que las propiedades relacionadas con la fractura, tales como tenacidad, ductilidad y fatiga, exhiben más intensamente que la resistencia y la dureza. Los aleantes se añaden para conseguir polvos de alta resistencia, por lo que las propiedades resultantes tienden a quedar por debajo de las de los productos forjados en cuantías variables, pero habitualmente importantes.

La porosidad puede asimismo afectar a las propiedades físicas. Dada la existencia de cavidades y fisuras de oclusión, la resistencia a la corrosión tiende a ser menor. Con la densidad varían también las propiedades eléctricas, térmicas y magnéticas. Como aspecto positivo, la porosidad favorece mucho la amortiguación de sonido y las vibraciones y numerosas piezas sinterizadas se diseñan para aprovechar esas características.

## **5.3.- Generalidades del Polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMWPE):**

### **5.3.1.- Introducción:**

El Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE, UHMW) es un subconjunto del polietileno termoplástico. También conocido como polietileno de alto módulo, (HMPE) o polietileno de alto rendimiento (HPPE), que tiene cadenas extremadamente largas, con una masa molecular por lo general entre 2 y 6 millones de uma. La cadena más larga sirve para transferir la carga de manera más eficaz a la cadena principal del polímero mediante el fortalecimiento de las interacciones intermoleculares. Esto resulta en un material muy resistente, con la resistencia al impacto más alta de cualquier termoplástico actualmente fabricado.

UHMWPE es un tipo de poliolefina. Se compone de cadenas extremadamente largas de polietileno, que todas se alinean en la misma dirección. Se deriva su fuerza en gran parte de la longitud de cada molécula individual (cadena). Los enlaces entre moléculas son enlaces de Van der Waals que son relativamente débiles para cada átomo de superposición entre las moléculas, pero debido a que las moléculas son muy largas, pueden existir grandes solapamientos, sumando a la capacidad para llevar a fuerzas de corte más grandes de molécula a molécula. Cada cadena se une a las otras por medio de fuerzas de Van der Waals, lo que hace que la totalidad de la fuerza inter-molécula es alta. De esta manera, grandes cargas de tracción no se limitan tanto por la debilidad comparativa de cada enlace de Van der Waals.

Como materia prima, estos plásticos se producen en forma de polvos, granulados, fibras, bandas, trozos, fibras impregnadas de resinas, tabletas premoldeadas. También es posible su suministro en forma de composiciones viscosas. Según de que aplicación se trate se escogerá la forma de suministro.

Su punto de fusión es de alrededor de 130-136 ° C (266-277 ° F) y no es aconsejable el uso de fibras de UHMWPE a temperaturas superiores a 80 a 100 ° C (176-212 ° F) durante largos períodos de tiempo. Se vuelve frágil a temperaturas por debajo de -150 ° C (-240 ° F).

Este plástico conserva su buen desempeño aún a bajas temperaturas y sus resistencias química y mecánica son superiores. Y como todos los miembros de la familia, no absorbe humedad, se puede utilizar en la industria alimentaria y su aspecto ceroso proporciona excelente lubricidad.

### **5.3.2.- Propiedades del Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE):**

Las propiedades que más se han explotado en este plástico son su excelente resistencia al impacto y al desgaste por abrasión. Por eso es el preferido cuando se trata de fabricar piezas maquinadas como engranes, husillos de transporte, juntas, y todo tipo de piezas mecánicas que necesiten excelente resistencia al desgaste por abrasión y que deban estar en ambientes húmedos; ya que su competencia directa, las poliamidas, que tienen el inconveniente de ser grandes absorbedores de agua.

Quizá sean estas aplicaciones netamente industriales las que mantienen al UHMWPE un poco desconocido para la mayoría de la gente. Las maquinarias para procesamiento de alimentos están dejando al acero inoxidable y usando los mismos elementos, pero de UHMWPE autolubricado, totalmente atóxico, que no absorbe humedad, resistente mecánicamente, más ligero y fácil de maquinar.

Tiene multitud de propiedades, unas de ellas son:

- Rango de temperatura de trabajo entre -100 °C y +80 °C
- Extremadamente resistente al desgaste (mejor que el polietileno de alto peso molecular)
- Buena resistencia al impacto incluso a bajas temperaturas
- Bajo coeficiente de fricción
- Resistencia a la abrasión
- Fisiológicamente inerte
- Liviano e irrompible
- Resistente a las bajas temperaturas
- Muy baja absorción del agua
- Aprobado por FDA (Food and Drug Administration) para contacto con alimentos
- Resistente a agentes químicos corrosivos como puede ser el ácido sulfúrico, etc
- Capacidad autolubrificante, debido a su porosidad es capaz de almacenar aceite u otros fluidos viscosos en su interior
- Alto factor de elongación
- Su aspecto ceroso proporciona excelente lubricidad

### Datos técnicos:

<b>POLIETILENO DE ULTRA ALTO PESO MOLECULAR (UHMWPE)</b>				
<b>PROPIEDADES MECÁNICAS A 23 °C</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ASTM</b>	<b>DIN</b>	<b>VALORES</b>
Peso específico	g/cm <sup>3</sup>	D-792	53479	0,93
Resist. a la Tracc. Fluencia	Kg/cm <sup>2</sup>	D-638	53455	200
Resist. a la Compresión (1 y 2 % Def.)	Kg/cm <sup>2</sup>	D-695	53454	45/80
Resist. a la Flexión	Kg/cm <sup>2</sup>	D-790	53452	-
Resist. al choque sin entalla	Kg.cm/cm <sup>2</sup>	D-296	53453	NO ROMPE
Alargamiento hasta Rotura	%	D-638	53455	>350
Módulo de Elasticidad	Kg/cm <sup>2</sup>	D-638	53457	6000
Dureza	Shore D	D-2240	53505	61-64
Coef. de Roce Estático S/Acero		D-1894		0.20-0.25
Coef. de Roce Dinámico S/Acero		D-1894		0.15-0.20
<b>PROPIEDADES TÉRMICAS</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ASTM</b>	<b>DIN</b>	<b>VALORES</b>
Calor Específico	Kcal/Kg.°C	C-351		0,54
Temp. de Flex. B/Carga (18.5 Kg/cm <sup>2</sup> )	°C	D-648	53461	46
Temp. de uso continuo en aire	°C			-30 a 80
Temperatura de Fusión	°C			130
Coef. de Dilatación Lineal de 23 a 100 °C)	por °C	D-696	52752	0,0002
Coef. de Conducción Térmica	Kcal/m.h.°C	C-177	52612	0,36
<b>PROPIEDADES ELÉCTRICAS</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>ASTM</b>	<b>DIN</b>	<b>VALORES</b>
Constante Dieléctrica a 60 Hz		D-150	53483	2,3
Constante Dieléctrica a 1 KHz		D-150	53483	2,3
Constante Dieléctrica a 1 MHz		D-150	53483	2,3
Absorción de humedad al aire	%	D-570	53472	<0.01

Tabla 3: Datos Técnicos Polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMW-PE)

### **5.3.3.- Sinterización del Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE):**

El Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) es un termoplástico que debido a su alto peso molecular presenta propiedades especiales. Es un material muy difícil de procesar por su gran peso molecular. Posee un índice de fluidez muy bajo por lo que es casi imposible utilizarlo en los procesos de soplado, inyección y extrusión.

La sinterización del Polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMW-PE) se realiza, como se ha explicado en el apartado 4.2.4., igual que en los otros materiales. Lo único que hay que tener en cuenta son las propiedades de este material y adecuar las condiciones del sinterizado según dichas propiedades.

Las propiedades que van a influir en este proceso son: Temperatura de fusión, tamaño de las partículas, distribución de tamaños de partícula, la forma, la compresibilidad, la pureza y la densidad aparente.

Según las propiedades de este material, mencionadas en el apartado 4.3.2, el proceso de sinterización tendrá diferentes parámetros: Temperatura de sinterizado (cercana o superior a la temperatura de fusión, rondará los 140 °C), duración del proceso (una hora o superior, sino no se sinteriza a esta temperatura), tiempo de enfriamiento, compactación, etc.

Además, dependiendo el modo en que se varíen estos parámetros, los productos sinterizados tendrán unas propiedades u otras.

Así pues, el proceso es similar al de el resto de materiales aunque con las particularidades de cada material que hacen variar las condiciones del proceso.

### **5.3.4- Aplicaciones del Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE):**

Este miembro de la familia del polietileno tiene muchas aplicaciones en varios sectores. Es el miembro más pesado de esta familia, y sus propiedades lo colocan entre los plásticos de ingeniería.

Sus aplicaciones netamente industriales son las que mantienen al UHMWPE un poco desconocido para la mayoría de la gente. Las maquinarias para procesamiento de alimentos están dejando al acero inoxidable y usando los mismos elementos, pero de UHMWPE autolubricado, totalmente atóxico, que no absorbe humedad, resistente mecánicamente, más ligero y fácil de maquinar.

Otra aplicación importante está en el campo de las prótesis (como las de rodilla o cadera). Tradicionalmente para esto se utilizaban piezas de platino u otros materiales, pero el problema era que el paciente no recuperaba ni siquiera un mínimo de movilidad en estas partes del cuerpo, pues una pieza de platino no podía rotar sobre un hueso, y así quedaba condenado a una silla de ruedas o a usar muletas o bastones, ni hablar de su vida deportiva.

El UHMWPE puede entrecruzarse y hacerse mucho más resistente, y fabricar prácticamente cualquier forma caprichosa, pues la cabeza del fémur o la rótula de estos pacientes se puede fabricar a su medida anatómica, brindando al paciente una nueva oportunidad de poder recuperar movilidad, e incluso se han reportado casos en los que el paciente puede volver a practicar deporte (no a nivel profesional). A casi ocho años de estos primeros implantes, no se han reportado rechazos ni problemas secundarios derivados del uso de este plástico.

Este polímero de ingeniería tiene multitud de aplicaciones, a continuación se nombrarán algunas de ellas aparte de las ya mencionadas:

- Tablas para picar alimentos
- Revestimiento
- Barrenas
- Piñones de cadenas
- Guías de cadena
- Tobogán de líneas
- Filtro prensa de placas
- Zapatos de vuelo
- Moledor de grano
- Mezclador de bujes



- Mezclador de paletas
- Cuchillas de arado
- Cadenas de rodillos
- Raspador de cuchillas
- Congeladores de espiral
- Esparcidoras

Este tipo de polietileno es de alta densidad y elevado peso molecular, entre 3,000,000 y 6,000,000 g/gmol, es un material altamente cristalino y debido a estas dos características, presenta propiedades especiales. Es un material muy difícil procesar, por lo que es casi imposible usarlo en los procesos de soplado, inyección y extrusión.

Las aplicaciones de este polietileno son diferentes a las de los otros tipos, van encaminadas principalmente a partes y refacciones de maquinaria.

Para el manejo de materiales, se puede encontrar en: soleras de fricción, cintas guía, canales, cintas de desgaste, placas deslizantes, tolvas, rodamientos, en la minería en rodillos o camisas de desgaste, como recubrimiento para bandas transportadoras, ruedas, bujes, para manejo de productos químicos, en bombas, filtro, partes para válvulas, juntas y empaques.

También tiene aplicación en refacciones de maquinaria de la industria del embotellado, éstas pueden ser estrellas, tornillos sin fin, espaciadores, placas de desgaste, bujes, levas guías y otros.

En la industria eléctrica, debido a sus propiedades dieléctricas, se emplea en partes de motores eléctricos interruptores y acopladores.

## **6.- DESARROLLO DEL PROCESO EXPERIMENTAL:**

### **6.1.- Introducción:**

Con el objetivo de conseguir el autoengrase de los "patines de rodadura" mediante la incorporación de un dispositivo impregnado en aceite que aplique a los elementos rodantes la mínima cantidad necesaria para que el sistema funcione, se han elegido diferentes materiales poliméricos y se han realizado con ellos diversos ensayos. El fin es analizar el comportamiento de dichos materiales porosos frente a la lubricación y el gasto de lubricante. Además, se han realizado numerosos ensayos para optimizar la sinterización de los diferentes materiales para que almacenen la mayor cantidad de lubricante.

Una vez seleccionados los materiales, se realizan numerosos ensayos de sinterización con el fin de analizar qué materiales tienen unas propiedades más adecuadas para la autolubricación de los "patines de rodadura". Asimismo, un concepto que se ha considerado fundamental es la porosidad de los materiales poliméricos, por lo que se ha elegido el Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) con diferentes tamaños de partícula que cumple con esta propiedad a la perfección.

Por último, se realizarán ensayos para determinar de manera comparativa el consumo de lubricante para los diferentes materiales en estudio y cuál es el más apropiado para autolubricar los "patines de rodadura". Para ello, se ha diseñado un banco de pruebas que simula el roce de el tren de engranajes del "patín de rodadura" con la pastilla de material polimérico. Estos ensayos de duración del lubricante en cada material se han realizado en las mismas condiciones tribológicas utilizando aceite Mobil Vactra Número 2 como lubricante.

### **6.2.- Optimización del Proceso de producción:**

El proceso de producción consiste en el **sinterizado de un material polimérico (Polietileno de ultra alto peso molecular, UHMWPE)** con la forma de un cubo de 20x20x20 mm aproximadamente, con una pequeña muesca (pastilla polimérica) para alojarlo en los laterales de los "patines de rodadura" y que lubriquen el tren de rodillos cilíndricos del interior de estos.

#### **6.2.1.- Materiales utilizados:**

##### **6.2.1.1.- Material polimérico:**

El material empleado en la realización de la pastilla de material polimérico es el Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW PE), concretamente el **MIPELON XM-220** suministrado por Mitsui Chemicals. En el capítulo 4 del proyecto se comentan las propiedades y características del UHMW-PE.

MIPELON es Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW-PE) en forma de polvo fino desrrollado por Mitsui Chemicals. Mientras que el tamaño medio de las partículas de polvo de Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW-PE) convencional es de 150 a 200  $\mu\text{m}$ , MIPELON puede reducir con éxito el tamaño de las partículas finas con un tamaño medio de partícula de 10 a 30  $\mu\text{m}$  por su tecnología especial, así como la retención de su peso molecular.

- **Aplicaciones:**

Este material tiene multitud de aplicaciones, a continuación se nombran algunas de ellas:

Resinas y cauchos modificados (compuestos):

La adición de MIPELON a poliacetal, poliamida, o resina de fenol mejora los resultados de las propiedades de autolubricación. Adición de MIPELON a la goma no solo mejora la autolubricación, sino que también aumenta la resistencia a productos químicos.



*Ilustración 58: Resinas y cauchos fabricados en MIPELON*

Materiales autolubricantes (compuestos):

Las partículas de MIPELON son extremadamente pequeñas en comparación con el Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW-PE) convencional, por lo que grandes cantidades de materiales de carga tales como el carbono, grafito, o disulfuro de molibdeno se dispersan fácilmente. Se producen materiales con excepcionales propiedades autolubricantes.



*Ilustración 59: Materiales autolubricantes de MIPELON*

## Filtros:

El MIPELON sinterizado produce un excelente filtro poroso como consecuencia de su tamaño de partícula pequeño.



Ilustración 60: Filtros porosos de MIPELON

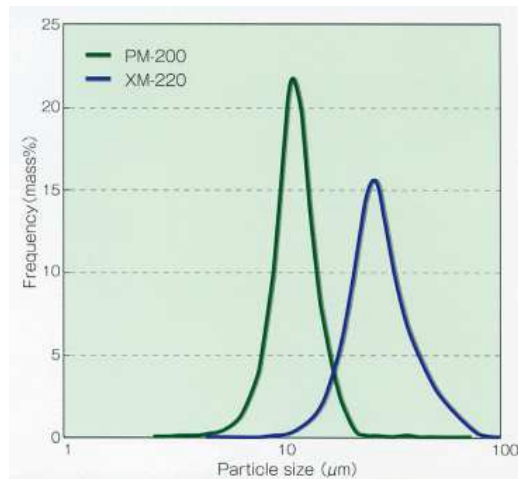
- **Propiedades físicas:**

Propiedades	Unidades	Método de prueba	MIPELON		
			XM-220	XM-221 U	PM-200
Peso molecular	$\times 10^4$	Método MCI	200	200	180
Densidad	$\text{Kg/m}^3$	Método MCI	940	940	940
Densidad aparente	$\text{Kg/m}^3$	ASTM D1895	400	400	300
Resistencia a la tracción hasta rotura	MPa	ASTM D638	44	44	44
Alargamiento hasta rotura	%	ASTM D638	350	350	350
Dureza Shore	D	ASTM D2240	65	65	65
Coefficiente de fricción		–	0,2	0,2	0,2
Temperatura de fusión	$^{\circ}\text{C}$	ASTM D3418	136	136	136
Tamaño medio de partícula	$\mu\text{m}$	Método de Coulter	30	25	10
Distribución de tamaño de partícula	%	Método de Coulter			
–20 $\mu\text{m}$			10	20	98
20 $\mu\text{m}$ - 30 $\mu\text{m}$			35	55	2
30 $\mu\text{m}$ - 40 $\mu\text{m}$			35	20	
40 $\mu\text{m}$ –			20	5	

Tabla 4: Propiedades físicas MIPELON XM-220

- **Distribución de tamaño de partícula:**

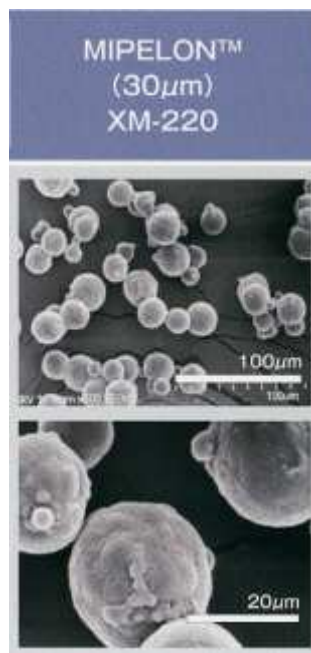
MIPELON es adecuado para usar en el filtro sinterizado debido a su estrecha distribución de tamaños de partícula.



*Ilustración 61: Distribución de tamaños de partícula XM-220*

- **Imágenes de microscopio electrónico:**

La superficie de MIPELON es suave y su forma es esférica.



*Ilustración 62: Aspecto del MIPELON XM-220 en el microscopio electrónico*

### **6.2.1.2.- Lubricante:**

Como se ha mencionado en apartados anteriores, el lubricante empleado para impregnar la "pieza" de polímero poroso es aceite **Mobil Vactra N°2**.

Los aceites de la serie Mobil Vactra Oil Numerada son lubricantes de calidad "premium" para guías y correderas específicamente diseñados para satisfacer los requisitos de precisión, de facilidad de separación del fluido de corte soluble y de protección de las máquinas herramienta.

La serie Mobil Vactra Oil Numerada está cuidadosamente formulada a partir de bases lubricantes de alta calidad y cuyo desempeño está equilibrado mediante un avanzado sistema de aditivos que proporciona controladas propiedades de fricción, sobresaliente compatibilidad con los fluidos de corte solubles en agua utilizados para el trabajo con metales y protección de las piezas y equipos contra la corrosión. El exclusivo paquete de aditivos proporciona excepcionales propiedades de fricción sobre una gran variedad de materiales de las guías, incluyendo acero sobre acero y acero sobre polímeros, disminuyendo el efecto de pegue y despegue y los chirridos. Esto permite lograr un movimiento suave y uniforme en las diferentes velocidades de translación para así mejorar la productividad y precisión de la máquina y ayudar a prolongar la vida útil de la herramienta y a mejorar los acabados superficiales. Esta serie ha sido optimizada para proporcionar una excelente facilidad de separación de los fluidos de corte solubles a la vez que minimiza los efectos corrosivos de los fluidos de alto pH sobre las superficies lubricadas.

<b>PROPIEDADES</b>	<b>VENTAJAS Y BENEFICIOS</b>
Características controladas de fricción	Ayuda a eliminar el efecto de pegue y despegue, permite la precisión en el maquinado
Capacidad de trabajo con múltiples materiales	Son adecuadas para trabajar con una amplia gama de combinaciones de materiales de guías, lo cual permite la consolidación de los productos
Facilidad de separación del agua y de los fluidos de corte	Ayuda a mejorar la vida útil y desempeño de muchos fluidos de corte acuoso
Adhesividad	Previene la eliminación de lubricante en superficies críticas
Protección a largo plazo contra la herrumbre y la corrosión	Ayuda a reducir el deterioro de las superficies de deslizamiento en la presencia de agua y fluidos de corte solubles

*Tabla 5: Propiedades aceite Mobil Vactra N°2*

#### -Aplicaciones:

Los productos de la serie Mobil Vactra Oil Numerada son recomendados para la lubricación de los sistemas de guía de las máquinas herramientas. Los mismos están diseñados para utilizarse en todas las combinaciones de materiales de guías como hierro fundido, acero y materiales no metálicos. Los productos de esta serie pueden ser aplicados a mano, con lubricador de lubricación forzada o por inmersión a través de un sistema de circulación. También son aptos para utilizarse en sistemas hidráulicos y mecanismos de engranaje de servicio moderado encontrados en las máquinas herramientas.

- La serie de productos Mobil Vactra Oil Numerada es apta para utilizarse en aplicaciones que requieren las especificaciones P53, P47 y P50 de Cincinnati Machine.
- **Los aceites Mobil Vactra Oil N°1 y N°2 son recomendados para las guías horizontales en máquinas herramienta de tamaño pequeño o mediano. También son adecuados para aplicarse en sistemas de circulación de grandes máquinas y como fluido hidráulico de servicio moderado.**
- Los aceites Mobil Vactra Oil N°3 y N°4 son normalmente recomendados para máquinas grandes donde las presiones sobre las guías son altas y se requiera de una gran precisión. También son recomendados para guías verticales e inclinadas donde el escurrimiento puede ser un problema y para mecanismos de accionamiento de engranajes en máquinas herramienta de servicio moderado.
- La serie Mobil Vactra Oil Numerada puede utilizarse para la lubricación de tornillos de bolas, guías lineales, cabezales fijos y tornillos de translación.
- La serie Mobil Vactra Oil Numerada es recomendada para aplicaciones en las que la contaminación del fluido de corte con aceite reduce la vida útil del fluido.

#### -Características:

Serie Mobil Vactra Oil	N°1	N°2	N°3	N°4
Grado de viscosidad ISO	32	68	150	220
Densidad 15 °C/15°C, ASTM D1298		0,883		
cSt a 40°C, ASTM D445	32	68	156	221
Punto de inflamación, ASTM D92, °C	216	228	248	240
Pour point, ASTM D97, °C	-30	-18	-6	-3
Corrosión a la lámina de cobre, ASTM D130C, 3h	1B	1B	1B	1B
Protección contra la herrumbre, ASTM D665B	Pasa	Pasa	Pasa	Pasa
Soporte de carga FZG, ISO 14635, Etapa de fallo	13	13	13	13

Tabla 6: Características lubricante (Mobil Vactra N°2)

### **6.2.2.- Etapas del proceso de producción:**

Como se ha comentado anteriormente, el proceso de producción consiste en el **sinterizado de un material polimérico** con la forma de un cubo de 20x20x20 mm aproximadamente con una pequeña muesca (pastilla de material poroso) para alojarlo en los laterales de los "patines de rodadura" y que lubriquen el tren de rodillos cilíndricos del interior de estos.

El proceso de producción consta de las siguientes etapas:

- 1) **Pre calentamiento de la estufa con el molde y la tapa de este adentro de la misma.** Esto se llevará a cabo durante aproximadamente 2 horas para que la temperatura del horno sea lo más estable y homogénea posible. La temperatura a la que se realiza el sinterizado del polímero es algo superior a su temperatura de fusión (137 °C aproximadamente). Se impregna el interior del molde, antes de introducirlo en el horno, con aceite o agentes desmoldantes para que no se quede la pieza adherida al mismo.
- 2) **Extracción del molde del horno y llenado.** El material polimérico con el que se llena el molde es Polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW PE) que se encuentra en polvo, en este caso **XM-220 suministrado por Mitsui Chemicals**.
- 3) **Prensado del material polimérico (diferentes presiones)** por medio de un utensilio de la forma superior del molde (cuadrado).
- 4) **Introducción del molde en el horno tapando la parte superior del mismo con una tapa de acero** para que funda y se unan entre sí sus partículas.
- 5) **Extracción del molde del horno** una vez transcurrido el tiempo de sinterizado.
- 6) **Enfriamiento al aire libre** hasta que se encuentra a temperatura ambiente.
- 7) **Extracción de la pieza resultante del molde.** Se recortan con ayuda de un cúter las rebabas resultantes del proceso.
- 8) **Pesado de la pieza de material polimérico.** El pesado se realiza con ayuda de una báscula digital con una capacidad de 250 gramos.
- 9) **Se impregna el material poroso con el lubricante.** Esto se realiza introduciendo las pastillas de material polimérico cubiertas de lubricante en un recipiente cerrado. A continuación, se hace vacío sobre este recipiente y las pastillas adquieren el lubricante. Los poros pueden contener una gran cantidad de aceite lubricante debido a la acción capilar (capilaridad).
- 10) **Pesado del material poroso impregnado en lubricante.** Al pesar la pastilla de material poroso sin impregnar y una vez impregnada, se calcula el porcentaje de lubricante que ha absorbido la pastilla.

Al finalizar el proceso, quedará la pastilla de material absorbente como se muestra a continuación:





*Ilustración 63: Pastilla de material absorbente impregnada en aceite*

### **6.2.3.- Ensayos realizados:**

En este ensayo se ha optimizado el proceso de sinterización del Polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMW-PE) XM-220. Para ello se han ido variando las condiciones o parámetros que entran en juego en el proceso. Estos parámetros son: Tiempo de sinterizado (dentro de la estufa), compactación del polvo de material poroso (presión ejercida), Temperatura de sinterizado y utilización de tapa de acero para el molde o no.

Así pues, variando estos parámetros se observa como varía el porcentaje de aceite que absorbe el material poroso. Se deben optimizar todos estos parámetros para que la pastilla de material absorbente sea capaz de almacenar la máxima cantidad de aceite y sinterizarse de la mejor manera.

Los resultados obtenidos en el ensayo de optimización del proceso de sinterizado del Polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMW-PE) XM-220, se encuentran en uno de los apartados del Anexo del proyecto.

### **6.3.- Ensayo de duración del lubricante:**

#### **6.3.1.- Materiales utilizados:**

Para la realización de este ensayo, se han utilizado muestras de **diferentes materiales absorbentes** (pastillas de material poroso) para realizar una comparativa entre ellos respecto a la duración del lubricante con el que se han impregnado. Se han empleado 5 materiales distintos para realizar la comparativa de su comportamiento debido al gasto de lubricante por fricción y presión

Los materiales de los que se parte para, posteriormente, obtener las diferentes muestras objeto del ensayo son los siguientes:

- **Capilub** (suministrado por **Thodacom**): se suministra en láminas de 6 mm de espesor.
- **PE XS-99480** (suministrado por **Porex**): se suministra en láminas de 3 mm de espesor. El tamaño de las partículas es de 7-12  $\mu\text{m}$ .

- **Polifilter PF01** (suministrado por **Polifluor**): se suministra en láminas de 7 mm de espesor. Tiene las siguientes características:

CARACTERÍSTICAS DEL Polifilter PE 01	
Material	<b>POLIFILTER PE01</b>
Tipo de material	<b>UHMW-PE</b>
Peso molecular	<b>9,2 millones g/mol</b>
Espesor pared	<b>3,2 mm</b>
Densidad (material procesado)	<b>550 ± 20 kg/m<sup>3</sup></b>
% de porosidad	<b>41 ± 2 %</b>
Tamaño de grano	<b>65 µm</b>
Tamaño de partícula máximo	<b>10 - 25 µm</b>
Caudal (generado con una pérdida de presión de 3,5 bar sobre una superficie de 700 mm <sup>2</sup> )	<b>138 litros/hora</b>

Tabla 7: Características Polifilter PE 01

- **UHMW-PE XM-220** (suministrado por **Mitsui Chemicals**): se suministra en forma de polvo. Tiene un tamaño medio de partícula de 30 µm. Es un tipo de Polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMW-PE) fabricado por Michui Chemicals. Es el **material con el que se está trabajando para este proyecto**. Se quiere comparar con el resto para ver si es mejor que los que ya había probado Eisenor y si su funcionamiento se asemeja con el de IKO que ya se sabe que funciona.
- Material utilizado por la competencia (**IKO**): Es el **material que se usa de referencia**. No se conocen apenas sus características por ser una patente de la competencia, ya que esta marca comercial ya dispone de un “patín de rodadura” sin engrase compacto con recirculación de bolas. Se cree que se trata de Polietileno de ultra alto peso molecular (UHME-PE).

No se dispone de mucha información al respecto de estos materiales. Al ser materiales creados por cada marca, los suministradores no aportan muchos datos al respecto. Al tratarse todos ellos de materiales absorbentes o porosos, cumplen con el desempeño de capilaridad necesario para la aplicación que se busca en este proyecto, autolubricación. Se cree que se trata de diferentes Polietilenos de ultra elevado peso molecular (UHMW-PE) con diferentes características dependiendo de la marca que lo suministra.

En lo que respecta al **material de IKO**, es el que se ha tomado como referencia para desarrollar este proyecto. Aunque no es exactamente el producto que se va a desarrollar, es el producto en el que se

ha apoyado el proyecto para saber que es una tecnología viable. El cliente que encomendó la realización de este proyecto, proporcionó información acerca del material con el que trabajaba IKO y dijo que se trataba de Polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMW-PE), de ahí que utilizáramos este material para el desarrollo de el "patín de rodadura" sin engrase.

Con el material **Capilub (Thodacon)**, se ha realizado un ensayo del consumo de aceite en los prototipos de patín sin engrase entre Mayo y Octubre del 2015 en un probador de la empresa Zayer. Se observó que el sistema funcionaba, pero se gastaba demasiado rápido, por lo que se optó por probar con materiales absorbentes de tamaño de poro más pequeño. Entonces, se adquirieron los materiales de **Polifilter PE01** y el **XM-220**. Al conocer estos datos del Capilub (Thodacon), también servirá como comparativa con el material que se está utilizando para este proyecto, el XM-220.

### **6.3.2.- Descripción del ensayo:**

El objetivo del ensayo es la determinación de la velocidad de consumo de aceite en los prototipos de patines sin engrase para los diferentes materiales en estudio. El ensayo se ha realizado en un Banco de Pruebas, diseñado en este proyecto, en la empresa Eisenor durante aproximadamente 3 semanas.

El ensayo consiste en preparar varias muestras de los diferentes materiales absorbentes impregnados en aceite y simular su funcionamiento en el Banco de pruebas para obtener datos comparativos sobre el consumo del lubricante en cada material. Cada una de las muestras van ubicadas en el interior del habitáculo del Banco de pruebas llamado portapastillas, con la muesca de cada una de las pastillas orientada hacia abajo, hacia el rodillo para que haya fricción entre ellos y el dispositivo impregnado en aceite vaya consumiendo el lubricante. Las muestras están colocadas a lo largo de todo el rodillo pegando unas con otras.

En primer lugar, preparamos las muestras de los diferentes materiales. Las muestras están compuestas de la pastilla de material poroso, de cada uno de los materiales, ubicada en el lugar donde va a trabajar en el "patín de rodadura" sin engrase, en el cartucho portapastillas. Entonces, cada muestra estará constituida por la pastilla de material absorbente y su cartucho portapastillas.

El número de muestras a probar en este ensayo, condicionado por la longitud del rodillo del Banco de pruebas, es de 9 pastillas de material poroso. El contenido de cada una de ellas, se definirá en el siguiente apartado. Se numerarán todas las muestras y los elementos adicionales de cada una de ellas para tener controlado el proceso.

Para obtener el consumo de aceite de cada material, se necesitan los siguientes datos de partida:

- Peso del cartucho portapastillas (mochila) de cada muestra.
- Peso de cada una de las pastillas de material absorbente sin impregnar de lubricante.
- Peso de cada una de las pastillas de material absorbente impregnado con el lubricante.

- Peso TOTAL de cada muestra al iniciar el ensayo (Peso Pastilla impregnada + Peso Cartucho portapastillas).

Así pues, con estos datos se puede calcular el porcentaje de aceite inicial en peso que contiene cada una de las pastillas de material poroso. Este cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$\% \text{ Aceite inicial} = \frac{(\text{PESO PASTILLA IMPREGNADA} - \text{PESO PASTILLA SIN IMPREGNAR})}{\text{PESO PASTILLA IMPREGNADA}} \times 100$$

Los datos de partida del ensayo son los siguientes:

CONDICIONES INICIALES ENSAYO DURACIÓN DEL LUBRICANTE						
MATERIAL	MUESTRA	PESO MOCHILA (g)	PESO PASTILLA (SIN Aceite) (g)	PESO TOTAL (g)	PESO ACEITE (g)	% ACEITE
Capilub (Thodacon)	1	16,483	3,206	24,388	4,699	59,4
Porex / Polifluor	2	16,391	4,42	24,108	3,297	42,7
EISENOR 1	3	16,224	3,919	23,94	3,797	49,2
EISENOR 2	4	16,252	4,042	23,662	3,368	45,5
IKO	5	24,916	3,351	29,906	1,639	32,8
Capilub (Thodacon)	6	16,116	3,192	24,12	4,812	60,1
Porex / Polifluor	7	16,343	4,362	24,05	3,345	43,4
EISENOR 3	8	16,312	4,447	24,133	3,374	43,1
EISENOR 4	9	16,257	4,044	23,882	3,581	47,0

Tabla 8: Condiciones iniciales Ensayo de duración del lubricante

Con estos datos se pone en marcha el Banco de pruebas y se realiza un seguimiento diario. El seguimiento diario consiste en realizar un pesaje de cada una de las muestras (Peso pastilla Impregnada + Peso de cartucho portapastillas) después de haber estado funcionando durante varias horas. Se pesa directamente cada uno de los cartuchos portapastillas con la pastilla ubicada en su interior, así obtenemos el peso Total de la muestra.

Al disponer del Peso TOTAL INICIAL de cada muestra y el valor del pesaje diario, al hacer la diferencia entre ambos valores dará como resultado el peso de lubricante que ha consumido la pastilla de material poroso.

$$\text{Peso Aceite consumido} = \text{PESO TOTAL INICIAL} - \text{PESO TOTAL DIARIO}$$

Además, con este valor del peso de aceite consumido y el valor del peso del aceite que contenía la pastilla al iniciar el experimento, se calcula el porcentaje (%) de lubricante (aceite Mobil Vactra Nº 2) que ha consumido dicha pastilla.

**PESO ACEITE INICIAL = [PESO TOTAL INICIAL - (PESO CARTUCHO + PESO PASTILLA SIN IMPREGNAR)]**

Este cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$\% \text{ Aceite consumido} = \frac{\text{PESO TOTAL INICIAL} - \text{PESO TOTAL DIARIO}}{\text{PESO TOTAL INICIAL} - (\text{PESO CARTUCHO} + \text{PESO PASTILLA SIN IMPREGNAR})} \times 100$$

ó

$$\% \text{ Aceite consumido} = \frac{\text{PESO ACEITE CONSUMIDO}}{\text{PESO ACEITE INICIAL}} \times 100$$

En el registrador que tiene instalado el Banco de pruebas (Arduino), se registran: horas en funcionamiento del banco de pruebas, vueltas que da el rodillo (mediante un sensor Hall) y distancia recorrida por cada pastilla sobre el rodillo.

La distancia recorrida se calcula mediante la siguiente relación:

$$\text{Diámetro Rodillo} = 106 \text{ mm} = 0.106 \text{ m}$$

Con el diámetro podemos calcular el perímetro del rodillo:

$$\text{Perímetro} = 2 * \pi * R = 2 * \pi * (0.106 / 2 \text{ m}) = 0.333 \text{ m}$$

Esto quiere decir que por cada 3 vueltas que gire el Rodillo del Banco de pruebas, cada pastilla de material absorbente habrá recorrido 1 metro rozando con el rodillo.

Así pues, se conocerá además del consumo de aceite de la pastilla, las horas en funcionamiento y la distancia recorrida sobre el rodillo para ese consumo de lubricante.

### **6.3.3.- Muestras:**

En este ensayo se han analizado 9 muestras, de todos los materiales mencionados en el apartado 5.3.1. De cada uno de los materiales hay por lo menos 2 muestras, para que las conclusiones sacadas en el ensayo sean más fiables.

Como se ha mencionado en apartados anteriores, exceptuando el material XM-220 que se suministra en polvo, el resto se suministra en planchas de diferentes espesores por lo que para la preparación de las muestras se han realizado diferentes cortes para rellenar el cartucho portapastillas. Los cortes se han realizado 2 pequeños troqueles, uno de ellos con la forma de la muesca de la pastilla y el otro con forma cuadrada.

Hay 2 de las muestras que se componen de 2 de los materiales mencionados mezclados en un mismo cartucho. Las muestras se componen de **PE XS-99480** (Porex) y **Polifilter PF01** (Polifluor) en un mismo cartucho. El resto de las muestras son de un único material por cartucho.

Las muestras son las siguientes: 2 muestras de **Capilub** (Thodacom), 2 muestras de (**PE XS-99480** y **Polifilter PF01**), una muestra del material de referencia de **IKO** y por último 4 muestras del material utilizado en este proyecto para su validación **XM-220**, con diferentes porcentajes de aceite.

La ubicación de cada una de las muestras es en orden del número de muestra, empezando desde un extremo del rodillo del Banco de pruebas y acabando en el otro.

La composición de las muestras es la siguiente:

- **Muestra 1:** Capilub (Thodacon)

Al suministrarse en placas de 6 mm de espesor, se realizan varios cortes. La muestra se compone de un corte cuadrado de base y encima de este se colocan el resto. Hay un corte central con la muesca y varios cortes para rellenar los laterales. Uno de estos recortes laterales, está dividido a la mitad de su espesor para completar ambos lados y que no sobresalgan los laterales de la muestra más que la muesca de contacto. Además, se introduce una chapita para que ejerza presión y no se salga la muestra del cartucho. Se compone de:

- 1 x Back insert.
- 1 x Central insert.
- 5 x Lateral insert.
- 1 x Chapita de 20x20x1 mm.



*Ilustración 64: Recortes para preparar muestra de Capilub*

- **Muestra 2:** PE XS-99480 y Polifilter PF01.

Esta muestra se compone de 2 recortes centrales con la forma de la muesca de PE XS-99480 (3 mm de espesor cada uno) y 2 recortes laterales de Polifilter PF01, ubicados en cada uno de los laterales de los recortes centrales, de 7 mm de espesor. Se compone de:

- 2 x Central insert (PE XS-99480)
- 2 x Lateral insert (Polifilter PF01)

- **Muestra 3:** XM-220 (Muestra 1 Eisenor)

Como se ha explicado en el apartado 5.2.2. del Proceso de producción, las muestras de este material se sinterizan en un molde y la pastilla que da forma en un único bloque, sin recortes. Todas las muestras de este material se realizan de este modo. Se trata de una muestra sinterizada el 29/04/2016 con un 49.1 % de aceite. Se puede comprobar el resto de datos en el apartado del Anexo de Ensayos de sinterización.

- **Muestra 4:** XM-220 (Muestra 2 Eisenor)

Se trata de una muestra sinterizada el 16/05/2016 con un 45.7 % de aceite. Se puede comprobar el resto de datos en el apartado del Anexo Ensayos de sinterización.

- **Muestra 5:** Muestra de referencia IKO.

Para la preparación de esta muestra se compró un patín de la marca IKO y se utilizó una de las pastillas que incorpora este patín para su elaboración. Como tiene una forma caprichosa se tuvieron que realizar varios cortes y rellenar los huecos que quedaban con recortes de teflón.

- **Muestra 6:** Capilub (Thodacon)

Preparación de la muestra de manera similar que la anterior de este material. Se compone de:

- 1 x Back insert.
- 1 x Central insert.
- 5 x Lateral insert.
- 1 x Chapita de 20x20x1 mm.

- **Muestra 7:** PE XS-99480 y Polifilter PF01.

Preparación de la muestra de manera similar que la anterior de este material. Se compone de:

- 2 x Central insert (PE XS-99480).
- 2 x Lateral insert (Polifilter PF01).

- **Muestra 8:** XM-220 (Muestra 3 Eisenor)

Se trata de una muestra sinterizada el 06/05/2016 B con un 41.9 % de aceite. Se puede comprobar el resto de datos en el apartado del Anexo Ensayos de sinterización.

- **Muestra 9:** XM-220 (Muestra 4 Eisenor)

Se trata de una muestra sinterizada el 09/05/2016 con un 46.7 % de aceite. Se puede comprobar el resto de datos en el apartado del Anexo Ensayos de sinterización.

### **6.3.4.- Resultados obtenidos:**

Los resultados obtenidos en el ensayo de duración del lubricante se muestran en uno de los apartados del Anexo.

## **6.4.- Equipos utilizados:**

### **6.4.1.- Equipos utilizados en el proceso de producción:**

Para realizar el proceso de producción de los materiales absorbentes, se han utilizado varios equipos. A continuación, se mencionan los más importantes:

- **Estufa de desecación:**

El horno empleado en el proceso de sinterizado del material polimérico en polvo se trata de una estufa de desecación de la marca HERMI.

El horno de laboratorio es un tipo de horno comúnmente usado para deshidratar reactivos de laboratorio o secar instrumentos, aunque en este caso se utiliza para el sinterizado del material poroso. El horno aumenta su temperatura gradualmente conforme pasa el tiempo, así como también sea su programación, cuando la temperatura sea la óptima y se estabilice, el termostato mantendrá la temperatura; si esta desciende volverá a activar las resistencias para obtener la temperatura programada; posee un termómetro de control que muestra la temperatura real dentro del horno, está montado al frente para su fácil lectura. Cuenta con dos perillas graduadas, una de las cuales regula la temperatura del horno y la otra la entrada del aire.



*Ilustración 65: Mandos de la estufa de desecación*

Tiene una capacidad de aproximadamente 30 litros. Está recubierto por múltiples capas de asbesto que impide que el calor llegue al exterior del instrumento y altere el experimento o dañe al operario. El horno funciona mediante resistencias eléctricas ubicadas en la parte inferior y los laterales de las paredes internas del horno. Estas resistencias se encuentran empotradas en paneles moldeados de fibra sobre tabique refractario. Cuenta con un pequeño cilindro montado en la parte superior como escape para una ventilación sencilla. Estos se encuentran recubiertos interiormente por tapones plásticos o de goma para evitar que escape calor de más o entre algún material extraño mientras permanecen abiertos. Estos en la parte externa del horno se encuentran protegidos por una pequeña laminita de acero la cual se desliza manualmente para abrir las ventilas o cerrarlas. Internamente, cuenta con bandejas donde poner los moldes.





*Ilustración 66: Estufa de desecación*

- **Moldes:**

Se han utilizado para la sinterización del Polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMW-PE), para la realización de la pastilla de material poroso, dos tipos de moldes.

El primero de ellos, está fabricado en acero. Consta de tres piezas, una central y otras dos que van atornilladas a esta mediante 4 tornillos, uno en cada esquina. Estas piezas laterales se sueltan para desmoldar la pieza de material absorbente una vez que se ha sinterizado. Esto es debido a que el molde no dispone de expulsores.



*Ilustración 67: Molde de acero*

El segundo de los moldes, está fabricado con hormigón polímero y una fina capa para dar un acabado de alta calidad de resina epoxi (Gelcoat). Dispone en su parte inferior de 4 expulsores para desmoldar la pastilla de material poroso. Este molde se realizó en la empresa para ver el comportamiento de este material.



*Ilustración 68: Molde de Hormigón polímero*

- **Báscula digital:**

Se trata de una báscula digital con una capacidad de 250 gramos. Dispone de un plato de pesado de acero inoxidable, una pantalla LED con iluminación interna y un rango de tara al 100 %.



*Ilustración 69: Báscula digital*

- **Máquina para hacer vacío:**

Consta de un recipiente en el que se introduce el elemento sobre el que se quiere hacer vacío y una bomba de vacío. Las bombas de vacío son aquellos dispositivos que se encargan de extraer moléculas de gas de un volumen sellado, formando un vacío parcial, también llegan a extraer sustancias no deseadas en el producto, sistema o proceso.

Las bombas de vacío de anillo líquido son bombas volumétricas rotativas con impulsores de paletas. Precisan para su funcionamiento de un líquido auxiliar, generalmente agua, que es el encargado de transmitir la energía de compresión de las paletas al gas.



*Ilustración 70: Bomba y líquido auxiliar*

El árbol y los rodets fijados al mismo son las únicas partes móviles, y no existen rozamientos con las partes fijas.

Los rodets están montados excéntricamente respecto al cuerpo de la bomba. Durante el funcionamiento el líquido auxiliar es centrifugado contra las paredes del cuerpo. Ello determina un volumen libre, de sección transversal en forma de luna, entre el núcleo del rodete y el anillo líquido. Este espacio actúa, por su forma específica, como cámara de aspiración creciente y como cámara de impulsión decreciente durante el giro del rodete. Los gases o vapores son aspirados o expulsados por lumbreras abiertas en las paredes laterales.

La función del líquido auxiliar es triple: formación del anillo líquido, evacuación del calor de compresión y cierre de los juegos funcionales.



*Ilustración 71: Recipiente en el que se hace vacío*

## **6.4.2.- Equipo utilizado en el ensayo de duración del lubricante:**

- **Banco de pruebas:**

### 1.- Introducción:

Para la realización del ensayo de duración del lubricante, a modo de comparativa sobre la velocidad de consumo del lubricante en los diferentes materiales porosos, se ha fabricado un mecanismo rotatorio accionado mediante un motor, Banco de pruebas, para observar cuál de los materiales bajo estudio es el más beneficioso para la autolubricación de los “patines de rodadura”.

El mecanismo consta de 9 piezas diferentes. El diseño de éstas se ha realizado con ayuda de un software parametrizado de diseño asistido por computadora de piezas tridimensionales llamado SolidEdge. Posteriormente se enviaron los planos de las diferentes piezas a una empresa externa de mecanizado para su realización mediante torno y fresadora.

Básicamente se trata de un soporte para un rodillo que va accionado mediante un motor con reductora Bonfiglioli BN63A4 sobre el cual apoyan las pastillas de material poroso y van lubricando y consumiendo el lubricante. El rodillo gira simulando el roce del tren de rodamientos cilíndricos del “patín de rodadura” con el polímero poroso. Así, dejando durante un tiempo prolongado el mecanismo funcionando, y secando el rastro de lubricante que van dejando las pastillas, comprobaremos cuál de las pastillas de polímero poroso es la más duradera.

Se divide en dos subconjuntos, la estructura (Base, Pieza 1, Pieza 2, Pieza 3, Rodillo, Rodamiento y Varillas de secado) que es la que da estabilidad al utillaje y por otro lado el “Portapastillas” (2 Pletinas laterales y Tapa) que es donde van ubicadas las pastillas de polímero poroso auto lubricante.

Además, se ha fabricado otra estructura con un eje paralelo al rodillo de acero del útil. Sobre este eje va montado un rollo de papel para limpiar el aceite que van soltando las pastillas de material polimérico. Con este sistema y con ayuda de unos tornillos que hacen presión sobre el eje, se va dosificando y regulando el paso del rollo de papel. Esto se realiza para acelerar el consumo de aceite y poder hacer varios ensayos.

### 2.- Componentes del Banco de Pruebas:

Como se ha mencionado anteriormente el mecanismo consta de 9 piezas mecanizadas que son: Base, Pieza 1, Pieza 2, Pieza 3, Rodillo, Pletina lateral, Tapa, Rodamiento y Varilla de secado. A continuación, se describirán cada una de ellas para ver sus singularidades y se adjuntarán los planos correspondientes y el plano del conjunto en uno de los Anexos del proyecto.

#### 2.1.- Base:

La placa Base tiene la misión de soportar el utillaje, apoyarlo sobre la mesa o superficie donde se coloque y absorber los esfuerzos que se producen durante el funcionamiento del útil.

El material empleado en su construcción es acero F 114 y tiene unas dimensiones de 300x600x20 mm. Tiene cuatro agujeros pasantes de diámetro 13 mm para alojar los tornillos que unirán esta pieza con la Pieza 1 y Pieza 3. Además, estos agujeros tienen cajeras de diámetro 20 mm para ubicar las cabezas de los tornillos de M12 para que no sobresalgan de la placa Base. La ubicación de estos agujeros está indicada en el plano correspondiente. Por otro lado, tiene cuatro agujeros de diámetro 8 mm, entre los agujeros mencionados anteriormente, con un ajuste de  $\varnothing 8 H7$  que con ayuda de unas guías hacen

que la Pieza 1 y 3 queden perpendiculares a esta al atornillarlas. Por último, tiene cuatro agujeros de M5 en las cuatro esquinas de la placa base, a 50 mm de ambos lados, sobre los cuales van atornilladas cuatro patas de goma para que asiente de la mejor manera posible en la superficie destinada a ello y evitar vibraciones.



*Ilustración 72: Base del banco de pruebas*

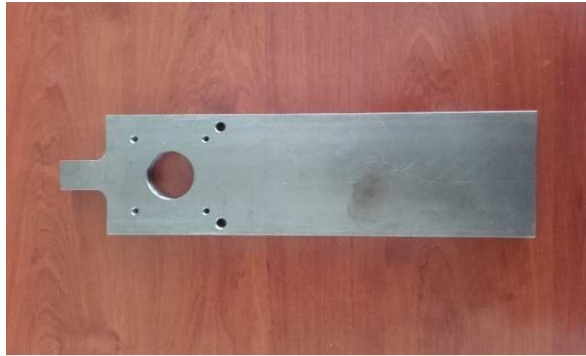
## 2.2.- Pieza 1:

Esta pieza tiene la misión de dar sujeción a la Pieza 2 y estabilidad al Rodillo.

La Pieza 1 está fabricada en acero F 114 y tiene unas dimensiones de 350x105x20 mm.

Tiene un agujero central en la parte superior de la pieza de diámetro 40 mm por el que pasa una sección del Rodillo para acoplarse al motor. Además, alrededor de este tiene 4 agujeros roscados separados 90° entre ellos de M6 para atornillar la Pieza 2 con ésta.

Descendiendo un poco nos encontramos 2 agujeros pasantes de diámetro 8 mm para ubicar unas varillas, que van de un extremo al otro del útil (de la Pieza 1 a la Pieza 3) paralelas a la base, para limpiar el lubricante del rodillo y así acelerar el proceso de vaciado del lubricante de las pastillas. En la parte superior de la pieza hay un saliente rectangular, acoplado mediante un radio de 10 mm para facilitar el mecanizado y evitar tensiones, del espesor de la pieza de 40x24,5 mm donde va sujetado el "portapastillas" (2 Pletinas laterales y la Tapa) mediante 3 agujeros roscados de M5. Por otro lado, en su cara inferior tiene 2 agujeros roscados de M 12 para anclar esta pieza a la Base. Por último, tiene dos agujeros de diámetro 8 mm con el objetivo de introducir dos guías para facilitar el atornillado a la Base y quede perpendicular a la esta, con un ajuste de  $\varnothing 8$  H7.



*Ilustración 73: Pieza 1 del banco de pruebas*

### 2.3.- Pieza 2:

El objetivo de esta pieza es el de sujetar el motor a la estructura de utillaje para que pueda acoplarse con el rodillo.

El material utilizado para su fabricación es acero F 114. Se trata de una pieza cilíndrica con un diámetro exterior de 105 mm y un agujero interior de diámetro 70 mm, con un espesor de 10 mm. Este diámetro interior debe tener precisión en la décima de milímetro ya que sobre el va sujetado el motor mediante unos resaltes ( $70^{+0,1}$  mm).

Por último, tiene 4 agujeros entre estos dos diámetros de 7 mm de diámetro, distanciados  $90^\circ$  entre ellos para anclar esta pieza sobre la Pieza 1.



*Ilustración 74: Pieza 2 del banco de pruebas*

### 2.4.- Pieza 3:

La misión de esta pieza es ubicar el rodamiento sobre el que irá apoyado el rodillo y alinearlos para que gire adecuadamente.

El material utilizado para su construcción es acero F 114. Sus dimensiones exteriores son idénticas a las de la pieza 1 (350x105x20 mm) con un saliente, acoplado mediante un radio de 10 mm para facilitar el mecanizado y evitar tensiones, en su parte superior (sobre el que va anclado el “portapastillas”

mediante 3 agujeros roscados de M5) de 40x24,5 mm del espesor de la pieza. En la mitad superior de la pieza hay un rebaje de 9 mm de profundidad y 32 mm de diámetro para ubicar el rodamiento. Este diámetro debe tener un ajuste de  $\varnothing 32 H7$  para que el rodamiento quede fijado en la pieza con precisión. En esta misma ubicación hay un agujero pasante desde el rebaje hasta el otro lado de la pieza de diámetro 16 mm para que atraviese un tramo del rodillo la Pieza 3 y que quede bien sujeto a la estructura.

Por otro lado, en su cara inferior tiene 2 agujeros roscados de M 12 para anclar esta pieza a la Base y dos agujeros de diámetro 8 mm con el objetivo de introducir dos guías para facilitar el atornillado a la Base y quede perpendicular a esta, con un ajuste de  $\varnothing 8 H7$ .



*Ilustración 75: Pieza 3 del banco de pruebas*

### 2.5.- Rodillo:

Este elemento del utillaje tiene como objetivo simular el funcionamiento de la cadena de rodillos cilíndricos del "patín de rodadura" a su paso por la pastilla de material poroso y así comprobar la duración del mismo.

El eje está fabricado en acero F 114. Se trata de un eje de revolución con tramos de diferentes diámetros.

Consta de un tramo central de 400 mm de longitud y 106 mm de diámetro sobre el cuál rozan las pastillas poliméricas. En un extremo de este tramo, hay una sección de 35 mm de longitud y diámetro 25 mm. En este tramo tiene un agujero interior de diámetro 14 mm con chavetera para alojar el eje del motor y que gire el rodillo solidario a éste. Este diámetro interior tiene que tener una buena precisión ( $14^{+0,05}$  mm) para que el rodillo no vibre y gire desequilibrado. En el otro extremo tiene un primer tramo de longitud 5 mm de diámetro 25 mm (lo que roza con la parte interior del rodamiento) y un segundo tramo de longitud 20 mm y diámetro 15 mm por donde se inserta el rodillo al rodamiento. Esta última sección tiene un agujero roscado de M8 para sujetar un imán y que por medio de un sensor de Hall contar las vueltas que da el rodillo.



*Ilustración 76: Rodillo del banco de pruebas*

### 2.6.- Pletina Lateral:

El objetivo de esta pieza es contener en su interior las pastillas de material poroso para que no se muevan cuando está el utillaje en funcionamiento.

La pieza está fabricada en acero F 114. Es una pieza rectangular con unas dimensiones de 450x40x8 mm. Tiene 2 agujeros pasantes de diámetro 6 mm para atornillar ésta a la Pieza 1 en un extremo y a la Pieza 3 en el otro extremo. Se acopla a estas piezas en el saliente que tienen ambas en su parte superior.

Por último, en la parte inferior de la pieza en ambos extremos tiene un rebaje para que no interfiera con el radio del saliente de las piezas 1 y 3 y no haya problemas al atornillarlas.



*Ilustración 77: Pletina lateral del banco de pruebas*



### 2.7.- Tapa:

La utilidad de este elemento es la de tapar el "portapastillas" y que mediante una esponja o goma haga presión sobre las pastillas para que rocen de manera óptima.

Está fabricada en acero F 114. Sus dimensiones son iguales que la Pletina lateral (450x40x8 mm). En cambio, esta tiene un rebaje por la parte inferior de la pieza para que asiente en el "portapastillas". Además, dispone de dos agujeros de diámetro 6 mm en sus extremos para atornillarla en el saliente de parte superior de la Pieza 1 y Pieza 3.



*Ilustración 78: Tapa del banco de pruebas*

### 2.8.- Rodamiento:

Es el encargado de que el rodillo gire sin problemas en el extremo contrario donde se acopla al motor.

Se trata de un elemento normalizado. Es un rodamiento TIMKEN 6002 2RS con dos tapas de obturación. Su diámetro interior es 15 mm, diámetro exterior 32 mm y una anchura de 9 mm.



*Ilustración 79: Rodamiento banco de pruebas*

### 2.9.- Motor:

Es el elemento encargado de accionar el rodillo y que este gire.

Se trata de un motor Bonfiglioli BN63A4 con reductora, con las siguientes características:

Bonfiglioli Group						
Made in Italy						
3 ~ Mot. BN63A4				No. 27402		
Cod. 830420150				IMB 14 IP 55		
V Δ/Y	I.CI. F	S 1			cos φ	
	Hz	kW	A Δ/Y	min-1		
230/400	50	0.12	0.88 - 0.51	1320	0.71	
460	60	0.14	0.50	1620		
220-240	VD	0.88-0.88	A	50Hz		47/55
380-415	VY	0.51-0.51	A	60Hz		CE
440-480	VY	0.50-0.51	A	60Hz		

*Ilustración 80: Características Motor banco de pruebas*

### 2.10.- Varillas para el secado:

La función de estas piezas es la de guiar y hacer pasar entre ellas y por debajo del rodillo un elemento de secado para que vaya recogiendo el aceite que van dejando las pastillas de material polimérico y acelerar el proceso de desgaste.

Se trata de unas varillas de 8 mm de diámetro y una longitud de 450 mm que van desde la Pieza 1 a la Pieza 3 horizontalmente. Permite sujetar los elementos de secado del rodillo y hacer rozar el papel de manera óptima para que el secado del rodillo sea uniforme.

### 2.11.- Estructura de secado:

Como su propio nombre indica es un útil para secar o limpiar el lubricante que van dejando las pastillas de material poroso sobre el rodillo y así acelerar el consumo de éste.

Se trata de una estructura con dos soportes verticales de metal sobre los que gira un eje sobre el que va insertado el rollo de papel para secar el rodillo. Tiene en ambos soportes un tornillo perpendicular al eje que al aplicarle presión frena o dosifica el paso del rollo de papel.



*Ilustración 81: Estructura de secado para el banco de pruebas*

### 2.12.- Ventilador:

Por último, se ha dotado al útil con un pequeño ventilador fijado mediante una pletina al motor para refrigerar el mismo, ya que funcionando todo el día se calienta en exceso.



*Ilustración 82: Ventilador banco de pruebas*

### 2.12.- Arduino:

Por último, para registrar los datos obtenidos en el banco de pruebas se ha utilizado un Arduino con un sensor Hall.

El Arduino es una placa de desarrollo que integra un microcontrolador y un entorno de desarrollo (IDE) diseñado para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios. Consta de una interfaz de entrada, que puede estar directamente unida a los *periféricos* o conectarse a ellos por puertos. El objetivo de esa interfaz de entrada es llevar la información al microcontrolador, la pieza encargada de procesar esos datos. El mentado microcontrolador varía dependiendo de las necesidades del proyecto en el que se desea usar la placa, y hay una buena variedad de fabricantes y versiones disponibles. Por último, tiene una interfaz de salida, que lleva la información procesada a los periféricos encargadas de hacer el uso final de esos datos, que en algunos casos puede bien tratarse de otra placa en la que se centralizará y procesará nuevamente la información, o sencillamente, por ejemplo, una pantalla o un altavoz encargada de *mostrar* la versión final de los datos.



*Ilustración 83: Arduino*

A éste se le conecta un lector de micro tarjetas SD para que se almacenen los datos del ensayo en una hoja de Excel. Además, se le conecta un sensor del Hall que con ayuda de un imán ubicado en el rodillo (extremo del rodamiento) cuenta las vueltas y la distancia recorrida por las pastillas de polímero a estudio. Este sensor es un dispositivo cuyo funcionamiento se basa en el efecto Hall para la detección o medición de campos magnéticos o corrientes y para la determinación de la posición en motores eléctricos y otros dispositivos.

Para programar la placa es necesario descargarse de la página web de Arduino el entorno de desarrollo (IDE). La estructura básica de programación de Arduino es bastante simple y divide la ejecución en dos partes: setup y loop. Setup constituye la preparación del programa y loop es la ejecución.

En este caso se ha programado para que muestre en una pantalla el número de vueltas que da el rodillo, la distancia recorrida y las horas de funcionamiento del útil. El programa del Arduino se muestra en uno de los Anexos del proyecto.

### 3.- Montaje:

El montaje del útil comienza insertando el rodamiento en la Pieza 2 y a continuación, insertar el extremo correspondiente del rodillo en el rodamiento y la Pieza 2. Seguidamente se introduce sin ajustarlo el extremo del rodillo, que se acopla al motor, en la Pieza 1. Esto se realiza en este orden debido a que, si atornillamos las Piezas 1 y 2 a la Base, no se podría colocar después el rodillo entre ellas.

A continuación, se atornillan las piezas 1 y 2 a la Base por su cara inferior mediante unos tornillos de M12. Después de que estas piezas estén bien ancladas, se procede a atornillar las Pletinas laterales a las piezas 1 y 2 mediante tornillos de M6, lo que confiere rigidez al utilaje.

Por último, se coloca el motor en la Pieza 2 haciendo coincidir los 4 agujeros de diámetro 7 mm y con ayuda de 4 tornillos de M6 se sujetan ambas piezas a la pieza 1.

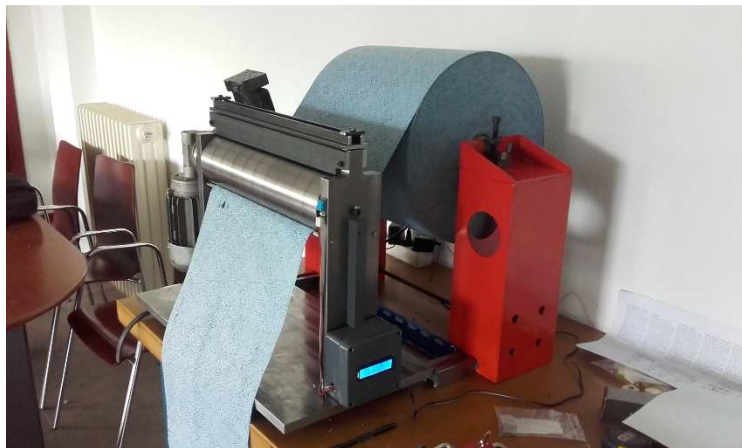
De este modo, el Banco de Pruebas queda completamente montado y preparado para realizar los ensayos pertinentes.

En la Ilustración 84, se puede apreciar el aspecto que tendría el Banco de Pruebas una vez montado.



*Ilustración 84: Banco de Pruebas*

A continuación, se muestra una imagen del Banco de Pruebas al completo, la estructura para simular el roce de el tren de rodamientos del "patín de rodadura" y la estructura de secado para retirar el lubricante que sueltan las pastillas y así acelerar el ensayo.



*Ilustración 85: Banco de pruebas funcionando*

## **7.- ANÁLISIS DE RESULTADOS:**

### **7.1.- Estudio de la optimización del proceso de sinterización:**

Los resultados obtenidos sobre la optimización del proceso de sinterizado se recogen en uno de los apartados del Anexo.

El estudio ha consistido en la sinterización en una estufa de desecación del Polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMW-PE), concretamente MIPELON XM-220, para realizar una pieza impregnada en lubricante que se destinará a la autolubricación del “patín de rodadura” de la empresa Eisenor S.A.

El sinterizado se lleva a cabo mediante el llenado de un molde con el material absorbente e introducido en una estufa de desecación para que sus partículas se unan entre sí consiguiendo la forma del molde, “pastilla” de material absorbente.

Para ello, se busca que dicho material almacene la máxima cantidad de lubricante en su interior. Así pues, se han ido modificando las diferentes variables del proceso hasta llegar a una “pastilla” de material poroso que sea capaz de acumular lubricante, el máximo posible, y a su vez esté bien sinterizado (homogéneo tanto interior como exteriormente, sin quedarse muy duro, etc). Todo ello intentando disminuir el tiempo de sinterizado al mínimo.

Las variables que se han modificado en el proceso son: Tiempo de sinterizado, temperatura del proceso y compactación de las muestras (diferentes presiones).

#### **7.1.1.- Tiempo de sinterizado:**

En cuanto a esta variable, Tiempo de sinterizado, se ha variado en este ensayo desde los 50 hasta los 105 minutos de sinterizado, obteniendo diferentes resultados.

Se ha observado que para un buen sinterizado es necesario un mínimo de 80 minutos, aunque dependiendo del resto de variables. Esto se cumple para una temperatura de 150°C, ya que con una temperatura menor o no se sinteriza o se queda blando en su interior.



*Ilustración 86: Pastilla sinterizada (blanda en el interior)*

Por ejemplo, se ha comprobado que el tiempo de sinterizado puede disminuir hasta los 60 minutos ejerciendo la presión máxima sobre el material absorbente en el molde, aunque luego se explicará porque no es la manera óptima.

### **7.1.2.- Temperatura del proceso de sinterizado:**

La Temperatura de sinterizado es una variable muy importante ya que, por debajo de la temperatura de fusión del material absorbente, este no se sinteriza.

Se han utilizado 3 temperaturas diferentes: 132 °C, 142 °C y 150 °C.

La primera de ellas, 132 °C, se desestima debido a que a esa temperatura el material poroso no se sinteriza, al menos en los tiempos de sinterizado que se han manejado en este ensayo (desde 50 minutos hasta 105 minutos).

A la temperatura de 142 °C y con un tiempo mínimo de sinterizado de 80 minutos, se aprecia que el material absorbente se sinteriza pero queda blando en su interior. Esto se podría solucionar aumentando el tiempo de sinterizado en 5 o 10 minutos.

En cuanto a la última temperatura utilizada, 150 °C, se observa que puede ser la temperatura óptima debido a que el tiempo de sinterizado se encuentra a 80 minutos y se sinteriza completamente la “pastilla” sin tener zonas blandas en su interior.

Concluir diciendo que a temperaturas mayores es posible que se quemen partes de la “pastilla” de material absorbente. En nuestro caso han salido varias “pastillas” que estaban bien sinterizadas, pero tenían la muesca de la pieza (parte más importante de la “pastilla”) quemada y debido a esto no salía el lubricante de la mejor forma, notándose que sacaba menos cantidad de lubricante.

### **7.1.3.- Compactación de las muestras (presión ejercida):**

Esta variable es fácil de analizar, debido a que las muestras de material absorbente que se han compactado pierden capacidad de acumulación de lubricante.

En un primer momento, se comprobó que al comprimir las muestras (ejercer presión sobre ellas), en mayor o menor medida, se disminuía notablemente el tiempo de sinterizado. A más presión, menor tiempo de sinterizado, hasta un mínimo de 60 minutos. Aun así, no compensaba ejercer presión sobre la muestra cuando el parámetro que más interesa, porcentaje de lubricante absorbido, se ve perjudicado.

Mientras en las muestras sin compactar se lograba una media aproximada del 45 % de lubricante en peso, en las muestras compactadas se consigue un máximo del 40 % de lubricante impregnado siendo más habitual rondar el 30 o 35 %.

Además, contra más presión se ejercía sobre la muestra, menos cantidad de lubricante almacenaba la muestra. Al compactar el material absorbente se disminuye el hueco entre las partículas, disminuyendo así el hueco en el que se inserta el lubricante. Esto es debido a que, al compactar el material se tiene la misma cantidad de polvo de material absorbente, aunque en un volumen mucho menor (dependiendo de la presión). Se observa que el uso de una mayor presión de compactación da lugar a una importante reducción de la porosidad superficial.

#### **7.1.4.- Otros aspectos:**

Además de las variables comentadas anteriormente, hay otros aspectos que también tienen importancia a la hora de optimizar el proceso de sinterización.

Uno de ellos es la utilización de una tapa de acero, que cubre toda la parte superior, para tapar el molde una vez lleno a la hora del proceso de sinterizado. Con esto se ha evidenciado, que dicha tapa conduce el calor y con ello le aporta calor al material poroso y evita que este se escape de su interior, disminuyendo los tiempos de sinterizado. Se ha comprobado que en alguna muestra que se ha sinterizado sin tapa, o no se sinterizaba en el tiempo que se había estado manejando hasta el momento o quedaba blando en su interior.

Por último, decir que las condiciones que parecen ser las óptimas para lograr la “pastilla” de material absorbente con la máxima cantidad de lubricante y que se haya sinterizado totalmente (sin zonas blandas en su interior) son:

- Utilización de tapa para el molde (se ha utilizado de acero).
- Tiempo de sinterizado → **80 minutos**.
- Temperatura de sinterizado → **150 °C**.
- Compactación del material absorbente (Presión ejercida) → **Sin Presión**.

Para concluir, se ha verificado en el ensayo de duración del lubricante que, aunque quede la “pastilla” blanda por adentro, se comporta de forma similar al resto de muestras bien sinterizadas en lo que respecta a la velocidad de consumo del lubricante. Lo importante es que el exterior de la pieza de material poroso se encuentre bien sinterizado, sin quemaduras y sin estar duro en su contorno exterior. Esto es debido a que si el exterior de la muestra, haciendo especial hincapié en la muesca de la pieza que es la encargada de suministrar el lubricante, está en buenas condiciones (sin quemaduras por altas temperaturas y largos periodos de sinterizado), el material absorbente dosificará el paso de lubricante de manera óptima. Además, parece que las muestras con el interior blando, observado en el desarrollo experimental, acumulan mayor cantidad de lubricante en su interior, llegando varias de ellas hasta un 50 o 51 % de lubricante en peso.

#### **7.2.- Estudio de la duración del lubricante:**

Los resultados obtenidos en este estudio se encuentran registrados en uno de los apartados del Anexo del proyecto.

En este estudio se ha analizado el ritmo o velocidad de consumo de los diferentes materiales absorbentes. Esto se ha llevado a cabo mediante un Banco de pruebas, explicado su funcionamiento en el apartado 6.4.2.- del proyecto.

El estudio ha consistido en realizar un test acelerado con 9 muestras, descrito en el apartado 6.3.- del proyecto, para realizar una comparativa entre las diferentes muestras de la velocidad de consumo del lubricante en cada uno de los materiales. El objetivo del ensayo es observar cómo se comportan las muestras sinterizadas en este proyecto, material MIPELON XM-220, en relación con el resto de materiales.

Sobre todo, se comparará con la muestra número 5, esta es la correspondiente a la empresa japonesa IKO. Es la muestra que se ha tomado como referencia para la comparativa de este



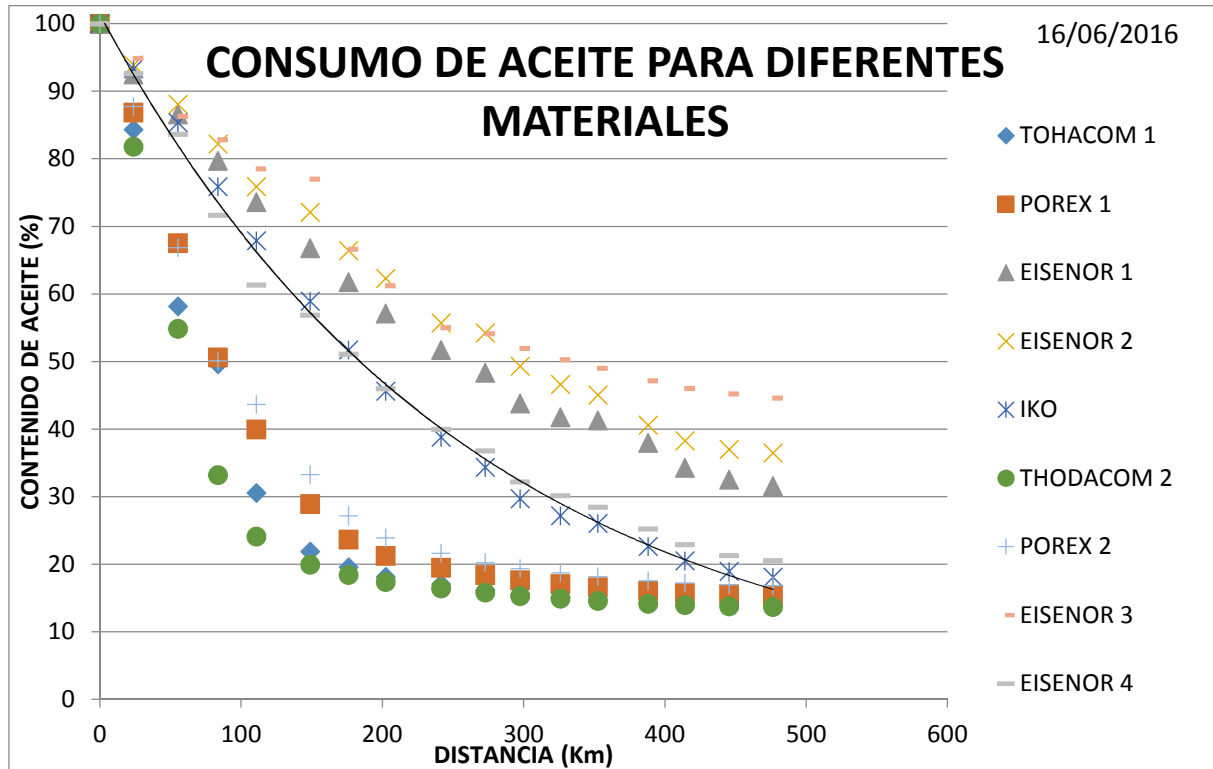
proyecto, ya que está testado su funcionamiento. Esta empresa comercializa otro tipo de patín sin engrase con el sistema de lubricación al que nos queremos asemejar. Aseguran que su sistema de autolubricación aguanta 20000 Km, lo que se asemeja a la vida de una máquina herramienta.

Además, se tendrá también especial atención a las muestras de material CAPILUB (Thodacon), ya que la empresa que encargó este proyecto, Zayer, realizó ensayos en un probador con este material que había desarrollado Eisenor y validaron el resultado, aunque aguantaba pocos kilómetros (Aproximadamente 1000 Km).

Con este ensayo se quiere comprobar que el material absorbente que se está utilizando para este proyecto se comporta de manera similar al material de IKO y mejora las prestaciones del material CAPILUB (Thodacon).

El estudio se ha prolongado hasta que las muestras han recorrido una distancia de aproximadamente 500 Km. Se dio por concluido el ensayo debido a que había materiales a los que les quedaba menos del 20 % de lubricante en su interior y apenas lubricaban. Se trata de un ensayo acelerado debido a que se iba retirando el lubricante que iban soltando las muestras. Se limpiaba simultáneamente con un sistema de secado que consistía en un rollo de papel absorbente que iba rozando el rodillo del Banco de pruebas por su parte inferior (explicado en el apartado 6.3.- del proyecto).

A continuación, se muestra una gráfica (Contenido de aceite-Distancia) realizada con los datos obtenidos en el estudio del consumo de lubricante de los diferentes materiales:



En primer lugar, decir que la forma ideal de consumo del lubricante por parte de los diferentes materiales se asemejaría a una función lineal, ya que esto significaría que durante la vida de los diferentes materiales absorbentes siempre lubricaría la misma cantidad hasta que se acabara el lubricante.

La realidad es que se asemeja a una función exponencial, como se puede observar en la muestra de IKO donde se ha insertado una línea de tendencia exponencial. El fabricante IKO asegura que el consumo de sus patines autolubricados sigue una tendencia exponencial.

Observando en la gráfica el resto de las muestras, se puede concluir que la tendencia de consumo de lubricante se asemeja a la muestra de IKO aunque a otros ritmos de consumo. Con lo que el resto de muestras también consumen el lubricante asemejándose a una función exponencial. En la tendencia de estos materiales, hay pequeños saltos en la gráfica y esto puede ser debido a que ha habido días en el ensayo en los cuales el papel absorbente de secado ha avanzado más despacio, con lo que ello conlleva que no limpia de manera óptima el rodillo y las pastillas de material absorbente vuelven a coger parte de ese lubricante que queda por el rodillo.

Se pueden diferenciar 3 zonas en el gráfico. En primer lugar, las muestras de CAPILUB (Thodacon) y POLIFILTER (Porex), que son las muestras que a mayor velocidad consumen el lubricante. En segundo lugar, 3 de las muestras de Eisenor (MIPELON XM-220) que son las que menor velocidad de consumo poseen. Por último, se encuentran la muestra de IKO y una de las muestras de Eisenor (Eisenor 4), que se encuentran entre las dos anteriores en cuanto a consumo de lubricante.

Con respecto a las muestras de CAPILUB y POLIFILTER, decir que el consumo es muy similar, se solapan entre ellas. En un primer momento consumen a gran velocidad, estabilizándose a falta de un 20 % de lubricante.

Por otro lado, las muestras sinterizadas en este proyecto con MIPELON XM-220 (Eisenor) se asemejan bastante entre ellas, aunque hay unas de las muestras (Eisenor 4) que se distancia de estas y se acerca al comportamiento de la muestra de IKO.

A continuación, se van a exponer los motivos por los cuales se distribuyen cada una de las muestras en las diferentes zonas de la gráfica.

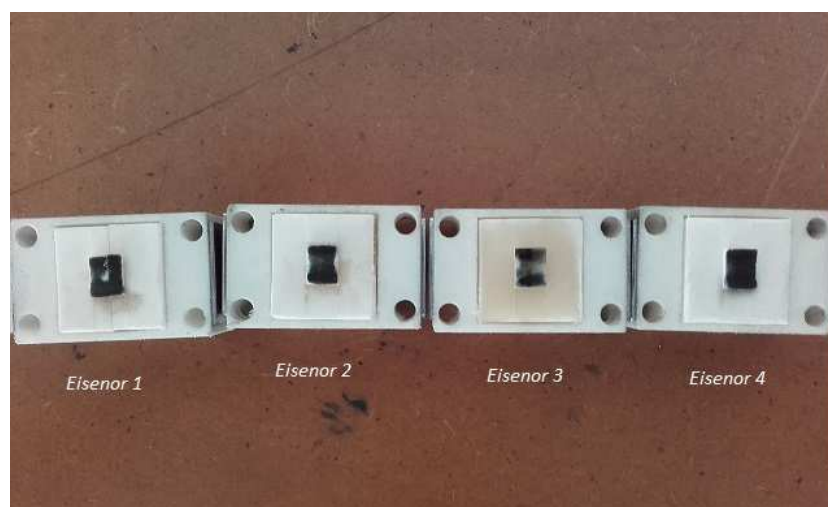
Las muestras se dividen en estas 3 zonas debido a su porosidad. A mayor tamaño de poro, mayor consumo de lubricante. Así pues, los materiales de CAPILUB y POLIFILTER son las muestras que mayor tamaño de poro poseen, asemejándose mucho entre ellas, ya que prácticamente se solapan sus consumos y las muestras de MIPELON XM-220 son las que menor tamaño de poro poseen, de ahí su menor consumo.

Esto está directamente relacionado con el tamaño de partícula de cada material. La granoselección (selección del tamaño de partículas) incide en el valor de la porosidad, cuanto mejor sea la selección de tamaño (cuanto más homogéneo sea el tamaño de las partículas) más porosas serán, puesto que en caso contrario las partículas más pequeñas ocupan parte de los poros.

Esto hace indicar que en las muestras de CAPILUB y POREX la distribución de los tamaños de partículas es más homogéneo y el tamaño de sus partículas mayor, dejando huecos de mayor tamaño entre ellas (poros mayores). Debido a esto y a su consumo demasiado elevado, se optó por elegir materiales con tamaño de partículas menor (MIPELON XM-220) y con ello menor tamaño de poro, para que el consumo fuera menor.

Después de dar los votivos por los que se encuentran las muestras de cada material en una zona de consumo en la gráfica, se van a dar los motivos por los cuales las muestras de MIPELON XM-220 (Eisenor) no están tan solapadas como las del resto de los diferentes materiales. Al ser las muestras del mismo material, su comportamiento debería ser similar. Hay 2 muestras que se asemejan bastante (Eisenor 1 y Eisenor 2), pero otras dos que se alejan de este comportamiento (Eisenor 3 y Eisenor 4).

Como se ha comentado, el comportamiento de estas 4 muestras debería ser similar, pero se ha observado que el área de contacto de cada una de las muestras con el rodillo del Banco de pruebas es diferente. Como se puede apreciar en la Ilustración 87, la muestra de Eisenor 3 es la que menor área de contacto (zona negra en la muesca de la “pastilla”) tiene y de ahí su menor consumo.



*Ilustración 87: Muestras de MIPELON XM-220 utilizadas en el ensayo*

Además, se puede observar en la ilustración anterior que las muestras de Eisenor 1 y Eisenor 2 tampoco contactan con la totalidad de la muesca sobre el rodillo, por ello son las muestras que se encuentran más próximas en cuanto a consumo entre sí, aunque menor que la muestra Eisenor 4. La muestra Eisenor 4, es la que más se aproxima de las 4 muestras a la muestra que se ha tomado como referencia para este proyecto (IKO), con lo que parece esperanzador debido a que contacta con la totalidad de la muesca con el rodillo, lo que parece augurar que el consumo de ambos materiales puede ser similar.

Para concluir con el análisis de los resultados del ensayo de consumo de lubricante, decir que parece que si todas las muestras de MIPELON XM-220 (Eisenor) contactarían con la totalidad de la muesca sobre el rodillo, se aproximarían en gran medida al consumo de la muestra de referencia.

Esto quiere decir que el material empleado para este proyecto parece ser el adecuado para la autolubricación del “patín de rodadura” sin engrase, ya que se asemeja al consumo de la muestra de IKO que ya está testado y en el mercado y mejora las prestaciones de los materiales probados con anterioridad (CAPILUB).

## **8.- CONCLUSIONES:**

Comenzar diciendo que el material estudiado en este proyecto, Polietileno de ultra alto peso molecular (MIPELON XM-220), para la autolubricación del “patín de rodadura” sin engrase de Eisenor, parece ser el adecuado para esta aplicación. Se ha llegado a esta conclusión por los siguientes motivos:

En primer lugar, decir que se verificó en el ensayo de optimización del proceso de sinterizado que este material poroso (MIPELON XM-220) era capaz de almacenar en su interior entre el 40 y 50 % de su volumen de lubricante. Esto es importante debido a que al no disponer de lubricación exterior y no poder modificar en gran medida el tamaño del patín, se necesita un dispositivo de autolubricación que almacene la mayor cantidad de lubricante posible en un volumen pequeño. Por ejemplo, el dispositivo de autolubricación utilizado para sus patines por la empresa de la competencia (IKO), almacena en torno al 38 % del volumen de material absorbente de lubricante. Esto nos hace ser optimistas respecto a nuestro material, ya que almacena una cantidad significativamente superior al del material de la competencia.

En segundo lugar, en cuanto al consumo de lubricante, parece que el material utilizado se aproxima al material testado y ya en mercado de la competencia, como se ha observado en el ensayo de duración del lubricante. Esto se cumple cuando el área de la muesca de la “pastilla” que lubrica el tren de rodillos cilíndricos contacta en su totalidad con el rodillo del Banco de pruebas. Además, mejora el rendimiento del material probado con anterioridad por la empresa Eisenor (CAPILUB). Así pues, parece que la porosidad y el tamaño medio de las partículas (30  $\mu\text{m}$ ) del material empleado cumplen con las expectativas depositadas, ya que el consumo se aproxima al del material poroso de IKO.

Por otra parte, aunque el consumo parezca que es el adecuado debido a que se aproxima al de la competencia, han aparecido problemas porque al tratarse de lubricación Elastohidrodinámica, el espesor de la película lubricante es muy pequeño y no estamos seguros de que sea suficiente. Al tratarse de un espesor del orden de unas pocas micras o menos, aparece la imposibilidad de medir esta capa de lubricante con el equipo que se dispone en la empresa.

La duración del lubricante que estima la competencia para su sistema de autolubricación es de 20000 Km, lo que supone prácticamente la vida completa de cualquier máquina herramienta. Con los resultados obtenidos en el ensayo de consumo de lubricante, se podría decir que el sistema diseñado en este proyecto parece tener la misma duración o muy parecida. Esto no se puede asegurar porque haría falta realizar una simulación de su funcionamiento en condiciones reales para verificar que se comporta de manera similar al de la competencia.

En cuanto a los cálculos realizados para saber con certeza en el régimen de lubricación que se está trabajando en el contacto del “patín de rodadura” con la guía lineal de Eisenor, decir que se ha llegado a la conclusión de que se trata de lubricación Elastohidrodinámica. Según el cálculo del parámetro  $\left(\frac{\eta \cdot N}{P}\right) = 2.9 \cdot 10^{-9}$ , el régimen se encuentra entre lubricación Límite y lubricación Elastohidrodinámica, pero el valor de la presión máxima de Hertz ( $P_{MÁX} = 2485.357 \text{ MPa} = 2.485 \text{ GPa}$ ) indica debido a su orden de magnitud (GPa) que nos encontramos en la zona Elastohidrodinámica. Al ser la presión ejercida bastante mayor que el límite elástico del acero ( $2.08 \cdot 10^{11} \text{ MPa}$ ), hay un fenómeno de Tensiones de Contacto.

Además, en el cálculo del espesor mínimo de película lubricante para lubricación Elastohidrodinámica en contacto puntual da un resultado de 0.06  $\mu\text{m}$  de espesor mínimo de película lubricante, que se encuentra dentro del rango de espesores de lubricación Elastohidrodinámica (0.05-1  $\mu\text{m}$ ).

La lubricación Elastohidrodinámica (EHD) tiene lugar en elementos que ruedan entre sí o con respecto a una superficie plana. El aumento de la viscosidad del aceite, debido a la presión; y el aplastamiento de la superficie, se combina para “atrapar” el lubricante en el momento en que éste penetra en la zona de contacto. El espesor mínimo de película lubricante oscila entre 0.05 y 2  $\mu\text{m}$  y es menor que en el caso de la teoría clásica hidrodinámica. La viscosidad del aceite puede llegar a límites de magnitud mayor que la viscosidad de entrada y la película lubricante puede desarrollar presiones hasta 360000 psi.

Al ser el espesor mínimo de película muy pequeño el grado de acabado de las guías y los rodillos debe ser muy bueno (rectificado, pulido) para que no se destruya la capa límite.

Al tratarse de lubricación Elastohidrodinámica, se recomienda el uso de lubricantes sintéticos. En nuestro caso se trata de aceite lubricante Mobil Vactra Nº2 a petición del cliente que encargó el proyecto a la empresa Eisenor, debido a que nos informó que se trataba del mismo aceite que utilizaba la competencia IKO.

## **9.- ANEXOS:**

### **9.1.- Resultados del ensayo de optimización del proceso de sinterizado:**

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de optimización del proceso de sinterizado del material absorbente MIPELON XM-220.

Como se ha comentado en el apartado 6.2.- del proyecto, se han realizado varios ensayos variando las variables de sinterizado para conseguir la sinterización óptima.

Las variables que se han ido cambiando y se han registrado en el siguiente documento son: Temperatura de sinterización ( $T^{\circ}$  Horno), el tiempo de sinterización y la compactación de las muestras (presión ejercida). Además, se recoge una breve descripción del resultado de la sinterización de cada una de las muestras.

ENSAYOS SINTERIZACIÓN UHMWPE (MIPELON XM-220)										
Nº Muestra	Fecha	Tª Horno	Tiempo Sinterizado	Presión	Peso SIN Aceite	Peso TOTAL (Aceite+Polímero)		% ACEITE	Observaciones	Tapa
1	04/04/2016	150 °C	80 min	0	3,958 g	7,646 g		48,2 %	BIEN SINTERIZADO	TOCHO DE ACERO como tapa
2	04/05/2016	150 °C	80 min	0	4,080 g	7,427 g		45,1 %	BIEN SINTERIZADO	
3	04/06/2016	150 °C	80 min	Presión Mínima	4,064 g	7,586 g		46,4 %	BIEN SINTERIZADO	
4	04/07/2016	150 °C	80 min	Presión MÁXIMA	3,884 g	5,754 g		32,5 %	Muy Duro. Se ha pegado el taco de hierro al polímero	
5	04/08/2016	150 °C	60 min	Presión MÁXIMA	3,922 g	5,847 g		32,9 %	Muy Duro. Se ha pegado el taco de hierro al polímero	
6	04/11/2016	150 °C	60 min	0	NO SE HA SINTERIZADO				Poco tiempo para sinterizar sin presión	
7	04/12/2016	150 °C	60 min	Presión Mínima	NO SE HA SINTERIZADO				Poco tiempo para la presión ejercida	
8	13/4/2016	150 °C	60 min	Presión MÁXIMA	3,497 g	5,898 g	40,7 %	BIEN SINTERIZADO		
9	14/4/2016	150 °C	50 min	Presión intermedia	NO SE HA SINTERIZADO				Muy poco tiempo de sinterizado	
10				Presión Mínima					Muy poco tiempo de sinterizado	

ENSAYOS SINTERIZACIÓN UHMWPE (MIPELON XM-220)									
Nº Muestra	Fecha	Tº Horno	Tiempo Sinterizado	Presión	Peso SIN Aceite	Peso TOTAL (Aceite+Polímero)	% ACEITE	Observaciones	Tapa
11	15/4/2016	150 ºC	50 min	Presión Mínima	NO SE HA SINTERIZADO			Muy poco tiempo de sinterizado	TOCHO DE ACERO como tapa
12	18/4/2016	150 ºC	60 min	Presión intermedia	NO SE HA SINTERIZADO			Muy poco tiempo de sinterizado para la presión ejercida	
13				Presión intermedia					
14	19/4/2016	150 ºC	60 min	Presión intermedia	NO SE HA SINTERIZADO			Muy poco tiempo Sint. para la presión ejercida	
15			70 min	Presión intermedia	3,984 g	6,730 g	40,8 %	Muy BLANDO	
16	20/4/2016	150 ºC	70 min	Presión intermedia	4,025 g	6,737 g	40,2 %	Muy BLANDO	
17				Presión intermedia	3,975 g	6,441 g	38,3 %	BLANDO en el centro	SIN tocho de ACERO como tapa
18	21/4/2016	150 ºC	80 min	Presión intermedia	3,847 g	6,653 g	42,2 %	Muy BLANDO	
19				Presión intermedia	3,787 g	6,559 g	42,3 %	Muy BLANDO	
20	22/4/2016	150 ºC	80 min	0	3,734 g	7,748 g	51,8 %	Muy BLANDO	
21				0	4,063 g	7,691 g	47,2 %	Muy BLANDO	



ENSAYOS SINTERIZACIÓN UHMWPE (MIPELON XM-220)									
Nº Muestra	Fecha	Tª Horno	Tiempo Sinterizado	Presión	Peso SIN Aceite	Peso TOTAL (Aceite+Polímero)	% ACEITE	Observaciones	Tapa
22	25/4/2016	150 °C	80 min	0	3,996 g	7,819 g	48,9 %	Muy BLANDO	SIN tocho de ACERO como tapa
23	26/4/2016	150 °C	80 min	0	4,037 g	7,694 g	47,5 %	Muy BLANDO	
24				0	4,011 g	7,708 g	47,9 %	Muy BLANDO	
25	27/4/2016	132 °C	80 min	0	NO SE HA SINTERIZADO		Temperatura muy baja para sinterizado		
26	28/4/2016	142 °C	105 min	0	3,852 g	7,749 g	50,3 %	Muy BLANDO	
27	29/4/2016	150 °C	80 min	0	3,919 g	7,698 g	49,1 %	Muestra 1 EISENOR Muy BLANDO	
28	05/02/2016	150 °C	80 min	0	3,934 g	7,607 g	48,3 %	Muy BLANDO	
29				0	3,973 g	7,563 g	47,5 %	Muy BLANDO	
30	05/03/2016	150 °C	80 min	0	3,923 g	7,405 g	47%	<b>BIEN SINTERIZADO (Perfecto)</b>	TOCHO DE ACERO como tapa
31	05/04/2016	150 °C	80 min	0	3,868 g	7,245 g	46,6 %	<b>BIEN SINTERIZADO</b>	

**ENSAYOS SINTERIZACIÓN UHMWPE (MIPELON XM-220)**

Nº Muestra	Fecha	Tª Horno	Tiempo Sinterizado	Presión	Peso SIN Aceite	Peso TOTAL (Aceite+Polímero)	% ACEITE	Observaciones	Tapa
32	05/05/2016	150 °C	86 min	0	4,016 g	7,608 g	47,2 %	<b>BIEN SINTERIZADO</b>	<b>TOCHO DE ACERO como tapa</b>
33			80 min	0	4,255 g	7,658 g	44,4 %	<b>BIEN SINTERIZADO</b>	
34	05/06/2016	150 °C	80 min	0	3,908 g	7,478 g	47,7 %	<b>BIEN SINTERIZADO</b>	
35				0	4,447 g	7,649 g	41,9 %	<b>Muestra 3 EISENOR BIEN SINTERIZADO</b>	
36	05/09/2016	150 °C	80 min	0	4,044 g	7,590 g	46,7 %	<b>Muestra 4 EISENOR BIEN SINTERIZADO</b>	
37	05/10/2016	150 °C	80 min	0	4,080 g	7,747 g	47,3 %	<b>BIEN SINTERIZADO (Perfecto)</b>	
38	05/11/2016	150 °C	80 min	0	4,064 g	7,615 g	46,6 %	<b>BIEN SINTERIZADO (Perfecto)</b>	
39				0	4,296 g	7,644 g	43,8 %	<b>BIEN SINTERIZADO</b>	
40	05/12/2016	150 °C	80 min	0	4,016 g	7,702 g	47,8 %	<b>BIEN SINTERIZADO</b>	
41	13/5/2016	150 °C	80 min	0	3,997 g	7,425 g	46,2 %	<b>BIEN SINTERIZADO</b>	

**ENSAYOS SINTERIZACIÓN UHMWPE (MIPELON XM-220)**

Nº Muestra	Fecha	Tª Horno	Tiempo Sinterizado	Presión	Peso SIN Aceite	Peso TOTAL (Aceite+Polímero)	% ACEITE	Observaciones	Tapa
42	16/5/2016	150 °C	80 min	0	4,042 g	7,437 g	45,7 %	<b>Muestra 2 EISENOR BIEN SINTERIZADO</b>	<b>TOCHO DE ACERO como tapa</b>
43	17/5/2016	150 °C	105 min	0	3,896 g	6,970 g	44,1 %	<b>BIEN SINTERIZADO</b>	
44	18/5/2016	150 °C	80 min	0	4,059 g	7,635 g	46,8 %	<b>BIEN SINTERIZADO (Perfecto)</b>	
45	19/5/2016	150 °C	80 min	0	3,925 g	7,684 g	48,9 %	<b>BIEN SINTERIZADO</b>	
46				0	4,040 g	7,770 g	48%	<b>BIEN SINTERIZADO</b>	
47	20/5/2016	150 °C	80 min	0	3,967 g	7,774 g	48,9 %	<b>BIEN SINTERIZADO</b>	
48				0	4,028 g	7,718 g	47,8 %	<b>BIEN SINTERIZADO</b>	
49	23/5/2016	150 °C	80 min	0	3,828 g	7,696 g	50,3 %	<b>BIEN SINTERIZADO (Perfecto)</b>	
50				0	<b>PIEZA DEFECTUOSA: Molde1 Epoxi Deteriorado</b>			<b>MOLDE EPOXI</b>	

**ENSAYOS SINTERIZACIÓN UHMWPE (MIPELON XM-220)**

Nº Muestra	Fecha	Tª Horno	Tiempo Sinterizado	Presión	Peso SIN Aceite	Peso TOTAL (Aceite+Polímero)	% ACEITE	Observaciones	Tapa
51	24/5/2016	150 °C	80 min	0	3,978 g	7,732 g	48,6 %	<b>BIEN SINTERIZADO</b>	<b>TOCHO DE ACERO como tapa</b>
52				0	3,880 g	7,703 g	49,6 %	<b>BIEN SINTERIZADO</b>	
53	25/5/2016	150 °C	80 min	0	3,957 g	7,560 g	47,7 %	<b>BIEN SINTERIZADO</b>	
54				0	4,156 g	7,649 g	45,7 %	<b>MOLDE EPOXI BIEN SINTERIZADO</b>	
55	26/5/2016	150 °C	80 min	0	4,136 g	7,694 g	46,2 %	<b>MOLDE EPOXI BIEN SINTERIZADO</b>	
56		132 °C	80 min	0	<b>NO SE HA SINTERIZADO</b>		<b>MOLDE EPOXI</b>		
57	27/5/2016	142 °C	80 min	0	4,145 g	7,995 g	48,2 %	<b>MOLDE EPOXI Muy BLANDO</b>	
58	30/5/2016	142 °C	80 min	0	4,179 g	7,809 g	46,5 %	<b>MOLDE EPOXI BIEN SINTERIZADO</b>	
59	31/5/2016	142 °C	80 min	0	4,196 g	7,715 g	45,6 %	<b>MOLDE EPOXI En el centro BLANDO</b>	
60	06/01/2016	142 °C	80 min	0	4,144 g	7,915 g	47,6 %	<b>MOLDE EPOXI En el centro BLANDO</b>	

**ENSAYOS SINTERIZACIÓN UHMWPE (MIPELON XM-220)**

<b>Nº Muestra</b>	<b>Fecha</b>	<b>Tª Horno</b>	<b>Tiempo Sinterizado</b>	<b>Presión</b>	<b>Peso SIN Aceite</b>	<b>Peso TOTAL (Aceite+Polímero)</b>	<b>% ACEITE</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Tapa</b>
61	06/02/2016	142 °C	80 min	0	4,192 g	7,813 g	46,3 %	<b>MOLDE EPOXI En el centro BLANDO</b>	<b>TOCHO DE ACERO como tapa</b>
62	06/07/2016	142 °C	80 min	0	4,248 g	7,788 g	45,5 %	<b>MOLDE EPOXI En el centro BLANDO</b>	

## **9.2.- Resultados del Ensayo de duración del lubricante:**

En este apartado del proyecto se recogen los resultados obtenidos en el ensayo de duración del lubricante, el consumo de lubricante, de los diferentes materiales.

Como se ha mencionado en el apartado 6.3.- del proyecto, se ha realizado un seguimiento del ensayo realizando el pesaje diario de cada una de las muestras para ver el consumo de cada uno de los materiales ensayados.

En los resultados aparecen los siguientes datos: Peso TOTAL inicial, Peso TOTAL tras recorrer distancia, peso de ACEIT INICIAL, Peso de ACEITE CONSUMIDO y % de ACEITE CONSUMIDO.

A continuación, se muestra los resultados obtenidos para este ensayo.

<b>ENSAYO</b>	1	<b>PESAJE N°</b>	1
Hora INICIO	14:30 h	Fecha	24/05/2016
Hora FINAL	8:18 h	<b>HORAS en FUNCIONAMIENTO (Día)</b>	17:48 h
Distancia recorrida (m)	23797	<b>Horas TOTALES en funcionamiento</b>	17:48 h

<b>MATERIAL</b>	<b>MUESTRAS</b>	<b>Peso TOTAL INICIAL (g)</b>	<b>Peso TOTAL tras Distancia</b>	<b>Peso ACEITE INICIAL</b>	<b>Peso ACEITE CONSUMIDO</b>	<b>% ACEITE CONSUMIDO</b>
THODACON	1	24,388	23,651	4,699	0,737	15,68
Porex / Polifluor	2	24,108	23,675	3,297	0,433	13,13
EISENOR 1	3	23,94	23,657	3,797	0,283	7,45
EISENOR 2	4	23,662	23,456	3,368	0,206	6,12
IKO	5	29,906	29,797	1,639	0,109	6,65
THODACON	6	24,12	23,244	4,812	0,876	18,20
Porex / Polifluor	7	24,05	23,641	3,345	0,409	12,23
EISENOR 3	8	24,133	23,961	3,374	0,172	5,10
EISENOR 4	9	23,882	23,619	3,581	0,263	7,34

<b>ENSAYO</b>	1	<b>PESAJE Nº</b>	2
Hora INICIO	10:11 h	Fecha	25/05/2016
Hora FINAL	9:18 h	<b>HORAS en FUNCIONAMIENTO (Día)</b>	23:07 h
Distancia recorrida (m)	55178	<b>Horas TOTALES en funcionamiento</b>	40:55 h

<b>MATERIAL</b>	<b>MUESTRAS</b>	<b>Peso TOTAL INICIAL (g)</b>	<b>Peso TOTAL tras Distancia</b>	<b>Peso ACEITE INICIAL</b>	<b>Peso ACEITE CONSUMIDO</b>	<b>% ACEITE CONSUMIDO</b>
THODACON	1	24,388	22,424	4,699	1,964	41,80
Porex / Polifluor	2	24,108	23,038	3,297	1,07	32,45
EISENOR 1	3	23,94	23,431	3,797	0,509	13,41
EISENOR 2	4	23,662	23,26	3,368	0,402	11,94
IKO	5	29,906	29,666	1,639	0,24	14,64
THODACON	6	24,12	21,949	4,812	2,171	45,12
Porex / Polifluor	7	24,05	22,943	3,345	1,107	33,09
EISENOR 3	8	24,133	23,672	3,374	0,461	13,66
EISENOR 4	9	23,882	23,297	3,581	0,585	16,34



<b>ENSAYO</b>	1	<b>PESAJE Nº</b>	3
Hora INICIO	9:43 h y 13:54 h	Fecha	26/05/2016
Hora FINAL	12:37 h y 8:21 h	<b>HORAS en FUNCIONAMIENTO (Día)</b>	21:15 h
Distancia recorrida (m)	83777	<b>Horas TOTALES en funcionamiento</b>	62:10 h

<b>MATERIAL</b>	<b>MUESTRAS</b>	<b>Peso TOTAL INICIAL (g)</b>	<b>Peso TOTAL tras Distancia</b>	<b>Peso ACEITE INICIAL</b>	<b>Peso ACEITE CONSUMIDO</b>	<b>% ACEITE CONSUMIDO</b>
THODACON	1	24,388	22,019	4,699	2,369	50,41
Porex / Polifluor	2	24,108	22,481	3,297	1,627	49,35
EISENOR 1	3	23,94	23,17	3,797	0,77	20,28
EISENOR 2	4	23,662	23,062	3,368	0,6	17,81
IKO	5	29,906	29,511	1,639	0,395	24,10
THODACON	6	24,12	20,906	4,812	3,214	66,79
Porex / Polifluor	7	24,05	22,448	3,345	1,602	47,89
EISENOR 3	8	24,133	23,555	3,374	0,578	17,13
EISENOR 4	9	23,882	22,868	3,581	1,014	28,32

<b>ENSAYO</b>	1	<b>PESAJE N°</b>	4
Hora INICIO	9:12 h	Fecha	27/05/2016
Hora FINAL	8:40 h	<b>HORAS en FUNCIONAMIENTO</b>	23:28 h
Distancia recorrida (m)	110812	<b>Horas TOTALES en funcionamiento</b>	85:38 h

<b>MATERIAL</b>	<b>MUESTRAS</b>	<b>Peso TOTAL INICIAL (g)</b>	<b>Peso TOTAL tras Distancia</b>	<b>Peso ACEITE INICIAL</b>	<b>Peso ACEITE CONSUMIDO</b>	<b>% ACEITE CONSUMIDO</b>
THODACON	1	24,388	21,125	4,699	3,263	69,44
Porex / Polifluor	2	24,108	22,13	3,297	1,978	59,99
EISENOR 1	3	23,94	22,939	3,797	1,001	26,36
EISENOR 2	4	23,662	22,85	3,368	0,812	24,11
IKO	5	29,906	29,38	1,639	0,526	32,09
THODACON	6	24,12	20,468	4,812	3,652	75,89
Porex / Polifluor	7	24,05	22,166	3,345	1,884	56,32
EISENOR 3	8	24,133	23,409	3,374	0,724	21,46
EISENOR 4	9	23,882	22,498	3,581	1,384	38,65

<b>ENSAYO</b>	1	<b>PESAJE N°</b>	5
Hora INICIO	9:30 h y 8:06 h	Fecha	31/05/2016
Hora FINAL	13:51 h y 8:18 h	<b>HORAS en FUNCIONAMIENTO (Día)</b>	28:33 h
Distancia recorrida (m)	148773	<b>Horas TOTALES en funcionamiento</b>	114:11 h

<b>MATERIAL</b>	<b>MUESTRAS</b>	<b>Peso TOTAL INICIAL (g)</b>	<b>Peso TOTAL tras Distancia</b>	<b>Peso ACEITE INICIAL</b>	<b>Peso ACEITE CONSUMIDO</b>	<b>% ACEITE CONSUMIDO</b>
THODACON	1	24,388	20,717	4,699	3,671	78,12
Porex / Polifluor	2	24,108	21,765	3,297	2,343	71,06
EISENOR 1	3	23,94	22,679	3,797	1,261	33,21
EISENOR 2	4	23,662	22,723	3,368	0,939	27,88
IKO	5	29,906	29,233	1,639	0,673	41,06
THODACON	6	24,12	20,269	4,812	3,851	80,03
Porex / Polifluor	7	24,05	21,819	3,345	2,231	66,70
EISENOR 3	8	24,133	23,358	3,374	0,775	22,97
EISENOR 4	9	23,882	22,338	3,581	1,544	43,12

<b>ENSAYO</b>	1	<b>PESAJE N°</b>	6
Hora INICIO	9:39 h	Fecha	06/01/2016
Hora FINAL	8:04 h	<b>HORAS en FUNCIONAMIENTO (Día)</b>	22:35 h
Distancia recorrida (m)	176142	<b>Horas TOTALES en funcionamiento</b>	136:46 h

<b>MATERIAL</b>	<b>MUESTRAS</b>	<b>Peso TOTAL INICIAL (g)</b>	<b>Peso TOTAL tras Distancia</b>	<b>Peso ACEITE INICIAL</b>	<b>Peso ACEITE CONSUMIDO</b>	<b>% ACEITE CONSUMIDO</b>
<b>THODACON</b>	1	24,388	20,608	4,699	3,78	80,44
<b>Porex / Polifluor</b>	2	24,108	21,592	3,297	2,516	76,31
<b>EISENOR 1</b>	3	23,94	22,489	3,797	1,451	38,21
<b>EISENOR 2</b>	4	23,662	22,531	3,368	1,131	33,58
<b>IKO</b>	5	29,906	29,115	1,639	0,791	48,26
<b>THODACON</b>	6	24,12	20,194	4,812	3,926	81,59
<b>Porex / Polifluor</b>	7	24,05	21,615	3,345	2,435	72,80
<b>EISENOR 3</b>	8	24,133	23,008	3,374	1,125	33,34
<b>EISENOR 4</b>	9	23,882	22,132	3,581	1,75	48,87

<b>ENSAYO</b>	1	<b>PESAJE N°</b>	7
Hora INICIO	9:34 h	Fecha	06/02/2016
Hora FINAL	8:06 h	<b>HORAS en FUNCIONAMIENTO (Día)</b>	22:32 h
Distancia recorrida (m)	202335	<b>Horas TOTALES en funcionamiento</b>	159:18 h

<b>MATERIAL</b>	<b>MUESTRAS</b>	<b>Peso TOTAL INICIAL (g)</b>	<b>Peso TOTAL tras Distancia</b>	<b>Peso ACEITE INICIAL</b>	<b>Peso ACEITE CONSUMIDO</b>	<b>% ACEITE CONSUMIDO</b>
<b>THODACON</b>	1	24,388	20,543	4,699	3,845	81,83
<b>Porex / Polifluor</b>	2	24,108	21,512	3,297	2,596	78,74
<b>EISENOR 1</b>	3	23,94	22,312	3,797	1,628	42,88
<b>EISENOR 2</b>	4	23,662	22,392	3,368	1,27	37,71
<b>IKO</b>	5	29,906	29,015	1,639	0,891	54,36
<b>THODACON</b>	6	24,12	20,145	4,812	3,975	82,61
<b>Porex / Polifluor</b>	7	24,05	21,506	3,345	2,544	76,05
<b>EISENOR 3</b>	8	24,133	22,826	3,374	1,307	38,74
<b>EISENOR 4</b>	9	23,882	21,949	3,581	1,933	53,98

<b>ENSAYO</b>	1	<b>PESAJE N°</b>	8
Hora INICIO	8:43 h	Fecha	06/03/2016
Hora FINAL	14:20 h	<b>HORAS en FUNCIONAMIENTO (Día)</b>	29:37 h
Distancia recorrida (m)	241475	<b>Horas TOTALES en funcionamiento</b>	188:55 h

<b>MATERIAL</b>	<b>MUESTRAS</b>	<b>Peso TOTAL INICIAL (g)</b>	<b>Peso TOTAL tras Distancia</b>	<b>Peso ACEITE INICIAL</b>	<b>Peso ACEITE CONSUMIDO</b>	<b>% ACEITE CONSUMIDO</b>
<b>THODACON</b>	1	24,388	20,49	4,699	3,898	82,95
<b>Porex / Polifluor</b>	2	24,108	21,454	3,297	2,654	80,50
<b>EISENOR 1</b>	3	23,94	22,107	3,797	1,833	48,27
<b>EISENOR 2</b>	4	23,662	22,171	3,368	1,491	44,27
<b>IKO</b>	5	29,906	28,903	1,639	1,003	61,20
<b>THODACON</b>	6	24,12	20,1	4,812	4,02	83,54
<b>Porex / Polifluor</b>	7	24,05	21,429	3,345	2,621	78,36
<b>EISENOR 3</b>	8	24,133	22,617	3,374	1,516	44,93
<b>EISENOR 4</b>	9	23,882	21,733	3,581	2,149	60,01

<b>ENSAYO</b>	1	<b>PESAJE N°</b>	9
Hora INICIO	9:10 h	Fecha	06/07/2016
Hora FINAL	8:05 h	<b>HORAS en FUNCIONAMIENTO</b>	22:55 h
Distancia recorrida (m)	272748	<b>Horas TOTALES en funcionamiento</b>	211:50 h

<b>MATERIAL</b>	<b>MUESTRAS</b>	<b>Peso TOTAL INICIAL (g)</b>	<b>Peso TOTAL tras Distancia</b>	<b>Peso ACEITE INICIAL</b>	<b>Peso ACEITE CONSUMIDO</b>	<b>% ACEITE CONSUMIDO</b>
<b>THODACON</b>	1	24,388	20,449	4,699	3,939	83,83
<b>Porex / Polifluor</b>	2	24,108	21,418	3,297	2,69	81,59
<b>EISENOR 1</b>	3	23,94	21,98	3,797	1,96	51,62
<b>EISENOR 2</b>	4	23,662	22,121	3,368	1,541	45,75
<b>IKO</b>	5	29,906	28,83	1,639	1,076	65,65
<b>THODACON</b>	6	24,12	20,07	4,812	4,05	84,16
<b>Porex / Polifluor</b>	7	24,05	21,384	3,345	2,666	79,70
<b>EISENOR 3</b>	8	24,133	22,586	3,374	1,547	45,85
<b>EISENOR 4</b>	9	23,882	21,62	3,581	2,262	63,17

<b>ENSAYO</b>	1	<b>PESAJE N°</b>	10
Hora INICIO	9:02 h y 14:35 h	Fecha	06/08/2016
Hora FINAL	13:54 h y 8:17 h	<b>HORAS en FUNCIONAMIENTO (Día)</b>	22:34 h
Distancia recorrida (m)	297417	<b>Horas TOTALES en funcionamiento</b>	234: 24 h

<b>MATERIAL</b>	<b>MUESTRAS</b>	<b>Peso TOTAL INICIAL (g)</b>	<b>Peso TOTAL tras Distancia</b>	<b>Peso ACEITE INICIAL</b>	<b>Peso ACEITE CONSUMIDO</b>	<b>% ACEITE CONSUMIDO</b>
THODACON	1	24,388	20,421	4,699	3,967	84,42
Porex / Polifluor	2	24,108	21,393	3,297	2,715	82,35
EISENOR 1	3	23,94	21,807	3,797	2,133	56,18
EISENOR 2	4	23,662	21,955	3,368	1,707	50,68
IKO	5	29,906	28,754	1,639	1,152	70,29
THODACON	6	24,12	20,045	4,812	4,075	84,68
Porex / Polifluor	7	24,05	21,353	3,345	2,697	80,63
EISENOR 3	8	24,133	22,512	3,374	1,621	48,04
EISENOR 4	9	23,882	21,455	3,581	2,427	67,77



<b>ENSAYO</b>	1	<b>PESAJE N°</b>	11
Hora INICIO	8:57 h	Fecha	06/09/2016
Hora FINAL	8:08 h	<b>HORAS en FUNCIONAMIENTO (Día)</b>	23:11 h
Distancia recorrida (m)	326066	<b>Horas TOTALES en funcionamiento</b>	257:35 h

<b>MATERIAL</b>	<b>MUESTRAS</b>	<b>Peso TOTAL INICIAL (g)</b>	<b>Peso TOTAL tras Distancia</b>	<b>Peso ACEITE INICIAL</b>	<b>Peso ACEITE CONSUMIDO</b>	<b>% ACEITE CONSUMIDO</b>
THODACON	1	24,388	20,402	4,699	3,986	84,83
Porex / Polifluor	2	24,108	21,375	3,297	2,733	82,89
EISENOR 1	3	23,94	21,729	3,797	2,211	58,23
EISENOR 2	4	23,662	21,865	3,368	1,797	53,36
IKO	5	29,906	28,713	1,639	1,193	72,79
THODACON	6	24,12	20,027	4,812	4,093	85,06
Porex / Polifluor	7	24,05	21,333	3,345	2,717	81,23
EISENOR 3	8	24,133	22,457	3,374	1,676	49,67
EISENOR 4	9	23,882	21,382	3,581	2,5	69,81

<b>ENSAYO</b>	1	<b>PESAJE N°</b>	12
Hora INICIO	8:54 h	Fecha	06/10/2016
Hora FINAL	8:09 h	<b>HORAS en FUNCIONAMIENTO (Día)</b>	23:15 h
Distancia recorrida (m)	352496	<b>Horas TOTALES en funcionamiento</b>	280:50 h

<b>MATERIAL</b>	<b>MUESTRAS</b>	<b>Peso TOTAL INICIAL (g)</b>	<b>Peso TOTAL tras Distancia</b>	<b>Peso ACEITE INICIAL</b>	<b>Peso ACEITE CONSUMIDO</b>	<b>% ACEITE CONSUMIDO</b>
THODACOM	1	24,388	20,384	4,699	4,004	85,21
Porex / Folifluor	2	24,108	21,359	3,297	2,749	83,38
EISENOR 1	3	23,94	21,711	3,797	2,229	58,70
EISENOR 2	4	23,662	21,812	3,368	1,85	54,93
IKO	5	29,906	28,694	1,639	1,212	73,95
THODACOM	6	24,12	20,011	4,812	4,109	85,39
Porex / Folifluor	7	24,05	21,313	3,345	2,737	81,82
EISENOR 3	8	24,133	22,414	3,374	1,719	50,95
EISENOR 4	9	23,882	21,32	3,581	2,562	71,54

<b>ENSAYO</b>	1	<b>PESAJE N°</b>	13
Hora INICIO	9:19 h	Fecha	14/06/2016
Hora FINAL	8:09 h	<b>HORAS en FUNCIONAMIENTO (Día)</b>	22:50 h
Distancia recorrida (m)	388049	<b>Horas TOTALES en funcionamiento</b>	303:40 h

<b>MATERIAL</b>	<b>MUESTRAS</b>	<b>Peso TOTAL INICIAL (g)</b>	<b>Peso TOTAL tras Distancia</b>	<b>Peso ACEITE INICIAL</b>	<b>Peso ACEITE CONSUMIDO</b>	<b>% ACEITE CONSUMIDO</b>
THODACOM	1	24,388	20,359	4,699	4,029	85,74
Porex / Folifluor	2	24,108	21,342	3,297	2,766	83,89
EISENOR 1	3	23,94	21,585	3,797	2,355	62,02
EISENOR 2	4	23,662	21,661	3,368	2,001	59,41
IKO	5	29,906	28,638	1,639	1,268	77,36
THODACOM	6	24,12	19,991	4,812	4,129	85,81
Porex / Folifluor	7	24,05	21,293	3,345	2,757	82,42
EISENOR 3	8	24,133	22,351	3,374	1,782	52,82
EISENOR 4	9	23,882	21,205	3,581	2,677	74,76

<b>ENSAYO</b>	1	<b>PESAJE N°</b>	14
Hora INICIO	9:08 h	Fecha	15/06/2016
Hora FINAL	8:12 h	<b>HORAS en FUNCIONAMIENTO (Día)</b>	23:04 h
Distancia recorrida (m)	414249	<b>Horas TOTALES en funcionamiento</b>	326:44 h

<b>MATERIAL</b>	<b>MUESTRAS</b>	<b>Peso TOTAL INICIAL (g)</b>	<b>Peso TOTAL tras Distancia</b>	<b>Peso ACEITE INICIAL</b>	<b>Peso ACEITE CONSUMIDO</b>	<b>% ACEITE CONSUMIDO</b>
THODACOM	1	24,388	20,349	4,699	4,039	85,95
Porex / Folifluor	2	24,108	21,333	3,297	2,775	84,17
EISENOR 1	3	23,94	21,445	3,797	2,495	65,71
EISENOR 2	4	23,662	21,583	3,368	2,079	61,73
IKO	5	29,906	28,603	1,639	1,303	79,50
THODACOM	6	24,12	19,981	4,812	4,139	86,01
Porex / Folifluor	7	24,05	21,282	3,345	2,768	82,75
EISENOR 3	8	24,133	22,312	3,374	1,821	53,97
EISENOR 4	9	23,882	21,122	3,581	2,76	77,07

<b>ENSAYO</b>	1	<b>PESAJE N°</b>	15
Hora INICIO	9:08 h	Fecha	16/06/2016
Hora FINAL	8:15 h	<b>HORAS en FUNCIONAMIENTO (Día)</b>	23:07 h
Distancia recorrida (m)	445399	<b>Horas TOTALES en funcionamiento</b>	349:51 h

<b>MATERIAL</b>	<b>MUESTRAS</b>	<b>Peso TOTAL INICIAL (g)</b>	<b>Peso TOTAL tras Distancia</b>	<b>Peso ACEITE INICIAL</b>	<b>Peso ACEITE CONSUMIDO</b>	<b>% ACEITE CONSUMIDO</b>
THODACOM	1	24,388	20,34	4,699	4,048	86,15
Porex / Folifluor	2	24,108	21,325	3,297	2,783	84,41
EISENOR 1	3	23,94	21,379	3,797	2,561	67,45
EISENOR 2	4	23,662	21,541	3,368	2,121	62,98
IKO	5	29,906	28,578	1,639	1,328	81,03
THODACOM	6	24,12	19,972	4,812	4,148	86,20
Porex / Folifluor	7	24,05	21,274	3,345	2,776	82,99
EISENOR 3	8	24,133	22,286	3,374	1,847	54,74
EISENOR 4	9	23,882	21,064	3,581	2,818	78,69

<b>ENSAYO</b>	1	<b>PESAJE N°</b>	16
Hora INICIO	9:29 h	Fecha	17/06/2016
Hora FINAL	8:11 h	<b>HORAS en FUNCIONAMIENTO (Día)</b>	22:42 h
Distancia recorrida (m)	476539	<b>Horas TOTALES en funcionamiento</b>	372:33 h

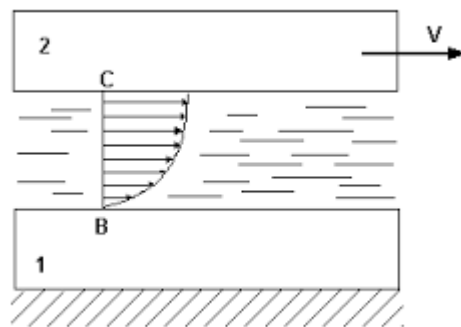
<b>MATERIAL</b>	<b>MUESTRAS</b>	<b>Peso TOTAL INICIAL (g)</b>	<b>Peso TOTAL tras Distancia</b>	<b>Peso ACEITE INICIAL</b>	<b>Peso ACEITE CONSUMIDO</b>	<b>% ACEITE CONSUMIDO</b>
THODACOM	1	24,388	20,334	4,699	4,054	86,27
Porex / Folifluor	2	24,108	21,319	3,297	2,789	84,59
EISENOR 1	3	23,94	21,343	3,797	2,597	68,40
EISENOR 2	4	23,662	21,522	3,368	2,14	63,54
IKO	5	29,906	28,564	1,639	1,342	81,88
THODACOM	6	24,12	19,967	4,812	4,153	86,31
Porex / Folifluor	7	24,05	21,269	3,345	2,781	83,14
EISENOR 3	8	24,133	22,264	3,374	1,869	55,39
EISENOR 4	9	23,882	21,038	3,581	2,844	79,42

## 9.3.- Cálculos:

### 9.3.1.- Régimen de lubricación:

En este cálculo, se va a identificar en que régimen de lubricación se está trabajando en el movimiento del “patín de rodadura”. El movimiento consiste en un “patín de rodadura” con recirculación de un tren de rodillos cilíndricos sobre un plano (guía de una bancada de máquina herramienta, etc).

Se considera una capa de lubricante entre dos placas, una fija y otra móvil con velocidad  $V$ , tal como la representada en la figura. Las partículas de fluido que están en contacto con la capa superior (C), se moverán con esa velocidad  $V$  y las que están en contacto con la placa fija inferior (B) tendrán velocidad nula.



En un punto intermedio entre C y B el fluido se moverá según la ley que relacione sus coordenadas con la velocidad.

La **LEY DE NEWTON** del rozamiento fluido dice que la fuerza necesaria para mover la placa superior sigue la ley siguiente:

$$dF = \eta * dS * \frac{dv}{dn}$$

donde:

$dv/dn$ , es el gradiente de velocidad.

$v$  = Velocidad relativa de desplazamiento de las dos superficies.

$\eta$  = VISCOSIDAD DINÁMICA.

En la práctica se observa que la resistencia al deslizamiento para este ejemplo es:

- Independiente de los esfuerzos normales.
- Aumenta con la velocidad.
- Aumenta con la superficie.
- No depende del estado o naturaleza de las superficies.

Si se busca la expresión para el coeficiente de rozamiento fluido de la misma forma que lo definimos para el rozamiento seco, se tiene:

$$F = \mu * N = \eta * S * \frac{dv}{dn}$$

con lo que  $\mu$  valdrá:

$$\mu = \eta * \frac{S dv}{N dn}$$

Experimentalmente, se comprueba que el valor de  $\mu$  depende de  $\eta * V * S / N$ .

Donde:

V = velocidad.

N = carga normal.

S = superficie de contacto.

Si  $N/S = P$ , presión que actúa sobre la superficie en contacto, se obtiene:

$$\mu = f\left(\eta \frac{V}{P}\right)$$

Esta función en la práctica tiene el aspecto de la curva siguiente, llamada **curva de Stribeck**.



La zona BC se denomina de lubricación estable porque si por cualquier motivo se produce un aumento de la temperatura del lubricante, ello provoca una disminución de la viscosidad con lo que  $\mu$  y el rozamiento disminuyen. Entonces la temperatura vuelve a bajar equilibrando la subida inicial. En esta zona BC se tendrá rozamiento fluido.

En la zona AB, la lubricación será inestable porque si aumenta la temperatura, la viscosidad disminuye y  $\mu$  aumenta con lo que aumenta el rozamiento, la generación de calor y la temperatura con lo que el proceso se hace inestable.

Los valores del parámetro  $(\eta \frac{V}{P})$  que dividen las diferentes zonas de la gráfica son  $0.33 * 10^{-6}$  donde termina la zona AB y  $1.7 * 10^{-6}$  donde comienza el último tramo lineal de la parte derecha de la gráfica.



A continuación, se va a calcular dicho parámetro ( $\eta \frac{V}{P}$ ) para comprobar en que parte de la gráfica nos encontramos para la autolubricación del “patín de rodadura” y por lo tanto el régimen de lubricación que corresponde a dicha aplicación.

$$\frac{\eta * N}{P}$$

Para calcular este parámetro necesitamos conocer: la viscosidad dinámica ( $\eta$  [reyn]), la velocidad angular del sistema (N [rev/s]) y la presión ejercida sobre el sistema (P [psi]).

Como se conoce el lubricante empleado (Mobil Vactra Nº2), se conocen los datos técnicos del mismo y con ello la viscosidad cinemática y su densidad. Así pues, calculamos la viscosidad dinámica del lubricante:

$\gamma$ = viscosidad cinemática = 68 cSt

$$\rho = \rho_0 * \rho_r = 1 \text{ g/cm}^3 * 0.883 \text{ g/cm}^3 = 0.883 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_0 = \text{densidad de referencia (agua)} = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_r = \text{densidad relativa del lubricante} = 0.883 \text{ g/cm}^3$$

$$\eta = \gamma * \rho = 68 \text{ cSt} * 0.883 \text{ kg/m}^3 = 60.044 \text{ cP} = 0.060044 \text{ Pa*s}$$

Se pasa el valor de la viscosidad dinámica de Pa\*s a reyn:

$$1 \text{ Reyn} = 6890 \text{ Pa*s}$$

$$\eta = 0.060044 \text{ Pa*s} \times \frac{1 \text{ Reyn}}{6890 \text{ Pa*s}} = \mathbf{0.0000087147 \text{ reyn} = 8.7147 * 10^{-6} \text{ reyn.}}$$

En segundo lugar, se necesita la velocidad angular a la que se mueve el sistema, en este caso el avance del patín de rodadura que se mueve a una velocidad aproximada de unos 25 m/min.

$$V = \text{velocidad lineal} = 25 \text{ m/min} \rightarrow V = 25 \frac{\text{m}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 0.41666 \text{ m/s}$$

$$N = \text{velocidad angular [rev/s]} \rightarrow N = \frac{V}{r} = \frac{0.41666 \text{ m/s}}{(3.5 * 10^{-3})} = \mathbf{119.0457 \text{ rev/s.}}$$

$$r = \text{radio del elemento rodante (rodillo)} = 3.5 * 10^{-3} \text{ m.}$$

Por último, se calcula el valor de la presión ejercida sobre el sistema, sobre uno de los rodillos del “patín de rodadura”. Hay dudas sobre el régimen de lubricación que tiene dicha aplicación, por eso se utilizarán dos expresiones para el cálculo de la presión ejercida sobre el rodillo, una de ellas para lubricación Hidrodinámica y la otra para Elastohidrodinámica.

En primer lugar, se calcula la **presión de contacto de Hertz para lubricación Elastohidrodinámica** que se realizará con la siguiente expresión:

$$P_{M\acute{A}x} = \frac{2 * F}{\pi * b * l}$$

Para calcular dicha presión necesitamos la fuerza ejercida sobre un rodillo (F [N]), el parámetro “b” y la longitud de contacto, en este caso la longitud del rodillo.

Se va a utilizar como fuerza ejercida sobre el patín, la fuerza que aguanta dicho patín, 108 KN = 108000 N. Como esta fuerza actúa sobre todos los rodillos que están en contacto, 13 rodillos al mismo tiempo, se divide dicha fuerza entre el número de rodillos:

$$F = 108000 \text{ N}/13 \text{ rodillos} = 8307.6923 \text{ N/rodillo.}$$

Para el cálculo del parámetro “b” se utiliza la siguiente expresión:

$$b = \sqrt{\frac{2*F}{\pi*l} \frac{\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}}}$$

Como el contacto que se produce es entre dos materiales iguales, acero, y se trata de un contacto entre un rodillo cilíndrico ( $d_1 = 7 \text{ mm}$ ) y un plano ( $d_2 = \infty$ ), la expresión queda:

$$b = \sqrt{\frac{2*F}{\pi*l} \frac{2*d_1(1-v^2)}{E}}$$

Siendo:

F= fuerza ejercida sobre el rodillo [N].

$d_1$ = diámetro del rodillo ( $d_1 = 7 \text{ mm}$ ) [mm].

$v$  = coeficiente de Poisson.

$l$  = longitud efectiva del contacto, longitud del rodillo ( $l = 14 \text{ mm}$ ) [mm].

E = módulo elástico del material, en este caso acero ( $2.08*10^{11} \text{ Pa} = 208000 \text{ MPa}$ ) [MPa].

Sabiendo esto, se procede al cálculo del parámetro “b”:

$$b = \sqrt{\frac{2*F}{\pi*l} \frac{2*d_1(1-v^2)}{E}} = \sqrt{\frac{2*8307.6923}{\pi*14} \frac{2*7(1-0.3^2)}{208000}} = \mathbf{0.152}$$

Como ya se han calculado los parámetros presentes en el cálculo de la presión máxima de Hertz, ya se puede calcular dicha presión:

$$P_{M\acute{A}x} = \frac{2*F}{\pi*b*l} = \frac{2*8307.6923}{\pi*0.152*14} = \mathbf{2485.357 \text{ MPa} = 360470.463 \text{ psi.}}$$

Al calcular la presión, ya se conocen todos los parámetros para calcular ( $\frac{\eta*N}{P}$ ) para lubricación Elastohidrodinámica. El cálculo queda:

$$\frac{\eta*N}{P} = \frac{(8.7147*10^{-6})*119.0457}{360470.463} = \mathbf{0.0000000029 = 2.9*10^{-9}}$$

El resultado obtenido, indica que nos encontramos en el lado izquierdo de la curva de Stribeck, en la zona AB. Esto indica que se trata de lubricación mixta, puede tratarse de **régimen de lubricación Elastohidrodinámica**.

En segundo lugar, se calculará la **presión de contacto de Petroff para lubricación Hidrodinámica**, que tiene la siguiente expresión:

$$P = \frac{F}{2 * r * l}$$

Donde:

$$r = \text{radio del elemento rodante} = 3.5 \text{ mm} = 3.5 * 10^{-3} \text{ m}$$

$$l = \text{longitud del contacto, en este caso longitud del rodillo} = 14 \text{ mm} = 14 * 10^{-3} \text{ m.}$$

$$F = \text{fuerza ejercida sobre el elemento rodante (calculado anteriormente)} = 8307.6923 \text{ N.}$$

Con estos datos ya se puede proceder al cálculo de la presión:

$$P = \frac{F}{2 * r * l} = \frac{8307.6923}{2 * (3.5 * 10^{-3}) * (14 * 10^{-3})} = 8.477237 * 10^7 \text{ Pa} = \mathbf{12295.1928 \text{ psi}}$$

Al tener calculados los tres parámetros ( $\eta$ , N y P) se puede proceder al cálculo del parámetro  $(\eta \frac{N}{P})$ :

$$\frac{\eta * N}{P} = \frac{(8.7147 * 10^{-6}) * 119.0457}{12295.1928} = \mathbf{0.0000000844 = 8.44 * 10^{-8}}$$

Como se ve en este resultado y observando la curva de Stribeck, se comprueba que este valor no corresponde con la zona de lubricación Hidrodinámica en la curva de Stribeck. Así pues, se puede concluir que en esta aplicación no se trabaja en el régimen de lubricación Hidrodinámica. Esto se debe a que el valor obtenido en los cálculos corresponde con la zona de lubricación mixta o límite, situada a la izquierda de la curva de Stribeck, y no con la zona de lubricación Hidrodinámica correspondiente a la zona derecha de dicha curva.

### 9.3.2.- Cálculo del espesor mínimo de película lubricante:

Para calcular el espesor mínimo de película lubricante hay infinidad de fórmulas de varios autores. En este caso se trata de lubricación Elastohidrodinámica de contacto lineal, ya que se refiere al contacto de un “patín de rodadura” con un tren de rodillos cilíndricos altamente cargado moviéndose en un plano (bancada de un torno, carnero, etc). Para la lubricación de este sistema se necesita una mínima capa de lubricante para que funcione bien y no se deteriore con facilidad.

El cálculo del espesor mínimo de película, es el valor mínimo de lubricante necesario para que el sistema funcione en óptimas condiciones.

Para el cálculo se ha elegido la expresión de Dawson para contacto lineal (rodillo contra plano, ambos de acero), ya que es la expresión que más se acerca a este caso.

Expresión para calcular el espesor de la película lubricante para contacto lineal según Dowson:

$$h_{min} = 2.65 * U^{0.7} * G^{0.54} * W'^{-0.13} * R_r \quad [m]$$

Donde:

$$U = \frac{\mu_0 * V}{(W' * R_r)}$$

$$G = \alpha * E'$$

$$W' = \frac{Q}{(E' * R_r * L)}$$

Aquí significan:

$h_{min}$  [m] : Espesor mínimo de la película de lubricante en el contacto de rodadura.

$U$  : Parámetro de velocidad.

$G$  : Parámetro del material.

$W'$  : Parámetro de la carga habiendo contacto lineal.

$\alpha$  [ $m^2/N$ ] : Coeficiente de presión-viscosidad.

$\mu_0$  [Pa\*s] : Viscosidad dinámica.

$v$  [m/s] :  $v = (v_1 + v_2)/2$ , velocidad media.

$v_1$  = velocidad del cuerpo rodante.

$v_2$  = velocidad en el contacto interior o exterior.

$E'$  [ $N/m^2$ ] :  $E' = E/[1-(1/m)^2]$ , módulo de elasticidad efectivo.

$E$ =módulo de elasticidad =  $2.08 * 10^{11}$  [ $N/m^2$ ] para acero.

$1/m$  = Constante de Poisson = 0.3 para acero.

$R_r$  [m] : Radio reducido de rodadura.

$$R_r = r_1 * r_2 / (r_1 - r_2), \text{ para contacto exterior.}$$

$r_1$  = radio del cuerpo rodante [m].

$r_2$  = radio del camino de rodadura interior o exterior [m].

$Q$  [N] : carga sobre el cuerpo rodante.

$L$  [m] : Longitud de intersticio, es decir, longitud efectiva del rodillo.

A continuación, se va a proceder al cálculo de los diferentes parámetros. En primer lugar se va a calcular el parámetro de velocidad,  $U$ :

$$U = \frac{\mu_0 * V}{(E' * R_r)}$$

Para ello vamos a calcular cada uno de los valores que se necesitan para calcular  $U$ :

Del lubricante tenemos:

$$\rho_r = \text{densidad relativa} = 0.883 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_0 = \text{densidad de referencia (la del agua} = 1 \text{ g/cm}^3)$$

$$\rho = \rho_r * \rho_0 = 0.883 \text{ g/cm}^3 * 1 \text{ g/cm}^3 = \mathbf{0.883 \text{ g/cm}^3}$$

$$\nu = \text{viscosidad cinemática} = 68 \text{ cSt} \rightarrow \nu = \mu / \rho$$

$$\mu = \rho * \nu = 0.883 \text{ g/cm}^3 * 68 \text{ cSt} = 60.044 \text{ cP} = \mathbf{0.060044 \text{ Pa*s}}$$

Ahora se calcula el valor de la velocidad media,  $v$ :

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{(0.4166 + 0)}{2} = \mathbf{0.2083 \text{ m/s}}$$

$$v_1 = 25 \text{ m/min} \rightarrow v_1 = 25 \frac{\text{m}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = \mathbf{0.4166 \text{ m/s}}$$

$$v_2 = \mathbf{0 \text{ m/s}} \rightarrow \text{Porque no se mueve, el patín se mueve sobre este plano.}$$

Se calcula el módulo elástico reducido,  $E'$  :

$$E' = E / [1 - (1/m)^2] = (2.08 * 10^{11}) / [1 - (0.3)^2] = \mathbf{2.285714286 * 10^{11} \text{ N/m}^2}$$

$$E = \mathbf{2.08 * 10^{11} \text{ N/m}^2}, \text{ para el acero.}$$

$$1/m = \mathbf{0.3}, \text{ para el acero.}$$

Ahora toca calcular el radio reducido,  $R_r$ :

$R_r = r_1 * r_2 / (r_1 + r_2) = r_1 = 3.5 \text{ mm} = 3.5 * 10^{-3} \text{ m}$ , porque la superficie 2 es un plano.

$r_1 =$  radio del cuerpo rodante = 3.5 mm

$r_2 =$  radio del camino de rodadura interior o exterior =  $\infty$ , porque es un plano.

Con estos datos ya se puede calcular el parámetro de velocidad,  $U$ :

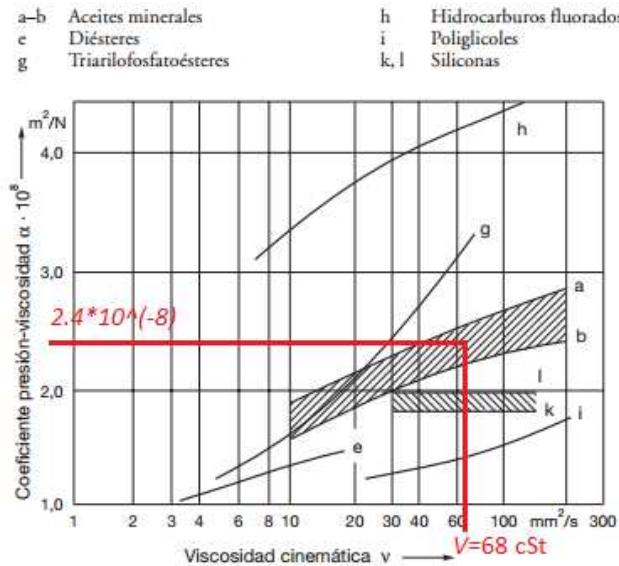
$$U = \frac{\mu_0 * V}{(E * R_r)} = \frac{(0.060044 \text{ Pa*s}) * (0.2083 \text{ m/s})}{(2.285714286 * 10^{11} \text{ N/m}^2) * (3.5 * 10^{-3} \text{ m})} = 1.56339565 * 10^{-11}$$

En segundo lugar, se calcula el parámetro del material,  $G$ :

$$G = \alpha * E'$$

Para ello necesitamos saber el coeficiente de presión-viscosidad.

Para obtener el valor del coeficiente de presión-viscosidad ( $\alpha$ ), necesitamos entrar en una tabla con el valor de la viscosidad cinemática ( $\nu = 68 \text{ cSt}$ ) y sabiendo que el lubricante Mobil Vactra N°2 es un aceite mineral:



Como se puede apreciar en el gráfico, el valor del coeficiente presión-viscosidad es,  $\alpha = 2.4 * 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N}$ .

Teniendo el valor del coeficiente presión-viscosidad y el módulo elástico reducido, que se ha calculado para el parámetro anterior, se puede calcular el parámetro del material,  $G$ :

$$G = \alpha * E' = (2.4 * 10^{-8} m^2 / N) * (2.285714286 * 10^{11} N / m^2) =$$

$$G = 5485.714$$

Por último, se va a calcular el parámetro de carga para contacto lineal,  $W'$ :

$$W' = \frac{Q}{(E' * R_r * L)}$$

Para calcular este último parámetro, hace falta la carga que soporta el rodillo del patín y la longitud del mismo. Se ha utilizado la carga máxima que aguanta el patín, 108 KN = 108000 N.

Como contactan a la vez 13 rodillos, habrá que dividir dicha carga para que quede la carga que se ejerce sobre un rodillo, sobre el cuerpo rodante.

$$Q = \text{carga sobre el cuerpo rodante} = 108000 \text{ N} / 13 \text{ rodillos} = 8307.6923 \text{ N}$$

$$L = \text{longitud efectiva del rodillo} = 14 \text{ mm} = 0.014 \text{ m}$$

Con estos valores y los calculados anteriormente (módulo elástico reducido y radio reducido) se puede calcular el valor del parámetro de carga para contacto lineal,  $W'$ :

$$W' = \frac{Q}{(E' * R_r * L)} = \frac{8307.6923 \text{ N}}{[(2.285714286 * 10^{11} N / m^2) * (3.5 * 10^{-3} \text{ m}) * (0.014 \text{ m})]} =$$

$$W' = 7.417582 * 10^{-4}$$

Una vez de tener los 3 parámetros adimensionales, se introducen en la fórmula inicial y se calcula el valor del espesor mínimo de película lubricante para contacto lineal:

$$h_{min} = 2.65 * U^{0.7} * G^{0.54} * W'^{-0.13} * R_r \quad [\text{m}]$$

$$h_{min} = 2.65 * (1.56339565 * 10^{-11})^{0.7} * (5485.714)^{0.54} * (7.417582 * 10^{-4})^{-0.13} * (3.5 * 10^{-3}) =$$

$$h_{min} = 6.7486 * 10^{-8} \text{ m} = 0.067486 \mu\text{m}$$

## **9.4.- Programa para contador de distancia y vueltas en el Banco de pruebas:**

```
/*
  DATALOGGER CONTADOR DE VUELTAS Y DISTANCIA
*/
//INICIO DECLARACIÓN DE LIBRERÍAS
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Time.h> //Incluimos la librería Time
#include <DHT11.h>
//FIN DECLARACIÓN DE LIBRERÍAS

//INICIO DECLARACIÓN DE VARIABLES
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);
const int chipSelect = 10;
int estadoActual1=0;
int estadoActual2=0;
int estadoUltimo=0;
long contador=0;
long distancia=0;
int pin=7;
DHT11 dht11(pin);

//FIN DECLARACIÓN DE VARIABLES

void setup(){ //INICIO DEL SETUP
  pinMode(2,INPUT);
  Serial.begin(9600);
  lcd.begin(16,2); //Inicializacion de LCD de 16 caracteres y 2 lineas
```



```
setTime(0,0,0,01,01,2016);
```

```
//INICIO PARPADEO PANTALLA LCD
```

```
for(int i = 0; i < 3; i++) //Bucle encendido/apagado del backlight
```

```
{
```

```
  lcd.backlight(); //Encendido
```

```
  delay(250); //Tiempo de espera
```

```
  lcd.noBacklight(); //Apagado
```

```
  delay(250); //Tiempo de espera
```

```
} //FIN PARPADEO PANTALLA LCD
```

```
//INICIO DEL TEST DE PANTALLA LCD
```

```
lcd.backlight(); // Dejamos encendido el backlight
```

```
  /*( Escribir en el LCD )*/
```

```
lcd.setCursor(0,0); //Apuntamos a la direccion LCD(caracter,linea)
```

```
lcd.print("EISENOR.COM"); //Escribimos texto
```

```
delay(1000); //Tiempo de espera
```

```
lcd.setCursor(1,1); //Apuntamos a la direccion LCD(caracter,linea)
```

```
lcd.print("Test"); //Escribimos texto
```

```
delay(500); //Tiempo de espera
```

```
for(int i = 5; i < 12; i++) //Bucle Procesando...
```

```
{ //Inicio del bucle procesando...
```

```
  lcd.setCursor(i,1); //Apuntamos a la direccion LCD(caracter,linea)
```

```
  lcd.print("."); //Escribimos texto
```

```
  delay(500); //Tiempo de espera
```

```
} //fin del bucle procesando..
```

```
lcd.setCursor(12,1); //Apuntamos a la direccion LCD(caracter,linea)
```

```
lcd.print("ok"); //Escribimos texto
```

```
delay(2000); //Tiempo de espera
```

```

lcd.clear(); //Borrado del LCD

lcd.setCursor(02,0); //Apuntamos a la direccion LCD(caracter,linea)

lcd.print("Registrador de DISTANCIA,HORA Y VUELTA"); //Escribimos texto

lcd.setCursor(02,1); //Apuntamos a la direccion LCD(caracter,linea)

lcd.print("    Proyecto PATINES SIN ENGRASE"); //Escribimos texto

for (int i = 0; i < 25; i++) //Bucle desplazamiento

{ //Inicio del bucle desplazamiento

    lcd.scrollDisplayLeft(); //Desplazamiento a la izquierda

    delay(250); //Tiempo de espera

}delay(100);

//FINAL DEL TEST DE PANTALLA LCD

//INICIO TARJETA EN MONITOR SERIE Y LCD

Serial.print("Inicializando tarjeta SD...");

lcd.clear(); //Borrado del LCD

lcd.setCursor(00,0); //Apuntamos a la direccion LCD(caracter,linea)

lcd.print("Inicializando"); //Escribimos texto en LCD

lcd.setCursor(00,1); //Apuntamos a la direccion LCD(caracter,linea)

lcd.print("tarjeta SD..."); //Escribimos texto en LCD

pinMode(10, OUTPUT);

// si la tarjeta está presente y puede inicializarse:

if (!SD.begin(chipSelect)) {

    Serial.println("Fallo en la tarjeta o no disponible");

    lcd.clear(); //Borrado del LCD

    lcd.setCursor(00,0); //Apuntamos a la direccion LCD(caracter,linea)

    lcd.print("Fallo en tarjeta"); //Escribimos texto en LCD

    lcd.setCursor(00,1); //Apuntamos a la direccion LCD(caracter,linea)

    lcd.print("o no disponible"); //Escribimos texto en LCD

    delay(1000); // no hacer nada más:

    lcd.noBacklight(); //Apagado

```

```

return;}

Serial.println("tarjeta inicializada.");

lcd.clear(); //Borrado del LCD

lcd.setCursor(00,0); //Apuntamos a la direccion LCD(caracter,linea)

lcd.print("Tarjeta"); //Escribimos texto en LCD

lcd.setCursor(00,1); //Apuntamos a la direccion LCD(caracter,linea)

lcd.print("inicializada"); //Escribimos texto en LCD

delay(1000);

//FINAL TARJETA EN MONITOR SERIE Y LCD

//INICIO CREACION DEL ARCHIVO EXCEL

File dataFile = SD.open("cuenta.csv", FILE_WRITE);

if (dataFile) {

    dataFile.println("Registrador EISENOR distancia");

    dataFile.println("www.eisenor.com");

    dataFile.println("");

    dataFile.print("A");

    dataFile.print((char)209);

    dataFile.print("OS");

    dataFile.print(";");

    dataFile.print("MESES");

    dataFile.print(";");

    dataFile.print("DIAS");

    dataFile.print(";");

    dataFile.print("HORAS");

    dataFile.print(";");

    dataFile.print("n ");

    dataFile.print((char)176);

    dataFile.print("VUELTAS");

    dataFile.print(";");

```

```

dataFile.println("DISTANCIA (m)");
dataFile.print(";");
dataFile.print("TEMPERATURA");
dataFile.print(";");
dataFile.println("HUMEDAD RELATIVA");
dataFile.close();
delay(100);
} //FINAL CREACION DEL ARCHIVO EXCEL

} //FIN DEL SETUP

void loop(){ //INICIO DEL LOOP

//INICIO CÁLCULO VUELTAS Y METROS
    estadoActual1=digitalRead(2);
    delay(10);
    estadoActual2=digitalRead(2);
    time_t t = now(); //Declaramos la variable time_t t

//Si los estados no son iguales, el sketch no hace nada.
    if (estadoActual1 == estadoActual2) {
        if (estadoActual1 != estadoUltimo){
            if (estadoActual1 == HIGH) {
                contador = contador + 1;
                distancia = contador*0.3330088;
            }
        }
    }
} //FIN CALCULO VUELTAS Y METROS

//INICIO DE MEDICIÓN TEMPERATURA Y HUMEDAD
int err;

float temp, hum;

if((err = dht11.read(hum, temp)) == 0) // Si devuelve 0 es que ha leído bien

```

```
/* {  
    Serial.print("Temperatura: ");  
    Serial.print(temp);  
    Serial.print(" Humedad: ");  
    Serial.print(hum);  
    Serial.println();  
}  
else  
{  
    Serial.println();  
    Serial.print("Error Num :");  
    Serial.print(err);  
    Serial.println();  
}  
*/
```

```
//FIN DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA Y HUMEDAD
```

```
//INICIO DE ESCRITURA EN MONITOR SERIE
```

```
    Serial.print ("dia:");  
    Serial.print (day(t));  
    Serial.print (" hora:");  
    /*Serial.print (month(t));  
    Serial.print ("/");  
    Serial.print (year(t));  
    Serial.print ("");*/  
    Serial.print (hour(t));  
    Serial.print(":");  
    Serial.print(minute(t));  
    Serial.print(":");  
    Serial.print(second(t));  
    Serial.print(";");
```

```
Serial.print ("Vueltas=");
Serial.print(contador);
Serial.print(";");
Serial.print ("Distancia=");
Serial.print(distancia);
Serial.println("m");
Serial.print("Temperatura: ");
Serial.print(temp);
Serial.print(" Humedad: ");
Serial.println(hum);

//FIN DE ESCRITURA EN MONITOR SERIE

//INICIO DE ESCRITURA EN LCD
    lcd.clear(); //Borrado del LCD
    lcd.setCursor(0,0); //Apuntamos a la direccion LCD(caracter,linea)
    lcd.print("L="); //Escribimos texto
    lcd.print(distancia); //Escribimos distancia
    lcd.print("m "); //Escribimos texto
    lcd.print("T="); //Escribimos texto
    lcd.print(temp); //Escribimos distancia
    lcd.setCursor(0,1); //Apuntamos a la direccion LCD(caracter,linea)
    lcd.print("V="); //Escribimos texto
    lcd.print(contador); //Escribimos contador
    lcd.print(" HR="); //Escribimos texto
    lcd.print(hum); //Escribimos distancia

//FIN ESCRITURA EN LCD

//COMIENZO DE ESCRITURA REGISTROS EN SD
File dataFile = SD.open("cuenta.csv", FILE_WRITE);
if (dataFile) { // si el archivo se encuentra disponible se escribe en el:
```

```
dataFile.print (year(t));
dataFile.print(";");
dataFile.print(month(t));
dataFile.print(";");
dataFile.print(day(t));
dataFile.print(";");
dataFile.print (hour(t));
dataFile.print(":");
dataFile.print(minute(t));
dataFile.print(":");
dataFile.print(second(t));
dataFile.print(";");
dataFile.print(contador);
dataFile.print(";");
dataFile.println(distancia);
dataFile.print(";");
dataFile.print(temp);
dataFile.print(";");
dataFile.println(hum);
dataFile.close();}}
//FINAL ESCRITURA REGISTRO EN SD
```

```
estadoUltimo= estadoActual1;
```

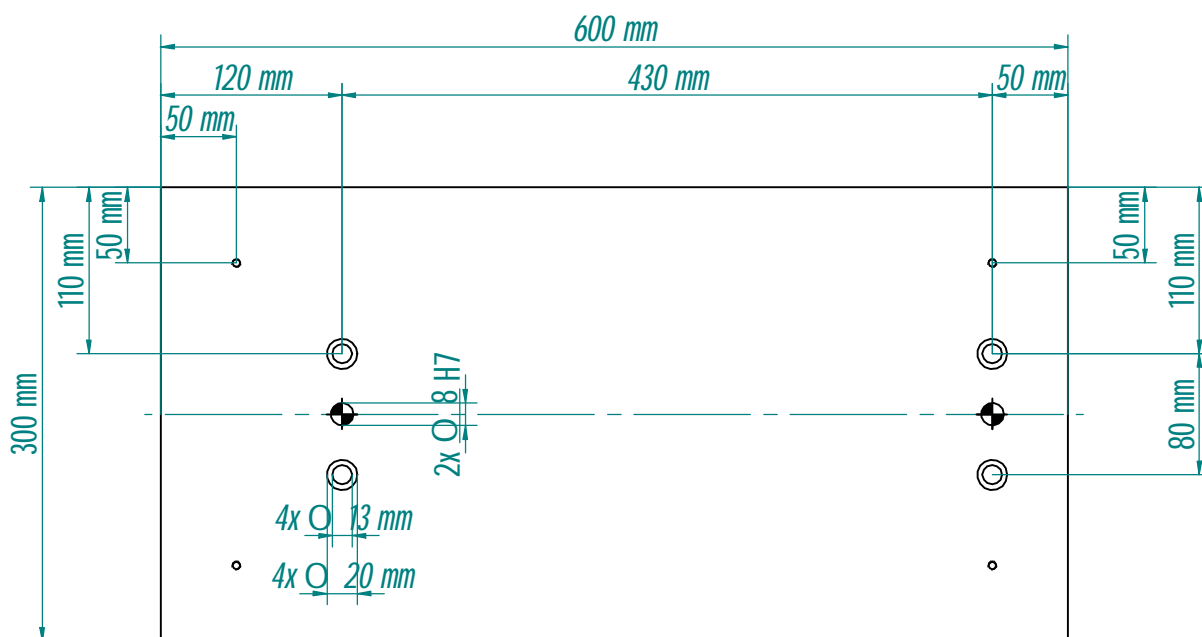
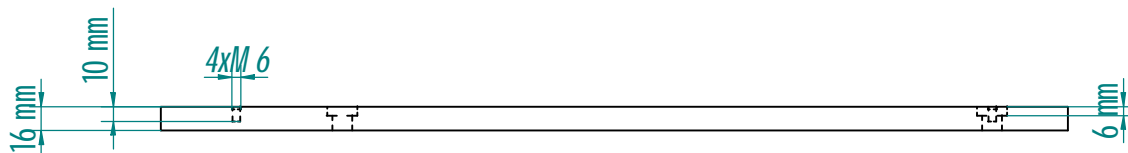
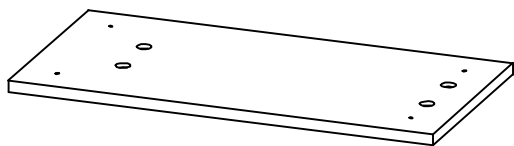
```
if (contador%2 == 0 ) {
    digitalWrite(4, LOW);
}
else {
    digitalWrite(4, HIGH);
}
} }    //FINAL DEL LOOP
```

## **9.5.- Planos:**

En este apartado del Anexo se adjuntan los planos de las diferentes piezas que constituye el Banco de pruebas diseñado para realizar el ensayo de consumo o duración del lubricante.

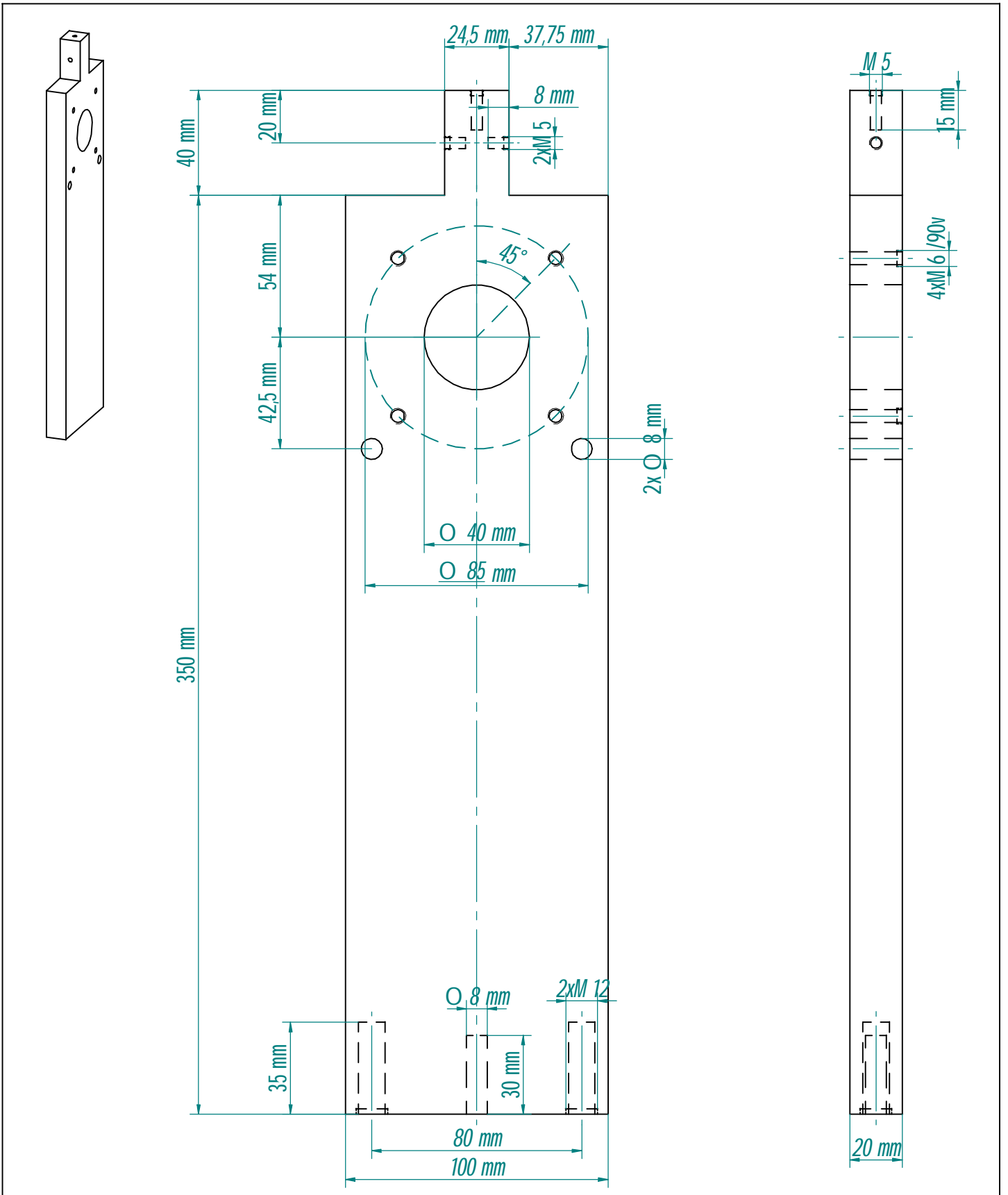
Además, se incluye un plano de la “pastilla” de material poroso.



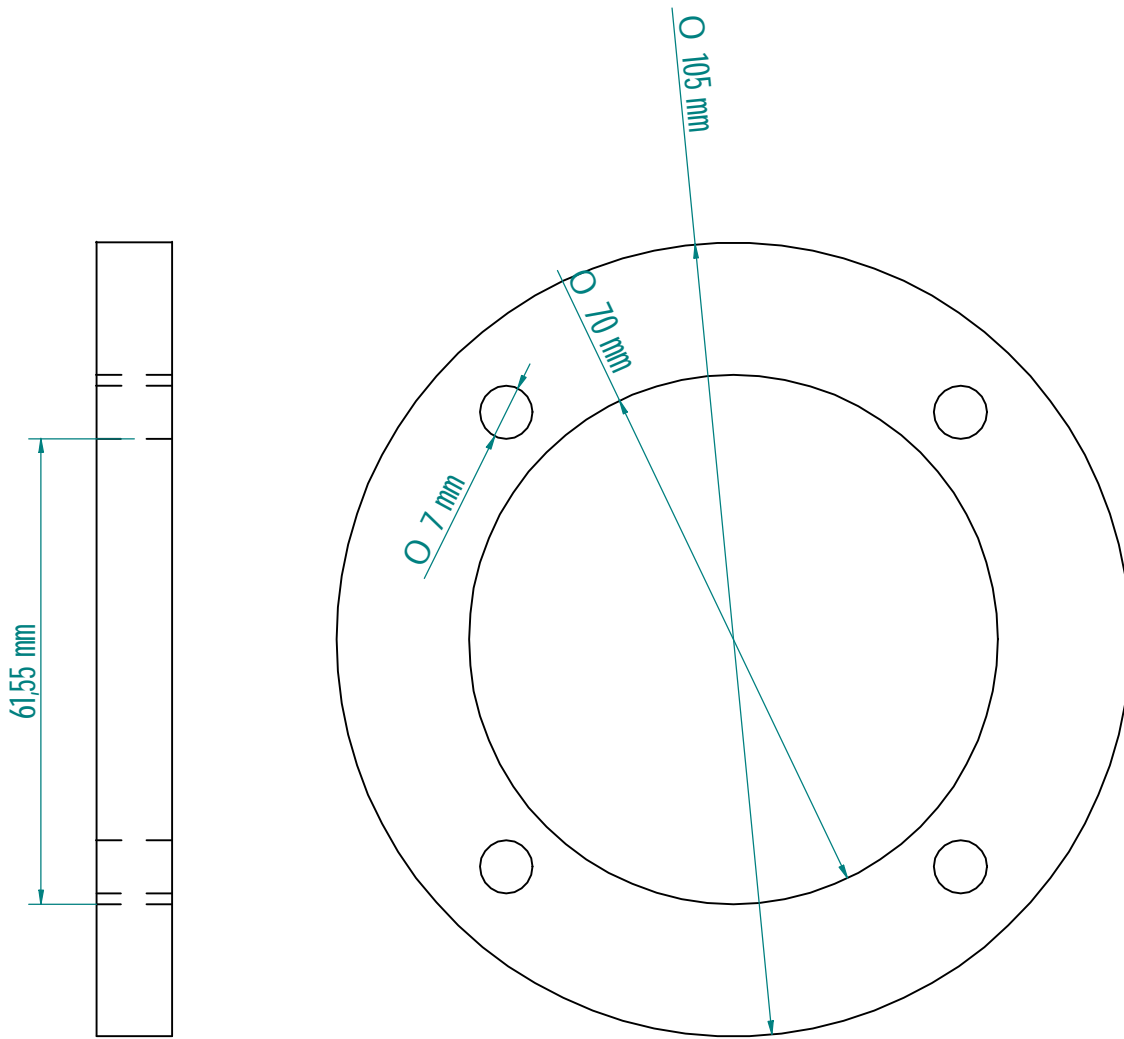


Nº	Modificación		Fecha	Nombre
Dibujado	Fecha	Nombre	Material	Sustituye a
Revisado/Aprobado	01/04/2016	Patxi	F 114	
Escala	Denominación		Cliente	Ref. cliente
1:5	Base		Fase del Proceso	Ref. Eisenor
				Nº de plano

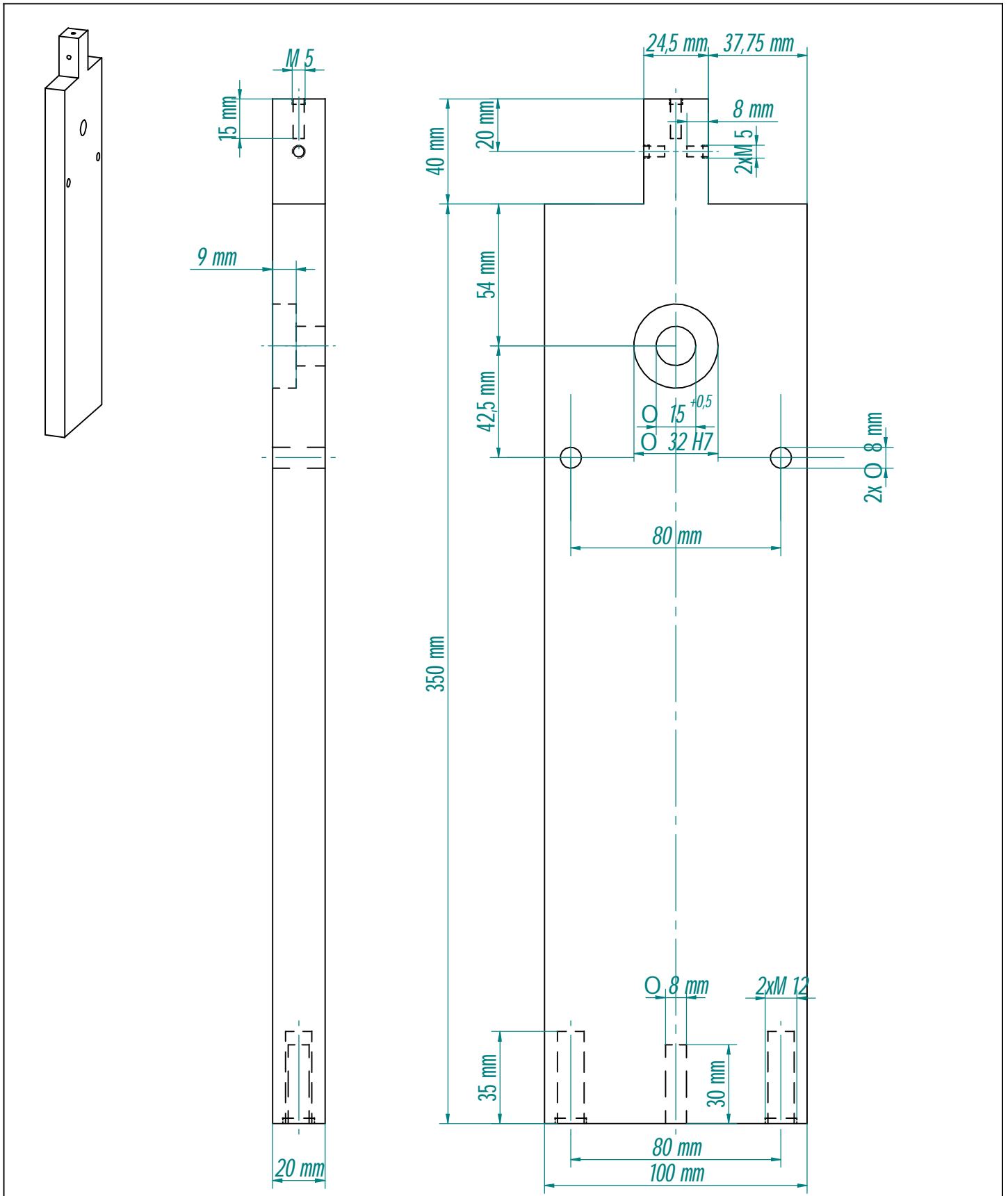
**EISENOR**



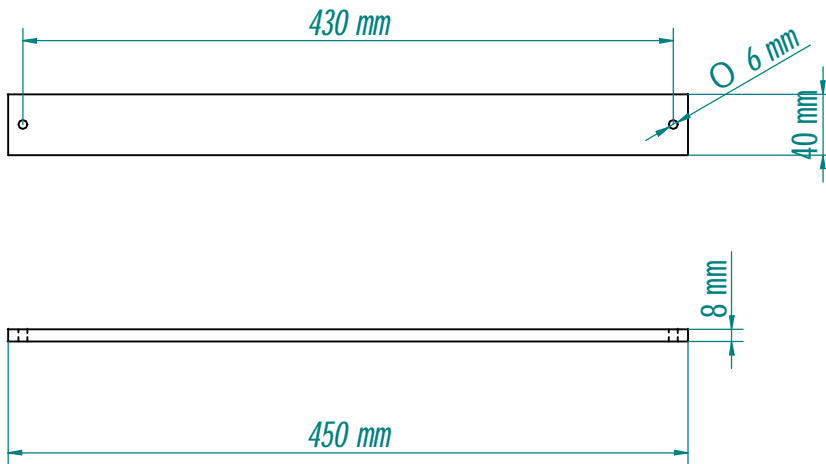
Nº		Modificación		Fecha	Nombre
Fecha		Nombre		Material	Sustituye a
28/04/2016		Patxi		F 114	
Dibujado				Tratamiento	Sustituido por
Revisado/Aprobado					
Escala		Denominación		Cliente	Ref. cliente
<b>EISENOR</b>		Pieza 1		Fase del Proceso	Ref. Eisenor
					Nº de plano



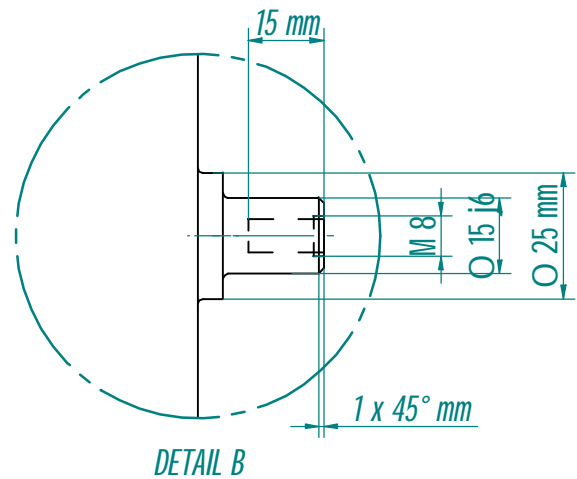
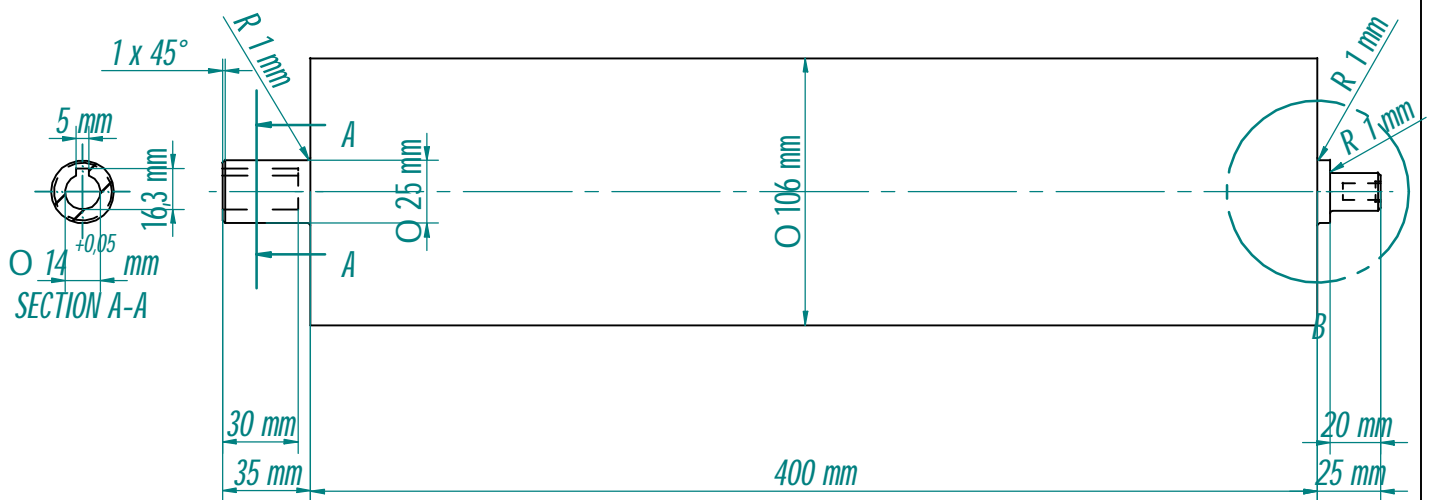
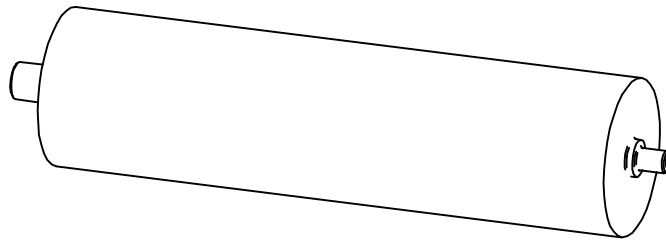
Nº	Modificación			Fecha	Nombre		
	Fecha	Nombre	Material	F 114		Sustituye a	
Dibujado	21/06/2016	Patxi	Tratamiento	Sustituido por			
Revisado/Aprobado							
Escala	Denominación		Cliente		Ref. cliente		
<b>EISENOR</b>	Pieza 2 Banco de Pruebas		Fase del Proceso		Ref. Eisenor		
					Nº de plano		



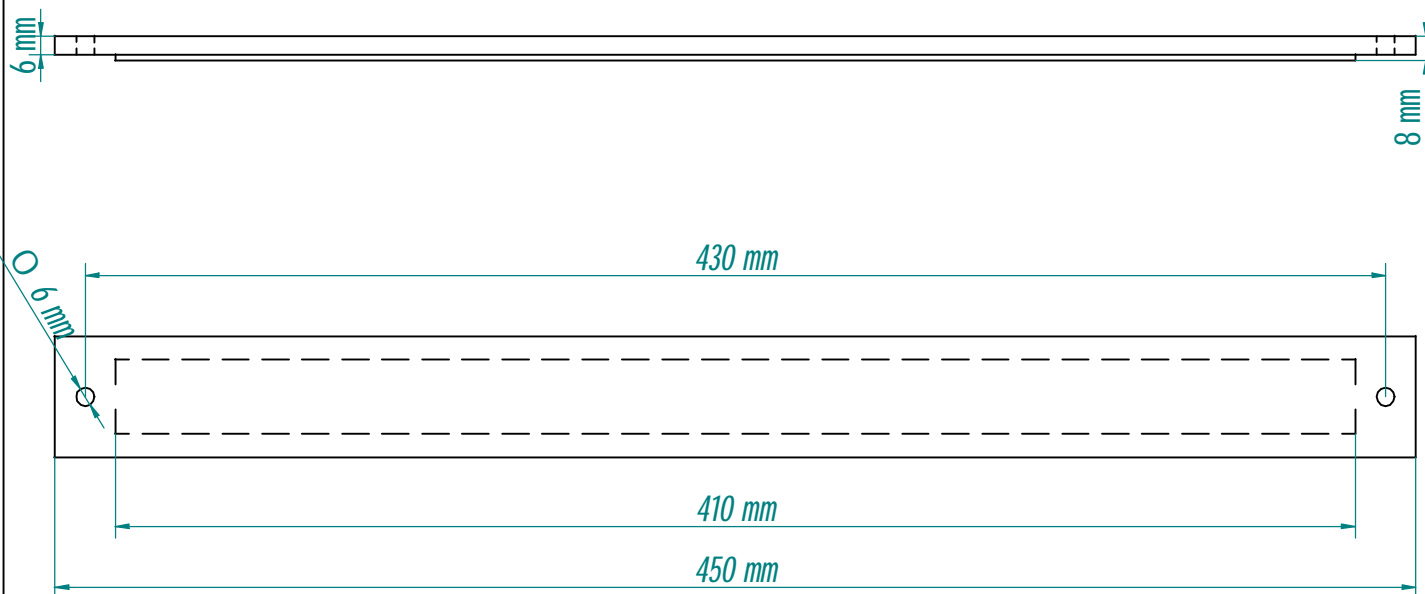
Nº		Modificación		Fecha		Nombre	
Dibujado		Fecha	Nombre	Material		Sustituye a	
Revisado/Aprobado		28/04/2016	Patxi	F 114			
Escala		Denominación		Cliente		Ref. cliente	
EISENOR		Pieza 3		Fase del Proceso		Ref. Eisenor	
						Nº de plano	



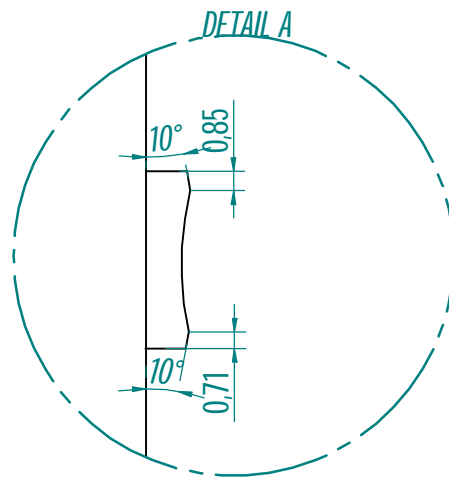
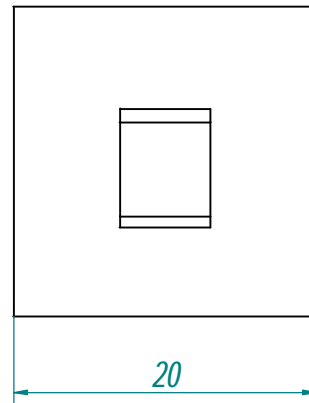
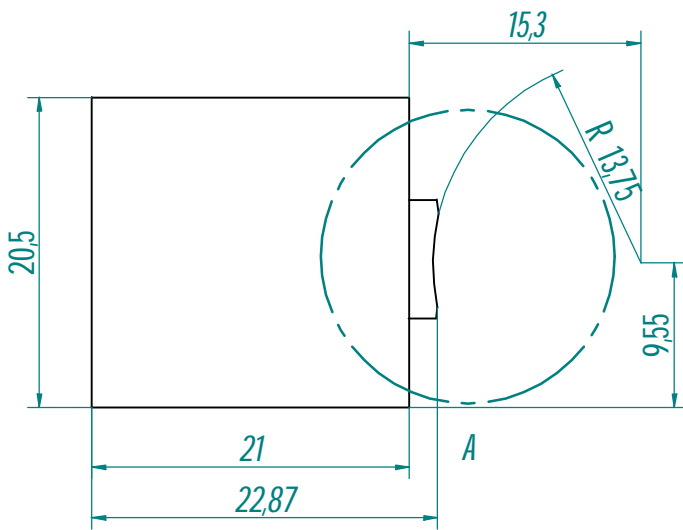
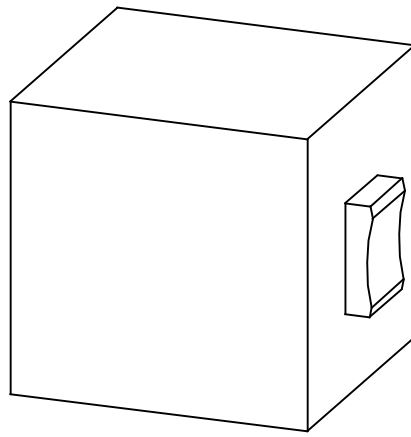
Nº	Modificación			Fecha	Nombre		
	Fecha	Nombre	Material	F 114		Sustituye a	
Dibujado	01/04/2016	Patxi	Tratamiento		Sustituido por		
Revisado/Aprobado							
Escala	Denominación		Cliente		Ref. cliente		
<b>EISENOR</b>	Pletina lateral		Fase del Proceso		Ref. Eisenor		
					Nº de plano		



Nº	Modificación			Fecha	Nombre
Dibujado	Fecha	Nombre	Material	Sustituye a	
Revisado/Aprobado	01/04/2016	Patxi	F 114	Sustituido por	
Escala 1:3	Denominación		Cliente	Ref. cliente	
EISENOR	Rodillo		Fase del Proceso	Ref. Eisenor	
				Nº de plano	



Nº	Modificación			Fecha	Nombre		
	Fecha	Nombre	Material	F 114		Sustituye a	
Dibujado	01/04/2016	Patxi	Tratamiento		Sustituido por		
Revisado/Aprobado							
Escala 1:5	Denominación		Cliente		Ref. cliente		
<b>EISENOR</b>	Tapa Banco de pruebas		Fase del Proceso		Ref. Eisenor		
					Nº de plano		



Nº		Modificación		Fecha	Nombre
Error: No reference		Fecha	Nombre	Material	
Dibujado		01/10/2015	loseba	Polimero poroso	
Revisado/Aprobado				Tratamiento	
Escala		Denominación		Cliente	Ref. cliente
2:1		Pastillas polimero poroso 210.009.003.V3		Fase del Proceso	Ref. Eisenor
EISENOR					Nº de plano



## **10.- BIBLIOGRAFÍA:**

- **Referencias Web:**

1. <http://estudiapolimeros.blogspot.com.es/2012/02/tecnicas-de-transformacion-de-polimeros.html>
2. <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/AP.T7.1MPyC.Tema7.MetodosProcesado.Extrusion.pdf>
3. <http://www.escet.urjc.es/~ihierro/estructuradelamateria/Tema%209.pdf>
4. <http://fisica.universidadlaboralab.es/wordpress/wp-content/uploads/2011/05/polimeros.pdf>
5. <http://www.xente.mundo-r.com/explora/quimica3/Polimeros.pdf>
6. <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/16700/1/polimeros.pdf>
7. <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/AP.T1.1MPyC.Tema1.IntroduccionPolimeros.Generalidades.pdf>
8. [http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/tecnologia-de-materiales-industriales/bloque-vi/Tema19-introduccion\\_polimeros.pdf](http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/tecnologia-de-materiales-industriales/bloque-vi/Tema19-introduccion_polimeros.pdf)
9. [www.artisam.org](http://www.artisam.org)
10. [www.detextiles.com](http://www.detextiles.com)
11. <http://polimerosquimicos.blogspot.com.es/2008/03/clasificacin-de-los-polmeros.html>
12. <http://www.losadhesivos.com/termoplastico.html>
13. <http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/ENE03/JUL09/morillo.pdf>
14. <http://pslc.ws/spanish/pe.htm>
15. <http://pslc.ws/spanish/mcene.htm>
16. <http://ingesaerospace-mechanicalengineering.blogspot.com.es/2011/06/tribologia-lubricacion.html>
17. <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/2724/mcp.pdf?sequence=1>
18. <http://www.produflon.com.ar/pdf/UHMWPE.pdf>
19. <https://www.logismarket.com.mx/ic/keroplast-ficha-tecnica-uhmw-pe-858388.pdf>
20. <http://www.nth.com.ar/panel/Web/Upload/ProductDocument/50145c438387c7a33bd7d861633a2f27.pdf>
21. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/2011/06/polietileno-de-ultra-alto-peso.html>
22. <http://monografias.umcc.cu/monos/2002/Eleno%20Alfonso.pdf>
23. [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0639\\_Q.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0639_Q.pdf)

24. <http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/tecnologia-de-polvos/material-de-clase-1/5.Sinterizacionx.pdf>
25. [http://www.ehu.es/manufacturing/docencia/993\\_ca.pdf](http://www.ehu.es/manufacturing/docencia/993_ca.pdf)
26. <http://www.ecured.cu/Sinterizaci%C3%B3n>

- **Artículos y libros:**

27. Abello, R. (2009) La investigación en Ciencias sociales: sugerencias prácticas sobre el proceso. Barranquilla-Colombia.
28. Arias, F. (1999) el proyecto de investigación; Guía para su elaboración (3<sup>ra</sup>. Edición) Caracas-Venezuela, Editorial Espíteme
29. Balestrini, M. (1997). Cómo se elabora el proyecto de investigación para los estudios formulativos o exploratorios, descriptivos, diagnósticos, evaluativos, formulación de hipótesis causales, experimentales y los proyectos factibles. Caracas: BL Consultores Asociados, Servicio Editorial.
30. Rena.edu.ve (2006) Discusión de los Resultados. (Documento en línea) disponible en: <http://www.rena.edu.ve/cuartaEtapa/metodologia/Tema17.html> (Consulta: 2010, noviembre 02)
40. Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett (2012) Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley (8<sup>a</sup> Edición). México D.F.
41. Francisco Martínez Pérez (Limusa). La Tribología: Ciencia y técnica para el mantenimiento.