



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Máster

Diseño y validación de un piloto regulador de presión para válvulas hidráulicas de diafragma

Design and validation of a pressure regulating pilot for hydraulic diaphragm valves

Autor

Diego Escudero Brun

Director

Jesús Cuartero Salafranca

Titulación del autor

Máster universitario en ingeniería mecánica

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2020

## Contenido

0. RESUMEN .....	6
1. Introducción: Motivaciones, objetivos y alcance del proyecto.....	7
2. Antecedentes: Información y explicación del producto .....	8
2.1 Campo de aplicación: Válvulas hidráulicas de diafragma .....	8
2.1.1 Concepto de funcionamiento de la válvula hidráulica de diafragma.....	11
2.2 Presentación y componentes del piloto regulador .....	13
2.2.1 Componentes involucrados en la lectura de presión.....	14
2.2.1.1 Cuerpo del piloto.....	14
2.2.1.2 Tapa del piloto.....	15
2.2.1.3 Tornillo regulador, apoyo y muelle. ....	15
2.2.1.4 Soportes de la membrana del piloto.....	15
2.2.1.5 Membrana del piloto regulador.....	16
2.2.2 Componentes involucrados en la comunicación de las conexiones del piloto regulador.....	17
2.2.2.1 Eje y tornillo de unión .....	17
2.2.2.2 Conjunto de jaulas y juntas tóricas .....	17
2.3 Mecanismo de operación del piloto regulador.....	19
2.3.1 Mecanismo de operación de la zona de lectura de presión .....	19
2.3.2 Mecanismo de operación de la zona del conjunto de conexiones .....	21
2.3.3 Ejemplo de aplicación real: Válvula hidráulica reguladora de presión .....	23
2.3.3.1 Caso 1: Aumento de la presión a la salida de la válvula.....	23
2.3.3.2 Caso 2: Caída de la presión a la salida de la válvula.....	25
2.3.3.3 Caso 3: Caída de la presión por debajo de la presión de consigna .....	26
3. Análisis de funcionamiento y problemas detectados .....	27
3.1 Prueba en banco de ensayos.....	27
3.2 Prueba en bomba manual de alta presión .....	27
3.3 Conclusiones de las pruebas realizadas .....	28
4. Análisis de los problemas y características claves para el funcionamiento .....	29
4.1 Análisis del margen de actuación.....	29
4.2 Regulación lenta.....	30
4.3 Toma nº3 no estanca .....	31
5. Propuesta de mejora de diseño .....	32
6. Análisis por elementos finitos para determinar el ajuste entre el conjunto: eje – junta tórica – cuerpo .....	33
6.1 Determinación de las propiedades del material de la junta tórica.....	34

6.1.1	Muestra para el ensayo.....	34
6.1.2	Resultados del ensayo.....	35
6.1.3	Obtención de la curva tensión – deformación.....	36
6.1.4	Simulación del ensayo por elementos finitos .....	40
6.1.4.1	Evaluación de los resultados del ensayo.....	40
6.1.5	Comparación del comportamiento del material obtenido con el ensayo de la muestra. 44	
6.1.5.1	Modelo, cargas y condiciones de contorno. ....	44
6.1.5.2	Materiales .....	44
6.1.5.3	Preparación de las variables de salida .....	45
6.1.5.1	Resultados de la simulación y comparación de resultados.....	46
6.1.5.1.1	Breve introducción al modelo de Ogden e influencia de sus constantes. 48	
6.2	Definición del modelo de la simulación .....	49
6.2.1	Modelo simplificado del conjunto.....	49
6.2.2	Materiales .....	50
6.2.3	Condición de contacto.....	50
6.2.4	Condiciones de contorno .....	53
6.2.5	Mallado.....	53
6.3	Procedimiento de la simulación .....	54
6.3.1	Step Inicial .....	55
6.3.2	Step 1: Preajuste .....	55
6.3.3	Step 2: Compresión del conjunto mediante el prisionero. ....	57
6.3.4	Step 3: Presurización de la cámara de la conexión. ....	57
6.3.5	Reducción del diámetro del eje.....	59
6.3.5.1	Comprobación de la simulación .....	61
7.	Comparación de resultados de la simulación y experimentales.....	63
8.	Propuesta de diseño alternativa .....	66
8.1	Componentes: Nuevo eje.....	66
8.2	Componentes: Comunicador de teflón .....	67
8.3	Ensamblaje del nuevo diseño:.....	67
8.4	Ventajas.....	68
8.5	Modo de funcionamiento .....	68
9.	Conclusiones.....	70
10.	Bibliografía .....	71

## Índice de ilustraciones:

Ilustración 1: Ensamblaje válvula hidráulica de diafragma .....	8
Ilustración 2: Cuerpo de válvula hidráulica .....	9
Ilustración 3: Cuerpo + diafragma en posición de montaje .....	10
Ilustración 4: Corte y Explosión de componentes del conjunto .....	11
Ilustración 5: Esquema conexiones válvula hidráulica .....	11
Ilustración 6: Detalle en corte de cámara superior en posición de montaje del conjunto ..	12
Ilustración 7: Membrana en posición de "Válvula cerrada" (Izquierda) y "Válvula cerrada" (Derecha).....	12
Ilustración 8: Vista de componentes en corte .....	13
Ilustración 9: Vista en corte de los componentes involucrados en la lectura de presión ....	14
Ilustración 10: Cuerpo del piloto regulador .....	14
Ilustración 11: Tapa del piloto regulador .....	15
Ilustración 12: Tornillo, soporte tornillo y muelle .....	15
Ilustración 13: Soportes superior e inferior .....	16
Ilustración 14: Membrana del piloto regulador .....	16
Ilustración 15: Vista en corte de los componentes involucrados en la comunicación de las cámaras .....	17
Ilustración 16: Eje original y tornillo de sujeción .....	17
Ilustración 17: Detalle de las jaulas y juntas tóricas .....	18
Ilustración 18: Detalle de componentes del conjunto .....	18
Ilustración 19: Esquema del equilibrio de fuerzas .....	20
Ilustración 20: Numeración de las conexiones .....	21
Ilustración 21: Esquema de la dirección del flujo 1 .....	21
Ilustración 22: Esquema de la dirección del flujo 2 .....	22
Ilustración 23: Símil válvula 3-3 .....	22
Ilustración 24: Esquema válvula reguladora de presión .....	23
Ilustración 25: Mecanismo de actuación 1 .....	24
Ilustración 26: Mecanismo de actuación 2 .....	25
Ilustración 27: Zonas del piloto regulador .....	28
Ilustración 28: Detalle análisis margen de actuación .....	29
Ilustración 29: Detalle interferencia en el movimiento por escalón .....	30
Ilustración 30: Detalle interferencia por diámetros .....	30
Ilustración 31: Detalle estanqueidad conexión nº 2 .....	31
Ilustración 32: Propuesta de diseño y ensamblaje .....	32
Ilustración 33: Situación ensayo de compresión .....	35
Ilustración 34: Geometría ensayo para determinar superficie de contacto .....	36
Ilustración 35: Mapa de colores de desplazamientos .....	37
Ilustración 36: Geometría axisimétrica de la junta tórica .....	38
Ilustración 37: Esquema radios para determinar superficie de contacto .....	38
Ilustración 38: Módulo de evaluación. Introducción de datos de ensayo 1 .....	41
Ilustración 39: Módulo de evaluación. Introducción de datos de ensayo 2 .....	41
Ilustración 40: Adecuación de modelos de comportamiento 1 .....	42
Ilustración 41: Adecuación de modelos de comportamiento 2 .....	42
Ilustración 42: Adecuación de modelos de comportamiento 3 .....	43
Ilustración 43: Salida módulo de evaluación .....	43

Ilustración 44: Modelo para comprobación de los datos del ensayo .....	44
Ilustración 45: Introducción del modelo Ogden de tercer grado .....	45
Ilustración 46: Preparación de las variables de salida y del incremento del step .....	46
Ilustración 47: Situación final simulación de ensayo de compresión .....	46
Ilustración 48: Obtención de las reacciones verticales.....	46
Ilustración 49: Esquema modelo simplificado axisimétrico.....	50
Ilustración 50: Fuerzas de reacción horizontales.....	52
Ilustración 51: Geometrías del modelo axisimétrico para la simulación.....	53
Ilustración 52: mallado de componentes .....	54
Ilustración 53: Tabla de condiciones de contorno según step.....	55
Ilustración 54: Detalle del Preajuste de las juntas tóricas .....	56
Ilustración 55: Introducción del Preajuste en el software .....	56
Ilustración 56: Estado inicial y final del step Preajuste.....	57
Ilustración 57: Indicación del desplazamiento impuesto y situación final de junta tórica y conjunto .....	57
Ilustración 58: Esquema de presión interior introducida .....	58
Ilustración 59: Situación inicial y final del step presión interior .....	58
Ilustración 60: Comprobación del estado del contacto .....	59
Ilustración 61: Detalle de la superficie donde se aplica inicialmente la presión .....	60
Ilustración 62: Detalle de los nodos sobre los que se amplía la presión aplicada.....	60
Ilustración 63: Sucesivas iteraciones de corrección de la superficie sobre la que se aplica la presión .....	61
Ilustración 64: Estado final de la comprobación de la simulación.....	62
Ilustración 65: Plano de ejes prototipos .....	63
Ilustración 66: Cuerpo vacío.....	66
Ilustración 67: Eje de propuesta de diseño alternativa .....	66
Ilustración 68: Comunicador de teflón .....	67
Ilustración 69: Montaje de la propuesta de diseño alternativa.....	67
Ilustración 70: Mecanismo de comunicación de la propuesta alternativa.....	68

## Diseño y validación de un piloto regulador de presión para válvulas hidráulicas de diafragma

### 0. RESUMEN

En este proyecto, se aborda la problemática existente en el funcionamiento de un piloto regulador propiedad de la empresa RIS IBERIA S.L que se encuentra en fase de desarrollo tras no haber sido validado por no haber obtenido resultados aceptables de funcionamiento en campo.

Inicialmente, se presenta el campo de aplicación de este modelo de piloto regulador las válvulas hidráulicas de diafragma, explicando brevemente su modo de operación, punto necesario para la comprensión del funcionamiento del piloto. Entonces, se exponen los componentes que forman el piloto regulador, explicando su naturaleza y características materiales y separándolos en dos zonas del mismo.

Una vez conocidos los componentes, se explica el modo de operación del piloto regulador, diferenciando de nuevo entre las dos zonas de este y explicando la finalidad de cada una de ellas. Para finalizar la comprensión del dispositivo, se ejemplifica con un caso y finalidad real aplicándolo a una válvula hidráulica de diafragma.

Entendiendo completamente el funcionamiento, se comienza analizando su desempeño en banco de pruebas y en distintos equipos de presión, para determinar los problemas que existen en este diseño y sus deficiencias en la operación. Se encuentran las causas de estas deficiencias y se procede a dar solución a todas ellas modificando componentes y proponiendo una mejora de diseño cualitativa, con el objetivo de abordar todas las deficiencias observadas.

Para definir completamente el componente rediseñado, se realiza un estudio de elementos finitos sobre el software de simulación "ABAQUS para definir completamente las modificaciones propuestas. Como paso previo a la simulación, se determinan las propiedades de los materiales hiperelásticos para conocer su comportamiento. En primer lugar, se realiza un ensayo de compresión uniaxial de una muestra real. Se presenta la metodología seguida para determinar la curva tensión-deformación del ensayo y así poder evaluar el material y definirlo a través de uno de los modelos de comportamiento de materiales hiperelásticos en términos de energía de deformación.

Se presenta el modelo axisimétrico simplificado para la simulación, detallando las características inherentes a un estudio de elementos finitos. En última instancia, como resultado de esta simulación tras simular todos los step que recrean la situación real de trabajo del piloto, se obtiene la geometría óptima que determina un ajuste óptimo en términos de estanqueidad y rozamiento para una situación a presión nominal.

Para verificar experimentalmente los resultados obtenidos en la simulación, se aplican estas modificaciones a un piloto regulador y se ensaya en la misma situación que la de la simulación.

Finalmente, se presenta una mejora de diseño alternativa explicando brevemente las características que considero beneficiosas pese a que supongan una mayor inversión en términos de rediseño y adaptación a los demás componentes del piloto regulador.

## 1. Introducción: Motivaciones, objetivos y alcance del proyecto

El proyecto toma como punto de partida el diseño de un piloto regulador existente propiedad de la empresa RIS Iberia. Este piloto regulador, no reúne las condiciones de funcionamiento necesarias que exige el sector, por lo que, en su momento, se clasificó como producto no apto para el funcionamiento y se retiró de la venta.

Inicialmente, se realizarán ensayos de trabajo en un banco de pruebas y para facilitar la comprensión del funcionamiento, se va a modelar cada uno de los componentes a escala real para ensamblarlos y definir completamente el conjunto.

Se realizará un análisis del funcionamiento, exponiendo los problemas detectados y definiendo las características claves para el funcionamiento.

Posteriormente se realizará una propuesta de diseño que ataque la defectología existente. Se utilizará el software de simulación por elementos finitos "ABAQUS", donde se realizará un ensamblaje simplificado del conjunto a estudiar y se someterá a las cargas impuestas en su situación de trabajo.

El objetivo, es obtener una solución válida para un funcionamiento adecuado del dispositivo cumpliendo con los requisitos exigidos. Se compararán los resultados obtenidos en las simulaciones con los de un ensayo real para determinar la precisión de la simulación.

## 2. Antecedentes: Información y explicación del producto

El piloto regulador de presión, es un dispositivo de funcionamiento mecánico que es comúnmente utilizado en el sector de riego mediante válvulas hidráulicas de diafragma.

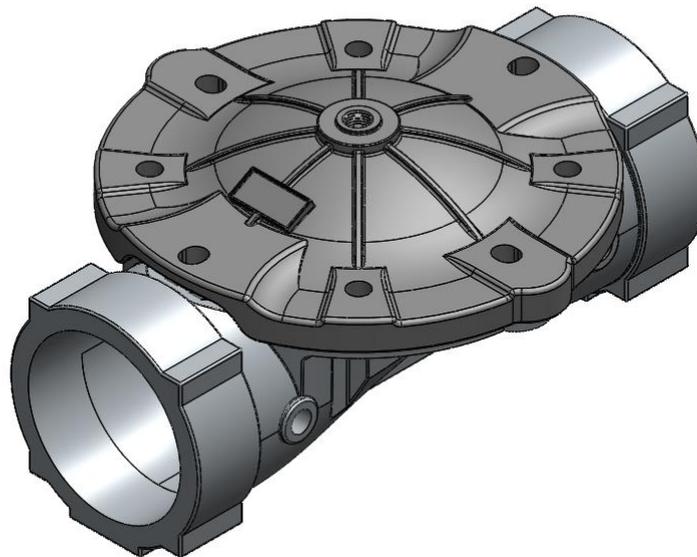
Mediante diferentes configuraciones en sus conexiones, es posible utilizar el dispositivo para diferentes aplicaciones. Puede utilizarse como regulador de presión a la salida de la válvula, como sostenedor de presión aguas arriba de la válvula, como dispositivo de seguridad frente a subidas repentinas e involuntarias de presión en la línea... Todas estas configuraciones se mostrarán brevemente más adelante.

### 2.1 Campo de aplicación: Válvulas hidráulicas de diafragma

Antes de explicar el funcionamiento y componentes del piloto regulador, es necesario explicar el tipo de válvulas hidráulicas a las que se conecta y sus características de funcionamiento.

El dispositivo se utiliza como parte de un kit de regulación que se conecta a las válvulas hidráulicas de diafragma.

A continuación, se muestra el ensamblaje y componentes del conjunto que forma una válvula hidráulica.



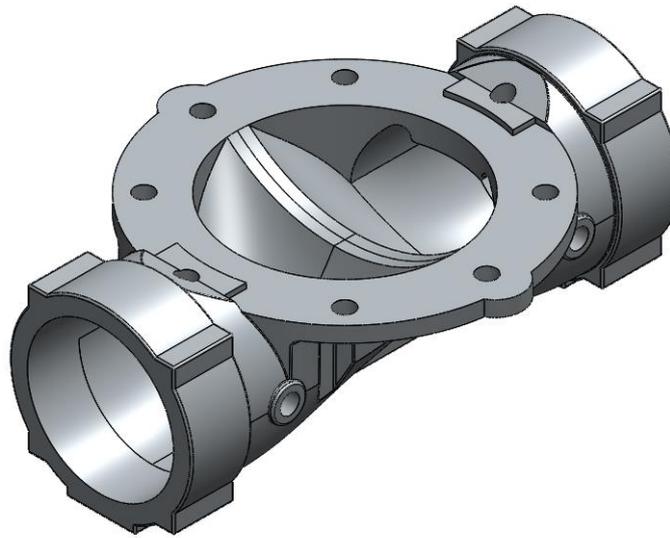
*Ilustración 1: Ensamblaje válvula hidráulica de diafragma*

En el ensamblaje completo de este tipo de válvulas, intervienen componentes a los que no se va a hacer mención, pues, aunque son necesarios para el correcto funcionamiento del conjunto, se entiende que se pueden omitir de la explicación del proyecto, sin que éste pierda entidad, y así poder centrarnos en los componentes en los que actúa el piloto regulador.

A continuación, se muestran los componentes básicos que forman el conjunto de válvula hidráulica de diafragma:

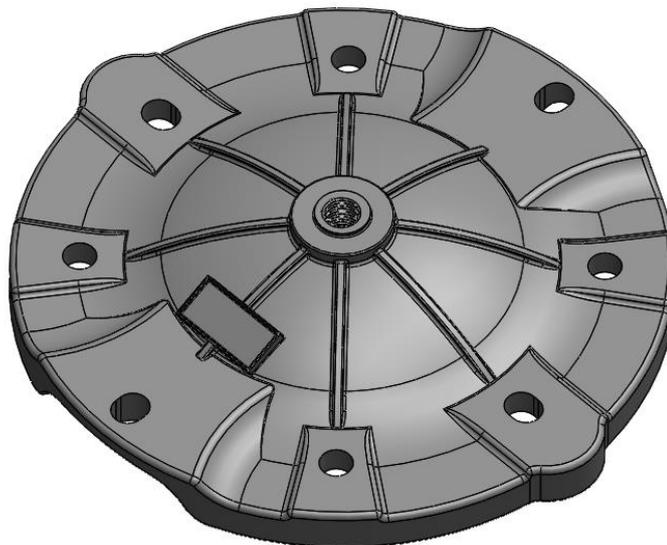
- El **cuerpo** de la válvula está fabricado en un material rígido, comúnmente fundición gris o plástico reforzado con fibra, dependiendo de la aplicación. Éste puede variar su

configuración dependiendo del caudal a operar, tipo de conexión, o presión de trabajo... Pero no es objeto de este proyecto entrar al detalle de este producto.



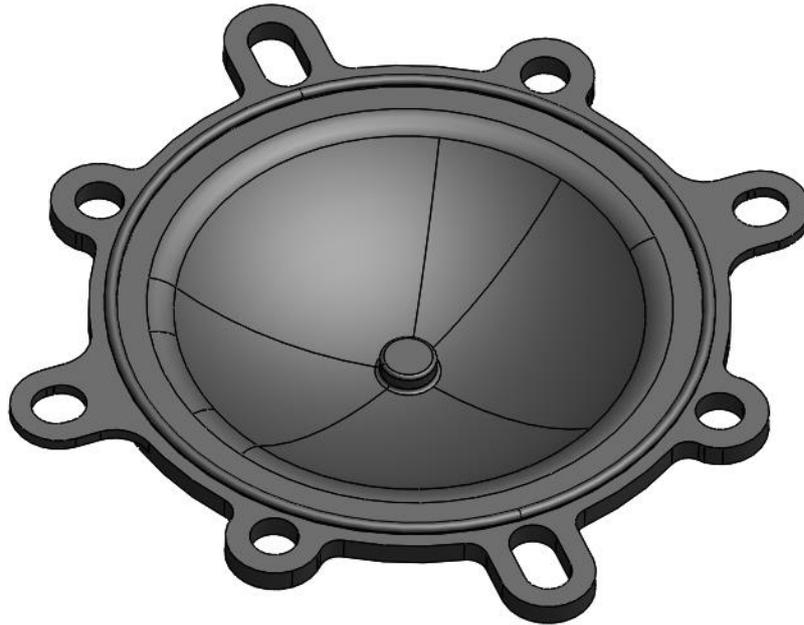
*Ilustración 2: Cuerpo de válvula hidráulica*

- Al igual que el cuerpo, la **tapa** de la válvula varía en geometría y material dependiendo de la aplicación en la que se use.



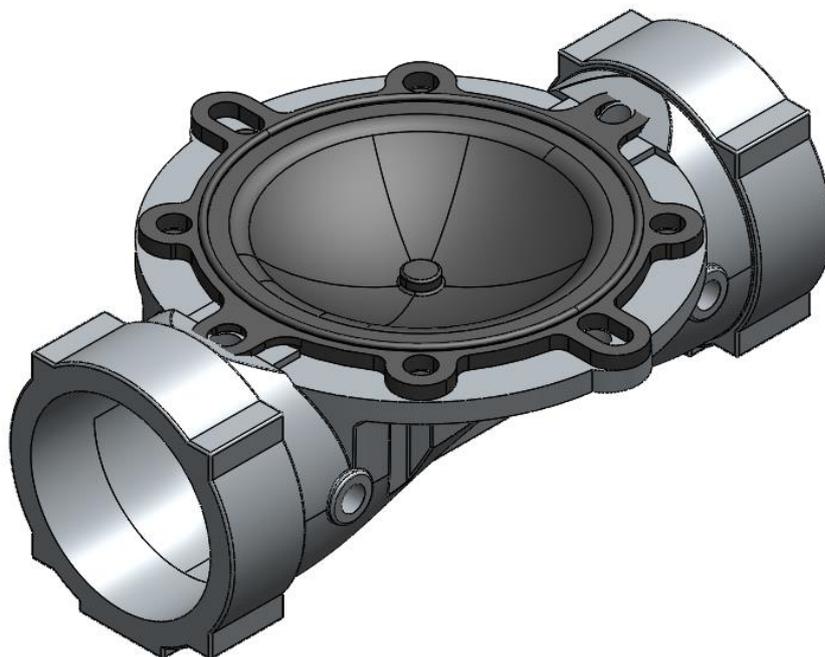
*Ilustración 3: Tapa de válvula hidráulica*

- El diafragma, o también comúnmente llamado **Membrana**, es el componente que se encarga de la apertura y cierre del conjunto. El material de este componente es caucho natural vulcanizado y reforzado con fibras textiles. Además de la geometría, la dureza de la goma como materia prima, la constitución y número de telas de refuerzo que se le incorporen, también determinarán el comportamiento y propiedades de la membrana.

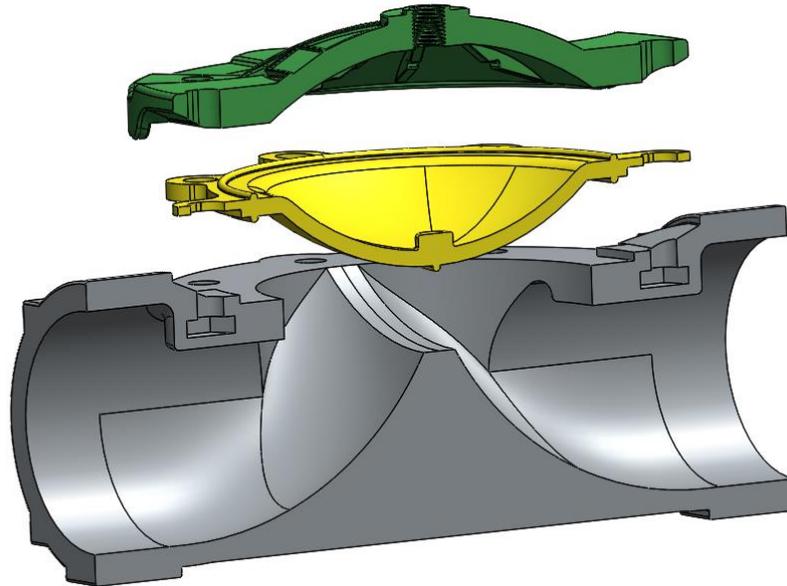


*Ilustración 4: Diafragma de válvula hidráulica*

A continuación, se muestran varias imágenes de los componentes para ubicarlos y comprender su rol en el conjunto.



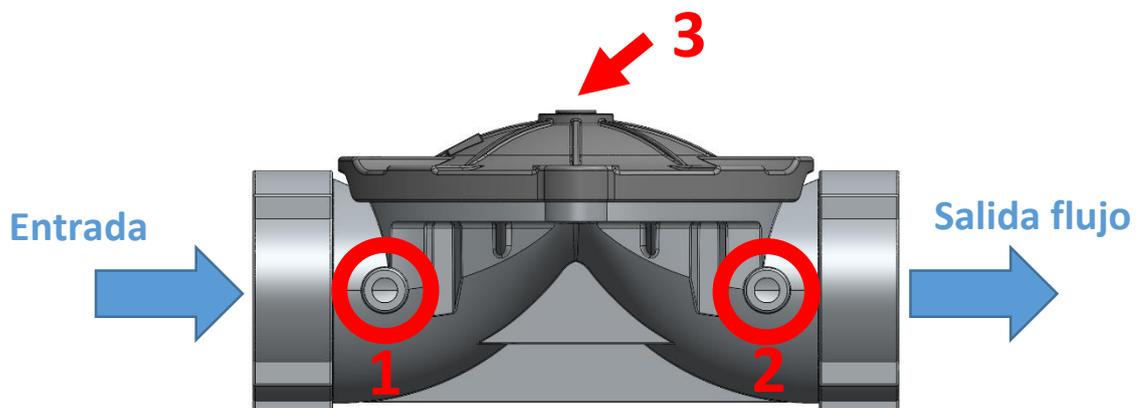
*Ilustración 3: Cuerpo + diafragma en posición de montaje*



*Ilustración 4: Corte y Explosión de componentes del conjunto*

### 2.1.1 Concepto de funcionamiento de la válvula hidráulica de diafragma

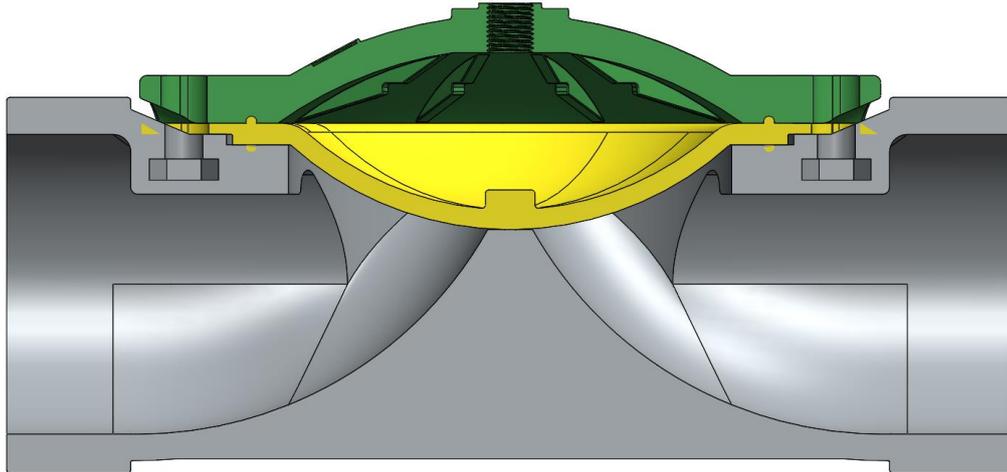
Es necesario explicar el modo de operación de este tipo de válvulas hidráulicas. Para ello, se utilizará el siguiente esquema donde se muestran las tomas y conexiones de la válvula hidráulica.



*Ilustración 5: Esquema conexiones válvula hidráulica*

Para comenzar, es necesario diferenciar entre el tipo de conexiones. Las conexiones de color azul corresponden a la entrada y salida del fluido hidráulico que se quiere transportar, mientras que las conexiones de color rojo, son conexiones de operación y se utilizan para manipular la válvula.

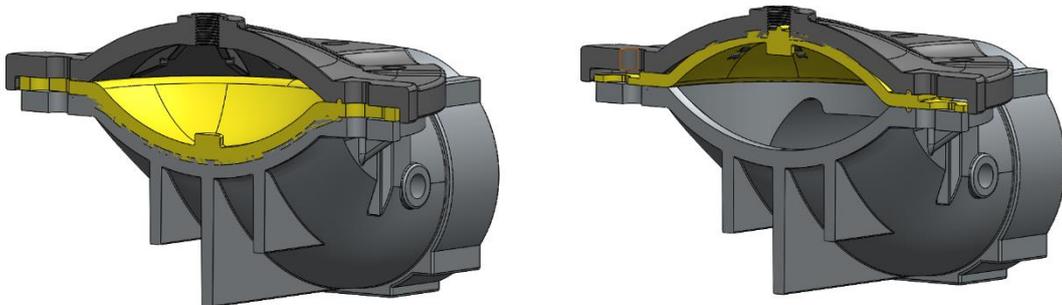
La manera de abrir y cerrar la válvula es unir la conexión nº1 con la conexión nº3, de manera que la presión existente aguas arriba de la válvula se transfiere a la cámara superior de la válvula. La cámara superior es el espacio comprendido entre el diafragma (coloreado de amarillo en la siguiente ilustración), y la tapa (coloreada de verde en la siguiente ilustración).



*Ilustración 6: Detalle en corte de cámara superior en posición de montaje del conjunto*

Cuando comunicamos, habitualmente con un racor de goma, la entrada de la válvula con la cámara superior, esta última se empieza a llenar de fluido y a adquirir la presión existente aguas arriba de la válvula. Esto provoca que la membrana, que es de un material hiperelástico, empiece a hincharse, deformándose hasta ejercer contacto con el cuerpo de la válvula. De esta manera, la fuerza que ejerce la membrana contra el cuerpo, no permite el paso de flujo a través de la válvula.

De la misma manera, para abrir la válvula, se cierra la conexión de la entrada de la válvula con la cámara superior, para comunicar esta última con la atmósfera, de modo que la presión existente aguas arriba de la válvula deforma la membrana (Imagen de abajo a la derecha) y el flujo atraviesa la válvula.



*Ilustración 7: Membrana en posición de "Válvula cerrada" (Izquierda) y "Válvula cerrada" (Derecha)*

Así que este tipo de válvulas, permite abrir y cerrar el flujo de agua actuando en la cámara superior. Por lo que el piloto regulador objeto de este proyecto, actuará sobre esta cámara para conseguir el funcionamiento deseado.

## 2.2 Presentación y componentes del piloto regulador

En esta apartado, se muestran el producto y los componentes que forman el piloto regulador, explicando la naturaleza de cada uno de ellos. Para comprender mejor su funcionamiento, es conveniente separar los componentes involucrados en la **lectura de presión** y los involucrados en la **comunicación de las tomas del piloto regulador**. Por lo tanto la toma número 1, en ningún momento se comunicará con las tomas 2, 3, y 4.

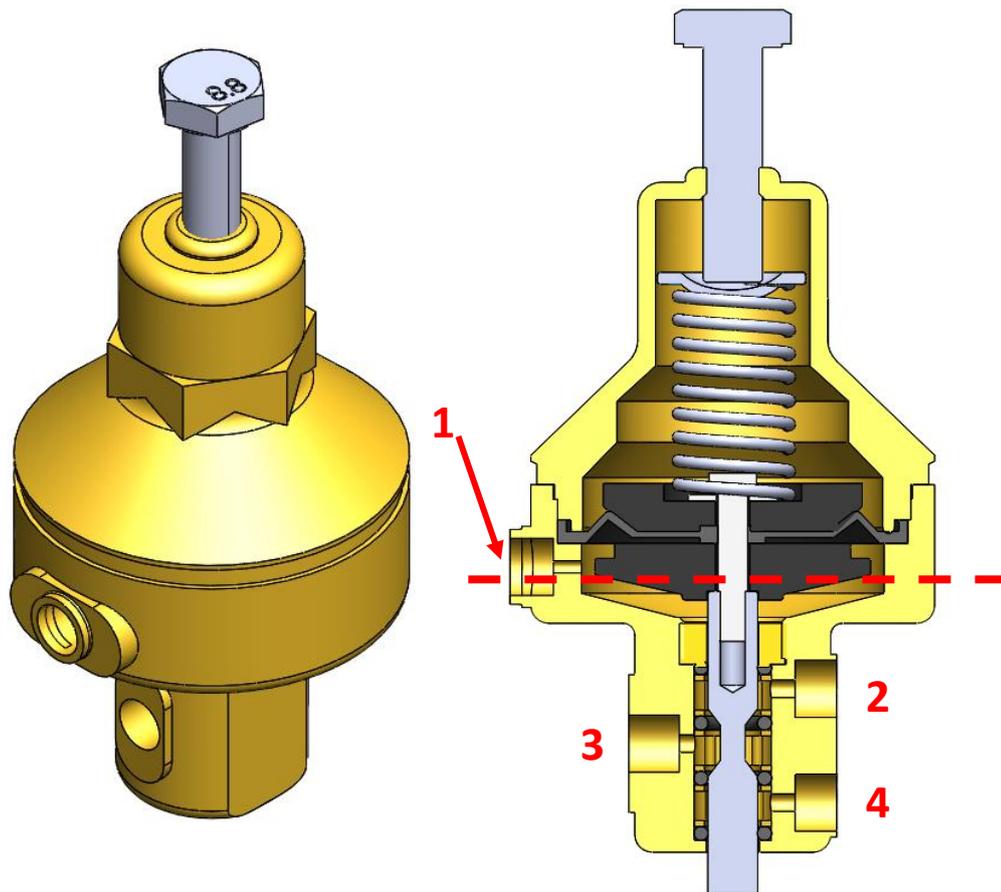
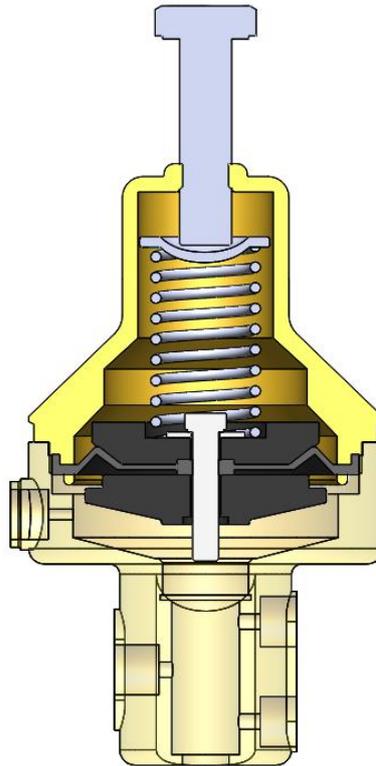


Ilustración 8: Vista de componentes en corte

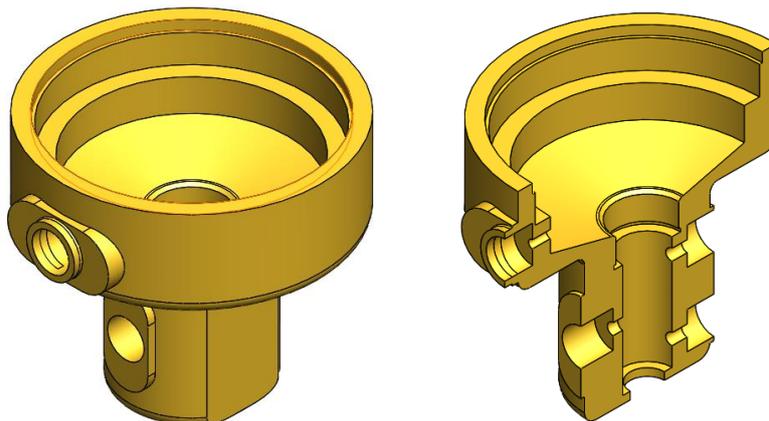
## 2.2.1 Componentes involucrados en la lectura de presión



*Ilustración 9: Vista en corte de los componentes involucrados en la lectura de presión*

### 2.2.1.1 Cuerpo del piloto

La estructura del piloto regulador está fabricada en latón. Éste es un material que permite aproximar la geometría mediante fundición para luego mecanizar las zonas con un acabado más exigente.



*Ilustración 10: Cuerpo del piloto regulador*

### 2.2.1.2 Tapa del piloto

El material de la tapa del piloto regulador está fabricada en el mismo material que el cuerpo.

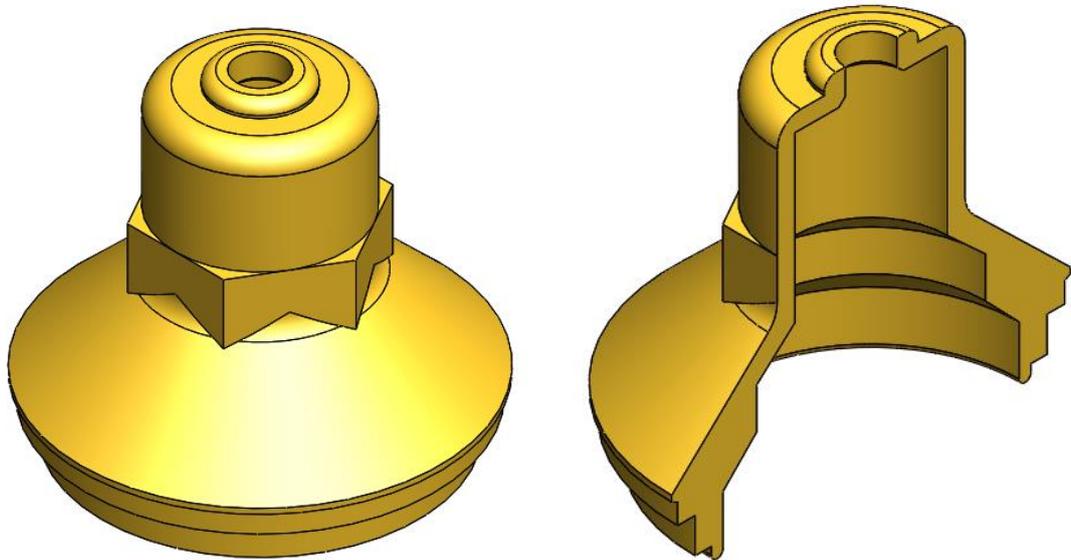


Ilustración 11: Tapa del piloto regulador

### 2.2.1.3 Tornillo regulador, apoyo y muelle.

Tornillo comercial de M10 encargado de regular la fuerza que ejerce el muelle sobre el conjunto. El apoyo del tornillo es la pieza que tiene como fin ajustar la fuerza de compresión del muelle al tornillo. El muelle, es el encargado de generar la fuerza, que directamente servirá para ajustar la presión objetivo establecida a la que regula el piloto.

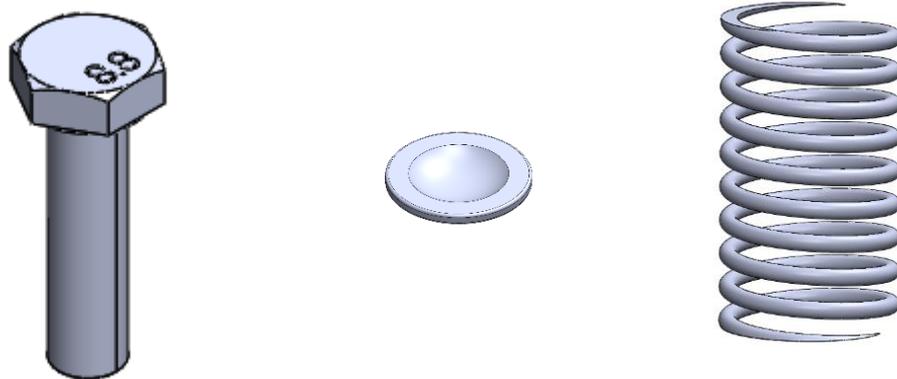
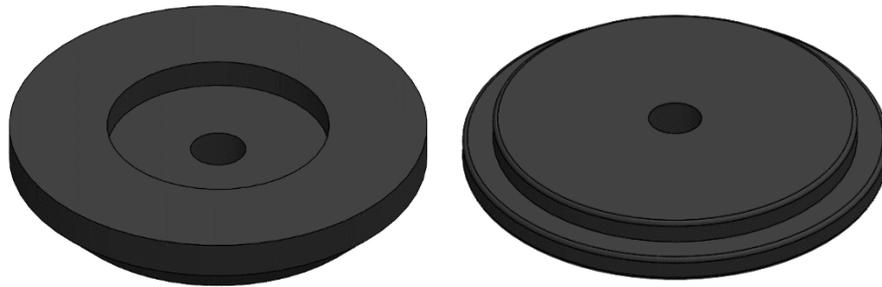


Ilustración 12: Tornillo, soporte tornillo y muelle

### 2.2.1.4 Soportes de la membrana del piloto

Se trata de piezas fabricadas en plástico (POM), y que entre ellos albergan la membrana de caucho que se muestra a continuación. Además, son los limitadores de carrera inferior y superior del conjunto, impidiendo que este se deforme más allá de lo deseado.



*Ilustración 13: Soportes superior e inferior*

#### **2.2.1.5 Membrana del piloto regulador**

Es un componente muy importante, pues es el encargado de, por un lado, aislar el piloto del exterior manera que la región superior sea estanca, y por otro lado es el componente donde actúa la presión de la toma que se quiere medir; haciendo que el conjunto suba o baje dependiendo de ésta y de la fuerza que ejerce el muelle.

Está fabricada en caucho vulcanizado sin refuerzo de fibras, pues en este caso, los soportes mostrados en el apartado anterior, impiden que la membrana se deforme más allá de los límites que se imponen geoméricamente.



*Ilustración 14: Membrana del piloto regulador*

## 2.2.2 Componentes involucrados en la comunicación de las conexiones del piloto regulador

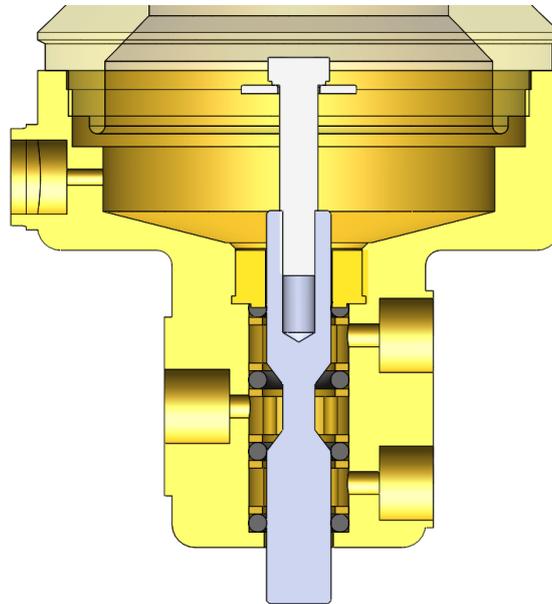


Ilustración 15: Vista en corte de los componentes involucrados en la comunicación de las cámaras

### 2.2.2.1 Eje y tornillo de unión

El eje del piloto regulador es la parte móvil que permite comunicar las tomas 2, 3 y 4 del piloto regulador a través del rebaje que tiene en el medio de su longitud. El eje es arrastrado por la membrana del conjunto superior solidariamente a través de un tornillo de M5 enroscado en el propio eje. El eje, está fabricado en acero inoxidable y es un componente clave para el buen funcionamiento del conjunto. El acabado de su superficie exterior debe ser de buena calidad, para que no haya imperfecciones que afecten al funcionamiento.

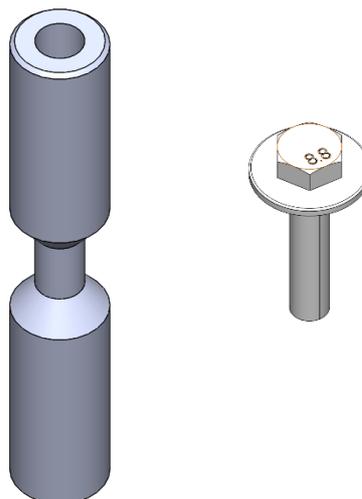
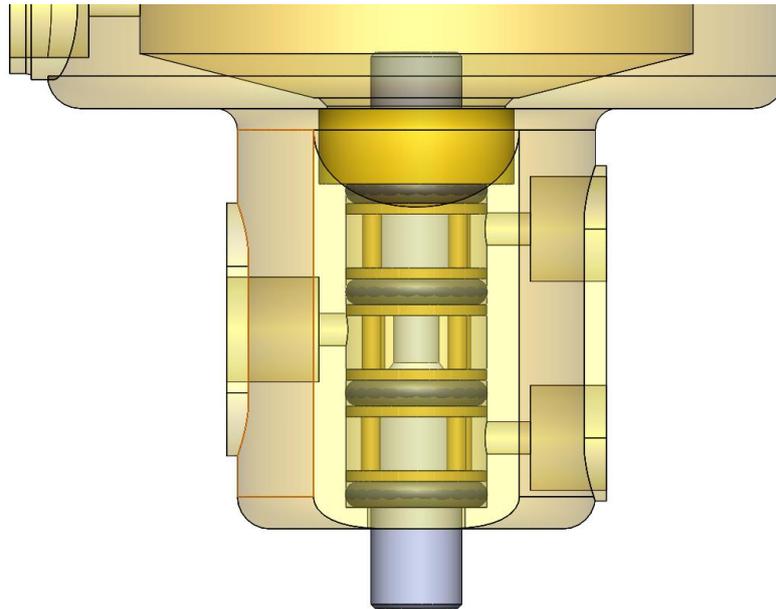


Ilustración 16: Eje original y tornillo de sujeción

### 2.2.2.2 Conjunto de jaulas y juntas tóricas

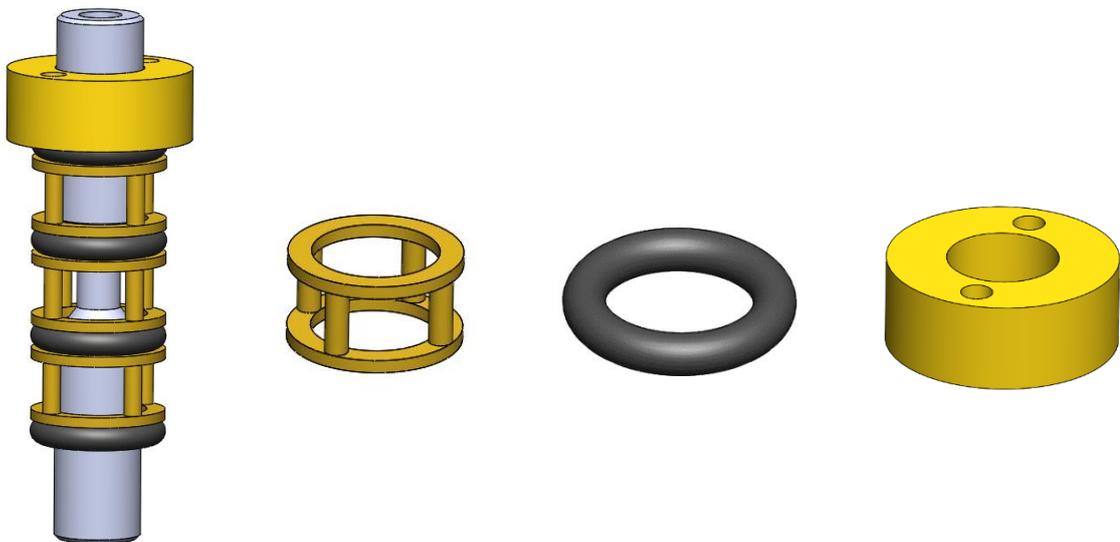
El conjunto de jaulas y juntas tóricas es el responsable de mantener aislada e independiente cada una de las tomas del piloto regulador. El mecanismo consiste en 4 juntas tóricas que

ajustan tanto con el cuerpo del piloto como con el eje central, de modo que únicamente sea posible comunicar una toma con otra cuando el eje se desplace de su posición de equilibrio.



*Ilustración 17: Detalle de las jaulas y juntas tóricas*

A continuación, se muestran los componentes que forman este conjunto:



*Ilustración 18: Detalle de componentes del conjunto*

- Jaula: Tiene como función crear una cavidad entre las paredes del cuerpo del piloto regulador y el eje central. Además, sirve de apoyo para las juntas tóricas definiendo su posición en el conjunto. Está fabricada en latón.
- Junta tórica: Encargada de realizar el ajuste entre cuerpo del piloto y eje. Fabricada en NBR (Goma de nitrilo butadieno). Es un componente comercial de tamaño 8,3x2,4mm.
- Prisionero: El cometido de este componente es comprimir el conjunto de juntas tóricas roscándose en la cavidad del cuerpo del piloto. De esta manera, éstas se expanden y realizan el ajuste entre cuerpo y eje del piloto. Es un **componente clave** que determina la distancia que se comprimen las tóricas, que influye directamente en el ajuste y rozamiento del conjunto.

### 2.3 Mecanismo de operación del piloto regulador

Para comprender el mecanismo de funcionamiento del piloto regulador, es necesario diferenciar las dos zonas que se han explicado anteriormente.

Por un lado, tenemos la **zona de lectura de presión** y por otro lado tenemos la **zona de comunicación** de las conexiones del piloto. Es también muy importante recordar, que los mecanismos de ambas zonas, están unidos solidariamente, por lo que el movimiento del conjunto de la zona de lectura se transmite directamente al conjunto de la zona de comunicación de las conexiones.

#### 2.3.1 Mecanismo de operación de la zona de lectura de presión

Esta zona del piloto regulador, únicamente consta de una conexión. El funcionamiento de esta parte del piloto, consiste en el enfrentamiento de dos fuerzas en la misma dirección y sentidos opuestos. Por un lado, tenemos la **fuerza que hace el muelle** hacia abajo y, por otro lado, tenemos la **fuerza hacia que hace la presión** bajo la membrana hacia arriba. Ambas fuerzas son variables en módulo, pero la manera en como varían es diferente:

- La fuerza que hace el muelle es variable en función de la distancia que esté comprimido el muelle. Esta compresión se realiza apretando o soltando el tornillo superior que comprime el muelle, así que de esta manera podemos regular la fuerza que el muelle realiza sobre el conjunto.

Así que la fuerza del conjunto hacia abajo varía según:

$$F_{muelle} = K \cdot x$$

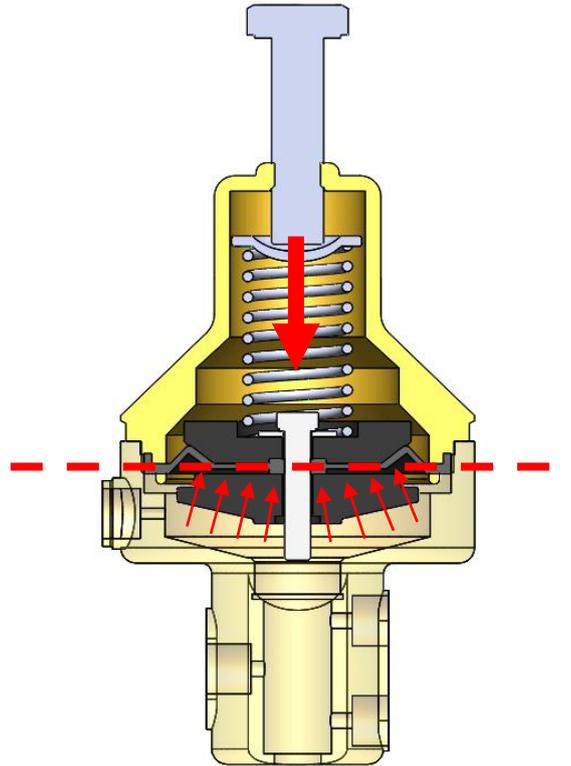
Siendo:

- F la fuerza del muelle
  - K la constante del muelle
  - X la longitud que se comprime el muelle en valor absoluto
- La fuerza que realiza la membrana, en cambio, varía con la presión existente bajo ella. Así que cuando aumente la presión, la membrana empujará el conjunto hacia arriba con una fuerza F dependiente de:

$$F_{membrana} = P \cdot S$$

Siendo:

- F la fuerza de la membrana
- P la presión existente bajo la membrana
- S la superficie de la membrana (Inicialmente plana)



*Ilustración 19: Esquema del equilibrio de fuerzas*

De modo que, esta conexión, se conectará a la zona del flujo sobre la que queramos actuar y se comparará con la fuerza del muelle (definida por el usuario) para establecer el equilibrio en el conjunto.

### 2.3.2 Mecanismo de operación de la zona del conjunto de conexiones

En esta zona del conjunto es donde se realiza el intercambio en las comunicaciones de las conexiones del piloto regulador. Para la explicación identificaremos las conexiones numéricamente. Siguiendo el orden establecido en apartados anteriores tenemos las conexiones 2, 3 y 4.

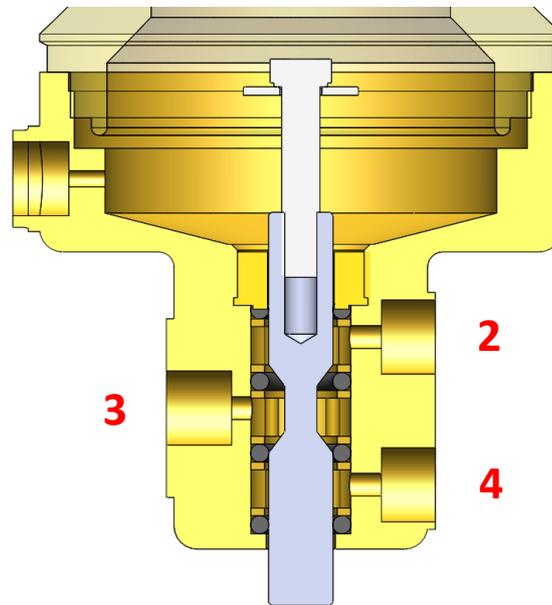


Ilustración 20: Numeración de las conexiones

En esta zona, el piloto regulador tiene 3 posiciones:

- Posición de equilibrio: Todas las conexiones son independientes (Idealmente, pues veremos que realmente en el diseño inicial no es así). De modo que ninguna conexión se puede comunicar con ninguna de las demás.
- Conexiones 3 y 2 comunicadas: Sucede cuando el eje sube hacia arriba y el fluido transcurre internamente a través del rebaje del eje de una conexión a otra.

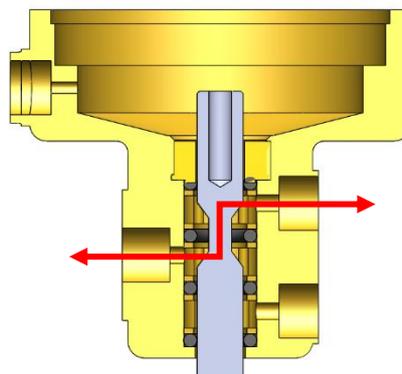
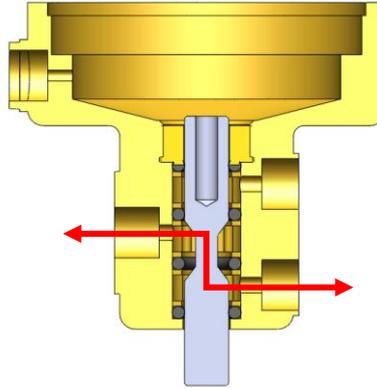


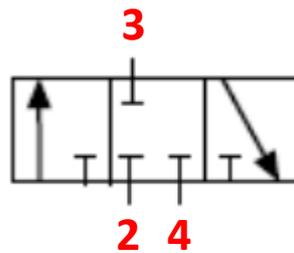
Ilustración 21: Esquema de la dirección del flujo 1

- Conexiones 3 y 4 comunicadas: De la misma manera, cuando el eje baja el fluido transcurre entre las conexiones 3 y 4.



*Ilustración 22: Esquema de la dirección del flujo 2*

Por lo tanto, esta zona del piloto regulador es realmente como una válvula con 3 posiciones y 3 conexiones en la que la posición central, cierra todas las tomas, mientras que la posición izquierda y derecha comunican la conexión 3 con 2 y 4. Además, para completar el razonamiento, en este caso la manipulación de la válvula 3/3 se realizaría mediante un medidor de presión con muelle.



*Ilustración 23: Símil válvula 3-3*

### 2.3.3 Ejemplo de aplicación real: Válvula hidráulica reguladora de presión

Para terminar de comprender el mecanismo de operación del piloto regulador, se va a presentar un caso de aplicación real. A continuación, se muestra el montaje correspondiente:

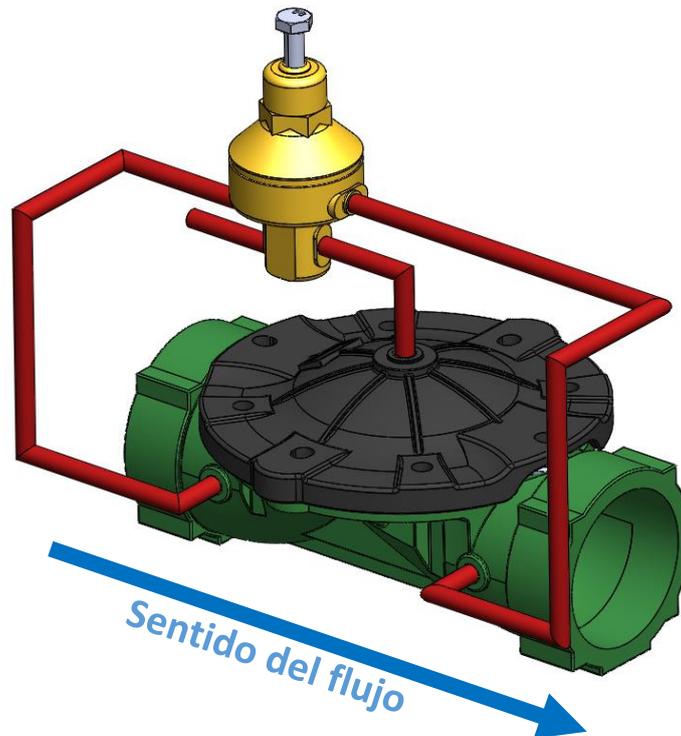


Ilustración 24: Esquema válvula reguladora de presión

Este montaje es el correspondiente a una válvula reguladora de presión. Esta válvula tiene como objetivo regular la presión a la salida de la válvula, de modo que permanezca constante ante las variaciones que pueda haber en la línea. En definitiva, esta válvula asegura una presión de salida constante y definida mediante la regulación del tornillo del piloto regulador.

Partamos del momento en el que el piloto regulador se encuentra en equilibrio y regulando la presión de salida a un valor determinado; para plantear una variación de presión en la línea y ver cómo actúa el piloto. Estas variaciones en la presión pueden venir ocasionadas por múltiples circunstancias: Aperturas y cierres de otros sectores, arranques o paradas de equipos de bombeo...

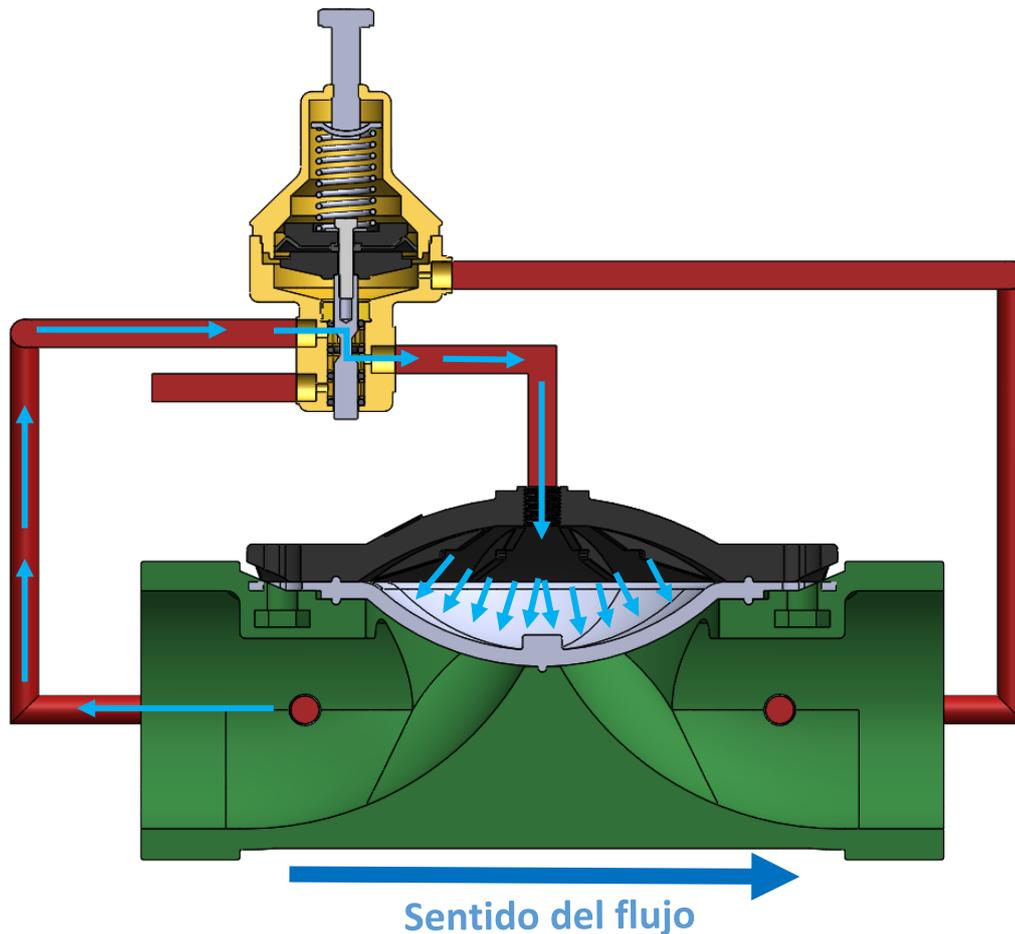
#### 2.3.3.1 Caso 1: Aumento de la presión a la salida de la válvula

Si por cualquier circunstancia aumentara la presión a la salida de la válvula, la presión existente en este punto se transmite a través de la conexión a la membrana del piloto. Este aumento de presión provoca que cambie el equilibrio de fuerzas existente entre membrana y muelle, haciendo que el muelle se comprima y creando un nuevo equilibrio de fuerzas (de mayor magnitud que las anteriores) en una nueva posición.

Por lo tanto, este movimiento generado por el aumento de presión desplaza el conjunto hacia arriba arrastrando detrás de él, el eje del piloto regulador.

Si el eje del piloto regulador se desplaza hacia arriba, como se ha explicado en el apartado anterior, se comunican las conexiones 2 y 3.

En este momento, el fluido del sistema transcurre de la manera que se muestra en el siguiente esquema.



*Ilustración 25: Mecanismo de actuación 1*

Como ha aumentado la presión de la línea, la presión existente aguas arriba de la válvula es mayor que la existente en la cámara superior de la válvula. De esta manera, el flujo transcurre hacia esta última y va aumentando la presión a la vez que se expande debido a esta. Es decir, la válvula se está cerrando.

Debido a que la válvula se está cerrando, se genera una mayor pérdida de carga de modo que la presión aguas abajo de la válvula disminuye. Al disminuir aquí la presión, que es donde está el "lector" de presión del piloto regulador, la presión que hay bajo la membrana del piloto regulador también disminuye, disminuyendo la fuerza en sentido ascendente.

La fuerza que ejerce la membrana disminuirá hasta el momento en que la presión bajo ella corresponda con el punto de ajuste realizado en el piloto regulador. Momento en el que se volverá al equilibrio de fuerzas inicial preestablecido.

Al mismo tiempo, el eje del piloto, arrastrado por el conjunto, volverá a su posición de equilibrio quedando la cámara de la válvula totalmente aislada.

En definitiva, tras una variación de presión en la línea, volvemos a tener la presión de consigna aguas abajo de la válvula reguladora.

### 2.3.3.2 Caso 2: Caída de la presión a la salida de la válvula

En una situación correspondiente a una caída de presión en la línea, el piloto regulador actúa de manera análoga a la situación del caso 1.

Cuando por cualquier circunstancia la presión de la línea baja, la toma de lectura del piloto regulador transmite la presión bajo la membrana del piloto regulador, de modo que el equilibrio de fuerzas entre el muelle y membrana del piloto se rompe.

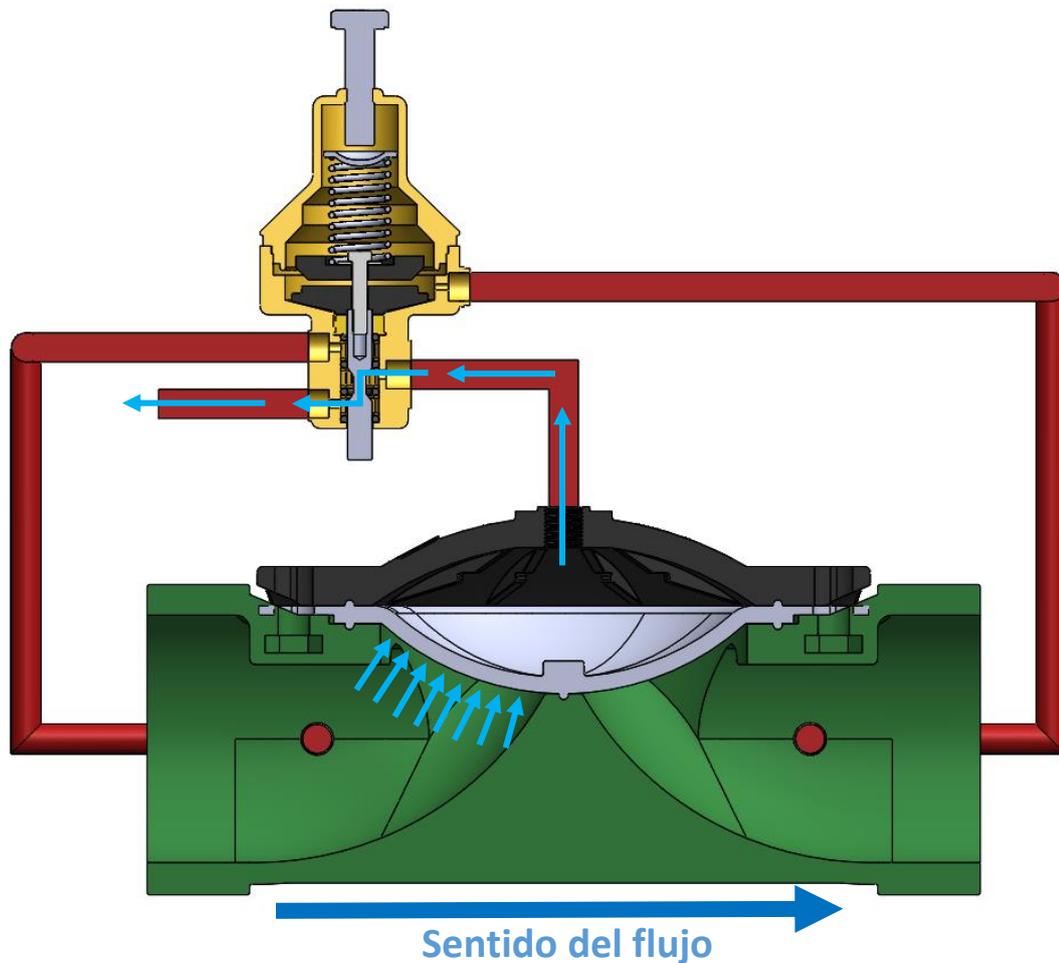


Ilustración 26: Mecanismo de actuación 2

Como la presión baja, la fuerza que hace la membrana también lo hace de modo que la fuerza que realiza el muelle vence la fuerza de la membrana y todo el conjunto se desplaza hacia abajo.

El eje del piloto regulador es arrastrado por el conjunto de modo que se comunican las tomas 2 y 3 del piloto. La toma 3 está comunicada con la atmósfera, así que como la presión en la cámara superior de la válvula es mayor que la presión atmosférica, el fluido sale de la cámara mientras esta disminuye su presión interior.

Al disminuir la presión interior, la membrana se despegará del cuerpo de la válvula, es decir, la membrana se está abriendo; lo que significa que las pérdidas ocasionadas por la válvula disminuyen.

Al disminuir las pérdidas, la presión aguas abajo de la válvula aumenta, lo que provoca que la presión bajo la membrana del piloto regulador aumente. De modo que la presión bajo la membrana también aumenta y por lo tanto aumenta la fuerza que ejerce hacia arriba. Como en este momento, la fuerza que origina la membrana es mayor que la que hace el muelle, se desplaza el conjunto hacia arriba.

El conjunto se desplazará hacia arriba hasta el momento que se iguale la fuerza que hace la membrana hacia arriba y la fuerza que hace el muelle hacia abajo, la cual aumenta según se desplaza el conjunto hacia arriba (Según se comprime el muelle).

En este punto, se crea un nuevo equilibrio de fuerzas y el eje se sitúa en su posición inicial de equilibrio y la cámara de la válvula quedará aislada.

En definitiva, tras una variación de presión en la línea, volvemos a tener la presión de consigna aguas abajo de la válvula reguladora.

### *2.3.3.3 Caso 3: Caída de la presión por debajo de la presión de consigna*

En el caso de que la presión de la línea caiga por debajo de la presión de consigna del piloto regulador, el conjunto bajará solidariamente abriéndose la válvula como se ha explicado en el apartado anterior (Caso 2).

La válvula empezará a abrir, subiendo la presión aguas abajo hasta el momento en que la fuerza de esta presión bajo la membrana del piloto sea lo suficientemente alta como para igualar la fuerza del muelle en la posición inicial.

Como la presión nunca será capaz de igualar esta fuerza ya que la presión aguas arriba es menor que la presión de consigna, el piloto regulador permanecerá desplazado hacia abajo comunicando permanentemente la cámara superior de la válvula con la atmósfera, es decir, la válvula estará completamente abierta.

El piloto permanecerá en esta posición hasta el momento en que la presión de línea aumente por encima de la presión de consigna, comenzando los procesos de regulación que sean explicados en los casos 1 y 2 de este apartado.

### 3. Análisis de funcionamiento y problemas detectados

Como se ha explicado en la introducción del proyecto, el diseño actual del piloto regulador no reúne las condiciones para trabajar adecuadamente según los requisitos del sector. En este apartado se aborda la problemática inherente al piloto y se detallan los estudios, mediciones, ensayos y demás pruebas que se han realizado para determinar las características desfavorables del producto.

#### 3.1 Prueba en banco de ensayos

En primera instancia, se realiza un montaje de una válvula reguladora de presión de 3" en un banco de ensayos. Con esto se pretende analizar el funcionamiento del piloto viendo las carencias que pueda tener frente a las exigencias de la línea.

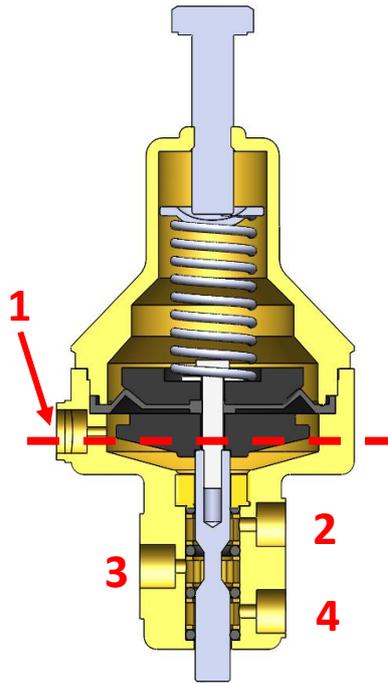
Se regula el piloto a una presión consigna de 2 bar, una presión de trabajo muy habitual en la práctica real. Tras regularlo se varía la presión de la línea mediante una válvula de mariposa aguas abajo de la válvula obligando al actuar al piloto regulador.

Realizando estas variaciones de presión, se observa que la actuación del piloto regulador, efectivamente, no es como se esperaría. Frente a una variación de presión pequeña (En torno a 0.6 bar) el piloto regulador no desplaza el conjunto, es decir, se mantiene en la posición inicial. Es a partir de esta presión, cuando sí que se observa que el piloto realiza la regulación. Por lo tanto, podemos determinar que el piloto tiene un **margen de actuación** bastante grande (demasiado para su correcto funcionamiento).

Además, se observa que una vez se comienza a mover el conjunto (Se puede apreciar en el movimiento del eje, visible al exterior), el movimiento de éste es bastante lento, por lo que también se puede determinar que una vez que el piloto comienza el proceso de regulación, esta **no realiza una regulación rápida** frente a las variaciones de presión. Este punto es crítico, pues una aplicación del piloto muy común en el sector, es utilizarlo como válvula de alivio rápido. El objetivo de esta configuración de válvula es proteger la instalación frente a subidas de presión. Si esta subida de presión es muy rápida, el piloto regulador no será capaz de actuar con la rapidez que se exige, poniendo en compromiso la integridad de la instalación.

#### 3.2 Prueba en bomba manual de alta presión

Además de las pruebas realizadas en banco, se estudia el comportamiento del piloto conectando sus tomas a una bomba manual de alta presión. Con este tipo de prueba, se pretende determinar las condiciones de movimiento del piloto y la estanqueidad de sus conexiones.



*Ilustración 27: Zonas del piloto regulador*

Se pretende determinar la estanqueidad de las conexiones. Se conectan por separado las tomas 2, 3 y 4 a la bomba manual y se sube la presión hasta alcanzar la presión nominal de trabajo (16 bar).

En las conexiones 2 y 4 (por separado), se cumple el objetivo. La conexión permanece estanca a esta presión (Y superiores), por lo que, el montaje sería adecuado frente a este requisito.

En cambio, cuando se realiza esta misma prueba en la conexión 3, no se consigue aumentar la presión. Se observa que, teniendo el piloto regulador en su posición de equilibrio, la conexión 3 no es estanca. Se vierte fluido a alguna de las otras dos tomas siendo imposible aislar la toma nº3. Por lo tanto, se determina que **la toma nº 3 no es estanca**.

### 3.3 Conclusiones de las pruebas realizadas

Tras realizar las pruebas explicadas, se obtienen una serie de conclusiones en cuanto a la problemática del conjunto:

- 1) Margen de actuación demasiado grande. El piloto regulador necesita una diferencia grande entre la presión de consigna y la presión de la línea para comenzar la regulación
- 2) Regulación lenta: Cuando el piloto comienza la regulación, no varía la presión de la línea rápidamente.
- 3) Toma nº3 no estanca. No se consigue aumentar la presión alimentando esta conexión con la bomba manual.

## 4. Análisis de los problemas y características claves para el funcionamiento

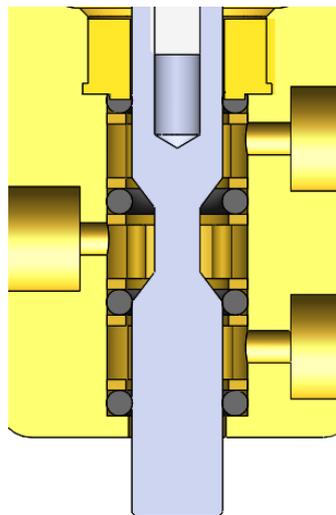
Analizando los problemas detectados, se procede a determinar el motivo de estas deficiencias en el funcionamiento.

### 4.1 Análisis del margen de actuación

Observando el comportamiento del piloto regulador en el banco de ensayos, se observa que el eje del piloto no se desplaza hasta que el margen entre la presión de consigna y la presión de la línea supera un valor de 0,6 – 0,7 bar, lo que se considera inadmisibles.

Analizando este hecho, se observa visualmente que el eje del piloto realiza una pequeña aceleración en su movimiento, para después desplazarse lentamente. Este hecho me sugiere que el conjunto se encuentra con algún tipo de escalón o freno que impide que el movimiento del conjunto sea inmediato.

Analizando la geometría del conjunto, se observa que el problema puede residir en el rebaje existente en el eje del piloto. En el siguiente ensamblaje, se observan los componentes a tamaño real.

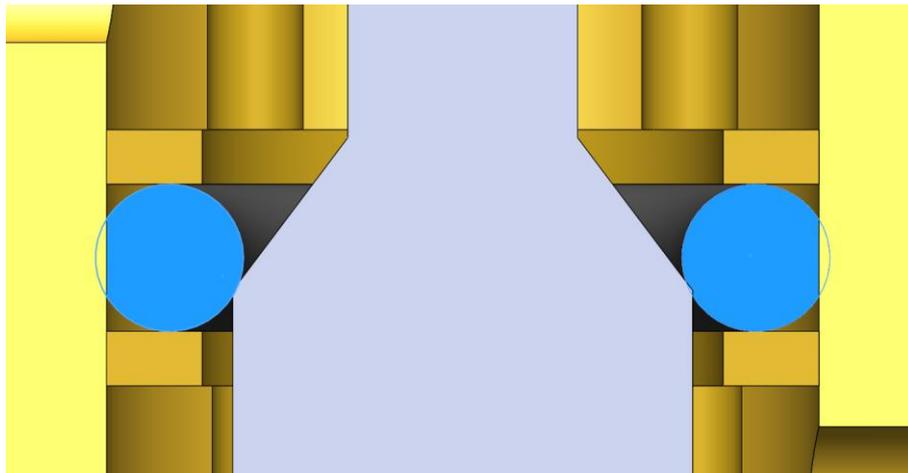


*Ilustración 28: Detalle análisis margen de actuación*

Si nos fijamos en las juntas tóricas se ve que, en el montaje real, sufrirán una compresión ocasionada por el prisionero que comprime todo el conjunto tóricas-jaulas. Cuando el prisionero comprime el conjunto, las tóricas se deformarán en dirección radial, realizando un mayor ajuste sobre el eje y sobre el cuerpo del piloto.

Pero en el momento en que el eje se desplaza de su posición central y el rebaje del mismo se encuentre en el mismo plano que el de la junta tórica, ésta no encuentra oposición para deformarse en dirección radial y aumenta su espesor en esta dirección.

Por lo tanto, en el momento en el que el eje vuelva a su posición central, se ocasionará un tope entre la superficie cónica del eje y la junta tórica expandida.



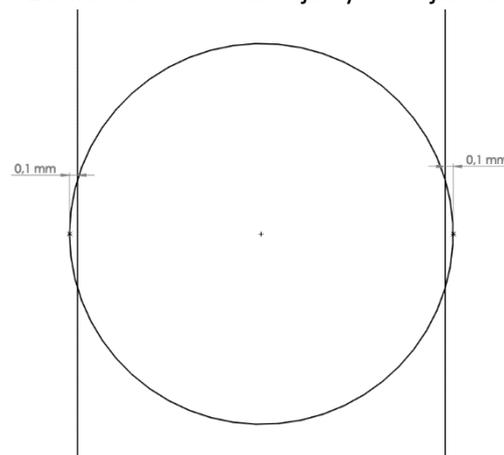
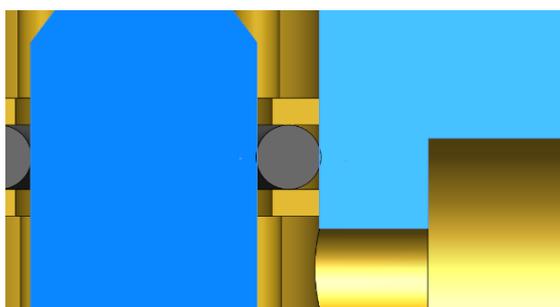
*Ilustración 29: Detalle interferencia en el movimiento por escalón*

Esta situación, en mi opinión, sugiere que la existencia de un amplio margen de actuación se debe a la fuerza extra que debe hacer el conjunto para vencer este escalón o tope. **Por lo que la existencia de un escalón que entorpece el desplazamiento del eje, será una deficiencia de diseño que se abordará en el apartado siguiente.**

#### 4.2 Regulación lenta

Analizando, como en el apartado anterior, el funcionamiento del piloto regulador en el banco de ensayos sometiéndolo a variaciones de presión en la línea, se observa que el movimiento del eje del piloto no es rápido y por lo tanto la regulación de la presión no se realiza ágilmente. Como ya se ha explicado, se trata de un punto clave del funcionamiento.

Analizando el ensamblaje, se observa que las juntas tóricas utilizadas, interfieren en 0.1mm en cuerpo y eje del piloto regulador, es decir, el diámetro exterior de la junta es 0.1mm más grande que el de la cavidad del piloto; y el diámetro interior de la junta es 0.1mm más pequeño que el diámetro exterior del eje. Que el montaje sea así, provoca que exista una pretensión en la junta que aumentará el rozamiento entre el eje y las juntas.



*Ilustración 30: Detalle interferencia por diámetros*

Esta situación se da previamente a enroskar el prisionero que comprime todo el conjunto de juntas y jaulas, por lo que cuando se enrosque, la presión entre el cuerpo-junta-eje, aumentará notablemente.

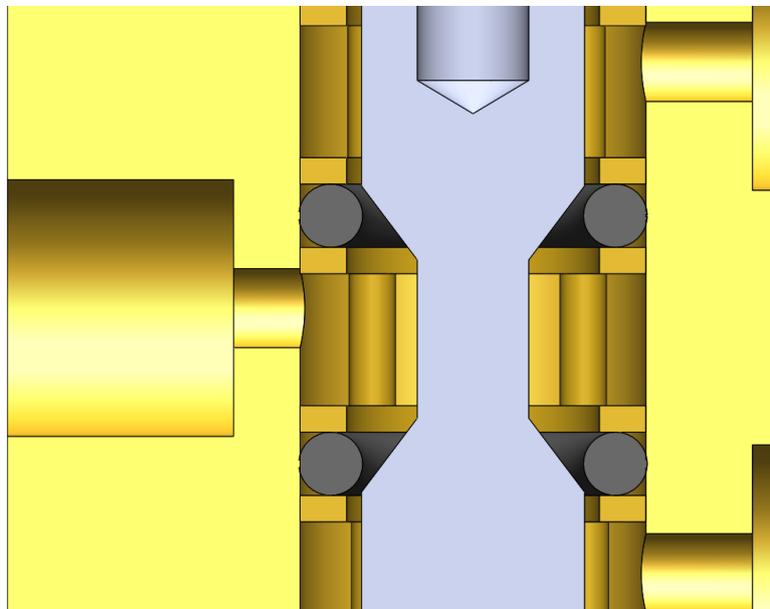
Esto me hace pensar que el rozamiento generado entre las caras en el desplazamiento del eje es demasiado grande, por lo que se genera una gran oposición al movimiento del conjunto.

Por lo tanto, en el siguiente apartado se tratará el **problema de la oposición al movimiento provocado por el excesivo rozamiento en el eje del piloto.**

#### 4.3 Toma nº3 no estanca

De los ensayos con la bomba manual es posible determinar, como ya se ha explicado, que no existe un punto en el recorrido del eje del piloto regulador en el cual la toma nº3 permanezca aislada de las demás.

Analizando el ensamblaje, que está hecho a tamaño real, se puede apreciar que la distancia que separa las juntas tóricas es ligeramente menor que las distancias que separan los comienzos del rebaje del eje del piloto.



*Ilustración 31: Detalle estanqueidad conexión nº 2*

**Se asume entonces que el diseño del rebaje no es adecuado y será una deficiencia de diseño que se abordará en el siguiente apartado.**

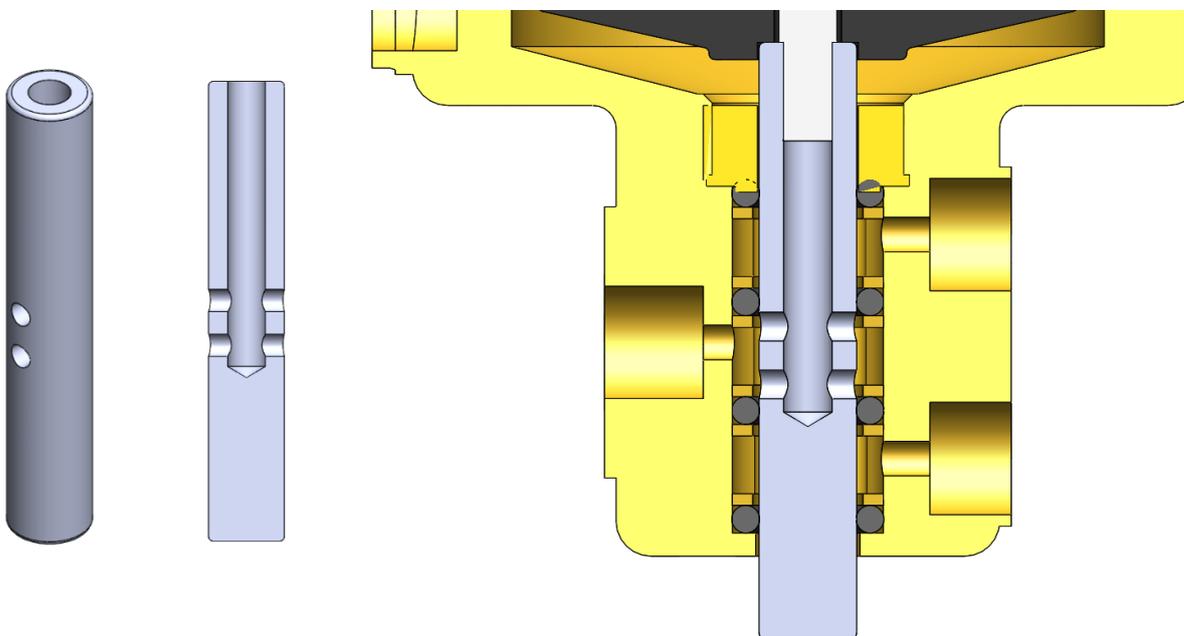
## 5. Propuesta de mejora de diseño

Tras analizar el conjunto, se han determinado unos puntos clave para el funcionamiento que trataremos de solucionar en este apartado. Los puntos clave que se han detectado son:

- 1) Existencia de un escalón que entorpece el desplazamiento del eje
- 2) Oposición al movimiento provocado por el excesivo rozamiento en el eje del piloto.
- 3) Longitud del rebaje demasiado grande.

Puesto que todos estos puntos de mejora son inherentes al eje del piloto, resulta lógico actuar sobre él. De modo que, en primera instancia, será el componente que rediseñaremos.

Para solucionar el problema del escalón que entorpece el desplazamiento del eje, resulta lógico pensar en diseñar un eje de diámetro constante, de modo que no haya ninguna interferencia de este tipo a lo largo de su recorrido. De esta manera, el problema quedaría solucionado, pero no seríamos capaces de hacer pasar el fluido de una conexión a otra.



*Ilustración 32: Propuesta de diseño y ensamblaje*

Para atacar esta necesidad, se plantea realizar dos agujeros pasantes a lo largo del diámetro del eje, separados una distancia determinada y situados en una posición concreta.

La posición de estos agujeros es importante. Deben estar situados de modo que estén en el centro del recorrido del conjunto (Limitado por los soportes de la membrana). Además, la separación que exista entre ellos determinará el recorrido necesario para comunicar una conexión con otra.

Por lo tanto, interesa que la distancia entre los agujeros sea la mayor posible siempre que no sobrepase la distancia de separación de las juntas tóricas. Esta distancia, se puede determinar por geometría, así que con este nuevo diseño damos solución al problema de la falta de aislamiento de la conexión.

Con estas modificaciones, solventamos las deficiencias nº 1 y nº 3, pero queda pendiente solucionar el excesivo rozamiento existente en el eje debido al apriete con las juntas tóricas.

## 6. Análisis por elementos finitos para determinar el ajuste entre el conjunto: eje – junta tórica – cuerpo

El rozamiento del conjunto es un factor con muchísima influencia sobre el funcionamiento. Si existe un gran rozamiento, el eje no se moverá con la facilidad que se requiere para el buen funcionamiento, y si, por el contrario, el rozamiento es demasiado bajo, el conjunto no estará aislado cuando aumente la presión. Para determinar el ajuste del conjunto, se ha realizado un estudio utilizando el método de los elementos finitos mediante el software de simulación ABAQUS.

El objetivo de este estudio es **determinar el ajuste mínimo necesario** entre el eje – junta – cuerpo del piloto, para realizar un diseño apto para validar en PN16, es decir, que no haya fugas de una cámara a otra trabajando a una presión constante de 16bar, pudiendo muy puntualmente producirse una sobrepresión a 24bar. La manera de calcular la presión máxima de trabajo es sumar la mitad de la presión nominal de trabajo a sí misma, es decir:  $16 + 16/2 = 24\text{bar}$ . Por lo tanto, el estudio se enfoca **en validar el conjunto hasta una presión máxima de trabajo de 24bar**.

Puesto que el componente responsable de proporcionar estanqueidad al conjunto es la junta tórica, se considera crucial para la simulación del modelo conocer el comportamiento preciso de esta pieza. Para ello, se va a realizar un estudio en elementos finitos para evaluar diferentes modelos de comportamiento hiperelásticos con el objetivo de determinar las propiedades de la goma. Dicho estudio, se detalla en la siguiente sección.

### 6.1 Determinación de las propiedades del material de la junta tórica

Como se ha dicho en el apartado anterior, se ha utilizado un modelo hiperelástico para definir las propiedades de la junta tórica. Los modelos hiperelásticos describen el comportamiento de materiales casi incompresibles, que presentan una respuesta elástica instantánea hasta altas deformaciones.

Los materiales hiperelásticos están definidos en términos de Energía de deformación. Se define una energía de deformación almacenada en el material por unidad de volumen como función de la deformación en ese punto en el material. En nuestro modelo, se asume que el material es isotrópico e isotermo.

El objetivo de este apartado es proporcionar información sobre cuál es la función de energía de deformación que describe de forma más precisa el comportamiento hiperelástico de la muestra ensayada.

A continuación, previo a la descripción de los siguientes apartados, se muestra un esquema de la metodología seguida para la caracterización del modelo de comportamiento hiperelástico.



#### 6.1.1 Muestra para el ensayo

Como no ha sido posible obtener una probeta normalizada del mismo material que el de la junta tórica, se ha realizado el ensayo sobre la misma junta tórica.

Se planteó la posibilidad de preparar una probeta a base de secciones circulares apiladas, pero el tamaño reducido de la sección de la junta (Diámetro 2,4mm) no permitió realizar una probeta adecuada. Por lo tanto, se ha realizado un ensayo de compresión uniaxial de la junta en la posición seccionada que se muestra a continuación:

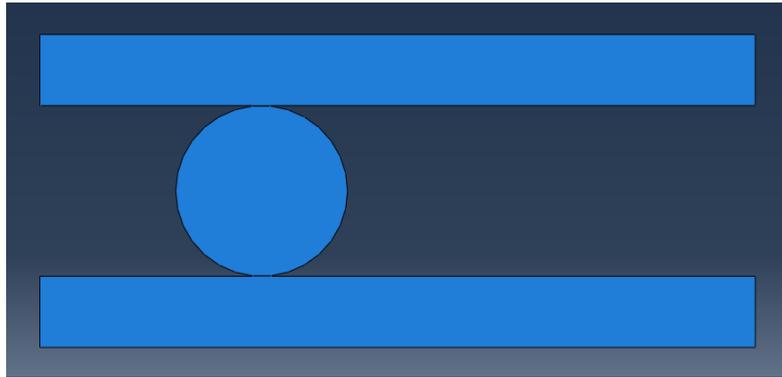


Ilustración 33: Situación ensayo de compresión

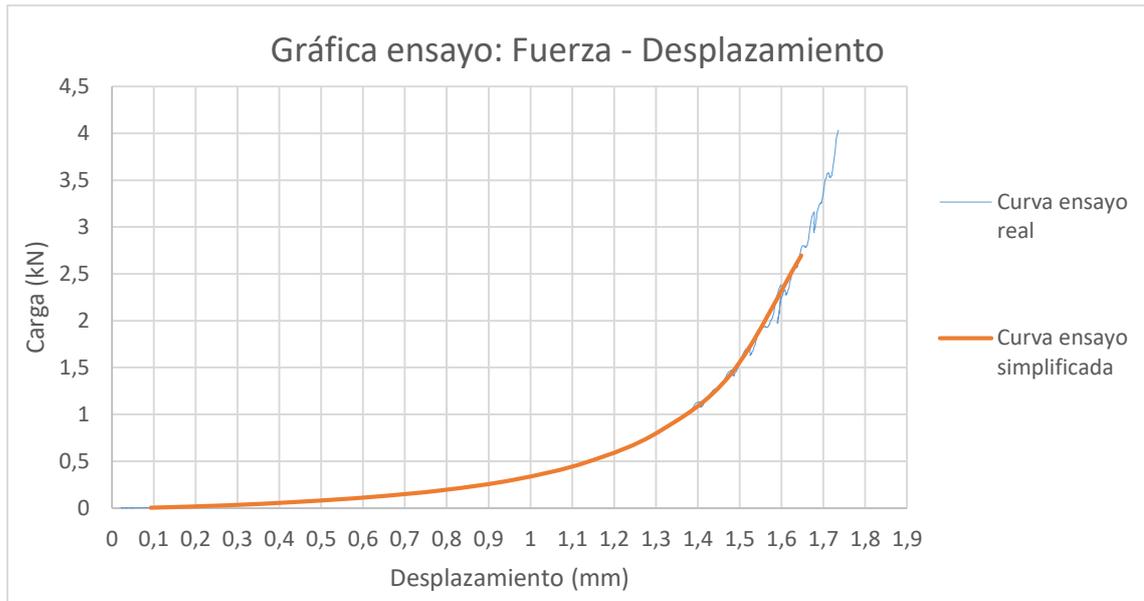
### 6.1.2 Resultados del ensayo

El resultado del ensayo se muestra en términos de Fuerza – desplazamiento, pues es la información que proporciona el software de la máquina de ensayos. Para el tratamiento de datos, se muestran las gráficas en valor absoluto, teniendo siempre en cuenta que se trata de un ensayo de compresión.



Como se puede observar, la fuerza aumenta de una manera exponencial con el desplazamiento. La longitud del ensayo es de 1.7mm aproximadamente, que supone un 70% de compresión en la sección de la junta tórica.

Teniendo en cuenta que debemos obtener la curva Tensión – Deformación, y esta posteriormente introducirla en el módulo de ABAQUS, se ha simplificado la curva reduciendo el número de puntos de esta a 10. Estos puntos, han sido calculados dividiendo el total de los datos en 10 tramos y realizando la media geométrica de cada uno de ellos, obteniendo la siguiente curva (Mostrada en naranja).

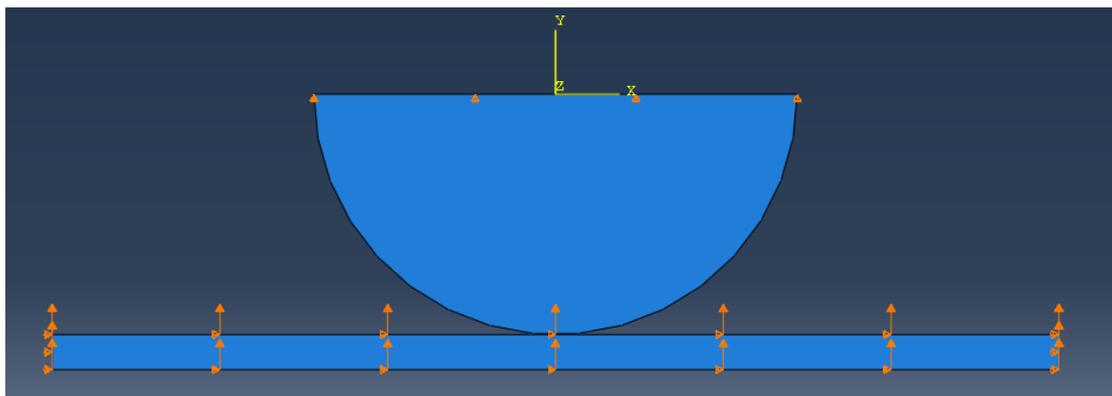


Como se puede observar, las líneas siguen la misma tendencia, por lo que la gráfica con 10 puntos se considera adecuada.

### 6.1.3 Obtención de la curva tensión – deformación

Para obtener la curva tensión – deformación se necesita conocer la sección que está comprimiendo la máquina de ensayos a lo largo del ensayo, pues esta, es variable y aumenta con la longitud del ensayo. Por lo tanto, en primera instancia necesitamos conocer la dependencia de la sección comprimida en función de la distancia.

Para conocer esto, se ha realizado un modelo en ABAQUS. En él, se simula una compresión de media sección de la junta para, mediante una de las variables de salida conocer la longitud del contacto establecido entre junta – superficie plana en función del desplazamiento. Notar que en este caso no tenemos un sistema de coordenadas axisimétrico, sino plano 2D, ya que en este caso no necesitamos simular la geometría de revolución.



*Ilustración 34: Geometría ensayo para determinar superficie de contacto*

El material utilizado para la simulación es un material elástico lineal con módulo elástico 200 MPa y 0.45 de módulo de Poisson. Siendo conocedores de que un material elástico no se comporta como el original, esto nos permite conocer la longitud del contacto a lo largo del ensayo de una manera bastante precisa.

Como condiciones de contorno:

- Se ha restringido el movimiento horizontal de la pieza que comprime la junta.
- Se ha realizado simetría respecto al eje X en la línea meda de la sección de la junta tórica
- Se ha establecido un desplazamiento impuesto de la mitad de la longitud del ensayo real ( $1.7/2=8.5\text{mm}$ )

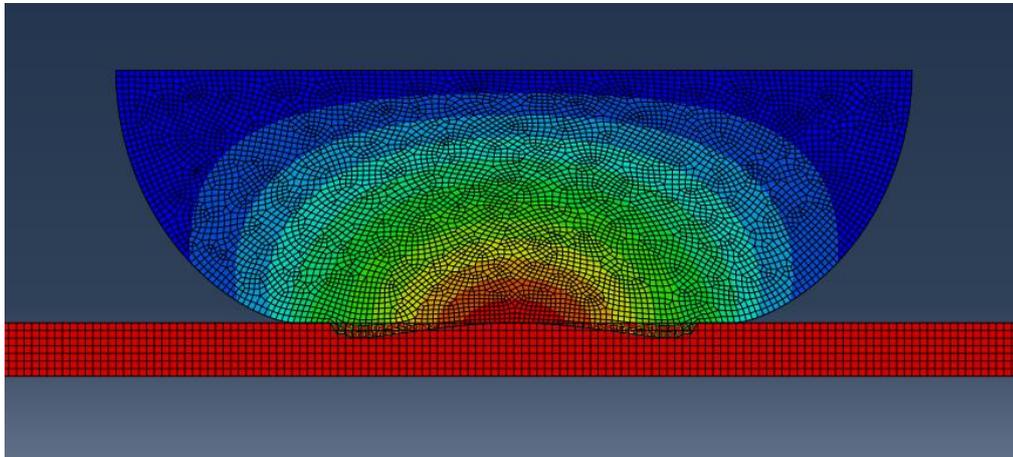
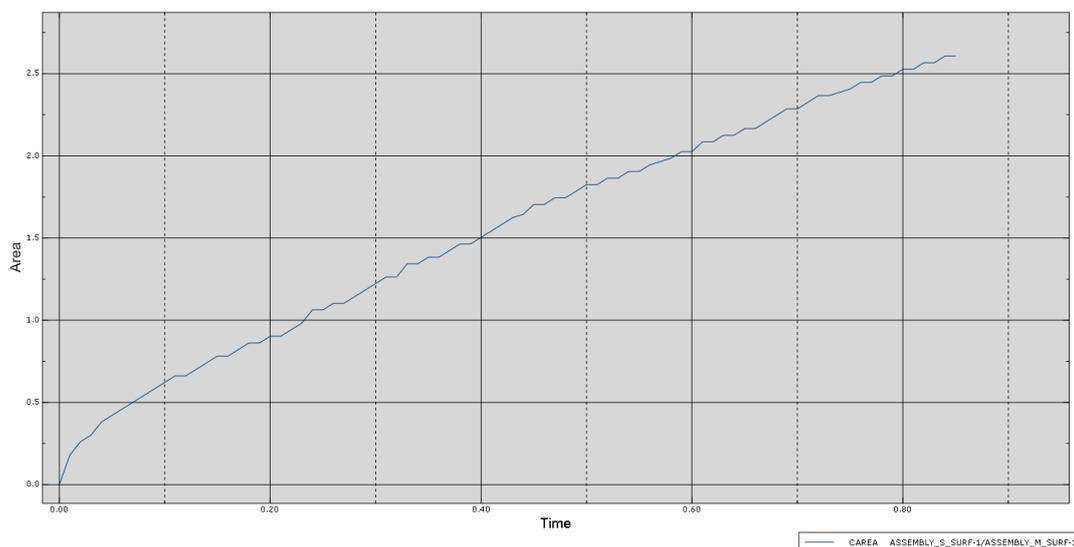


Ilustración 35: Mapa de colores de desplazamientos

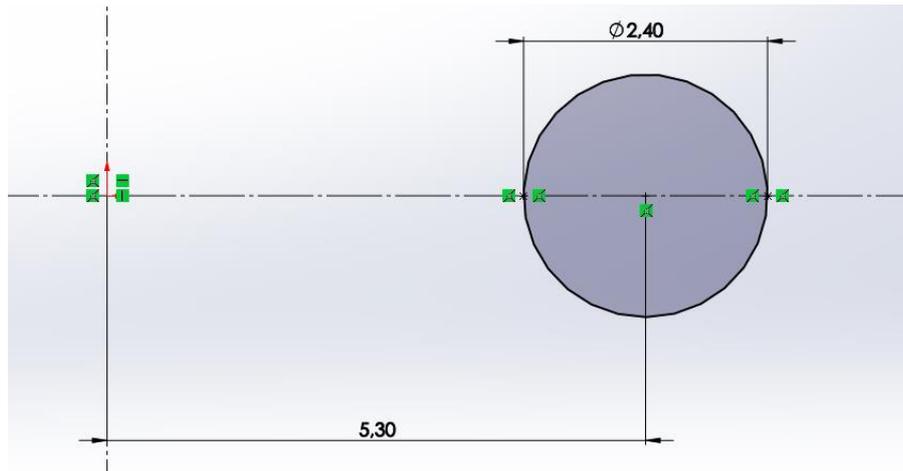
Si bien vemos que la simulación no es perfecta, pues existe interferencia entre elementos de una pieza y otra, sí que nos es posible obtener la longitud del contacto entre ambas piezas.

Para ello utilizamos la variable de postproceso “CAREA”. Esta variable mide la longitud del contacto que le definamos, en nuestro caso, el único que existe en el modelo. ABAQUS nos proporciona un gráfico en su entorno:



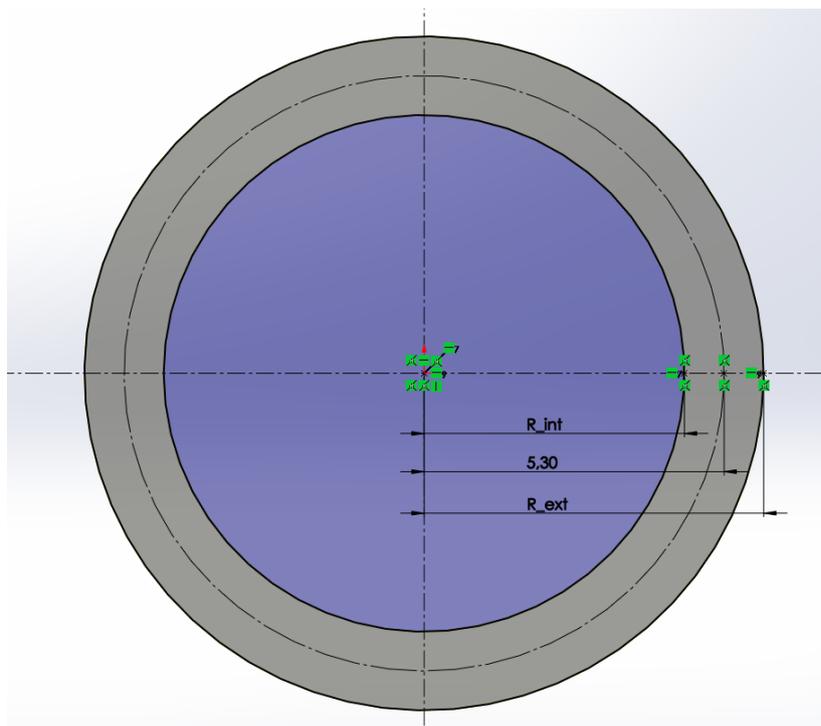
Nos muestra el área (longitud en 2D) frente al tiempo del ensayo. Para obtener la gráfica Longitud – Desplazamiento, se ha dividido la simulación en 85 incrementos, de modo que cada incremento significa 0.01 mm de desplazamiento. De esta manera, la gráfica obtenida se puede interpretar como longitud – desplazamiento.

Conociendo la longitud del contacto en cada punto de desplazamiento y conociendo el radio medio de contacto de la junta tórica (5.3mm), somos capaces de calcular el área de contacto en cada punto del ensayo.



*Ilustración 36: Geometría axisimétrica de la junta tórica*

La manera de calcularlo ha sido determinando en cada momento la corona circular que hace contacto con las superficies planas de la máquina de ensayos. Conociendo el radio medio y la longitud del contacto, se conocen los radios interiores y exteriores, pudiendo calcular fácilmente la superficie de contacto.



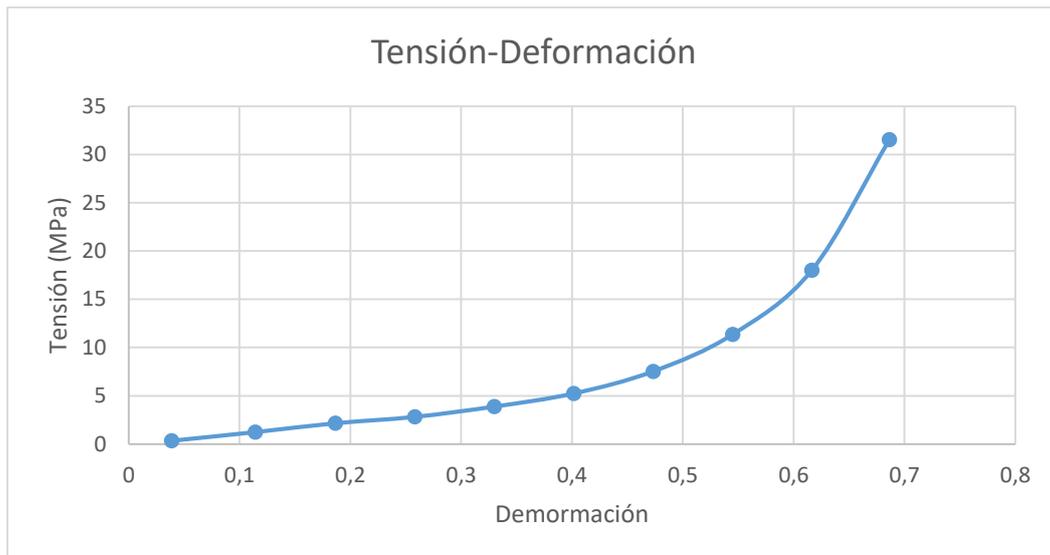
*Ilustración 37: Esquema radios para determinar superficie de contacto*

Los valores para la superficie de contacto se muestran en la siguiente tabla:

Position /2 (mm)	Longitud del contacto (mm)	Rint (mm)	Rext (mm)	Superficie del contacto (mm <sup>2</sup> )
0,0463	0,41	5,095	5,505	13,6533
0,1368	0,728	4,936	5,664	24,2430
0,2235	0,942	4,829	5,771	31,3694
0,3097	1,263	4,6685	5,9315	42,0590
0,3958	1,484	4,558	6,042	49,4185
0,4818	1,748	4,426	6,174	58,2099
0,5678	1,959	4,3205	6,2795	65,2364
0,6537	2,16	4,22	6,38	71,9299
0,7397	2,386	4,107	6,493	79,4559
0,8236	2,566	4,017	6,583	85,4500

Y ahora sí, conociendo la superficie de contacto en cada punto, se puede obtener fácilmente la curva Tensión – Deformación.

Desp. (mm)	Fuerza ensayo (kN)	Sup. contacto (mm <sup>2</sup> )	Tensión (Mpa)	Deformación
0,0928	0,0049	13,6534	<b>0,3579</b>	<b>0,0387</b>
0,2737	0,0304	24,2430	<b>1,2535</b>	<b>0,1141</b>
0,4471	0,0681	31,3694	<b>2,1699</b>	<b>0,1863</b>
0,6195	0,1191	42,0590	<b>2,8322</b>	<b>0,2581</b>
0,7918	0,1927	49,4185	<b>3,8997</b>	<b>0,3299</b>
0,9637	0,3060	58,2099	<b>5,2567</b>	<b>0,4015</b>
1,1357	0,4922	65,2364	<b>7,5454</b>	<b>0,4732</b>
1,3075	0,8175	71,9299	<b>11,3647</b>	<b>0,5448</b>
1,4794	1,4325	79,4559	<b>18,0284</b>	<b>0,6164</b>
1,6474	2,6952	85,4501	<b>31,5417</b>	<b>0,6864</b>



#### 6.1.4 Simulación del ensayo por elementos finitos

Cuando se modela en ABAQUS un ensayo, se utilizan los datos de Tensión – deformación para modelar un comportamiento. ABAQUS posee un módulo de valuación que permite predecir el comportamiento de un material hiperelástico y también permite elegir un modelo de comportamiento adecuado. Este módulo de ABAQUS permite realizar tests sobre un material existente. Pero lo realmente importante es elegir un modelo de energía de deformación que defina correctamente el comportamiento del material.

##### 6.1.4.1 Evaluación de los resultados del ensayo

ABAQUS ofrece diferentes modelos de comportamiento en términos de energía de deformación.

En este apartado, se evalúan y comparan diferentes modelos con los resultados del ensayo. El objetivo es elegir un modelo de energía de deformación que defina de manera más precisa el comportamiento hiperelástico de la muestra ensayada a partir de los datos del ensayo.

El proceso para llevarlo a cabo comienza introduciendo los datos del ensayo en el módulo de materiales del software:

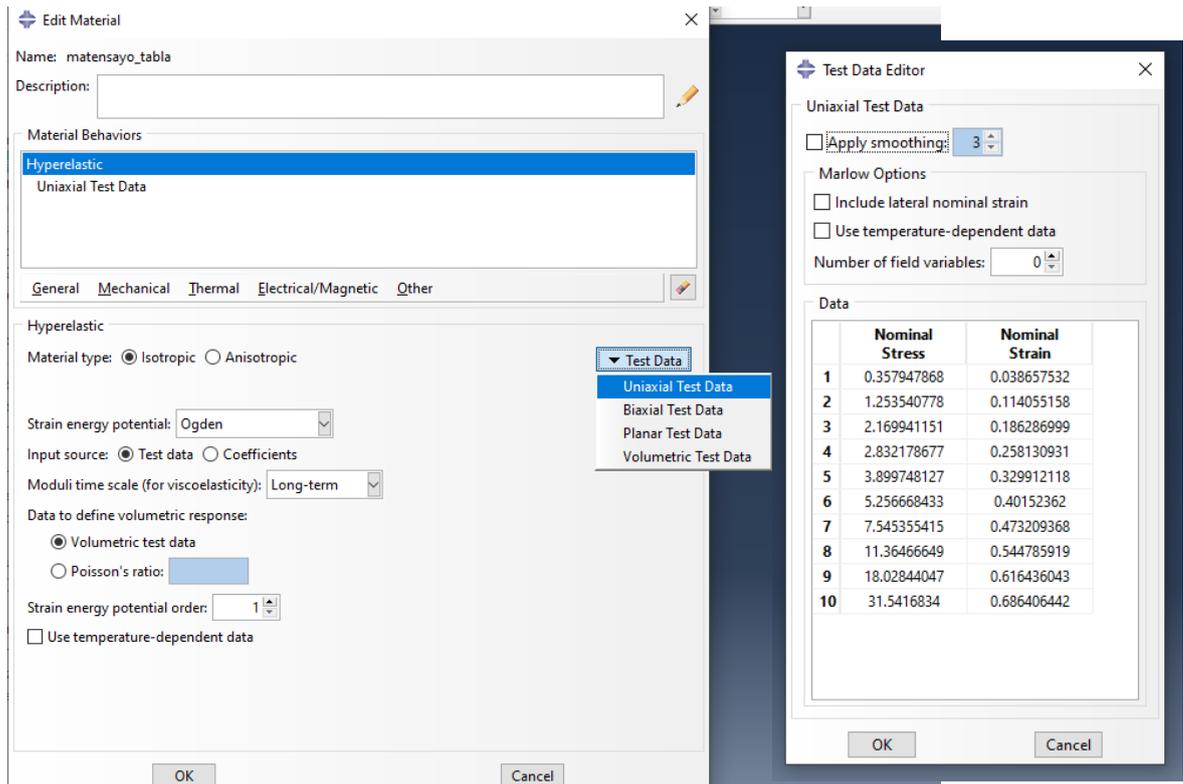


Ilustración 38: Módulo de evaluación. Introducción de datos de ensayo 1

Una vez que hemos definido los valores del ensayo, podemos evaluar el material en el gestor de materiales o “Material manager”. El procedimiento para ello se describe en la siguiente imagen:

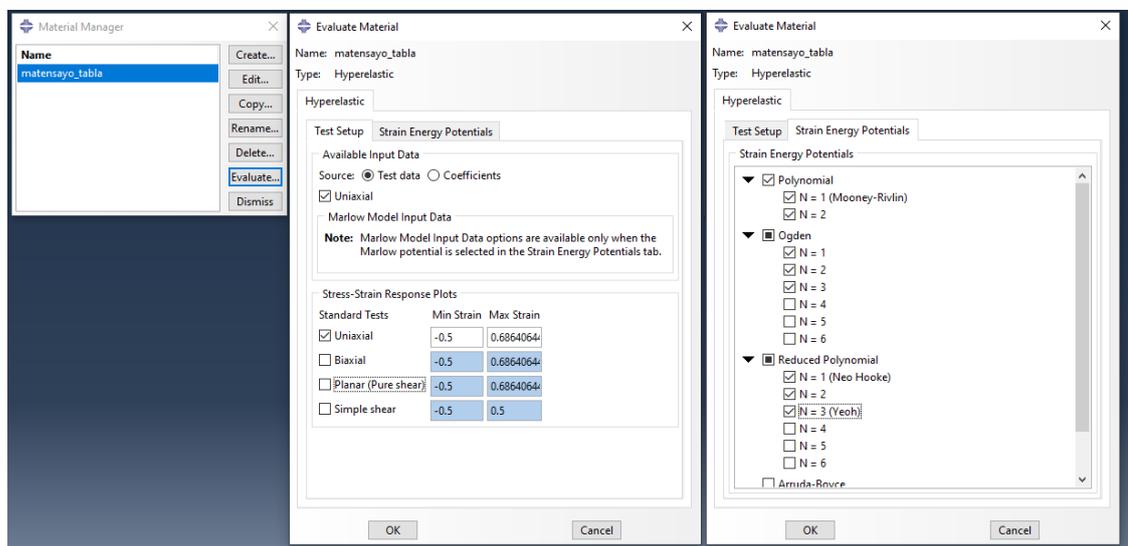


Ilustración 39: Módulo de evaluación. Introducción de datos de ensayo 2

En la imagen se puede apreciar la selección de los modelos de energía de deformación que en primera instancia serán utilizados para predecir el comportamiento de la muestra a partir de los datos del ensayo. En este caso se ha elegido que se evalúen los modelos:

- Polinomial hasta orden 2

- Ogden hasta orden 3
- Polinomial reducido hasta orden 3

En la primera evaluación, aparecen modelos que no representan el comportamiento del material:

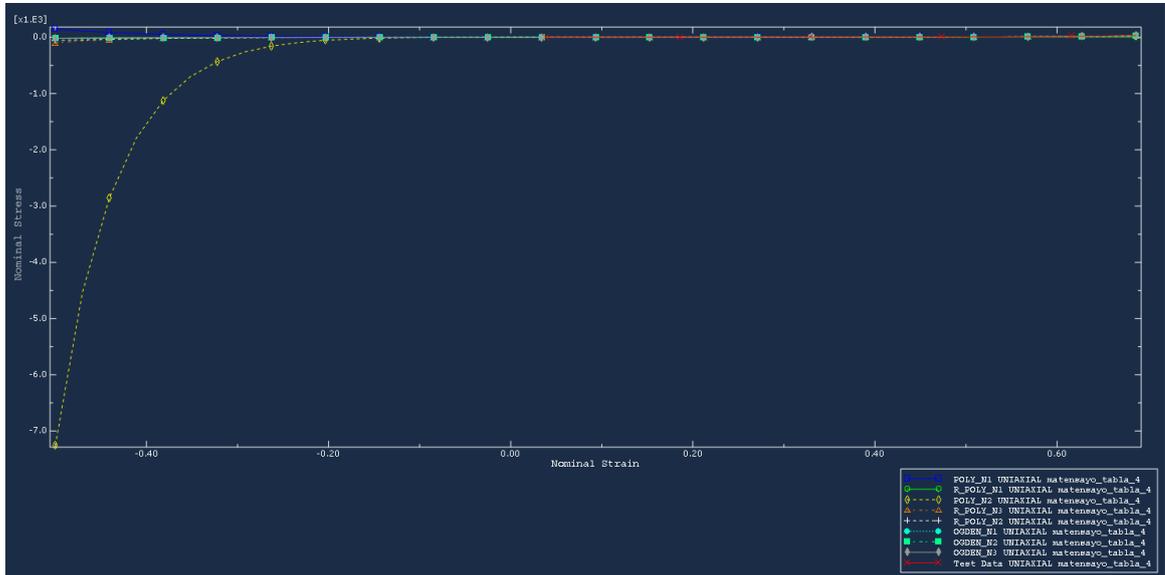


Ilustración 40: Adecuación de modelos de comportamiento 1

Estos modelos, al estar muy alejados del ensayo, desvirtúan el fondo de estala y no se consigue apreciar adecuadamente los modelos que si se aproximan. Por esto, se realiza otra evaluación eliminando estos modelos de entre los evaluables.

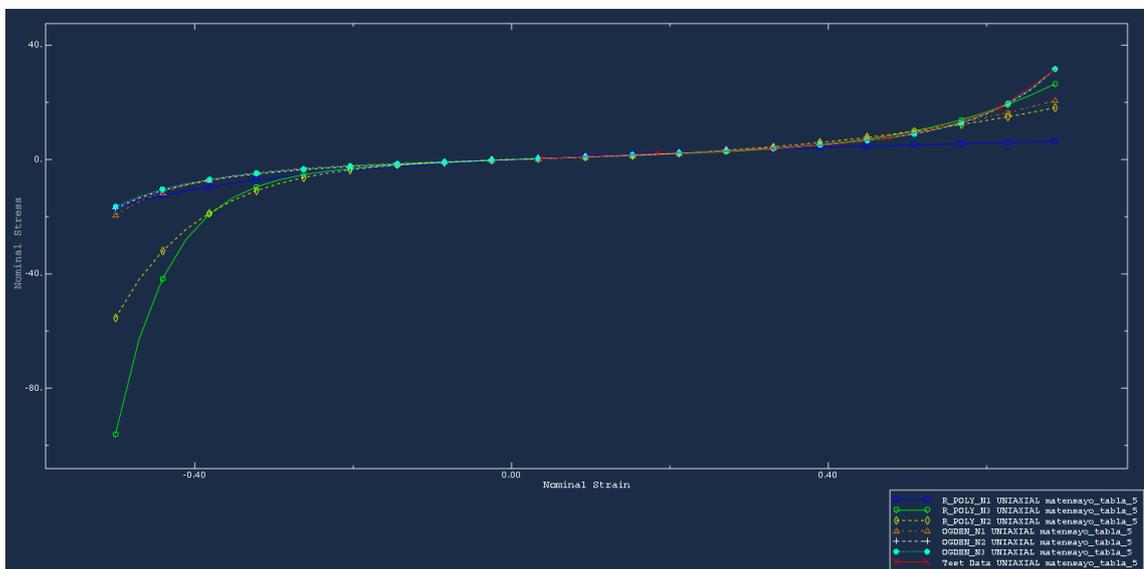


Ilustración 41: Adecuación de modelos de comportamiento 2

Con el fondo de escala adecuado es posible apreciar diferencias entre los modelos que se asemejan a los resultados del ensayo. Para una tercera evaluación eliminaremos los modelos representados con línea amarilla, verde y azul (Polinomial reducido de orden 1, 2 y 3), que son los que a simple vista se puede apreciar que no siguen la tendencia de la línea roja, que es la del ensayo.

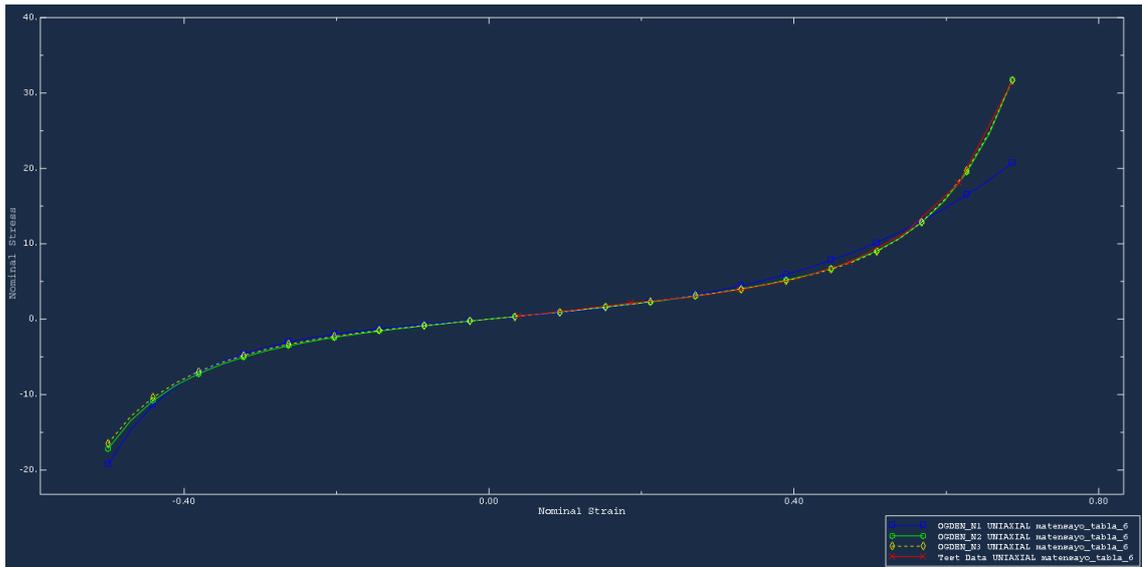


Ilustración 42: Adecuación de modelos de comportamiento 3

En esta última evaluación, descartamos el Ogden de orden 1 y elegimos el Ogden de orden 3, ya que pese a haber muy poca diferencia con el de orden 2, es el que mejor se adapta a la curva del ensayo.

Por lo tanto, acudimos a la información de estabilidad del modelo evaluado, para comprobar la estabilidad del mismo y obtener las constantes de la función de energía de deformación que definen el comportamiento del material.

HYPERELASTICITY - OGDEN STRAIN ENERGY FUNCTION WITH N = 3

I	MU_I	ALPHA_I	D_I
1	-31.7676136	11.2346669	0.00000000
2	11.6012192	12.3050307	0.00000000
3	23.4397145	10.0458689	0.00000000

STABILITY LIMIT INFORMATION

UNIAXIAL TENSION:	STABLE FOR ALL STRAINS
UNIAXIAL COMPRESSION:	STABLE FOR ALL STRAINS
BIAXIAL TENSION:	STABLE FOR ALL STRAINS
BIAXIAL COMPRESSION:	STABLE FOR ALL STRAINS
PLANAR TENSION:	STABLE FOR ALL STRAINS
PLANAR COMPRESSION:	STABLE FOR ALL STRAINS
VOLUMETRIC TENSION:	STABLE FOR ALL VOLUME RATIOS
VOLUMETRIC COMPRESSION:	STABLE FOR ALL VOLUME RATIOS

Ilustración 43: Salida módulo de evaluación

Como se puede comprobar, el modelo es estable para para tensión y compresión en todos los casos.

### 6.1.5 Comparación del comportamiento del material obtenido con el ensayo de la muestra.

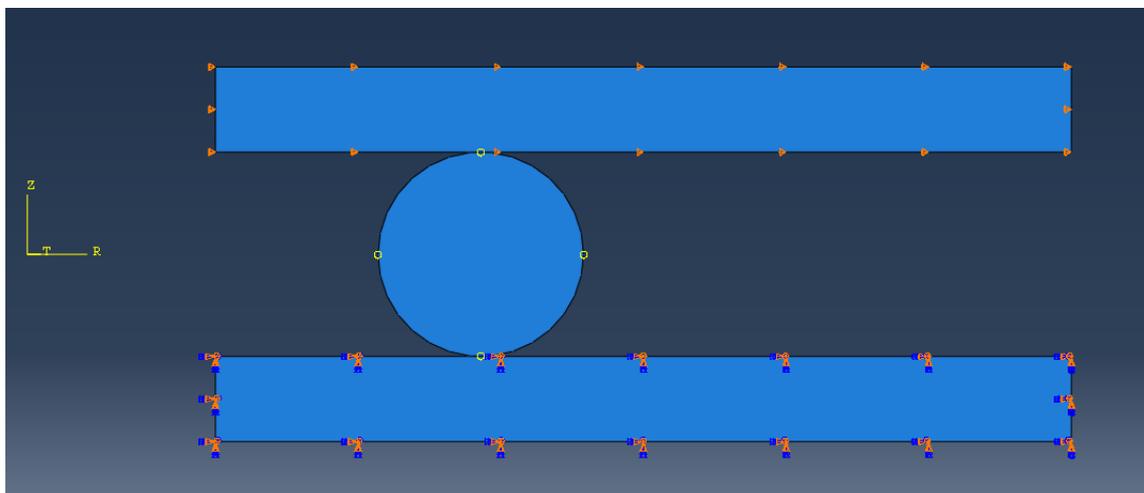
Para determinar que el material obtenido a través de la evaluación en ABAQUS es adecuado, resulta necesario compararlo con los resultados del ensayo de la muestra. Para ello se prepara un modelo de simulación en ABAQUS en el que se recrea el ensayo real.

#### 6.1.5.1 Modelo, cargas y condiciones de contorno.

En este caso se vuelve a generar un modelo axisimétrico con 3 componentes. La junta tórica y 2 superficies planas y mucho más rígidas que la junta tórica.

Las condiciones de contorno aplicadas recrean la situación de un ensayo de compresión:

- Superficie plana inferior empotrada
- Desplazamiento impuesto en la superficie superior de 1.7mm (Desplazamiento total del ensayo real)



*Ilustración 44: Modelo para comprobación de los datos del ensayo*

#### 6.1.5.2 Materiales

El material de las superficies es indiferente, pues se han establecido condiciones de contorno que imponen una deformación nula en sus caras exteriores.

El material de la junta tórica ha sido modelada como un material hiperelástico que sigue el modelo de energía de deformación de Ogden de orden 3. La definición de este material se ha realizado a través de las constantes obtenidas en el apartado anterior, y se ha considerado un material isotrópico.

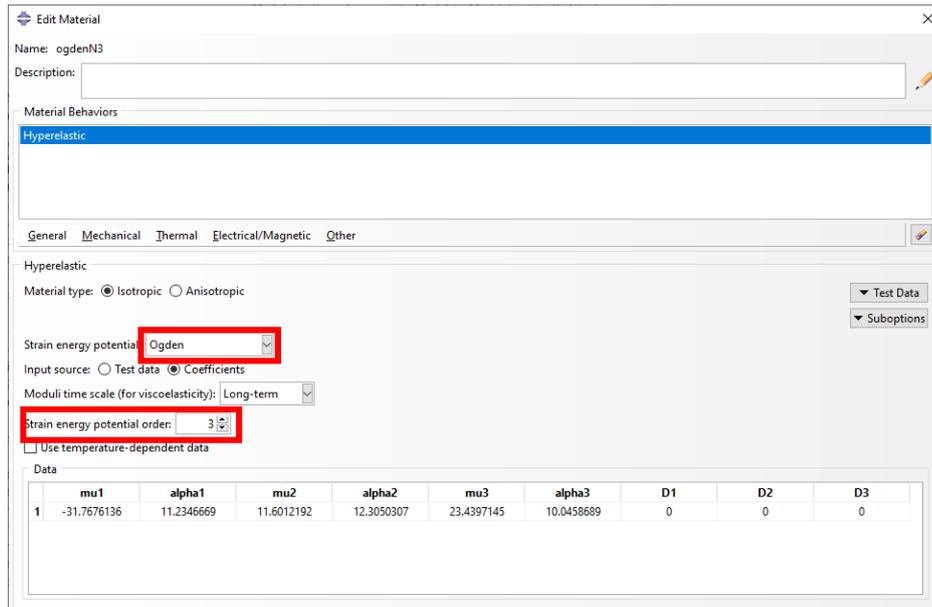


Ilustración 45: Introducción del modelo Ogden de tercer grado

### 6.1.5.3 Preparación de las variables de salida

Para poder comparar los resultados de la simulación con los del ensayo, es necesario solicitar a ABAQUS una variable de salida que por defecto no está activada. Como la información que nos proporciona la máquina de ensayos es Fuerza – desplazamiento, lo que hacemos es solicitar al software que nos proporcione las reacciones verticales generadas en la pieza que comprime la junta tórica.

Además, se establece el tiempo del Step en 1.7 y el incremento se fija a 0.01, para así obtener los resultados para cada centésima de milímetro del ensayo y obtener una curva con un número significativo de puntos.

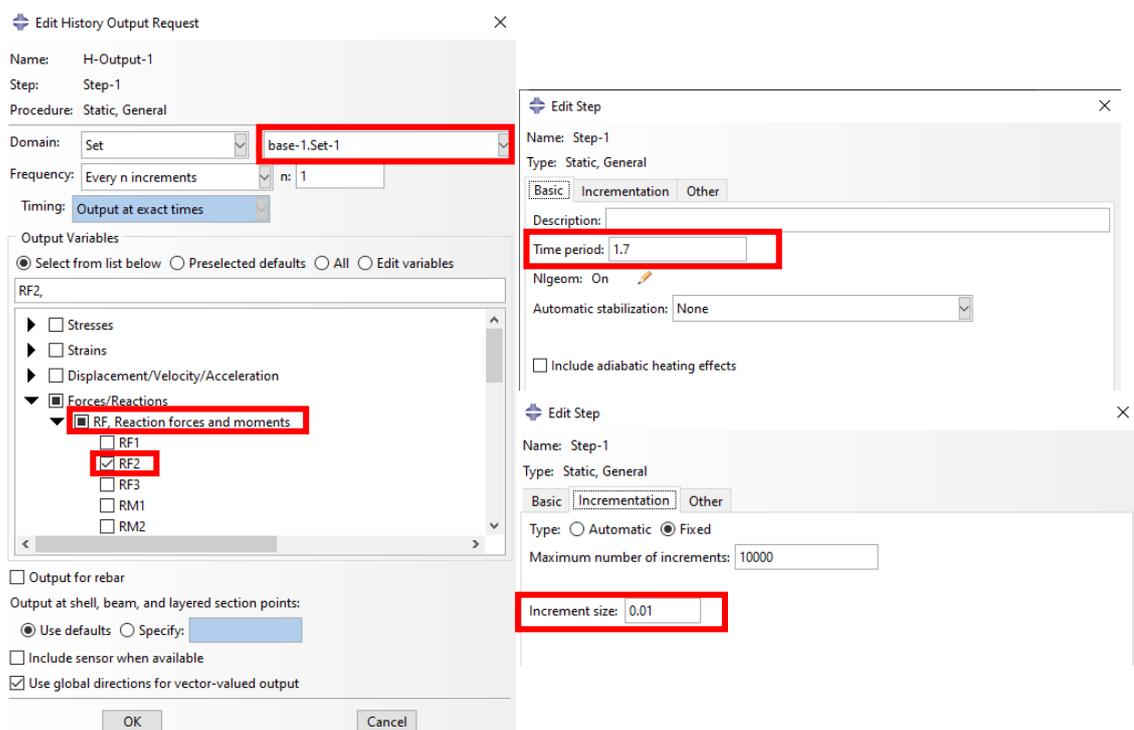


Ilustración 46: Preparación de las variables de salida y del incremento del step

### 6.1.5.1 Resultados de la simulación y comparación de resultados

Se lanza la simulación y se comprueba el modelo deformado:

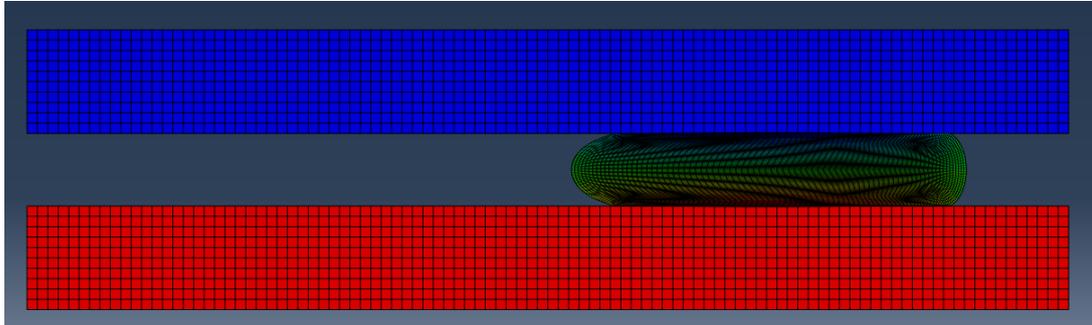


Ilustración 47: Situación final simulación de ensayo de compresión

A simple vista se ve que la deformación que sufre la junta, tanto en el ensayo como en la simulación es excesiva, sabiendo que ni en la realidad, ni en la simulación del modelo del piloto regulador en ningún momento se van a alcanzar estos niveles de deformación.

Para obtener las reacciones verticales, se acude a la variable de postproceso solicitada previamente al cálculo. El software nos da la información de la reacción vertical en cada intervalo para cada nodo de la pieza en la que le hemos solicitado, por lo tanto, deberemos sumar la reacción de todos los nodos en un mismo intervalo:

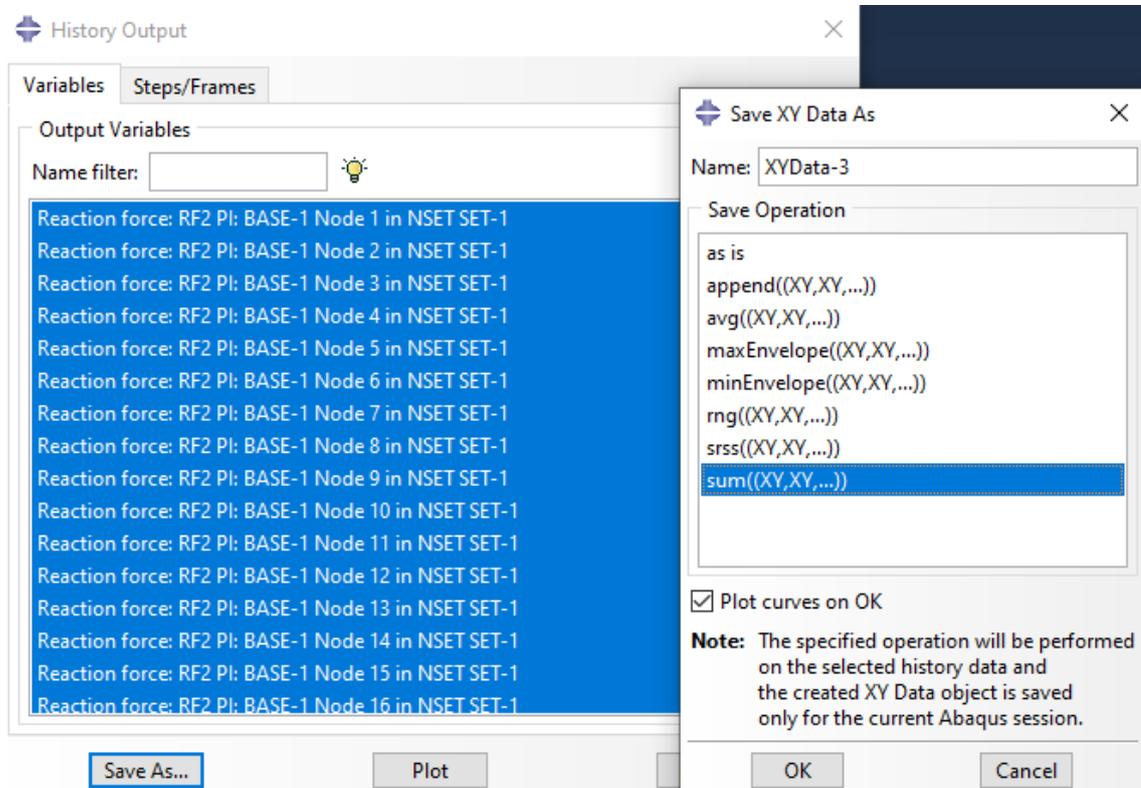
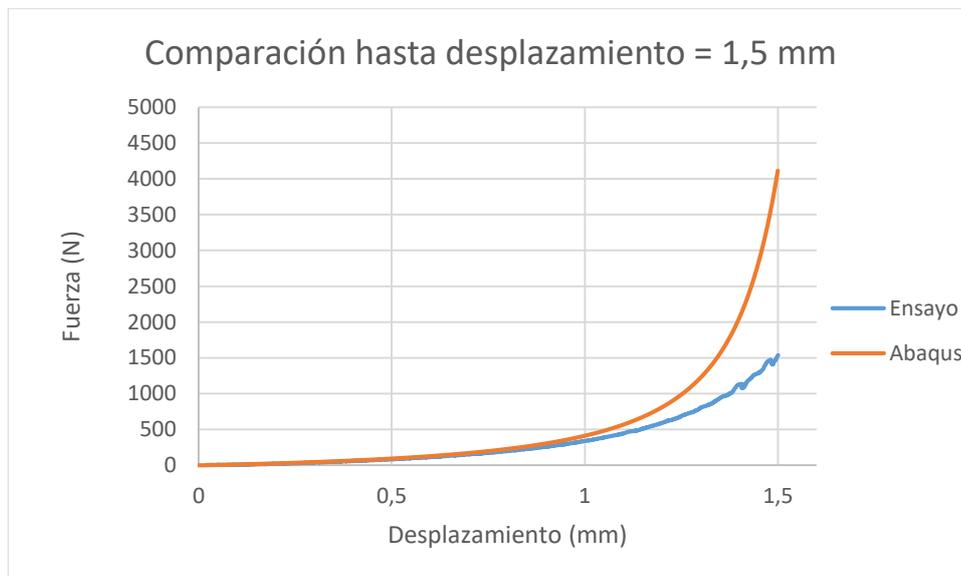


Ilustración 48: Obtención de las reacciones verticales

De esta manera se obtiene una curva Fuerza – Desplazamiento que debemos comparar con el resultado del ensayo:



Se aprecia que la tendencia de ambas curvas hasta 1.5 mm es bastante similar. Además, sabiendo que no se van a alcanzar estos niveles de deformación, se decide realizar el análisis comparativo hasta esta longitud aproximadamente.



Observando el tramo de desplazamiento, se observa que el resultado de la simulación es muy similar al del ensayo hasta 1mm. Si bien se podría tomar como válido este modelo, se va a intentar ajustar el último tramo del ensayo modificando las variables del modelo Ogden de orden 3.

### 6.1.5.1.1 Breve introducción al modelo de Ogden e influencia de sus constantes.

La bibliografía explica que el modelo de Ogden es adecuado incluso cuando la deformación alcanza valores del 700% pudiendo obtener resultados precisos a lo largo de todo el rango de deformación.

La ecuación que define el modelo de comportamiento de materiales hiperelásticos de Ogden es:

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{elem} - 1)^{2i}$$

Donde:

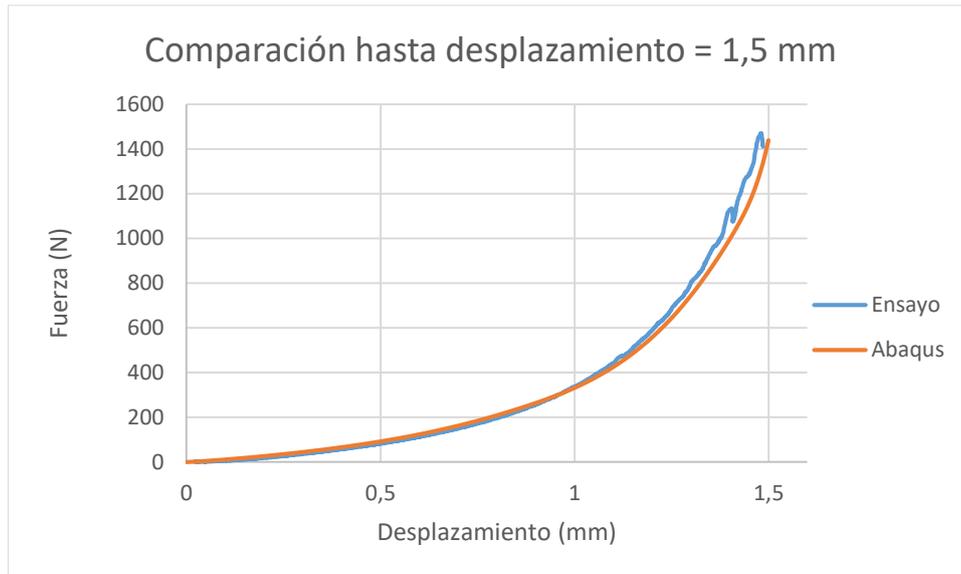
- $U \rightarrow$  Es la energía de deformación
- $\alpha \rightarrow$  Constante del material
- $\mu \rightarrow$  Constante del material. (Módulo de rigidez transversal, o segundo parámetro de Lamé)
- $\lambda_i \rightarrow$  Son las 3 deformaciones principales (Primer parámetro de Lamé)
- $D \rightarrow$  Representa la compresibilidad (Variación de volumen)
- $J \rightarrow$  Es el Jacobiano del elemento

Sin entrar en detalle en las características del modelo, cualitativamente sabemos que para variar el comportamiento del modelo, únicamente podemos actuar sobre las variables  $\mu$  y  $\alpha$ .

Sabiendo también que en el resultado de la simulación en Abaqus se ha obtenido una curva con más energía de deformación que la del ensayo real, deberemos actuar sobre las constantes para disminuir la energía de deformación de la simulación.

Se decide actuar sobre las constantes  $\mu_1$  y  $\mu_2$ , disminuyéndolas para que el término  $\frac{2\mu_i}{\alpha_i^2}$  de la ecuación se haga más pequeño y disminuya la energía de deformación. No se ha modificado el término  $\mu_3$  ya que daba problemas de convergencia y abortaba la simulación.

De esta manera, modificando cualitativamente las constantes del modelo y observando simulación tras simulación el nuevo comportamiento del material, se obtiene el siguiente resultado:



Donde se aprecia que la tendencia de las curvas es mucho más similar en todo el rango del ensayo. Por lo que finalmente se selecciona este modelo de energía de deformación para la simulación del conjunto del piloto regulador.

<b>mu1</b>	<b>alpha1</b>	<b>mu2</b>	<b>alpha2</b>	<b>mu3</b>	<b>alpha3</b>	<b>d1</b>	<b>d2</b>	<b>d3</b>
-31,9676136	11,2346669	11,2012192	12,3050307	23,4397145	10,0459689	0	0	0

## 6.2 Definición del modelo de la simulación

En este apartado se explican todas las variables de pre-proceso inherentes al modelo utilizado para la simulación, para en un posterior apartado, explicar el procedimiento de la simulación entrando en detalle en cada uno de los Steps realizados.

### 6.2.1 Modelo simplificado del conjunto

Para realizar la simulación se ha diseñado un modelo simplificado del conjunto objetivo de estudio. Para determinar el ajuste de las juntas tóricas, únicamente necesitamos simular el conjunto de las cámaras y conexiones.

Dada la naturaleza del conjunto y los numerosos contactos existentes en él, se ha realizado un diseño con simetría axial (Axisimétrico) con el objetivo de facilitar los cálculos y reducir el tiempo computacional. Además, este hecho nos permite trabajar aumentando el número de elementos de malla, hecho importante ya que al estar trabajando en una versión educativa tenemos limitado el conjunto de malla a 250.000 nodos.

A continuación, se muestran el conjunto modelado en Abaqus y la correspondencia de las piezas con el modelo original.

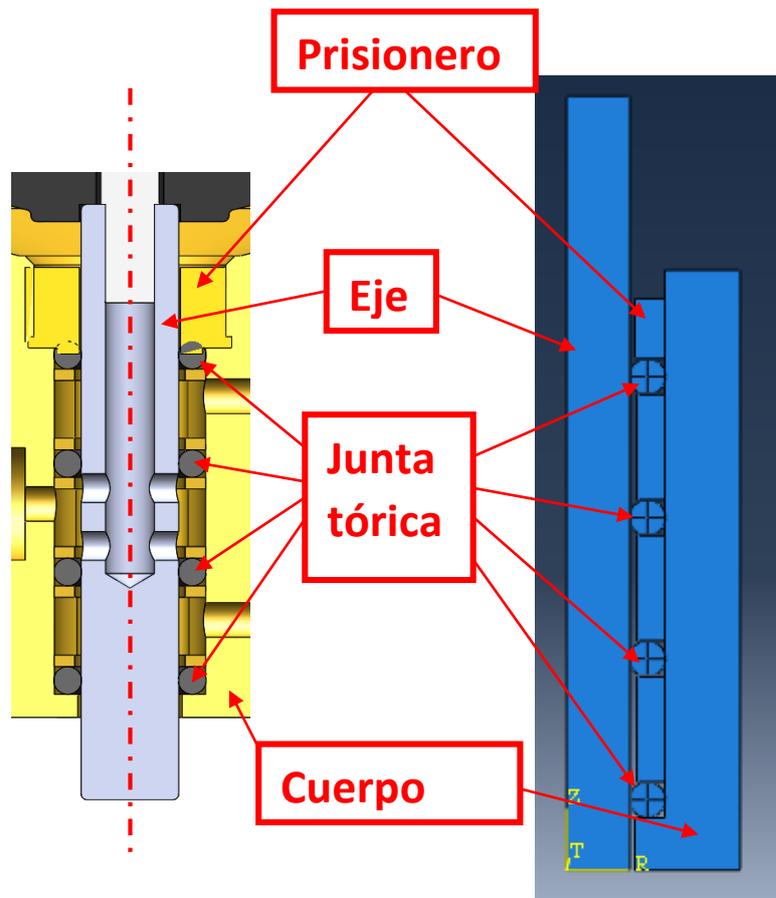


Ilustración 49: Esquema modelo simplificado axisimétrico

Como se puede observar, solo se ha modelado la geometría suficiente para generar un modelo axisimétrico.

### 6.2.2 Materiales

En el modelo se han incluido dos tipos de materiales. Uno de carácter metálico elástico lineal y otro de tipo hiperelástico.

En cuanto al material metálico, se han tomado los valores de un latón convencional: Módulo elástico 70 GPa y módulo de Poisson 0.3. Puesto que la diferencia de resistencia a la deformación de los dos tipos de materiales existentes (metálicos – hiperelásticos) es muy grande, se han introducido estos valores para todos los materiales metálicos, incluyendo el eje, que realmente es de acero inoxidable. Se ha realizado esto ya que teniendo un material mucho más resistente que el de la junta tórica se consigue ver el comportamiento de esta última, objeto de nuestro estudio.

En cuanto a la definición del material de la junta tórica, se ha calculado en el apartado anterior las constantes del modelo de comportamiento Ogden de grado 3 que definen las características del material de la junta tórica.

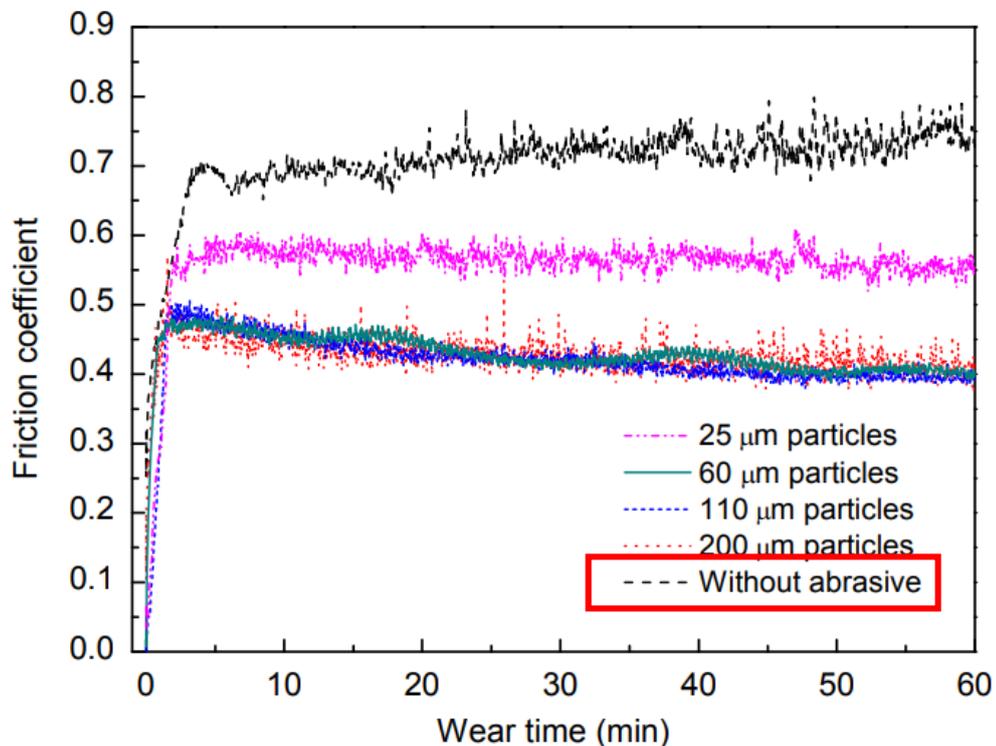
### 6.2.3 Condición de contacto

Se ha definido un contacto de comportamiento tangencial entre componentes con un coeficiente de fricción constante. Por lo tanto, este coeficiente de fricción será el que determine la propiedad del contacto.

Para definir este coeficiente de fricción se ha acudido a la bibliografía relacionada con los materiales que intervienen en el modelo.

Sabiendo que el material de la junta tórica es NBR70, Nitrile butadiene rubber o goma de nitrilo butadieno en castellano con 70 Shore A de dureza, se ha recurrido a varios artículos de investigación donde se estudia el rozamiento de este tipo de goma interaccionando con acero inoxidable.

En el artículo, *“Influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles on the friction and wear behaviors of nitrile rubber against 316L stainless Steel”* de Ming-xue SHEN, Jin-peng ZHENG<sup>2</sup>, Xiang-kai MENG<sup>1,2</sup>, Xiao LI<sup>2</sup>, Xu-dong PENG, se estudia el comportamiento y desgaste de estos materiales frente a la influencia de partículas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Si bien la influencia de estas partículas no nos es interesante, del artículo se puede extraer información del rozamiento entre estos materiales sin haber añadido estas partículas, como se muestra en la siguiente gráfica:



En ella se muestra, en la línea negra de trazo discontinuo, que el coeficiente de fricción entre estos materiales alcanza un valor constante de 0.75 después de un tiempo de ensayo.

Se ha utilizado este coeficiente para todos los contactos del modelo. Pero además de esto, se ha lanzado la simulación introduciendo un valor mayor y menor del coeficiente de rozamiento con el fin de medir la influencia que este parámetro tiene en el modelo.

De las diferentes simulaciones se obtienen resultados bastante similares. Para comprobarlo, se ha medido la fuerza **de reacción horizontal** sobre las paredes que ejerce la presión de la junta tórica tras realizar la compresión del conjunto a través del prisionero superior.

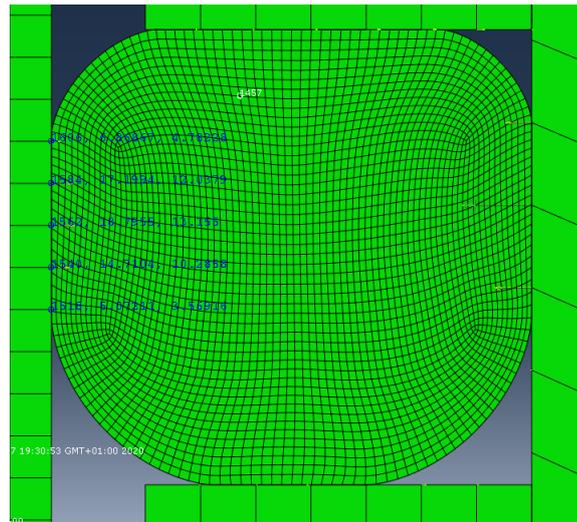
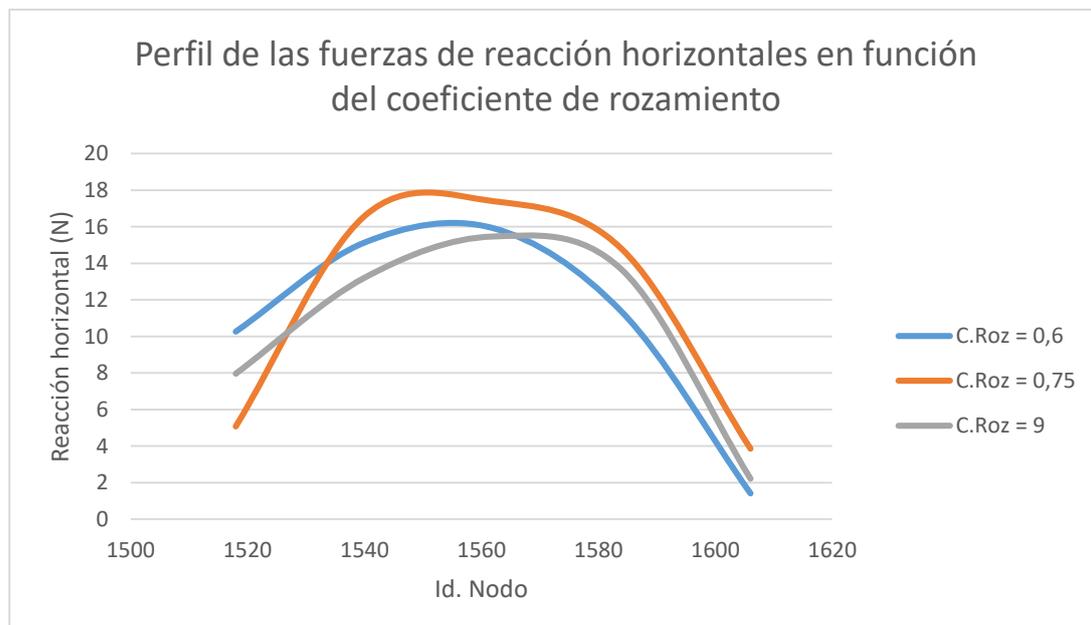


Ilustración 50: Fuerzas de reacción horizontales

Por lo tanto, se obtiene un perfil de fuerzas que se muestra a continuación:

NODO	Coeficientes de rozamiento		
	C.Roz = 0,6	C.Roz = 0,75	C.Roz = 0.9
1606	1,41	3,85	2,21
1584	11,34	14,78	13,65
1562	15,92	17,4	15,47
1540	15,13	16,58	13,21
1518	10,26	5,07	7,96

Que se grafica para ver la comparativa de forma visual.



Como la diferencia entre los resultados obtenidos no es muy grande, se ha tomado como válido el valor del coeficiente de rozamiento para la simulación, si bien sabiendo que este

punto puede ser objeto de un estudio más exhaustivo determinando el coeficiente de rozamiento concreto de este caso.

Este hecho, se considera un punto de estudio posterior a la realización de este trabajo fin de máster y con el que seguir investigando sobre el modelo, utilizando técnicas experimentales y/o analíticas para determinar las propiedades de rozamiento entre los cuerpos que intervienen.

#### 6.2.4 Condiciones de contorno

Para comenzar a definir las restricciones de movimiento del conjunto, se definen condiciones de contorno en los componentes.

- **Empotramiento de eje y cuerpo del piloto:** Se restringe el movimiento en todos los grados de libertad del eje y del cuerpo del piloto. Se realiza esta restricción ya que se necesita que el proceso de compresión del conjunto de juntas tóricas se realice de manera fidedigna a la realidad.
- **Restricción del movimiento lateral de las jaulas:** Para asegurar el movimiento vertical de los componentes móviles (Excepto las juntas tóricas), se restringe el movimiento horizontal de éstos.

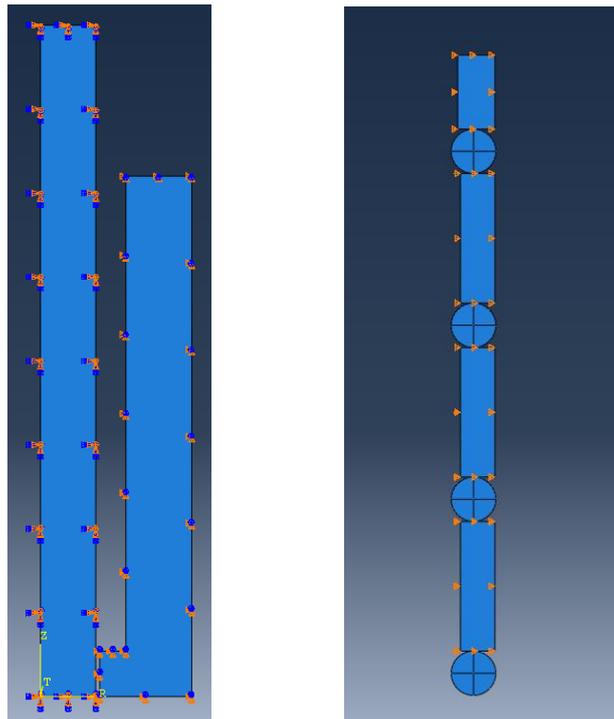


Ilustración 51: Geometrías del modelo axisimétrico para la simulación

#### 6.2.5 Mallado

El mallado de los distintos componentes se ha realizado de la siguiente manera. Diferenciaremos en cuanto a tipo de malla para los dos tipos de materiales que tenemos en el conjunto: Material elástico lineal y material hiperelástico (juntas tóricas).

- **Material elástico lineal:** Para el mallado de estos componentes se ha elegido utilizado un elemento del tipo CAX4R. Cuadriláteros de 4 nodos bilineales axisimétricos con

integración reducida. Un elemento común para geometrías rectangulares axisimétricas. La integración reducida nos permitirá evitar que los elementos se bloqueen si las deformaciones son muy grandes.

En cuanto a la estrategia de mallado, se ha hecho un sembrado sencillo en los bordes de las piezas rectangulares. Como estos componentes van a deformarse muchísimo menos que las juntas tóricas, no es necesario hacer una malla excesivamente refinada. Así, podremos introducir más elementos en la junta tórica que es el objeto de nuestro estudio.

- **Material hiperelástico:** Cuando se utilizan materiales hiperelásticos es necesario utilizar formulación híbrida para que se pueda calcular el modelo. Por ello, para las juntas tóricas, se han utilizado elementos del tipo CAX4RH. Cuadriláteros de 4 nodos bilineales axisimétricos, híbridos y con integración reducida.

La estrategia de mallado en este caso ha sido utilizando un eje medio a partir del cual empezar a construir la malla. De esta manera se consigue una uniformidad en el elemento bastante adecuada en toda la superficie de la junta, obteniendo en el borde de la junta elementos con muy parecida longitud entre sus nodos.

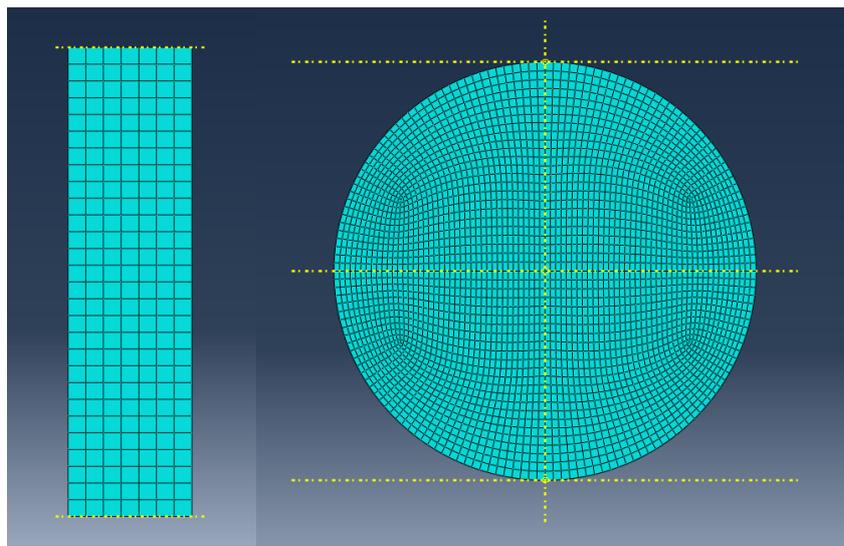


Ilustración 52: mallado de componentes

### 6.3 Procedimiento de la simulación

Realizando esta simulación, lo que se pretende es recrear la situación real de compresión del conjunto y en especial el efecto sobre las juntas tóricas. Para explicar detalladamente el

Boundary Condition Manager

Name	Initial	Preajuste	Compresion_toricas	Presión_interior16bar	desplazamiento_eje1	presion_adicional1	desplazamiento_eje2	presion_adicional2	desplazamiento_eje3	presion_adicional3
✓ Desplazamiento impuesto			Created	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated
✓ EMpotramiento_eje	Created	Propagate	Propagated	Propagated	Inactive	Inactive	Inactive	Inactive	Inactive	Inactive
✓ Empotramiento_cuerpo	Created	Propagate	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated
✓ Solo movimiento vertical_conjunto			Created	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated
✓ desplazamiento_lateraleje					Created	Propagated	Inactive	Inactive	Inactive	Inactive
✓ desplazamiento_lateraleje2							Created	Modified	Inactive	Inactive
✓ desplazamiento_lateraleje3									Created	Propagated
✓ prisionero_inmovil_en_preajuste		Created	Inactive	Inactive	Inactive	Inactive	Inactive	Inactive	Inactive	Inactive

proceso que sigue la simulación, se explicarán los diferentes Step que se han incluido en la simulación y las acciones realizadas en cada uno de ellos. A continuación, se muestra una tabla que recoge todos los Steps incluidos en la simulación y las condiciones de contorno correspondientes a cada uno:

*Ilustración 53: Tabla de condiciones de contorno según step*

Además, se muestra un esquema de la metodología seguida en la simulación para **obtener el diámetro del eje necesario para conseguir el ajuste mínimo necesario en la junta tórica para trabajar a PN16**, pudiéndose alcanzar una presión puntual de 24bar:

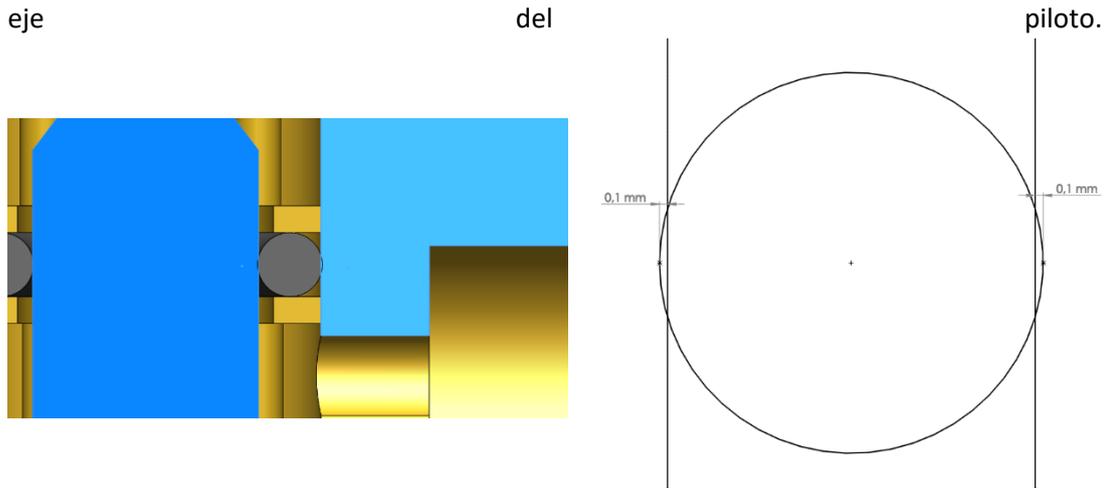


### 6.3.1 Step Inicial

En este Step, se incluyen las condiciones de contorno mencionadas en la sección 6.2.4.

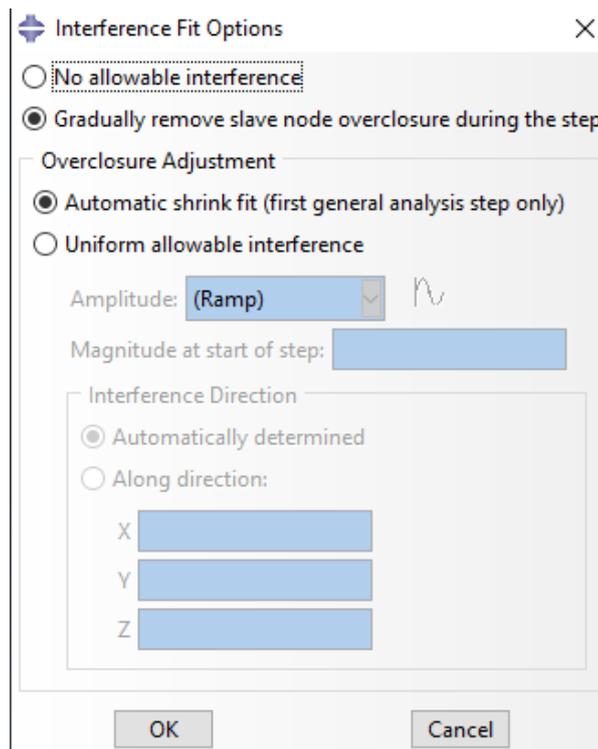
### 6.3.2 Step 1: Preajuste

Como se ha explicado en apartados anteriores, el tamaño de la junta tórica interfiere con el resto de componentes, ya que, como se aprecia en la imagen de más abajo, el diámetro exterior de la junta tórica es 0.1mm más grande que el diámetro interior del cuerpo del piloto y el diámetro interior de la junta es 0,1mm más pequeño que el diámetro exterior del



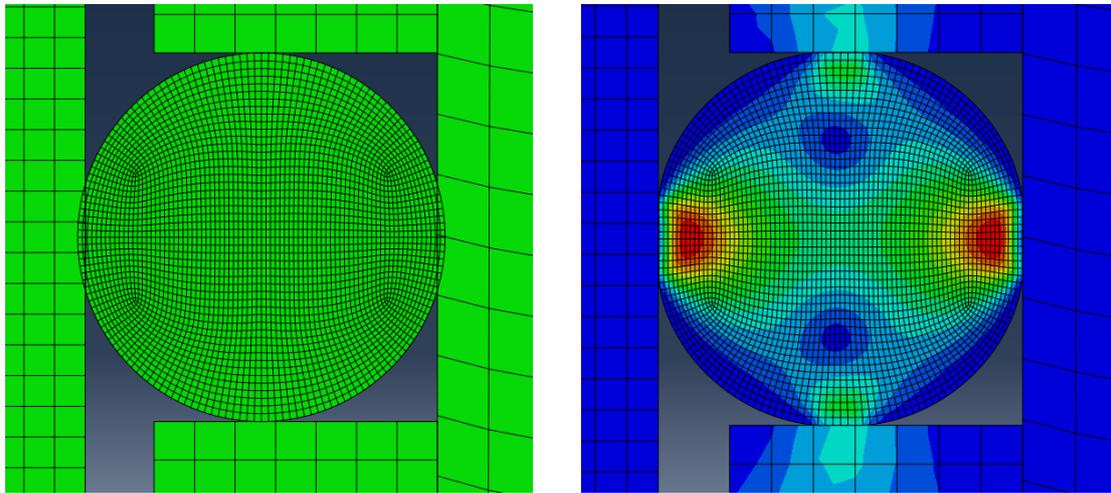
*Ilustración 54: Detalle del Preajuste de las juntas tóricas*

Este hecho implica que, en el montaje, exista una pre-compresión, o pre-ajuste en la junta tórica y aparezcan fuerzas y deformaciones en la junta. Se ha incluido esta situación en la simulación incluyendo un Step, donde se realiza el pre-ajuste de la junta tórica con las paredes laterales.



*Ilustración 55: Introducción del Preajuste en el software*

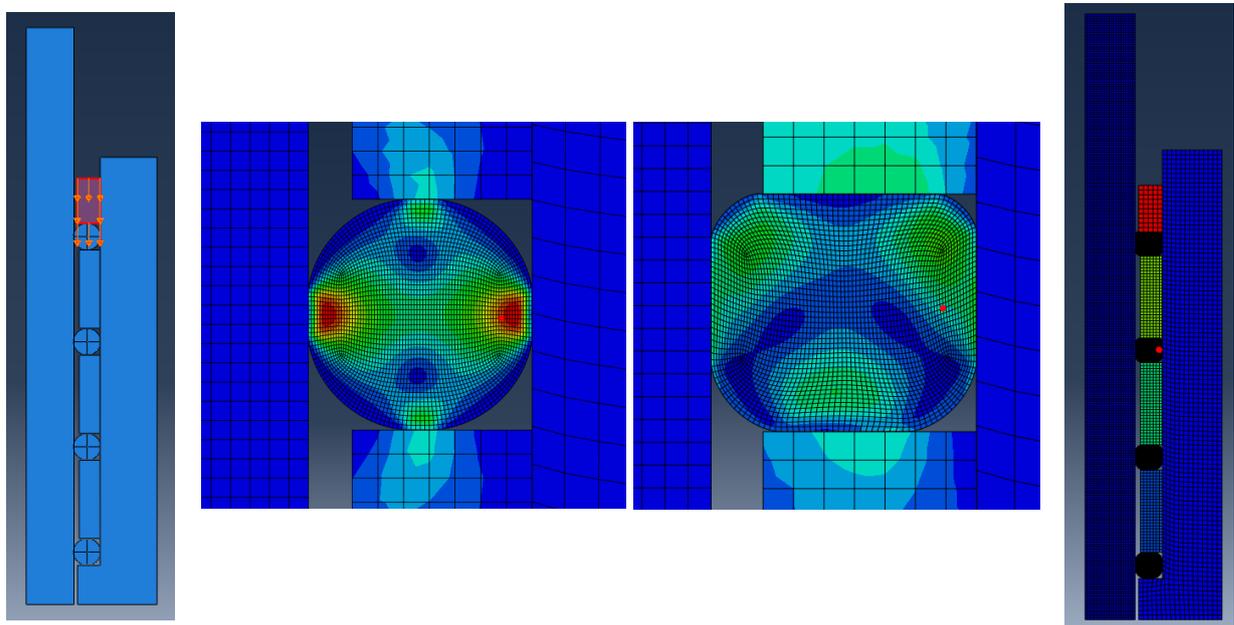
Como se puede comprobar, el pre-ajuste genera tensiones y deformaciones en la junta tórica:



*Ilustración 56: Estado inicial y final del step Preajuste*

### 6.3.3 Step 2: Compresión del conjunto mediante el prisionero.

Para simular la compresión del conjunto se ha añadido un desplazamiento vertical impuesto en el prisionero. Este desplazamiento es de exactamente la distancia que se comprimen las juntas tóricas en la realidad, medida tomada del ensamblaje 3D.



*Ilustración 57: Indicación del desplazamiento impuesto y situación final de junta tórica y conjunto*

Esta situación representa la posición de montaje del conjunto y la deformación que sufren las juntas tóricas.

### 6.3.4 Step 3: Presurización de la cámara de la conexión.

Puesto que la toma del piloto regulador siempre estará conectada a la corriente de agua, las variaciones de presión de la línea se transmiten a la conexión. Esto implica que la mitad de

la superficie de la junta tórica se encuentra presurizada a la presión de línea, en el peor de los casos, 24 bar. En la simulación se ha recreado esta situación aplicando una carga de presión de 2,4 MPa en la mitad de la superficie de ambas juntas tóricas., como se muestra en la imagen de más abajo.

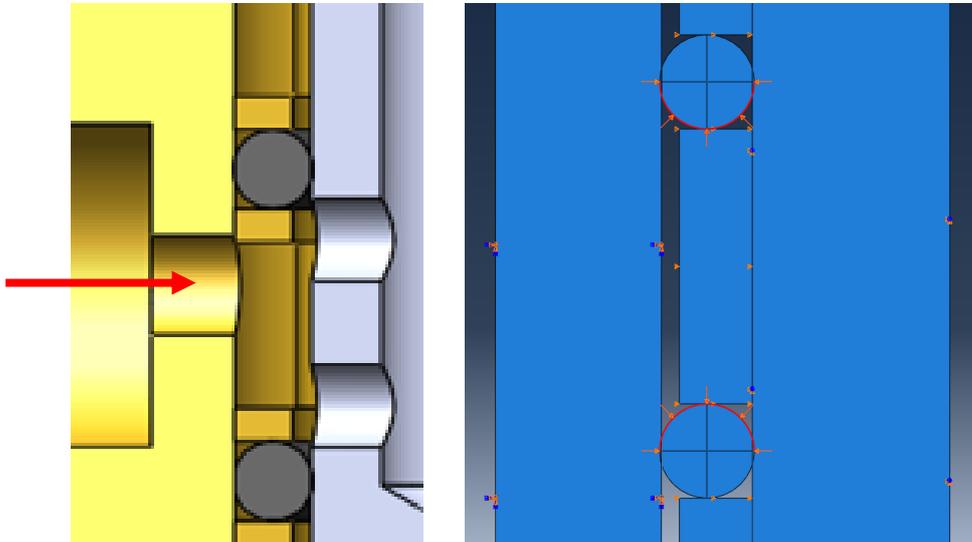


Ilustración 58: Esquema de presión interior introducida

Como consecuencia de esto, las juntas tóricas se deforman aún más, llegando a desplazar al conjunto. El resultado se muestra en la siguiente imagen:

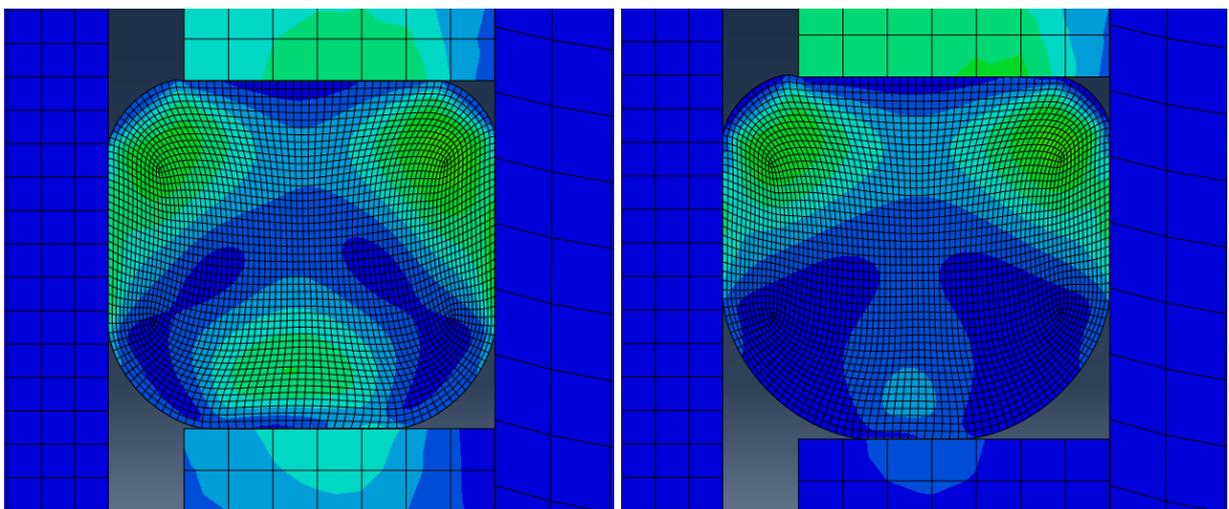


Ilustración 59: Situación inicial y final del step presión interior

En este punto, que es la situación límite de trabajo, debemos comprobar si se producen fugas a través de los contactos de la junta tórica. La comprobación de fugas se ha realizado en a través de la variable de postproceso "CSTATUS", que indica la situación en la que se encuentra un contacto: Cerrado, desplazando o abierto. Para este trabajo, puesto que el desplazamiento de las juntas tóricas es algo que está dentro de la normalidad, se considerará

que el conjunto comienza a fugar en el momento en el que un contacto de cualquier junta tórica se encuentre abierto.

En este punto los contactos se encuentran cerrados en todas las dos juntas tóricas, como se muestra a continuación:

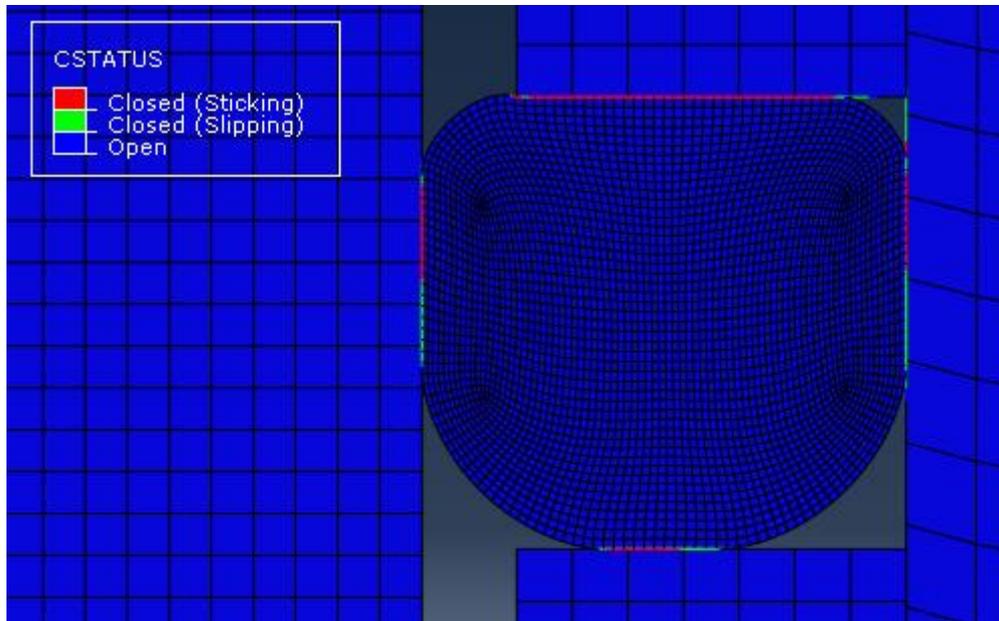


Ilustración 60: Comprobación del estado del contacto

Por lo tanto, ahora debemos ir disminuyendo el diámetro exterior de eje poco a poco e ir comprobando el estado de los contactos con la variable “CSTATUS”.

### 6.3.5 Reducción del diámetro del eje

Para simular la reducción del eje, lo que se ha hecho es imponer un desplazamiento en la cara lateral del mismo, así podemos ir realizando reducciones sucesivas sin necesidad de variar el modelo de la simulación.

El hecho de reducir el diámetro del eje con la presión interior aplicada, presenta una dificultad añadida a la simulación. En el modelo, conforme se va desplazando la superficie hacia la izquierda simulando la reducción del diámetro del eje, se va abriendo el contacto entre esta superficie y la junta tórica. Durante este desplazamiento, llega un momento en el cual parte de la superficie de la junta tórica que inicialmente estaba haciendo contacto con el eje, se despega y queda libre de contacto. Por lo tanto, ahora esta superficie debería estar sometida a la presión interior simulada en el modelo.

Esto no pasa en la simulación, pues la carga de presión que actúa sobre la junta tórica, solo lo hace, inicialmente, sobre una mitad de ésta. En la siguiente imagen se ven los elementos sobre los que, en su superficie exterior, actúa la carga de presión.

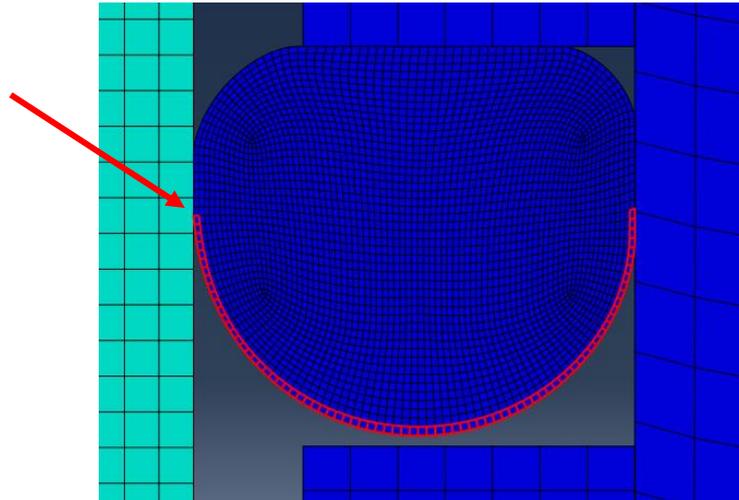


Ilustración 61: Detalle de la superficie donde se aplica inicialmente la presión

En las siguientes imágenes se puede apreciar la situación del contacto en el Step en el que se ha aplicado la presión y el Step posterior en el que se desplaza la superficie del eje.

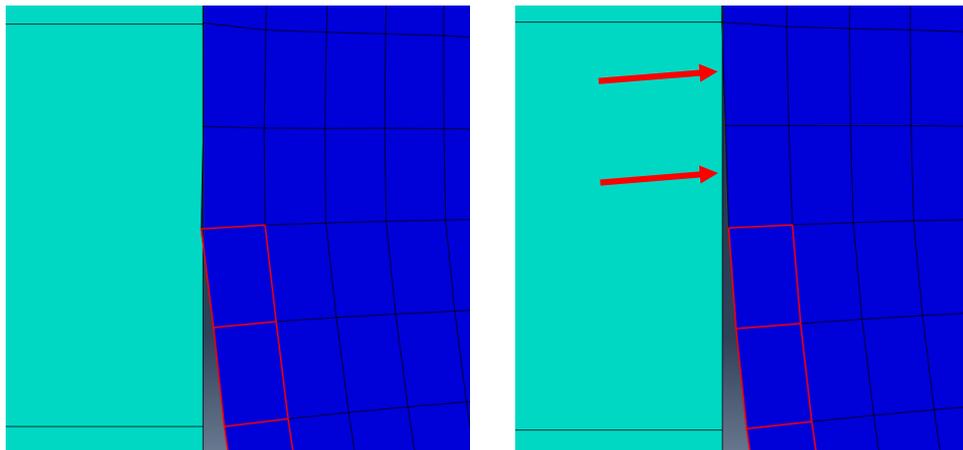
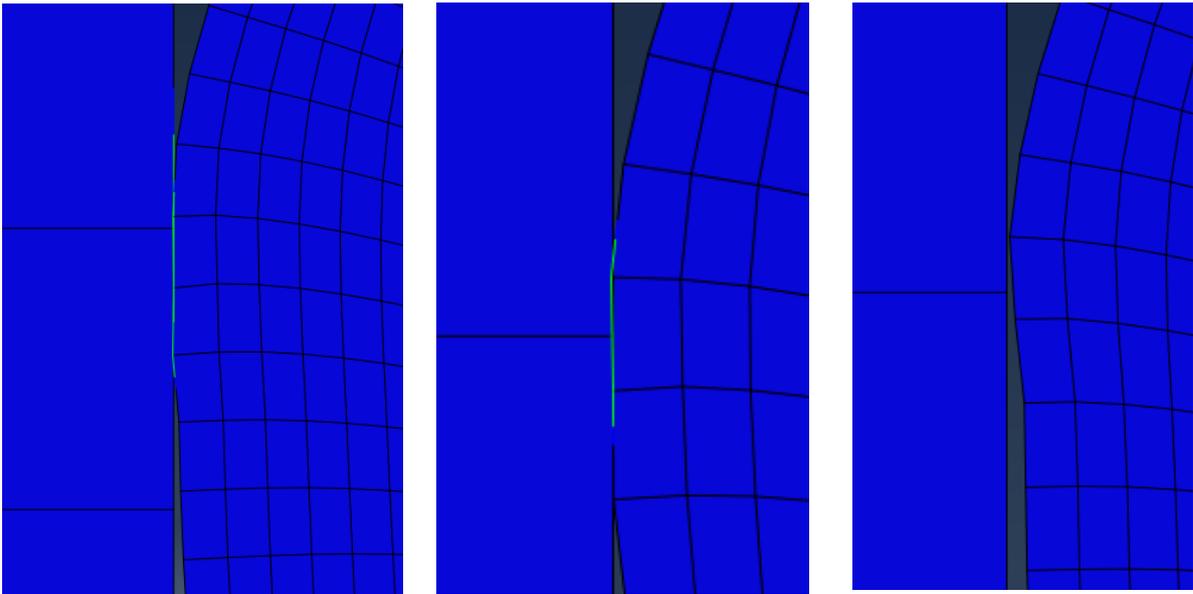


Ilustración 62: Detalle de los nodos sobre los que se amplia la presión aplicada

Como se puede apreciar, la nueva superficie expuesta al fluido deberá llevar aplicada una carga de presión de igual magnitud que el resto.

Para realizar la simulación correctamente, se han realizado steps iterativos en los que se intercalan reducción del diámetro del eje y corrección de la superficie donde se aplica la presión para comprobar en cada uno de ellos el estado del contacto "CSTATUS".

A continuación, se muestran el penúltimo y último step, donde se aprecia la apertura total del contacto y, por lo tanto, la situación de fuga.

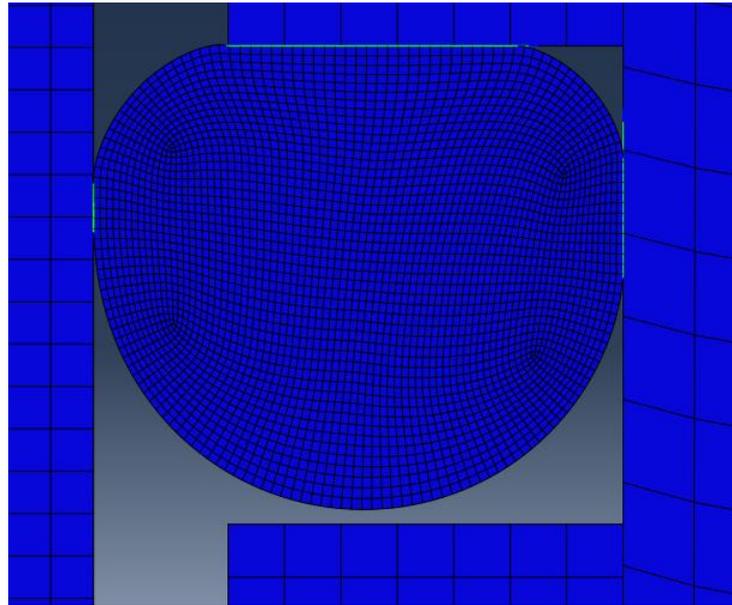


*Ilustración 63: Sucesivas iteraciones de corrección de la superficie sobre la que se aplica la presión*

Habiendo determinado el Step en el que aparecen fugas a través de la junta tórica, podemos establecer el Step anterior como situación límite en la que no hay fugas a través de la junta. Este Step corresponde a un desplazamiento de la pared vertical de 0.18 mm hacia la izquierda, por lo que **el diámetro del eje del piloto regulador deberá ser de  $8.4 - 0.18 \cdot 2 = 8.04\text{mm}$  según lo estudiado en esta simulación.**

#### *6.3.5.1 Comprobación de la simulación*

Para asegurar que el resultado obtenido en el proceso de simulación anterior, se realiza de nuevo una simulación, pero en esta ocasión introduciendo el eje con el diámetro obtenido previamente. Como se puede observar, tras realizar la compresión del conjunto y aplicar la carga de presión interior a las juntas tóricas, el contacto se encuentra cerrado, aunque casi en el límite. A la vista de estos resultados, acabamos determinando que según esta simulación el diámetro del eje obtenido en el apartado anterior es adecuado. En la siguiente imagen se muestra la situación del contacto.



*Ilustración 64: Estado final de la comprobación de la simulación*

## 7. Comparación de resultados de la simulación y experimentales

En esta sección, se recogen las pruebas realizadas para validar experimentalmente los resultados obtenidos en la simulación de elementos finitos.

Partamos de los resultados obtenidos en la simulación, donde se define un diámetro óptimo del eje de 8,04mm para un piloto PN16. Esto, como ya se ha explicado, implica que el piloto sea capaz de trabajar a 16 bar de manera habitual siendo capaz de funcionar durante pequeños instantes a 24 bar.

Para realizar los ensayos, se ha encargado la mecanización de varios prototipos del eje en cuestión que recogen las modificaciones ya explicadas en el proyecto. Se realizan 16 unidades diferentes, en las que se modifican 3 parámetros para ver la influencia en el funcionamiento del piloto.

A continuación, se muestra un plano donde se indican los parámetros modificados en cada eje prototipo:

- Cota A: Diámetro del eje
- Cota D: Diámetro de los agujeros pasantes
- Cotas B y C: Modifican la separación de los agujeros pasantes

Nº Pieza	"A"	"B"	"C"	"D"
2	8,1	22	5	2,5
3	8,1	21,5	6	2,5
4	8,1	21,5	6	2,5
5	8	22	5	2,5
6	8	21,5	6	2,5
7	8	21,5	6	3
8	7,95	22	5	2,5
9	7,95	21,5	6	2,5
10	7,95	21,5	6	3
11	7,9	22	5	2,5
12	7,9	21,5	6	2,5
13	7,9	21,5	6	3
14	7,85	22	5	2,5
15	7,85	21,5	6	2,5
16	7,85	21,5	6	3

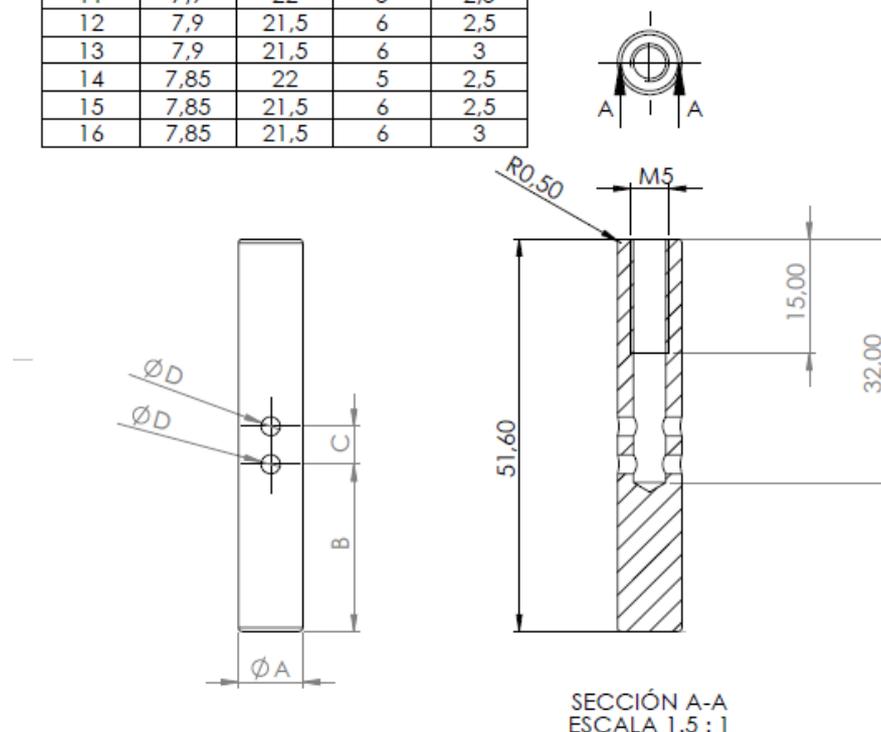


Ilustración 65: Plano de ejes prototipos

La modificación de la cota “D” se realiza para verificar si aumentando el diámetro de los orificios se reduce el tiempo de actuación ya que aumentamos el caudal de fluido que se comunica a través de estos.

La modificación de las cotas “B” y “C” implican que los agujeros pasantes estén más separados o menos, de modo que, con el mismo movimiento vertical del eje, cada uno de ellos se comunique antes con su respectiva conexión.

Aunque estas modificaciones no han sido objeto de estudio en el cálculo de elementos finitos, se han probado experimentalmente y se ha determinado que efectivamente aumenta el caudal que pasa a través del eje y que la posición en la que los agujeros están separados 6mm en vez de 5 es más beneficiosa, pues comunica las conexiones con un movimiento vertical menor y existiendo un punto “neutro” en el que las conexiones se encuentran aisladas.

En cuanto a la modificación de la cota “D”, que es la que se ha calculado en el estudio de elementos finitos, se van a probar los diferentes modelos de prototipo. En este caso:

- Prototipo Nº 16 → Diámetro exterior = 7.85 mm
- Prototipo Nº 13 → Diámetro exterior = 7.9 mm
- Prototipo Nº 10 → Diámetro exterior = 7.95 mm
- Prototipo Nº 7 → Diámetro exterior = 8 mm
- Prototipo Nº 4 → Diámetro exterior = 8.1 mm

Visto el resultado obtenido en la simulación, el diámetro óptimo se encuentra en un modelo intermedio entre el prototipo Nº 4 y Nº 7.

Para comprobarlo, se recrea la situación de la simulación comprimiendo el conjunto con el prisionero y presurizando la toma Nº3 utilizando una bomba manual.

A continuación, se muestra el montaje necesario para realizar las pruebas. La siguiente imagen, se corresponde con el montaje del eje nº 4, donde se puede apreciar en el manómetro que se alcanzan los 24 bar sin fugas.



En la siguiente tabla, se recogen los resultados obtenidos con cada uno de los ejes prototipo anteriormente detallados:

EJE (nº)	DIÁMETRO (mm)	Presión máx sin fugas (bar)
16	7.85	10
13	7.9	16
10	7.95	20
7	8	22
4	8.1	27

Por lo que los resultados obtenidos experimentalmente, se aproximan bastante con los resultados de la simulación.

Si hacemos una interpolación lineal entre los valores obtenidos con los ejes nº 7 y 4 y teniendo en cuenta que el diámetro obtenido de la simulación es 8.04mm, se podría aproximar que la presión de fuga con este diámetro es de 23.5 bar. Presión muy cercana a la presión de validación (24 bar).

## 8. Propuesta de diseño alternativa

En esta sección se pretende proponer una solución diferente a la problemática planteada en este proyecto. Como se ha explicado, el problema surge de la necesidad concreta y en los apartados anteriores se ha propuesto una mejora de diseño válida en la cual solo interviene la modificación, importante eso sí, de uno de los componentes.

La propuesta de diseño que se muestra en esta sección, supone modificar todos los componentes que intervienen en la comunicación de las conexiones del piloto regulador.

En las siguientes imágenes se muestran el cuerpo del piloto regulador con los componentes antiguos que deberían retirarse para el nuevo montaje.

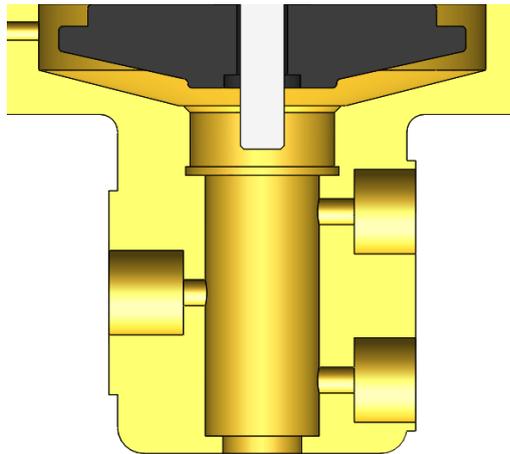


Ilustración 66: Cuerpo vacío

El nuevo diseño consistiría fundamentalmente de 2 tipos de pieza:

### 8.1 Componentes: Nuevo eje

Eje de acero con sus juntas tóricas del tamaño correspondiente:

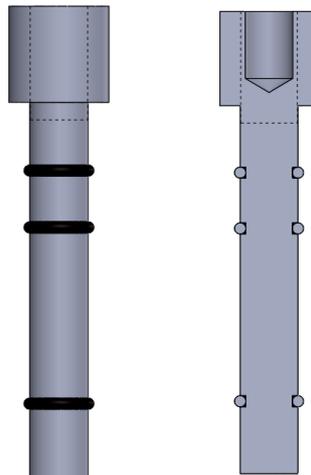
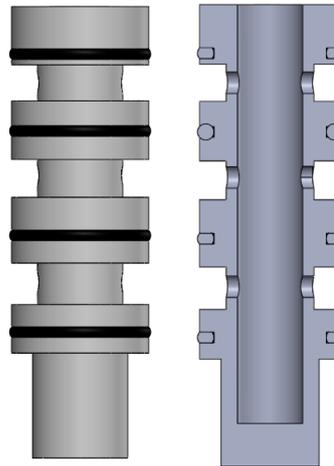


Ilustración 67: Eje de propuesta de diseño alternativa

Se trata de una única pieza en acero inoxidable con alojamientos ranurados para colocar juntas tóricas que una vez más serán las encargadas de realizar el sellado de las conexiones. Este eje, se movería por el interior del siguiente componente:

## 8.2 Componentes: Comunicador de teflón

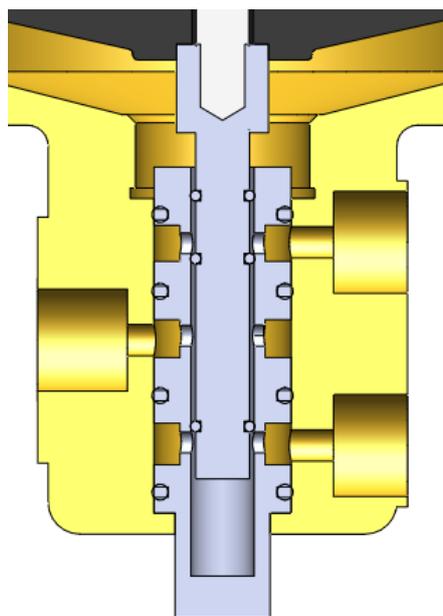
Pieza comunicadora de teflón (PTFE) con juntas tóricas:



*Ilustración 68: Comunicador de teflón*

Se trata de una pieza de revolución, fabricada en un material plástico llamado politetrafluoroetileno (PTFE) o comúnmente llamado teflón. Las ventajas que presenta este material, en cuanto a su producción, es que se trata de un material muy barato y muy fácil de mecanizar. Además, en cuanto a su funcionabilidad, el rozamiento que presenta su superficie es menor que la del acero. Recordar que el rozamiento en el movimiento del vástago es un aspecto clave de diseño.

## 8.3 Ensamblaje del nuevo diseño:



*Ilustración 69: Montaje de la propuesta de diseño alternativa*

Como se puede comprobar los nuevos componentes han sido adaptados para poder ensamblarse en la geometría existente.

El método de funcionamiento de este montaje, si bien sigue el mismo concepto de funcionamiento que el expuesto en el proyecto, trabaja de una manera un tanto diferente. La pieza de teflón, en parte exterior, aísla cada una de las conexiones gracias a sus juntas tóricas. Estas juntas tóricas no estarán en movimiento, por lo que su diseño no debe ser tan ajustado y se pueden sobredimensionar para asegurar la estanquidad.

La comunicación se realiza a través del volumen que queda libre entre la pared interior de la pieza de teflón y la superficie exterior del eje, y son las juntas tóricas del eje las que bloquean el paso de flujo de una conexión a otra.

#### 8.4 Ventajas

Este tipo de diseño presenta, en mi opinión, ventajas sobre el expuesto en este trabajo:

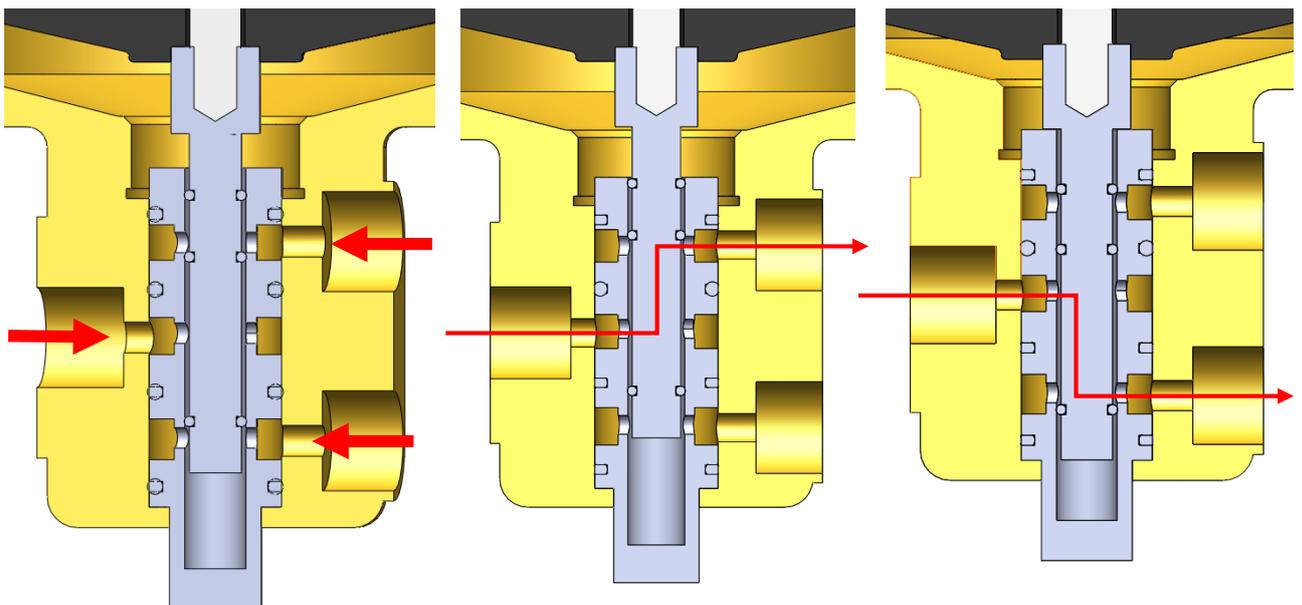
El teflón, a diferencia de cualquier metal sólido, presenta muy poca fricción. Por lo tanto, la funcionalidad debería ser mejor ya que el rozamiento existente entre los componentes junta-teflón es menor que el de junta-acero.

Pero lo que en mi opinión hace este diseño más apropiado, es que los componentes son mucho más sencillos de fabricar, además de que en el conjunto intervienen menos componentes y son más sencillos que los anteriores, sobretodo prisionero y jaulas.

Incluso el proceso de montaje de esta parte del piloto es más sencillo, pues la pieza de teflón se montaría por compresión en el cuerpo del piloto, y el eje entraría ajustado a la pieza de teflón.

#### 8.5 Modo de funcionamiento

A continuación, se muestra la funcionalidad de este diseño:



*Ilustración 70: Mecanismo de comunicación de la propuesta alternativa*

De izquierda a derecha, tenemos:

- 1) Situación de cierre: Todas las conexiones son independientes. Las juntas tóricas del eje no permiten el paso de agua de una conexión a ninguna otra
- 2) Comunicación de la conexión nº 3 con la nº 2: El flujo transcurre entre estas conexiones por el interior de la pieza de teflón.
- 3) Comunicación de la conexión nº 3 con la nº 4: El flujo transcurre entre estas conexiones por el interior de la pieza de teflón.

Como se puede observar en las imágenes, el movimiento del eje estaría limitado por geometría, no pudiendo ir más allá de las posiciones que se muestran en las figuras del medio y derecha, que corresponden con las que comunican la conexión nº 3.

## 9. Conclusiones

El proyecto surge de una necesidad real de la empresa. Con unas condiciones impuestas por el diseño existente se ha propuesto un rediseño de uno de los componentes para atacar la problemática detectada en el funcionamiento del piloto regulador.

Previa a la realización de lo expuesto en este proyecto, existe un trabajo de comprensión del funcionamiento del dispositivo, observando su comportamiento en condiciones reales de trabajo. Con todo ello, se han determinado unos aspectos funcionales clave que impiden el correcto desempeño del piloto. Conocer la defectología, ha permitido definir el modo de actuación sobre la geometría existente, que impone una serie de restricciones geométricas.

Para determinar con precisión la geometría del eje del piloto, se ha recurrido a una herramienta de simulación en elementos finitos. Ésta se ha utilizado tanto para recrear la situación real de trabajo del piloto como para evaluar y definir los materiales hiperelásticos existentes en el conjunto en forma de juntas tóricas.

Se considera que la evaluación de este material es de gran importancia, dada la influencia sobre el funcionamiento que tienen las juntas tóricas. Se ha caracterizado y comparado satisfactoriamente su comportamiento a través de uno de los modelos en términos de energía de deformación.

Sabiendo de la precisión que conocer las características del material aporta al estudio, se considera como punto a desarrollar posteriormente a este trabajo de fin de máster, el determinar las propiedades de contacto entre la superficie exterior del eje y la junta tórica. Si bien, se ha demostrado que, en este caso, la influencia de este parámetro, moviéndonos dentro de unos rangos razonables, no afecta demasiado al resultado de la simulación.

En el proyecto se ha incidido sobre una mejora de diseño que modifica una única pieza del conjunto. Se ha comprobado que la solución es válida y factible, tanto en términos funcionales como en términos de fabricación/económicos, siendo la intención de la empresa de implementarla y sacar el nuevo conjunto al mercado.

Aunque también se ha propuesto una mejora alternativa, que, en mi opinión, tiene una serie de ventajas respecto a la estudiada, si bien, implica la modificación de todo el conjunto de comunicación de conexiones.

Para concluir, considero que la realización de este proyecto me ha permitido utilizar los conocimientos adquiridos a lo largo de mi formación académica y reflejar el aprendizaje adquirido, para ayudándome de herramientas de diseño y simulación, proporcionar una solución válida a una necesidad real de la empresa.

## 10. Bibliografía

### Normas técnicas:

[https://portal-aenormas-aenor-com.cuarzo.unizar.es:9443/aenor/suscripciones/personal/pagina\\_per\\_buscadore.asp](https://portal-aenormas-aenor-com.cuarzo.unizar.es:9443/aenor/suscripciones/personal/pagina_per_buscadore.asp)

### Artículo Mooney-Rivlin

<https://medium.com/@getwelsim/mooney-rivlin-hyperelastic-model-for-nonlinear-finite-element-analysis-b0a9a0459e98>  
:~:text=An%20example%20of%20Mooney%2DRivlin%20hyperelastic%20analysis&text=Her e%20we%20define%20the%20rubber,%3D%200.001%20MPa%5E%2D1.

### Simulación de juntas tóricas:

<https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/24338/d12-simulation-and-calibration-of-rubber-materials-for-seals.pdf>

### Catálogo Santoprene:

[https://exxonmobilchemical.ides.com/en-US/ds244548/Santoprene%E2%84%A2\\_8201-70.aspx?l=74710&U=0](https://exxonmobilchemical.ides.com/en-US/ds244548/Santoprene%E2%84%A2_8201-70.aspx?l=74710&U=0)

### Propiedades de elastómeros:

[http://www.allsealsinc.com/03\\_Elastomers-Materials.pdf](http://www.allsealsinc.com/03_Elastomers-Materials.pdf)

### Estudio de comportamiento a fricción de materiales hiperelásticos (1):

<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1010616/FULLTEXT01.pdf>

### Estudios de comportamiento a fricción de materiales hiperelásticos (2):

<InfluenceofAl2O3particlesonthefrictionandwearbehaviorsofnitrilerubberagainst316Lstainlesssteel-.pdf>

### Bachelor Thesis in Mechanical Engineering:

<https://core.ac.uk/reader/41824540>

### Artículo modelo Ogden (1):

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/ogden-model>

### Artículo modelo Ogden (2):

<https://medium.com/@getwelsim/ogden-hyperelastic-model-for-nonlinear-finite-element-analysis-df9518de3b48>

### Estudio comportamiento a compresión:

<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6040/11Mss11de14.pdf?sequence=11&isAll owed=y>  
:~:text=En%20compresi%C3%B3n%20el%20mecanismo%20de,que%20contienen%20mater ial%20altamente%20deformado.

