

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA DE MATERIALES AVANZADOS
TRABAJO FIN DE MÁSTER**

***CARACTERIZACIÓN TRIBOLÓGICA Y
DURABILIDAD DE UN NUEVO DESARROLLO DE
JUNTAS DE ESTANQUEIDAD DE POLIURETANO
AUTO LUBRICADAS***

Estudiante	<i>Artetxe Boveda, Andoni</i>
Directora Tekniker	<i>Pinedo Araukua, Bihotz</i>
Director UPV/EHU	<i>Gonzalez Martinez, Javier Jesus</i>
Departamento	<i>Ingeniería Minera y Metalúrgica y Ciencia de los Materiales</i>
Curso académico	<i>2020-2021</i>

Bilbao, 9 de septiembre de 2021

RESUMEN

EL objetivo de este trabajo se centra en la caracterización de fricción y durabilidad de juntas de estanqueidad de poliuretano auto lubricado (HPU Lubric[®]) para una aplicación como pueden ser cilindros neumáticos frente a una junta que se viene utilizando comúnmente (HPU Premium[®]). Estos dos materiales tienen las mismas propiedades con la única diferencia de que la nueva junta HPU Lubric tiene propiedades de auto lubricado. Los polímeros han sido fabricados por la empresa Trygonal Iberia SL.

La principal motivación del proyecto es desarrollar el procedimiento de ensayos, ya que en la actualidad no existen apenas normas estándares para testear juntas de este tipo, ni de polímeros en general, en comparación con las que existen para los metales. Para llevar a cabo el proyecto, se hicieron ensayos para la caracterización tribológica en primer lugar en probeta en el tribómetro SRV, en el cual se utilizó la configuración pin-disco, siendo el disco de acero cromado. Después, se hicieron ensayos en el banco de ensayos de juntas TESSA con la intención de tener propiedades tribológicas de componente y así, poder comparar estas con los resultados obtenidos en el tribómetro.

Una vez completados los ensayos, se han analizado los resultados obtenidos mediante la lectura de fuerza de fricción, temperatura y presión, haciendo una comparación entre los dos materiales. Además de ello, las probetas han sido analizadas tanto con la lupa óptica, como con un microscopio óptico. Se ha medido la masa de las probetas tanto al principio como al final del ensayo para la analizar la pérdida de masa.

En los resultados se ha podido apreciar en las juntas HPU Lubric una mejora en las propiedades tribológicas de fricción como de durabilidad respecto al material de referencia HPU Premium. Está diferencia ha sido notable a altas temperaturas, el cual, a mayor temperatura obtenida durante el ensayo, es decir, en las condiciones más extremas para la junta, el auto lubricado del material hace que la junta sufra menos gracias a un film continuo y consistente que es creado en el eje reduciendo tanto la fricción entre junta y eje como el desgaste de la junta.

LABURPENA

Lanaren helburu nagusia propietate auto lubrikatzaileak dituen zilindro pneumatikoetarako junta berri bat (HPU Lubric[®]) karakterizatzea da. Horretarako, erreferentziatzat hartutako poliuretanozko juntarekiko (HPU Premium[®]) diferentziak ikertuko dira. Bi materialek antzerako propietate mekanikoak dituzte, ezberdintasun batekin, HPU Premium materialak propietate auto lubrikatzaileak dituela. Juntak Trygonal Iberia SL enpresarengatik fabrikatuak izan dira.

Proiektuaren motibazio nagusia entseguetarako prozedimendu bat sortzearena da, ez baitago ia arau estandarrik juntak entseiatzeko, ezta polimeroentzat orokorrean, metalekin daudenekin alderatuta. Proiektua aurrera eramán ahal izateko, karakterizazio tribologikorako entseguak egin dira, lehenik eta behin SRV tribometroan, non pin-diskoa konfigurazioarekin egin diren entseguak, pina polimeroa izanik eta diskoa altzairu kromatua. Ondoren, frikzio eta iraunkortasun probak egin ziren juntentzako TESSA entsegu bankuan. Bankuan egindako entseguen helburua konponentearen propietate tribologikoak lortzearena eta hauen emaitzak tribometroan lorturiko emaitzekin alderatzea da.

Behin entseguak eginda, lortutako emaitzak analizatu dira, hau da, entseguetan lorturiko frikzio indarra, tenperatura eta presioaren datuak analizatu eta bi materialen arteko ezberdintasunak ikertu. Horretaz gain, saiakuntzak eginiko probetak mikroskopia optikoarekin zein lupa optikoaren analizatu egin dira. Probeten hasierako zein amaierako masak ere neurtu egin dira haien masa galerak analizatu ahal izateko.

Emaitzetan ikusi da nola HPU Lubric juntak HPU Premium juntak baino jarrera hobea izan dutela propietate tribologikoetan. Hobekuntza hori gehien ikusi den momentua tenperatura altuak lortu direnean izan da, gero eta tenperatura altuagoa lortu, hau da, kondizio zakarrenak izan diren momentuetan, materialaren auto lubrikazio funtzioari esker juntak jasandako esfortzuak txikiagoak izan dira, honek ardatzean sorturiko etengabea eta trinkoa den film-ari esker frikzio indarra eta desgastea murrizten baititu.

ABSTRACT

The objective of this work focuses on the characterisation of friction and durability of self-lubricating polyurethane seals (HPU Lubric©) for an application such as pneumatic cylinders. For this purpose, a direct comparison will be made with a reference polyurethane (HPU Premium©). These two materials have the same properties with the only difference that HPU Lubric seal has self-lubricating properties. The polymers have been manufactured by the company Trygonal Iberia SL.

The main motivation of the project is to develop the test procedure, as there are currently hardly any standard specifications for testing seals of this type, or for polymers in general, compared to those that exist for metals. To carry out the project, tribological characterisation tests were carried out firstly on the SRV tribometer, in which the pin-disc configuration was selected. Being the polyurethane the pin and the disc a chromium-plated steel. Afterwards, tests were carried out on the TESSA seal test bench to obtain the tribological properties of the component and thus, be able to compare these results with the ones obtained on the tribometer.

Once the tests were completed, the results obtained were analysed by means of friction force, temperature, and pressure readings, making a comparison between the two materials. In addition, the specimens were analysed both, with the optical magnifying glass and with an optical microscope. The mass of the specimens was measured both, at the beginning and at the end of the test to analyse the mass loss.

The results showed an improvement in the tribological properties of the HPU Lubric seals compared to the HPU Premium reference material. This difference was noticeable at higher temperatures, which, at higher temperatures obtained during the tests, i.e. the most extreme conditions for the seal, the self-lubrication of the material causes the seal to suffer less due to a continuous and consistent film that is created on the shaft, reducing both, the friction between the seal and the shaft, and the wear of the seal.

CONTENIDO

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Alcance	2
2. Estado del arte	4
2.1. Clasificación de juntas de estanqueidad	4
2.2. Materiales utilizados en juntas	9
2.3. Mecanismos de fallo	15
2.4. Coeficiente de fricción	21
3. Metodología y procedimiento experimental.....	23
3.1. Materiales.....	23
3.2. Caracterización tribológica básica en tribómetro SRV Optimol	
26	
3.2.1. Equipo de ensayo.....	26
3.2.2. Ensayos normalizados	27
3.2.3. Otras configuraciones de ensayo	29
3.2.4. Configuración de ensayo para proyecto	29
3.3. TESSA: banco de ensayo de juntas.....	31
3.3.1. Características técnicas	32
3.3.2. Casos de estudios que se pueden llevar a cabo	32
3.3.3. Tipos y matriz de ensayo realizado	33
3.3.4. Procedimiento de ensayo	35
4. Resultados y discusión	41
4.1. Caracterización básica de materiales (ensayos SRV)	41
4.1.1. Ensayos tribómetro.....	41
4.1.2. Inspección de las probetas.....	44
4.2. Caracterización de juntas en banco de ensayos TESSA	46
4.2.1. Ensayo de fricción	46
4.2.2. Ensayo de durabilidad	52
5. Conclusiones	58
6. Bibliografía	59
ANEXO I	60

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. SISTEMA DE SELLADO DE UN PISTÓN [1].....	4
ILUSTRACIÓN 2. JUNTA TÓRICA COMPRIMIDA EN UNA RANURA [2].....	5
ILUSTRACIÓN 3. CORTE TRANSVERSAL DE UN RETÉN [3]	6
ILUSTRACIÓN 4. DISEÑO DE JUNTAS RECÍPROCOS: (A) ENERGIZADO POR ELASTÓMERO, Y (B) ENERGIZADO POR MUELLE METÁLICO EN FORMA DE U [3]	7
ILUSTRACIÓN 5. EJEMPLOS DE GEOMETRÍAS DE JUNTAS DE PISTÓN Y DE VÁSTAGO [4].....	8
ILUSTRACIÓN 6. FACTORES QUE AFECTAN AL RENDIMIENTO DE SELLADO [5]	9
ILUSTRACIÓN 7. CURVA TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE DIFERENTES MATERIALES DE SELLADO [2]	11
ILUSTRACIÓN 8. TEMPERATURA DE TRABAJO DE LOS ELASTÓMEROS MÁS UTILIZADOS [6].....	13
ILUSTRACIÓN 9. FALLO DEBIDO AL MONTAJE INCORRECTO (FUENTE: TEKNIKER).....	16
ILUSTRACIÓN 10. DAÑO DE DIESELING EN UN JUNTA [7].....	17
ILUSTRACIÓN 11. GRIETA POR FATIGA EN LA SUPERFICIE DE UNA JUNTA (FUENTE: TEKNIKER)	19
ILUSTRACIÓN 12. TÍPICA CURVA DE DESGASTE EN UN SISTEMA TRIBOLÓGICO [9]	20
ILUSTRACIÓN 13. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS SRV (FUENTE: TEKNIKER).....	26
ILUSTRACIÓN 14. CONFIGURACIÓN ENSAYO TRIBÓMETRO SRV	27
ILUSTRACIÓN 15. VARIEDAD DE CONFIGURACIONES DE ENSAYO SRV	28
ILUSTRACIÓN 16. CONFIGURACIÓN SRV	30
ILUSTRACIÓN 17. IMAGEN BANCO DE ENSAYO DE JUNTAS TESSA	31
ILUSTRACIÓN 18. CONFIGURACIÓN ENSAYO TESSA.....	33
ILUSTRACIÓN 19. BALANZA DE PRECISIÓN	36
ILUSTRACIÓN 20. MONTAJE DE JUNTA	36
ILUSTRACIÓN 21. MONTAJE DE PIEZA DE LA JUNTA AL CABEZAL	37
ILUSTRACIÓN 22. CABEZALES Y VÁSTAGO MONTADOS EN CÁMARA.....	37
ILUSTRACIÓN 23. CERCADO DE SEGURIDAD DE LA TESSA.....	38
ILUSTRACIÓN 24. PANTALLA AJUSTES PLC DE LA TESSA	38
ILUSTRACIÓN 25. PANTALLA ALARMAS PLC DE LA TESSA	39
ILUSTRACIÓN 26. PANTALLA MANUAL PLC DE LA TESSA	39
ILUSTRACIÓN 27. PANTALLA AUTOMÁTICO PLC DE LA TESSA.....	40
ILUSTRACIÓN 28. RESULTADO COF VS PRESIÓN (SRV)	43
ILUSTRACIÓN 29. FILM HPU PREMIUM EN LA ZONA DE PEGADO DEL DISCO DE ACERO (3795)	44
ILUSTRACIÓN 30. FILM HPU LUBRIC EN LA ZONA DE PEGADO DEL DISCO DE ACERO (3798)	45
ILUSTRACIÓN 31. FILM HPU LUBRIC EN LA ZONA DE DESLIZAMIENTO DEL DISCO DE ACERO (3798)	45
ILUSTRACIÓN 32. RESULTADOS FUERZA FRICCIÓN EN EL BANCO DE ENSAYOS TESSA	47
ILUSTRACIÓN 33. FUERZA FRICCIÓN 120 BAR. A) 0,2M/S, B) 0,3M/S, C) 0,4M/S, D) 0,5M/S, Y E)0,6M/S	48
ILUSTRACIÓN 34. FUERZA FRICCIÓN 60 BAR. A) 0,2M/S, B) 0,3M/S, C) 0,4M/S, D) 0,5M/S, Y E)0,6M/S.	49
ILUSTRACIÓN 35. FUERZA FRICCIÓN 0 BAR. A) 0,2M/S, B) 0,3M/S, C) 0,4M/S, D) 0,5M/S, Y E) 0,6M/S ..	50

ILUSTRACIÓN 36. HPU PREMIUM TRIBOFILM 7238LN43	51
ILUSTRACIÓN 37. HPU LUBRIC DOPED TRIBOFILM 7238LN33	51
ILUSTRACIÓN 38. PRESIÓN DURANTE LOS ENSAYOS DE DURABILIDAD DE HPU PREMIUM; A) PRIMER CICLO, B) SEGUNDO CICLO, C) TERCER CICLO Y D) CUARTO CICLO.....	53
ILUSTRACIÓN 39. PRESIÓN DURANTE LOS ENSAYOS DE DURABILIDAD DE HPU LUBRIC; A) PRIMER CICLO, B) SEGUNDO CICLO, C) TERCER CICLO, D) CUARTO CICLO, E) QUINTO CICLO Y F) SEXTO CICLO....	54
ILUSTRACIÓN 40. DISTANCIA PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL ENSAYO DE DURABILIDAD	55
ILUSTRACIÓN 41. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LOS ENSAYOS DE DURABILIDAD DE HPU PREMIUM DURANTE A) PRIMER CICLO, B) SEGUNDO CICLO, C) TERCER CICLO Y D) CUARTO CICLO	55
ILUSTRACIÓN 42. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LOS ENSAYOS DE DURABILIDAD DE HPU LUBRIC DURANTE A) PRIMER CICLO, B) SEGUNDO CICLO, C) TERCER CICLO, D) CUARTO CICLO, E) QUINTO CICLO Y F) SEXTO CICLO	56

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE HPU PREMIUM.....	24
TABLA 2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE HPU LUBRIC DOPED.....	25
TABLA 3. RANGO DE PARÁMETROS DEL SRV.....	29
TABLA 4. RANGOS DE AMPLITUD PARA DIFERENTES FRECUENCIAS.....	29
TABLA 5. MATRIZ DE ENSAYOS BÁSICOS EN SRV.....	30
TABLA 6. RANGO DE TRABAJO DEL BANCO DE JUNTAS TESSA.....	32
TABLA 7. MATRIZ DE ENSAYOS PARA JUNTAS HPU LUBRIC.....	34
TABLA 8. MATRIZ DE ENSAYO PARA JUNTAS HPU PREMIUM.....	34
TABLA 9. MATRIZ DE ENSAYOS DE DURABILIDAD.....	35
TABLA 10. RESULTADOS TRIBÓMETRO SRV DE HPU PREMIUM.....	42
TABLA 11. RESULTADOS TRIBÓMETRO SRV DE HPU LUBRIC DOPED.....	42
TABLA 12. RESUMEN RESULTADOS DE DURABILIDAD.....	52

1. INTRODUCCIÓN

El trabajo se basa en el procedimiento de ensayo para la caracterización tribológica de eficiencia y durabilidad de juntas de estanqueidad con aplicación para cilindros neumáticos. En este caso se han utilizado dos materiales distintos, por un lado, un poliuretano convencional de referencia (HPU Premium[®]) y un poliuretano auto lubricado (HPU Lubric[®]). Estas juntas tienen una pequeña diferencia entre sí, por un lado, está el HPU Premium, el cual es el polímero que vienen usando actualmente la empresa Trygonal Iberia SL, el cual se ha utilizado como polímero de referencia a la hora de hacer los ensayos. Por otro lado, se han ensayado las juntas HPU Lubric doped, los cuales tienen las mismas propiedades mecánicas que el HPU Premium. La única diferencia que hay entre las dos juntas es que el HPU Lubric doped tiene un aditivo con base flúor que hace que este tenga una auto lubricación que ayudaría al material a tener un desgaste menos que el polímero de referencia.

En primer lugar, se pondrá en contexto el proyecto, dando una pequeña explicación sobre la aplicación real y el componente en el que van montados las juntas y el funcionamiento de este. Partiendo de las condiciones de trabajo reales de la junta, se busca la manera en la que se puede conseguir la mejor representación de las condiciones mediante un ensayo tribológico.

Para ello se analizará profundamente el comportamiento del material y se estudiarán los antecedentes en poliuretanos auto lubricados.

Las juntas elastómeras son unos componentes muy usados como juntas de estanqueidad en dispositivos con fluidos. Su uso es muy extendido en todo tipo de industrias como la automovilística, energía, aeroespacial y manufactura. Son componentes críticos en motores, rodamientos etc. Su principal función es el repeler la transmisión del fluido entre diferentes cavidades, así como el evitar que entren partículas de suciedad.

1.1. Objetivos

La principal motivación del proyecto es generar un procedimiento de ensayos de las juntas con el fin de crear un procedimiento estándar para las juntas de estanqueidad debido a que, en la actualidad, al contrario que lo que ocurre para los metales, no existe una gran variedad de procedimientos estándares para los ensayos de materiales poliméricos.

El presente proyecto consiste en evaluar la eficiencia y durabilidad de las nuevas juntas auto lubricadas desarrolladas por la empresa Trygonal Iberia SL frente al desarrollo convencional. Para ello se llevará a cabo una caracterización tribológica de los desarrollos tanto a escala laboratorio (probetas) como a nivel componente en un banco de ensayos para sistemas de sellado. Este proyecto se desarrolla en el marco del proyecto europeo iTribomat (Intelligent Open Test Bed for Materials Tribological Characterisation Services) que tiene como objetivo proporcionar el primer banco de pruebas de innovación abierta del mundo dedicado a validar y escalar nuevos materiales, permitiendo así la caracterización inteligente de materiales tribológicos y fomentando la innovación industrial en la industria manufacturera europea.

1.2. Alcance

El proyecto ha sido redactado con el objeto de especificar el comportamiento tribológico, así como el desgaste del nuevo material auto-lubricado frente a un material de poliuretano convencional que ha sido utilizado como material de referencia. Los datos obtenidos serán utilizados para el desarrollo del proyecto europeo iTribomat, en el que un caso de uso consiste en desarrollar herramientas y protocolos que permiten llevar a cabo la caracterización tribológica de juntas de estanqueidad.

Así, se desarrollarán procedimientos de ensayos específicos para la caracterización tribológica (fricción y desgaste) de materiales poliméricos. Haciendo por una parte la caracterización tribológica de los materiales ensayándolos en un tribómetro (SRV®). Y, por otro lado, haciendo ensayos de

componente en el banco de ensayos de juntas TESSA, disponible en Tekniker, en el cual se hará el montaje, puesta a punto y desarrollo de protocolo de ensayo. Se harán dos tipos de ensayos, por un lado, ensayos de fricción y por otro ensayo de durabilidad. Una vez hecho los ensayos se hará un análisis y caracterización de las muestras ensayadas y se determinará la eficiencia de las nuevas juntas.

2. ESTADO DEL ARTE

Los sistemas de sellado utilizados en los dispositivos suelen estar compuestos por una combinación de diferentes juntas de estanqueidad, con el fin de minimizar las fugas que puedan ocasionarse en el componente. Un buen ejemplo de ello lo podemos encontrar en la Ilustración 1.

2.1. Clasificación de juntas de estanqueidad

Las juntas de estanqueidad usualmente se clasifican según su función. La función de las juntas de eje (Rod Seal) es el sellado del fluido del interior de una cámara para que no fugue al exterior. La junta llamada rascador (Wiper Seal) previene la penetración de partículas de suciedad al interior de la cavidad. Estas dos juntas trabajan en conjunto para proteger el sistema manteniendo al margen el polvo, agua y otro tipo de contaminantes. Además de las juntas de estanqueidad comentados también hay juntas estáticas, también conocidos como O-rings, los cuales sirven como juntas entre dos partes estáticas. Por último, tenemos los aros del pistón o aros guía (Piston guide ring) que sirven para que la presión se mantenga lo más extensa posible sobre el eje y ayudan a que el eje se mantenga alineado.

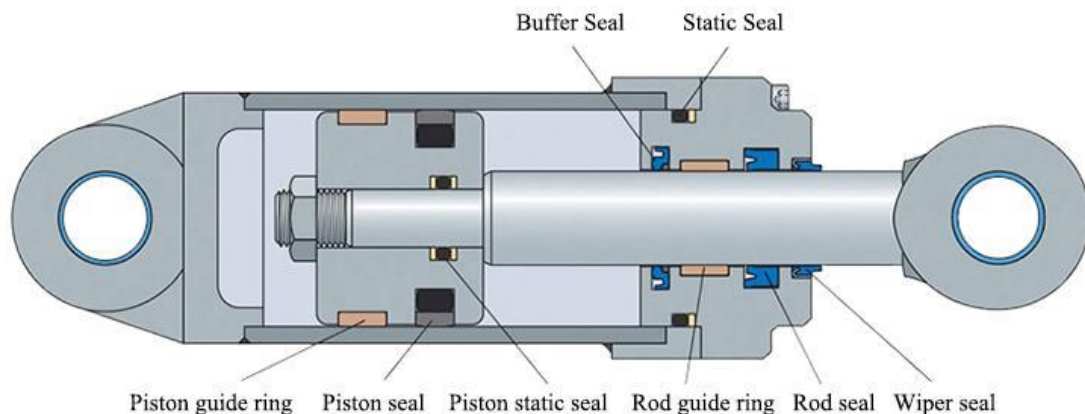


Ilustración 1. Sistema de sellado de un pistón [1]

Indiferentemente de la función de las juntas, tienen la función principal de sellar dos áreas o cavidades. Para ello en todos los casos hace falta una determinada interferencia o compresión entre las dos superficies a sellar para

prevenir fugas. En cuanto a las juntas dinámicas que sellan superficies con movimiento relativo entre sí, se clasifican en dos tipos de juntas: Juntas rotatorias y juntas recíprocas. Las juntas rotativas se usan cuando el movimiento relativo entre las dos caras es rotatorio u oscilante, mientras las juntas recíprocas se usan para el sellado de dos superficies que tienen un movimiento relativo recíproco.

Juntas estáticas

La principal función de una junta estática se basa en el sellado de dos superficies con una velocidad relativa nula entre ellas. Estos son usados para todo tipo de componentes que tienen un fluido que retener en su interior. Se diferencian en dos grupos principales, juntas y juntas (gasket). Las juntas están tipificadas como juntas tóricas de elastómeros en una ranura para sellar y juntas de material fibroso sujetadas en un par de bridas.

Estas juntas están pensadas para que con la propia presión ejercida en la junta sea suficiente para que haga un correcto sellado y no ocurran fugas en las mismas. La junta estática más común es la junta tórica de elastómero y la forma de trabajo más común que tienen los mismos se puede observar en la Ilustración 2. El tamaño del diámetro del perfil de la junta se basa en unas normas de diseño estándares gracias a la gran cantidad de estudio que hay sobre la misma. A veces estas normas no son seguidas por falta de conocimiento o por el simple hecho de reducir los costos. Esto puede originar graves problemas de seguridad a corto y medio plazo [2].

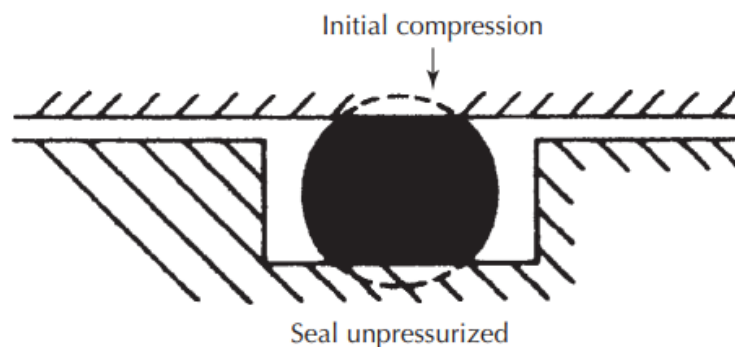


Ilustración 2. Junta tórica comprimida en una ranura [2]

Juntas rotatorias

Este tipo de juntas se pueden encontrar en diferentes componentes como bombas industriales, cajas de cambio, turbinas, motores, compresores etc. Entre todas las juntas rotatorias el más usado es el retén (lip seal). Su geometría suele ser asimétrica y su principal característica es que suelen tener un labio que trabaja como junta. Las diferentes partes que tiene un retén pueden ser observados en Ilustración 3.

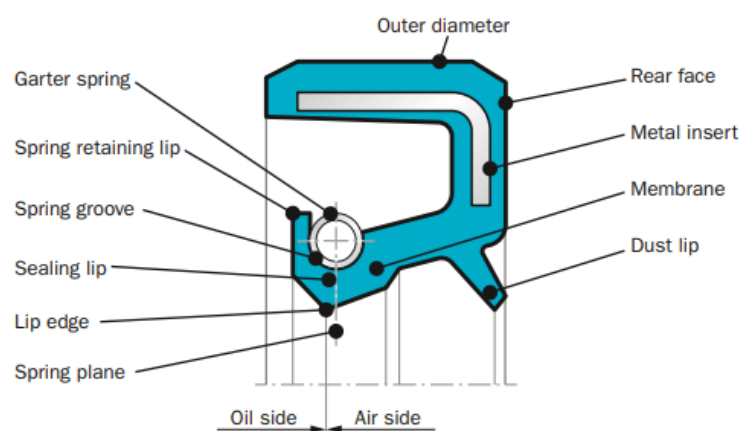


Ilustración 3. Corte transversal de un retén [3]

Estos retenes suelen estar provistos de un muelle toroidal con el fin de hacer una mayor presión circunferencial para aumentar la presión máxima que pueda soportar la junta y para compensar el cambio de geometría que pueda sufrir el polímero debido a la temperatura y ataques químicos. El acero usado para el muelle suele ser acero SAE1074 o acero inoxidable AISI304. Los diseñadores juegan con la rigidez del muelle para ajustar la presión para conseguir los valores deseados [3].

En cuanto al material, la gran mayoría de los retenes están hechos de polímeros como el Nitrilo Butadieno (NBR), Goma acrílica (ACM), Silicona (VQM), Fluorados (FKM) y Nitrilos Hidrogenados (HNBR). En general, la presión máxima de operación de este tipo de juntas es en torno a 0,5 bar y la máxima velocidad de operación es en torno a los 30 m/s.

Juntas recíprocas

Las juntas recíprocas se encuentran usualmente en cilindros neumáticos e hidráulicos, inyectores de bombas y prensas, entre otros. Hoy en día hay una gran variedad de estas juntas con diferentes geometrías, dimensiones y materiales. Estos están hechos de diversos materiales, tales como elastómeros y plásticos. En el caso de las juntas hechos de plástico, tienen que recibir energía de algo externo ya que por sí solos no tienen la capacidad suficiente para garantizar el sellado, por ello, tienen que ir acompañados de un elemento para que haga la función de presión. Para hacer esa función, existen dos métodos, introducir un elastómero (Ilustración 4a), o incorporar un muelle metálico en las juntas en forma de U en los retenes (Ilustración 4b). Estos tipos de elastómeros son utilizados para aplicaciones de alta y baja presión neumática como hidráulica. Tienen una gran capacidad de sellado estático y una muy baja fuga cuando se encuentra en movimiento [2].

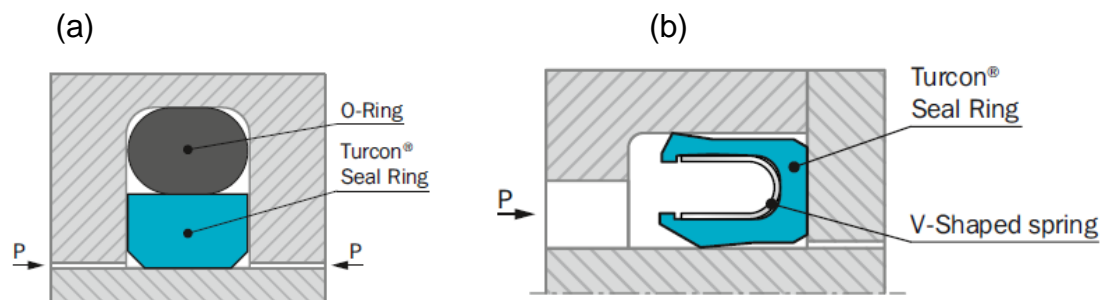


Ilustración 4. Diseño de juntas recíprocas: (a) energizado por elastómero, y (b) energizado por muelle metálico en forma de U [3]

Con el movimiento recíproco, las juntas además de soportar ciclos de presión tienen que soportar las fuerzas de fricción que ocurren con el eje o con la cavidad del pistón. El diseño de estos es muy importante a la hora de escoger cual usar para cada función, ya que un incorrecto diseño puede llevar a un fallo prematuro de la junta provocando una fuga. Un ejemplo de ello pueden ser los O-ring, algunas han tenido un fallo prematuro por la fuerza espiral ocurrida en ellas. Esto ocurre debido a que la fuerza fricción a la que está sometida la junta no es uniforme alrededor de la superficie de contacto. Por ello, a lo largo de los años se han desarrollado nuevas juntas con la geometría de sección cuadrada

o rectangular, ya que tienen una mayor resistencia al fallo por la fuerza espiral y mejoran las características de las juntas con sección circular [2].

En la Ilustración 5 se pueden ver las geometrías más comunes en las juntas de pistón y vástago para actuadores hidráulicos. La geometría de estas juntas determina la gran parte de los parámetros de sellado, así como la presión de contacto entre superficies, la fricción, características de hidroneo y la contaminación de exclusiones.

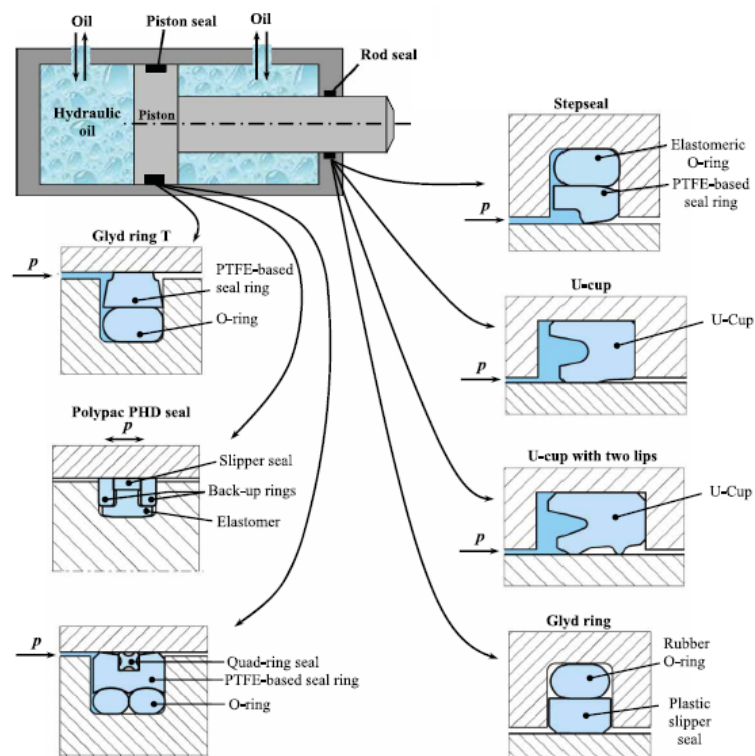


Ilustración 5. Ejemplos de geometrías de juntas de pistón y de vástago [4]

Debido al gran rango de parámetros envueltos en cada operación de sellado, la obtención del diseño más apropiado para el sistema de sellado para una aplicación específica es todo un reto. En la Ilustración 6 se observan las principales razones que afectan al correcto sellado. Geometría de la sección de la junta, material y rugosidad de la junta y sus relativas contracaras, propiedades de sellado, tolerancias de fabricación y condiciones de la operación del sistema que afectan al ratio de fugas, fricción y desgaste de los componentes de sellado.

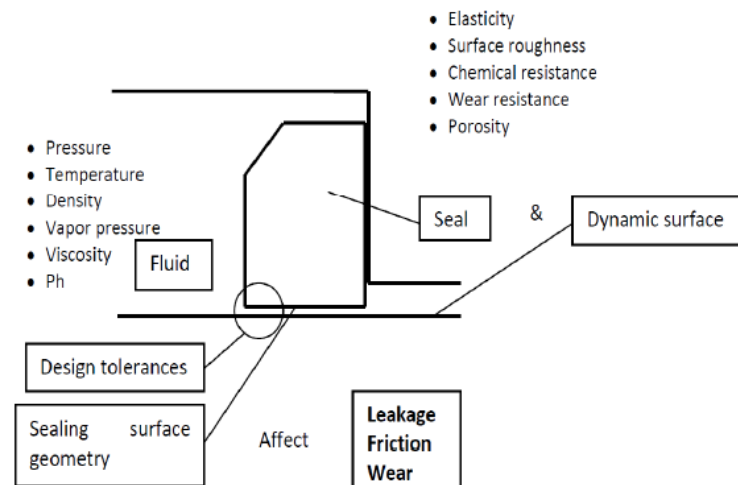


Ilustración 6. Factores que afectan al rendimiento de sellado [5]

La selección del mejor material de sellado y de contacto es esencial a la hora de incrementar la eficiencia y la vida de los sistemas de sellado. Debido a la continua demanda del mercado en el aumento del rendimiento de los aparatos mecánicos, se necesita una mejoría en las juntas y sus materiales. Unas de las principales propiedades que se piden obtener son la baja fricción, bajo desgaste y baja fuga. La investigación y el desarrollo en el diseño de nuevas soluciones de sellado requiere un profundo conocimiento en diferentes áreas como la ciencia de materiales, tribología y modelización, siendo muy importante envolver todos los factores con un único fin.

2.2. Materiales utilizados en juntas

Las diferentes geometrías de juntas que existen combinados con el material adecuado cubren la gran mayoría de la demanda que existe hoy en día en la industria. Los materiales más importantes para el sellado de fluidos debido a su bajo coste y sus propiedades viscoelásticas son los elastómeros, los termoplásticos y los plásticos. Estos polímeros se basan en moléculas de cadena larga que generalmente se combinan con otros materiales para la obtención de unas propiedades específicas. Presentan unas propiedades de tensión deformación no lineal y sus propiedades térmicas y mecánicas son muy dependientes de la temperatura ambiental. La gran variedad de materiales poliméricos existentes ayuda a cubrir diversas aplicaciones y condiciones de

operabilidad, desde una baja velocidad (menor a 0,5 m/s), hasta velocidades superiores a 15 m/s.

Elastómeros

Estos consisten en una larga cadena de molecular orgánicas con una unidad de monómero repetida. Usualmente tienen agentes de curado, aditivos y antioxidantes. Sus propiedades son muy dependientes de su formulación y procesado. Cuando un polímero es mezclado con un agente de curado y sometido a temperatura o presión, se crean lazos entre cadenas. Además, se suelen añadir aditivos para poder incrementar su dureza.

Las propiedades y comportamiento de un elastómero dependen del agente de curado utilizado y el material, tamaño, forma y cantidad del aditivo añadido al material base. En general, los elastómeros son un tipo de material que presentan alta elasticidad, viscoelasticidad y temperatura de transición vítrea muy por debajo de la temperatura ambiente. Son una buena solución para sistemas de sellado gracias a su facilidad para acomodarse en diferentes alojamientos, tolerancias, así como variaciones de presiones y temperatura. Su gran adaptabilidad se debe a su bajo modulo elástico, gran elongación de rotura, una alta histéresis y una gran resiliencia, por lo que soportan una alta compresión, tracción y tensión a cortante sin que tengan una deformación permanente [2].

Las principales propiedades de los elastómeros son los siguientes:

- Bajo módulo de elasticidad y alta elongación antes de rotura. Gracias a este factor, el elastómero puede recibir grandes deformaciones para su instalación, como se puede observar en la Ilustración 7. Gracias a su bajo módulo de elasticidad, el elastómero se acomoda fácilmente a las tolerancias y excentricidades de montaje.
- Tiene una curva de tensión-deformación no lineal.
- Baja histéresis y gran resiliencia. La combinación de estas dos propiedades hace que los elastómeros tengan la capacidad de

responder rápidamente a los cambios de interferencia, por ejemplo, cambios de presión o excentricidades dinámicas.

- Un alto valor del coeficiente de Poisson (ν). Este valor ronda los 0,5, es decir, el material es prácticamente incompresible. La deformación dada en un eje se deforma en la otra dirección.
- Su resistencia química depende de la formulación del elastómero.
- Sus propiedades termo mecánicas son muy dependientes a la temperatura del lugar en el que se encuentran.

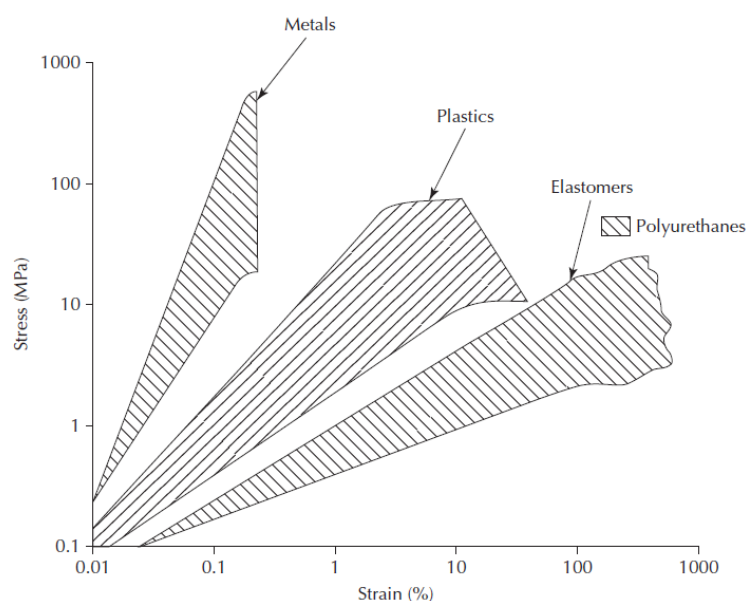


Ilustración 7. Curva tensión-deformación de diferentes materiales de sellado [2]

Las principales limitaciones que tienen los elastómeros son los siguientes:

- Un rango limitado de temperatura. La temperatura es la gran limitante a la hora de usar los elastómeros para aplicaciones de sellado. La gran mayoría de los elastómeros se usan en rangos de temperatura de entre -30°C y 100°C .
- Memoria. Cuando un elastómero se encuentra parado durante un largo periodo de tiempo, tiende a adherirse a la superficie con la que está en contacto, por ello, al comienzo presenta una alta fricción, la cual puede causar vibraciones y pegados.

- Alta fricción. Durante el deslizamiento presentan una alta fricción, es por ello que no es común ver elastómeros en aplicaciones secas.
- Absorción de fluidos. Los fluidos tienden a disolverse en la superficie del material y penetran en él hasta conseguir el equilibrio. Este fenómeno emblandece el elastómero, pudiendo provocar la descompresión.

Los elastómeros comúnmente usados son el caucho de nitrilo (Nitrile Rubber, NBR), Poliuretanos (AU y EU), cauchos de nitrilo hidrogenados (Hydrogenated Nitrile Rubber, HNBR), Fluorocarbonos (FKM), Perfluorelastómeros (FFKM), monómero de etileno propileno dieno (EPDM), fluorosilicona (FVMQ) y caucho de silicona (Q). Este grupo de materiales cubre un rango de temperaturas de funcionamiento de entre -50°C y $+270^{\circ}\text{C}$ en unas condiciones de trabajo estables. Su uso está limitado a aplicaciones que requieren una velocidad de deslizamiento inferior a 3 m/s. En la Ilustración 8 se pueden observar los rangos de temperatura de trabajo de los elastómeros más utilizados.

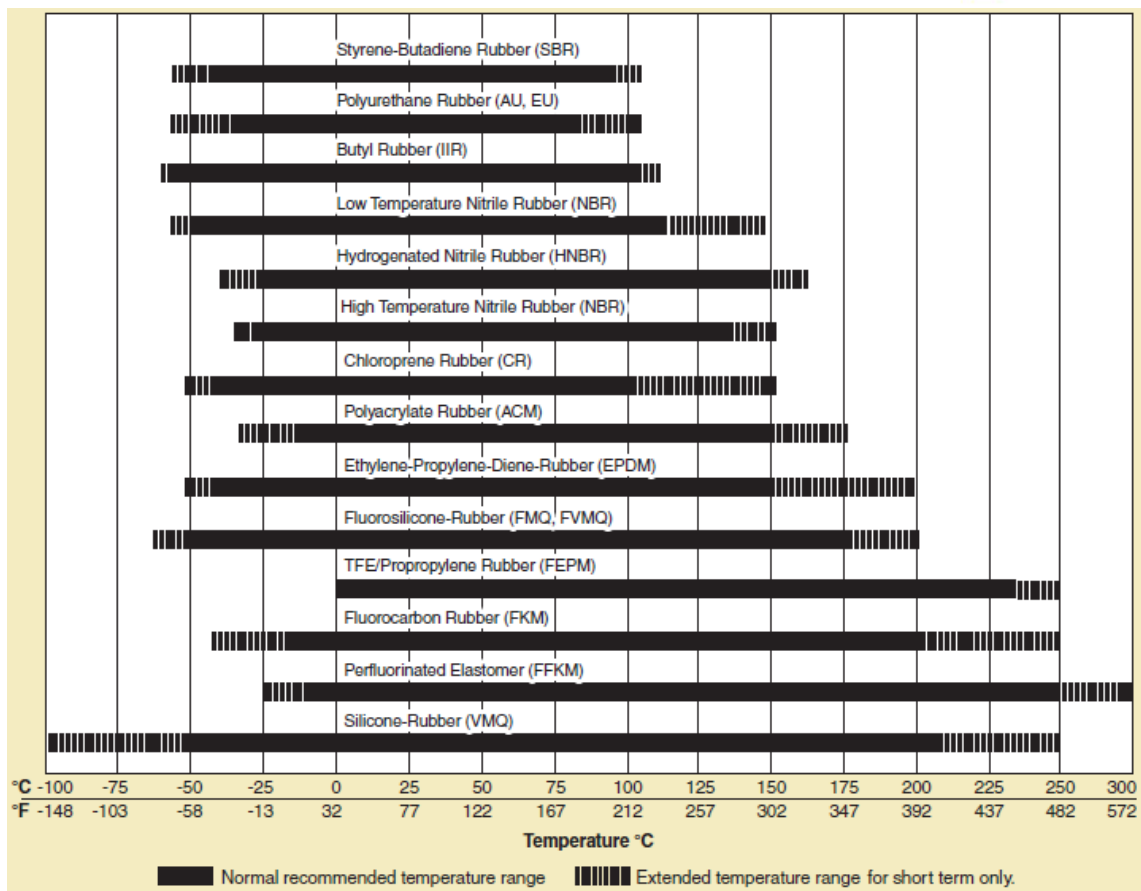


Ilustración 8. Temperatura de trabajo de los elastómeros más utilizados [6]

Plásticos

Los plásticos pertenecen a otro grupo entre los polímeros comúnmente usados para la industria del sellado. La gran diferencia con los elastómeros es que estos tienen una recuperación mucho menor. Además, los plásticos representan una fuerza de fricción menor y un rango de temperaturas mayor, es por ello por lo que estos pueden ser usados en contactos sin lubricación o con una lubricación baja. Todo ello añadido a que no presentan el efecto stick-slip ni vibraciones debido a la adhesión del material a la superficie metálica, algo que sí ocurre con los elastómeros.

Las principales ventajas de los plásticos en comparación con los elastómeros son las siguientes:

- Baja fricción y potencial funcionamiento en seco. Los plásticos generan una menor fuerza fricción que los elastómeros bajo las

mismas condiciones de trabajo, es por ello por lo que, al contrario que los elastómeros, pueden ser usados en aplicaciones en seco o con poca lubricación

- Un alto rango de temperaturas
- Buena resistencia química
- Buena resistencia al desgaste
- Alta dureza

Las principales desventajas de los plásticos son los siguientes:

- Poca capacidad de resistencia mecánica. Necesitan un añadido de componente elastómero o un muelle metálico para incrementar su resistencia mecánica
- Baja elasticidad. Este factor hace que el montaje de las juntas de plástico sea más complicado que en el caso de los elastómeros
- Es más propenso a sufrir fluencia, es decir, son más propensos a recibir deformaciones por una presión constante en un periodo largo de tiempo. Es por ello por lo que el plástico no es un buen material para aplicaciones con fuerzas cíclicas actuantes en la junta
- Sus propiedades termodinámicas son muy dependientes de la temperatura

Hoy en día a los plásticos suelen añadirse composites a medida con el objetivo de mejorar la resistencia al desgaste, mejor resistencia mecánica, una menor fricción y una alta resistencia a la fatiga. Los PTFE (Politetrafluoroetileno) y los PTFE composites son los plásticos comúnmente usados en la industria del sellado debido a sus buenas propiedades tribológicas. Su rango de temperatura de trabajo se encuentra entre -190°C y $+260^{\circ}\text{C}$, y pueden ser usados en velocidades hasta los 15 m/s en unas condiciones estables. Para aplicaciones tribológicas, el PTFE suele combinarse con el carbono, bronce, fibra de vidrio, grafito y molibdeno disulfuro. El PEEK (Polieteretercetona) es otro tipo de plástico comúnmente usado en la industria de las juntas.

Termoplásticos

Este tipo de material también es muy común encontrarlos en el uso de las juntas. Los termoplásticos tienen unas propiedades que son una combinación de los elastómeros y los plásticos. Los más comúnmente usados son el poliuretano y el poliéster.

2.3. Mecanismos de fallo

Los elastómeros tienen una vida mínima teórica en servicio la cual varía dependiendo de las normas finales del usuario. A pesar de ello, hay muchos factores inevitables o muy difíciles de controlar que conllevan a un fallo prematuro de la junta. El fallo de una junta puede conllevar a catástrofe en aplicaciones específicas. En cualquier caso, es de vital importancia que el usuario conozca bien las recomendaciones de uso del fabricante de juntas para las condiciones de trabajo, las características de la superficie de contacto y la compatibilidad del fluido.

La evidencia más clara de un fallo de la junta es la fuga excesiva del fluido. Las causas que originan el fallo pueden ser diversas y sus orígenes pueden ser por mala instalación de las juntas, mal montaje del eje, fuga prematura o fallo de la junta, entre otros. Más de la mitad de los fallos están atribuidos al mal montaje del eje (excentricidades) y la mala instalación de la junta.

Cuando la fuga ocurre en una junta recién puesto y aparentemente no tiene ningún signo de daño o desgaste, probablemente la causa de la fuga sea por una de las siguientes razones:

- Insuficiente interferencia o presión de contacto
- Gran viscosidad del fluido, cual conlleva a un excesivo espesor del film
- Excesiva grasa
- Un sistema de vibración incapaz de seguir por el labio del sellado

En otros casos, durante la inspección visual se puede observar el daño mecánico de la junta. En general, los principales problemas debido al daño mecánico son los siguientes:

- Material inadecuado para el sellado
- Inadecuada protección o recubrimiento del eje
- Mala lubricación o fallo del lubricante
- Contaminación en el contacto que provoca un mayor desgaste
- Incorrecta rugosidad del eje o de la cavidad de la junta
- Ataque químico y térmico
- Uso de herramientas incorrectas para el montaje (Ilustración 9)



Ilustración 9. Fallo debido al montaje incorrecto (Fuente: Tekniker)

- Endurecimiento del material debido a la presión o temperatura excesiva. El endurecimiento afecta a la elasticidad y resiliencia del polímero, debilitando la capacidad de sellado dinámico del polímero
- El daño dieseling, causado por las burbujas creadas en el aceite. Cuando el sistema no es purgado o hay un excesivo aumento de presión, pueden crearse burbujas en el aceite que pueden causar el derretimiento de la junta (Ilustración 10)



Ilustración 10. Daño de dieseling en un junta [7]

- Excentricidades de montaje. La combinación de excentricidades estáticas y dinámicas puede llevar a la fuga [8].

La gran mayoría de los fallos ocurren igualmente para juntas estáticos como dinámicos y para todo tipo de materiales de sellado. Igualmente, los fallos causados en aplicaciones neumáticas trabajando en seco como en condiciones lubricadas. En el caso de las aplicaciones neumáticas el calentamiento del material conlleva a una aceleración del fallo. Los funcionamientos recíprocos y rotatorios también pueden originar fallos similares, siendo el funcionamiento recíproco el que más tiene. Los fallos más comunes en aplicaciones recíprocas son las siguientes:

- Fuga debido a la excesiva velocidad de funcionamiento que origina un film del fluido muy fino
- Extrusión debido a la excesiva temperatura o presión. Usualmente ocurre cuando la presión del fluido empuja a la junta a la pequeña separación que hay entre las superficies de sellado. En consecuencia, puede ocurrir una fuga y, por lo tanto, un fallo prematuro
- Presión excesiva generada por el movimiento recíproco

El desgaste de las juntas es el resultado del movimiento relativo entre dos cuerpos en contacto. La posible causa del excesivo desgaste puede ser debido a la inadecuada limpieza o ensamblaje, presencia de suciedad en el área de sellado, excesiva presión o lubricación insuficiente. Los principales mecanismos de desgaste en una superficie metálica son la adhesión, abrasión, fatiga o desgaste químico. Dependiendo de las propiedades del material y las condiciones de deslizamiento puede ocurrir un mecanismo de desgaste u otro, aunque también puede darse una combinación de varios. Las principales características de cada tipo de desgaste pueden observarse a continuación.

- **Desgaste abrasivo**

Es el tipo de desgaste más común. Cuando dos materiales de diferentes durezas están en contacto y soportan una carga normal, el material con mayor dureza penetra en el más blando provocando una abrasión debido a la deformación plástica y fractura del mismo. La altura de la aspereza del material o la rugosidad también influyen en el resultante del desgaste del material. Cuando un material está deslizando en una superficie con una alta rugosidad, la principal causa de desgaste es la abrasión. El ratio de desgaste de un material se determina por la profundidad de penetración de las asperezas en el polímero. La evolución del desgaste varía con el tiempo.

- **Desgaste adhesivo**

Este está asociado con la formación de enlaces en la intercara. El desgaste adhesivo de los polímeros suele ocurrir cuando los enlaces formados entre los materiales en contacto son superiores a la fuerza cohesiva del polímero. En el caso de contacto polímero-metal, un pequeño film del material blando (polímero) es transferido a la superficie dura (metal). Este film es conocido como tribofilm. Si el tribofilm se desprende de la superficie del metal y se forma un nuevo film en el mismo, el ratio de desgaste aumenta. En cambio, si el film se mantiene en la superficie, la fuerza de fricción aumenta, pero el

desgaste del material termina siendo insignificante. La fuerza de enlace del polímero con el metal depende de la presencia de reactivos como el flúor.

- **Desgaste a fatiga**

La fatiga causa cambios en el material debido a cargas de tensión repetitivas. La causa del desgaste a fatiga suele estar asociada con la superficie de contacto. Además de ello, puede ocurrir el desgaste a fatiga debido a las asperezas durante tensiones cíclicas, ya que estas conllevan a unas concentraciones de tensión, formando y propagando grietas. Estas grietas suelen aparecer en la superficie (Ilustración 11) o en la subsuperficial. En general, para coeficientes de fricción bajos, la tensión máxima a cortante es subsuperficial. Mientras el coeficiente de fricción incrementa, esta máxima tensión a cortante va aflorando hacia la superficie. La iniciación de las grietas de fatiga ocurre en los defectos del material, los cuales tienen concentraciones de tensiones altas. El desgaste a fatiga además de generar grietas, también pueden crear pitting y delaminación del material.

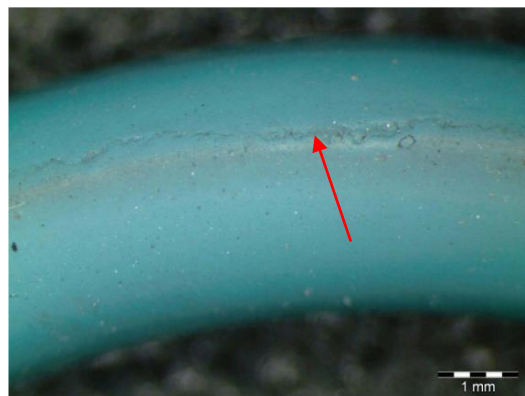


Ilustración 11. Grieta por fatiga en la superficie de una junta (Fuente: Tekniker)

○ Desgaste químico

Debido a la interacción entre el polímero y el metal se origina una reacción tribo mecánica. Esta reacción es creada por diversas razones como una alta temperatura interfacial debido a la temperatura creada por la fricción. Las superficies reaccionan con el ambiente creando productos que se depositan en las superficies. Estos productos se eliminan después debido a la creación de grietas o la abrasión durante la fricción.

En general, los procedimientos de deslizamiento se pueden diferenciar en tres fases, ver Ilustración 12. Una primera fase de rodaje en el que la uniformidad del desgaste empieza a coger forma eliminando las micro asperezas de la superficie. Una segunda fase donde el ratio de desgaste ha alcanzado la tasa en la que las dos superficies sufren un desgaste constante y uniforme. Y, por último, una tercera fase conocida como la acelerada o catastrófica, en la cual el desgaste empieza a incrementar exponencialmente hasta el fallo catastrófico.

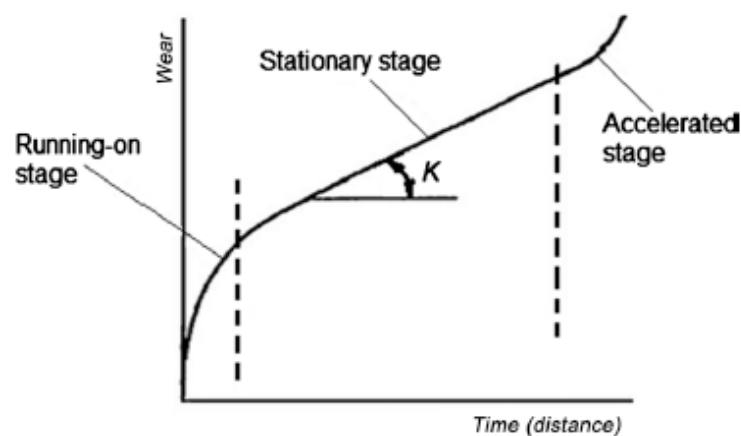


Ilustración 12. Típica curva de desgaste en un sistema tribológico [9]

2.4. Coeficiente de fricción

El coeficiente de fricción (CoF) es el ratio de la fuerza de fricción (F_r), fuerza que resiste a que dos objetos en contacto puedan deslizarse libremente, dividido entre la fuerza normal (N) que empuja los dos objetos entre sí. El coeficiente de fricción se representa de la siguiente manera:

$$CoF = F_r / N \quad (1)$$

Para el coeficiente de fricción existen diferentes tipos y valores que dependen del tipo de la fuerza resistiva. EL CoF se puede medir experimentalmente, midiendo la fuerza requerida para que se produzca el deslizamiento o midiendo el ángulo en el que el objeto empieza a deslizar por una superficie inclinada por su propio peso [10].

Entre los diferentes tipos de CoF se encuentra el estático, el cinético, de deformación, molecular y el de rodadura. Teniendo cada uno de estos tipos su propio CoF.

Coeficiente estático

El coeficiente de rozamiento estático es el coeficiente de proporcionalidad que relaciona la fuerza necesaria para que un bloque empiece a deslizarse dividido entre la fuerza normal. Siguiendo la siguiente ecuación:

$$CoF_e = F_{r_{max}} / N \quad (2)$$

La fuerza es la necesaria para que el objeto se empiece a mover.

Coeficiente cinético

El coeficiente de rozamiento dinámico es el coeficiente que relaciona la fuerza de rozamiento que actúa sobre un bloque que desliza dividido por la fuerza normal. Siguiendo la siguiente ecuación

$$CoF_d = F_r / N \quad (3)$$

La fuerza de fricción será la medida por la resistencia en el movimiento relativo entre los dos objetos. El CoF dinámico siempre será menor al estático, ya que este último es el coeficiente máximo que se puede obtener.

Coeficiente de deformación

El coeficiente de deformación de fricción es la fuerza restrictiva de movimiento de un objeto que está deslizándose o rodando en una o las dos superficies blandas que se deforman debido a la fuerza.

Coeficiente molecular

El coeficiente molecular de la fricción es la fuerza restrictiva de movimiento de un objeto que está deslizándose en una superficie extremadamente lisa o que está envuelta de un lubricante.

Coeficiente de rodadura

El coeficiente de rodadura combina los coeficientes de fricción estática, de deformación y molecular.

3. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este proyecto se va a estudiar principalmente la mejoría en las propiedades tribológicas que pudiera tener un nuevo material de poliuretano auto-lubricado.

Los ensayos realizados para la caracterización de las propiedades tribológicas de los dos tipos de poliuretano se pueden dividir en dos tipos principales. Por un lado, se han hecho ensayos básicos en una máquina tribológica en la cual los ensayos se hacen con una probeta del material de junta y eje. Por otro lado, se han hecho ensayos en un banco de ensayos de juntas TESSA, disponible en Tekniker, con la intención de recrear las condiciones de trabajo de estas juntas en aplicaciones de cilindros neumáticos como las que se quieren replicar en este trabajo.

En el ámbito tribológico de los materiales, existen diferentes normas para los ensayos tribológicos. Todas estas normas están pensadas para los ensayos de diferentes lubricaciones de materiales. Como no existe ninguna norma para la caracterización tribológica de las juntas y muy pocas para polímeros en general, todas las pautas y procedimientos seguidos son los desarrollados en Tekniker, siendo estos basados en las pocas normas existentes y en base a experiencia.

3.1. Materiales

Para este proyecto, la empresa Trygonal Iberia SL ha facilitado dos tipos de materiales de la familia de poliuretanos con una dureza Shore A en torno a 95 para que fuesen ensayados. Estos dos materiales son muy parecidos en lo que a propiedades mecánicas se refiere, con la única diferencia de que mientras que uno de ellos es un poliuretano puro (sin lubricación interna), el otro tiene un aditivo que hace la función de lubricación durante la fricción.

El poliuretano es un material termoplástico que pueden ser encontrados con diferentes formas y durezas para diversas utilidades. Es un material que se puede fácilmente adaptar a la función que deba desempeñar, es por ello por lo

que nos encontramos con materiales tanto flexibles como rígidos. Estos materiales son utilizados en diferentes aplicaciones como en aislamientos, protectores, colchones, adhesivos, neumáticos etc.

A continuación, se muestran las principales características de los dos materiales de poliuretano convencional (HPU Premium) y auto-lubricado (HPU Lubric Doped) a caracterizar.

HPU Premium

Es un poliuretano resistente a la hidrólisis y apropiado para productos alimenticios. El color de este material es el rojo. Es resistente a los aceites minerales, fluidos HFD-U y HETG, agua fría con ácidos y bases diluidos. Es aplicable para juntas estáticos, juntas de pistón y barras, juntas de parabrisas y juntas rotatorias.

El material tiene las propiedades expuestas en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de HPU Premium

Propiedades	Valor	Unidad	Estándar DIN
Hardness	95 ± 3	Shore A	DIN ISO 7619-1
Hardness	49 ± 3	Shore D	DIN ISO 7619-1
Density	1.190	g/cm ³	DIN EN ISO 1183-1
100% Modulus	15.3	MPa	DIN 53504
300% Modulus	44.5	MPa	DIN 53504
Elongation at break	382	%	DIN 53504
Tensile strength	49,2	MPa	DIN 53504
Compression set 70°C/22h	20.0	%	DIN ISO 815-1
Compression set 70°C/70h	22.5	%	DIN ISO 815-1
Compression set 100°C/22h	27.9	%	DIN ISO 815-1
Rebound resilience	39	%	DIN ISO 4662-2017
Tear resistance	40.1	N/mm	DIN ISO 34-1 A
Abrasion resistance	28	Mm ³	DIN ISO 4649 B
Min. Service temperature	-30	°C	
Max. Service temperature	+100	°C	

HPU Lubric doped

Este material, al igual que el HPU Premium, es un poliuretano resistente a la hidrólisis, con la única diferencia de que este está modificado con aditivos lubricantes líquidos. Usando una lubricación interna se quiere conseguir un bajo coeficiente de fricción. Este nuevo desarrollo está aditivado principalmente con Flúor. Se quiere buscar la mejoría que pueda aportar este tipo de aditivación a las nuevas juntas respecto a las que ahora se están usando, juntas de Referencia.

Las propiedades del HPU Lubric doped pueden verse en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de HPU Lubric doped

Propiedades	Valor	Unidad	Estándar DIN
Hardness	94 ± 3	Shore A	DIN ISO 7619-1
Hardness	49 ± 3	Shore D	DIN ISO 7619-1
Density	1.195	g/cm ³	DIN EN ISO 1183-1
100% Modulus	11,8	MPa	DIN 53504
300% Modulus	22.5	MPa	DIN 53504
Elongation at break	464	%	DIN 53504
Tensile strength	40.9	MPa	DIN 53504
Compression set 70°C/22h	17	%	DIN ISO 815-1
Compression set 70°C/70h	30	%	DIN ISO 815-1
Compression set 100°C/22h	31	%	DIN ISO 815-1
Rebound resilience	32	%	DIN ISO 4662-2017
Tear resistance	94.0	N/mm	DIN ISO 34-1 A
Abrasion resistance	29	Mm ³	DIN ISO 4649 B
Min. Service temperature	-30	°C	
Max. Service temperature	+100	°C	

Comparando las propiedades de los dos materiales, se puede observar que los dos materiales tienen unas propiedades mecánicas prácticamente idénticas, por lo que la única diferencia entre las dos se puede decir que es el añadido de lubricante al HPU Lubric doped.

3.2. Caracterización tribológica básica en tribómetro SRV Optimol

3.2.1. Equipo de ensayo

El tribómetro SRV ha sido diseñado por OPTIMOL con el propósito de ofrecer una idea realista del comportamiento de los lubricantes y materiales ante la fricción y el desgaste. Se basa en el movimiento recíproco oscilatorio de una probeta (bola, cilindro o anillo, entre otros) sobre un disco fijo con el lubricante (si lo hubiera) emplazado entre ellos. En la Ilustración 13 se muestra un esquema de la máquina de ensayo.

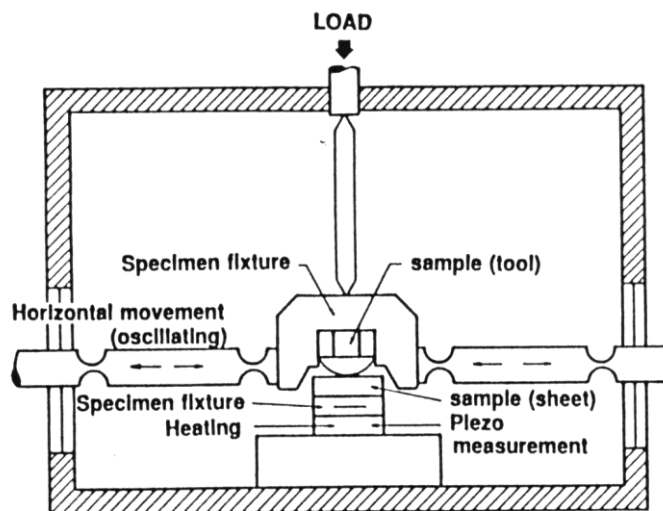


Ilustración 13. Principio de funcionamiento de la máquina de ensayos SRV (Fuente: Tekniker)

Tiene un amplio rango de condiciones de operación que es capaz de abarcar dada su versatilidad de tipo de contacto entre las probetas (puntual, lineal y de área) y con un completo control gracias a un software que plotea las condiciones de operación implicadas durante el ensayo (carga, frecuencia, amplitud de oscilación, temperatura y duración de ensayo). Estas características hacen de la SRV una herramienta poderosa en el desarrollo y optimización de cualquier lubricante, material o recubrimiento. Consta de una célula de carga que permite monitorizar la fricción generada durante el ensayo.

La máquina nos permite hacer ensayos tanto a altas como a bajas temperaturas. Dispone de un módulo de baja temperatura que trabaja en un

rango entre -35°C hasta 290°C y otro de alta temperatura en la cual se pueden alcanzar temperaturas máximas de hasta 900°C .

El equipo de ensayo de fricción y desgaste SRV consiste en un soporte fijo de la probeta inferior y en un soporte móvil extraíble para la probeta superior. La probeta superior es presionada contra la inferior mediante una fuerza ajustable y se le hace oscilar tangencialmente con una frecuencia y amplitud seleccionadas con anterioridad. El sistema calcula el coeficiente de fricción y la pérdida de material a lo largo del ensayo. En la Ilustración 14 se muestra la configuración de la máquina para un ensayo.

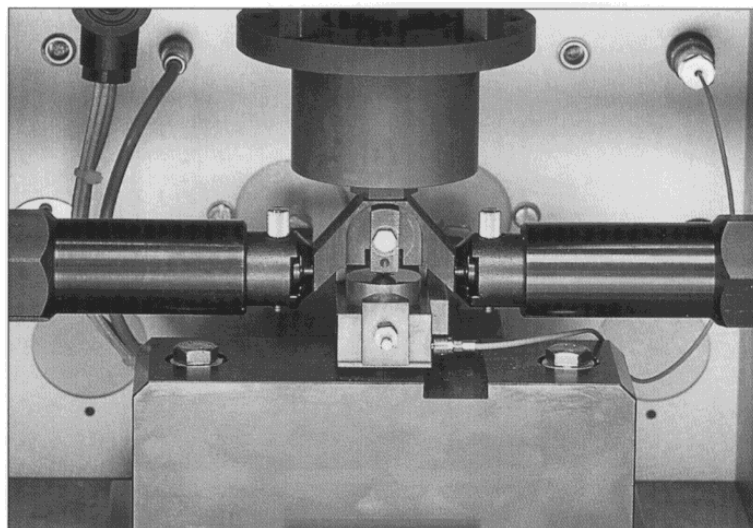


Ilustración 14. Configuración ensayo tribómetro SRV

La configuración de máquina nos permite realizar ensayos con diferente geometría de contacto (punto, línea, superficie). A continuación, se muestran las probetas estándar y sus adaptadores para poder ajustarlas a la máquina de ensayos:

3.2.2. Ensayos normalizados

En la Ilustración 15 se pueden ver alguna de las configuraciones de ensayo que se pueden hacer en la SRV.

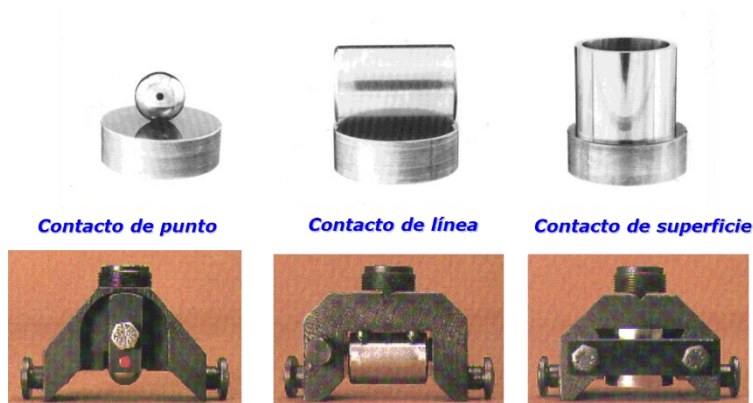


Ilustración 15. Variedad de configuraciones de ensayo SRV

Existen una serie de ensayos ball on disc normalizados:

- Norma ASTM D 5707” Standard test method for measuring friction and wear properties of lubricating grease using a high-frequency, linear oscillation (SRV) Test machine”
- Norma ASTM D 5706-97 “Standard test method for determining extreme pressure properties of lubricating greases using a high-frequency, linear oscillation motion (SRV) Test machine”
- ASTM D6425 “Standard test method for determining friction and wear properties of extreme pressure (EP) lubricating oils using SRV test machine”
- DIN 65593 “Wear test of solid film lubricants in oscillating motion on frictional wear tester”
- Norma DIN 51834-2 “Determination of friction and wear parameters f for lubricating oils using a linear-oscillation test machine”

Además, también se pueden llevar a cabo ensayos de lubricidad, existe la norma:

- ISO 12156-1 “Diesel fuel-assessment of lubricity using the high-frequency reciprocating rig (HFRR)

3.2.3. Otras configuraciones de ensayo

La máquina nos permite un amplio abanico de posibilidades, de forma que además de las configuraciones estándar, se pueden diseñar nuevas que simulen mejor los sistemas reales. Podemos utilizar cualquier valor para los parámetros de ensayos (temperatura, amplitud, frecuencia, carga) siempre y cuando estén dentro de los límites de la máquina. Los valores de estos parámetros pueden permanecer fijos o variar a lo largo del ensayo. En la Tabla 3 se puede ver los rangos permitidos por la máquina

Tabla 3. Rango de parámetros del SRV

Carga		1N - 2000N
Tiempo de ensayo		1 minuto – 999 horas
Frecuencia		1 Hz – 511Hz
Amplitud		0,1 mm – 4 mm
Velocidad lineal		0,01 m/s – 0,4 m/s
Temperatura	Estándar	RT – 290°C
	Bajas	-35°C – 290°C
	Altas	Hasta 900°C

A la hora de escoger los valores de frecuencia y amplitud, deberemos de hacerlo con cuidado, ya que no todas las combinaciones son válidas. Los valores máximos de amplitud para ciertas frecuencias pueden verse en la Tabla 4.

Tabla 4. Rangos de amplitud para diferentes frecuencias

Frecuencia (Hz)	Amplitud (mm)	Velocidad lineal (m/s)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (mm)	Velocidad lineal (m/s)
1-30	4.5	0.01-0.27	90	1.5	0.270
30-50	4.0	0.24-0.4	100	0.5	0.1
60	3.0	0.36	150	0.5	0.15
70	2.0	0.28	200	0.2	0.08
80	1.5	0.24	300-500	0.10	0.06-0.1

3.2.4. Configuración de ensayo para proyecto

Para la configuración de ensayo en este proyecto se ha decidido utilizar el poliuretano de pin contra un disco de acero 42CrMo4V con recubrimiento de cromo a fin de representar lo mejor posible el contacto real que se da en el

cilindro neumático entre junta de estanqueidad (poliuretano) y eje de acero cromado 42CrMo4V, en esta aplicación seleccionada (ver Ilustración 16).

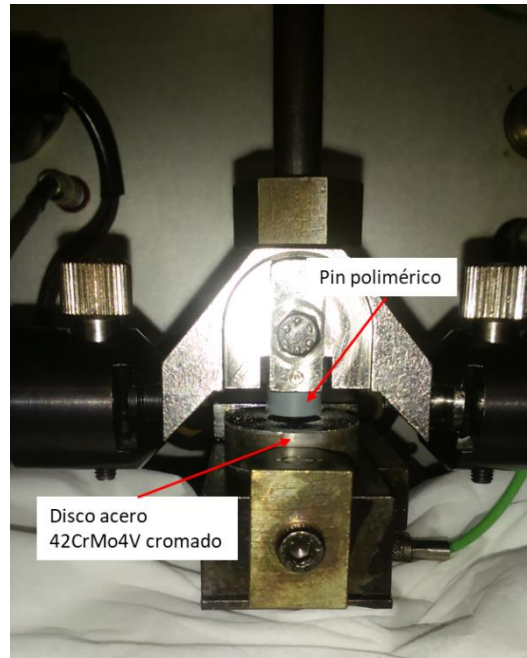


Ilustración 16. Configuración SRV

La matriz de ensayos utilizada para estos ensayos puede verse en la Tabla 5. La tabla muestra los ensayos a realizar con cada material, es decir, se van a realizar un total de 18 ensayos de fricción con el material HPU Premium y otros 18 con HPU Lubric doped.

Tabla 5. Matriz de ensayos básicos en SRV

Material	Carga (N)	Presión (Mpa)	Velocidad (mm/s)	Tiempo (h)	Distance (m)	Repeticiones (u)
HPU Lubric & Premium	39	0,5	30	8	864	2
			60	4		2
			120	2		2
	128	1,63	30	8		2
			60	4		2
			120	2		2
	156	1,99	30	8		2
			60	4		2
			120	2		2

3.3. TESSA: banco de ensayo de juntas

El equipo TESSA [11] ha sido diseñada por Tekniker con el objetivo de tener un banco de ensayo de juntas en el cual poder ensayar diferentes configuraciones de juntas y así poder hacer una simulación acelerada del comportamiento de las juntas de estanqueidad en componente real. La TESSA se divide en dos módulos. Por un lado, está el módulo del movimiento rotatorio, y por otro, el módulo de movimiento recíproco, ver Ilustración 17.

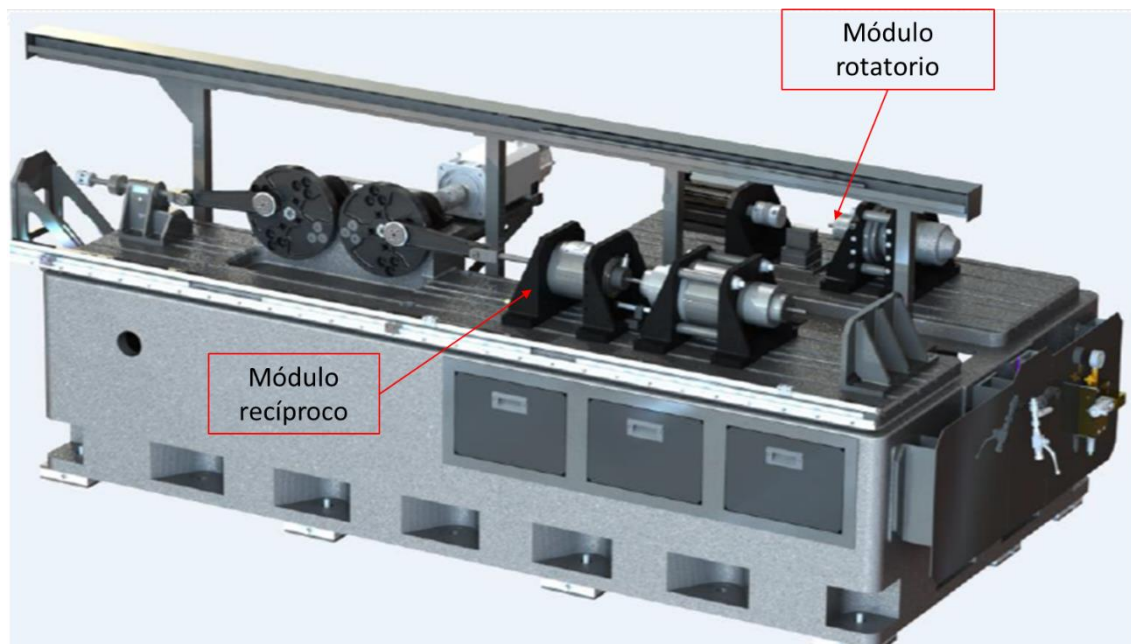


Ilustración 17. Imagen banco de ensayo de juntas TESSA

La TESSA tiene un amplio rango de condiciones de trabajo y permite ensayar diversos tipos de geometrías de juntas, tanto juntas de vástago como de pistón, aplicaciones neumáticas o hidráulicas y como hemos comentado el movimiento puede ser rotatorio o recíproco. El diseño de la cámara de ensayos se hace a medida de cada proyecto en particular. Se puede hacer análisis de fricción de durabilidad y de fugas, y los ensayos se hacen bajo norma (en caso de tenerla) o bajo procedimientos desarrollados a medida (ya que no existen normas para los ensayos).

3.3.1. Características técnicas

Como se ha comentado, la TESSA tiene un amplio rango de condiciones en las que se puede trabajar. Dentro de este amplio existen unas limitaciones que se pueden ver en la Tabla 6.

Tabla 6. Rango de trabajo del banco de juntas TESSA

	Recíproco	Rotatorio
Diámetro del eje	18 – 200 mm	8 – 50 mm
Velocidad nominal	-	2200 rpm
Velocidad	5 m/s	4000 rpm
Temperatura	-50°C – 120°C	
Presión	>200 bar	
Aplicaciones	Hidráulicas y neumáticas	

En el módulo rotatorio el movimiento que se puede hacer puede ser tanto rotatorio como oscilatorio.

3.3.2. Casos de estudios que se pueden llevar a cabo

Gracias a la gran versatilidad que tiene el banco de ensayos, pueden desarrollarse diferentes estudios en el mismo. Entre ellos se encuentran los siguientes:

- Selección de geometrías de juntas comerciales y materiales óptimos para aplicaciones concretas
- Validación de nuevas formulaciones de materiales y lubricantes
- Análisis de materiales, acabados y tratamientos superficiales de los vástagos
- Ensayos de componentes completos (tales como actuadores o cilindros, por ejemplo)

Los ensayos pueden ser aplicados para sistemas de sellado de una gran variedad de componentes, dispositivos y aplicaciones industriales y sectores.

3.3.3. Tipos y matriz de ensayo realizado

Se ha llevado a cabo dos diferentes tipos de ensayos en el banco de ensayos de juntas TESSA: 1) Por un lado, ensayos de fricción, en el cual se quiere caracterizar la fuerza de fricción que ofrecen las juntas bajo diferentes niveles de presión y velocidad. Durante los ensayos se monitorizará la evolución de la fuerza de fricción, la presión de la cámara y la temperatura.

2) ensayos de durabilidad, que consiste en evaluar el comportamiento de las juntas en el tiempo mediante ensayos largos a una presión y velocidad determinada. Para ello, se evaluará la fricción, las fugas y el desgaste de las juntas mediante mediciones de fugas periódicas.

Para la configuración de ambos ensayos se va a utilizar un vástago de acero cromado 42CrMo4V con un diámetro de 25mm. Los ensayos se van a realizar con dos cabezales con una junta objeto de estudio en cada cabezal unidos a una cámara de presión, ver Ilustración 18.

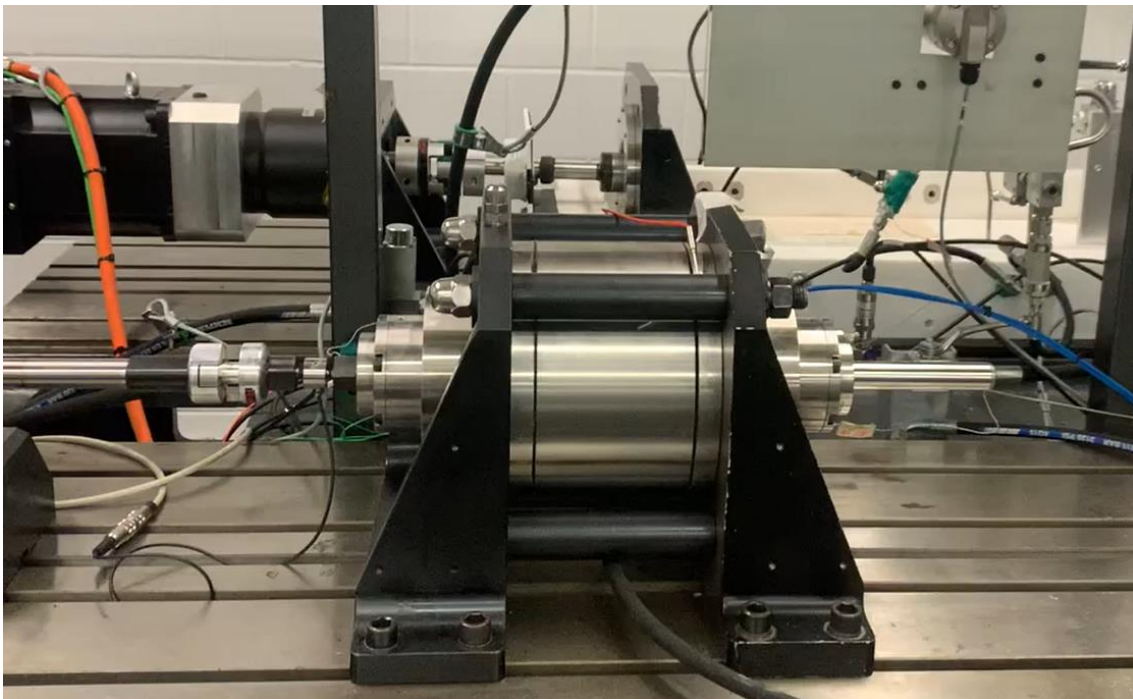


Ilustración 18. Configuración ensayo TESSA

Ensayo de fricción

El ensayo de fricción se ha realizado con juntas tanto de material de referencia (HPU Premium) como con material auto-lubricado (HPU Lubric doped) con un diámetro interior de 25mm. Se va a aplicar presión neumática de N₂ en la cámara y se utilizará la parte recíproca del banco para la realización de los ensayos. En la se puede ver la matriz de ensayos a seguir. Antes de cada ensayo se hace un rodaje a 0.4 m/s durante dos minutos. Después se hace el ensayo empezando a 0,2 m/s y subiendo la velocidad 0,1 m/s cada dos minutos. El ensayo se ha realizado en seco.

Tabla 7. Matriz de ensayos para juntas HPU Lubric

Material	Shaft	P (bar)	v (m/s)
Lubric	6	120	0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6
		60	
		0	
	7	120	
		60	
		0	
	8	120	
		60	
		0	

Tabla 8. Matriz de ensayo para juntas HPU Premium

Material	Shaft	P (bar)	v (m/s)
Premium	9	120	0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6
		60	
		0	
	10	120	
		60	
		0	
	12	120	
		60	
		0	

Ensayo de durabilidad

Así como el ensayo de fricción, el ensayo de durabilidad se ha llevado a cabo con las juntas convencionales (HPU Premium) y las auto-lubricadas (HPU Lubric doped) con un diámetro interior de 25mm. Se aplica presión neumática de N₂ en la cámara y se ha utilizado la parte recíproca del banco para la realización de ensayos. Además, en este caso el eje irá lubricado con aceite DROP380, en el cual se esparcirá 1ml del mismo por todo el eje de manera uniforme. Para la caracterización de las juntas, se han realizado tres ensayos con cada material bajo las mismas condiciones de trabajo. Ciclos de 24 horas a 0.8m/s de velocidad y 120 bar de presión en cámara. Después de cada ciclo el ensayo se para. Previo al ensayo se realizará un rodaje a 0 bar y 0,5m/s durante 5 minutos y después un ensayo de fugas estáticas a 100 bar durante 30 minutos en el cual se monitoriza la caída de presión en cámara. Después de cada ciclo se realizará un ensayo de fugas estáticas como las comentadas anteriormente. La matriz de ensayos diseñada puede observarse en la Tabla 9.

Tabla 9. Matriz de ensayos de durabilidad

Material			P (bar)	v (m/s)	t	Repeticiones
Lubric	Previo	Rodaje	0	0,5	5 min	3
		Fugas	100	0	30 min	
	Ciclo	Desgaste	120	0,8	24 h	
		Fugas	100	0	30 min	
Premium	Previo	Rodaje	0	0,5	5 min	3
		Fugas	100	0	30 min	
	Ciclo	Desgaste	120	0,8	24 h	
		Fugas	100	0	30 min	

3.3.4. Procedimiento de ensayo

Antes de cada ensayo, se pesan las juntas por separado en una balanza de precisión, ver Ilustración 19. La masa de la junta se mide cinco veces y el valor anotado será el promedio de los cinco valores anotados.



Ilustración 19. Balanza de precisión

Una vez pesadas las juntas, se procede al montaje. En primer lugar, se coloca la junta a ensayar en la cavidad preparada para la misma, ver Ilustración 20.



Ilustración 20. Montaje de junta

Una vez introducida la junta y unidas las dos piezas, se comprueba que los dos O-ring se encuentran en buen estado. Una vez hecha la comprobación se monta la pieza metiéndola con sumo cuidado para no dañar los O-ring en el cabezal que irá unido a la cámara de presión, ver Ilustración 21.



Ilustración 21. Montaje de pieza de la junta al cabezal

Una vez montado todo se atornilla el cabezal a la cámara de presión metiendo el cabezal del lado A junto al eje. Después de ello, se montan dos termopares a cada lado de las juntas para poder medir el incremento de temperatura durante el ensayo debido a la fricción generada entre eje y junta.

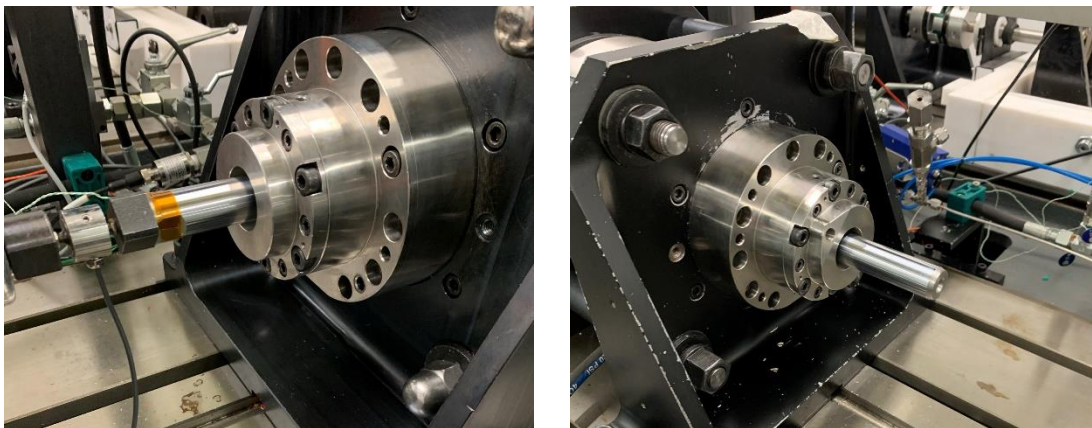


Ilustración 22. Cabezales y vástago montados en cámara

Una vez finalizado el montaje, se procede a programar el ensayo a realizar. Primero de todo se cierra el cercado de la máquina para poder trabajar con ella sin ningún tipo de peligro, ver Ilustración 23.



Ilustración 23. Cercado de seguridad de la TESSA

Primero de todo se entra en el apartado de ajustes y en él se pulsa el botón de bloquear puertas, ver Ilustración 24. Una vez las puertas bloqueadas conectamos nuestro USB en el puerto correspondiente y pulsamos el botón de conectar.

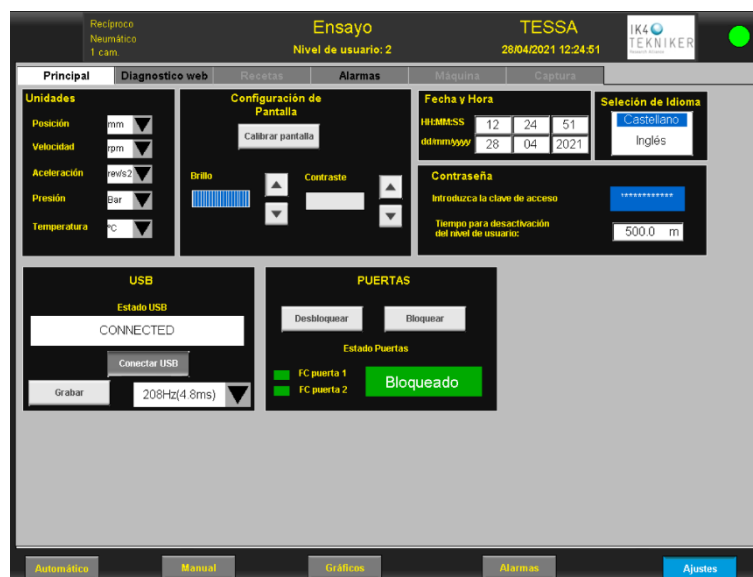


Ilustración 24. Pantalla Ajustes PLC de la TESSA

Una vez hecho lo anterior, cambiamos a la ventana de alarmas que aparece en la parte de debajo de la pantalla. Pulsamos en el tic verde que aparece en la parte derecha central de la pantalla, ver Ilustración 25, para eliminar las alertas que han salido anteriormente entre otras por abrir la puerta.

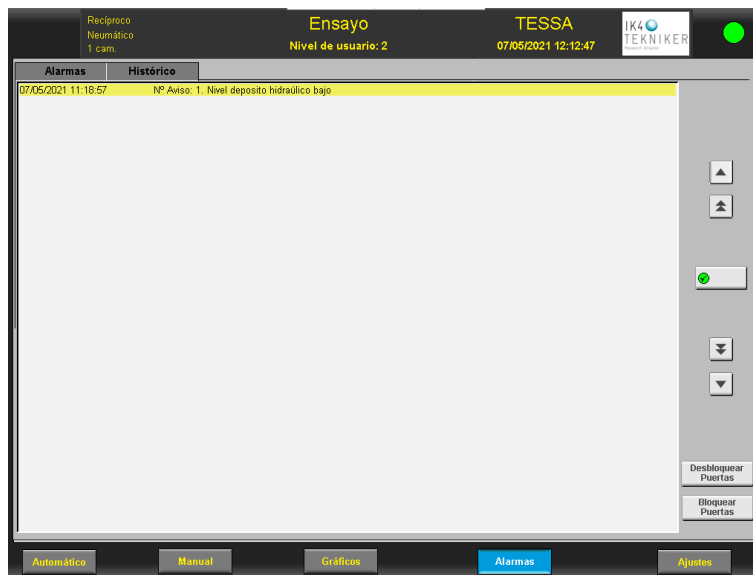


Ilustración 25. Pantalla Alarmas PLC de la TESSA

Una vez las alarmas estén actualizadas y no se tenga ninguna de ellas activada, se podrá empezar con el ensayo. Para ensayar con presión neumática se irá a la pantalla de Manual y se pulsará el cuadrado de “Iniciar”. Después se abrirán las válvulas 1 y 3 mediante el PLC manualmente para meter la presión en la cámara de presión, ver Ilustración 26.

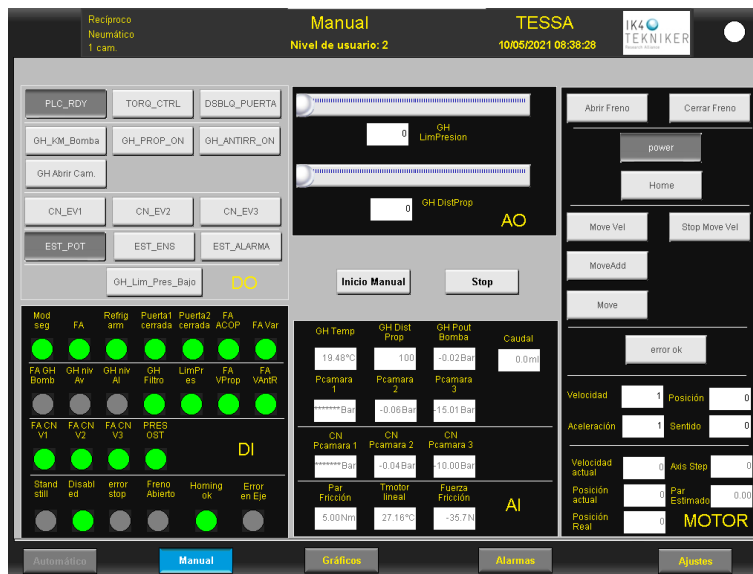


Ilustración 26. Pantalla Manual PLC de la TESSA

Por último, se cambia la pantalla a “Automático” y ahí primero se escoge la receta con el ensayo que se quiere hacer y se pulsa “Cargar”. Una vez escogida la receta que se quiere ensayar, en capturas se pone el nombre con el que se quiere guardar el ensayo, ver Ilustración 27. Una vez todo hecho, se selecciona “Inicio Ensayo” y se vuelve a seleccionar “Iniciar” y el ensayo se pondrá automáticamente en marcha siguiendo la receta que se ha seleccionado anteriormente.

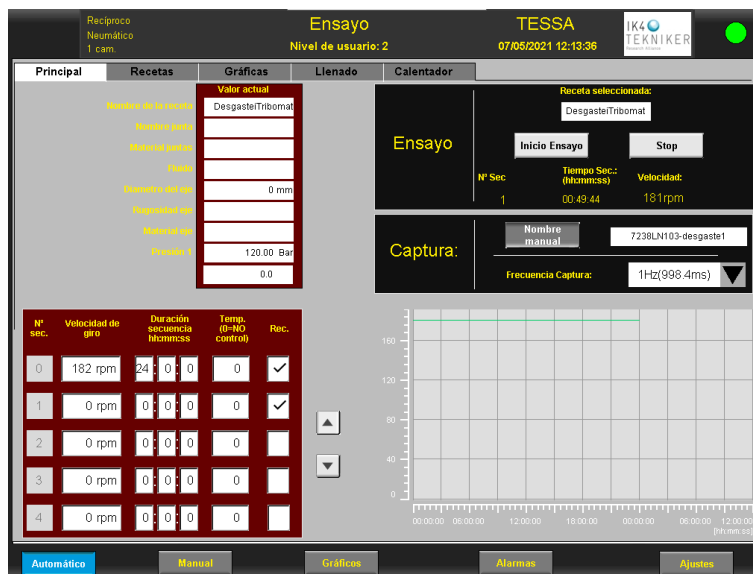


Ilustración 27. Pantalla Automático PLC de la TESSA

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se ha comentado anteriormente, el proyecto se divide en dos partes principales. Por un lado, están los ensayos realizados en el tribómetro SRV y por otro lado los ensayos realizados en el banco de ensayos de juntas de sellado TESSA. Es por ello por lo que los ensayos realizados en cada equipo serán analizados por separado y después, se buscará la relación que pueda haber entre los dos.

4.1. Caracterización básica de materiales (ensayos SRV)

En primer lugar, se han ensayado los dos materiales a diferentes velocidades y presiones con el fin de conseguir caracterizar los materiales de la mejor manera posible. Una vez ensayados, se han analizado los resultados e inspeccionado las superficies desgastadas durante el ensayo.

4.1.1. Ensayos tribómetro

Los ensayos se han conseguido siguiendo la matriz de ensayos de la Tabla 5. De los ensayos en el tribómetro se obtiene el CoF y la variación de temperatura en un punto del eje aproximado al punto de contacto durante el ensayo. Además de ello, se mide la masa perdida del pin pesándolo antes y después del ensayo y las probetas son analizadas mediante análisis microscópico antes y después del ensayo a fin de evaluar la superficie de contacto. Un resumen de los datos de los ensayos del material de referencia HPU Premium y HPU Lubric pueden verse en la Tabla 10 y la Tabla 11 respectivamente.

Tabla 10. Resultados tribómetro SRV de HPU Premium

Nº Test	Pin	P (MPa)	v (mm/s)	Distance (m)	CoF	Δm (mg)	ΔT (°C)
3795	HPU Premium	0,5	30	864	0,94	1,39	1,0
3801	HPU Premium	0,5	30	864	0,80	0,76	-1,0
3804	HPU Premium	0,5	60	864	1,05	0,67	4,1
3805	HPU Premium	0,5	60	864	1,05	1,29	6,0
3800	HPU Premium	0,5	120	864	1,92	2,02	9,8
3802	HPU Premium	0,5	120	864	1,74	4,38	10,3
3767	HPU Premium	1,63	30	864	0,50	0,19	2,5
3779	HPU Premium	1,63	30	864	0,64	0,55	-1,5
3770	HPU Premium	1,63	60	864	0,62	1,30	5,9
3776	HPU Premium	1,63	60	864	0,64	0,50	5,2
3682	HPU Premium	1,63	120	864	0,90	4,90	11,9
3683	HPU Premium	1,63	120	864	0,87	4,80	14,3
3759	HPU Premium	1,99	30	864	0,53	0,44	4,2
3777	HPU Premium	1,99	30	864	0,57	0,42	0,3
3766	HPU Premium	1,99	60	864	0,55	0,50	4,8
3774	HPU Premium	1,99	60	864	0,55	0,20	5,6
3761	HPU Premium	1,99	120	864	0,75	6,90	13,1
3781	HPU Premium	1,99	120	864	0,77	4,10	13,6

Tabla 11. Resultados tribómetro SRV de HPU Lubric doped

Nº Test	Pin	P (MPa)	v (mm/s)	Distance (m)	CoF	Δm (mg)	ΔT (°C)
3773	HPU Lubric	0,5	30	864	0,74	0,22	-0,6
3798	HPU Lubric	0,5	30	864	0,81	0,53	-0,4
3772	HPU Lubric	0,5	60	864	1,04	0,44	3,4
3806	HPU Lubric	0,5	60	864	0,98	0,47	2,8
3796	HPU Lubric	0,5	120	864	1,22	1,36	10,9
3799	HPU Lubric	0,5	120	864	1,79	1,06	11,8
3757	HPU Lubric	1,63	30	864	0,65	1,08	6,5
3778	HPU Lubric	1,63	30	864	0,68	0,70	7,6
3684	HPU Lubric	1,63	60	864	0,63	1,18	2,0
3687	HPU Lubric	1,63	60	864	0,63	0,71	5,7
3683	HPU Lubric	1,63	120	864	0,94	5,40	14,1
3685	HPU Lubric	1,63	120	864	0,91	5,40	15,0
3755	HPU Lubric	1,99	30	864	0,59	1,09	5,1
3775	HPU Lubric	1,99	30	864	0,61	0,17	1,7
3756	HPU Lubric	1,99	60	864	0,58	1,05	6,2
3666	HPU Lubric	1,99	60	864	0,58	0,48	4,7
3674	HPU Lubric	1,99	60	864	0,62	0,50	3,6
3678	HPU Lubric	1,99	120	864	0,76	4,40	14,8
3679	HPU Lubric	1,99	120	864	0,76	4,90	14,3

A partir de los resultados obtenidos se ha graficado también el CoF vs velocidad, ver Ilustración 28 , y así poder ver el comportamiento que tiene el polímero frente a una subida de velocidad. Además de lo comentado, en la gráfica se puede apreciar el cambio del CoF a diferentes presiones a cada temperatura, y así poder analizar el comportamiento del polímero a diferentes presiones a una velocidad constante. En cada columna aparece el promedio de los dos ensayos que se han hecho con los mismos parámetros, y material y una barra de error que indica la desviación estándar que tiene cada promedio.

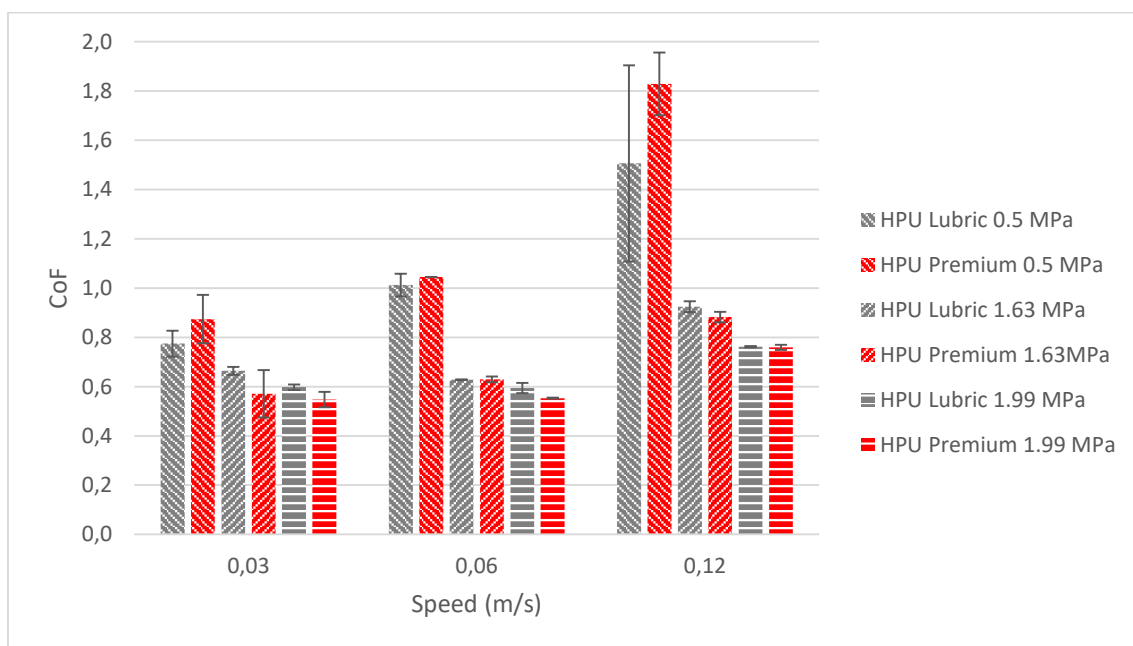


Ilustración 28. Resultado CoF vs presión (SRV)

Como se puede concluir haciendo una lectura de los resultados, tanto el HPU Premium como el HPU Lubric, el CoF disminuye con el incremento de presión, esto se debe a que, aunque la presión ejercida contra el disco aumenta, la fuerza fricción se mantiene o tiene una subida menor a la que tiene la presión. En cambio, con el aumento de velocidad, el CoF aumenta. Esto se debe a que, aunque la presión se mantenga constante en el tiempo, debido a un aumento de velocidad, aumenta también la fuerza fricción y, por lo tanto, el CoF, como lo demuestra la ecuación (1).

En cuanto a la comparación que se pueda hacer entre los dos materiales ensayados, aunque se aprecia un CoF algo menor en el caso de HPU Lubric,

sobre todo a velocidades altas y presiones bajas, está es prácticamente despreciable. Por lo tanto, en los dos se obtienen unos CoF similares con las mismas condiciones de trabajo.

En cuanto a la pérdida de masa del polímero durante el ensayo (Tabla 10 y Tabla 11) no se ve ninguna gran diferencia entre los dos poliuretanos. Al ser la distancia de ensayo corta (864 metros), no se puede apreciar el desgaste que pueda tener cada material para que se pueda hacer una comparación entre las dos.

4.1.2. Inspección de las probetas

Una vez realizado los ensayos se inspeccionaron tanto los pines de poliuretano, como los discos de acero cromado. En las zonas de inicio y final del recorrido recíproco se ha observado un fenómeno de pegado, conocido como “stick-slip”. Esto se debe a que, a la hora de hacer el cambio de dirección, sufre una aceleración que hace que el material tenga un pequeño pegado. Es por ello por lo que se han analizado la superficie de dos discos ensayados con cada material en la zona en la que ocurre el pegado. En la Ilustración 29 se puede ver la zona de pegado en el disco ensayado contra el poliuretano HPU Premium. Como se puede ver, hay marcas oscuras en la dirección de deslizamiento, los cuales pueden considerarse como el tribofilm creado por el desgaste del polímero.

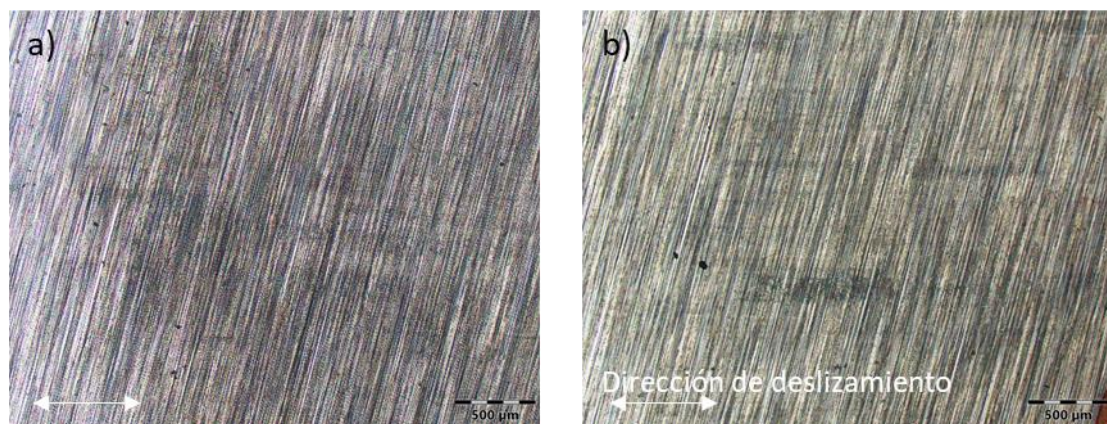


Ilustración 29. Film HPU Premium en la zona de pegado del disco de acero (3795)

En el caso del HPU Lubric, también se ha visto en la zona de pegado tribofilm, ver Ilustración 30. En este caso, se puede apreciar como el film creado es mucho más consistente que en el caso del material de referencia (HPU Premium). Este tribofilm creado ayuda a que el material tenga un menor desgaste durante el tiempo además de reducir la fuerza fricción entre las dos superficies.

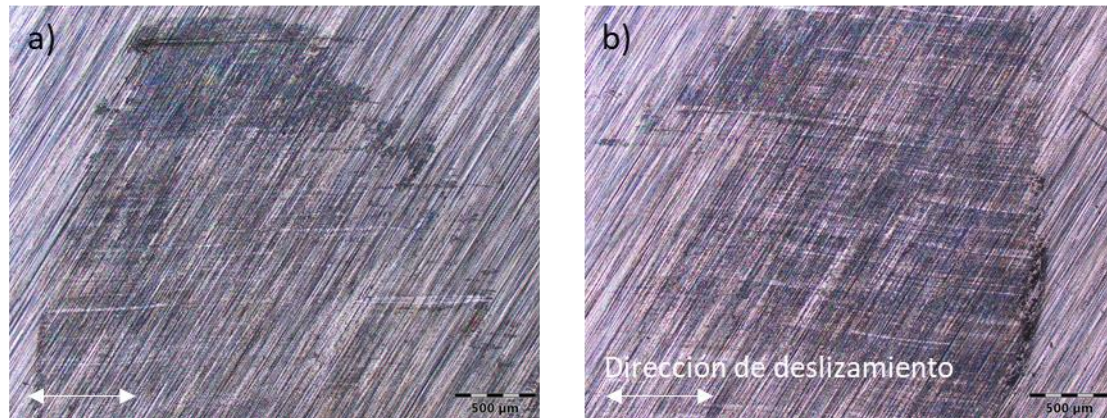


Ilustración 30. Film HPU Lubric en la zona de pegado del disco de acero (3798)

En el caso de los discos de acero ensayados contra HPU Lubric, se ha encontrado este film en la zona de deslizamiento también, ver Ilustración 31, cosa que en el caso de del HPU Premium no se ha podido apreciar.



Ilustración 31. Film HPU Lubric em la zona de deslizamiento del disco de acero (3798)

Una vez hecho el análisis de los discos de acero en el microscopio óptico, se ha llevado a analizar el disco de acero del ensayo 3795 al Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), con el objetivo de confirmar que las zonas oscuras

captadas en el microscopio óptico pertenecen al film del polímero creado por el rozamiento entre las dos caras.

Con la lectura que se puede hacer en las imágenes del microscopio óptico, se puede deducir que las manchas negras observadas pertenecen al polímero. Diferentes estudios de polímeros con auto-lubricación demuestran que gracias al aditivo de auto lubricado se obtiene un film más consistente y continuo que el obtenido del polímero puro. Conseguir un film tribológico más consistente y continuo en la superficie de contacto (disco de acero cromado) ayuda a obtener un menor coeficiente de fricción y un mejor comportamiento anti desgaste ([12], [13]).

4.2. Caracterización de juntas en banco de ensayos TESSA

4.2.1. Ensayo de fricción

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos del SRV, se ha llevado a cabo los ensayos en el banco de ensayos de juntas de sellado. Para la realización de los ensayos se ha seguido la matriz de ensayos presentada en la Tabla 7 y en la Tabla 8. En el ANEXO I se muestra un resumen de los resultados obtenidos. Estos resultados son los obtenidos directamente desde la lectura de los sensores del banco. Al contrario del tribómetro SRV, donde se aplica una fuerza normal, la lectura de la fuerza de fricción no se traduce al valor de coeficiente de fricción, porque la fuerza de cortadura es desconocida. Además de las lecturas de la máquina, se mide la masa perdida de la junta pesándolo antes y después del ensayo, y las juntas son analizadas mediante análisis microscópico antes y después del ensayo a fin de evaluar la superficie de contacto. Los resultados obtenidos se pueden ver en la Ilustración 32.

En la gráfica de la Ilustración 32 se muestra un resumen de los resultados de fricción obtenidos. Se puede ver que a mayor presión, la fuerza de fricción obtenida es mayor. Esto se debe a que, debido a la presión en la cámara, la presión que ejerce la junta en el eje es mayor. Además, también se puede ver que a 0 bar, no hay diferencia entre HPU Premium y HPU Lubric, pero a 60 y 120 bar, se puede ver que HPU Lubric tiene una menor fuerza de fricción. Así, una

de las principales conclusiones obtenidas de estos ensayos es que parece que las juntas auto-lubricadas necesitan cierta presión de contacto y, por lo tanto, cierta temperatura. Los resultados coinciden con los resultados obtenidos a nivel probeta (en SRV), donde se replicaron las presiones de contacto entre junta y eje sin presión “extra” en cámara (0 bar), y los materiales se comportaban de manera similar.

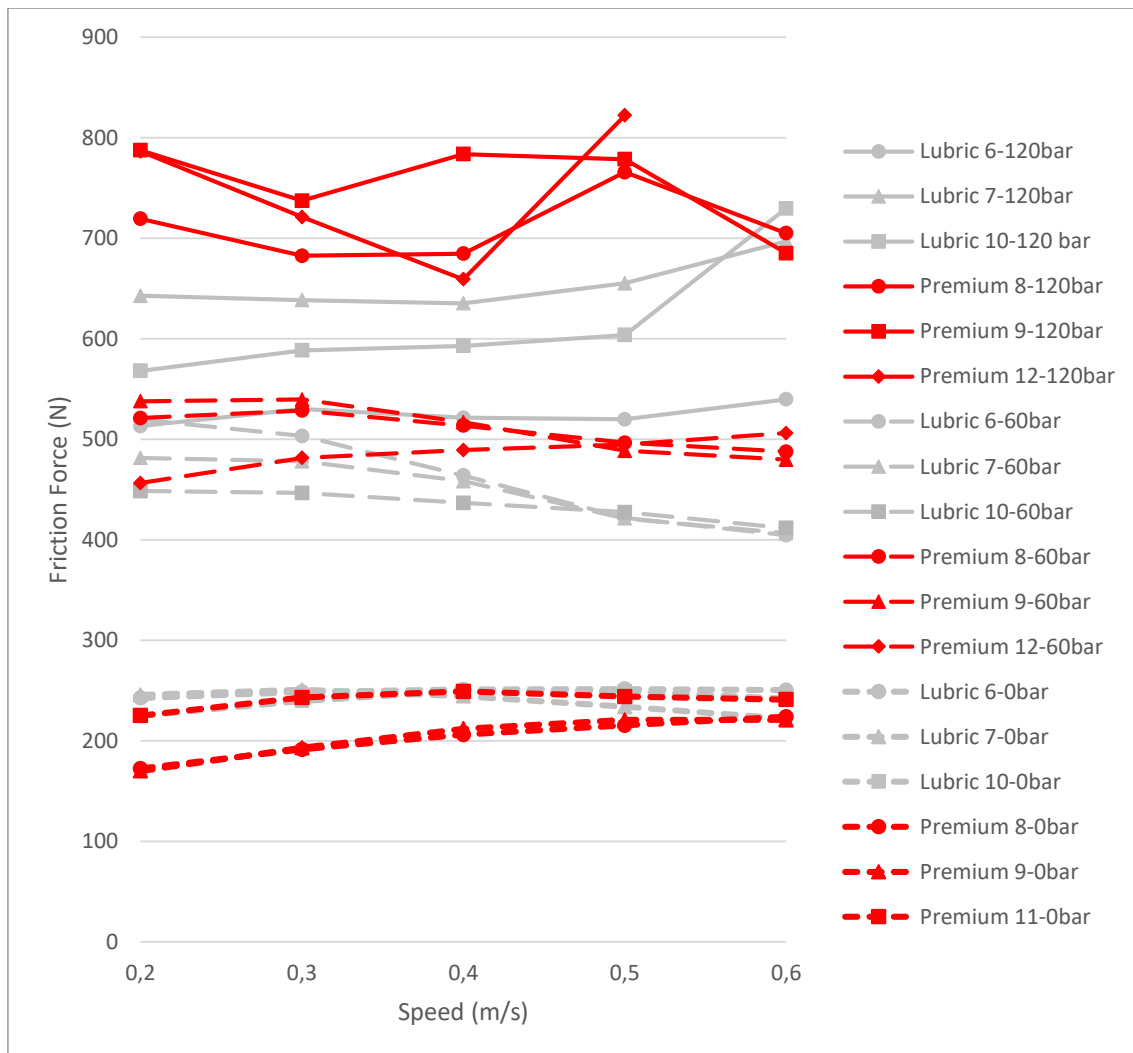


Ilustración 32. Resultados fuerza fricción en el banco de ensayos TESSA

Debido a que el movimiento del ensayo es recíproco, el comportamiento de las juntas tiene un comportamiento que se conoce como pico de fricción al cambiar de dirección, fricción estática, ver Ilustración 33. Debido a esta aceleración, la junta se queda por un instante pegada a eje incrementando la fuerza de fricción en cada cambio de dirección hasta vencer esta fricción estática.

Se ha cogido un ensayo representativo de cada material a cada presión para poder comparar las diferencias a un ciclo entre los dos materiales. En la Ilustración 33 se puede ver el ciclo a cada velocidad a 120 bar, en la Ilustración 34 a 60 bar, y en la Ilustración 35 a 0 bar.

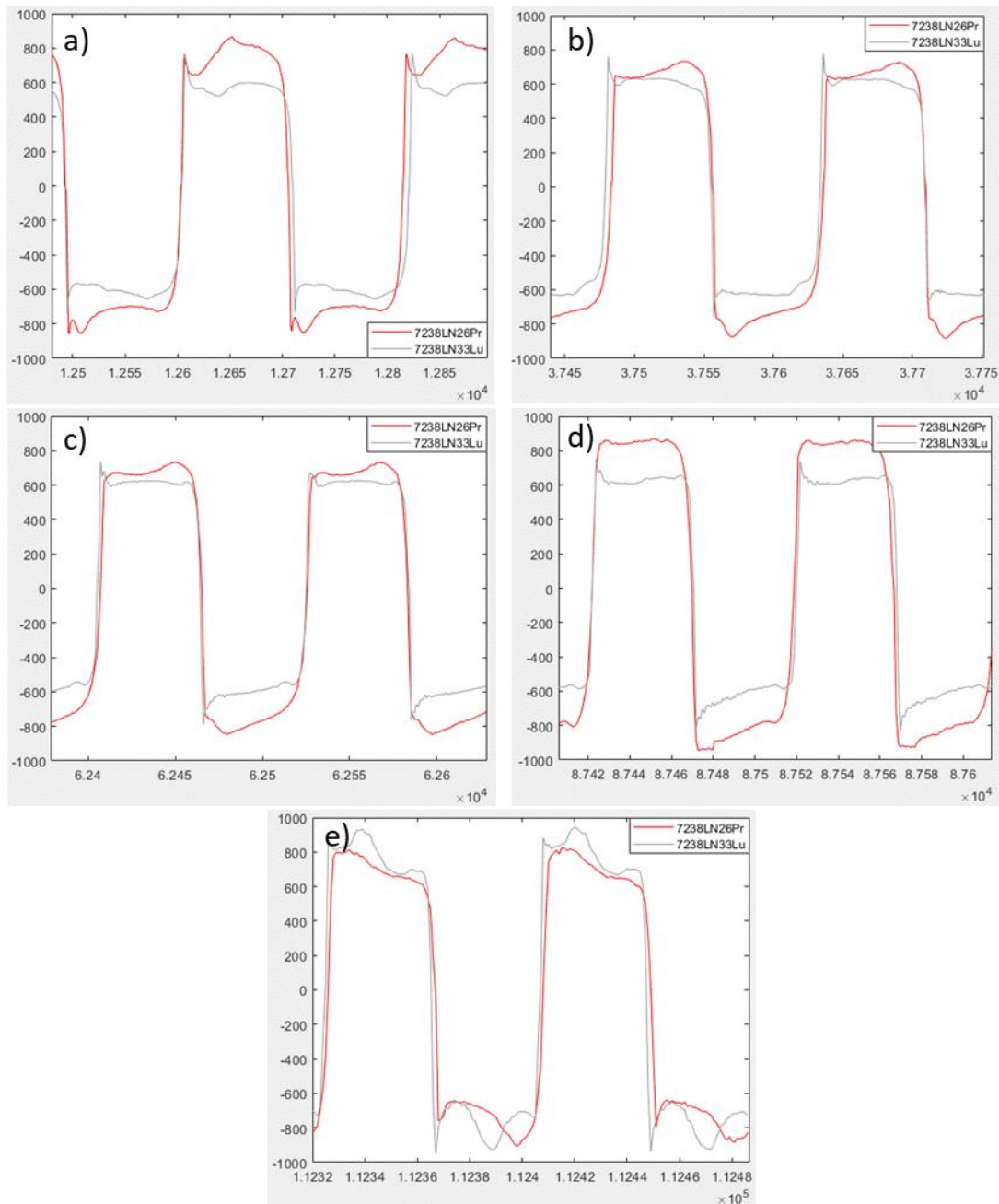


Ilustración 33. Fuerza fricción 120 bar. a) 0,2m/s, b) 0,3m/s, c) 0,4m/s, d) 0,5m/s, y e)0,6m/s

Los resultados muestran que, en el rango de velocidades ensayadas, la velocidad no afecta apenas a la Fuerza de Fricción, hasta alcanzar la velocidad

de 0,5 m/s, en el cual se aprecia un aumento considerable de fricción para ambos materiales.

Además, se puede ver como a 120 bar Lubric presenta un pegado (mayor fricción estática) en el momento de aceleración del eje, cosa que no ocurre en el caso de Premium. Además de ello, en todas las velocidades menos la última el valor de fuerza fricción es menor en el caso de Lubric.

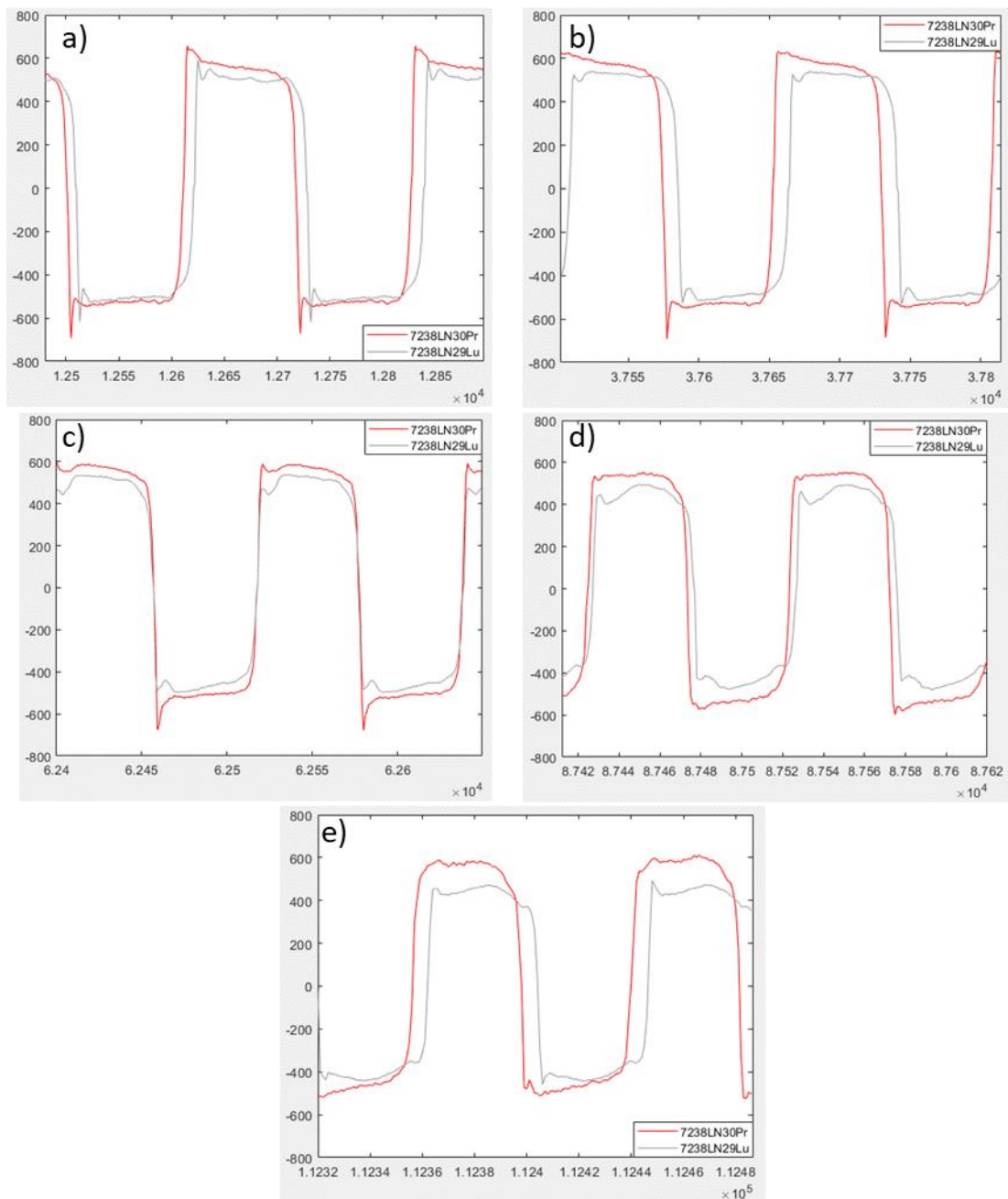


Ilustración 34. Fuerza fricción 60 bar. a) 0,2m/s, b) 0,3m/s, c) 0,4m/s, d) 0,5m/s, y e) 0,6m/s

En el caso de los ensayos a 60 bar, al igual que en el de a 120 bar, las juntas Lubric presentan un pequeño pico de fricción estática o pegado en la aceleración del eje y una menor fuerza fricción que el Premium. Los valores de fricción obtenidos son en todos los casos menores que los registrados a 120 bar.

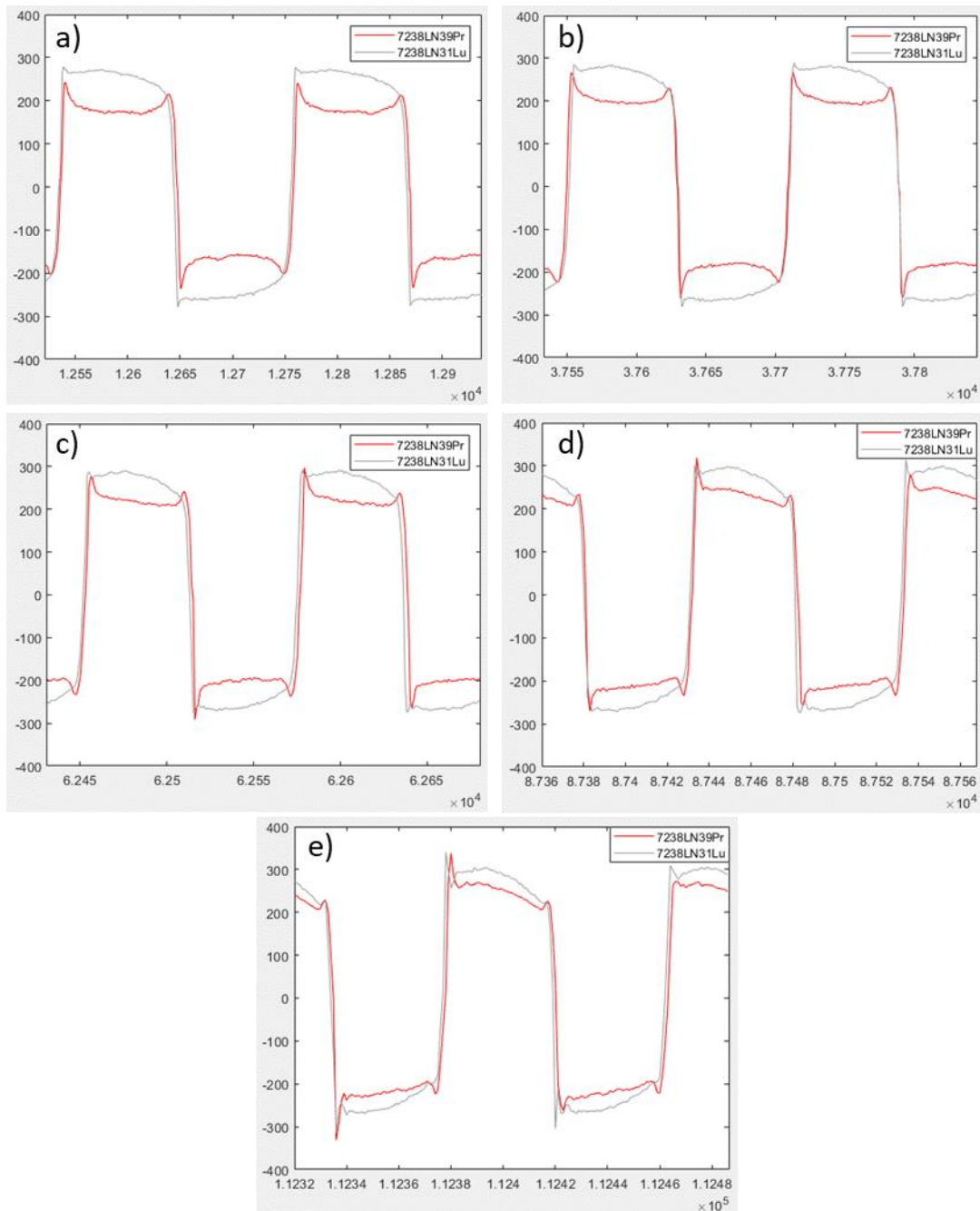


Ilustración 35. Fuerza fricción 0 bar. a) 0,2m/s, b) 0,3m/s, c) 0,4m/s, d) 0,5m/s, y e) 0,6m/s

A diferencia que las otras dos presiones, en esta es el Premium el que presenta una menor fuerza fricción, sobre todo a bajas velocidades, y el efecto de pegado tanto en la desaceleración como en la aceleración. Es decir, el aditivo parece no activarse a esta presión. En todos los casos las fuerzas de fricción monitorizan a 0 bar son menores que las monitorizadas a 60 y 120 bar. Por ello, se puede concluir que la Fuerza Fricción aumenta con la presión en cámara.

Después del ensayo a 120 bar, se ha apreciado tribofilm en el eje con los dos materiales. En la Ilustración 36 se puede ver el film creado por HPU Premium en el ensayo 7238LN43 a 120 bar, mientras que en la Ilustración 37 se puede ver el film creado por HPU Lubric doped en el ensayo 7238LN33 a 120 bar.

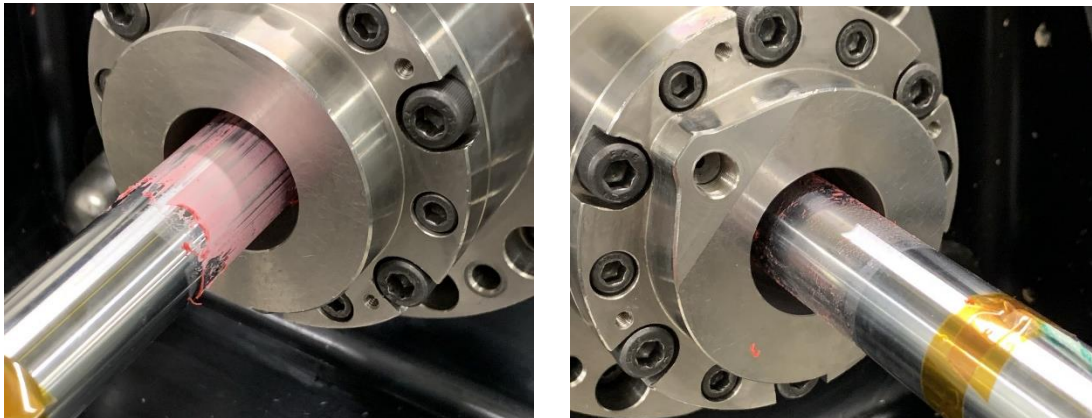


Ilustración 36. HPU Premium tribofilm 7238LN43

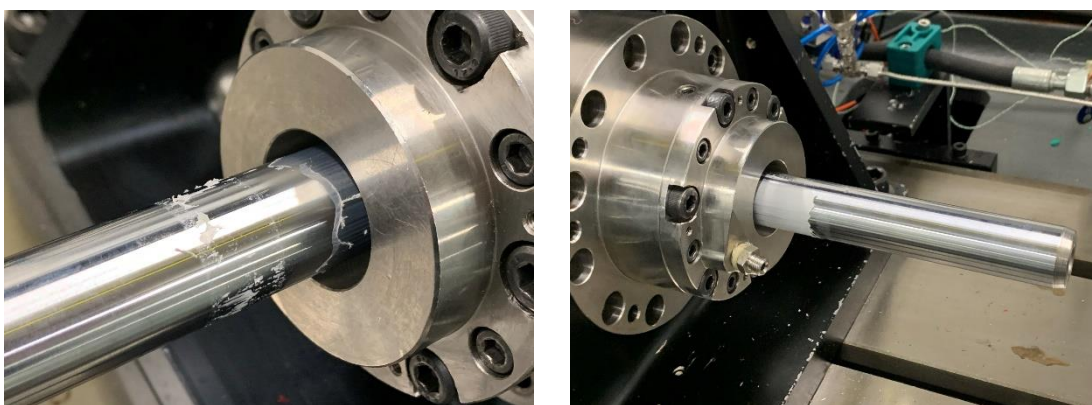


Ilustración 37. HPU Lubric doped tribofilm 7238LN33

En general, el film creado por la junta HPU Lubric doped muestra una mejor consistencia que la creada por el material HPU Premium. El film creado por el material HPU Premium es debido al calor y la alta presión ejercida entre la

junta y el eje, debido a ello, la junta sufre un gran desgaste creando virutas de la misma que hacen que el film no sea constante. Este fenómeno también se ha podido observar en el caso de los ensayos a 60 bar, cosa que no se ha visto en los ensayos a 0 bar. Esto se debe a que, a partir de una temperatura, las juntas HPU Lubric muestran un mejor comportamiento debido a la activación de la lubricación que tiene el material. El film que se crea en el eje hace que tanto la fuerza fricción como el ratio de desgaste se reduzcan. Además, algunas juntas de HPU Premium fugaron durante las últimas velocidades, no llegando a terminar el ensayo completo a realizar.

4.2.2. Ensayo de durabilidad

Los ensayos se completaron acorde a la matriz de ensayos de la Tabla 9. En el resumen de resultados de la Tabla 12 se puede ver un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 12. Resumen resultados de durabilidad

Ensayo	Material	Eje	Velocidad (m/s)	NºCiclos hasta fallo	Distancia hasta fallo (m)	Perdida de masa (g)	
						Side A	Side B
7238LN101	Premium	4	0,8	4	2,63 x10 ⁵	0,00654	-0,01318
7238LN102	Lubric	13	0,8	4	2,07 x10 ⁵	0,02466	-0,00892
7238LN103	Lubric	14	0,8	6	4,13 x10 ⁵	0,11227	0,00814
7238LN104	Premium	15	0,8	2	1,14 x10 ⁵	0,04564	-0,0074
7238LN105	Premium	16	0,8	2	1,23 x10 ⁵	0,00675	-0,02198
7238LN106	Lubric	17	0,8	3	1,83 x10 ⁵	-0,00042	0,01676

Como criterio de fallo de las juntas en el ensayo de durabilidad se ha considerado el momento en el que la fuga dinámica supera el 25% (caída de la presión dinámica desde los 120 bar a 90 bar). Así, en el momento en el que la presión caiga hasta los 90 bar, será considerado como fallo de la junta. Como se puede observar en la Ilustración 38 y en la Ilustración 39, la línea roja marca el límite mínimo considerado como fallo de la junta.

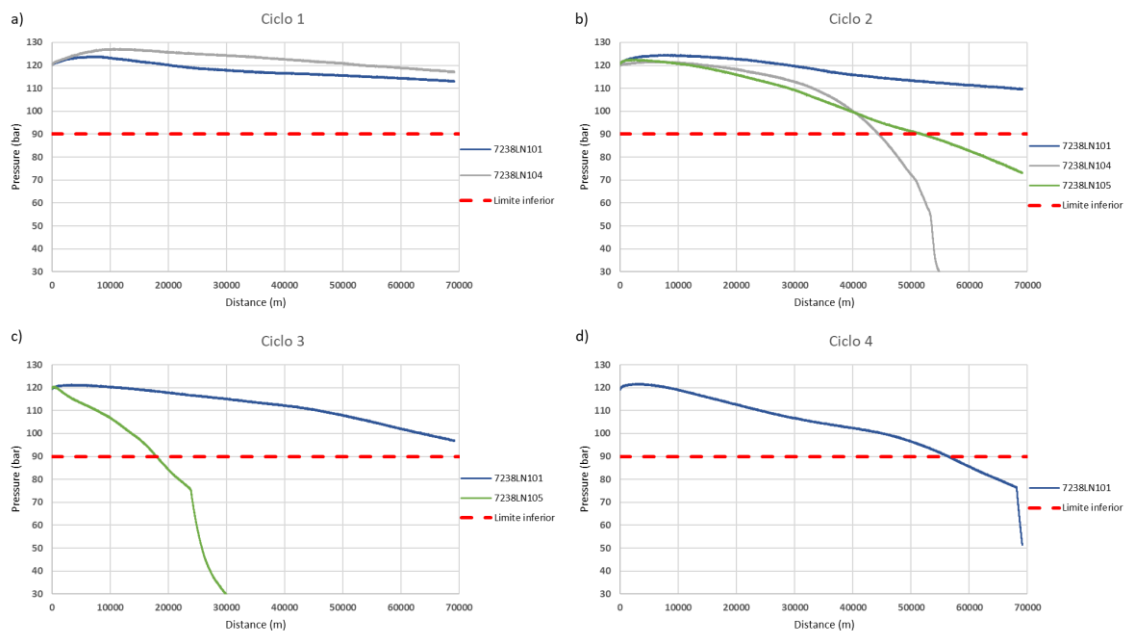


Ilustración 38. Presión durante los ensayos de durabilidad de HPU Premium; a) primer ciclo, b) segundo ciclo, c) tercer ciclo y d) cuarto ciclo

Como se puede ver, tanto el ensayo 7238LN104 como el ensayo 7238LN105 han fallado a algo más de la mitad del segundo ciclo. Después de analizar las juntas, se ha comprobado que el fallo ocurrido no ha sido ni por un mal montaje ni por falta de lubricación en ningún punto, por lo que estos dos ensayos se han dado por válidos. En el caso de las juntas del ensayo 7238LN101, han aguantado hasta tres cuartos del cuarto ciclo. Se han analizado las dos juntas utilizadas en el ensayo y no se ha podido ver ninguna anomalía que haya hecho que estas duren prácticamente el doble de distancia que las anteriores, por lo que esta variación se debe a la dispersión de resultados que es común en los ensayos de durabilidad y de componentes en general llevados a cabo en bancos de ensayo.

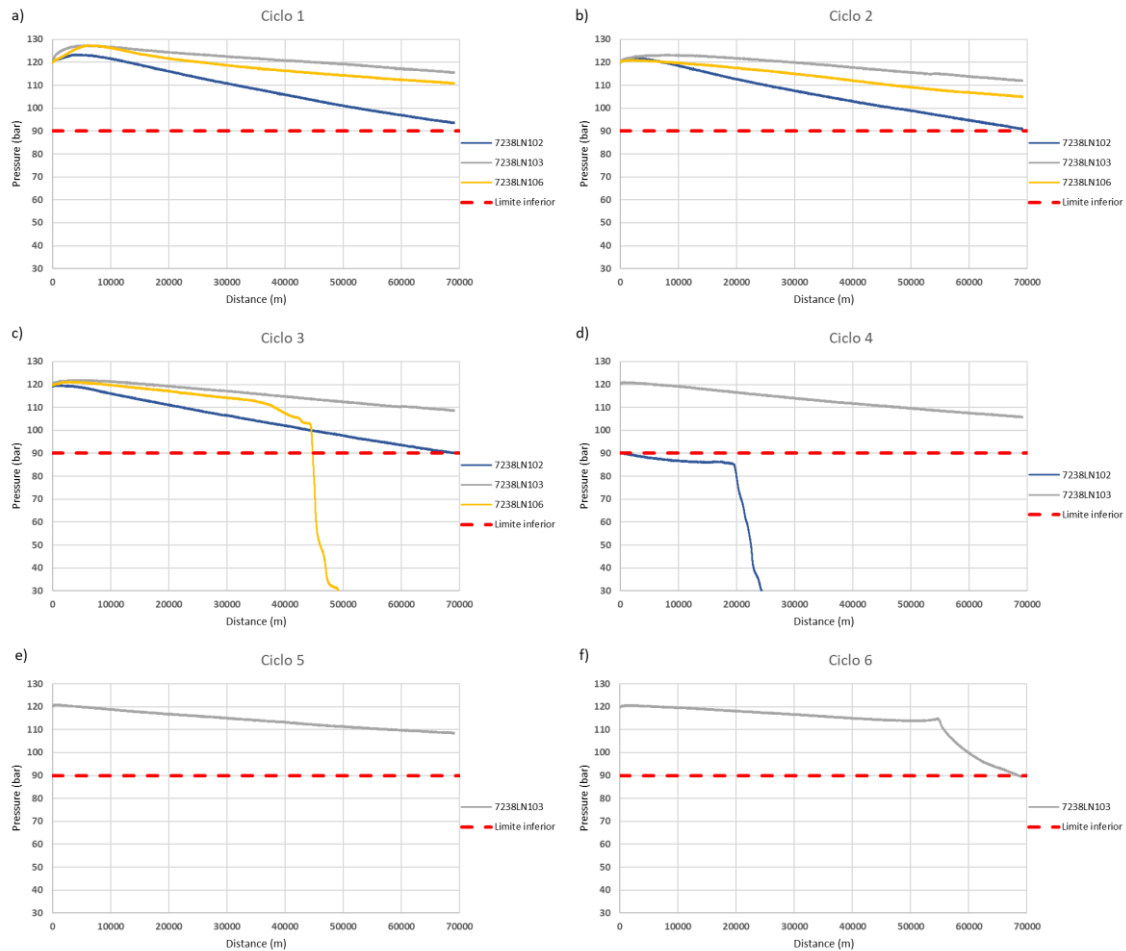


Ilustración 39. Presión durante los ensayos de durabilidad de HPU Lubric; a) primer ciclo, b) segundo ciclo, c) tercer ciclo, d) cuarto ciclo, e) quinto ciclo y f) sexto ciclo

En el caso de las juntas HPU Lubric, la duración de estas ha sido superior a las conseguidas en las juntas HPU Premium. Esto se debe a que, como se ha comentado antes, las propiedades de auto lubricación que tienen hacen que el desgaste que tienen sea menor por lo que mantienen las propiedades de sellado durante una distancia mayor. De promedio, las juntas HPU Lubric tienen una durabilidad 60% mayor que la obtenida para las juntas de referencia HPU Premium.

En la Ilustración 40 se puede ver el promedio de distancia de cada material de la junta y la desviación estándar de las mismas. En él se ve claramente como las juntas HPU Lubric han tenido una durabilidad media superior a la obtenida con el HPU Premium.

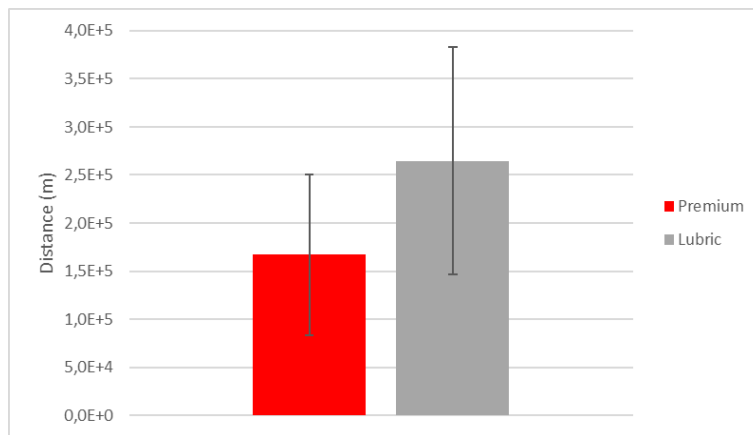


Ilustración 40. Distancia promedio y desviación estándar del ensayo de durabilidad

En la Ilustración 41 y en la Ilustración 42 se muestran las medidas de evolución de temperatura medidas durante los ensayos de durabilidad.

Como se ha comentado en el apartado 3.3.4, se ha puesto un termopar en el eje en el punto más cercano a la junta para obtener la temperatura alcanzada durante los ensayos, es por ello por lo que cada ensayo tiene dos curvas, los cuales son pertenecientes a la medición de cada lado del eje.

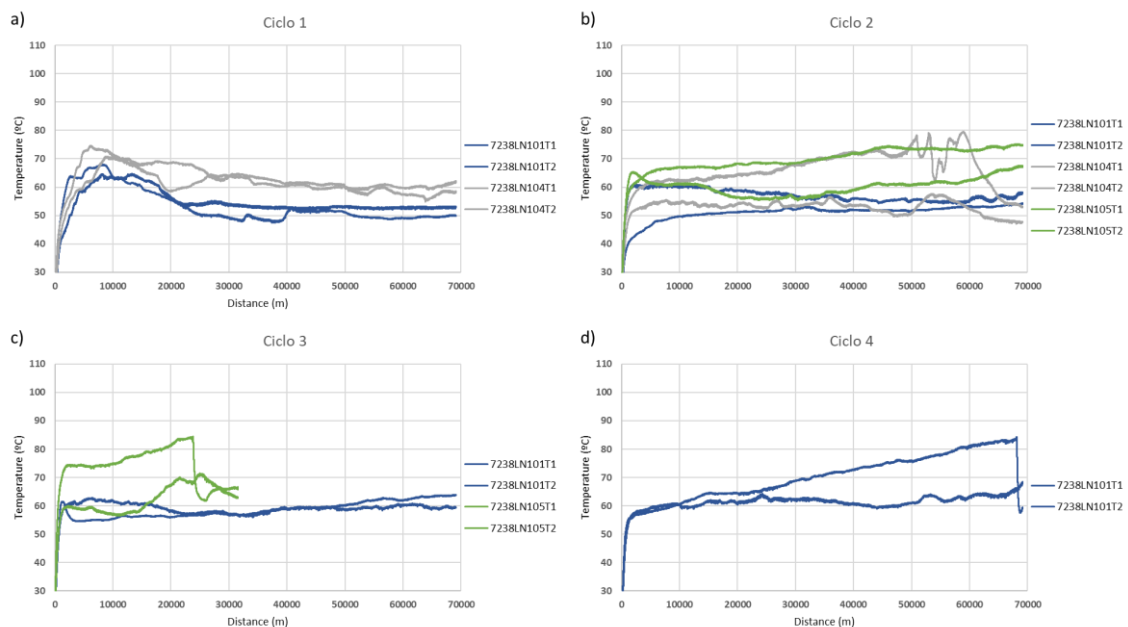


Ilustración 41. Variación de la temperatura en los ensayos de durabilidad de HPU Premium durante a) primer ciclo, b) segundo ciclo, c) tercer ciclo y d) cuarto ciclo

En el caso del primer ciclo del ensayo 7238LN105, no se ha podido medir debido a un error en la captura de datos durante el ensayo. Es por ello por lo que no se muestran datos de este ensayo en el primer ciclo.

Como se puede apreciar, en el primer ciclo la temperatura sube y vuelve a bajar hasta que se estabiliza alrededor de los 60°C al estabilizarse la fricción. Como se puede ver, en el momento de fallo de la junta, la temperatura de la junta sube un poco, no siendo este incremento muy significativo. Esto puede deberse a que a la hora en la que la presión empieza a fugar a través de la junta, esta sufre una mayor presión contra el eje y, por lo tanto, existe un incremento de temperatura.

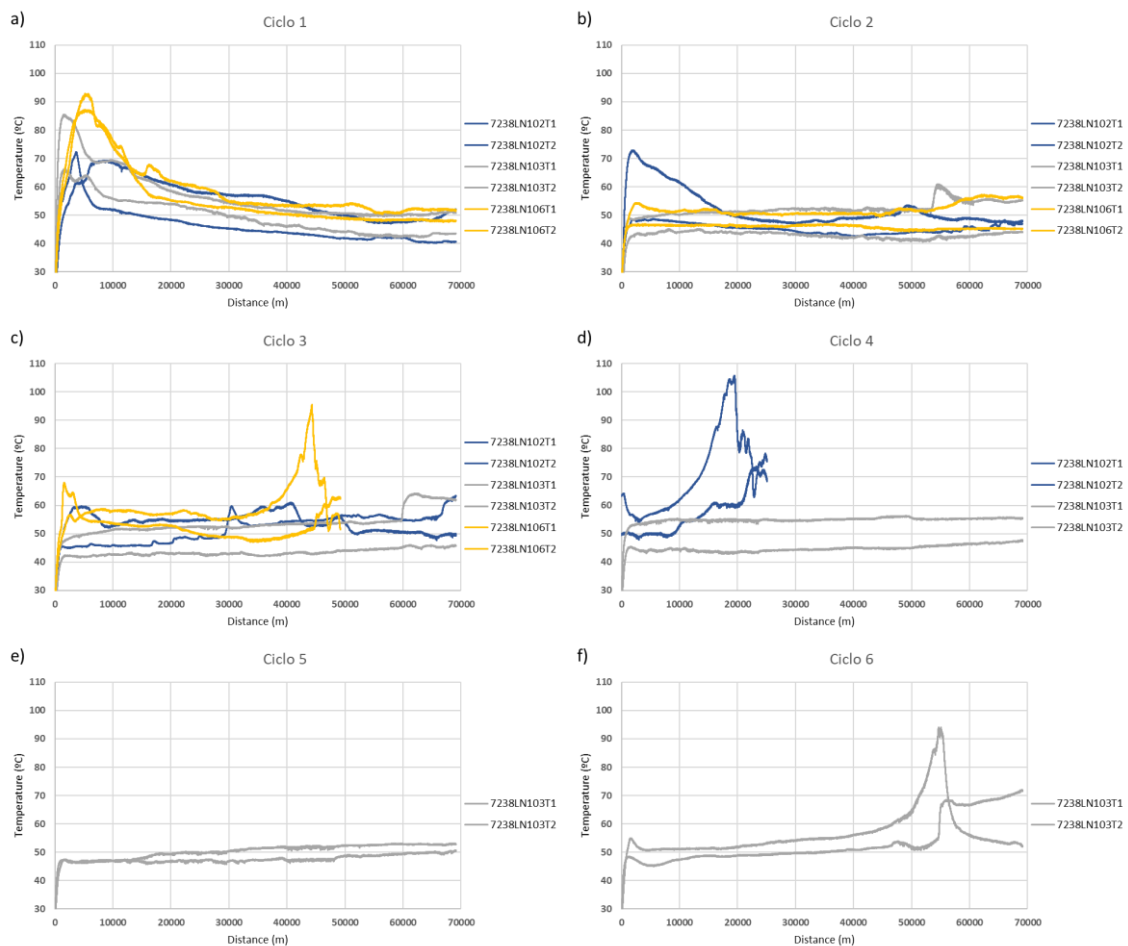


Ilustración 42. Variación de la temperatura en los ensayos de durabilidad de HPU Lubric durante a) primer ciclo, b) segundo ciclo, c) tercer ciclo, d) cuarto ciclo, e) quinto ciclo y f) sexto ciclo

En el caso de las juntas HPU Lubric, el incremento de temperatura al inicio del primer ciclo es mayor que el de las juntas HPU Premium. Después del pico de temperatura que en algunos casos llega hasta los 80-90°C, la temperatura se estabiliza en alrededor de 50°C. Esta diferencia de temperatura respecto a las juntas HPU Premium es una de las razones por las que las nuevas juntas HPU Lubric tienen una durabilidad del 60% mayor. En el momento en el que las juntas fallan, el incremento de temperatura en el punto de contacto con el eje llega hasta los 100°C, siendo este pico mucho mayor que el obtenido en las juntas HPU Premium. Esto se debe a que gracias a las propiedades de auto-lubricación que tienen las juntas, teniendo mayor impacto a temperaturas altas, hace que una vez el lubricante añadido al ensayo falle, estas duren un mayor tiempo sin fallar, teniendo un incremento de temperatura mayor.

5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado en Tekniker un procedimiento de ensayos para juntas de estanqueidad para cilindros neumáticos. En él, se han caracterizado la fricción y durabilidad de dos juntas de poliuretano, una convencional que se ha usado como material de referencia (HPU Premium[®]) y otra auto-lubricada (HPU Lubric doped[®]), el cual su principal componente de auto-lubricación es el Flúor. Se han realizado ensayos tanto en un tribómetro como en un banco de ensayos de juntas.

Una vez llevado a cabo los ensayos y analizadas tanto los resultados como las juntas, se han obtenido las siguientes principales conclusiones:

- El material auto-lubricado logra mejorar la durabilidad del material de referencia en un 60% para la aplicación y para las condiciones de trabajo seleccionadas. Después de los ensayos se ha podido observar como después de los ensayos en los que más temperatura se ha obtenido, el material auto-lubricado creaba un film continuo y consiste en el eje. Este film ayuda a que haya una reducción en la fricción entre las dos caras haciendo que el desgaste sea menor, y, por lo tanto, tenga una mayor durabilidad.
- Las juntas auto-lubricadas necesitan cierta presión de contacto para activarse. Dicha presión de contacto es necesaria para llegar a la cierta temperatura en la que la auto-lubricación empieza a funcionar. Los resultados obtenidos coinciden tanto a nivel de probeta (en SRV) como a nivel de componente (en banco de ensayos TESSA) donde se vio un comportamiento similar entre los dos materiales.

Como futuros trabajos se plantea el poder ensayar el material auto-lubricado en otras aplicaciones tales como aplicaciones semi-estáticas donde las condiciones de trabajo de la junta son menos severas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Guangzhou JinBond Hidraulic Seal Technology Co., "Classification Of Hydraulic Dynamic Seals," 2019. <https://www.jinbondseal.com/news/classification-of-hydraulic-dynamic-seals-22344318.html> (accessed Feb. 19, 2021).
- [2] R. Flitney, "Seals and Sealing Handbook," vol. 31, no. 5, 2007.
- [3] Telleborg Sealing Solutions, "Hydraulic Seals.," *Ind. Lubr. Tribol.*, vol. 29, no. 5-6, Sep.-Oct.-Nov.-Dec. 1977, p.126., 1977, doi: 10.1243/pime_proc_1949_160_049_02.
- [4] G. K. Nikas, "Eighty years of research on hydraulic reciprocating seals: Review of tribological studies and related topics since the 1930s," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, vol. 224, no. 1, pp. 1–23, 2010, doi: 10.1243/13506501JET607.
- [5] M. Dekker, *Müller HK, Nau BS. Fluid sealing technology: Principles and applications.* 1998.
- [6] Parker Hannifin corporation, "O-Ring handbook," 2010.
- [7] Trelleborg Sealing Systems, "Avoiding seal failure," 2010. <https://www.mobilehydraulictips.com/avoiding-seal-failure/>.
- [8] B. Pinedo, "Effect of Mounting Misalignments on The Tribological Behavior of Elastomeric Seals: Analytical Predictive Models and Experiental Validation," vol. 2016, no. July, pp. 35–90, 2016.
- [9] A. V. Bogdanovich, "Lows of Wear Process of the Friction Pair '0.45% Carbon Steel—Polytetrafluoroethylene' during Sliding from the Position of Fracture Mechanics," *World J. Mech.*, vol. 09, no. 05, pp. 95–104, 2019, doi: 10.4236/wjm.2019.95007.
- [10] R. Kurtus, "Determining the Coefficient of Friction," 202AD.
- [11] B. Pinedo, M. Conte, J. Aguirrebeitia, and A. Igartua, "Effect of misalignments on the tribological performance of elastomeric rod lip seals: Study methodology and case study," 2017.
- [12] Y. Yang *et al.*, "Core-shell polytetrafluoroethylene @ phenolic resin composites: Structure and tribological behaviors," *Tribol. Int.*, vol. 144, no. November 2019, p. 106092, 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2019.106092.
- [13] Y. Yang *et al.*, "Multi-environment adaptability of self-lubricating core/shell PTFE@PR composite: Tribological characteristics and transfer mechanism," *Tribol. Int.*, vol. 154, no. July 2020, p. 106718, 2021, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106718.

ANEXO I

Los ensayos marcados en rojo son ensayos que han fugado a las últimas velocidades.

Test Nº	Material junta	Eje	P (bar)	Fricción Rodaje	0,2 m/s	0,3 m/s	0,4 m/s	0,5 m/s	0,6 m/s	ΔT (°C)	desgaste lado A (g)	desgaste lado B (g)	
7238LN24	HPU lubric doped	6	120	249	Media	513,19	530,09	521,39	519,92	539,72	2,5	0,00103	0,00116
					Max	682,46	809,50	810,27	747,51	769,91			
7238LN25		7		264	Media	642,83	638,55	635,37	655,26	697,11	59,7	0,03454	0,03458
					Max	917,67	903,11	854,31	875,43	925,54			
7238LN33		10		244	Media	568,18	588,57	592,97	603,87	729,83	59,0	0,07243	0,06903
					Max	805,27	815,77	833,73	849,95	1000,00			
7238LN26	HPU premium	8		280	Media	719,38	682,61	684,67	765,70	705,09	56,2	0,04916	0,04355
					Max	966,41	955,71	880,15	980,34	1000,00			
7238LN27**		9		264	Media	787,54	737,45	783,81	778,62	685,11	59,9	0,19871	0,01345
					Max	980,47	935,21	939,53	1000,00	999,97			
7238LN34		11		268	Media	648,35	573,51	510,60	511,00	554,50	51,2	0,00228	0,00328
					Max	892,03	814,44	681,64	630,80	708,37			
7238LN43*	12	309	Media	786,43	721,18	659,14	822,34			0,06608	0,1694		
			Max	1000,00	967,08	837,15	1000,00						
7238LN28	HPU lubric doped	6	60	260	Media	519,60	503,36	463,93	421,99	404,55	43,9	0,00454	0,01065
					Max	678,99	633,51	585,84	565,64	598,91			
7238LN29		7		252	Media	481,50	478,18	458,44	421,35	406,70	47,0	0,00094	0,00111
					Max	636,47	595,17	553,53	531,83	526,87			
7238LN36		10		239	Media	448,55	446,64	436,71	427,50	411,78	45,0	0,00732	0,0136
					Max	544,45	542,04	562,86	588,87	629,97			
7238LN30	HPU premium	8	265	Media	521,17	528,61	513,64	496,56	487,72	49,3	0,02327	0,03788	

				Max	709,47	698,68	711,42	687,19	643,07			
7238LN35		9	260	Media	537,93	539,69	517,03	488,71	479,71	46,7	0,01602	0,00894
				Max	636,02	639,86	625,73	587,98	624,48			
7238LN42**		11	265	Media	505,10	522,52	526,79	505,99	204,84	40,9	-0,00073	0,04279
				Max	639,25	656,46	692,69	702,91	324,83			
7238LN44		12	228	Media	456,50	481,55	489,32	494,86	506,25	47,4	0,00135	0,04975
				Max	586,42	620,93	614,37	613,18	624,16			
7238LN31	HPU lubric doped	6	235	Media	242,58	248,66	251,05	251,48	250,43	29,2	0,0006	0,00072
					Max	282,41	297,18	304,70	347,37			
7238LN32	HPU lubric doped	7	237	Media	245,66	250,68	244,49	233,87	222,11	26,4	0,00021	6E-05
					Max	285,22	301,36	301,94	297,15			
7238LN38		10	214	Media	224,88	239,81	249,66	249,28	241,96	26,7	-0,00108	-0,00034
				Max	271,51	290,89	308,41	325,53	343,96			
7238LN39	HPU premium	8	165	Media	172,41	191,56	206,12	215,35	224,05	22,0	-0,00061	-0,00063
					Max	250,06	277,80	306,59	344,9			
7238LN40	HPU premium	9	155	Media	170,05	193,11	212,00	220,89	220,84	27,6	-0,00073	-0,00064
					Max	233,84	265,60	294,12	338,56			
7238LN41	HPU premium	11	214	Media	225,09	243,16	249,12	244,02	241,00	27,3	0,00048	-0,00065
					Max	260,56	286,59	304,54	318,57			
7238LN45		12	310	Media	323,41	334,03	330,26	319,32	294,55	32,6	0,00022	0,0207
				Max	381,59	397,89	409,64	433,38	434,81			

* Fuga a 0,5 m/s

** Fuga a 0,6 m/s