



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

María Begoña Serrano Castillo

Javier Gómez (Advanced Material Simulation)

Benjamin Ivorra

24 de Junio de 2021



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

| uma.es

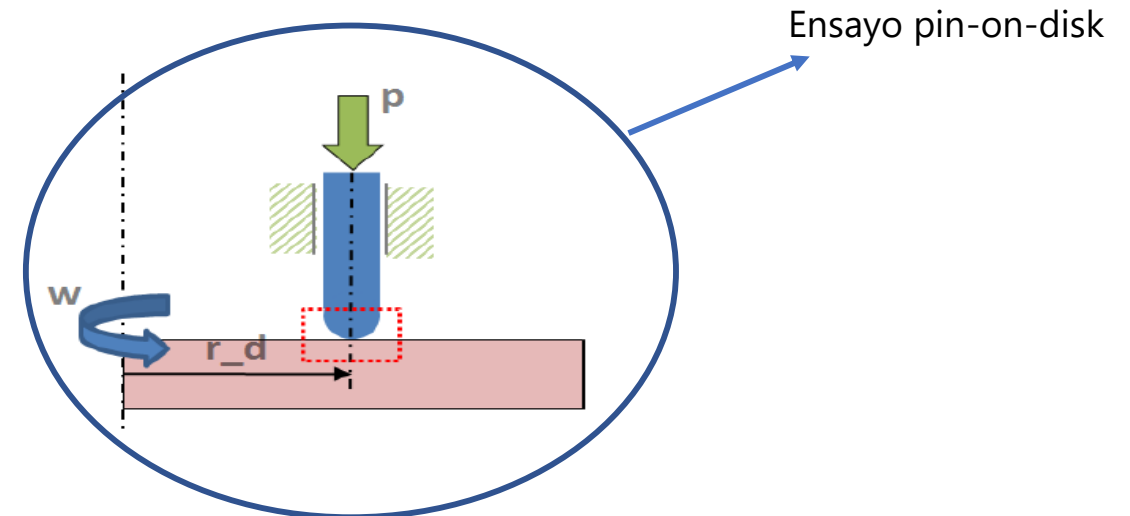


Contenido

- Fundamentos teóricos
- Geometría, Materiales y Mallado
- Ecuaciones e Interfaces Físicas
- Condiciones de Contorno
- Estudios
- Resultados obtenidos
- Conclusiones

Fundamento Teórico

- Tribología: ciencia y tecnología de la interacción entre superficies en movimiento relativo e involucra el estudio de la fricción, **desgaste** y lubricación y de las prácticas relacionadas con las mismas. Norma ASTM G99-17
- El desgaste ocurre cuando hay desprendimiento de asperezas durante un contacto.



Fundamento Teórico

- Ecuación de Archard para desgaste

$$V = \frac{KW_s}{H}$$

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

Ecuación modificada:

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

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

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

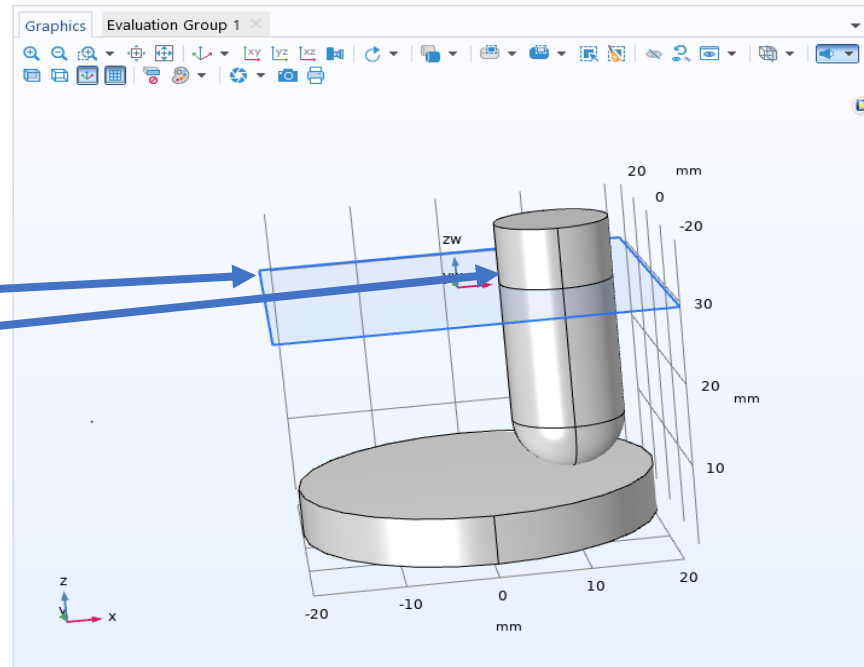
p: presión de contacto

v_s: velocidad de deslizamiento

Geometría, Materiales y Mallado

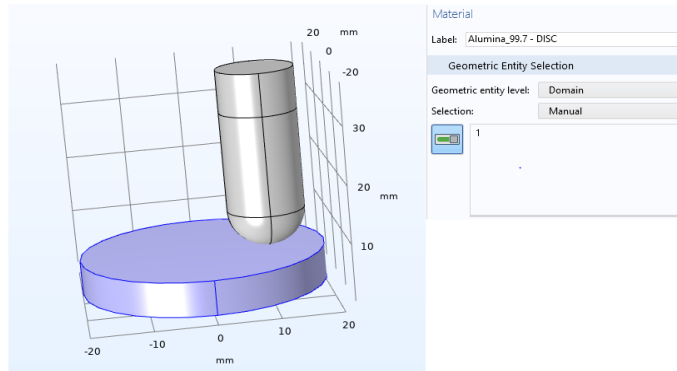
- Geometría

- Geometry 1
 - Cylinder 1 (*cyl1*)
 - Cylinder 2 (*cyl2*)
 - Sphere 1 (*sph1*)
 - Union 1 (*uni1*)
 - Work Plane 1 (*wp1*)
 - Partition Domains 1 (*pard1*)
 - Form Assembly (*fin*)

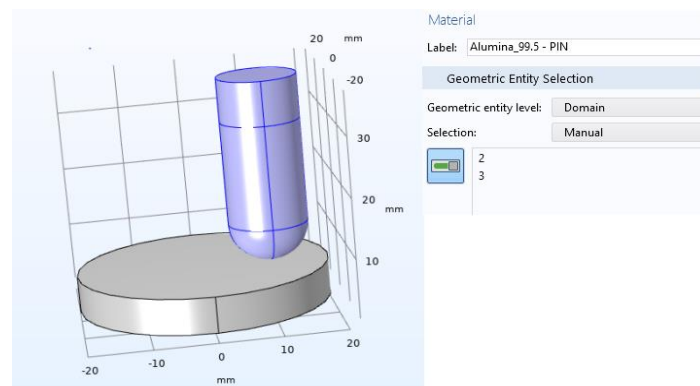


Geometría, Materiales y Mallado

- Materiales: Alumina -> alta dureza, largo tiempo de desgaste



Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	3.93[g/cm ³]	kg/m ³	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

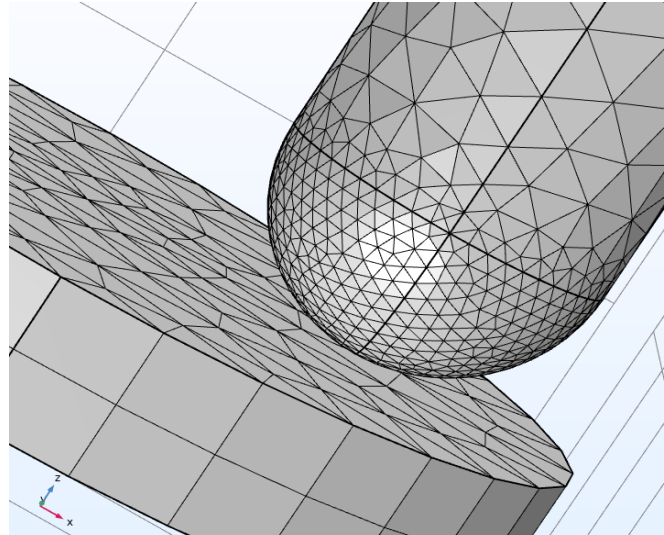
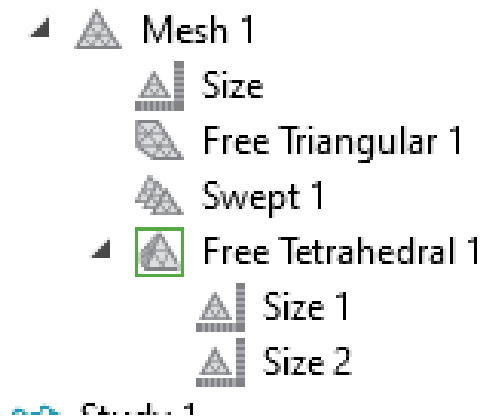


▼ Material Contents

Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	3.88[g/cm ³]	kg/m ³	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

Geometría, Materiales y Mallado





- Mallado:













Importancia de distinguir el tamaño en las zonas de contacto, al material más blando se le asigna el tamaño más fino

Ecuaciones e Interfaces Físicas

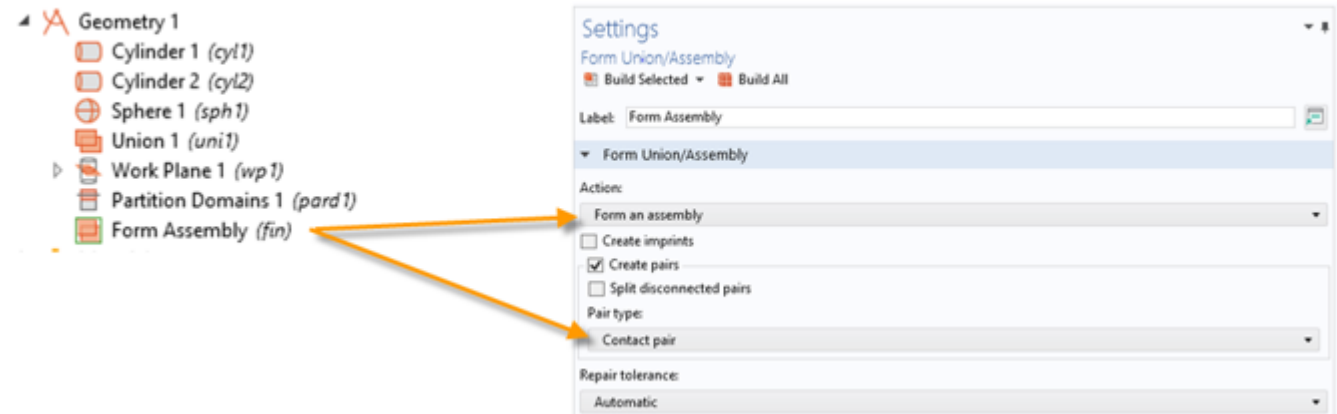
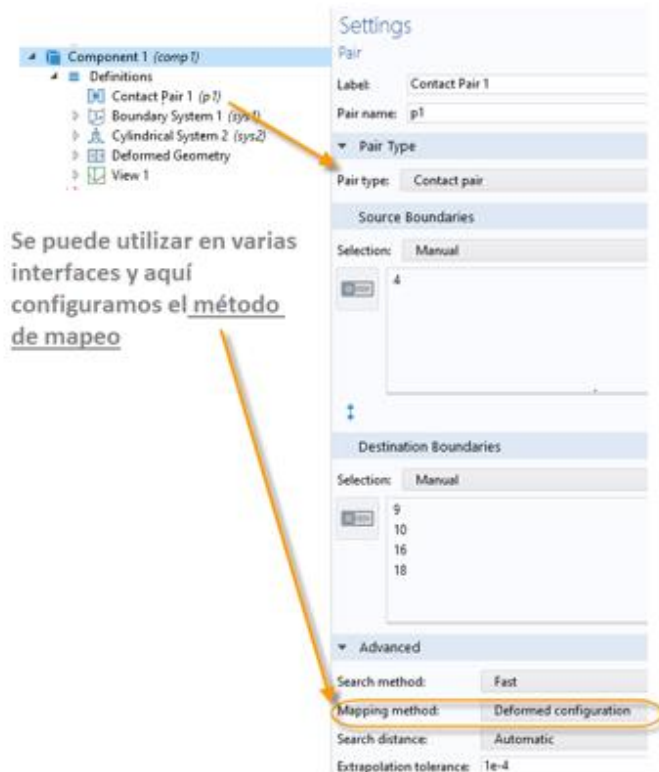
- Única física, *Solid Mechanics*:

- ▲  Solid Mechanics (*solid*)
 - ▶  Linear Elastic Material 1
 - ▶  Free 1
 - ▶  Initial Values 1

- ▲  Solid Mechanics (*solid*)
 - ▶  Linear Elastic Material 1
 - ▶  Free 1
 - ▶  Initial Values 1
 - ▶  Prescribed Displacement 1
 - ▶  Roller 1
 - ▶  Fixed Constraint 1
 - ▶  Boundary Load 1
 - ▶  **Contact 1**
 - ▶  Spring Foundation 1

Ecuaciones e Interfaces Físicas

- Hay deformación de geometría en el contacto



Ecuaciones e Interfaces Físicas

- La interfaz de *Contact* contiene *Wear* y *Slip Velocity*

Pair Selection

Pairs:

Contact Pair 1 (p1)

+

Equation

Show equation assuming:

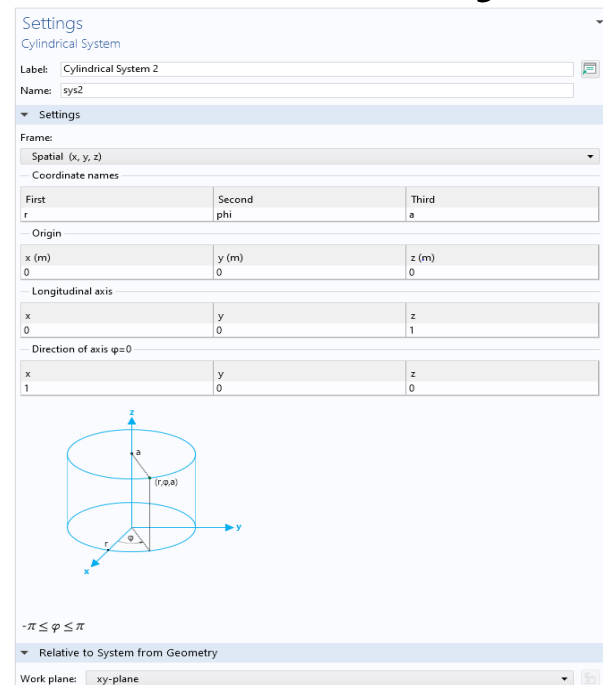
Study 1, Stationary

$$T_{np,j} = \text{if} \left(g_n \leq 0, T_{n,j} - p_n g_n, T_{n,j} e^{\left(\frac{-p_n g_n}{T_{n,j}} \right)} \right)$$
$$T_{n,j+1} = T_{np,j}$$
$$p_n = 5 \frac{E_{char}}{r_{min}}$$

El contacto se estudia en estacionario y es la parte donde se condiciona la brecha o el espacio de contacto entre las piezas.

Ecuaciones e Interfaces Físicas

- *Slip Velocity*, se basa en el sistema de referencia que se haya definido en el modelo, en este trabajo se utiliza un sistema cilíndrico



Ecuaciones e Interfaces Físicas

- *Slip Velocity*

Contact 1

- Free 1
- Slip Velocity 1**
- Wear 1

$T_t = \min(\mu T_n + T_{cohe}, T_{t,max})$

$\frac{-V_{slip}}{|V_{slip}|}$

Coordinate System Selection

Coordinate system: Boundary System 1 (sys1)

Friction Parameters

Friction model: Coulomb

Friction coefficient: μ mu 1

Cohesion sliding resistance: T_{cohe} 0 N/m²

Maximum tangential traction: $T_{t,max}$ Inf N/m²

Prescribed Velocity

V_{slip} 0 t1 t2 m/s

Ecuaciones e Interfaces Físicas

- *Wear*, ecuación de Archard

Wear Model

Formulation:
Deformed geometry

Wear model:
Generalized Archard

Wear constant:
 k_{wear} $k_w \cdot w_{accel}$

Reference contact pressure:
 $T_{n,ref}$ 1 [Pa]

Exponent:
 n 1

Wear surface:
Destination

$d_d \rightarrow h_{wear}$

$$\frac{\partial h_{wear}}{\partial t} = - \frac{\partial h_{wear}}{\partial t} n$$
$$\frac{\partial h_{wear}}{\partial t} = k_{wear} \left(\frac{T_n}{T_{n,ref}} \right)^n \|\mathbf{v}_{slip}\|$$

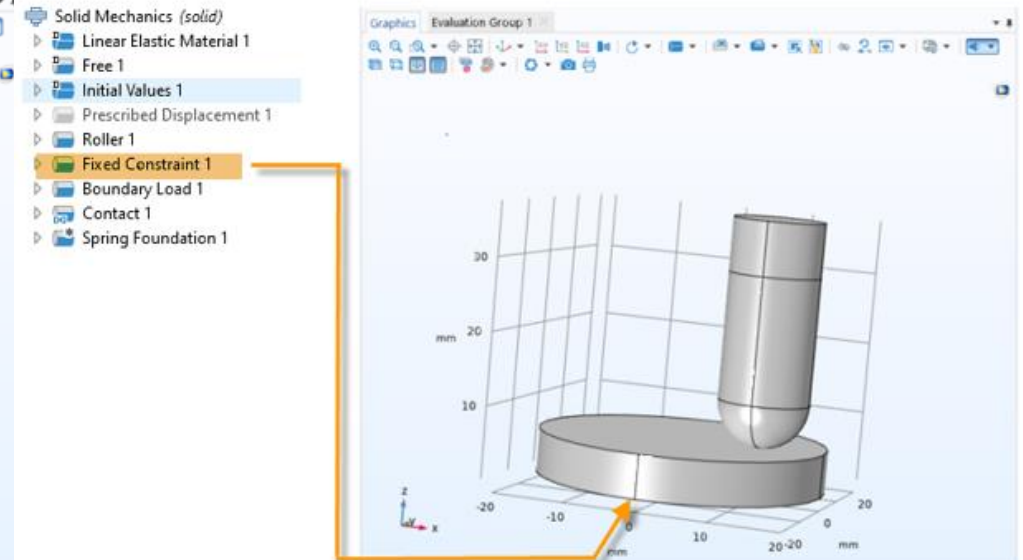
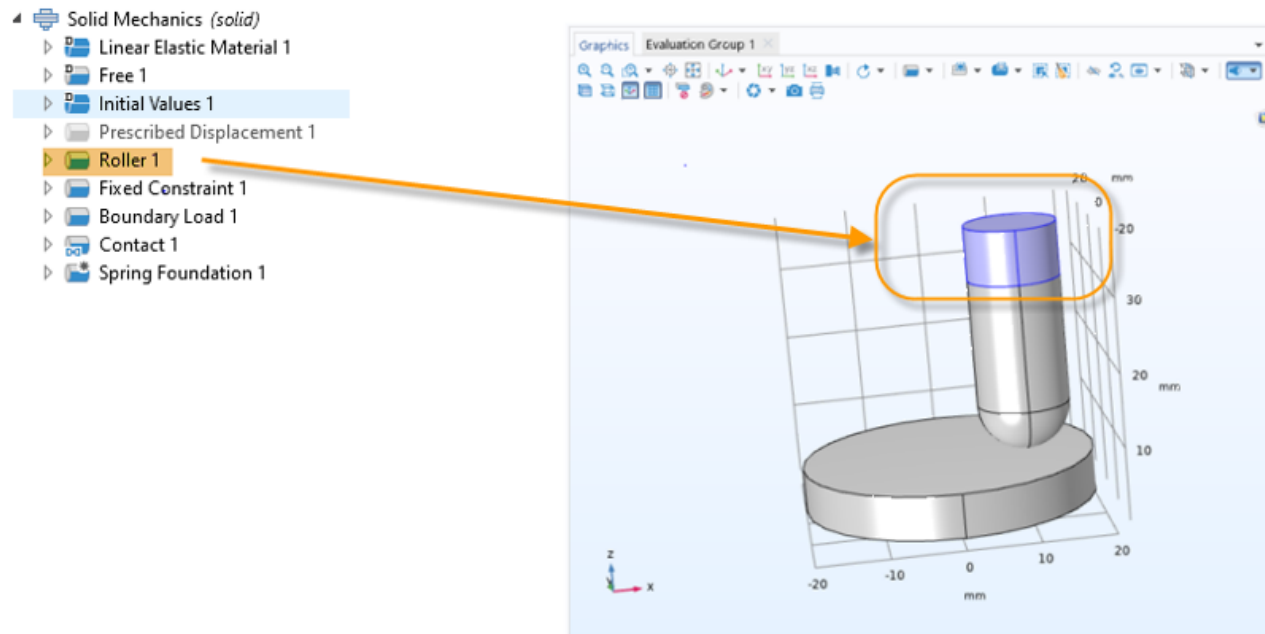
T_n : presión de contacto
 $T_{n,ref}$: de referencia
 n : exponente
adimensional (=1)



Condiciones de Contorno

- *Roller*
- *Fixed Constraint*
- *Boundary Load*
- *Spring Foundation*

Condiciones de Contorno



Condiciones de Contorno

$S \cdot n = F_A$
 $F_A = \frac{F_{tot}}{A}$

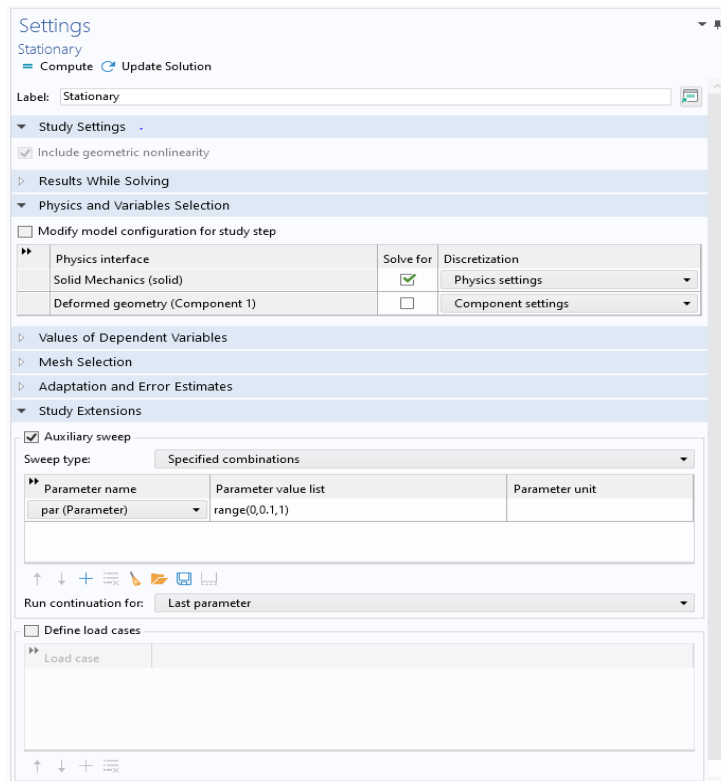
$S \cdot n = F_A$
 $F_A = \frac{F_{tot}}{A}$

La constante también la parametrizamos y aquí vemos de nuevo el parámetro par, que se explica en el estudio

Spring type:
 Total spring constant
 $k_{tot} = k_t \cdot (1 - par)$

Estudios

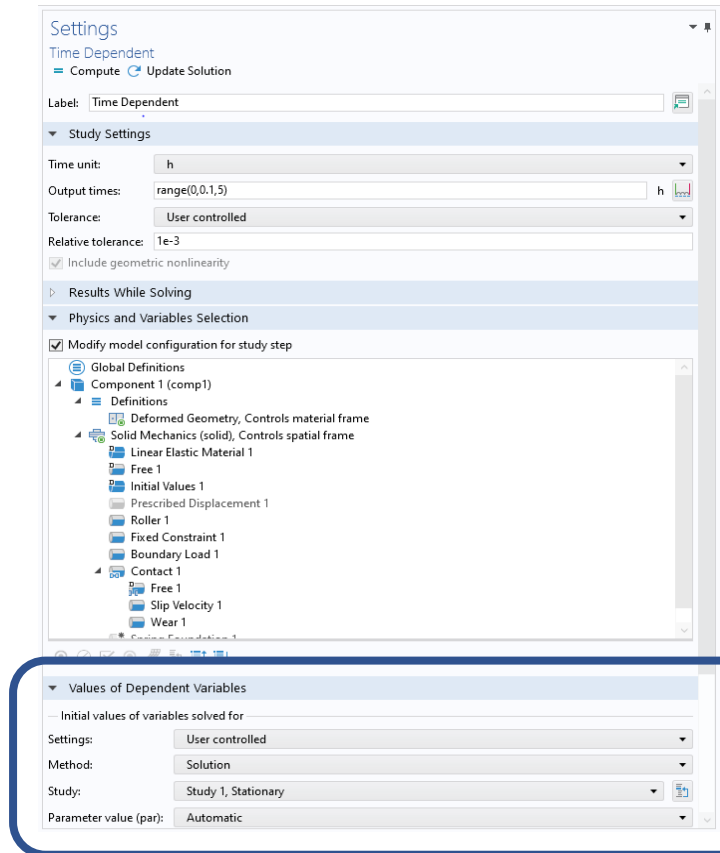
- Estudio estacionario



Se le añade un barrido auxiliar para ayudar al resolvidor con los problemas de restricciones en el modelo al comienzo

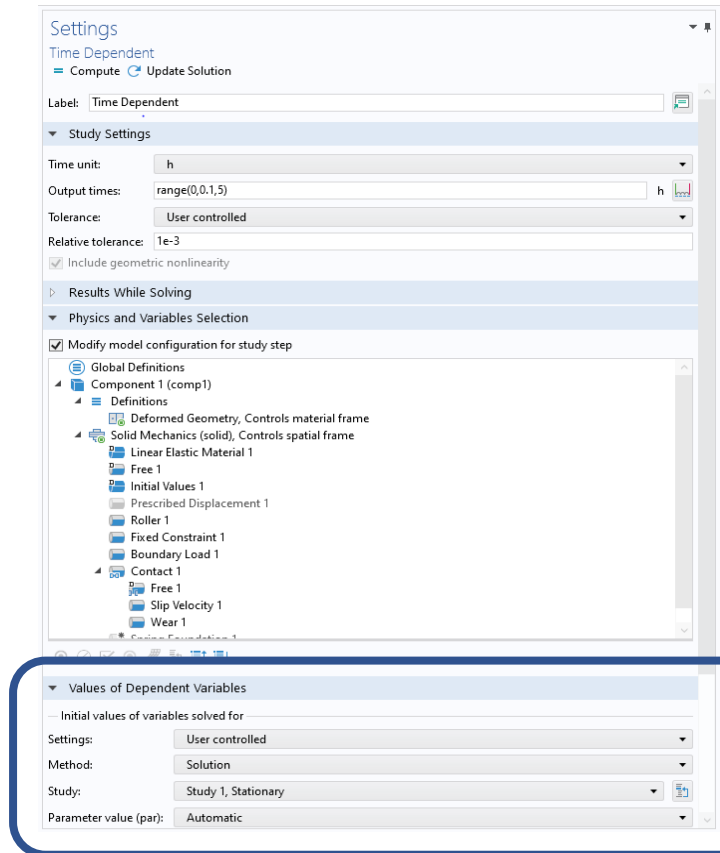
Estudios

- Estudio temporal



Estudios

- Estudio temporal



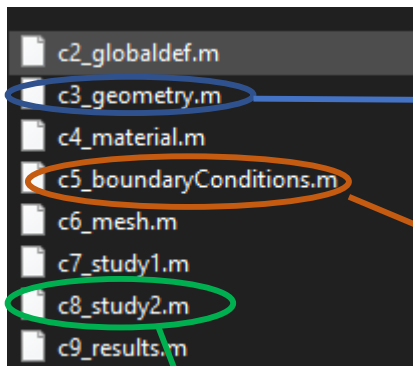


Estudios – Optimización en MATLAB

- Guardar el modelo Comsol como archivo Matlab (xxxx.m)
- “Limpiar” el código de Comsol y separarlo según corresponda
- Crear una tabla numérica ficticia con la que comparar
- Crear funciones para calcular diferencia entre puntos, función de mínimos cuadrados
- Función lectura el código de Comsol
- Aplicar la función de Matlab, `fminunc`

Estudios – Optimización en MATLAB

Resultado de dividir el código original de Comsol



```
15 - model.component('compl').geom('geom1').feature('unil').selection('input').set({'cyl2' 'sph1'});
16 - model.component('compl').geom('geom1').create('wpl', 'WorkPlane');
17 - model.component('compl').geom('geom1').feature('wpl').set('quickz', 30);
18 - model.component('compl').geom('geom1').feature('wpl').set('unite', true);
19 - model.component('compl').geom('geom1').create('pard1', 'PartitionDomains');
20 - model.component('compl').geom('geom1').feature('pard1').selection('domain').set('unil(1)', 1);
21 - model.component('compl').geom('geom1').feature('fin').label('Form Assembly');
22 - model.component('compl').geom('geom1').feature('fin').set('action', 'assembly');
23 - model.component('compl').geom('geom1').feature('fin').set('pairtype', 'contact');
24 - model.component('compl').geom('geom1').run;
25
26 - model.component('compl').pair.create('pl', 'Contact');
27 - model.component('compl').pair('pl').source.set([4]);
28 - model.component('compl').pair('pl').destination.set([9 10 16 18]);
```

```
5
6 - model.sol.create('sol2');
7 - model.sol('sol2').study('std2');
8 - model.sol('sol2').attach('std2');
9 - model.sol('sol2').create('st1', 'StudyStep');
10 - model.sol('sol2').create('vl', 'Variables');
11 - model.sol('sol2').create('tl', 'Time');
12 - model.sol('sol2').feature('tl').create('sel', 'Segregated');
13 - model.sol('sol2').feature('tl').feature('dl', 'Direct');
14 - model.sol('sol2').feature('tl').create('il', 'Iterative');
15 - model.sol('sol2').feature('tl').feature('sel').create('ss1', 'SegregatedStep');
16 - model.sol('sol2').feature('tl').feature('sel').create('ss2', 'SegregatedStep');
17 - model.sol('sol2').feature('tl').feature('sel').create('ls1', 'LumpedStep');
18 - model.sol('sol2').feature('tl').feature('sel').feature.remove('ssDef');
19 - model.sol('sol2').feature('tl').feature('il').create('mgl', 'Multigrid');
```

```
9
10 - model.component('compl').physics('solid').create('bndl1', 'BoundaryLoad', 2);
11 - model.component('compl').physics('solid').feature('bndl1').selection.set([14]);
12 - model.component('compl').physics('solid').create('cnt1', 'SolidContact', 2);
13 - model.component('compl').physics('solid').feature('cnt1').create('sv1', 'FrictionSlipVelocity', 2);
14 - model.component('compl').physics('solid').feature('cnt1').create('wear1', 'Wear', 2);
15 - model.component('compl').physics('solid').create('spfl', 'SpringFoundation2', 2);
16 - model.component('compl').physics('solid').feature('spfl').selection.set([9 10 16 18]);
17
18 - model.component('compl').coordSystem('sys1').set('mastercoordsystcomp', '2');
19 - model.component('compl').coordSystem('sys1').set('mastersystem', 'sys2');
```

Estudios – Optimización en MATLAB

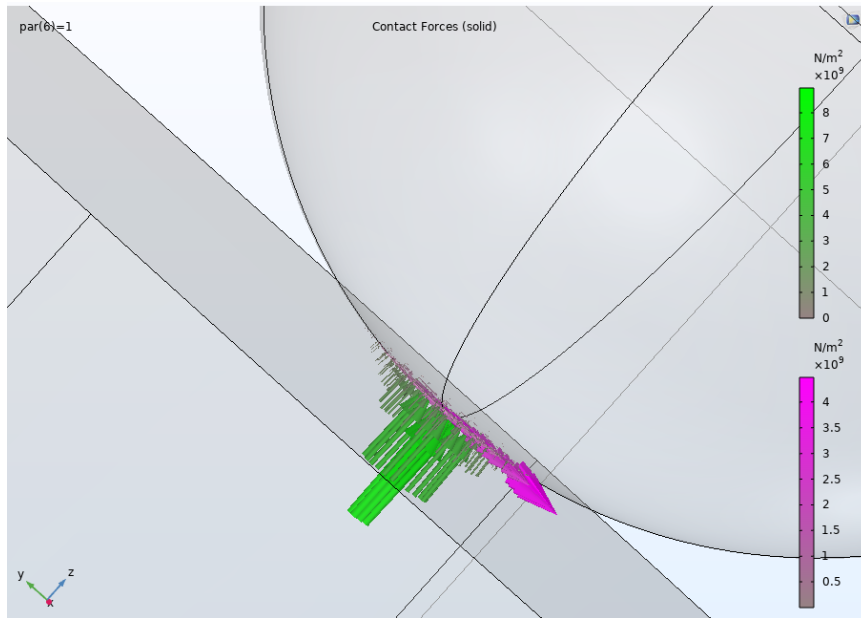
- Funciones:

```
11 -     else
12 -         ynum(i)=dnum(i)+ynum(i-1);
13 -     end
14 - end
15 - plot(xnum, ynum, 'r');
16
17 - x1=xnum;
18 - y1=ynum;
19 - x2=xexp;
20 - y2=yexp;
21 - xmin1=min(x1);
22 - xmax1=max(x1);
23 - xmin2=min(x2);
24 - xmax2=max(x2);
25 - xmin=max(xmin1, xmin2);
26 - xmax=min(xmax1, xmax2);
27 - xlin=linspace(xmin, xmax, 100);
28 - y_inter1=interp1(x1, y1, xlin);
29 - y_inter2=interp1(x2, y2, xlin);
```

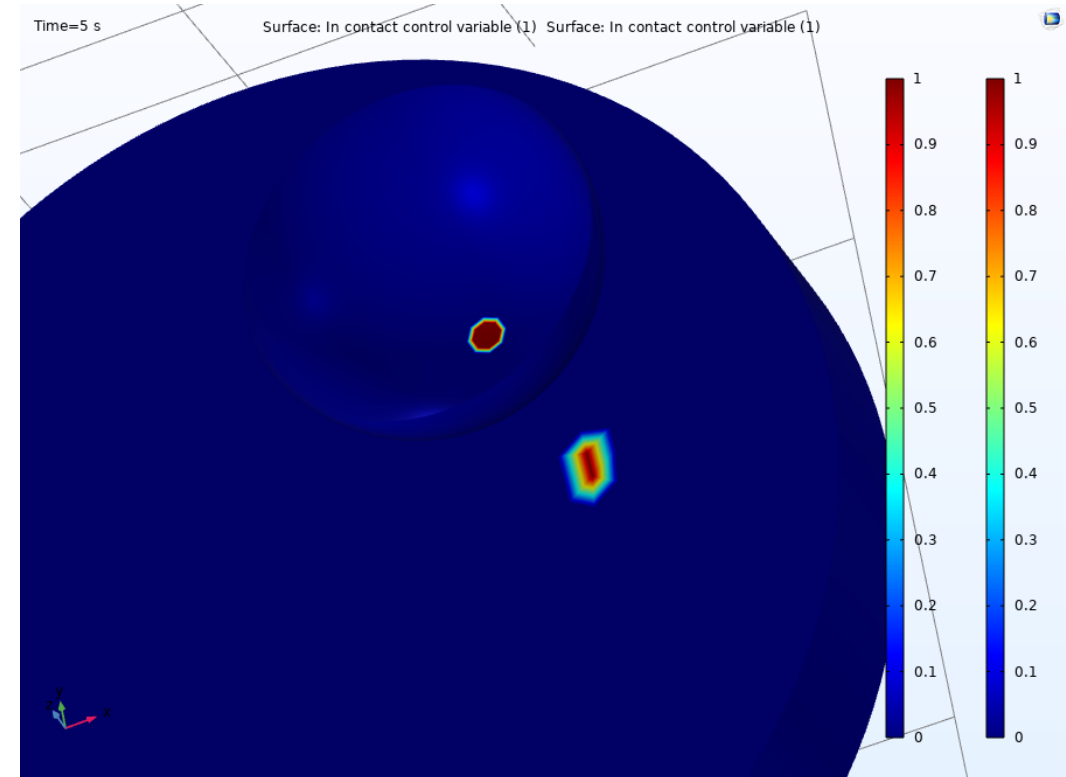
```
1 function [diff2]=calculadiff(x1,y1,x2,y2)
2 -     xmin1=min(x1);
3 -     xmax1=max(x1);
4 -     xmin2=min(x2);
5 -     xmax2=max(x2);
6 -     xmin=max(xmin1, xmin2);
7 -     xmax=min(xmax1, xmax2);
8 -     xlin=linspace(xmin, xmax, 100);
9 -     y_inter1=interp1(x1, y1, xlin);
10 -    y_inter2=interp1(x2, y2, xlin);
11 -    y=y_inter2-y_inter1;
12 -    diff2=sum((y_inter1-y_inter2).^2);
13 - end
```

```
22 - k0=2.0;
23 - f=@(k) f1(k, xexp, yexp, fileID);
24 - [kopt, fval, exitflag, output]=fminunc(f, k0);
--
```

Resultados obtenidos

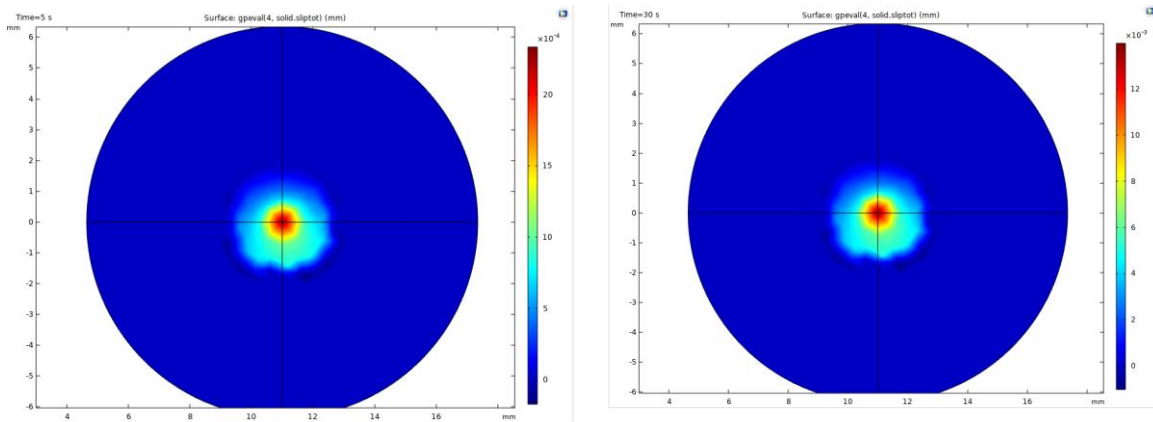


Fuerzas de contacto

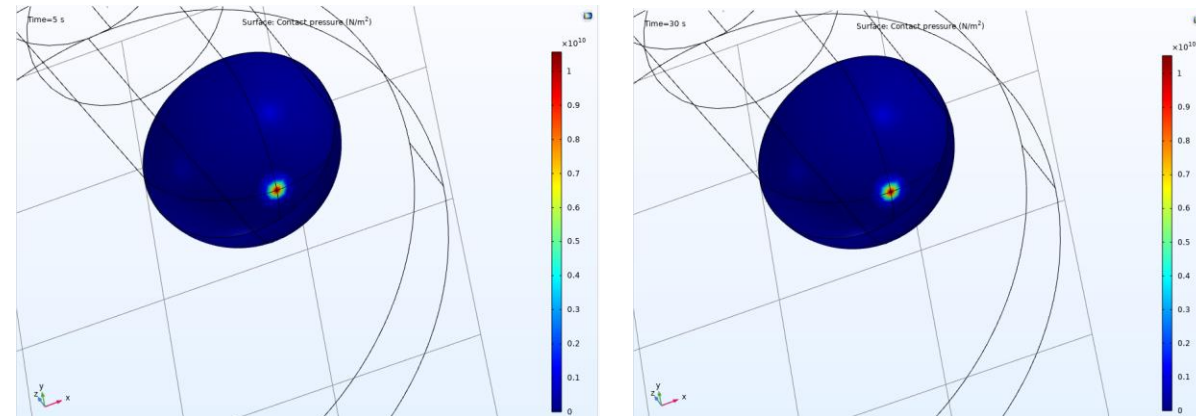


Contacto en ambas partes

Resultados obtenidos



Slip distance

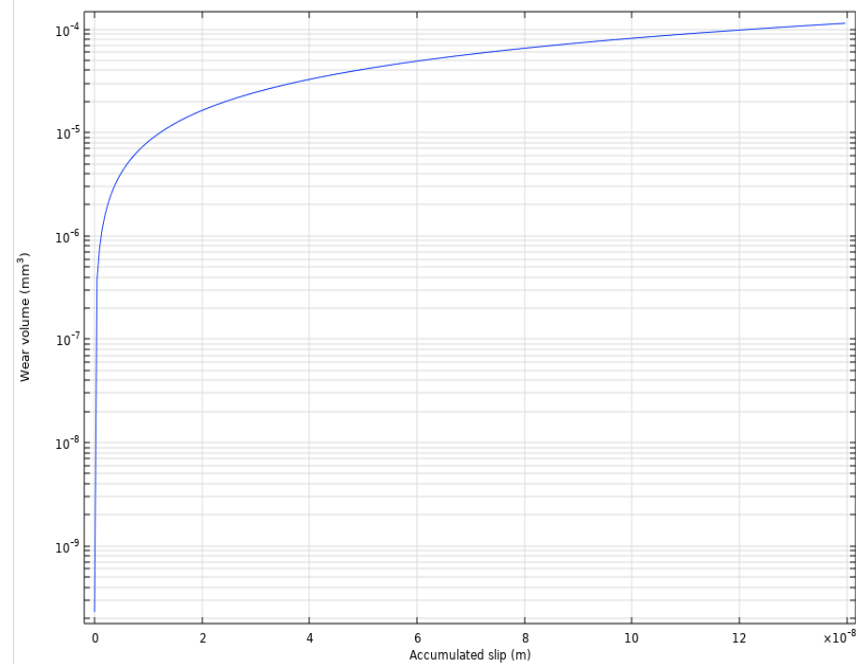


Presión de contacto

Resultados obtenidos

Time (s)	Accumulated wear depth (mm ³)
0.0000	2.2941E-10
0.10000	3.8257E-7
0.20000	7.6490E-7
0.30000	1.1472E-6
0.40000	1.5296E-6
0.50000	1.9119E-6
0.60000	2.2942E-6
0.70000	2.6765E-6
0.80000	3.0588E-6
0.90000	3.4411E-6
1.0000	3.8234E-6
1.1000	4.2057E-6
1.2000	4.5879E-6
1.3000	4.9702E-6
1.4000	5.3525E-6
1.5000	5.7348E-6
1.6000	6.1170E-6
1.7000	6.4993E-6
1.8000	6.8815E-6
1.9000	7.2638E-6

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



	A	B	C
	0	1,54221E-27	1,5422E-27
	2,21077E-10	1,92054E-20	3,0844E-27
	4,42154E-10	3,58235E-20	1,9205E-20
	6,6323E-10	5,30022E-20	5,5029E-20
	8,84307E-10	7,43829E-20	1,0803E-19
	1,10538E-09	9,88448E-20	1,8241E-19
	1,32646E-09	1,23907E-19	2,8126E-19
	1,54754E-09	1,47187E-19	4,0517E-19
	1,76861E-09	1,67534E-19	5,5235E-19
	1,98969E-09	1,84672E-19	7,1989E-19
	2,21077E-09	1,98774E-19	9,0456E-19
	2,43184E-09	2,09765E-19	1,1033E-18
	2,65292E-09	2,17459E-19	1,3131E-18
	2,874E-09	2,21838E-19	1,5306E-18
	3,09508E-09	2,23055E-19	1,7524E-18
	3,31615E-09	2,21395E-19	1,9754E-18
	3,53723E-09	2,17226E-19	2,1968E-18
	3,75831E-09	2,10958E-19	2,4141E-18
	3,97938E-09	2,03032E-19	2,625E-18
	4,20046E-09	1,93898E-19	2,8281E-18
	4,42154E-09	1,84005E-19	3,022E-18
	4,64261E-09	1,73776E-19	3,206E-18
	4,86369E-09	1,63594E-19	3,3797E-18
	5,08477E-09	1,53781E-19	3,5433E-18
	5,30584E-09	1,44591E-19	3,6971E-18
	5,52692E-09	1,36222E-19	3,8417E-18
	5,748E-09	1,28842E-19	3,9779E-18
	5,96907E-09	1,22611E-19	4,1068E-18
	6,19015E-09	1,17664E-19	4,2294E-18
	6,41123E-09	1,14065E-19	4,347E-18
	6,6323E-09	1,11792E-19	4,4611E-18

Tabla ficticia utilizada en Matlab

Valores derivados de Comsol y representación gráfica

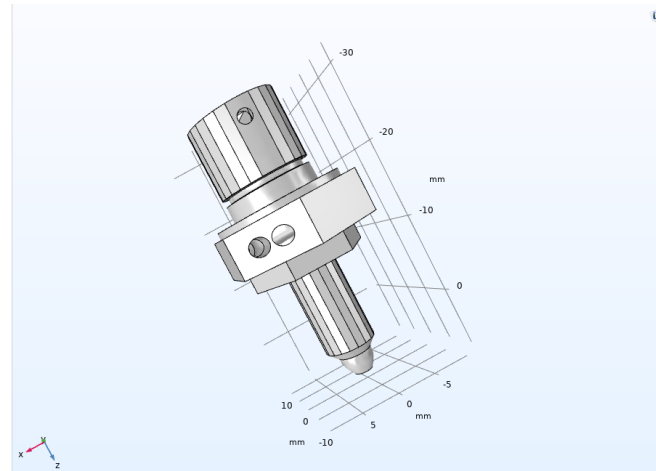


Conclusiones

- Configuración del concepto funciona y abre la posibilidad de estudios futuros combinando desgaste en la otra pieza o, mutuo
- Largo periodos de simulación para visualizar la profundidad de desgaste en este tipo de materiales cerámicos
- La posibilidad de enlace de COMSOL con MATLAB para este tipo de optimizaciones da muchas facilidades de cálculo
- Estudio de desgaste utilizando el concepto de geometría deformada, actualiza las condiciones de contacto durante la simulación
- Utilización de un factor, *Wear acceleration*, para reducir largos periodos de tiempo

Conclusiones

- Actualmente se está incorporando el concepto estudiado al tornillo de la válvula



GRACIAS



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

| uma.es



MU COM



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

| uma.es



Addlink
Software Científico

 **COMSOL**