



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



Máster Universitario  
en Simulación Numérica  
en Ciencia e Ingeniería  
con COMSOL Multiphysics

# TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Modelización de ensayo de tribología para obtener las propiedades de  
desgaste de material para posterior optimización**

MÁSTER UNIVERSITARIO en

SIMULACIÓN NUMÉRICA EN CIENCIA E INGENIERÍA

con COMSOL MULTIPHYSICS

Autor: María Begoña Serrano Castillo

Tutor: Javier Gómez (Advanced Material Simulation)

Cotutor: Benjamin Ivorra

JUNIO de 2021



## 1. Descripción General

Este Trabajo Fin de Máster (TFM) forma parte del trabajo numérico llevado a cabo por la empresa Advanced Material Simulation (AMS) dentro del proyecto de investigación europeo del programa H2020, "LIGHTCOCE". Dicho proyecto tiene como objetivo cubrir la brecha entre la industria y expertos en los estudios multifuncionales de materiales.

En este trabajo se aborda el desarrollo de un modelo estándar de ensayo tribológico pin-on-disk, para obtener las propiedades de desgaste del material, para su posterior optimización a través de MATLAB. Con el objetivo de la utilización de dichas propiedades óptimas, en un modelo de apriete del tornillo de una válvula de alta presión, y el posterior cálculo del desgaste en el apriete de dicho tornillo.

Aún siendo los estudios de tribología una tarea compleja debido a la naturaleza multidisciplinar y estocástica de estos procesos como la superficie topográfica, calor de fricción, reacciones químicas, etc....

El modelo propuesto para el estudio analítico de desgaste es simple en geometría, y no se han tenido en cuenta todo lo referente al efecto termodinámico en el ensayo tribológico ni reacciones químicas. Dado que el trabajo por parte de la empresa en este proyecto es específicamente sobre las características de los materiales, por tanto, la colaboración con ellos se ha basado en encontrar un modelo numérico y un método para obtener las propiedades del material.

En la revisión de la literatura que se puede encontrar sobre este tema se comprueba que se deben realizar muchas simplificaciones para que las simulaciones sean factibles de analizar. Aún así este trabajo tiene la característica que el desgaste se produce en la parte del pin en contacto con el disco (bola). Todo esto se irá desarrollando en los siguientes puntos de esta memoria.

Por último, se debe resaltar que al tratarse de una colaboración entre distintas instituciones europeas, las fechas con la finalización del TFM no han sido compatibles con la recopilación de datos experimentales. Por tanto, en acuerdo con empresa y profesores, se ha adecuado el modelo y el proceso basado en artículos pero con la validación de que el set-up del modelo físico podrá ser utilizado por la empresa una vez hayan recopilado los datos. Quedando así como trabajo futuro, el modelado con los datos experimentales y su aplicación en el tornillo de la válvula, cuyo modelo si ha sido desarrollado en paralelo al del ensayo para este TFM. Se amplía información sobre estos futuros trabajos en el punto correspondiente a Conclusiones de esta memoria.

## 2. Fundamento Teórico

En esta sección se intenta presentar tanto la tribología como sus temas relevantes para este trabajo, y una revisión sobre el modelado de desgaste por medios numéricos junto a una breve explicación sobre el ensayo en sí.

Es importante tener una buena comprensión de los fenómenos que pueden ocurrir en el contacto tribológico de un sistema de deslizamiento recíproco linealmente, no solo para la comprensión de los eventos en experimentos y aplicaciones reales, sino también para la capacidad de analizar críticamente la validez de las simulaciones.

Una definición de la tribología, es la “ciencia y tecnología de la interacción entre superficies en movimiento relativo e involucra el estudio de la fricción, el desgaste y lubricación y de las prácticas relacionadas con las mismas”. Esta ciencia no solo comprende fenómenos mecánicos, sino varios temas de la ciencia de los materiales y la química, lo que lo convierte en un campo muy interdisciplinario.

Dentro de esta ciencia solo explicaremos el fundamento teórico del desgaste desde el punto de vista del modelado numérico, dado que es el tema principal de este TFM. Aunque a continuación se explica brevemente en qué consiste el ensayo pin-on-disk (perno en disco), encontrando más información en la norma ASTM G99-17, *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*.

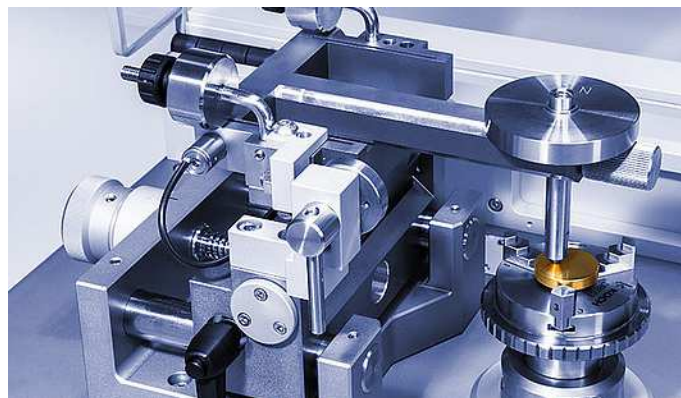


Figura 1. Tribómetro tipo pin-on-disk

El pin (perno) se presiona a una carga específica contra el disk (disco) posicionando el extremo en contacto perpendicular al disco, y bien el disco o el perno rotan respecto al centro del disco. Los resultados de desgaste en algunos casos son reportados como pérdidas volumétricas versus la distancia de deslizamiento.

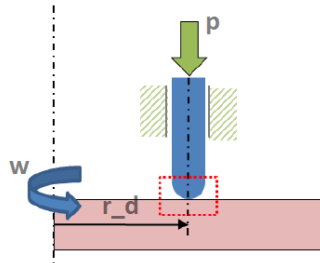


Figura 2. Esquema del ensayo pin-on-disk

Una vez que se resuelve el tema de contacto y conseguimos la distribución de la presión después del estudio estacionario, Comsol utiliza estas soluciones para el cálculo del desgaste, esto lo veremos un poco más extenso en el punto 6 de ecuaciones e interfaces físicas.

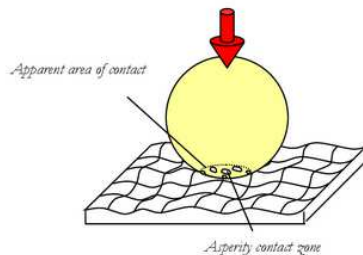


Figura 3. Contacto del estudio solo la bola del perno se desgasta

El desgaste ocurre cuando un fragmento de material desprende asperezas durante un contacto. En este trabajo se estudia el desgaste en la bola como se ha comentado y se puede ver en la figura 3.

A partir de la ecuación de Archard la cual se ha convertido en la ecuación estándar para el campo de tribología. La conocida ecuación de Archard para desgaste:

$$V = \frac{KW_s}{H} \quad (1)$$

*s*: desplazamiento relativo entre las partes

*V*: volumen del material desgastado

*K*: coeficiente de desgaste

*H*: dureza de Brinell del material suave del par de contacto

*W*: fuerza normal

Se introduce el ratio específico de desgaste por el área obtenemos una expresión para calcular el desgaste local si el contacto de la presión es conocido:

$$h = kps \quad (2)$$

Donde  $h$  es la profundidad de desgaste en la superficie,  $p$  la presión de contacto y  $s$  es la distancia de deslizamiento. Al ser el desgaste un proceso dinámico y el ratio de desgaste lo podemos obtener derivando la ecuación (2) respecto al tiempo, llegamos a la velocidad de deslizamiento  $v_s$  en la ecuación y por tanto, a la ecuación modificada de Archard:

$$\frac{dh(t)}{dt} = kp(t)v_s(t) \quad (3)$$

$$\frac{dh(t)}{dt} = \dot{w} : \text{ratio de desgaste} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$k$ : constante de desgaste [ $Pa^{-1}$ ]

$p$ : presión de contacto

$v_s$ : velocidad de deslizamiento

En general el desgaste se va produciendo lentamente pero la linealidad del proceso utilizando la ecuación de Archard, tienen un alto coste computacional. Es debido a esto que este trabajo no se ha podido finalizar con la propuesta original, el coste de tiempo en simulaciones es muy alto para obtener resultados óptimos.

### 3. Geometría

El modelo utilizado para obtener las características del desgaste se ha realizado en 3D con un pequeño estudio previo en 2D para clarificar el set-up de la física y sus interfaces en 3D, este paso previo del 2D es muy recomendable como verificación dado que este tipo de estudios necesitan mucho tiempo de simulación.

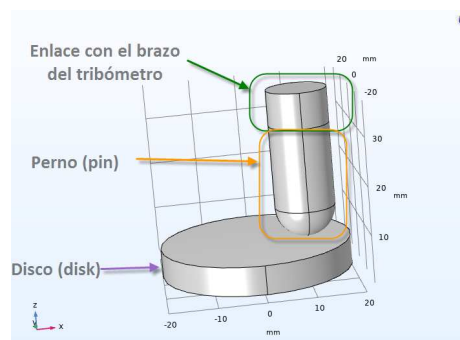


Figura 4. Modelo 3D en Comsol

La parte de enlace con el brazo del tribómetro se ha reducido a partir de una partición de dominios para poder aplicar las restricciones aplicadas en la física de una manera simplificada.

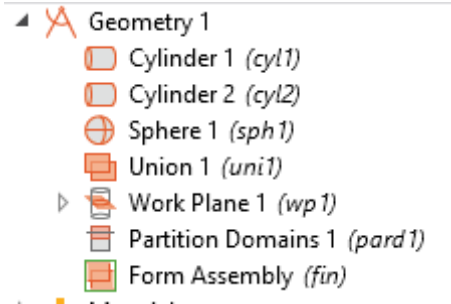
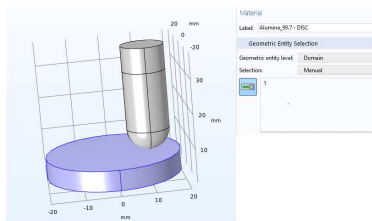


Figura 5. Árbol de la geometría en el Model Builder

Al ser una geometría bastante sencilla no se ha considerado necesario la parametrización de sus dimensiones. En cambio se han definido solo aquellos parámetros que se han considerado “universales”, es decir, con este concepto de modelo solo se deben cambiar esos parámetros para conseguir los datos de salida necesario para optimizar en MATLAB.

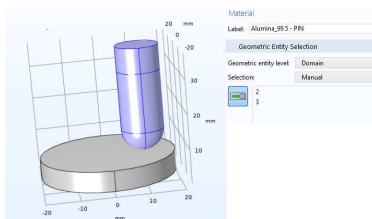
## 4. Materiales

Los materiales utilizados para este ensayo ha sido Alumina para todos los dominios pero no de la misma pureza, así el perno es Alumina 99.5 y el disco de Alumina 99.7.



Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	3.93[g/cm <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Young's modulus	E	393[GPa]	Pa	Young's modulus and Poisson's...
<input checked="" type="checkbox"/> Poisson's ratio	nu	0.23	1	Young's modulus and Poisson's...
Coefficient of thermal expansion	alpha_iso...	8e-6[1/K]	1/K	Basic
Heat capacity at constant pressure	Cp	900[J/(kg*K)]	J/(kg-K)	Basic
Thermal conductivity	k_iso ; kii...	27[W/(m*K)]	W/(m-K)	Basic

Figura 6. Material del disco



Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	3.88[g/cm <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Young's modulus	E	379[GPa]	Pa	Young's modulus and Poisson's...
<input checked="" type="checkbox"/> Poisson's ratio	nu	0.23	1	Young's modulus and Poisson's...
Coefficient of thermal expansion	alpha_iso...	8e-6[1/K]	1/K	Basic
Heat capacity at constant pressure	Cp	900[J/(kg*K)]	J/(kg-K)	Basic
Thermal conductivity	k_iso ; kii...	27[W/(m*K)]	W/(m-K)	Basic

Figura 7. Material del perno

## 5. Ecuaciones e Interfaces Físicas

En este trabajo no ha hecho falta nada más que una física, de hecho se encuentran presentaciones donde se explica cómo antes de esta versión 5.6 de COMSOL para el estudio de desgaste (*wear*), las ecuaciones no estaban directamente implementadas. Entonces, se debía calcular con la implementación de una Ecuación Diferencial Ordinaria de Contorno (*Boundary Ordinary Differential Equation (ODE)*).

La física utilizada es *Solid Mechanics* es una de las que permite la interfaz de contactos, *Contact* en la cual se encuentra la interfaz de desgaste, *Wear*. Que es lo principal para llevar a cabo este trabajo.

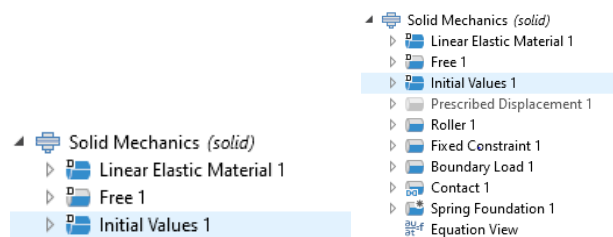


Figura 8. Árbol por defecto de la física (izquierda) y árbol completo con las interfaces utilizadas (derecha)

A continuación, se desgrena cada una de las interfaces dentro de la física *Solid Mechanics* y el porqué de su utilización así como las ecuaciones y parámetros utilizados. Para empezar con un estudio de contacto debemos definir el sistema de coordenadas en el cual nos gustaría trabajar así como el par de contacto, *Contact Pair*.

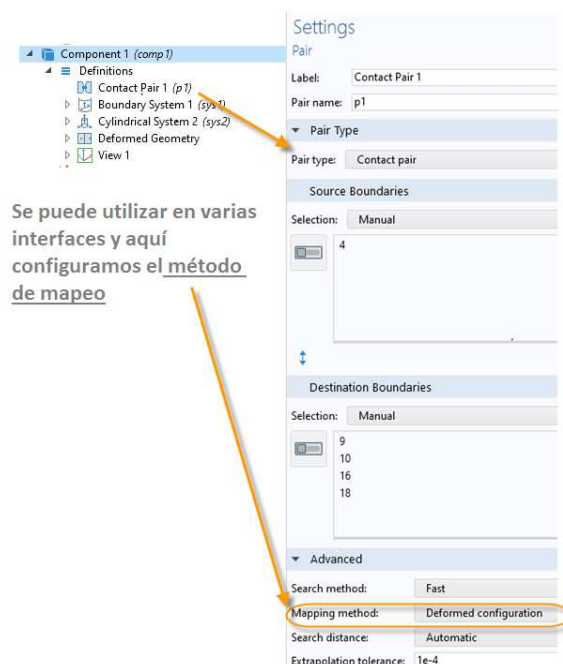


Figura 9. Configuración del Contact Pair

Dado que este tipo de ensayo es para grandes deslizamientos entre los contornos el método recomendado es el *Deformed configuration*.

Es de gran importancia definir este nodo correctamente porque seleccionamos la fuente y el destino de nuestro contacto. Los contactos mecánicos usan una formulación asimétrica, las ecuaciones son formuladas en el lado de destino. Desde Comsol se recomienda que el material más blando se encuentre en el destino y es en este destino donde se aplicará además, el mallado más fino. Veremos más sobre malla en su apartado correspondiente.

Este par de contacto debe ser configurado dentro de la geometría, es decir, por defecto la geometría nos forma una unión pero al existir contacto esta unión se debe cambiar a *Assembly*, eligiendo el tipo de contacto que hemos elegido.

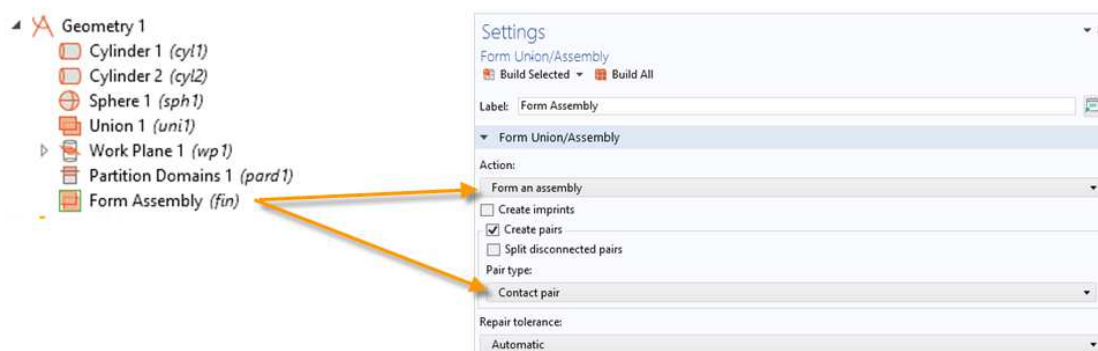


Figura 10. Configuración del Contact Pair dentro de la geometría

Estos pasos previos son muy importantes para la interfaz de contactos que se aplica en este trabajo. A continuación, se desarrolla la interfaz de contacto y el resto se desarrollará en el siguiente punto de Condiciones de Contorno.

Dentro de la interfaz *Contact* es justo donde debemos añadir este par de contacto creado anteriormente y se estudia la brecha entre las partes en contacto. Además, para este trabajo se debe añadir los nodos de *Wear* y *Slip Velocity*, los cuales se explican a continuación gráficamente.



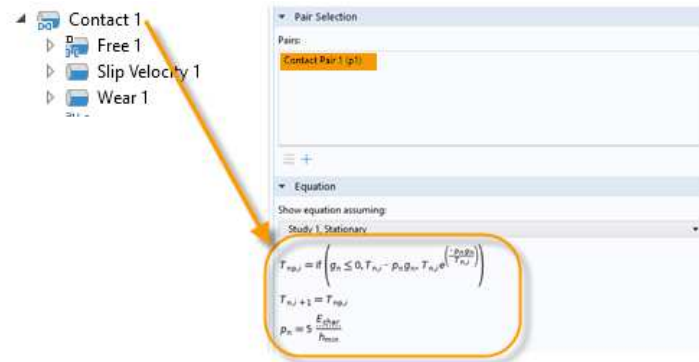


Figura 11. Interfaz de Contact con su formulación

El tipo de contacto Hertziano que se da en este trabajo necesita de una buena precisión de ahí que se haya elegido como método de contacto *Augmented Lagrangian*.

En el nodo *Slip Velocity* se define está teniendo en cuenta el sistema de referencia definido con anterioridad, en este trabajo se ha utilizado un sistema cilíndrico. Se utilizan los parámetros definidos en *Parameters* y son los únicos que necesitamos cambiar una vez que se reciban los datos experimentales.

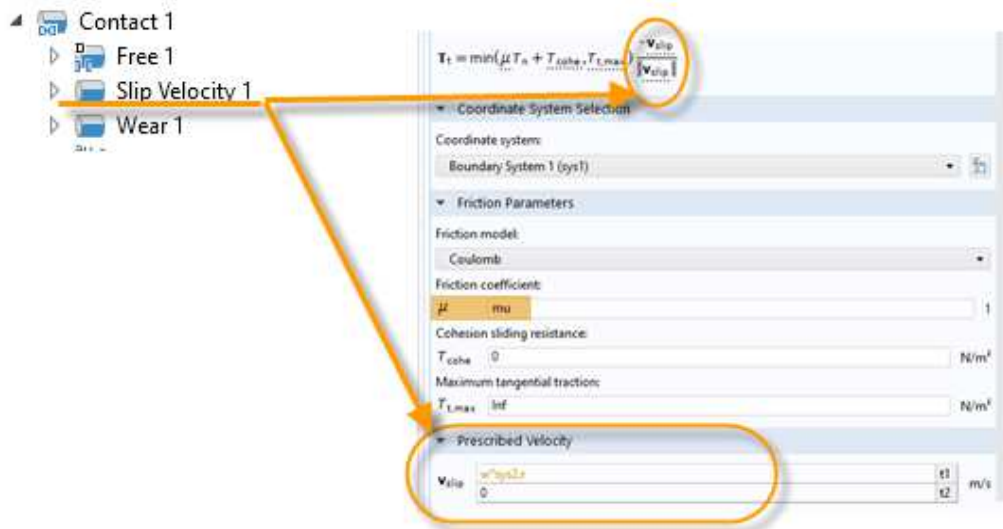


Figura 12. Propiedades de Slip Velocity

Por último, se muestran las propiedades de desgaste, *Wear*, donde se aplica la ecuación de Archard al igual que se designa donde ocurre el desgaste, fuente o destino.

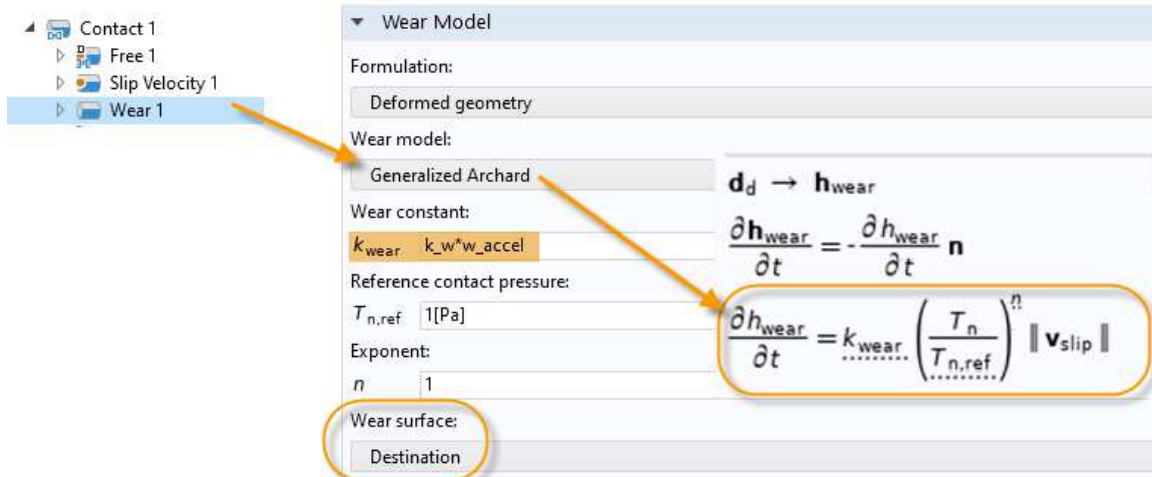


Figura 13. Propiedades de Wear

$T_n$  es la presión de contacto,  $T_{n,ref}$  es la de referencia,  $n$  es un exponente adimensional, tanto el exponente como la presión de referencia tienen valor de 1 por defecto, y así la ecuación se corresponde con la ecuación clásica de Archard que ya se explicó anteriormente.

En la constante de desgaste, definida por el parámetro  $k_w$ , esta constante se encuentra multiplicada por un factor de aceleración,  $w_{accel}$ . Este factor se recomienda porque los problemas de desgaste requieren de periodos muy largos de tiempo para generar desgaste de profundidad. Con esta manera de abordar este problema con el tiempo, el resultado se podría interpretar como si se estuviera simulando por tantas veces el periodo usado.

Como se comentó en la sección sobre la definición del Par de contacto se comprueba que es en el nodo de *Wear* donde se elige donde se produce el desgaste, en este estudio se produce en el destino.

## 6. Condiciones de Contorno

En esta sección se detallan el resto de interfaces declaradas dentro de la física para poder solucionar estos tipos de ensayos, y las cuales se asignan a los contornos.

Se empieza fijando el perno por la parte superior, como se ha visto en secciones anteriores este está sujeto o conectado con un brazo mecánico que le transmite la presión que se quiere ejercer sobre el disco.

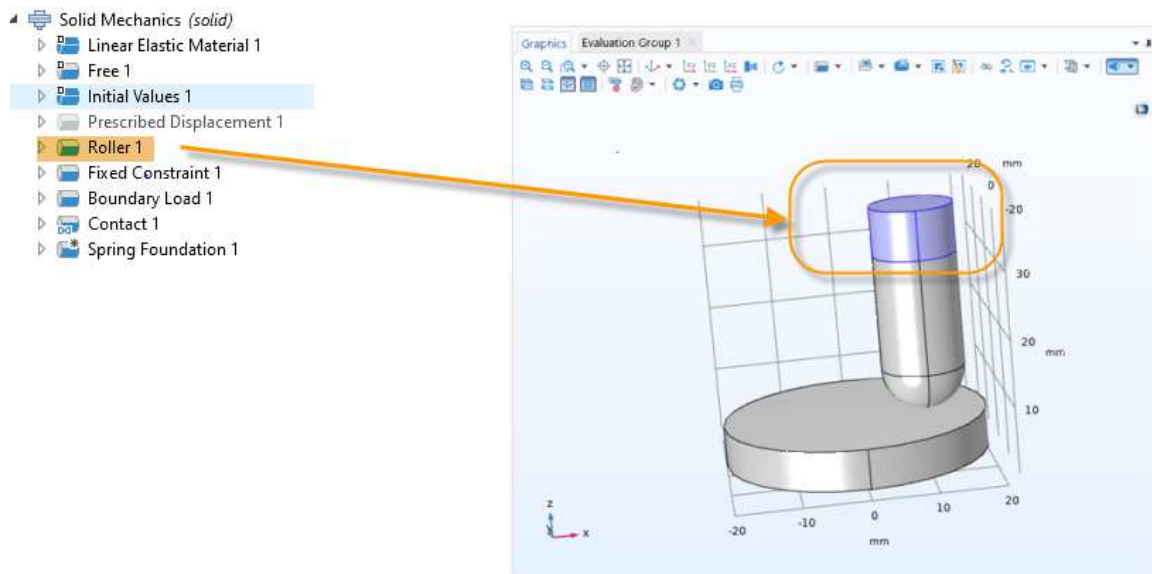


Figura 14. Roller

Esta restricción nos ayuda a solventar el problema de falta de equilibrio al comenzar el cálculo, esto se podría conseguir también con *Rigid Motion Supression* pero en el segundo paso de estudio fallaría. Por eso, *Roller* es el que mejor se adapta a la configuración elegida para el modelo.

El disco tiene una cara considerada fija que es la que está en contacto con la mesa de ensayo, esto lo hacemos usando un *Fixed Constraint*.

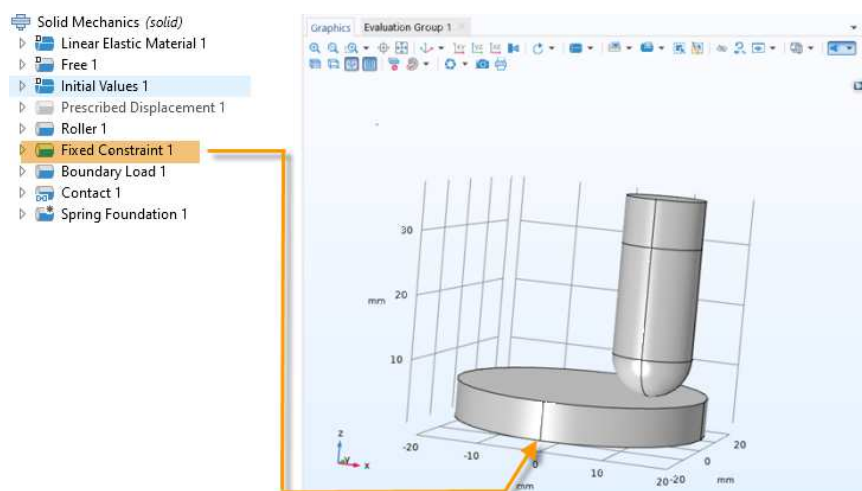


Figura 15. Fixed Constraint

La carga que se aplica al pin para que vaya presionando el disco y se produzca el desgaste se aplica en la parte superior del pin (perno). Esta carga es otra de las variables que hemos definido en los parámetros.

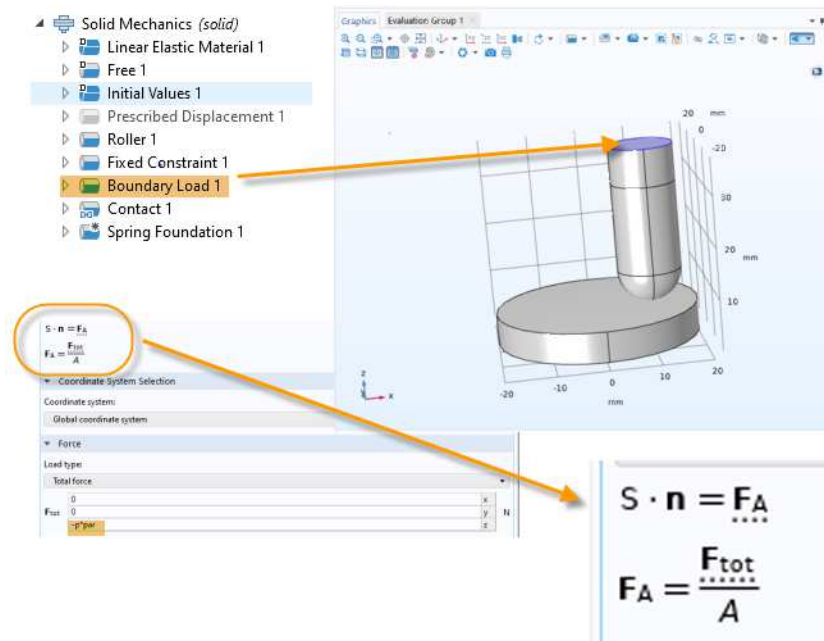


Figura 16. Boundary Load

Se puede ver que el parámetro que describe la carga,  $p$ , está multiplicado por un factor  $par$ , este se explicará en la sección 8. Estudios.

Y por último, se añade un *Spring Foundation* en la terminación del perno para las restricción del disco, además, esto nos ayuda a conseguir la convergencia del primer paso con un parámetro decreciente, dentro de un *Auxiliary Sweep* (barrido auxiliar) dentro del estudio estacionario.

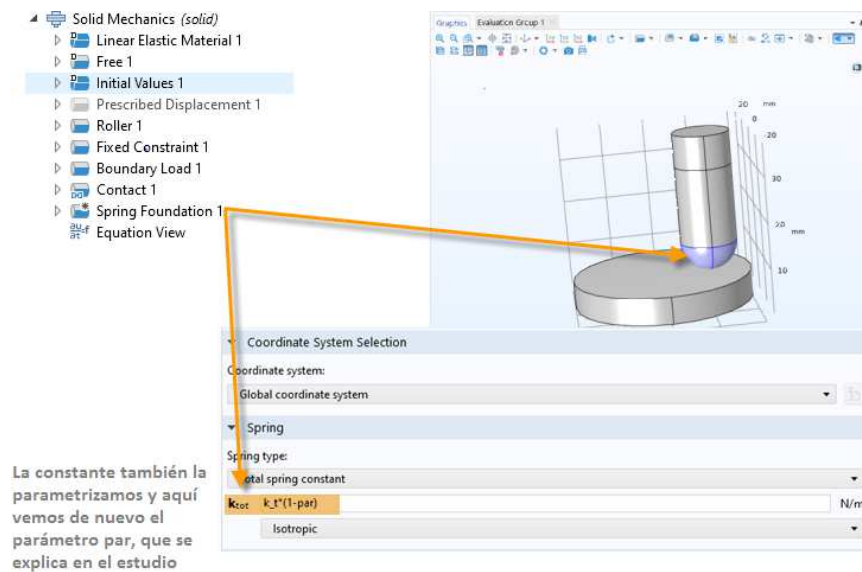


Figura 17. Spring Foundation

## 7. Malla

En el modelado de contactos mecánicos el mallado es tan importante como en cualquier otra física e interfaz. Sobre el mallado con contacto mecánico existe mucha información en los blogs de Comsol donde se recomienda que entre una pieza de contacto con la otra, existe un “salto” de tamaño de mallado. Con esto quieren decir, primero que la malla más fina se definirá en la pieza definida en el *Contact Pair* como *Destination*, a su vez, el material más blando.

En el caso de que la *Source* sea no deformable cualquier malla que describa apropiadamente la geometría puede ser utilizada.

Para este trabajo se han seguido las recomendaciones mencionadas anteriormente, es decir, las zonas no deformables tienen mallado barrido siguiendo la geometría. Tamaños distintos dependiendo si son zonas en contacto o no. Y, en este caso es la bola del perno que se encuentra en contacto con el disco la que adquiere el tamaño más fino, dado que es la parte del contacto definida como *Destination*.

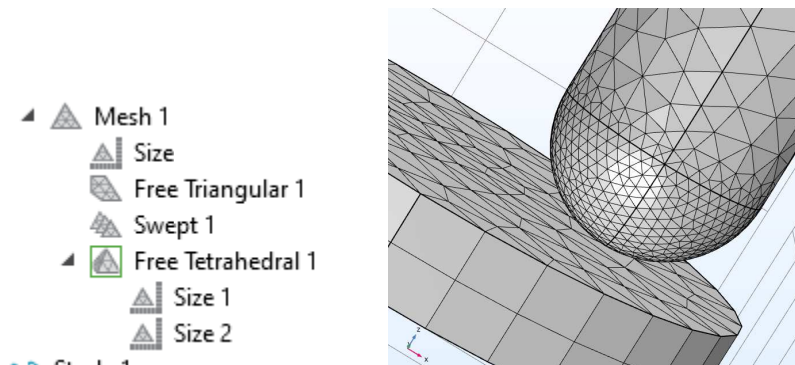


Figura 18. Mallado de las partes en contacto

## 8. Estudios

Para los estudios de contacto se necesitan hacer dos estudios o en dos pasos, uno estacionario, donde no hay desplazamientos. Y, otro estudio temporal donde se resuelve el problema de desgaste. En la sección donde se explican las ecuaciones e interfaces físicas ya se comentó sobre el parámetro, *par*, creado para ayudar al resolvidor. Se le añadió a la carga en *Boundary Load*, a la *spring constant* en *Spring Foundation* y se le añadirá a este estudio de barrido auxiliar con un rango de 0 a 1.

Esto se debe porque inicialmente tenemos un problema de restricciones en el modelo, por eso se añade el nodo *Spring Foundation* la cual añade durante el comienzo de la simulación un resorte débil limitando los movimientos del cuerpo rígido. Este parámetro, *par*, se usa para definir la rigidez de dicho resorte.

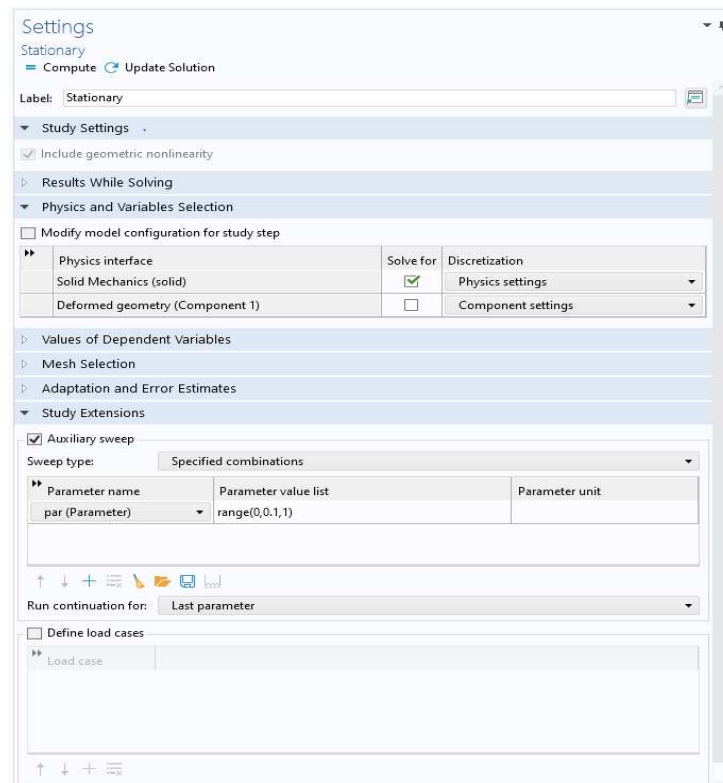


Figura 19. Propiedades del estudio estacionario

Tanto el *Spring Foundation* como la *Boundary Load* utilizan el parámetro, *par*, como ya hemos visto y cuando este parámetro alcanza 1, la carga es la deseada y el *spring* deja de actuar.

Algunas escalas en las variables deben ser ajustadas, tanto en el estudio estacionario como en el estudio temporal.

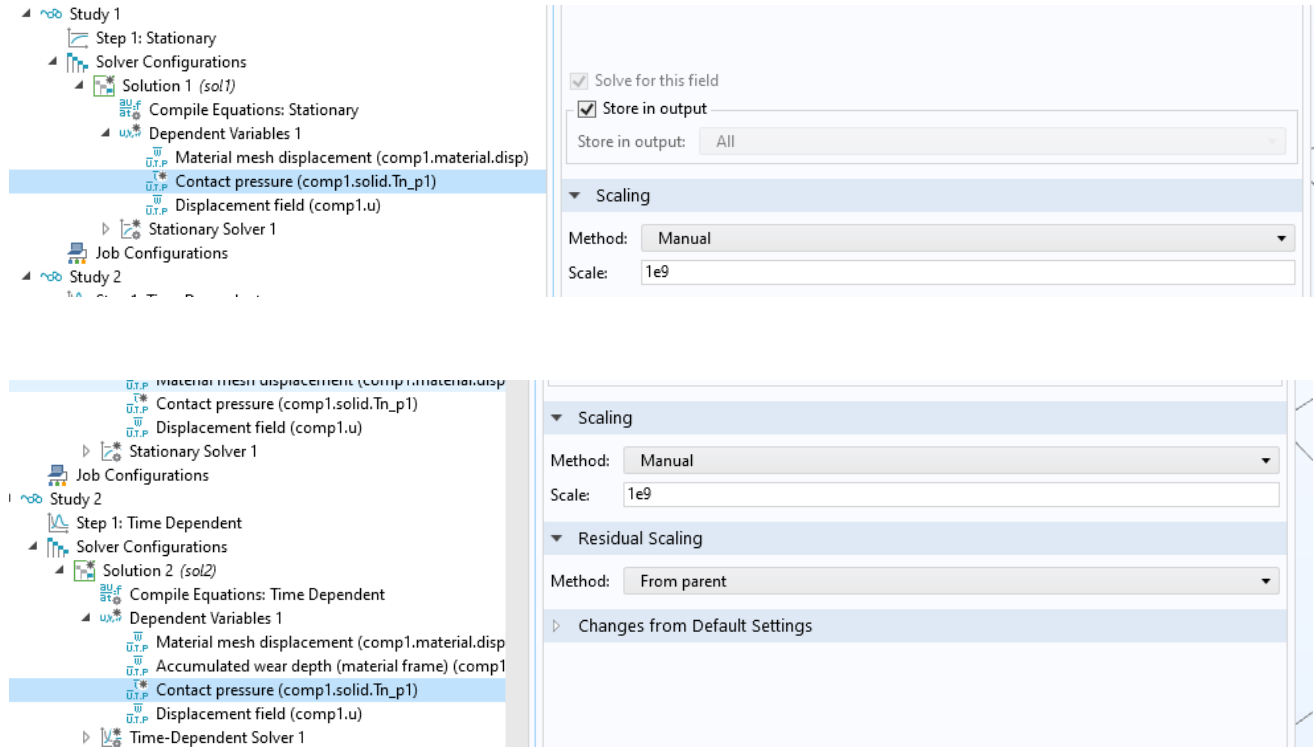


Figura 20. Escalas en las variables dependientes de cada estudio

El estudio temporal tomará como método de partida la solución del estudio estacionario, además de resolver las físicas en secuencia como se puede observar en la figura 21. Dentro de la ventana de propiedades variamos el contenido de las físicas y sus variables las cuales controlan las interfaces de la física. Esto es bastante útil cuando se quiere resolver en secuencia como ya se ha mencionado o, comparando diferente casos de análisis para un modelo, por ejemplo comparten misma geometría y material. Esto se hace variando las condiciones de contorno o las variables y así no tenemos necesidad de habilitar y deshabilitar los nodos en la física.

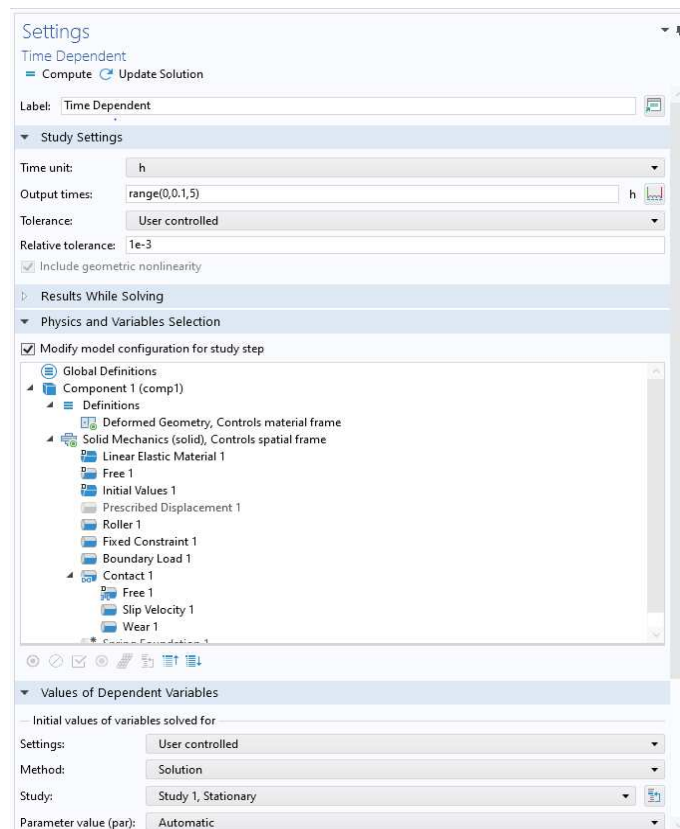


Figura 21. Configuración del estudio temporal

Dentro de esta sección se hará mención al estudio de optimización comenzado con los resultados obtenidos, haciendo hincapié en que no recibimos los datos experimentales a tiempo y estos ensayos necesitan tiempo de computación al igual que la optimización.

Como se menciona en la sección de conclusiones queda para trabajo futuro aunque ya se haya comenzado. Para estos temas de optimización lo primero es comparar la curva experimental con la curva numérica, con el objetivo de encontrar los parámetros del modelo de desgaste que mejor reproducen los resultados experimentales.

Hemos supuesto que los resultados experimentales son *Wear volumen versus Slip distance*, en la siguiente sección se presentan algunos resultados.

Calculamos el área entre las curvas o la diferencia al cuadrado de los valores y minimizamos esa área y obtenemos la propiedad óptima del material. Se barajaron distintos métodos pero se decidió ir con el siguiente método de optimización.

Método: Construimos una función Matlab como input  $k_{wear}$ ,  $n$  y como output la distancia entre la función experimental y la correspondiente función numérica. Comsol estaría como parte de la función. Se aplica un algoritmo de optimización de Matlab. Se podría realizar el acoplamiento del Algoritmo Genético (AG) que hemos aprendido a hacer durante este máster. La empresa ha preferido utilizar su propia metodología.



El archivo original de Comsol en Matlab ha sido modificado el tamaño de la malla como se comenta en la sección de Conclusiones como estrategia, consiguiendo un tiempo más corto.

La curva experimental todavía no existe por carencia de datos, se ha creado una numérica en Excel que se adjunta con esta memoria. Este algoritmo tiene oscilaciones por lo que se deduce que hay que seguir trabajando en él.

## 9. Resultados Obtenidos

Como se viene comentando durante esta memoria la falta de tiempo no ha hecho posible la realización completa de este trabajo. Aunque se consiguió configurar un modelo tipo concepto el cual se puede aplicar para el objetivo principal de este TFM una vez se reciban los datos experimentales.

A continuación, se presentan algunos de los resultados obtenidos tanto de esfuerzos, distancia de deslizamiento, profundidad de desgaste, así como tablas donde se han estudiado valores derivados (media de la superficie e integral) para llegar a obtener la gráfica que se espera recibir de parte del laboratorio, *Wear volumen vs Slip distance*.

La imagen mostrada casi no se aprecia el cambio porque no ha habido tiempo de simular el modelo durante más horas. También vale destacar que se ha utilizado el operador *gpeval* (*gporder, expr*), este se usa para obtener resultados más suaves en las gráficas, eliminando las discontinuidades que surgen al usar elementos lineales. En este caso tomamos el orden 4, es decir, se toman 4 puntos gaussianos alrededor de cada punto de la entidad geométrica para hacer un promedio ponderado de la variable que se quiere representar.

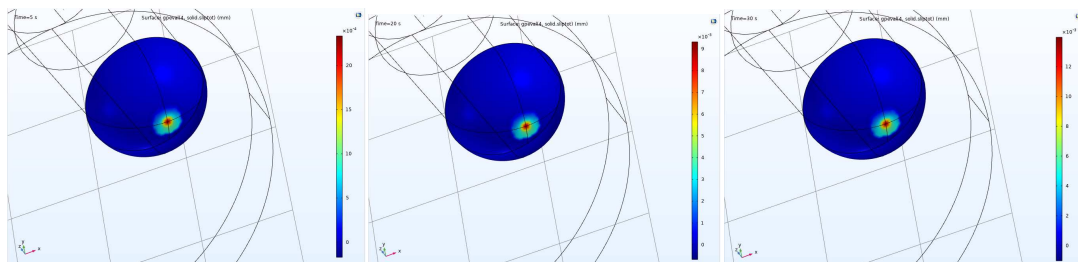


Figura 22. Resultados en distinto tiempo de la acumulación de distancia de deslizamiento

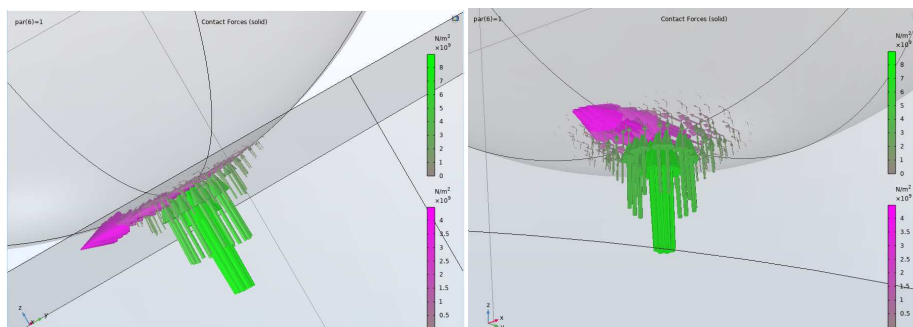


Figura 23. Fuerzas de contacto resultantes

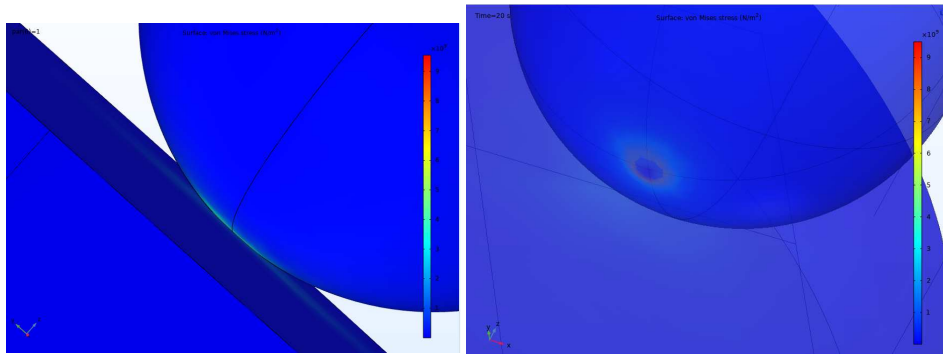


Figura 24. Esfuerzos

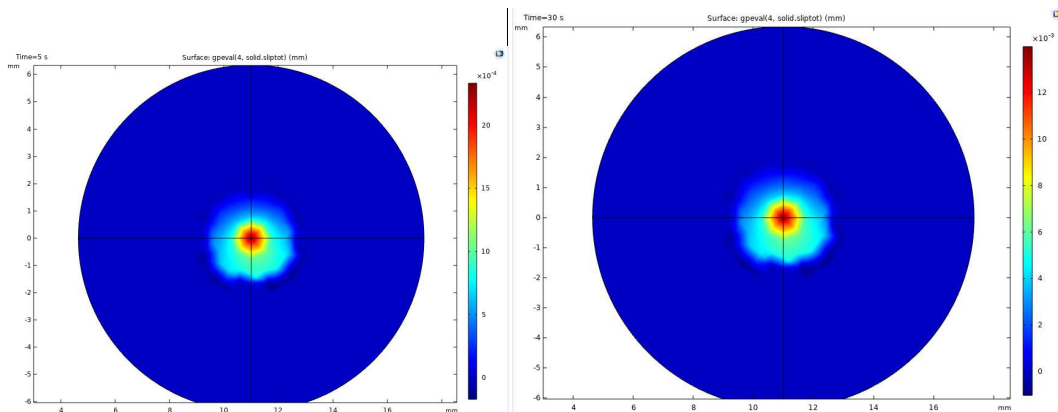


Figura 25. Slip distance

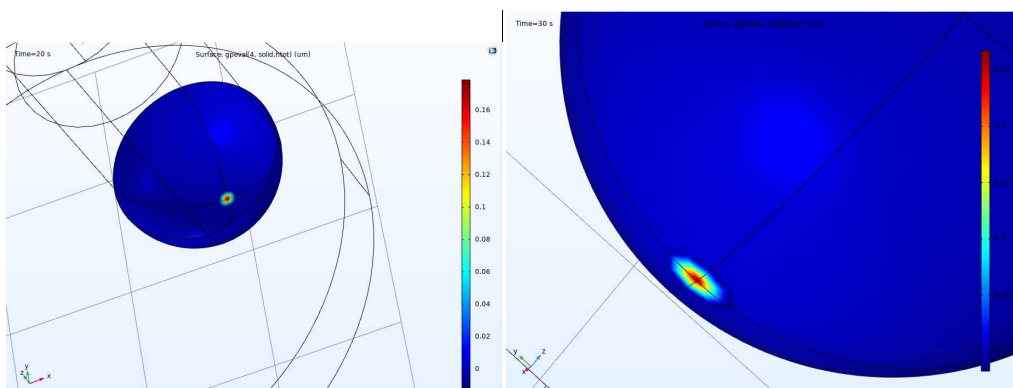


Figura 26. Wear depth

Time (s)	Accumulated wear depth (mm <sup>3</sup> )	Time (s)	Accumulated slip (m)	Wear volume (mm <sup>3</sup> )
0.0000	2.2941E-10	0.0000	0.0000	2.2941E-10
0.10000	3.8257E-7	0.10000	4.6613E-10	3.8257E-7
0.20000	7.6490E-7	0.20000	9.3225E-10	7.6490E-7
0.30000	1.1472E-6	0.30000	1.3984E-9	1.1472E-6
0.40000	1.5296E-6	0.40000	1.8645E-9	1.5296E-6
0.50000	1.9119E-6	0.50000	2.3306E-9	1.9119E-6
0.60000	2.2942E-6	0.60000	2.7967E-9	2.2942E-6
0.70000	2.6765E-6	0.70000	3.2628E-9	2.6765E-6
0.80000	3.0588E-6	0.80000	3.7289E-9	3.0588E-6
0.90000	3.4411E-6	0.90000	4.1950E-9	3.4411E-6
1.0000	3.8234E-6	1.0000	4.6611E-9	3.8234E-6
1.1000	4.2057E-6	1.1000	5.1272E-9	4.2057E-6
1.2000	4.5879E-6	1.2000	5.5932E-9	4.5879E-6
1.3000	4.9702E-6	1.3000	6.0593E-9	4.9702E-6
1.4000	5.3525E-6	1.4000	6.5254E-9	5.3525E-6
1.5000	5.7348E-6	1.5000	6.9915E-9	5.7348E-6
1.6000	6.1170E-6	1.6000	7.4575E-9	6.1170E-6
1.7000	6.4993E-6	1.7000	7.9236E-9	6.4993E-6
1.8000	6.8815E-6	1.8000	8.3897E-9	6.8815E-6
1.9000	7.2638E-6	1.9000	8.8557E-9	7.2638E-6

Figura 27. Valores derivados para calcular el Wear volumen y el Accumulated slip

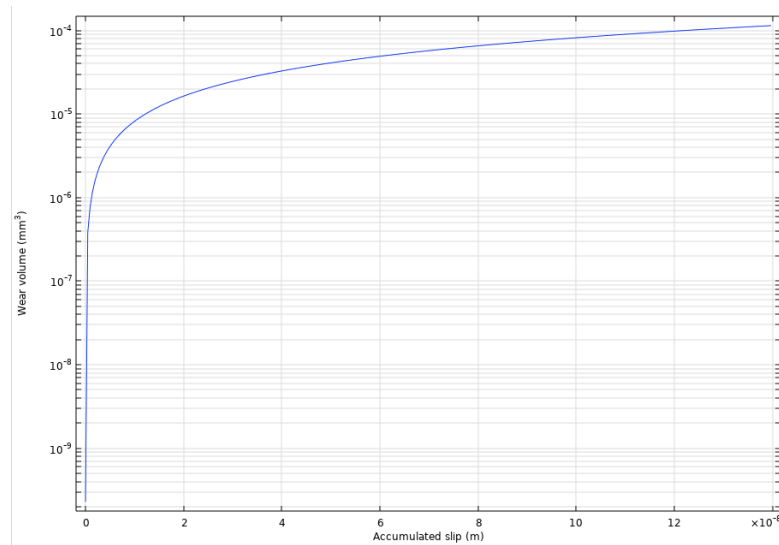


Figura 28. Gráfica a comparar con los datos experimentales y optimizar



## 10. Conclusiones

El factor tiempo en este trabajo ha sido determinante, tanto por la colaboración internacional entre las 26 instituciones europeas que forma el grupo de investigación. La cual ha provocado que los datos experimentales no hayan llegado a tiempo. Así como, el volumen computacional de tiempo necesario para este tipo de estudios, ha hecho que tengamos que adaptar este TFM.

Aún así, se ha podido comprobar que la configuración del modelo funciona para el objetivo principal de esta investigación. Tanto el modelo en Comsol como la optimización ya comenzada en MATLAB funcionan y han dado resultados que han sido aprobados satisfactoriamente por parte de la empresa.

Con todo esto hay que destacar la complejidad del tema de contactos aún pareciendo un modelo simple con una única físicas. Si el modelo no está bien restringido o solo una parte nos encontraremos con el problema de que uno de los resolvedores no llegará a convergir, lo que es un gran consumo de tiempo solo en la preparación del modelo. En esta memoria en la sección de Estudios, se ha intentado dar algunos pasos a seguir con los cuales se consigue resolver el modelo. Hay distintas estrategias que se enumeran a continuación que ayudan a reducir el tiempo de computación, todo dependiendo de la precisión de resultados que se necesite obtener:

- Posibilidad de utilización del factor *Wear acceleration* (mencionado y explicado en esta memoria)
- Estrategia *coarse-fine*: hacer el ajuste con mallas gruesas y la verificación final o un ajuste fino final con mallas finas
- Si hay dos parámetros de entrada se trabaja con valores del mismo peso, se escalan los *inputs* para que no sea un valor 0.00001 y 40000
- La solución no suele ser única si se considera el posible error experimental, hay una región solución
- Las iteraciones son largas por lo que conviene escribir en un archivo de texto todos los pasos intermedios interesantes para no tener que empezar desde cero cuando hay problemas

Las posibilidades de trabajos futuros son bastantes en este tema, primero terminar el algoritmo de optimización con los datos correctos una vez conseguidos por parte de la empresa. Una vez obtenida la constante óptima por medio de la optimización en Matlab, aplicarla al modelo del tornillo, con el mismo set-up de desgaste que se ha llevado a cabo en este trabajo. El tornillo de la válvula en sí sería la superficie de destino y que sufre el desgaste, y habría que comprobar, cuántas vueltas de apriete se pueden dar hasta que aparezca desgaste. Esta parte de trabajo futuro, ya ha empezado y se sigue trabajando para tener el modelo de contacto que funcione.

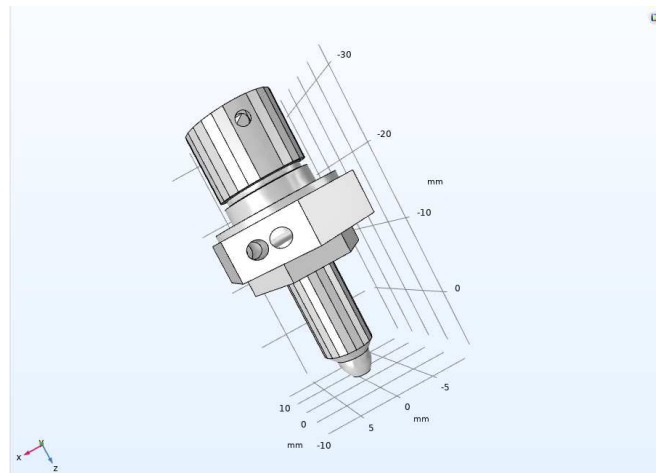


Figura 29. Modelo en Comsol para la válvula Ceramic HFT Filling

Un estudio interesante podría ser el caso que existe desgaste tanto en la *Source* como en el *Destination*, donde la utilización de dos interfaces *Wear* configurando la *Wear Surface* para cada interfaz como se ha explicado anteriormente. Donde sería probablemente necesaria la rotación del disco y un estudio completo de la fricción del modelo, esto por ejemplo, se podría hacer utilizando el nodo *Friction* en vez del de *Slip Velocity* como se ha utilizado en este caso de estudio. Esto se hace porque se formará una ranura de desgaste en el disco más el desgaste de la punta del perno.

Por último, mencionar la posibilidad de hacer la optimización con Comsol, tarea bastante “pesada” por el tipo de cálculos paramétricos que se deben llevar a cabo.



## 11. Referencias

- [1] A. Torabi, S. Akbarzadeh, M. Salimpour, and M. M. Khonsari, "On the running-in behavior of cam-follower mechanism," *Tribology International*, vol. 118, pp. 301–313, 2018.
- [2] F. J. Franklin, I. Widiyarta, and A. Kapoor, "Computer simulation of wear and rolling contact fatigue," *Wear*, vol. 251, no. 1-12, pp. 949–955, 2001.
- [3] I.M. Hutchings, *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, 1992.
- [4] J.F. Archard, *Wear theory and mechanisms*, in M.B. Peterson and W.O. Winer (eds.), *Wear Control Handbook*, ASME, New York.
- [5] R. G. Bayer, *Mechanical Wear Fundamentals and Testing*, CRC Press, New York, NY, USA, 2nd edition, 2004.
- [6] [https://doc.comsol.com/5.6/docserver/#!/com.comsol.help.sme/sme\\_uq\\_modeling.05.102.html](https://doc.comsol.com/5.6/docserver/#!/com.comsol.help.sme/sme_uq_modeling.05.102.html)
- [7] <https://www.comsol.com/blogs/nonlinearity-ramping-improving-convergence-nonlinear-problems/>
- [8] <https://www.comsol.com/support/knowledgebase/1102>
- [9] <https://www.comsol.com/blogs/solving-nonlinear-static-finite-element-problems/>