

Predicción de daño a fatiga en mecanismos planos flexibles con juntas con holgura y desgaste.

Mario López Lombardero

Tesis doctoral

Ferrol, 4 de Julio de 2025

Índice



1. Introducción.
2. Flexibilidad.
3. Análisis de junta con holgura.
4. Consideración de desgaste.
5. Fatiga.
6. Caso industrial.
7. Conclusiones y trabajo futuro.

1.

Introducción.

- 2. Flexibilidad.
- 3. Análisis de juntas con holgura.
- 4. Desgaste.
- 5. Fatiga.
- 6. Caso industrial.
- 7. Conclusiones y trabajo futuro.



Motivación

¿Por qué estudiar la fatiga en máquinas?

La fatiga se define, según la norma ASTM E 1150, como: *“El proceso de cambio estructural permanente, localizado y progresivo que ocurre en un material sometido a condiciones que producen tensiones y deformaciones fluctuantes en uno o varios puntos, y que puede culminar en grietas o fractura completa tras un número suficiente de fluctuaciones”*.

Las consecuencias de la fatiga implican una continua degradación que puede llevar a la rotura de componentes, lo que cual puede traducirse en accidentes, pérdidas económicas, y humanas.



Desastre del tren de Versailles, 1842
200 víctimas



Accidente del tren de Enschede, 1998
101 víctimas

Motivación

¿Por qué estudiar la fatiga en máquinas?

Efectos económicos:

- El 80 % de las fracturas son debidas a fatiga (Dowling, 2013).
- Las pérdidas debidas a fracturas ascienden hasta el 4% del PIB (Milne, 1994).
- La combinación de la fatiga, la corrosión y el desgaste incrementan las pérdidas hasta el 10% del PIB (Dowling, 2013).
- Las pérdidas debidas a fatiga afectan a una gran cantidad de sectores (Reed, 1983).

- En muchas ocasiones, los fallos a fatiga se deben al desconocimiento de las condiciones reales de operación.
- Este desconocimiento puede producirse por la presencia de holguras combinada con el desgaste.

Major Sector Contributions to the Annual Costs of Fracture (1982 Dollars in Billions)

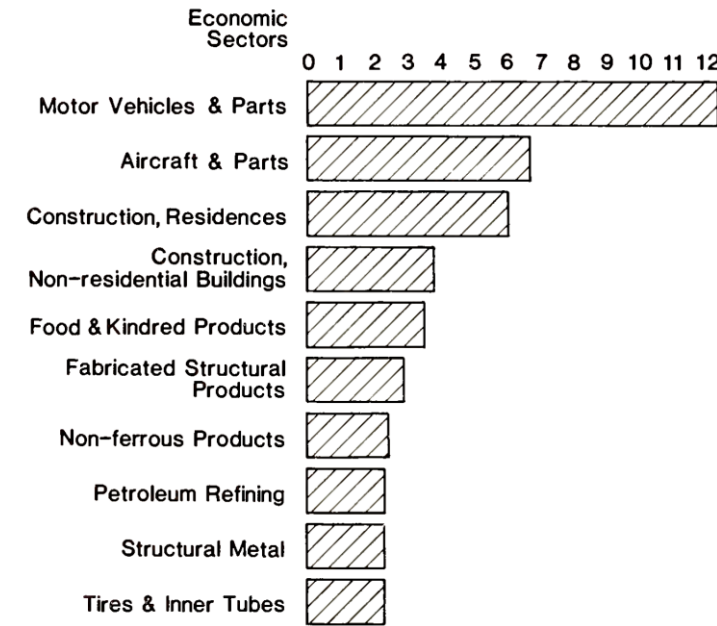


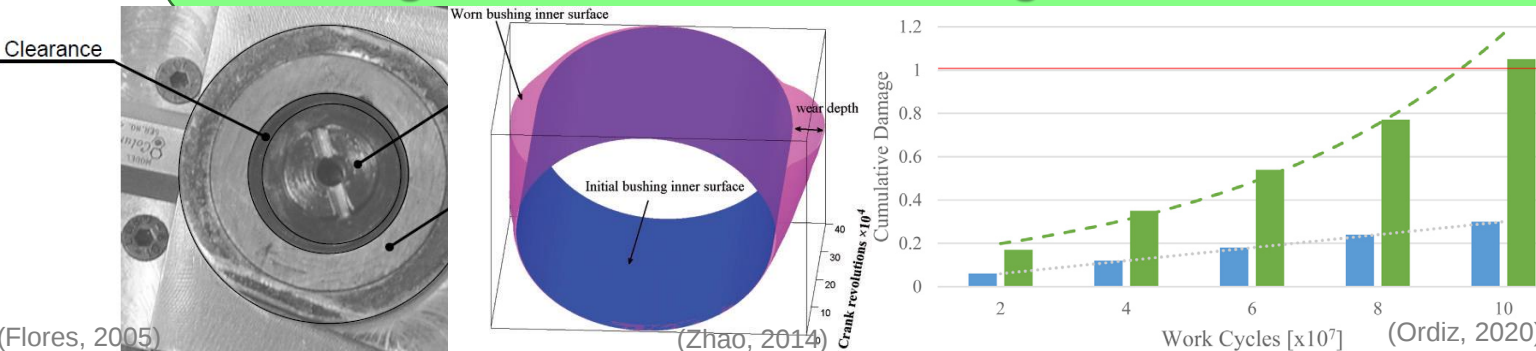
TABLE 1. Comparative costs of fracture to the UK economy in £ × 10⁹

Defence*	23.4
Transport*	6.2
Education*	9.8
Health*	30.1
Turnover of big company	5.0
Total 1992 R&D spending in 1992†	12.6
Fractures	20.0

Sources

*1993–94 forecast from UK Government budget, November 1993.

†Institute of Fiscal Studies, February 1994.

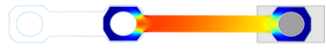
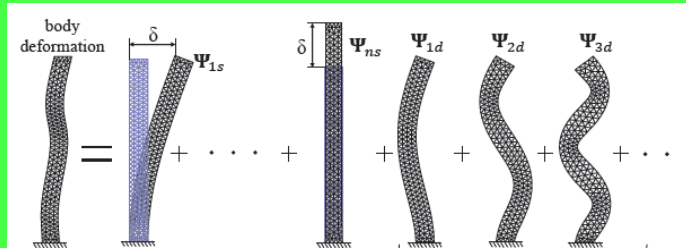


Objetivo

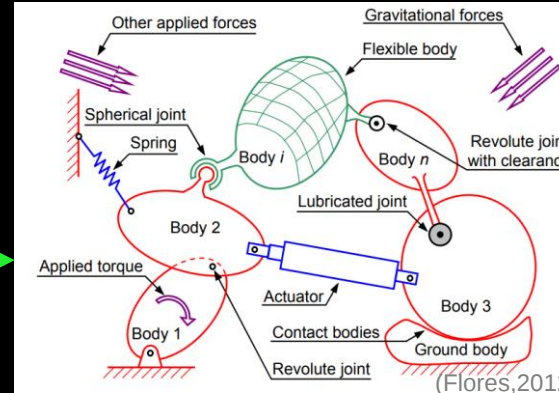
Desarrollar una metodología de análisis a fatiga en máquinas, que permita la consideración de efectos como la presencia de holguras en sus juntas, así como su evolución en el tiempo con el desgaste.

¿Cómo?

Flexibilidad



Multibody dynamics (MBD)

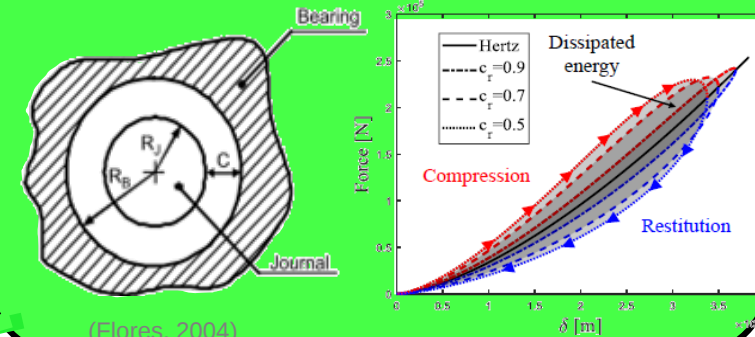


$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{Q} \\ -\dot{\Phi}_q \dot{\mathbf{q}} \end{Bmatrix}$$

Movimiento
Reacciones
Tensiones

**ANÁLISIS A
FATIGA**

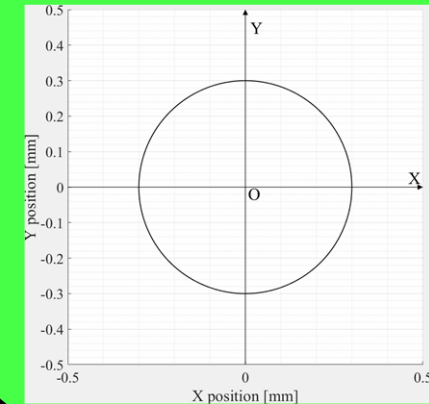
Holguras



Fuerzas de
contacto

Evolución
de la
geometría

Desgaste



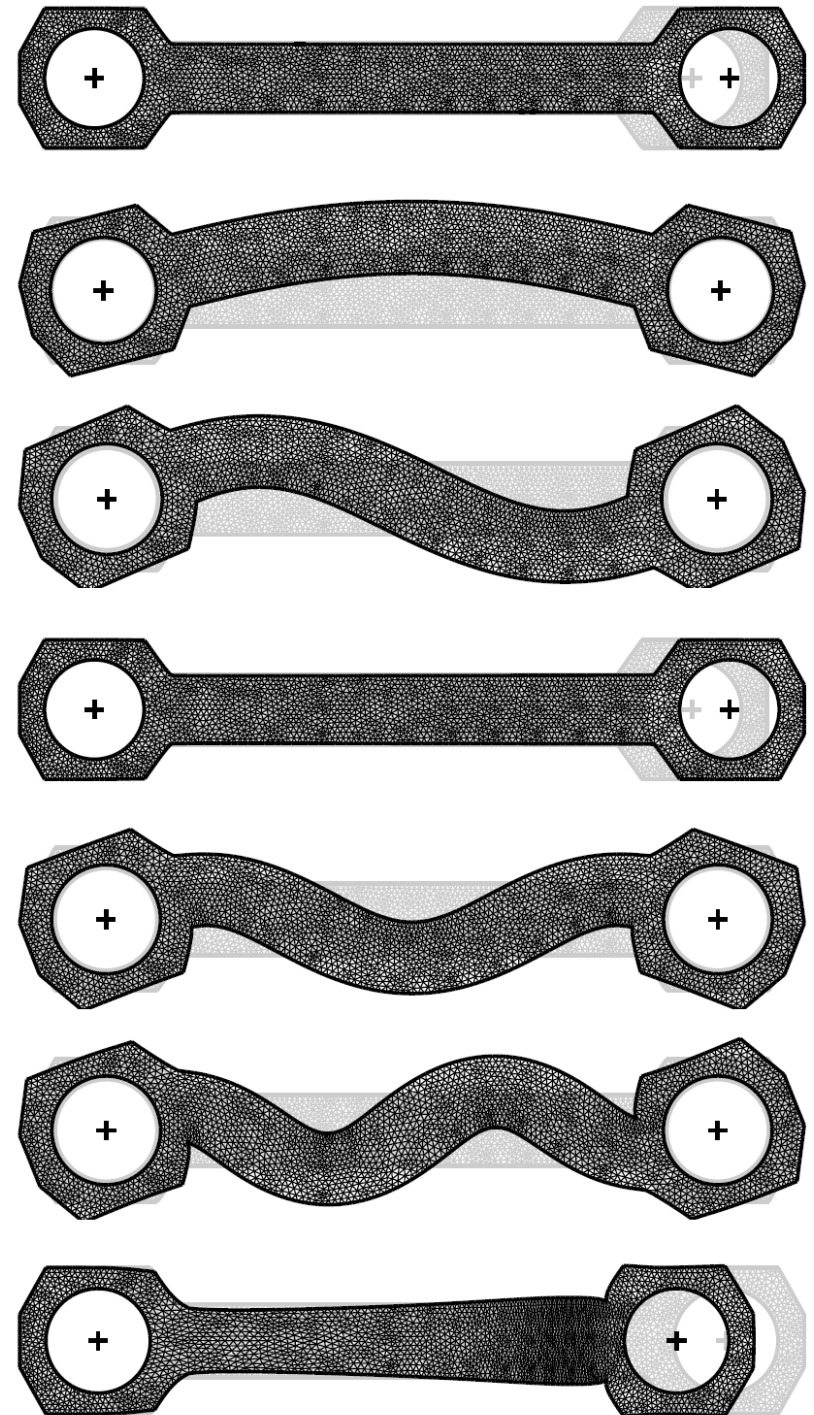
Ley de Archard

$$V_w = \frac{K_w}{H} F_n s$$

2.

Flexibilidad.

- 3. Análisis de juntas con holgura.
- 4. Desgaste.
- 5. Fatiga.
- 6. Caso industrial.
- 7. Conclusiones y trabajo futuro.



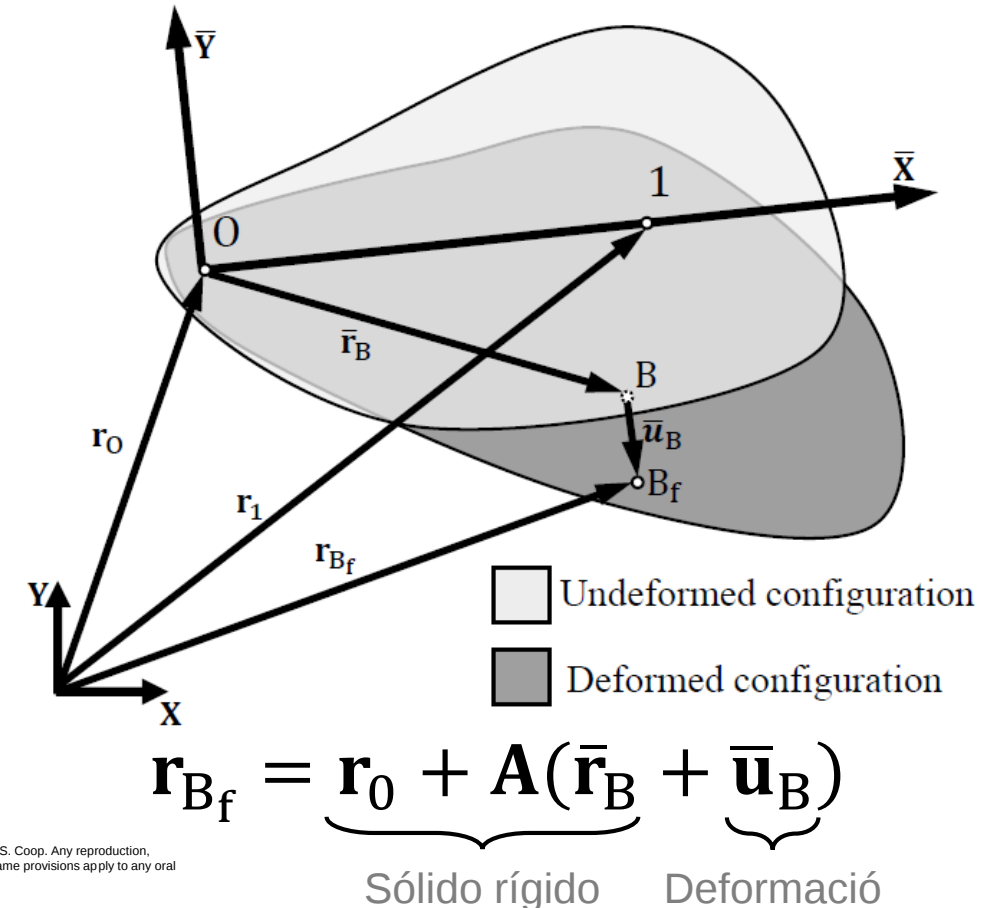
Introducción

- El objetivo de la simulación de *Flexible Multibody Systems* (**FMBS**) es la obtención de los campos de desplazamientos, deformaciones y tensiones de los sólidos sin recurrir al método de los elementos finitos (**FEM**).
- Se ha empleado la formulación de sistema de referencia flotante.

FFRF (Floating Frame of Reference Formulation)

- Válida solo para pequeñas deformaciones.
- Se suelen emplear métodos de reducción de variables.
- La deformación se describe como una combinación lineal de modos de deformación.
- Matriz de masas variable en el tiempo.

• Válida para cuerpos con cualquier tipo de geometría.



Component Mode Synthesis (CMS)

- El campo de desplazamientos de un sólido deformable puede obtenerse mediante análisis FEM.
- Cuanto mayor es el número de nodos, mayor dimensión tiene el problema.

$$\mathbf{M}_{\text{FEM}} \ddot{\mathbf{u}}^* + \mathbf{C}_{\text{FEM}} \dot{\mathbf{u}}^* + \mathbf{K}_{\text{FEM}} \mathbf{u}^* = \mathbf{f}^*$$

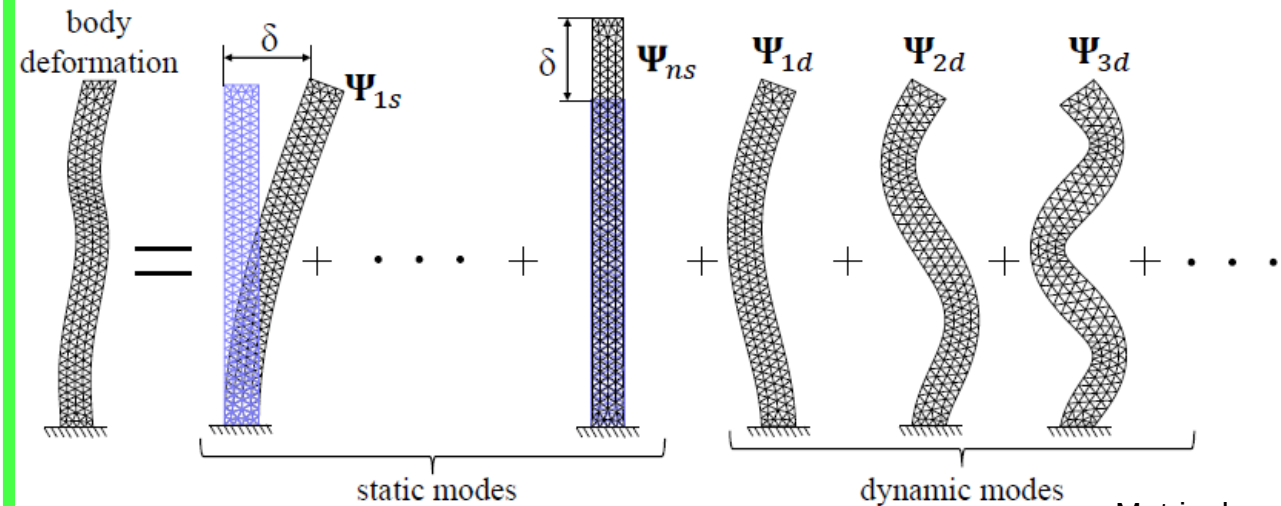
donde:

- $\dim(\mathbf{M}_{\text{FEM}}, \mathbf{C}_{\text{FEM}}, \mathbf{K}_{\text{FEM}}) = z \times z$

- $\dim(\ddot{\mathbf{u}}^*, \dot{\mathbf{u}}^*, \mathbf{u}^*, \mathbf{f}^*) = z \times 1$

Número de grados de libertad (gdl)

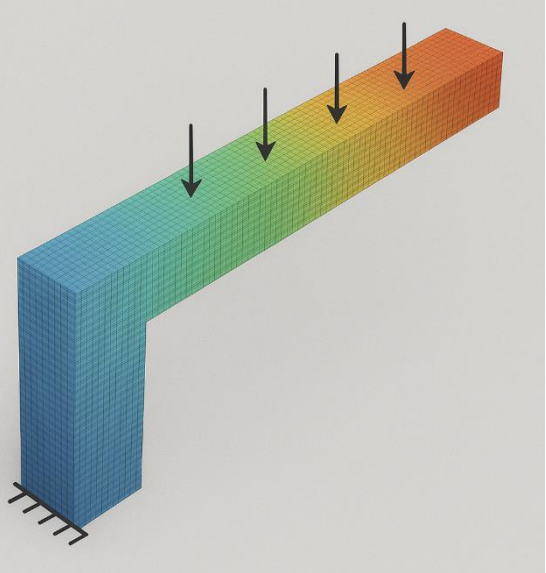
- Métodos de CMS permiten obtener una solución aproximada asumiendo la deformación como una combinación lineal de modos.



$$\bar{\mathbf{u}}^*(t) \approx \begin{bmatrix} \bar{\Psi}_{1s} & \dots & \bar{\Psi}_{vs} & \bar{\Psi}_{1d} & \dots & \bar{\Psi}_{vd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_{1s}(t) \\ \vdots \\ \xi_{vs}(t) \\ \xi_{1d}(t) \\ \vdots \\ \xi_{vd}(t) \end{bmatrix} = \bar{\Psi} \mathbf{q}_f(t)$$

$v \ll z$

Matriz de transformación

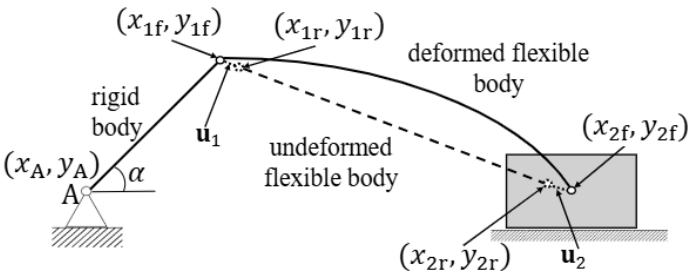


- Tras la integración de las ecuaciones del movimiento, se obtienen los valores de las variables flexibles en cada paso de tiempo:



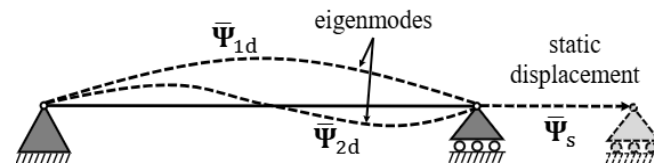
Validación del modelo

Se ha considerado un mecanismo biela-manivela con una biela flexible para contrastar las tensiones con un modelo



Modelo de validación

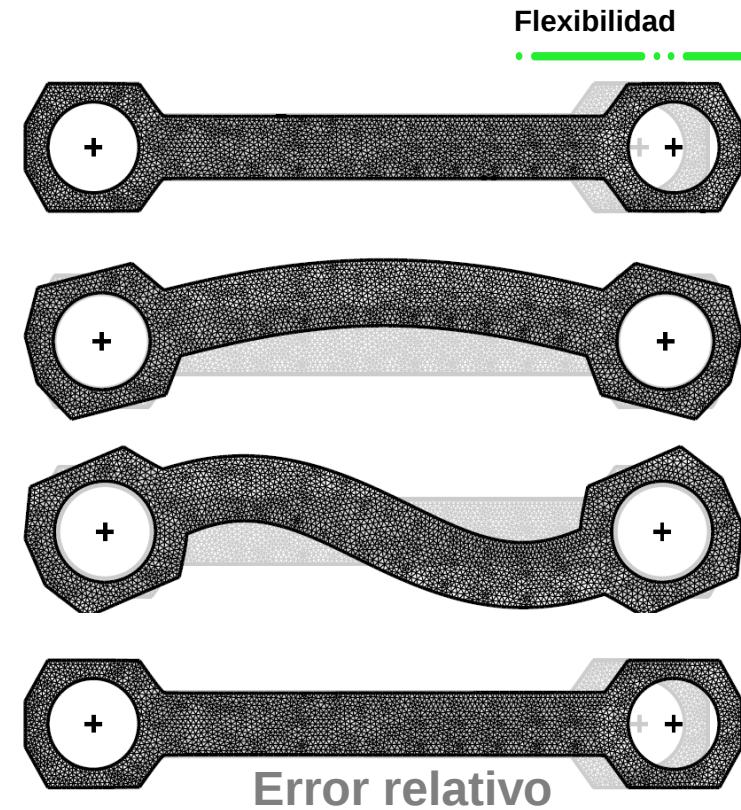
Modelo propuesto



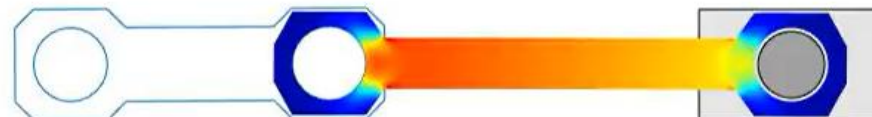
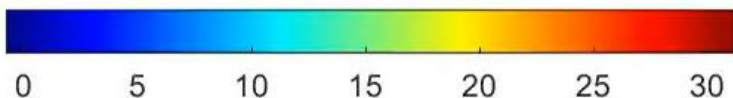
Condiciones de contorno

Modelo FEM

Modo
estático



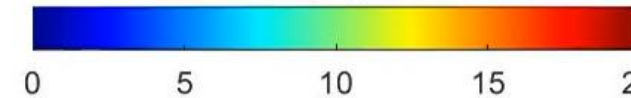
MPa



MPa

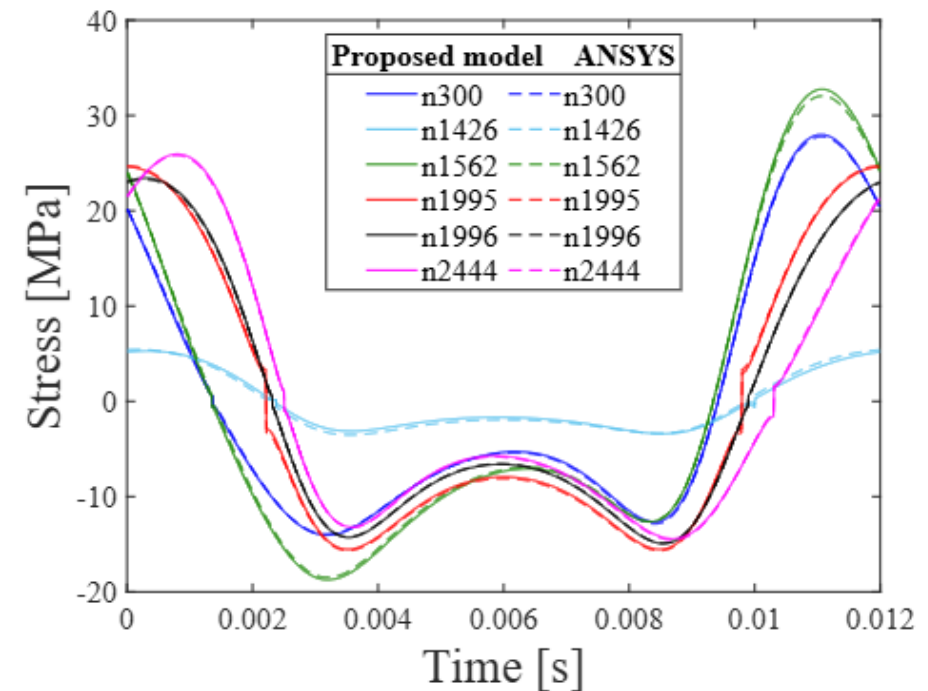
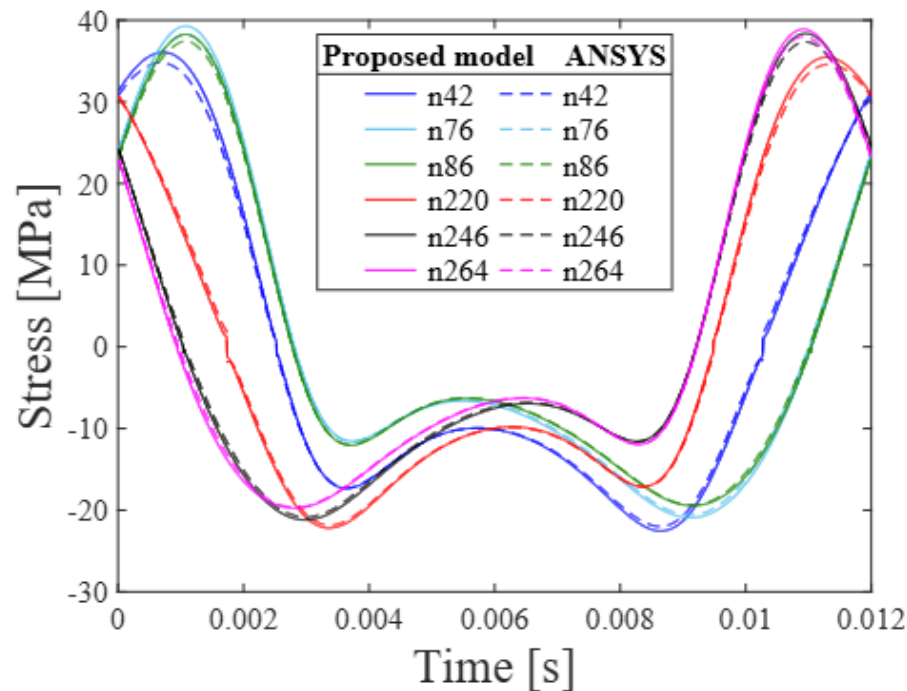
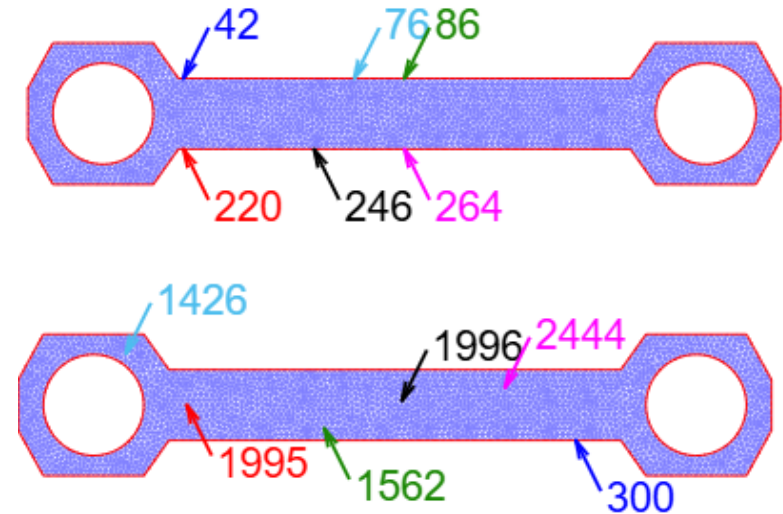


[%]



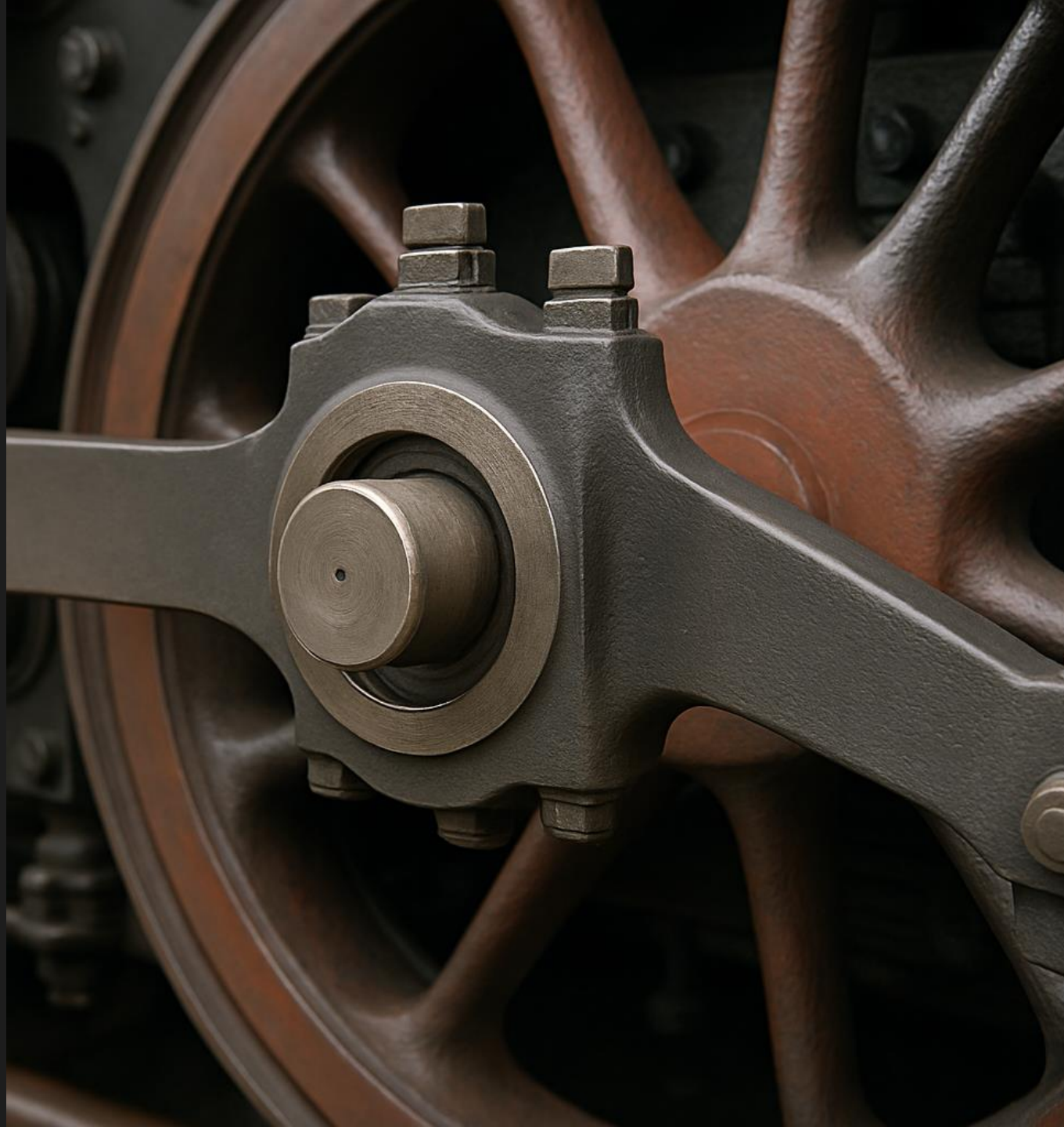
Validación del modelo

- Comparación de los valores de tensión de von Mises con signo en distintos nodos.
- Buena coincidencia entre ambas curvas.
- El modelo propuesto es válido incluso en concentradores de tensión.



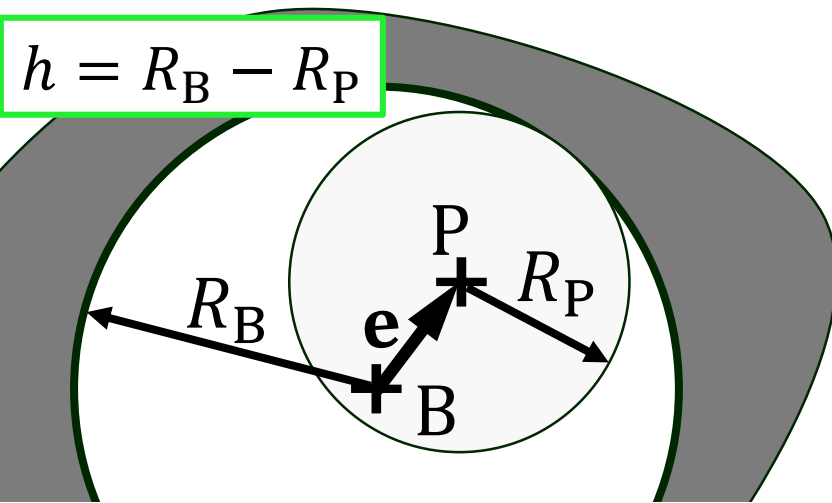
3. Análisis de juntas de revolución con holgura.

- 4. Desgaste.
- 5. Fatiga.
- 6. Caso industrial.
- 7. Conclusiones y trabajo futuro.

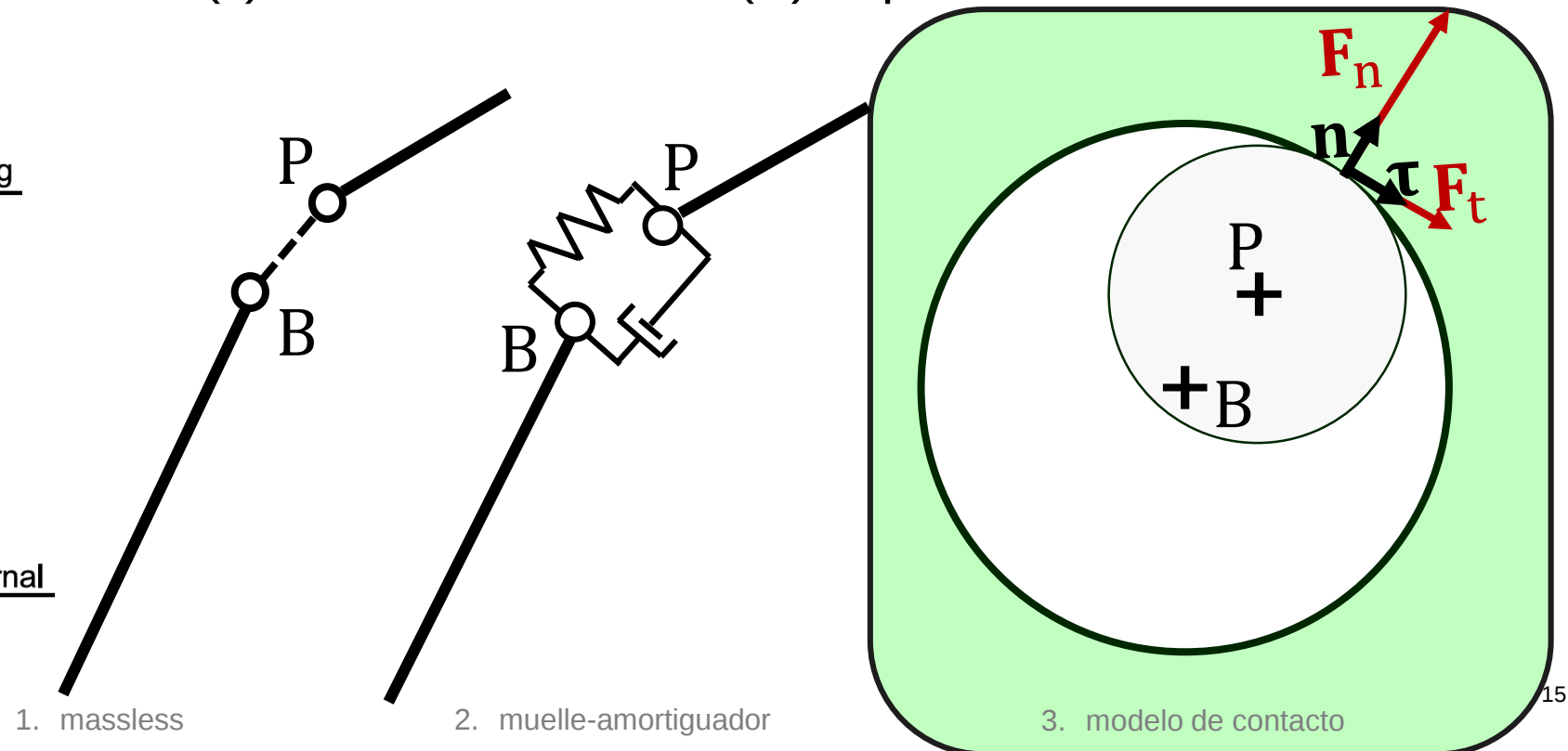
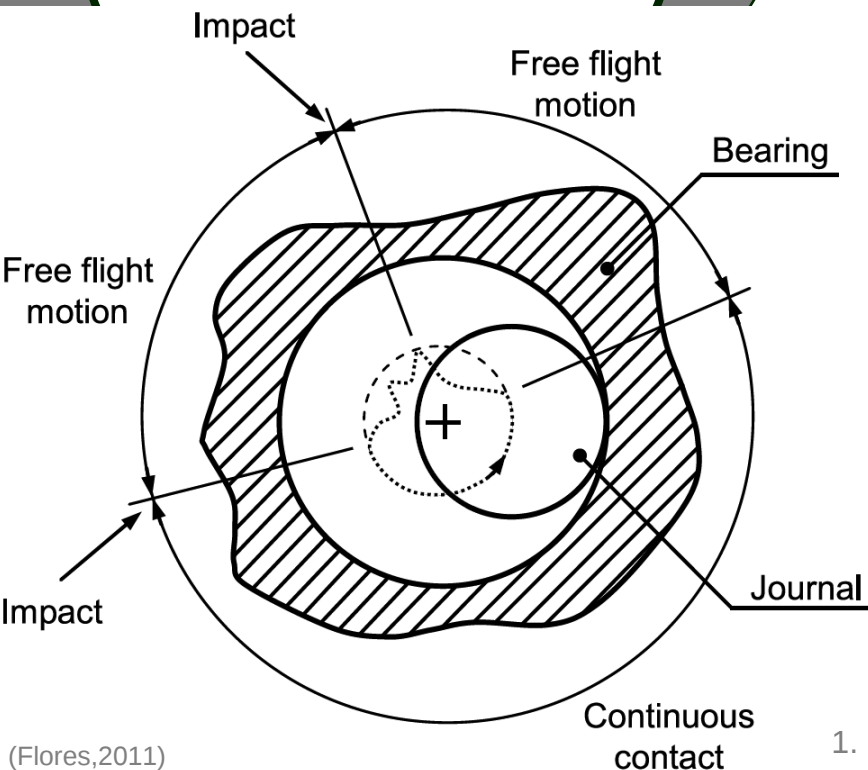


Introducción

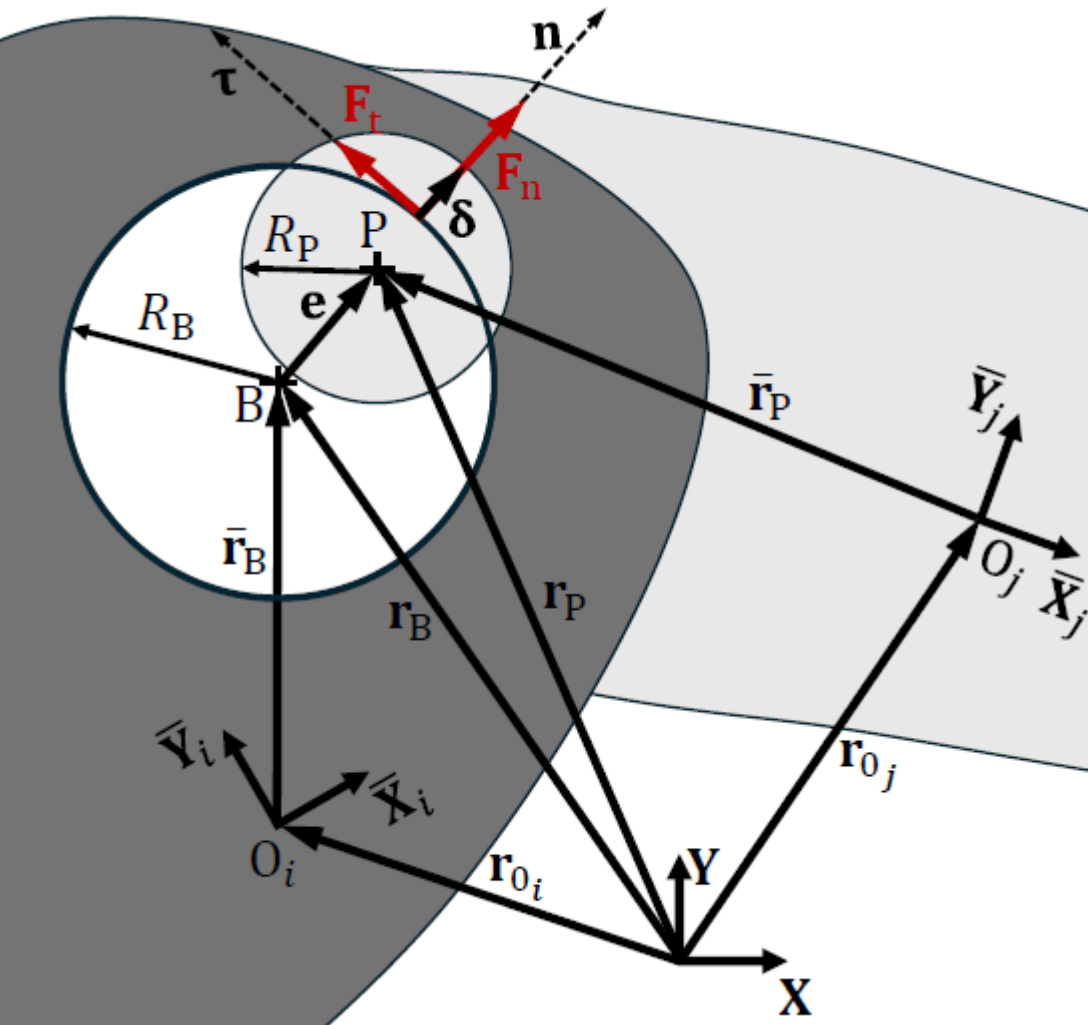
$$h = R_B - R_P$$



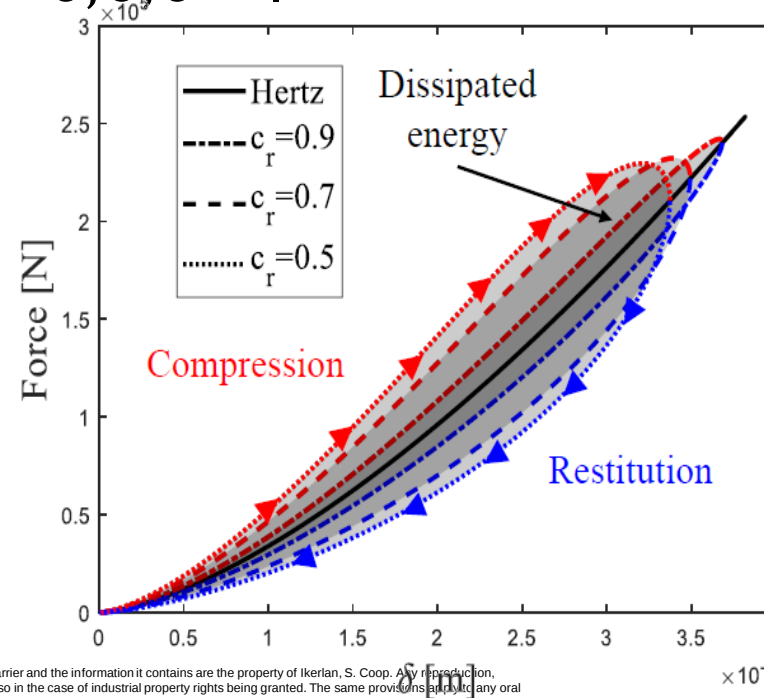
- Para que pueda existir giro relativo en juntas de revolución es necesaria la presencia de holgura.
- El análisis y desarrollo de modelos es una disciplina ampliamente estudiada en el ámbito de MBD.
- Una junta con holgura puede estar en tres fases: (i) vuelo libre; (ii) contacto continuo; (iii) impacto.



Modelo de contacto normal



- La fuerza de contacto entre bulón y casquillo tiene una componente normal y una componente tangencial (fricción).
- Los modelos de contacto continuo establecen una relación entre la fuerza normal de contacto y $\delta, \dot{\delta}, \dot{\delta}(-)$.



Hertz

$$F = K \cdot \delta^n$$

Hunt-Crossley

$$F = K \cdot \delta^n \cdot (1 + \chi \cdot \dot{\delta})$$

Lankarani-Nikravesh

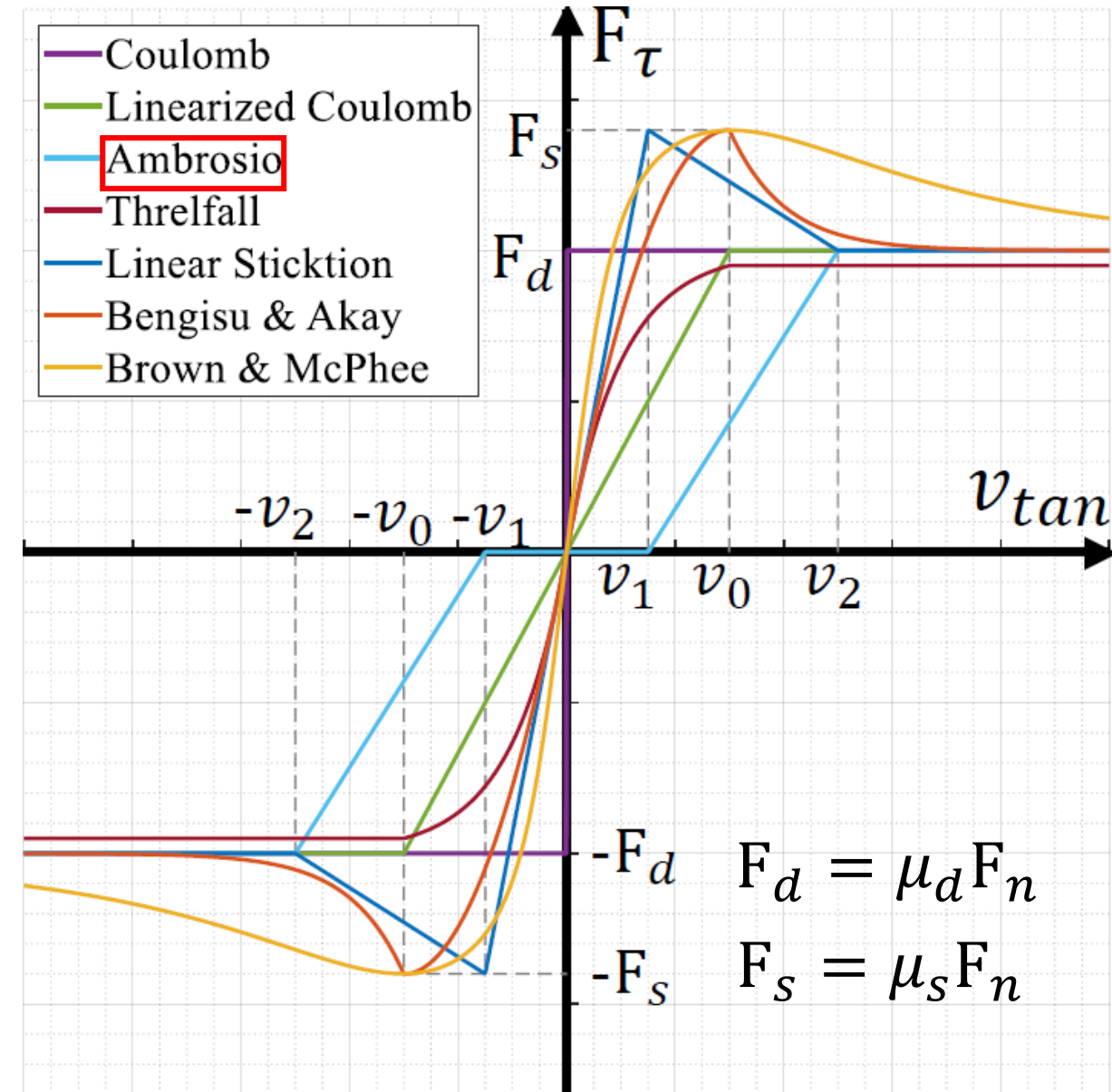
$$\chi = \frac{3(1 - c_r^2)}{4\dot{\delta}(-)}$$

Modelos de contacto

Modelos de contacto tangencial (fricción).

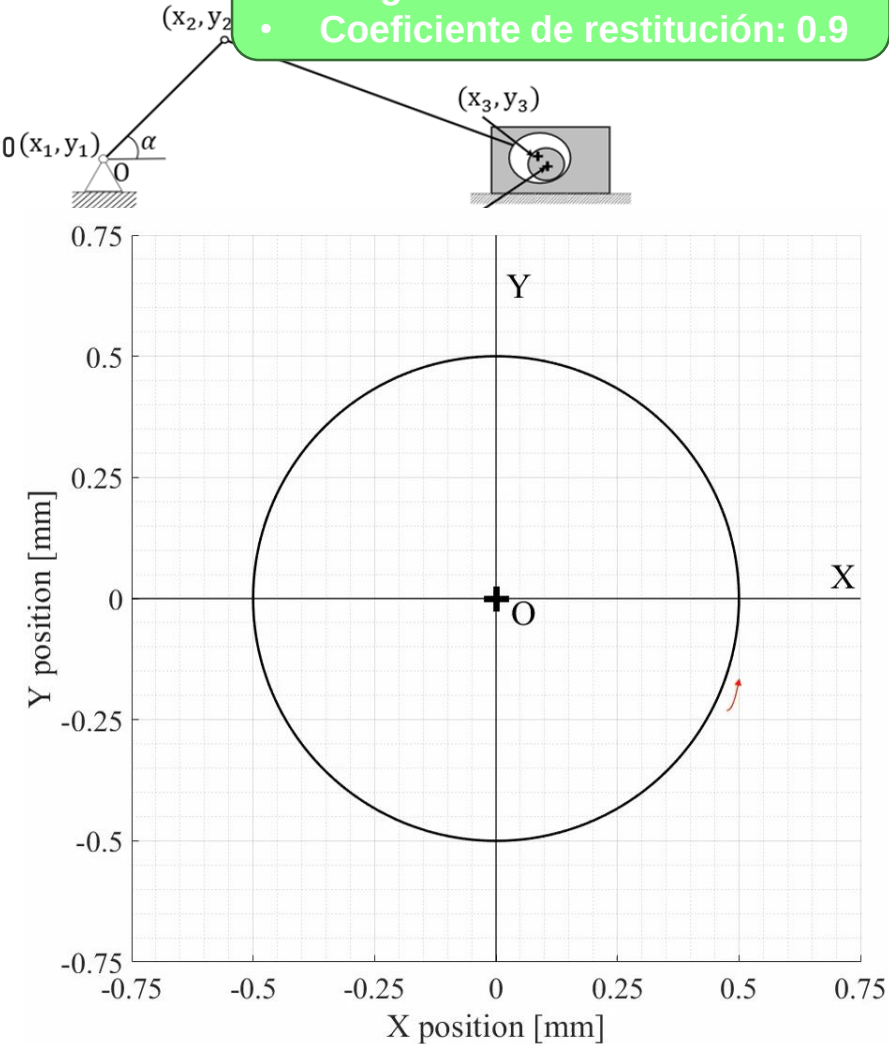
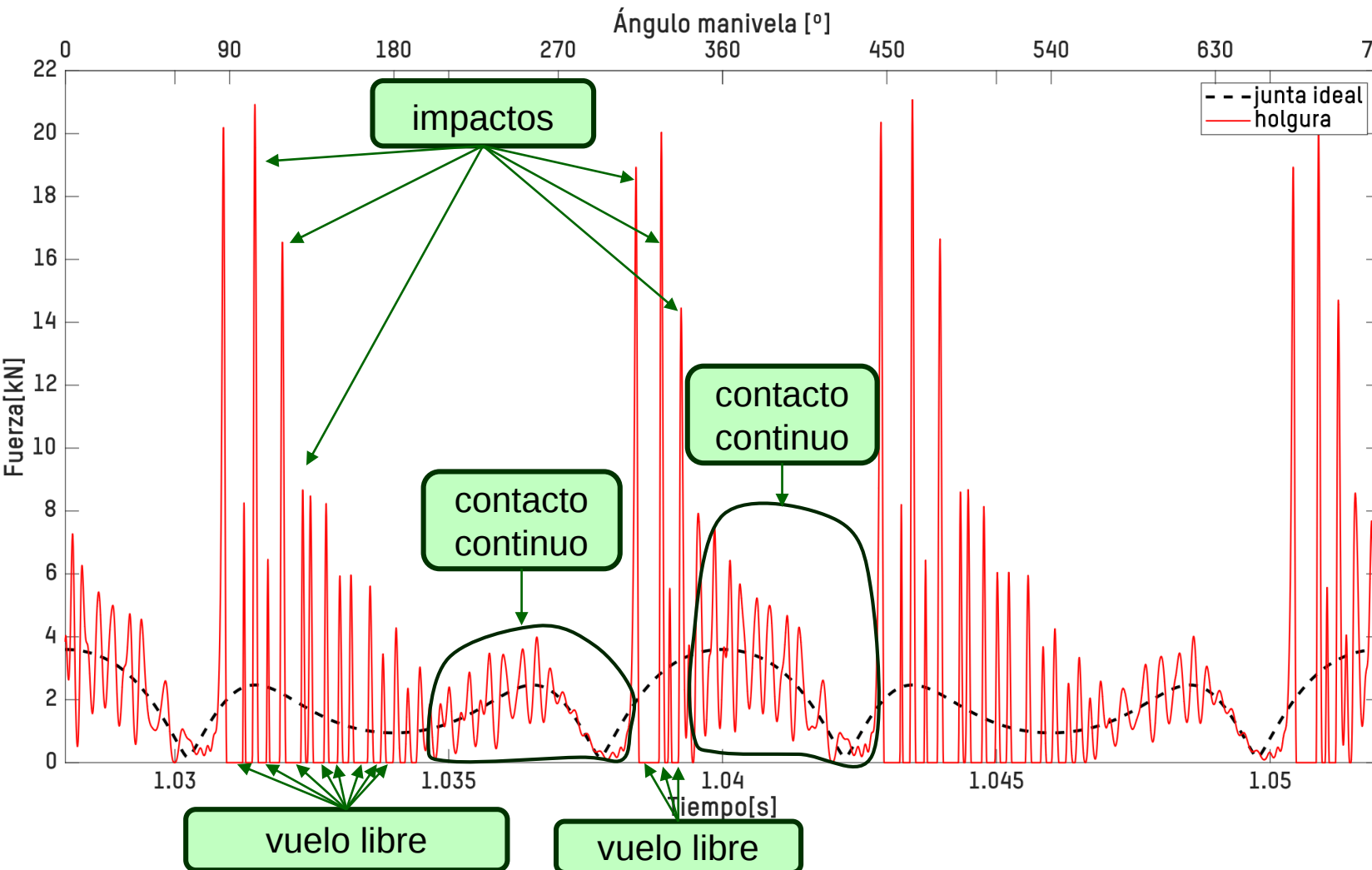
$$F_{\tau} = \mu F_n \frac{v_{tan}}{|v_{tan}|}$$

- Se han desarrollado numerosos modelos de fuerza tangencial para lidiar con la discontinuidad cuando la velocidad tangencial relativa es próxima a cero.
- Muchos modelos han tratado de describir fenómenos como la transición de fricción estática a dinámica o el **stick-slip**.



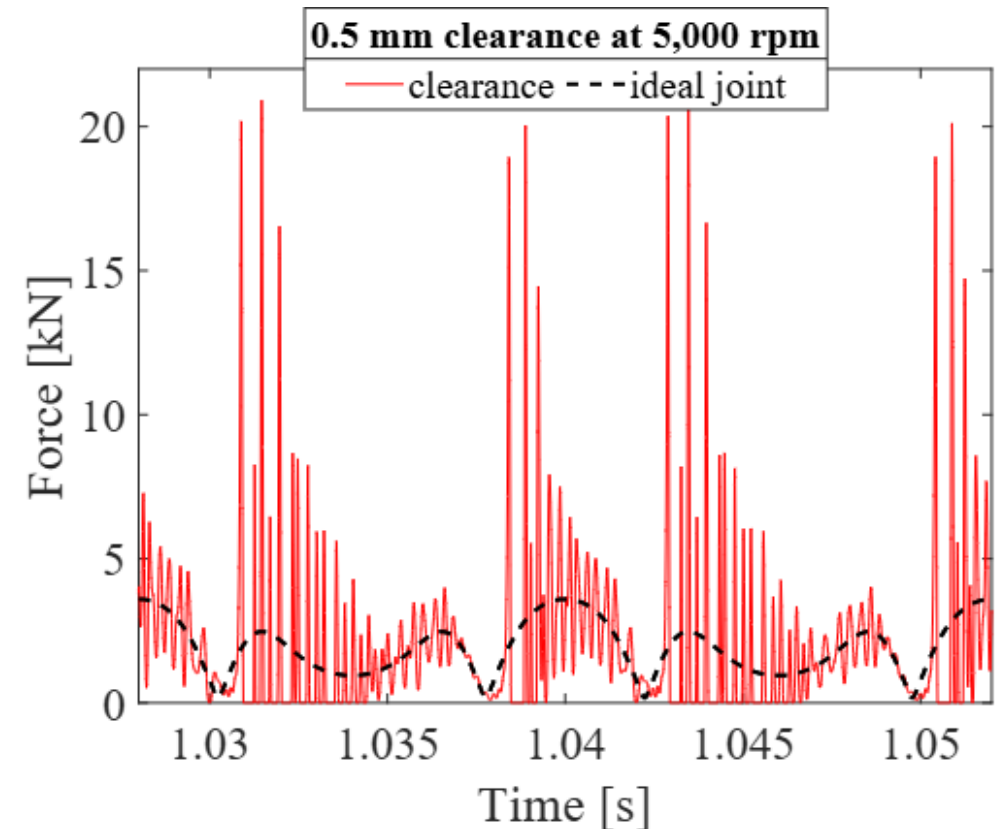
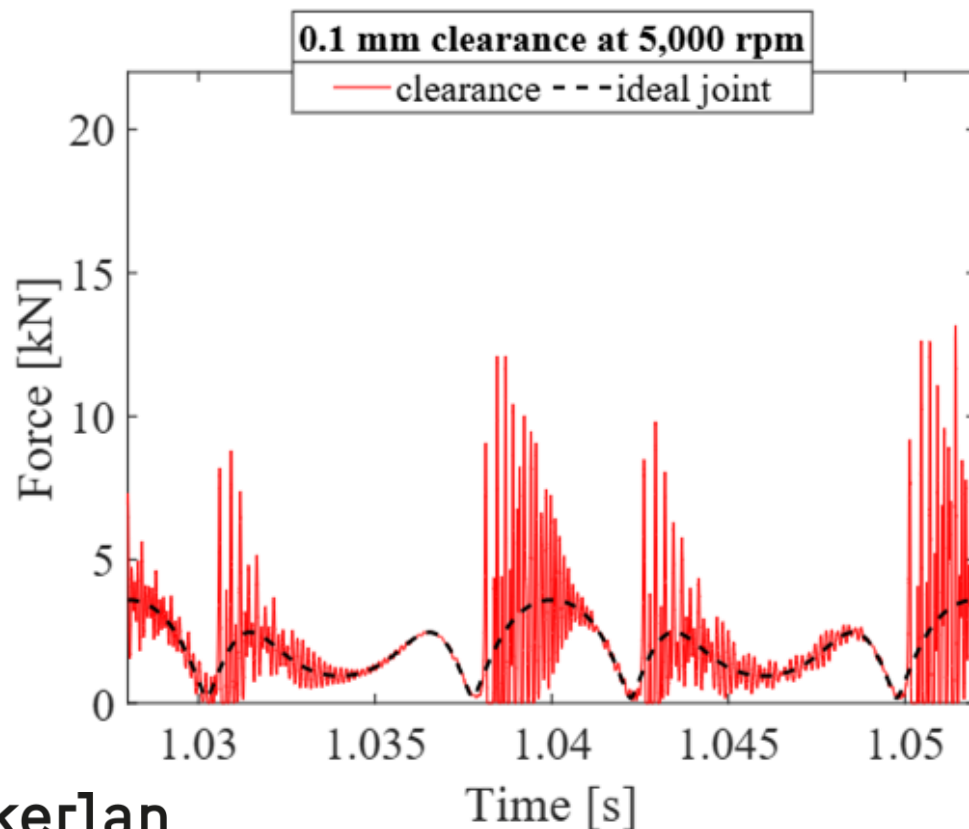
Comportamiento dinámico de mecanismos con holguras: fuerza de contacto

- Velocidad: 5,000 rpm
- Holgura: 0.5 mm
- Coeficiente de restitución: 0.9



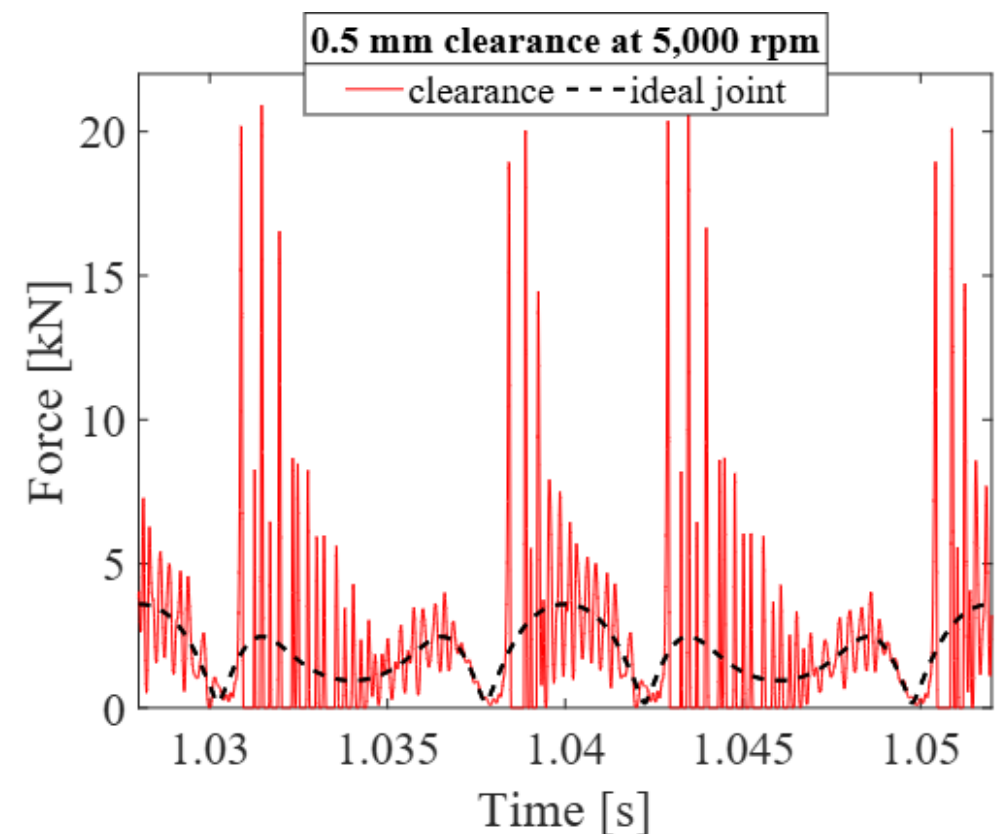
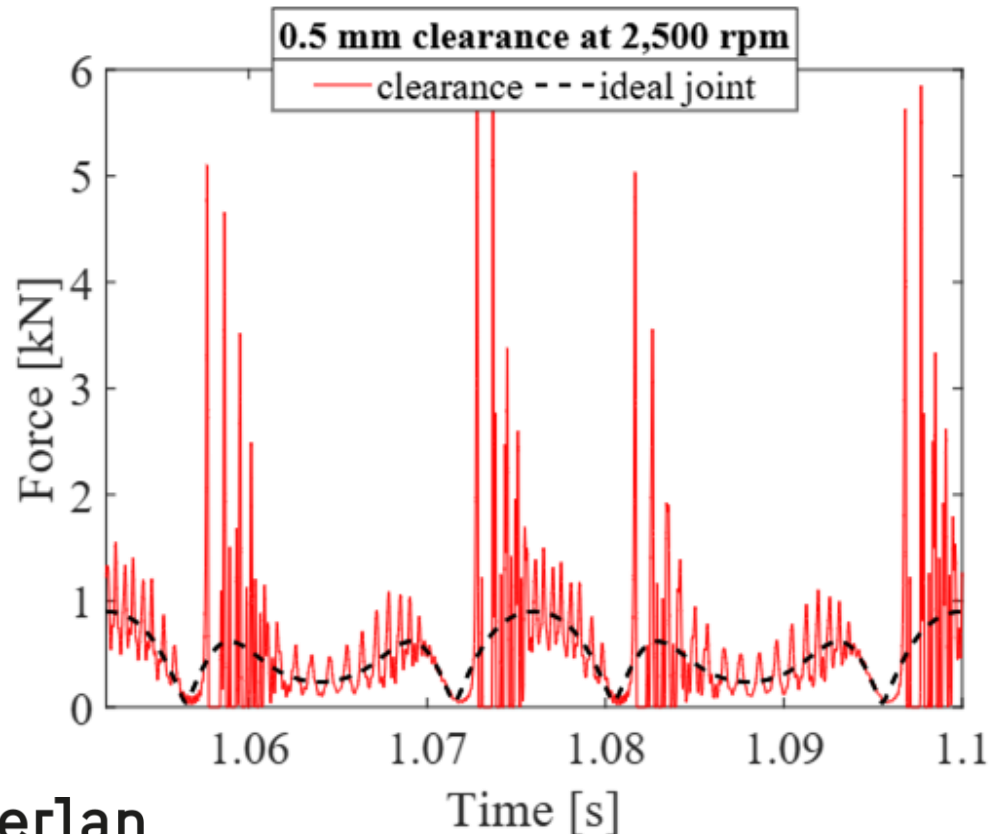
Comportamiento dinámico de mecanismos con holguras: fuerza de contacto

La respuesta dinámica del mecanismo se ve muy condicionada por los parámetros del mecanismo, del contacto, de la holgura...



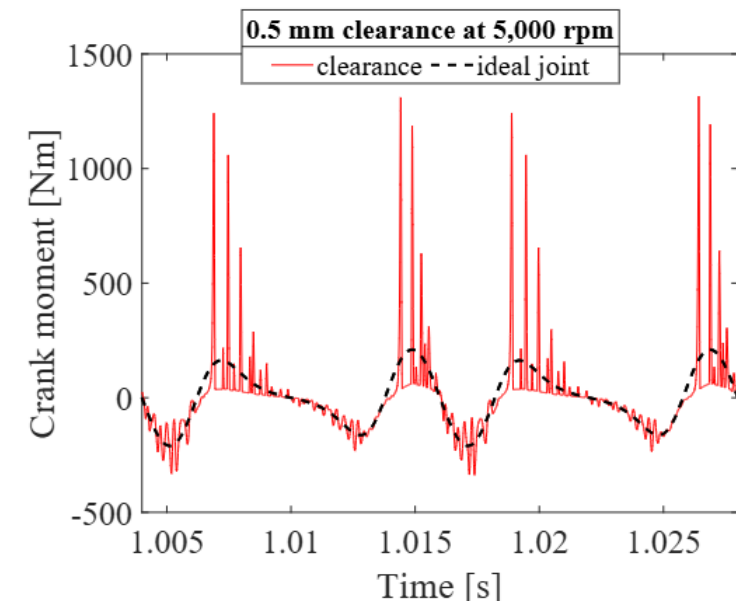
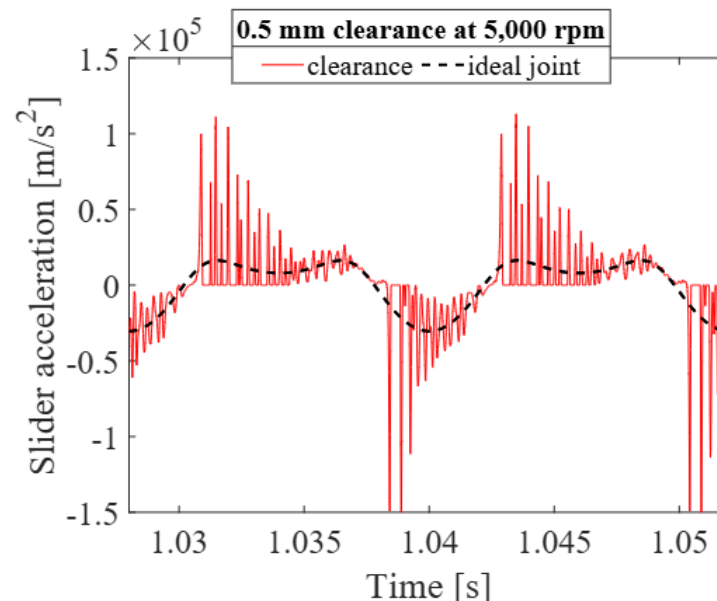
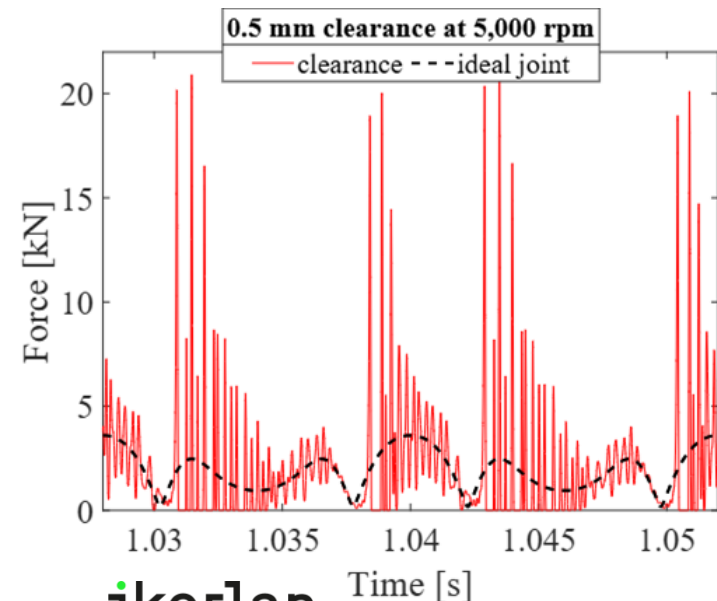
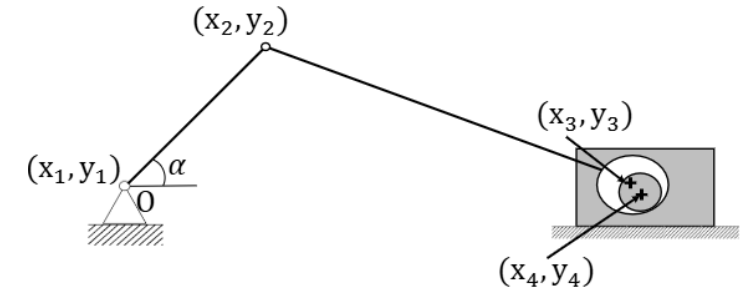
Comportamiento dinámico de mecanismos con holguras: fuerza de contacto

La respuesta dinámica del mecanismo se ve muy condicionada por los parámetros del mecanismo, del contacto, de la holgura...

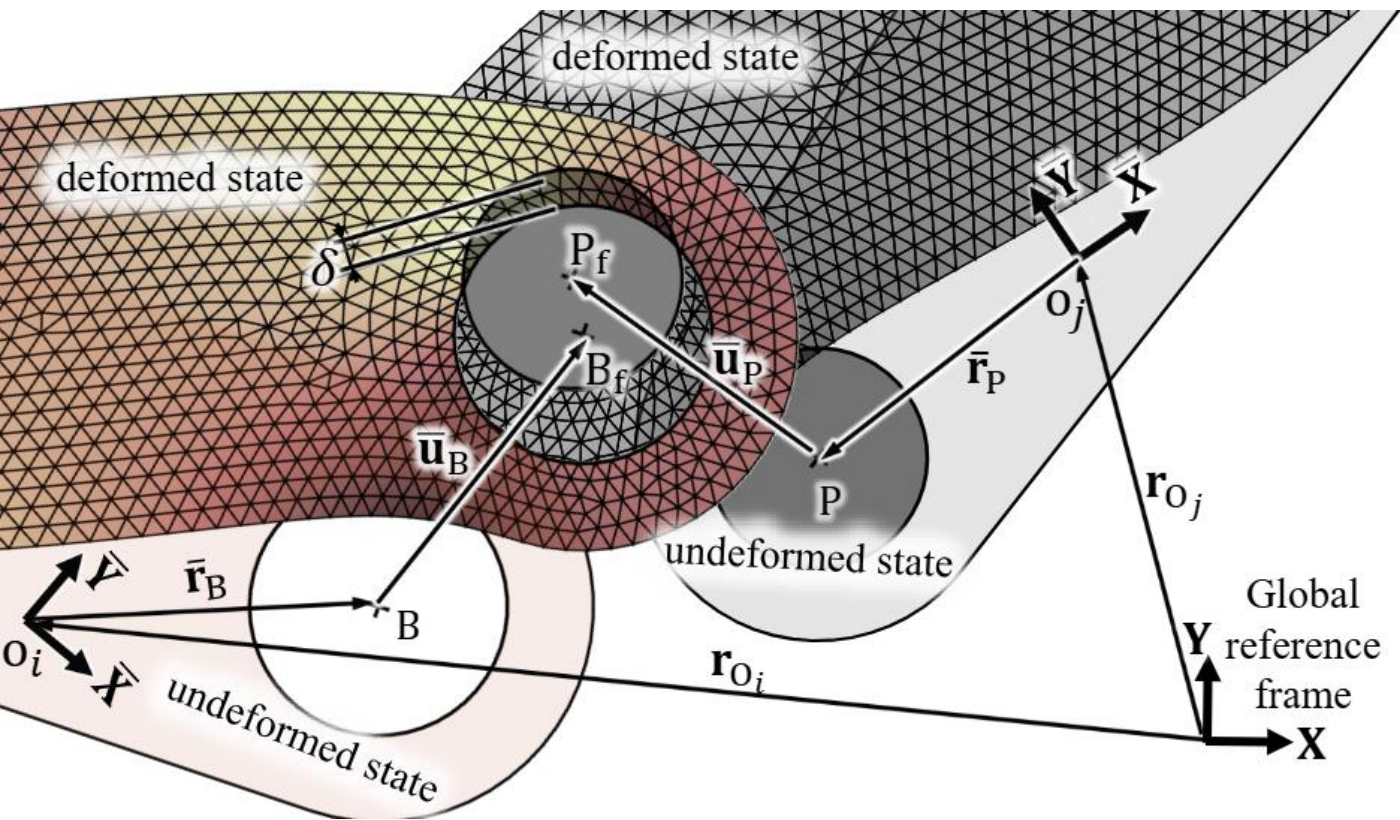


Comportamiento dinámico de mecanismos con holguras: fuerza de contacto

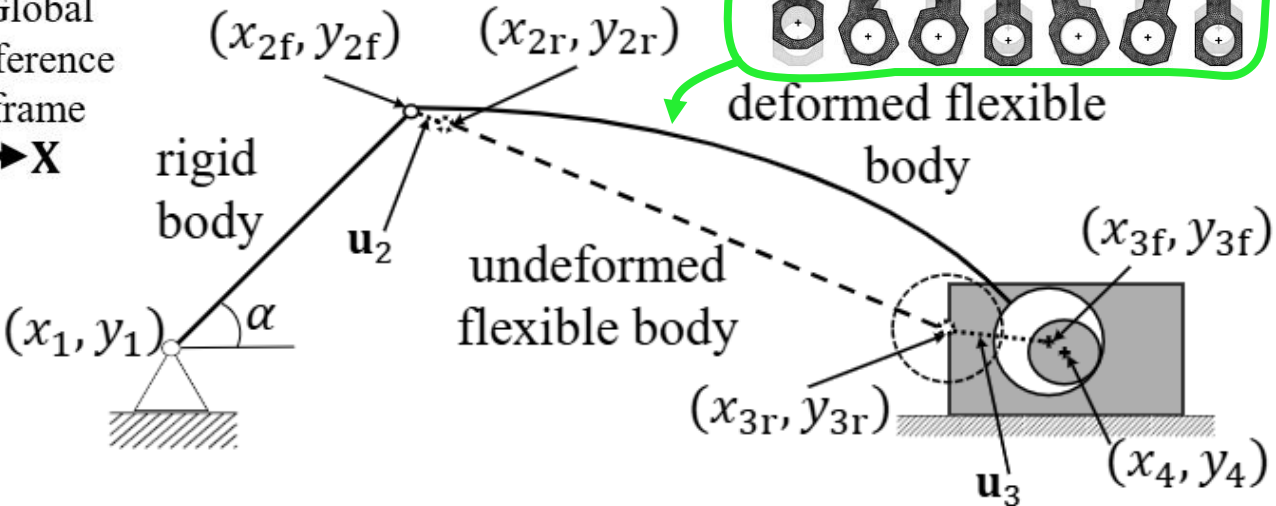
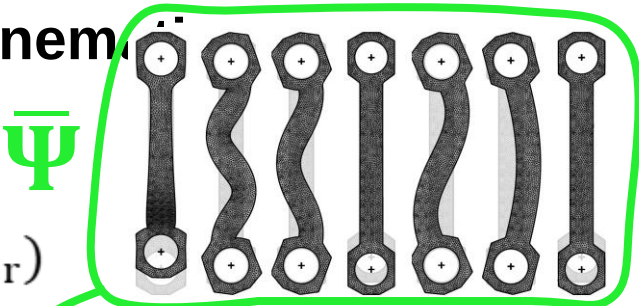
La presencia de holguras en el mecanismo también se manifiesta en las aceleraciones de la deslizadera y en el momento del actuador.



Mecanismos flexibles con juntas con holgura



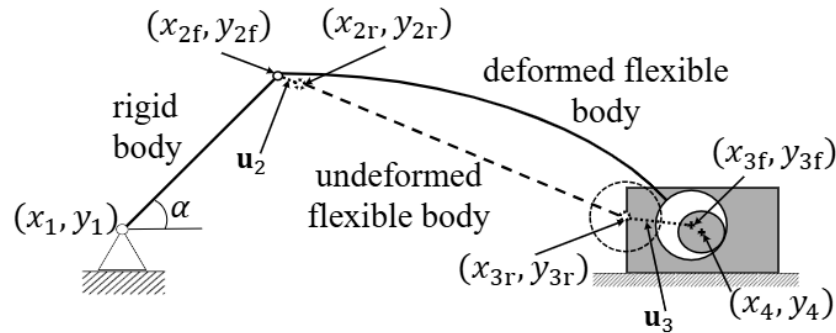
Las deformaciones locales de los centros de casquillo y bulón deben tenerse en cuenta para la determinación del contacto y el análisis de su cinem.



$$\begin{bmatrix} x_{2f} \\ y_{2f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{2r} \\ y_{2r} \end{bmatrix} + A \bar{\Psi}_2 \mathbf{q}_f \quad \bar{\mathbf{u}}_2$$

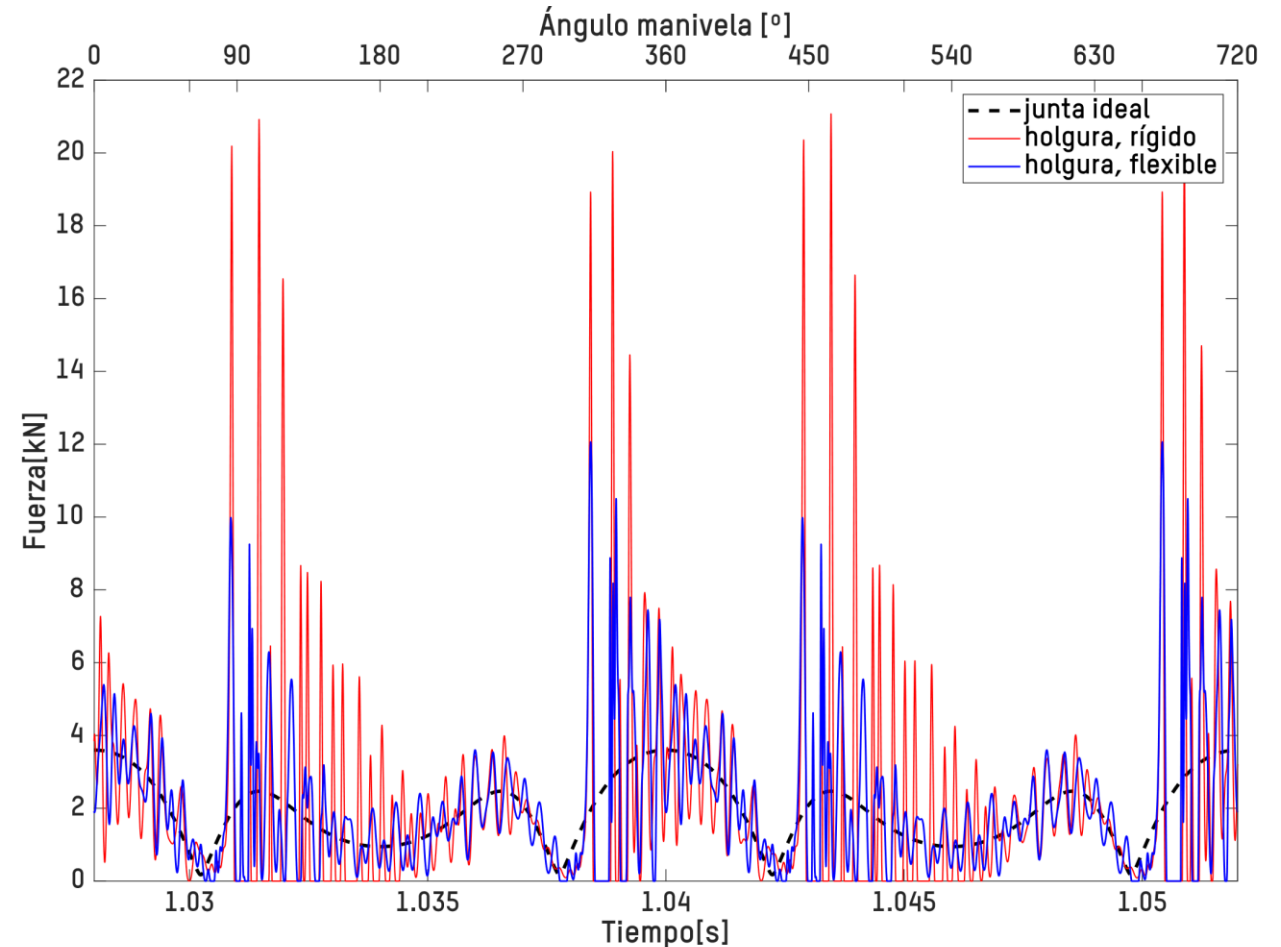
$$\begin{bmatrix} x_{3f} \\ y_{3f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{3r} \\ y_{3r} \end{bmatrix} + A \bar{\Psi}_3 \mathbf{q}_f \quad \bar{\mathbf{u}}_3$$

Mecanismos flexibles con juntas con holgura



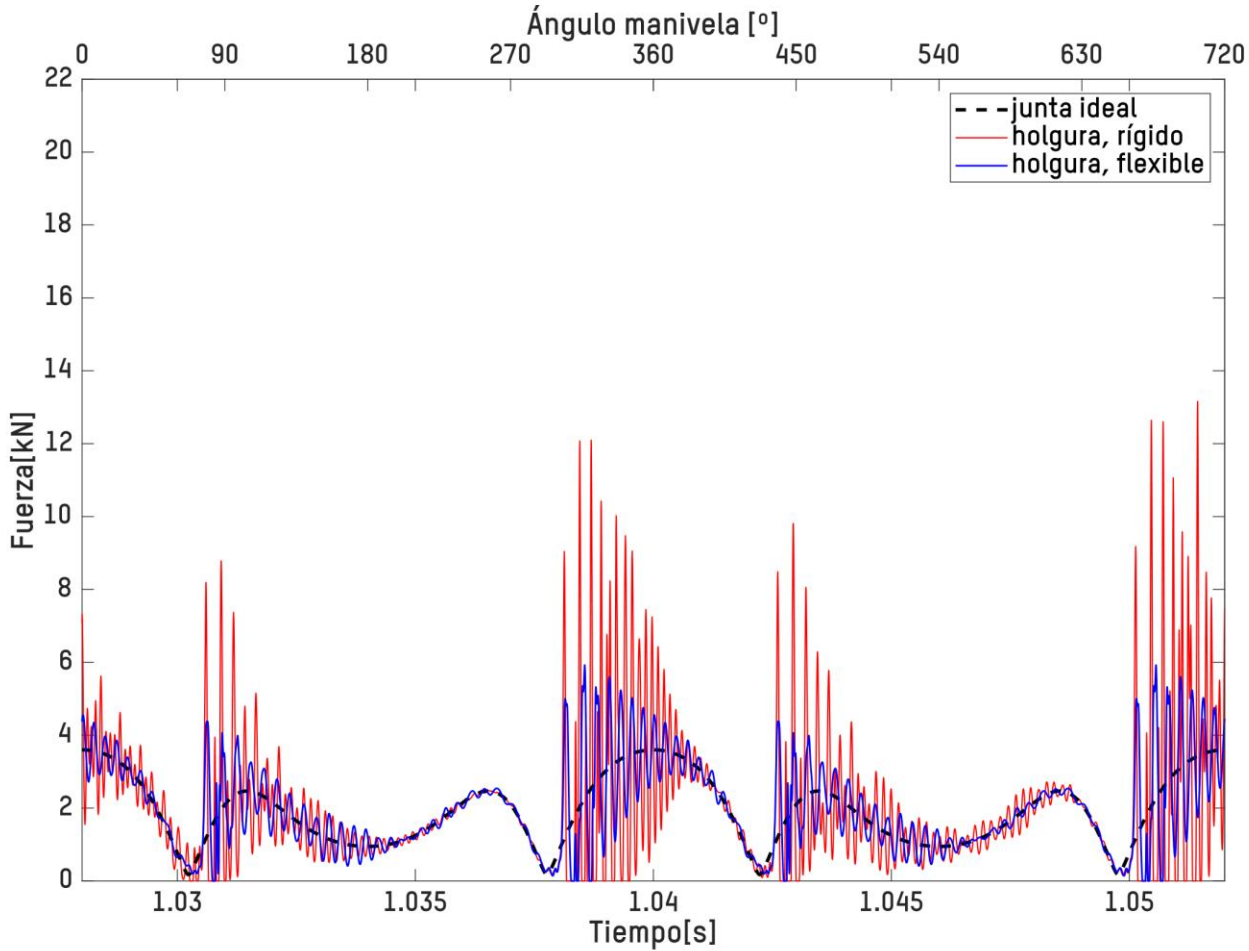
- Velocidad: 5,000 rpm
- Holgura: 0.5 mm
 - Radio casquillo: 10 mm
 - Radio bulón: 9.5 mm
- Coeficiente de restitución: 0.9

La flexibilidad tiende a disminuir los efectos de las holguras, disipar los impactos, reducir la frecuencia de fases de vuelo libre.

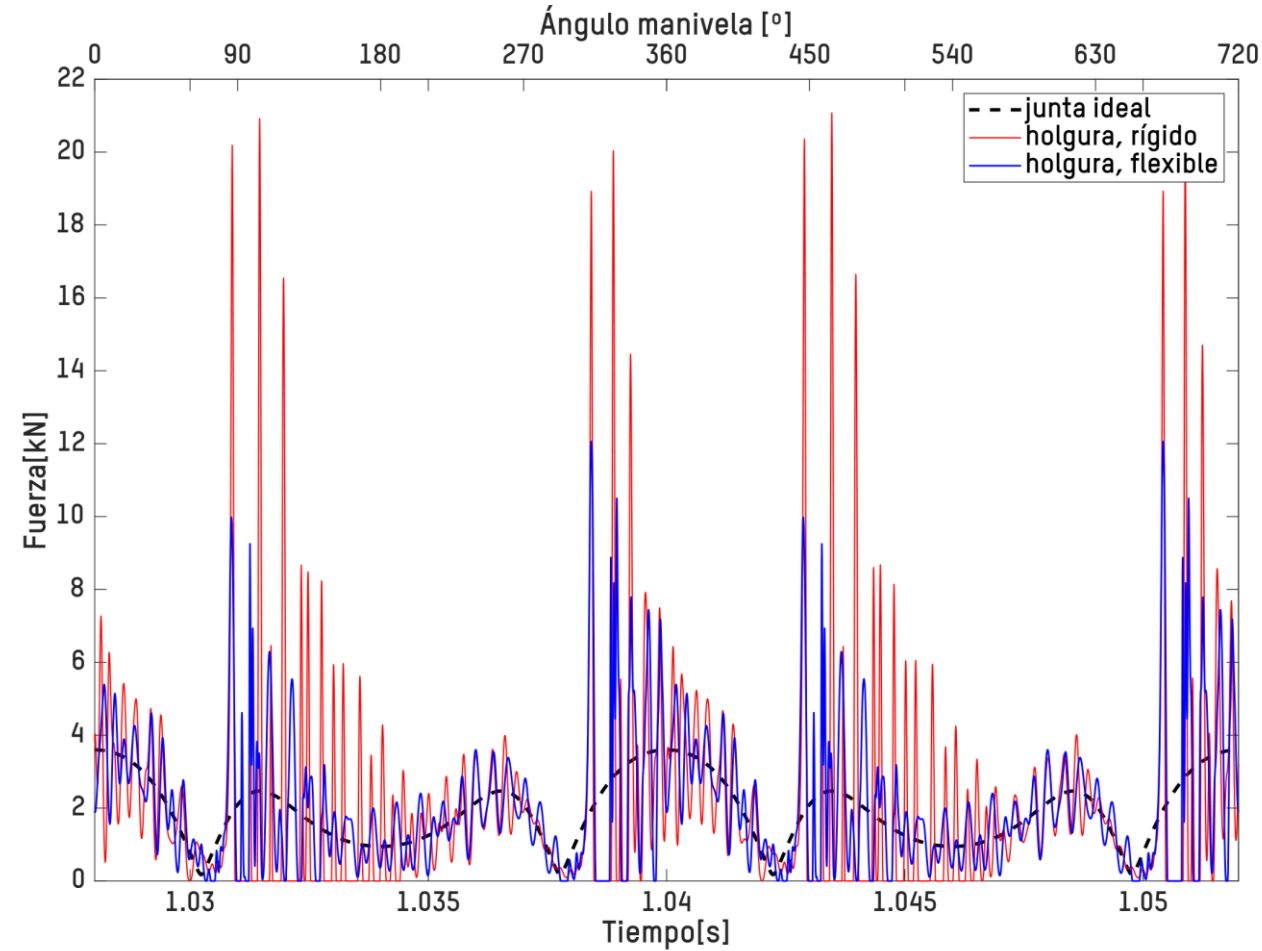


Mecanismos flexibles con juntas con holgura

0.1 mm de holgura a 5,000 rpm

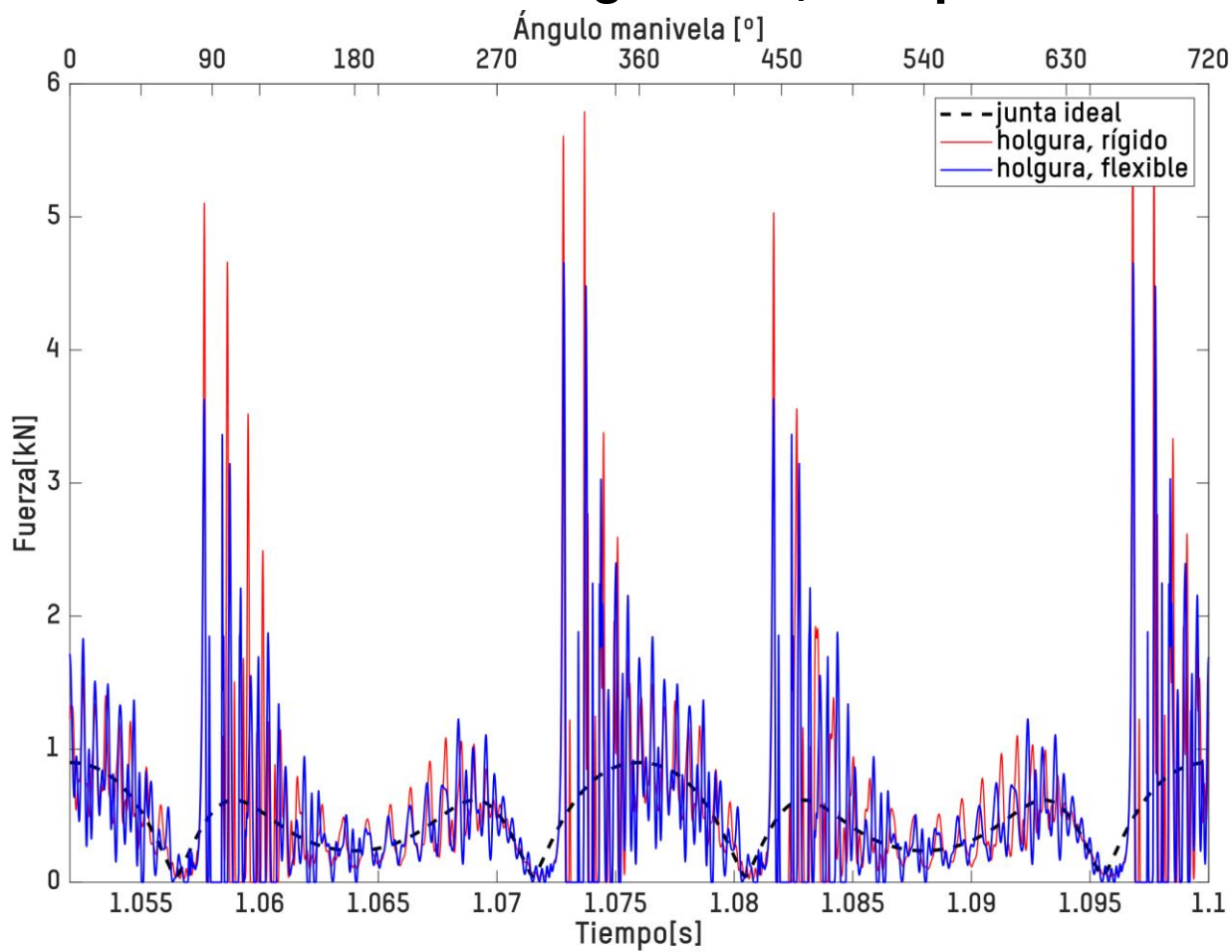


0.5 mm de holgura a 5,000 rpm

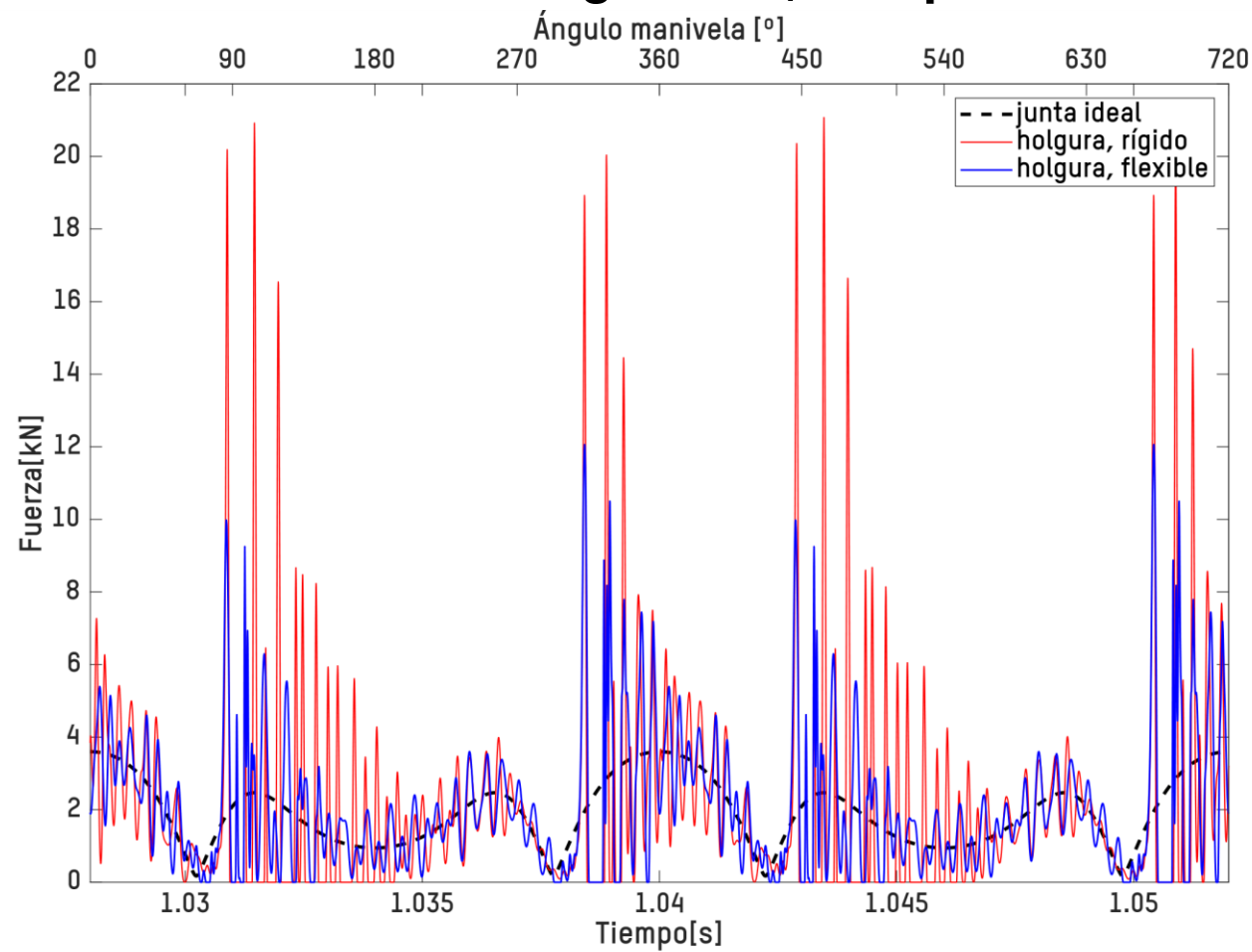


Mecanismos flexibles con juntas con holgura

0.5 mm de holgura a 2,500 rpm



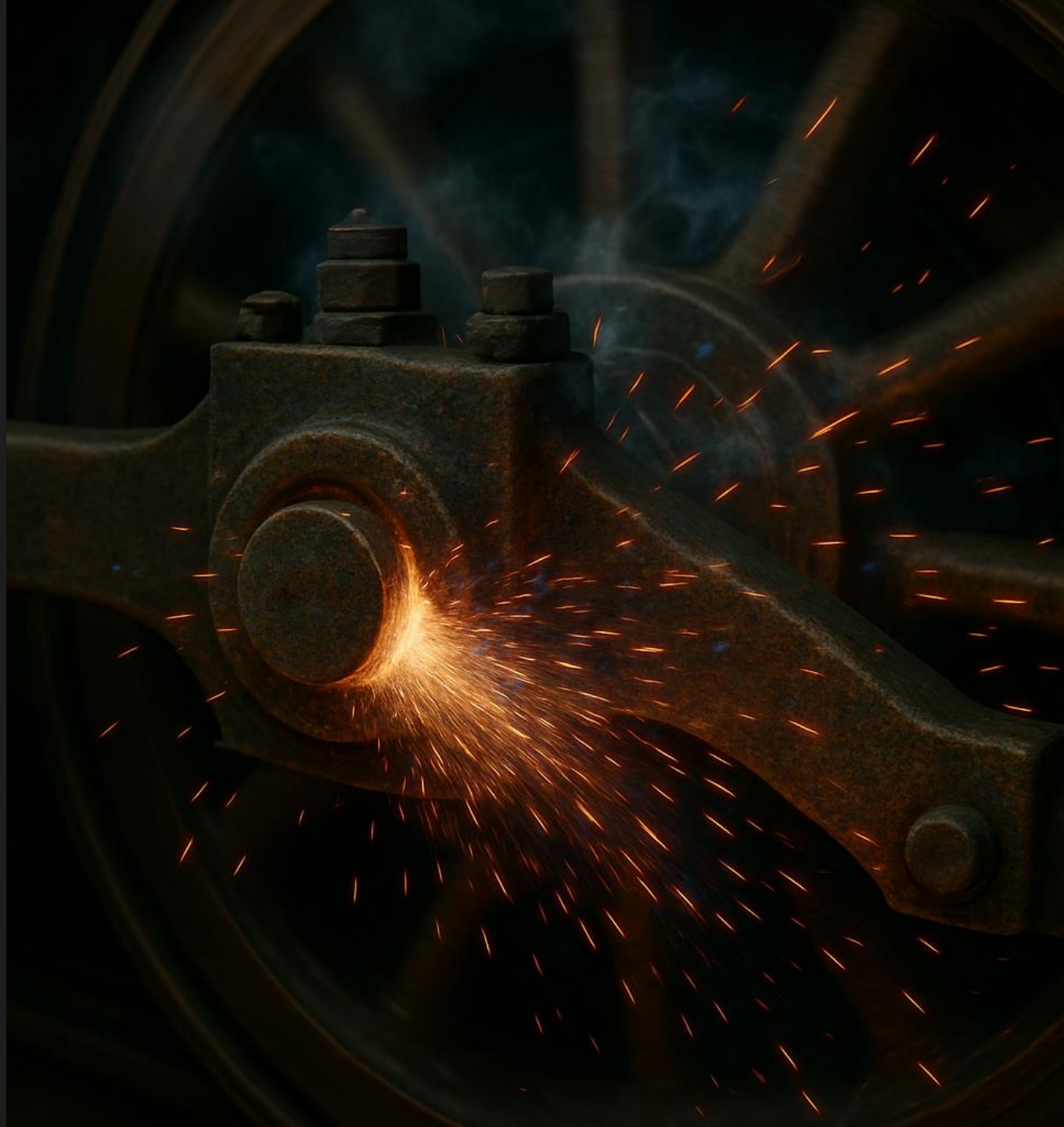
0.5 mm de holgura a 5,000 rpm



4.

Desgaste.

- 5. Fatiga.
- 6. Caso industrial.
- 7. Conclusiones y trabajo futuro.



Introducción

- El desgaste se produce cuando dos superficies que están en contacto y bajo carga, en condiciones de rozamiento, experimentan un deslizamiento relativo, resultando en una progresiva pérdida de material en una o en ambas superficies.
- Se asume que sólo se desgasta el material más blando.
- Existen una gran cantidad de modelos para describir el desgaste: el más popular es la ecuación de desgaste de Archard (1953).

Ecuación de Archard

$$V_w = \frac{K_w}{H} F_n S$$

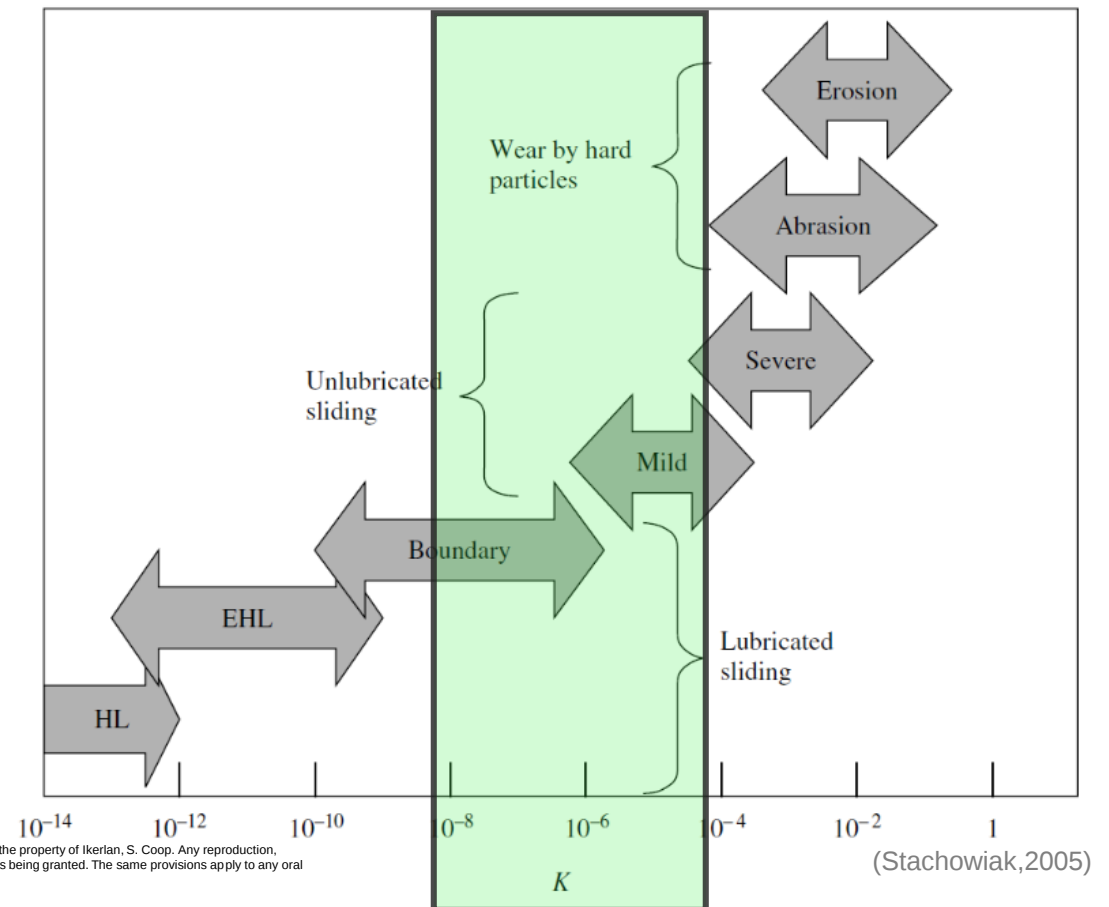
Constante de desgaste

Volumen de desgaste

Dureza (del material más blando)

Fuerza normal

Deslizamiento o relativo



Implementación del desgaste

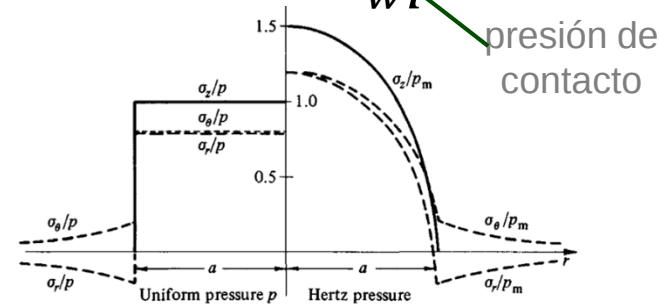
- La presencia del desgaste afecta a la geometría de los cuerpos en contacto.
- La ecuación de Archard se implementa de forma discreta.

Volumen de desgaste

$$V_w = \frac{K_w}{H} F_n s$$

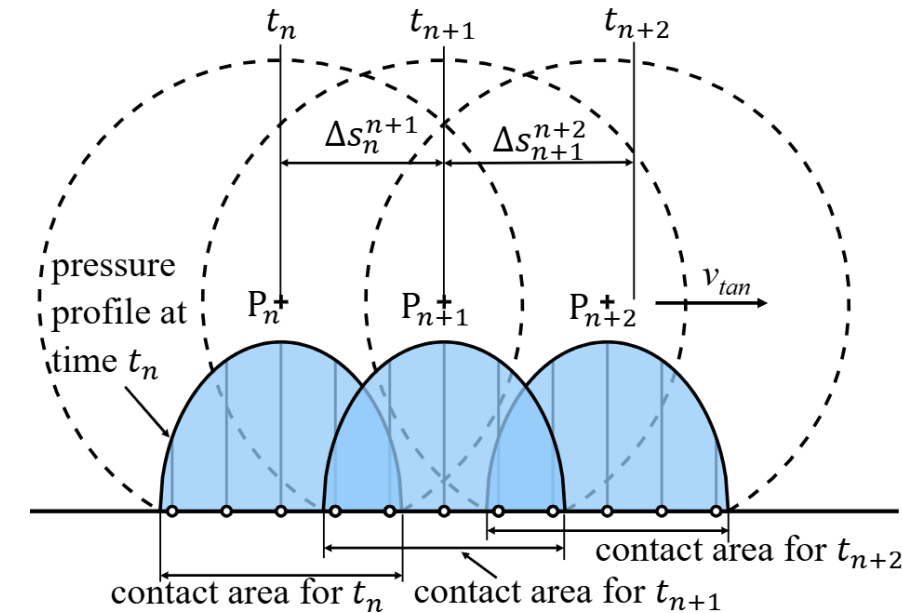
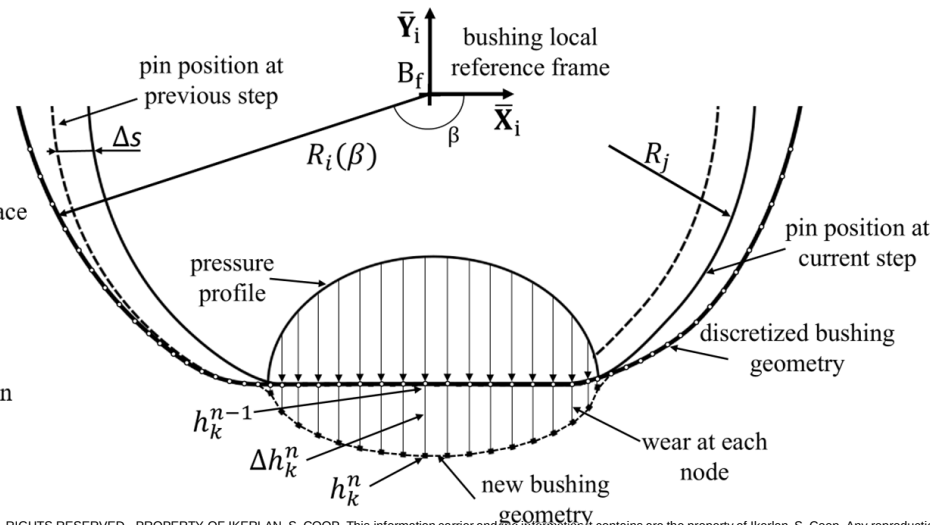
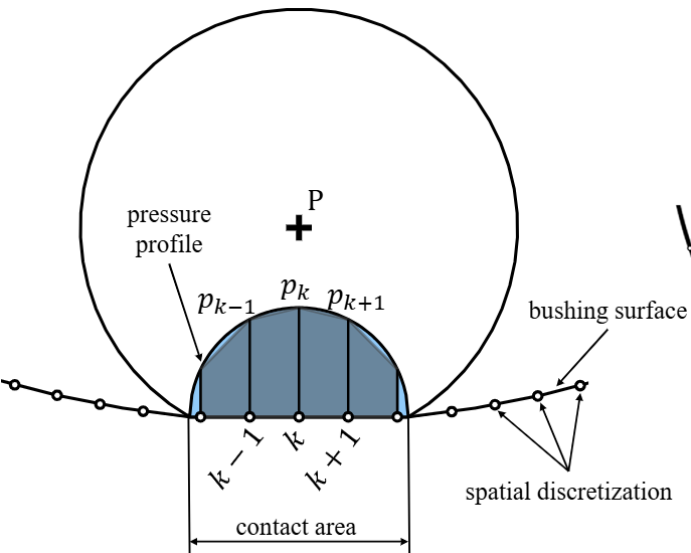
Profundidad de
desgaste

$$h = k_w p s$$



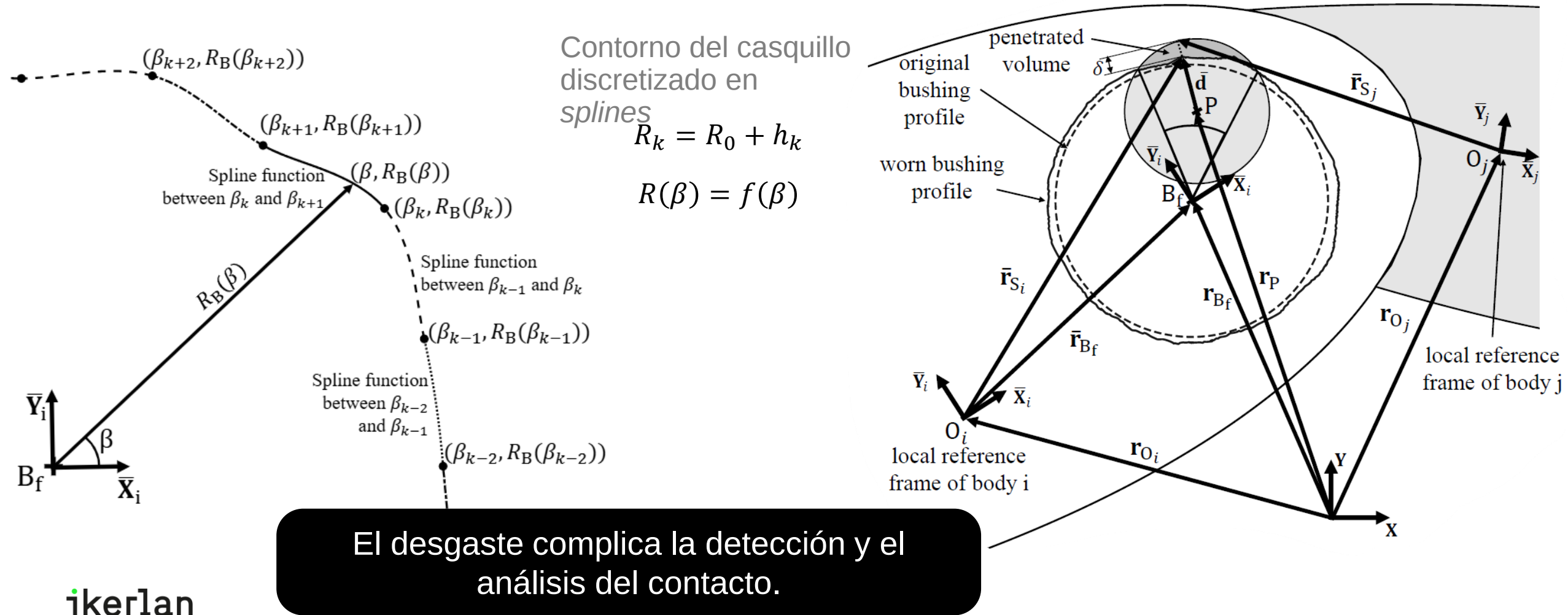
Profundidad de desgaste en el
punto k en el instante n

$$h_k^n = h_k^{n-1} + k_w p_k s_{n-1}^n$$

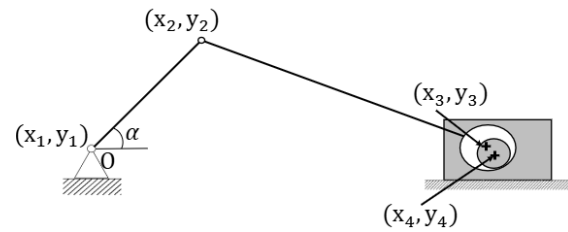


Implementación del desgaste

- La presencia del desgaste afecta a la geometría de los cuerpos en contacto.
- La ecuación de Archard se implementa de forma discreta.

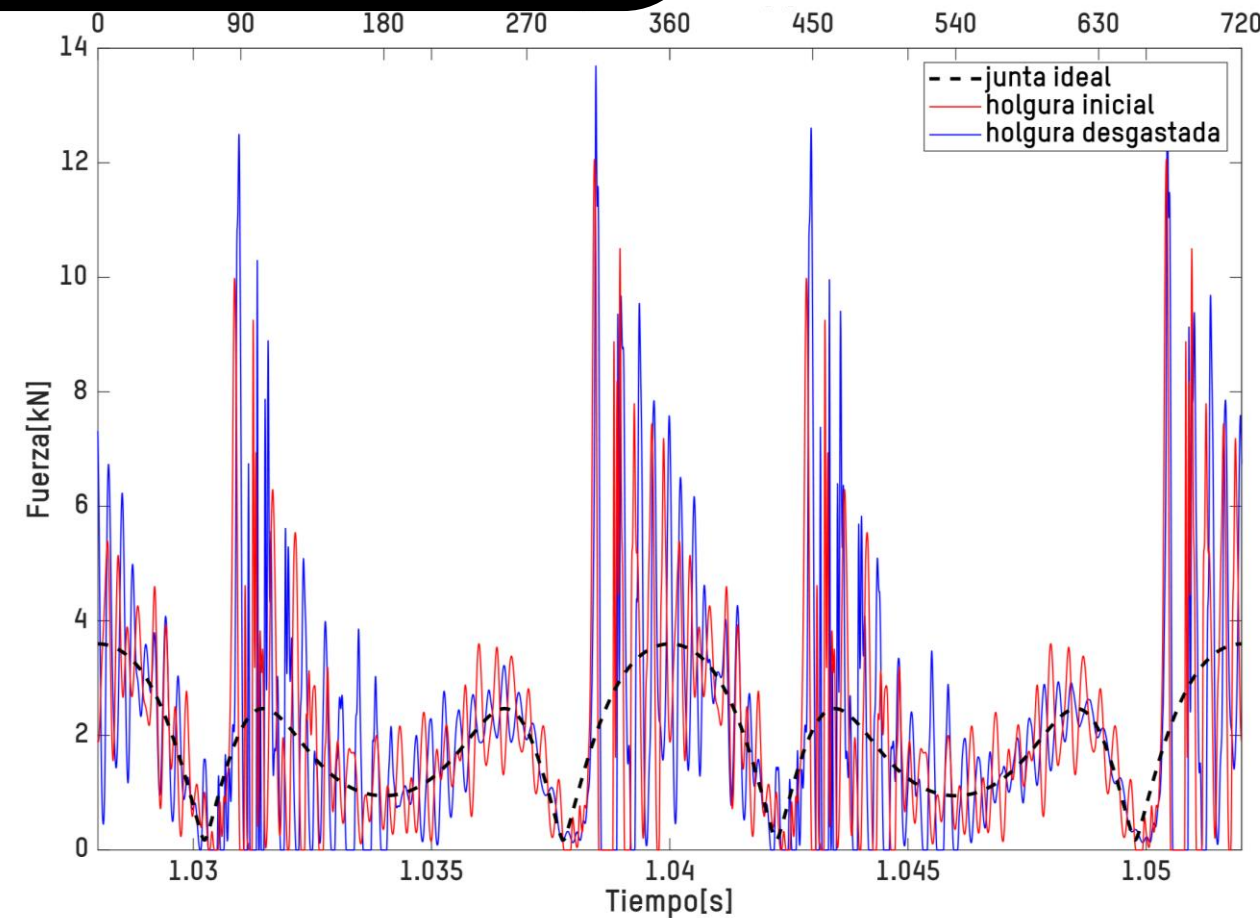
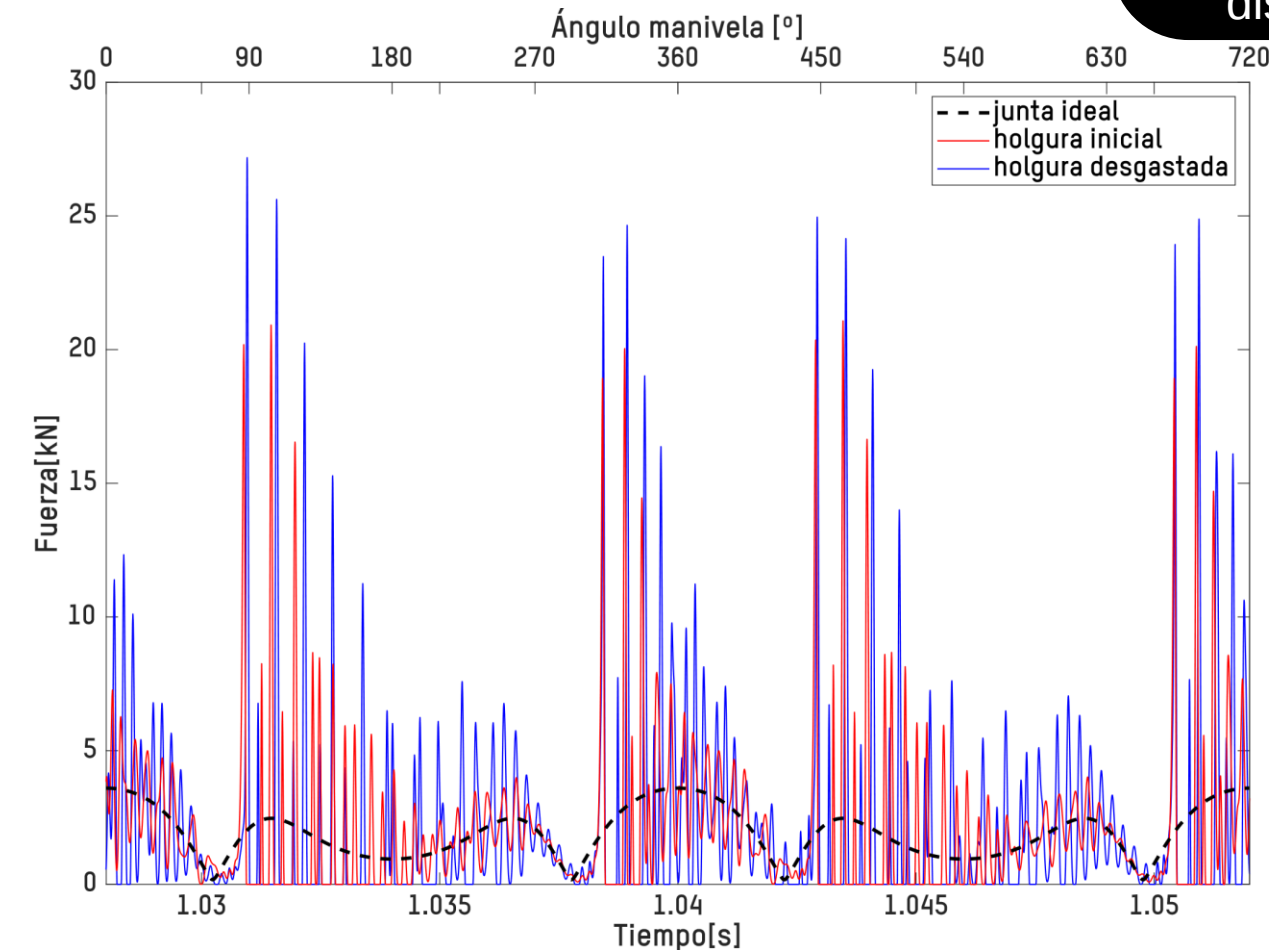
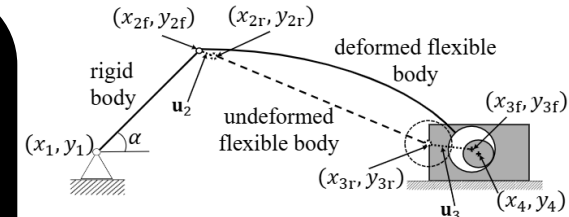


Efectos del desgaste en la dinámica

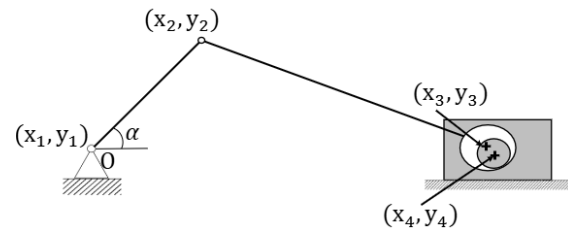


- Velocidad: 5,000 rpm
- Holgura: 0.5 mm
- 200 ciclos de desgaste

- El desgaste incrementa la amplitud y frecuencia de los impactos.
- La consideración de la flexibilidad disminuye el efecto del desgaste.

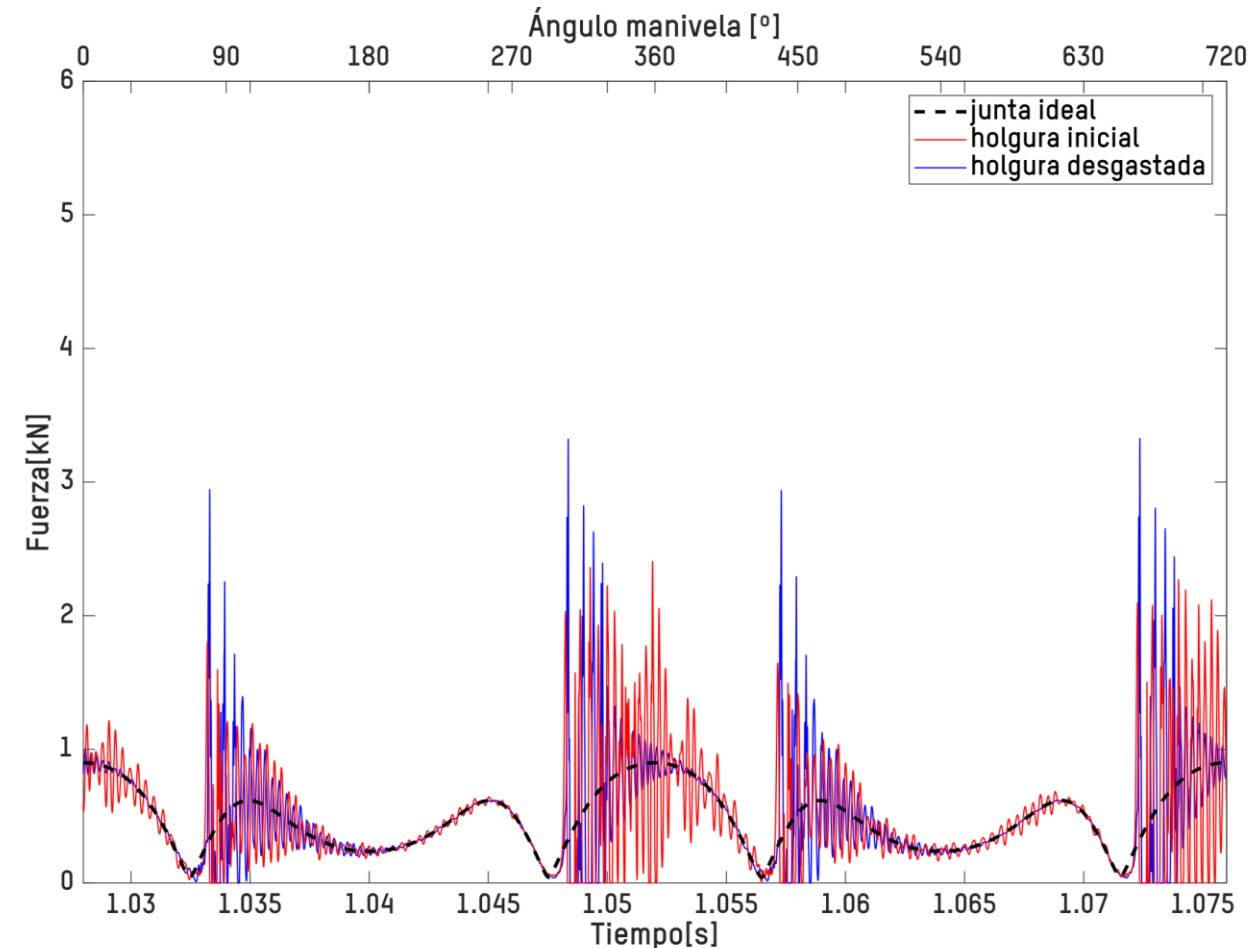
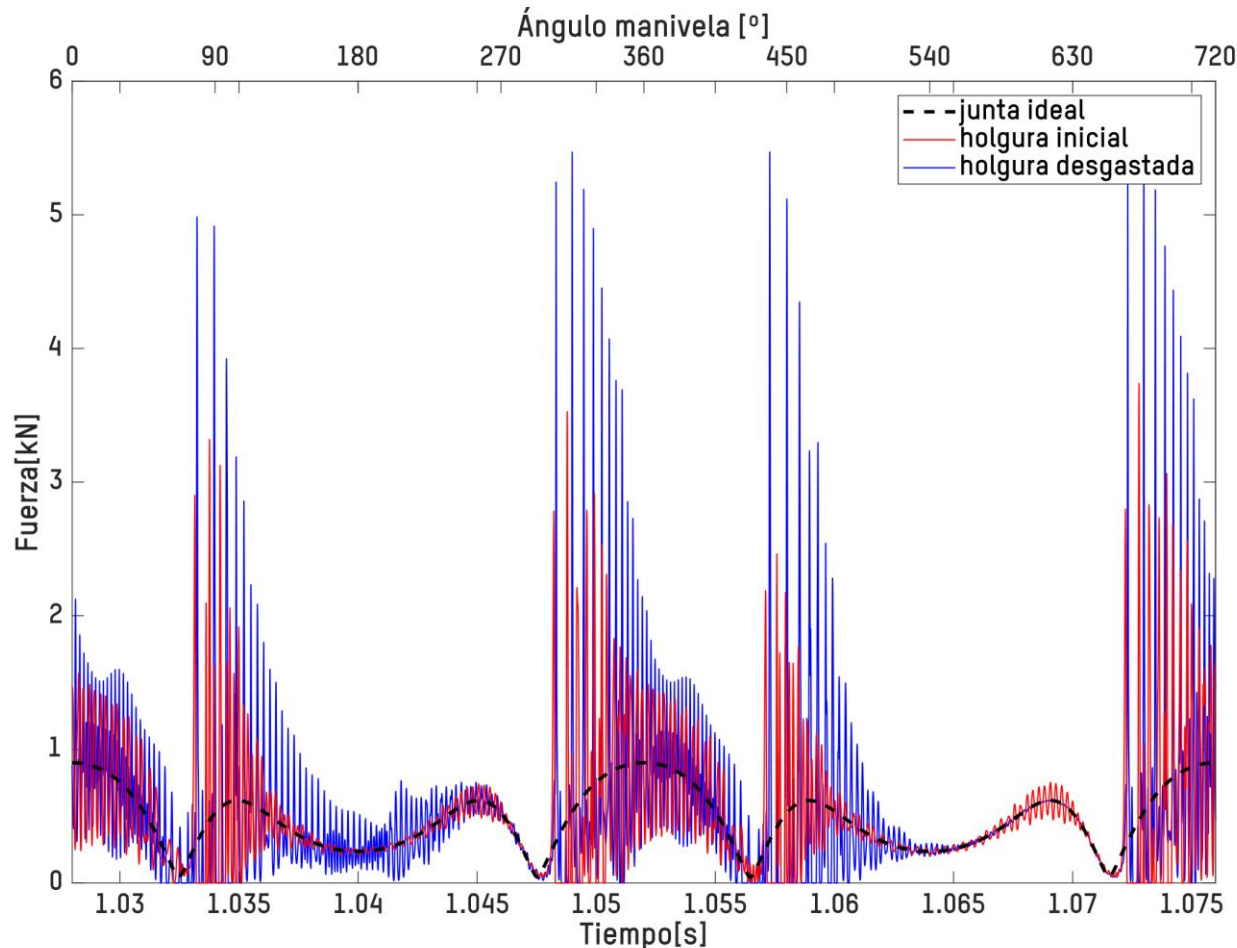
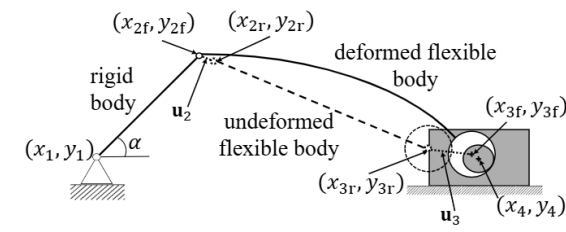


Efectos del desgaste en la dinámica



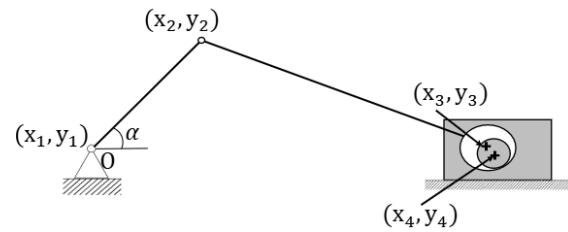
- Velocidad: 2,500 rpm
- Holgura: 0.1 mm
- 200 ciclos de desgaste.

El efecto de la flexibilidad en la evolución de las fuerzas debidas al desgaste varía en función de la velocidad y el tamaño de la holgura.



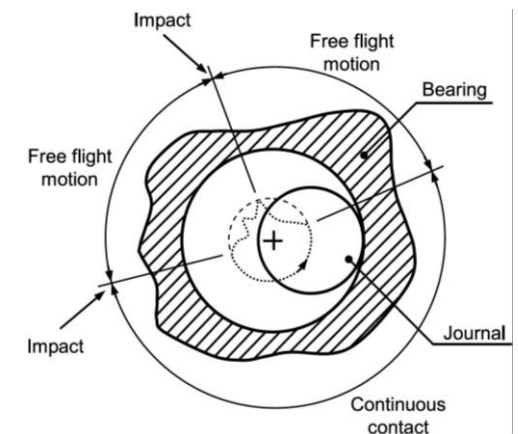
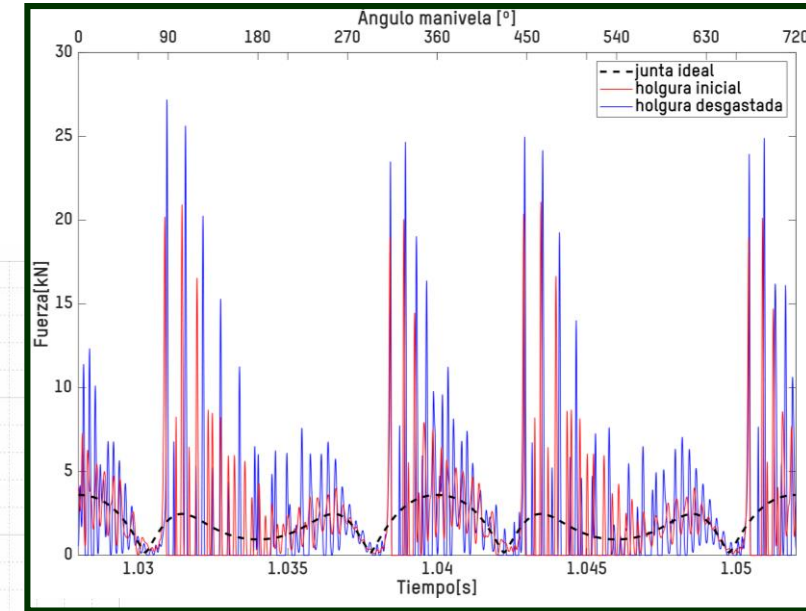
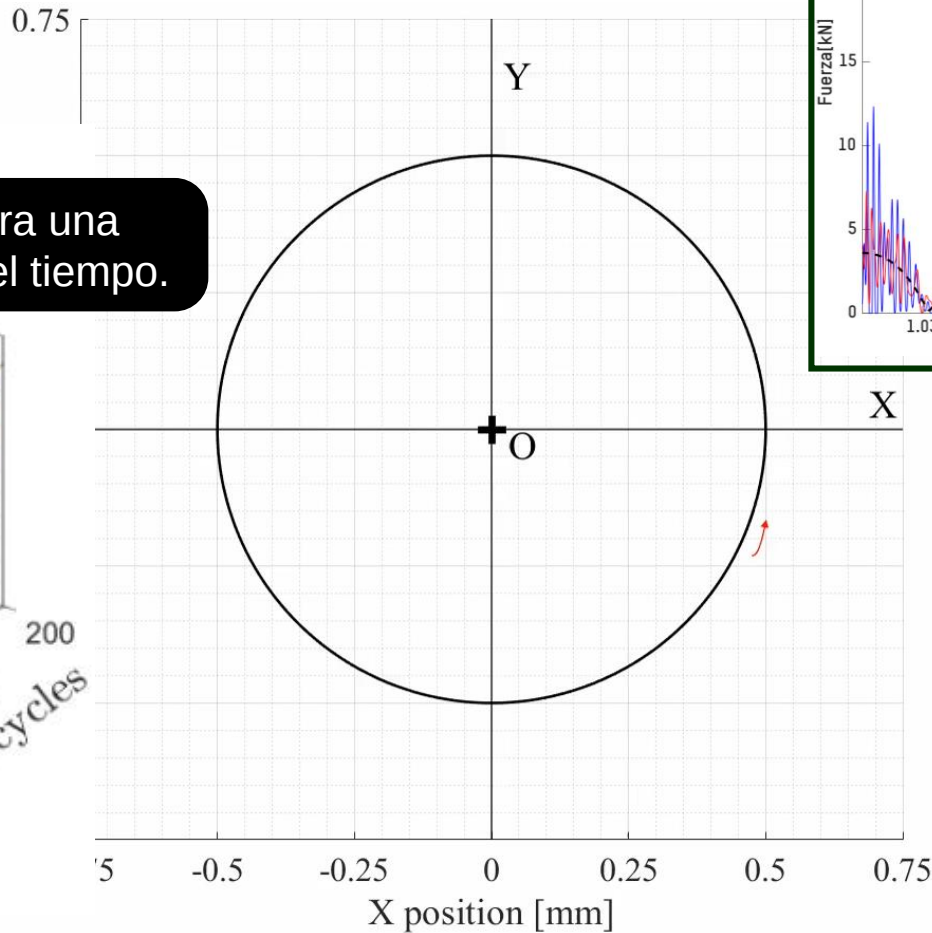
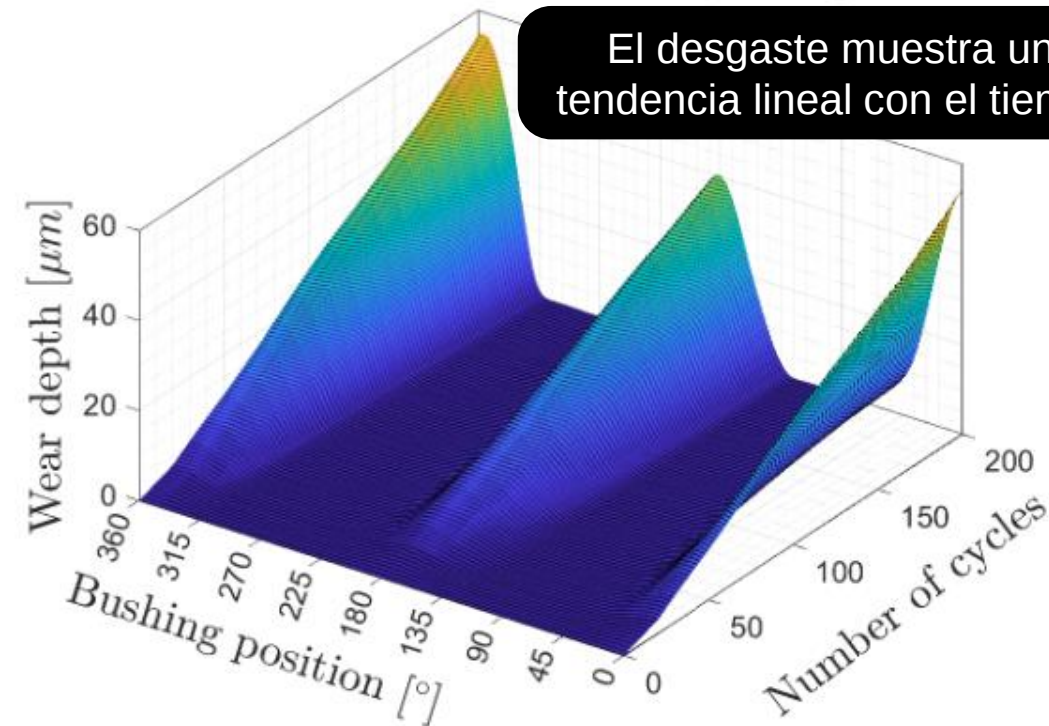
Efectos del desgaste en la dinámica

Desgaste

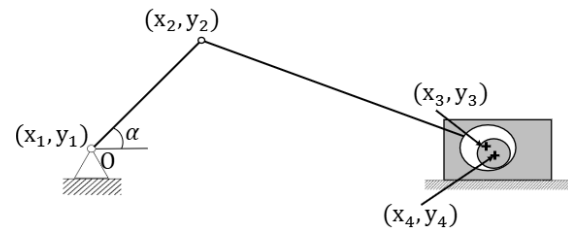


0.5 mm clearance at 5,000 rpm

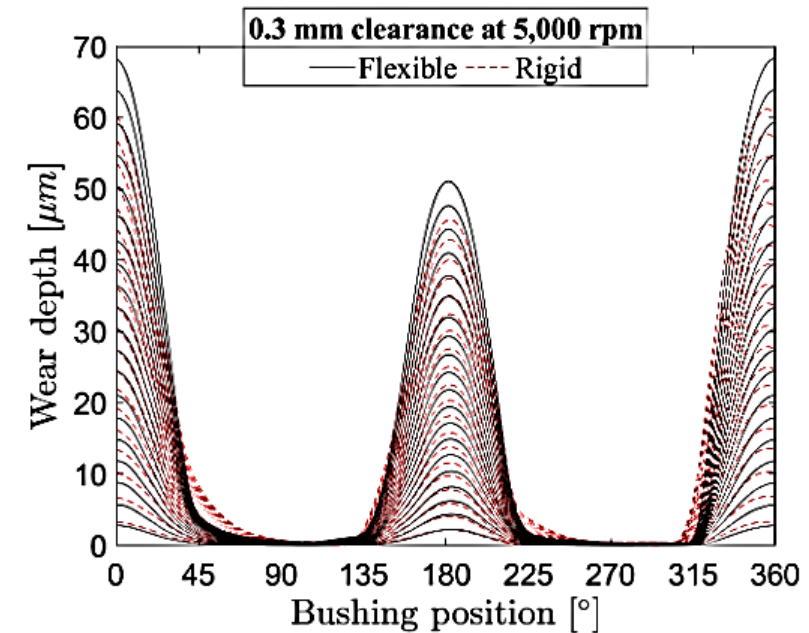
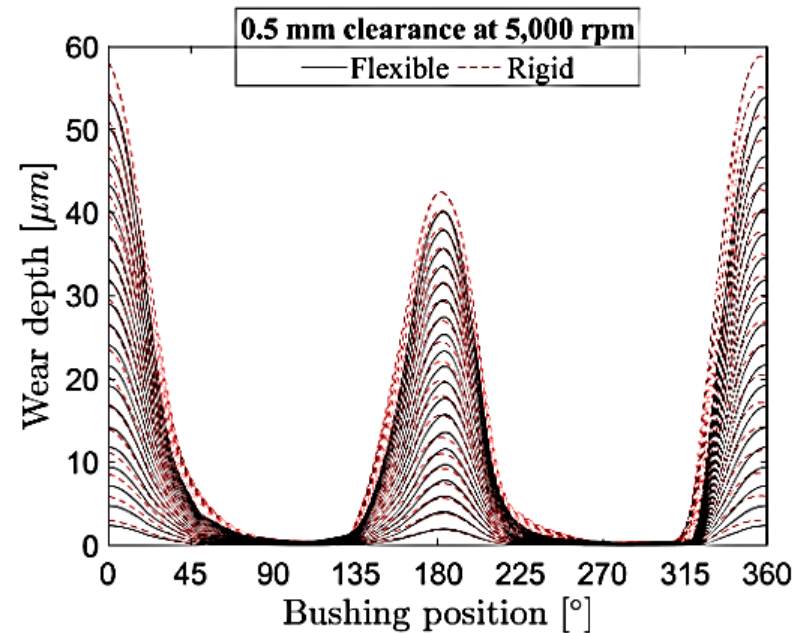
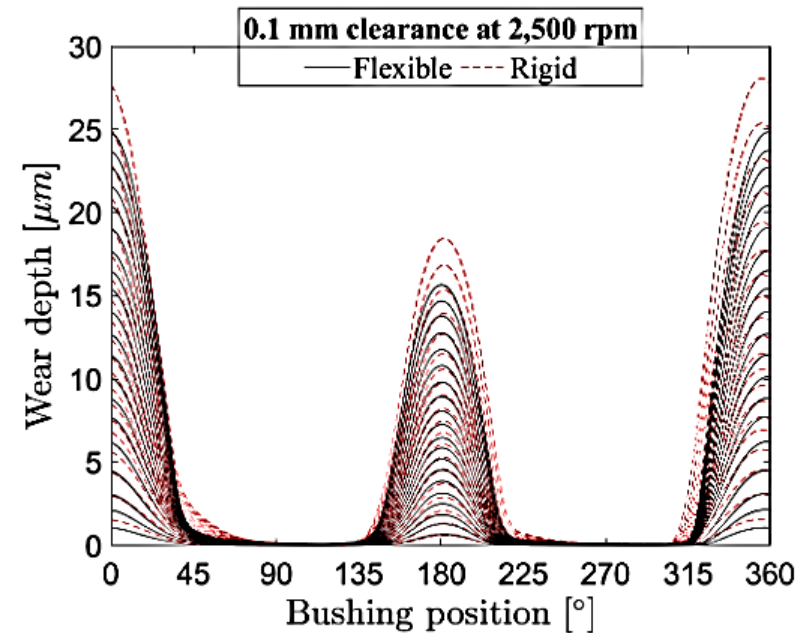
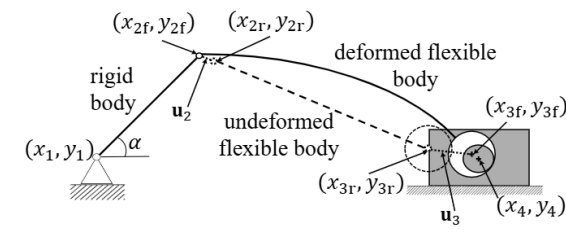
El desgaste muestra una tendencia lineal con el tiempo.



Efectos del desgaste en la dinámica



La profundidad del desgaste se ve afectada por el tamaño inicial de la holgura, la velocidad de accionamiento y la consideración de flexibilidad.



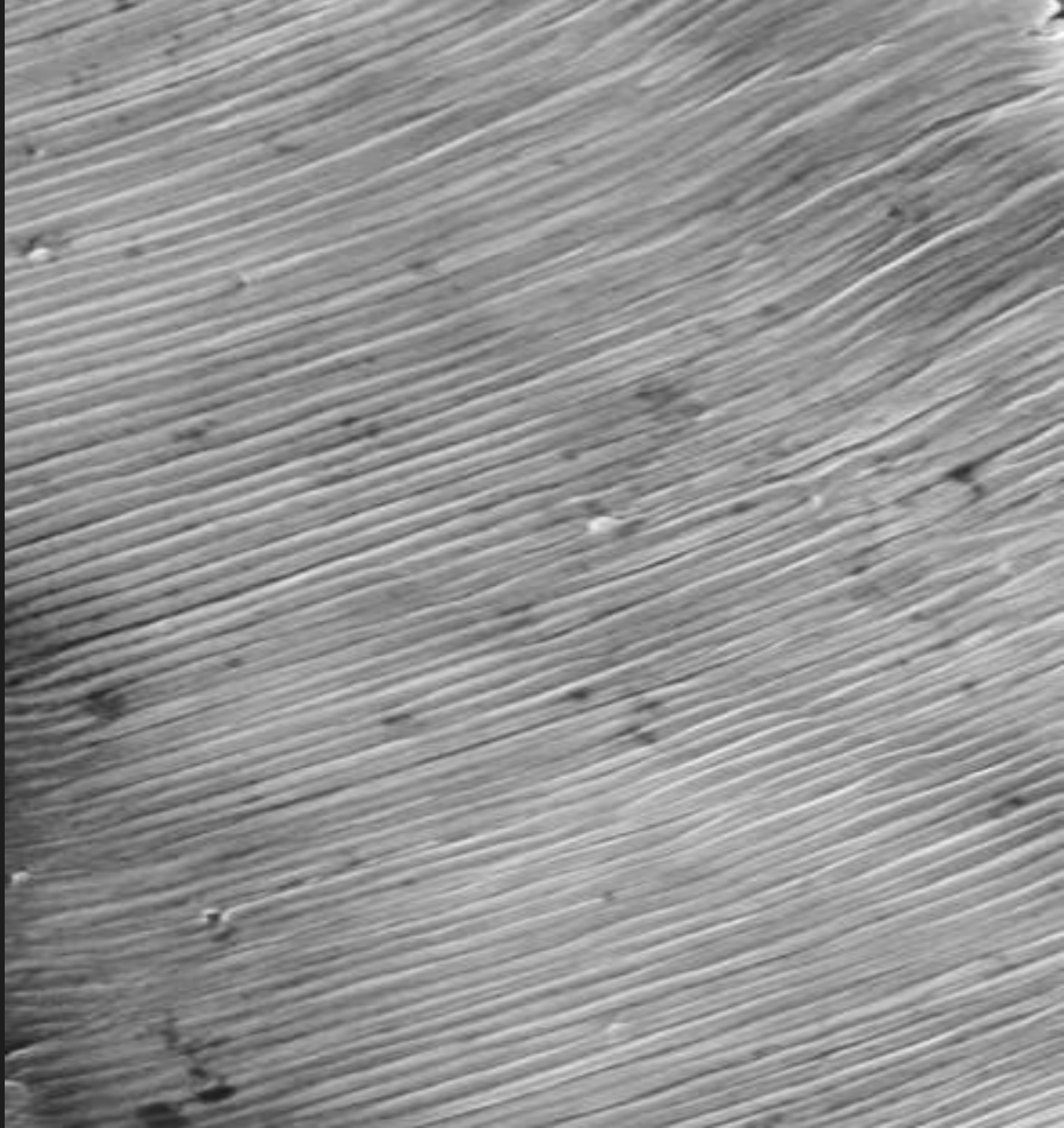
La flexibilidad NO siempre tiende a disminuir el valor del desgaste.

5.

Fatiga.

6. Caso industrial.

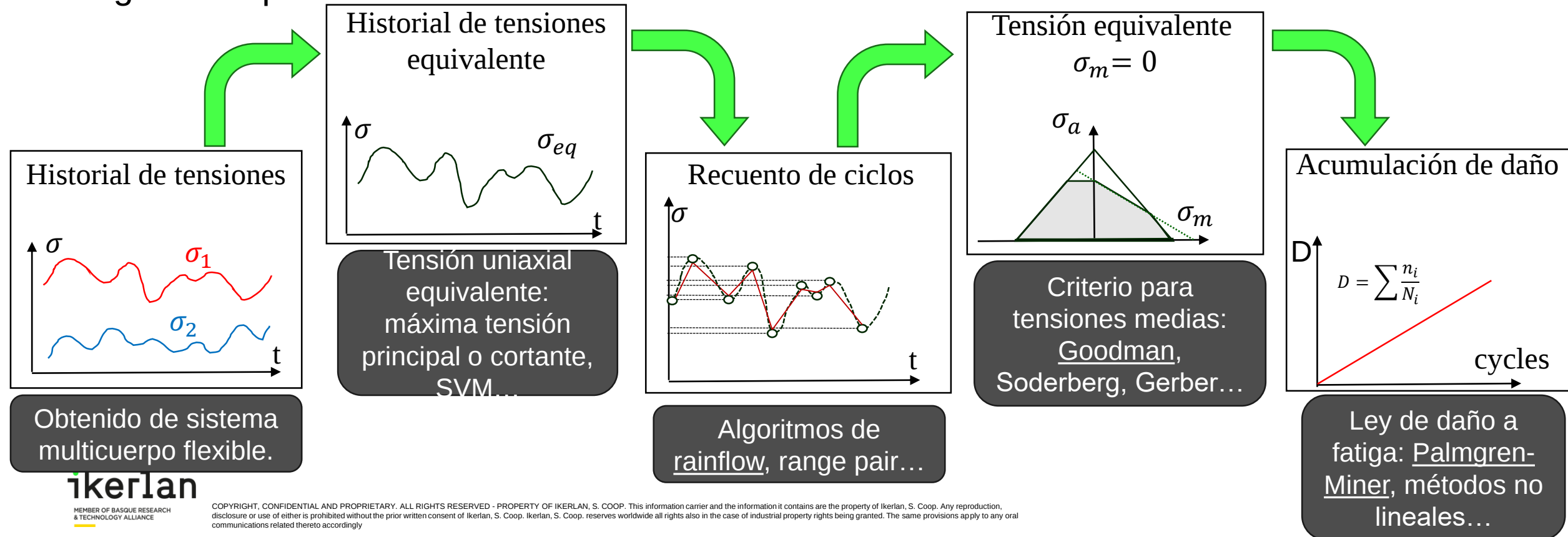
7. Conclusiones y trabajo futuro.



Fatiga

Pasos en el análisis a fatiga

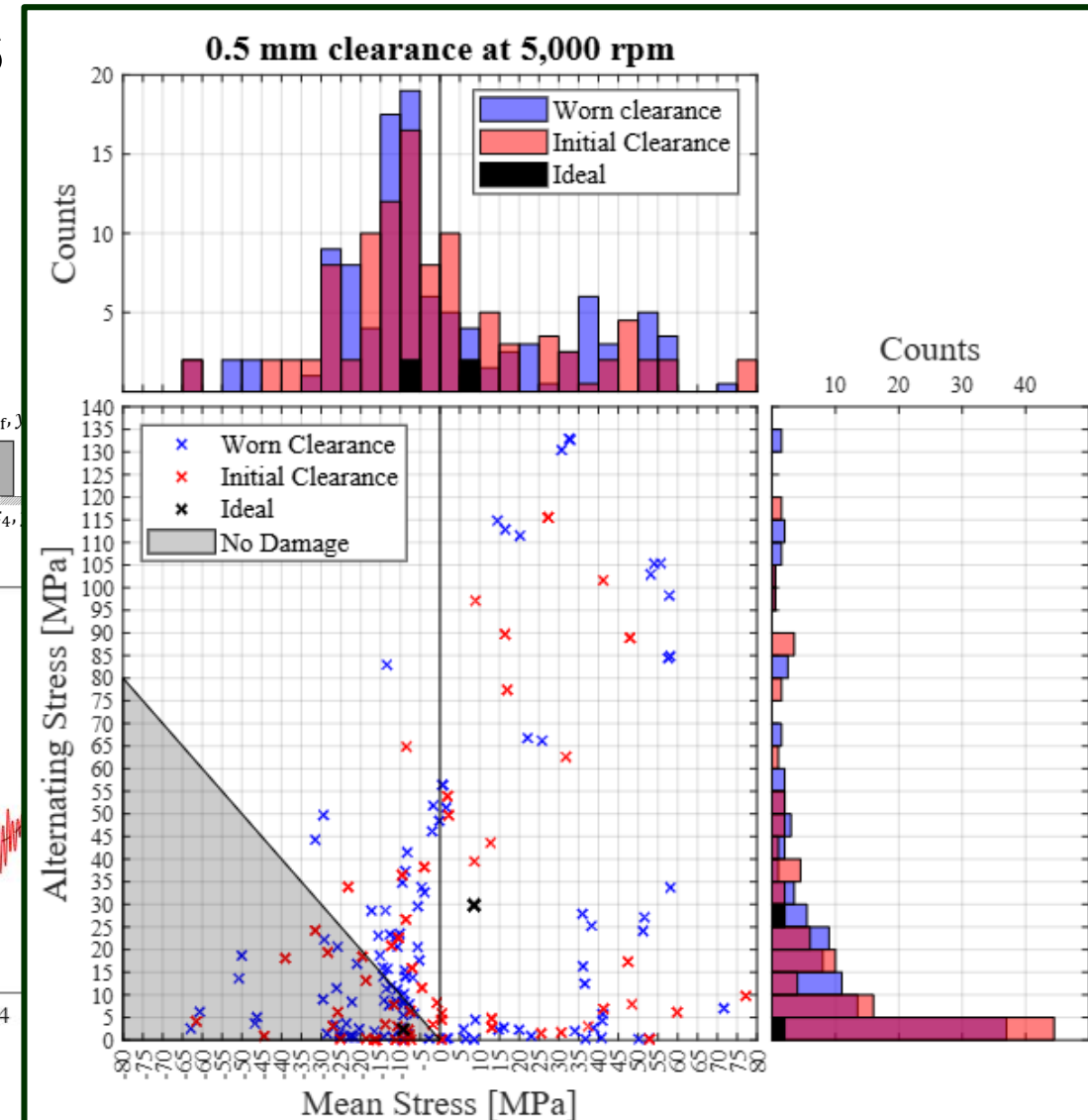
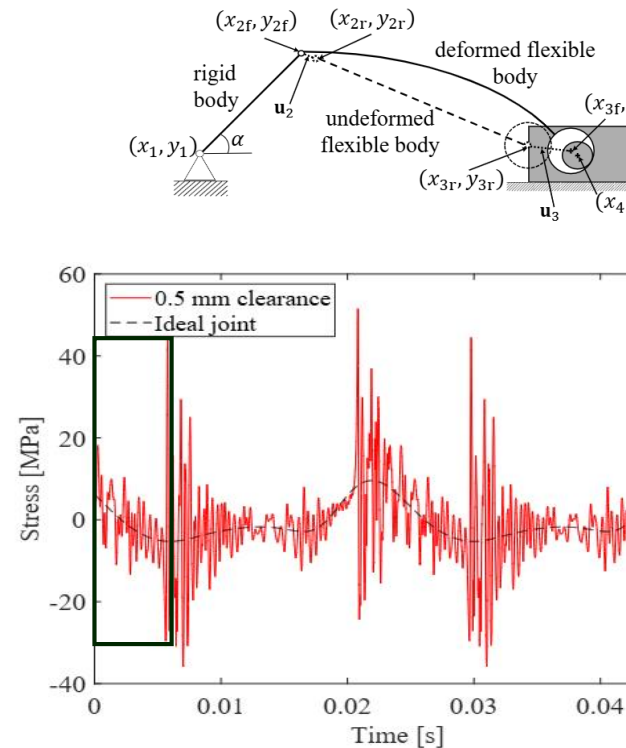
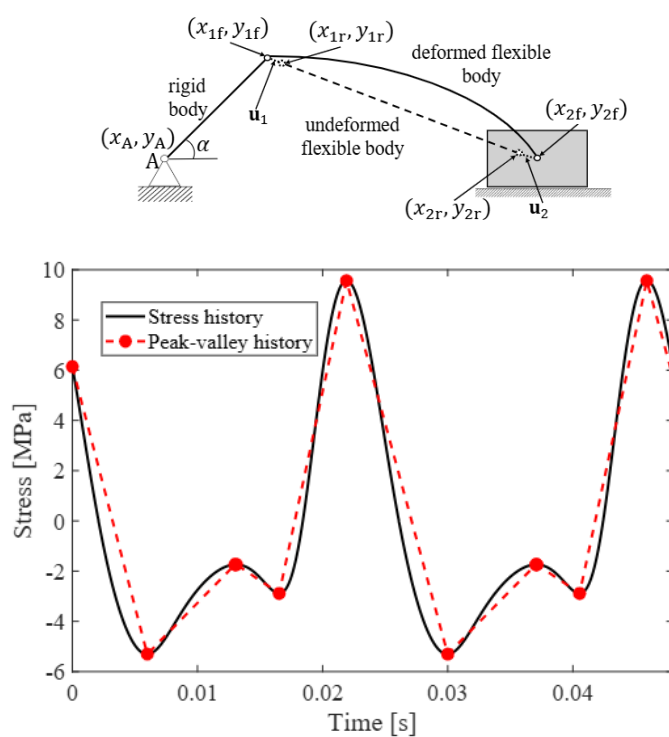
Mediante la expansión del modelo flexible puede obtenerse el campo de tensiones en cada instante de tiempo. Esto permite llevar a cabo el análisis a fatiga mediante los siguientes pasos:



Análisis a fatiga

Efecto de la presencia de holguras

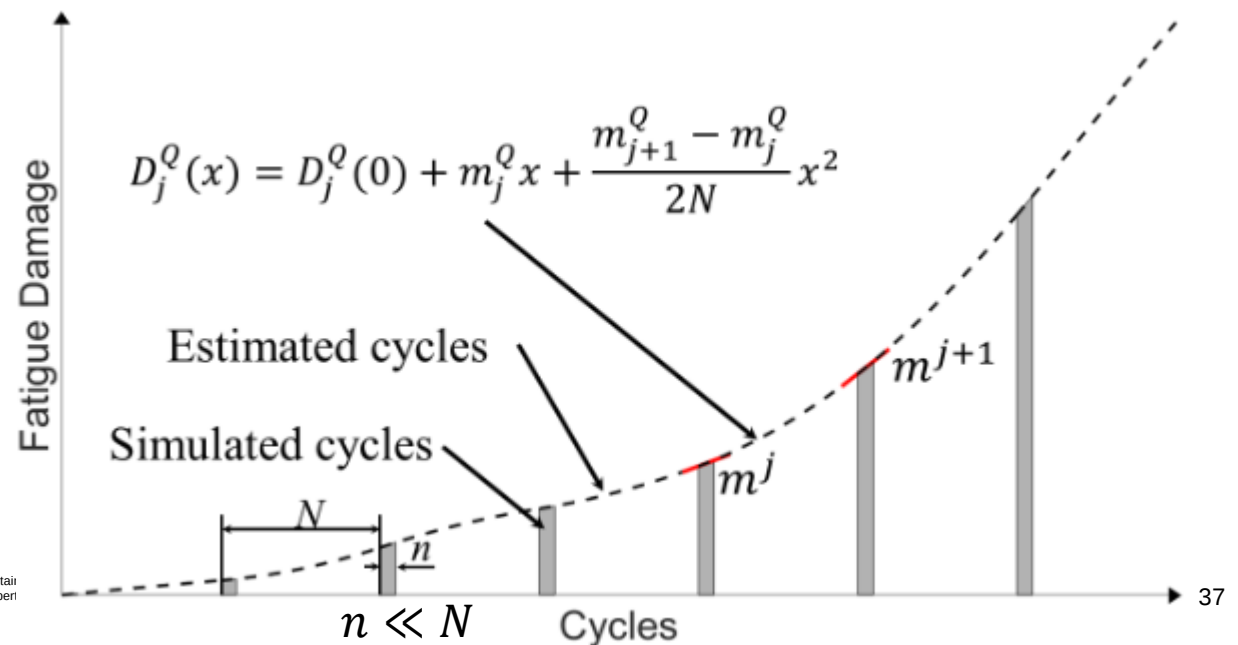
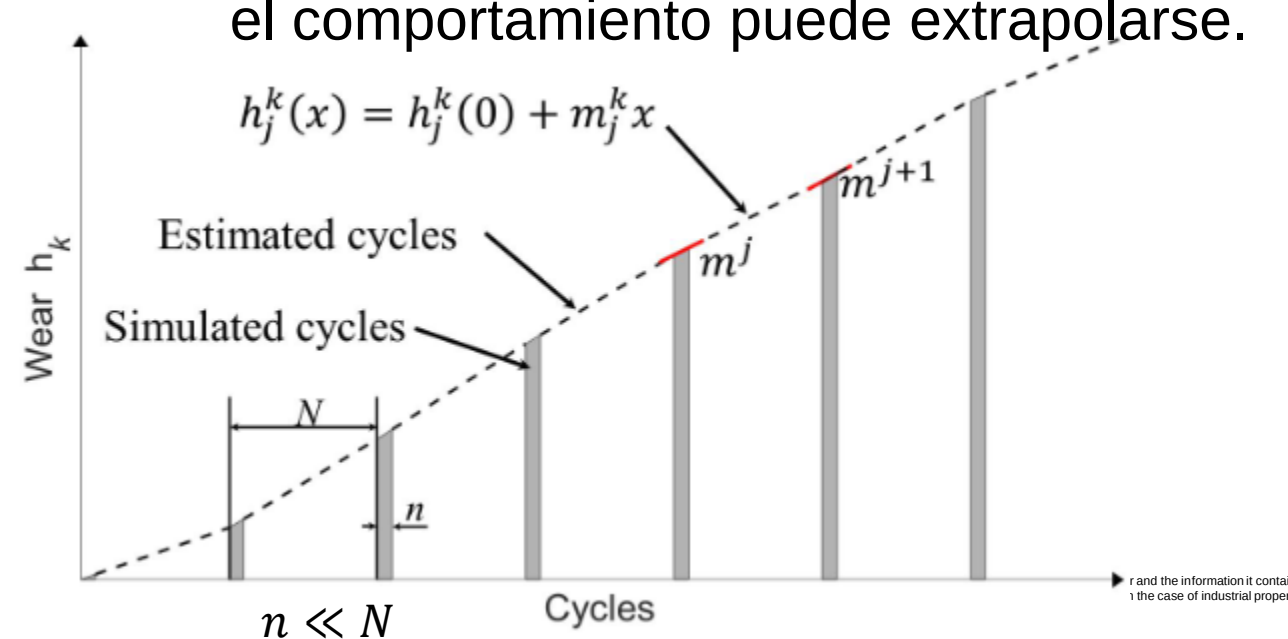
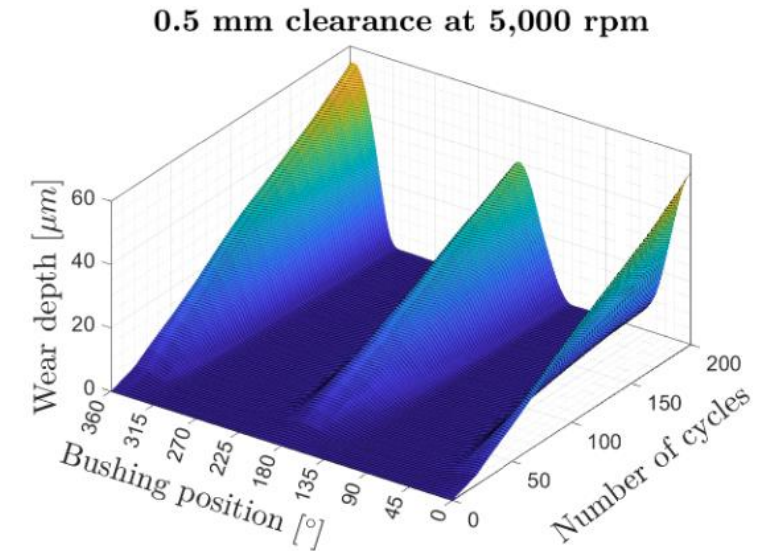
La presencia de holguras se manifiesta en el historial de tensiones:



Análisis a fatiga

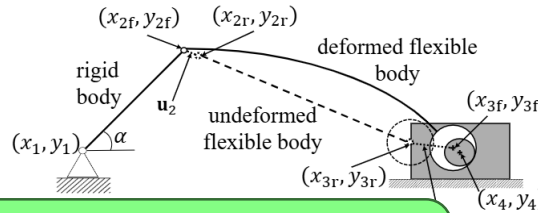
Metodología para la estimación del daño considerando desgaste

- Las simulaciones considerando desgaste y flexibilidad son demasiado costosas para analizar millones de ciclos.
- Dado que la evolución del desgaste tiende a ser lineal, el comportamiento puede extrapolarse.

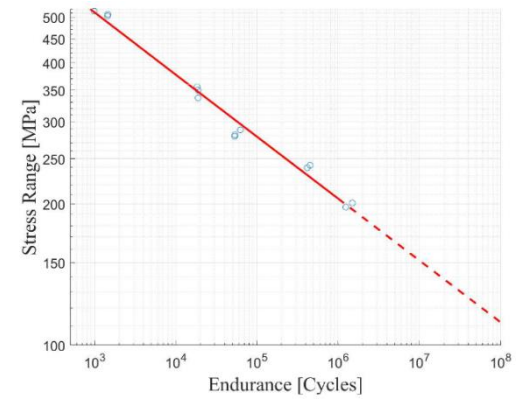


Análisis a fatiga

Caso de estudio:



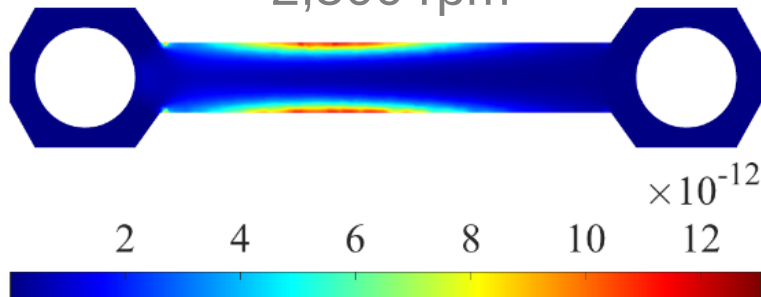
Fallo a fatiga si
Daño=1



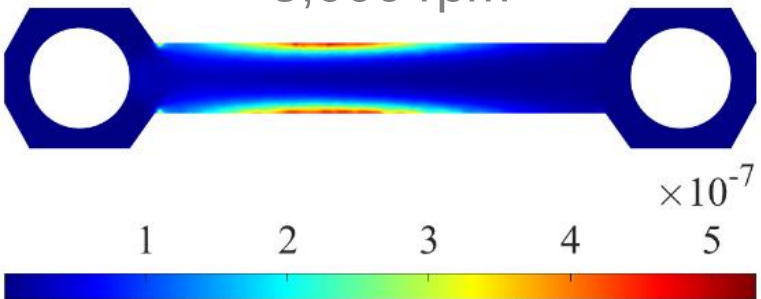
Fatiga

Caso ideal

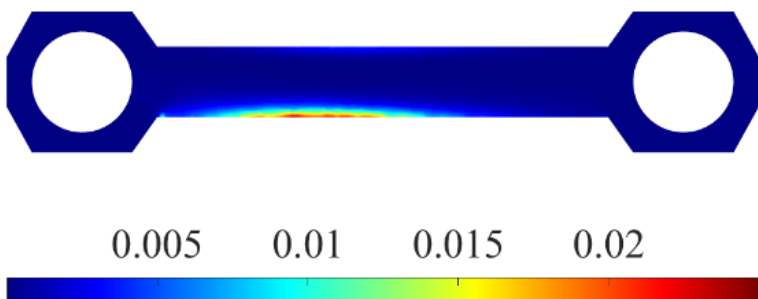
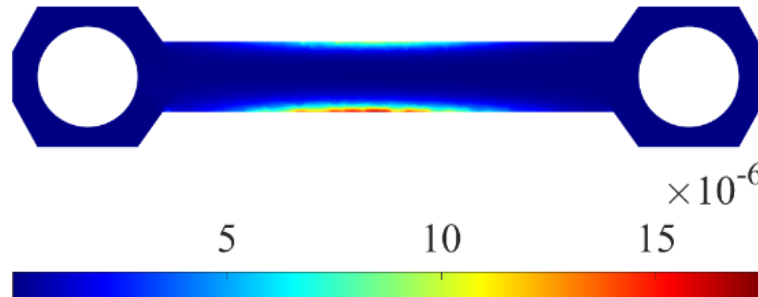
2,500 rpm



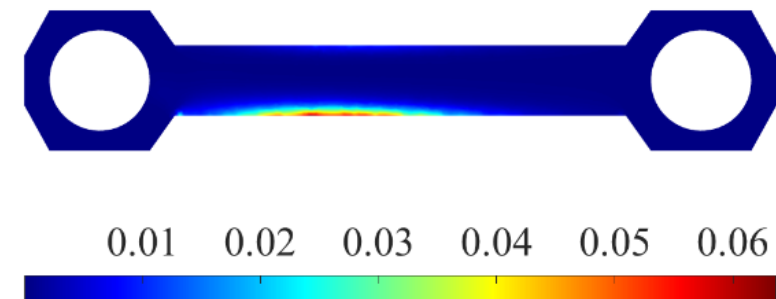
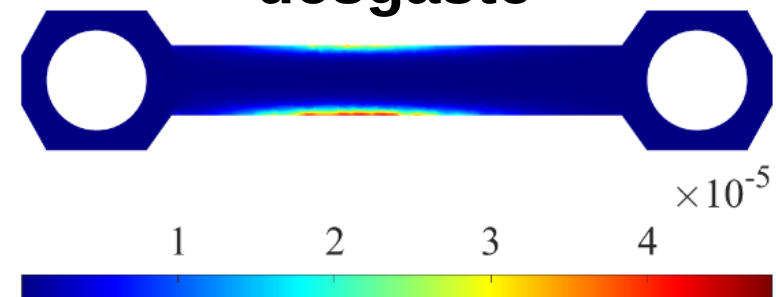
5,000 rpm



Holgura (0.5 mm)

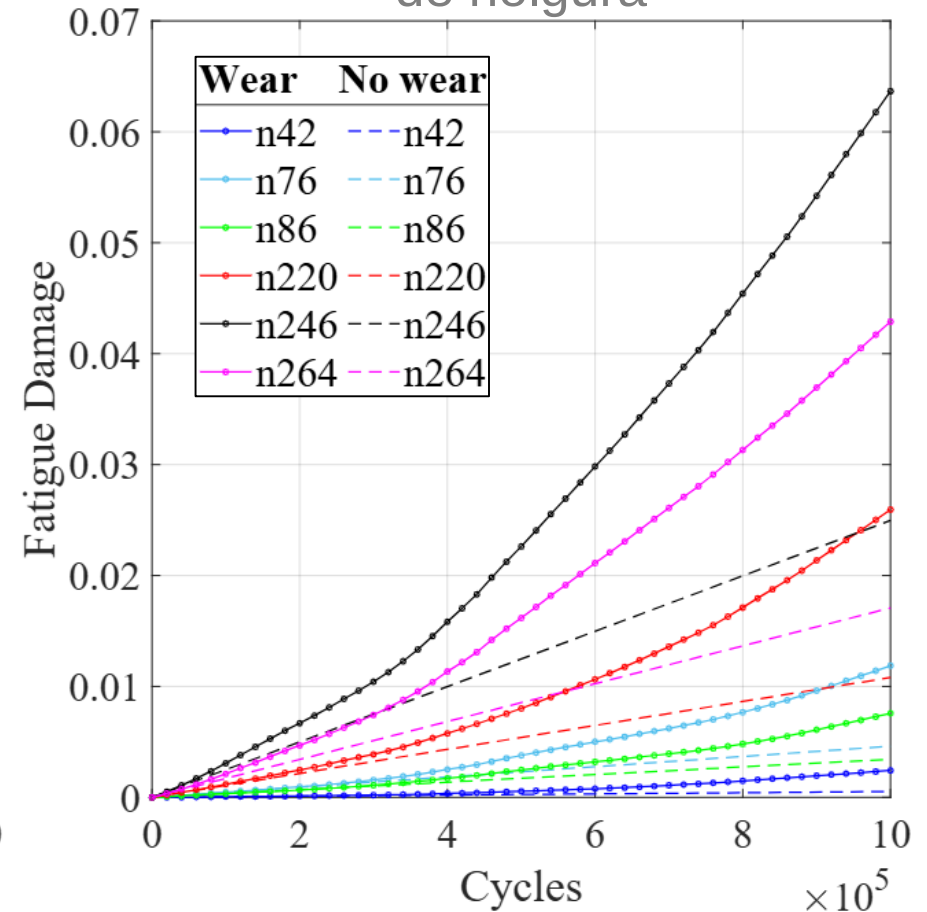
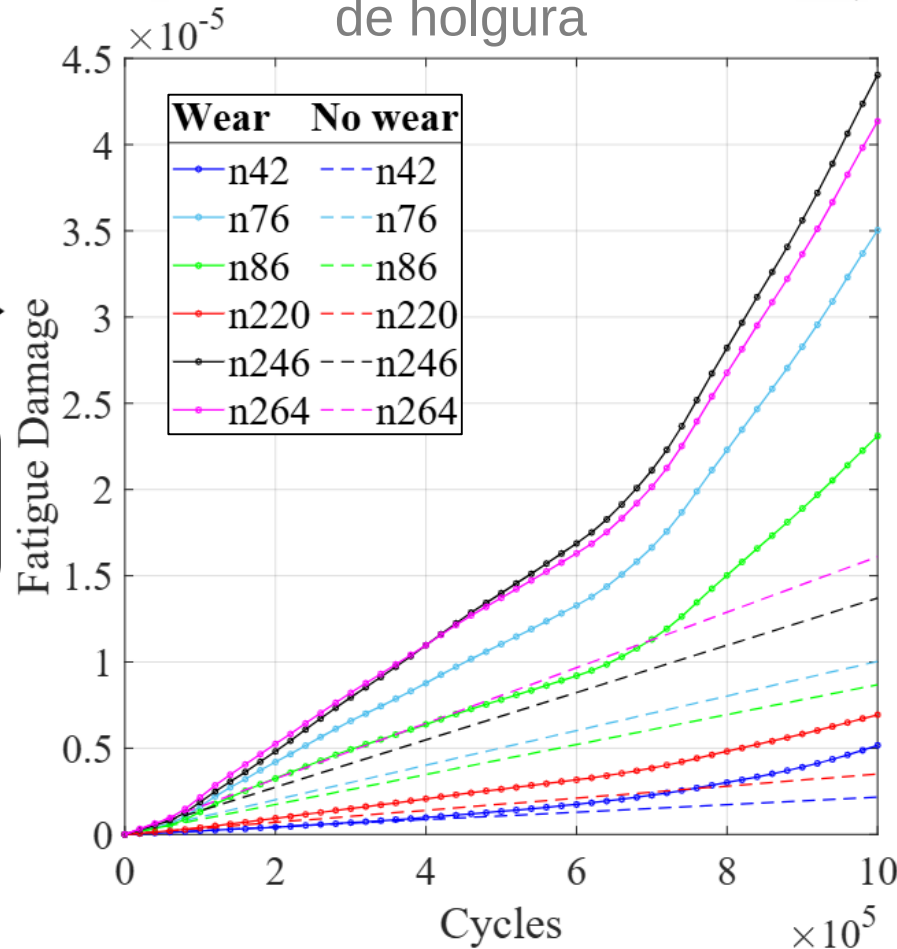
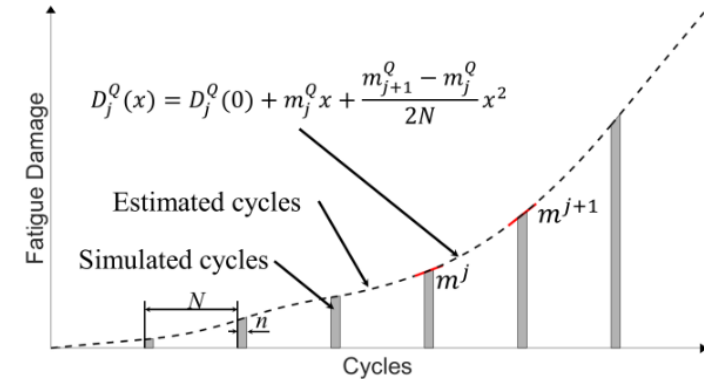
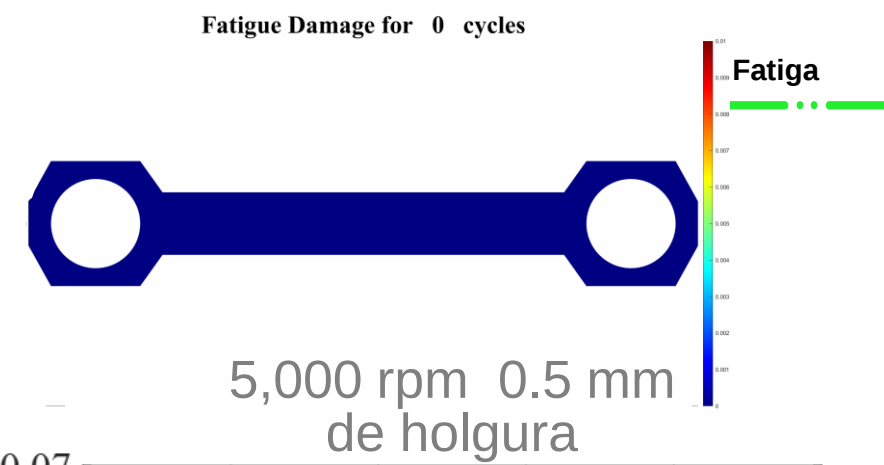
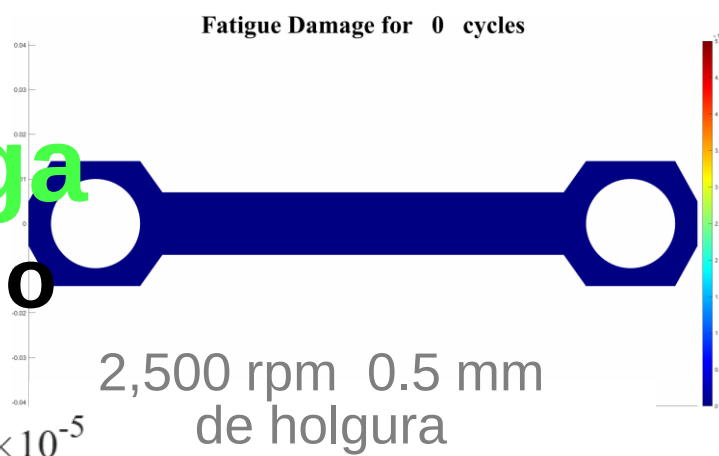


Holgura (0.5 mm) y desgaste

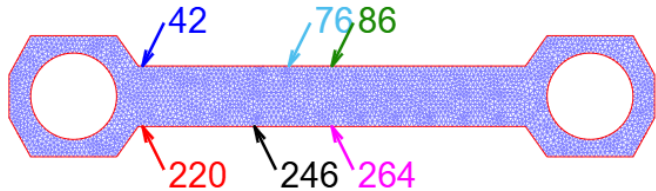


Análisis a fatiga

Evolución del daño



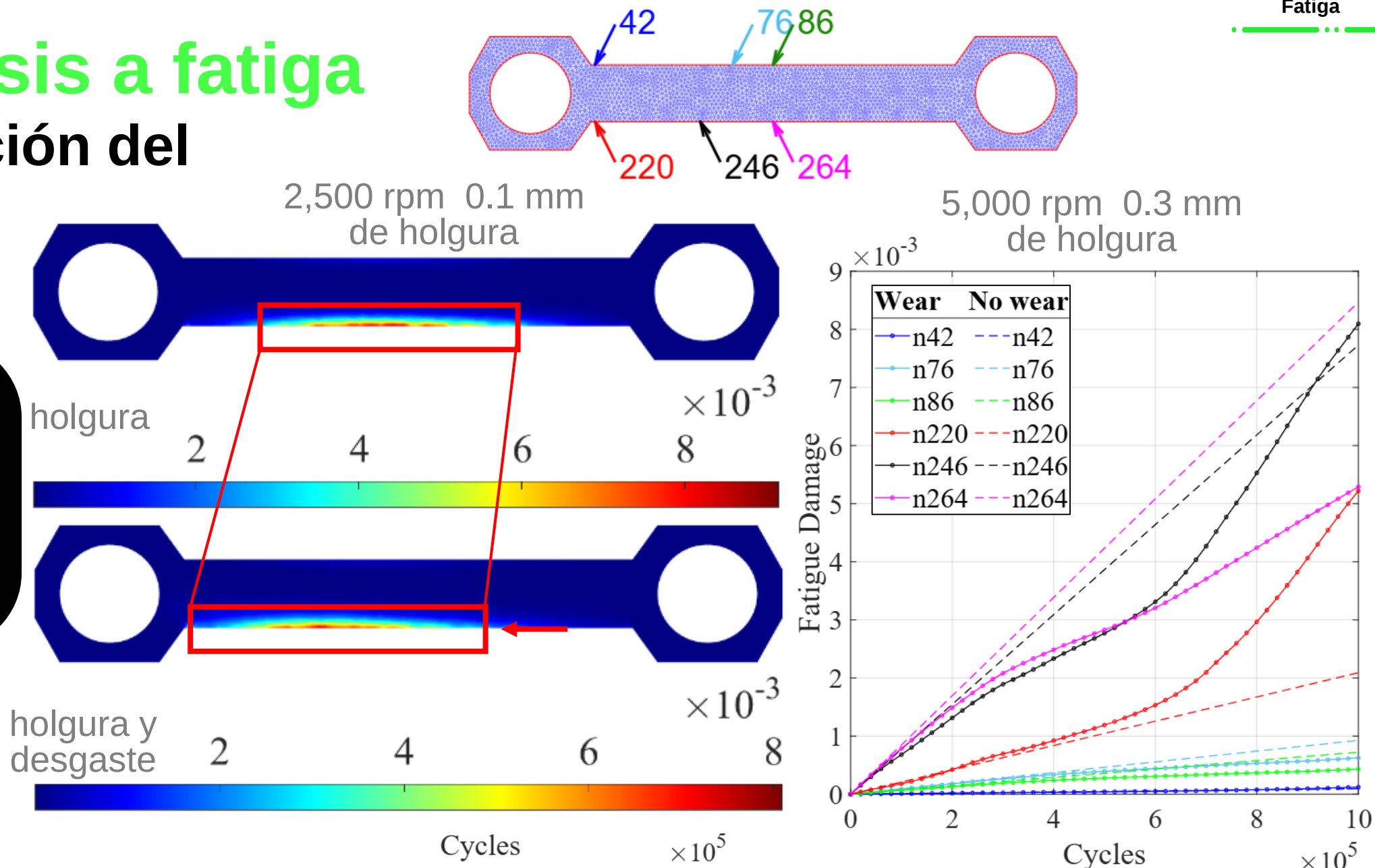
El desgaste incrementa el daño a fatiga en el tiempo y produce una tendencia no lineal.



Análisis a fatiga

Evolución del daño

Se observan casos en los que el desgaste reduce ligeramente el daño a fatiga y modifica la posición de la zona crítica.



6.

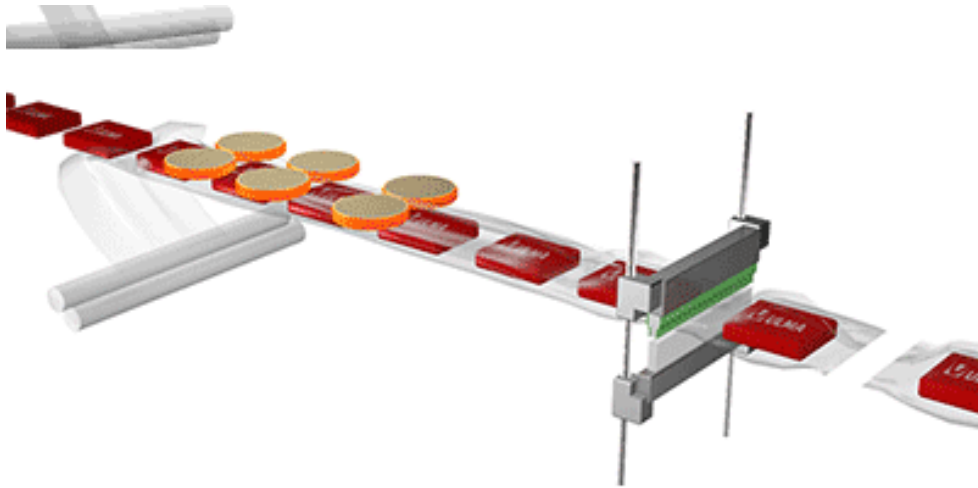
Caso industrial.

7. Conclusiones y trabajo futuro.



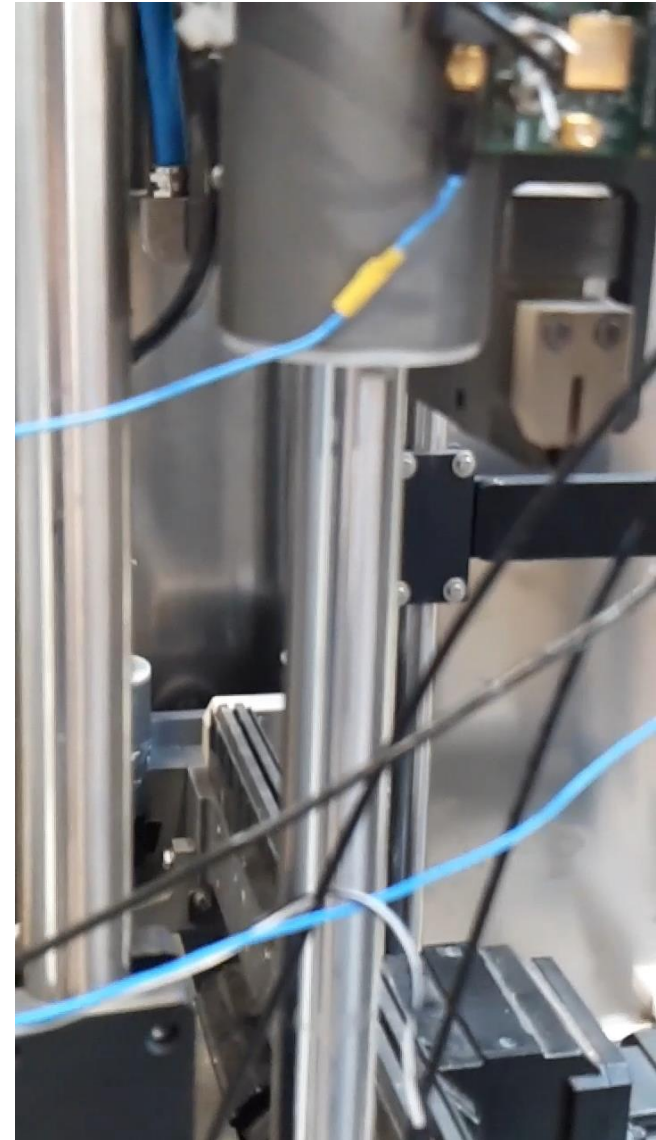
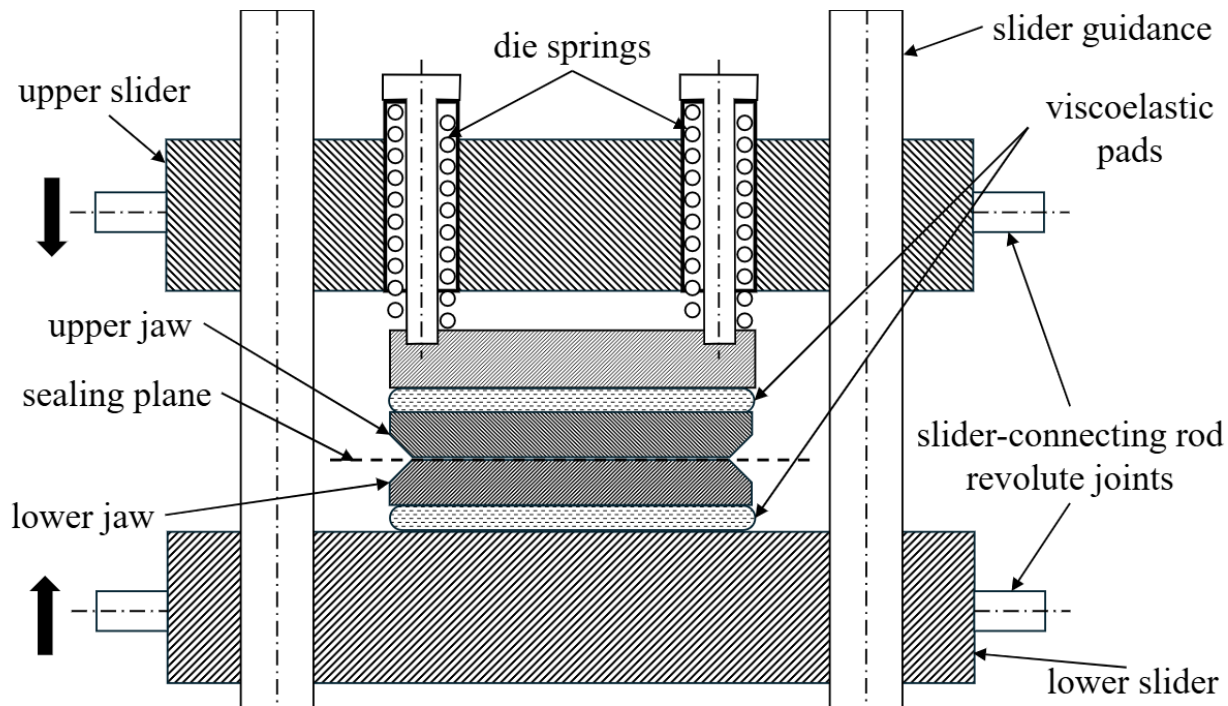
Caso Industrial

- Máquina ULMA Packaging FV55.
- Diseñada para el empaquetado y termosellado de envases alimenticios.



Caso Industrial

- Máquina ULMA Packaging FV55.
- Diseñada para el empaquetado y termosellado de envases alimenticios.

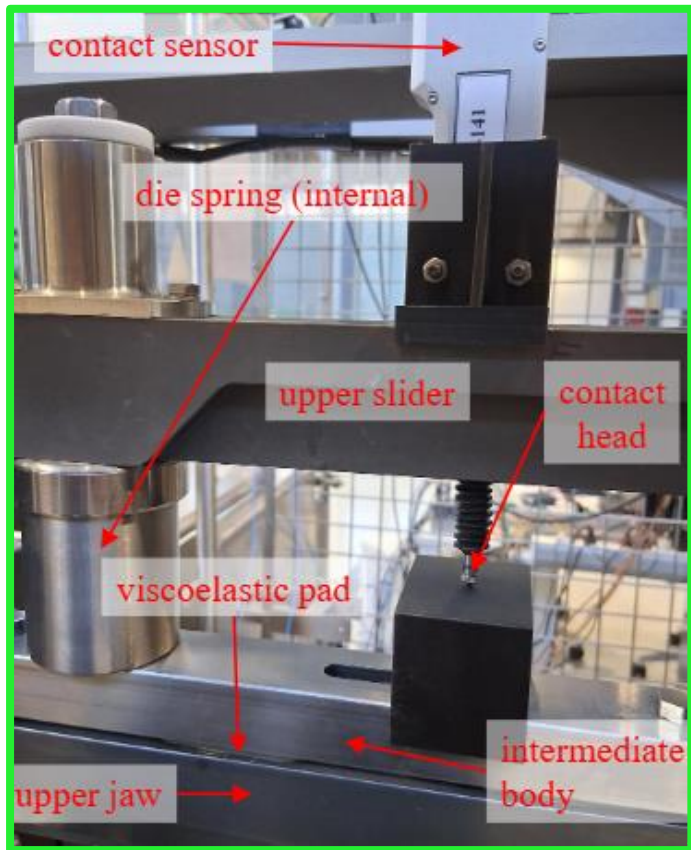


Caso Industrial

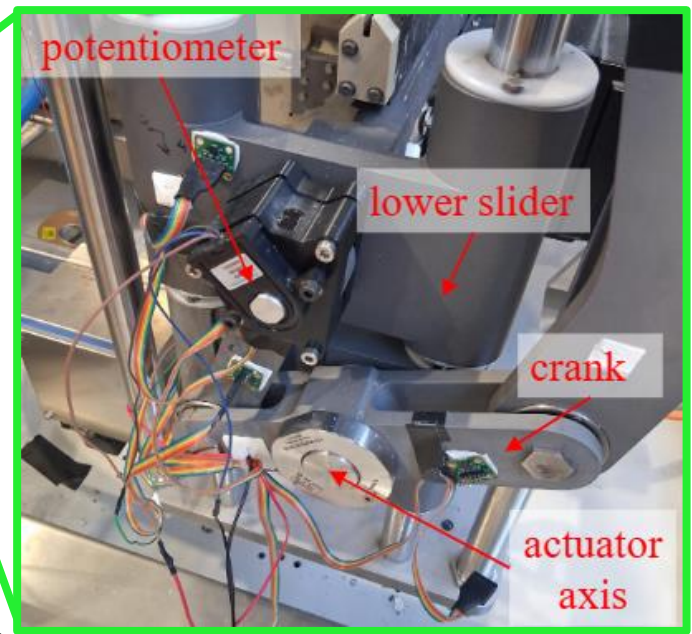
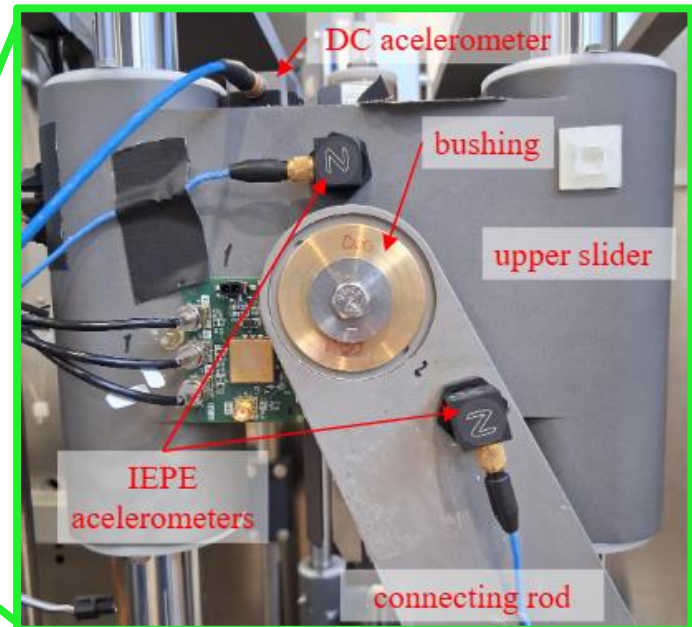
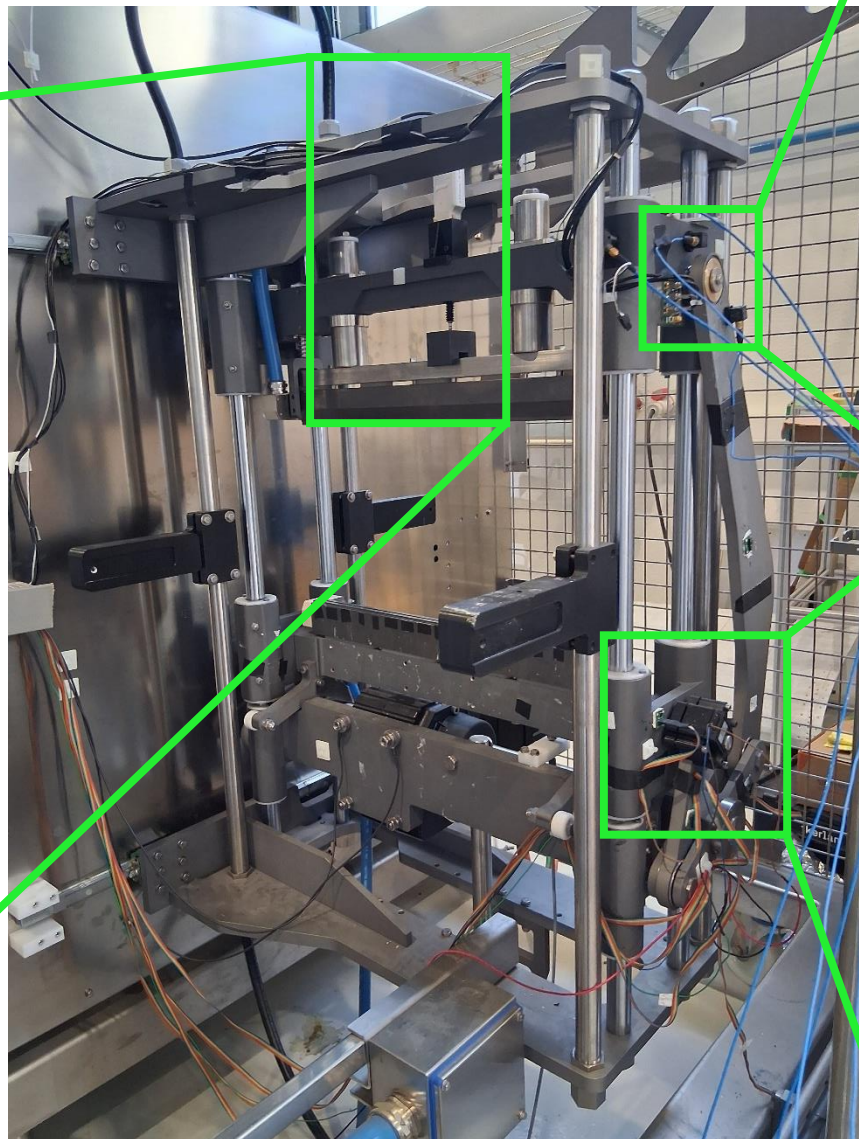
aso Industrial

Acelerómetros

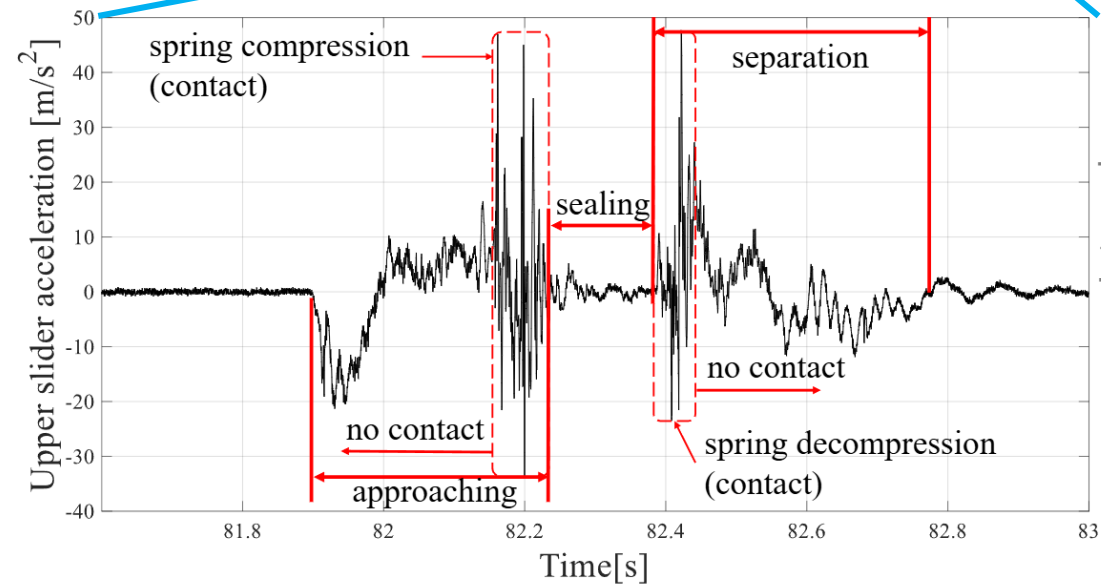
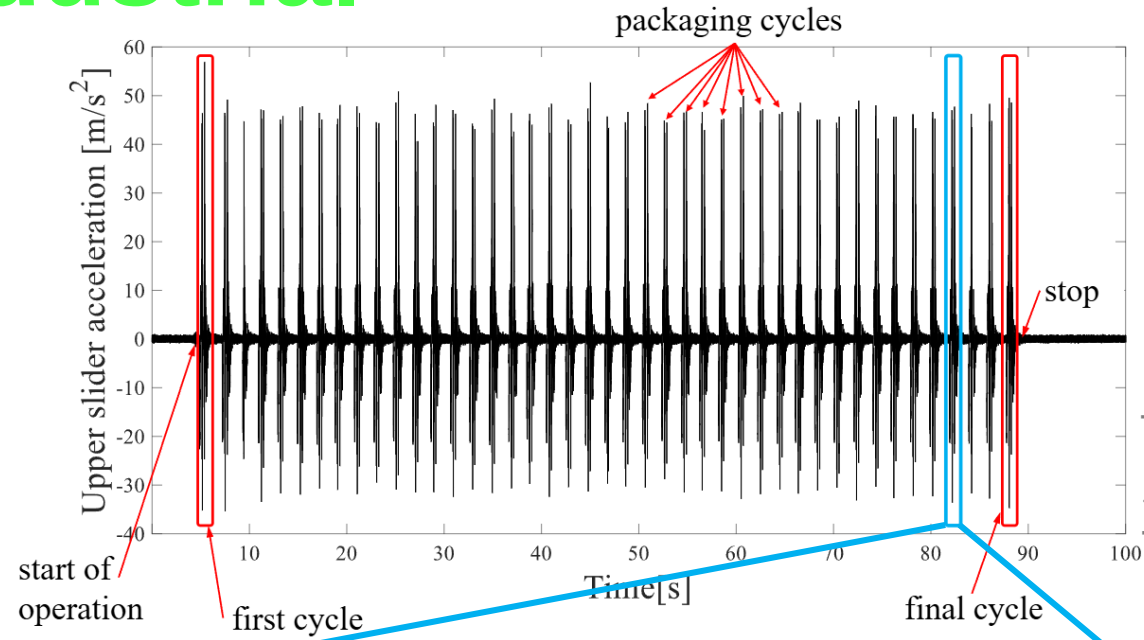
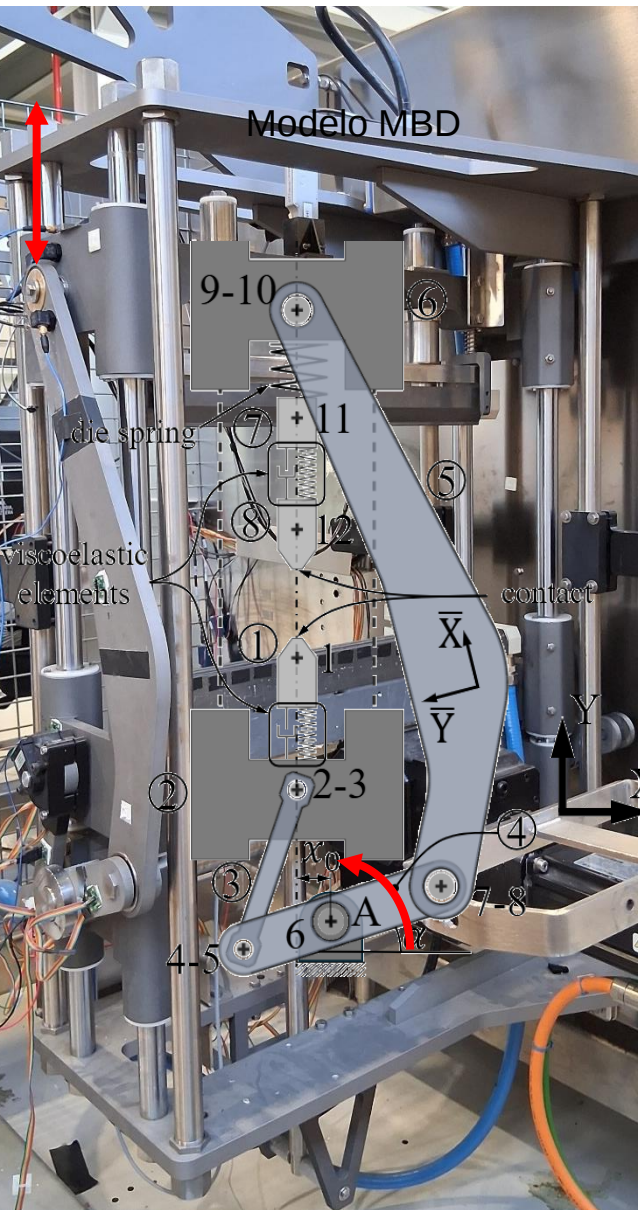
Potenciómetro



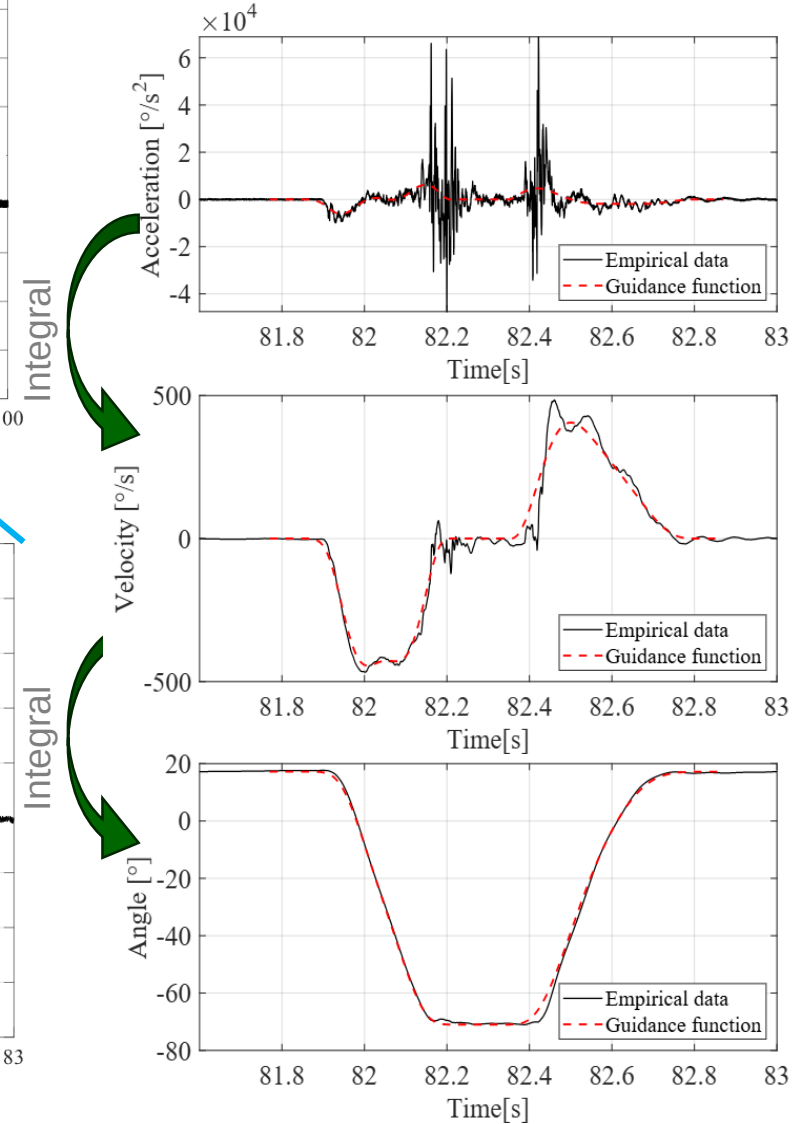
Palpador



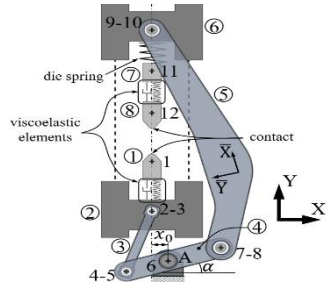
Caso Industrial



Movimiento del actuador



Caso Industrial

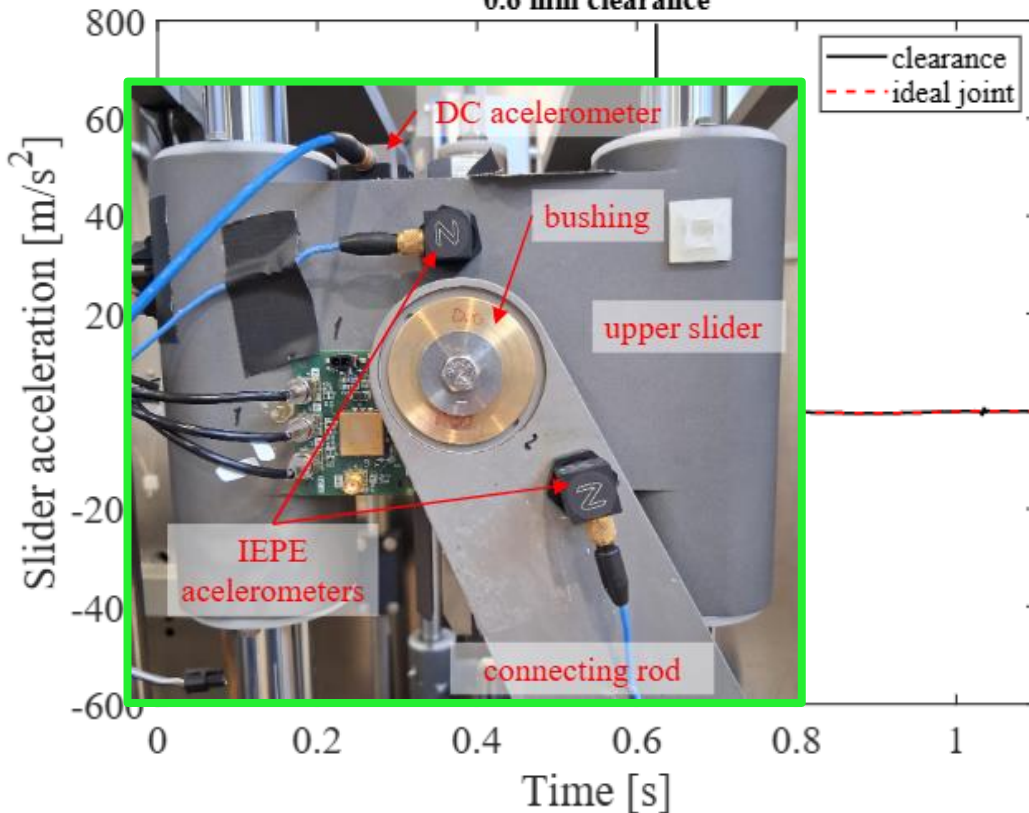


Comparación de la aceleración de la mordaza superior:

- El modelo proporciona aceleraciones más elevadas.
- Ambas señales coinciden en los puntos críticos de funcionamiento.

Modelo MBD

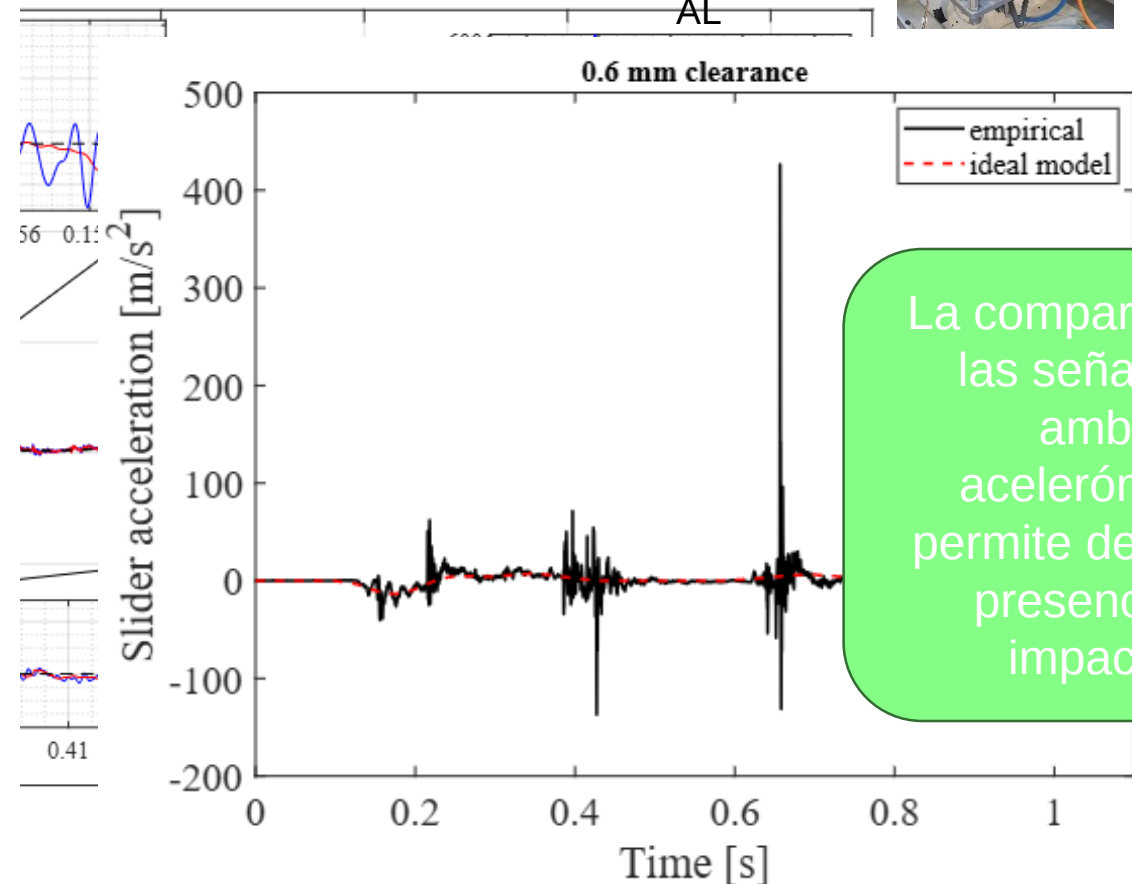
0.6 mm clearance



0.6 mm clearance test

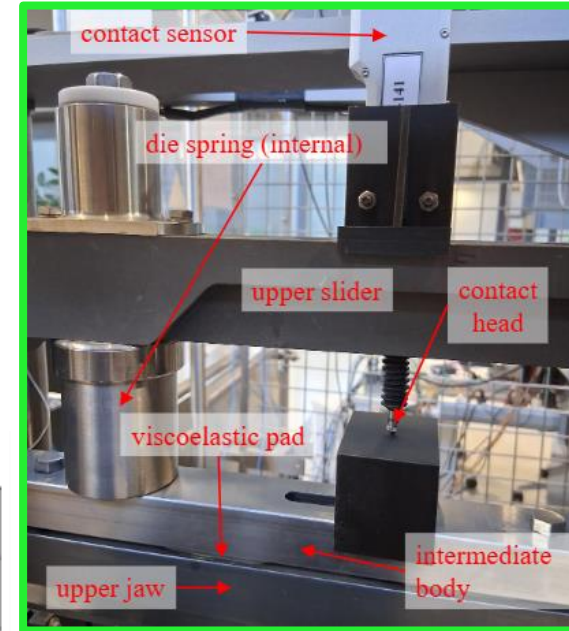
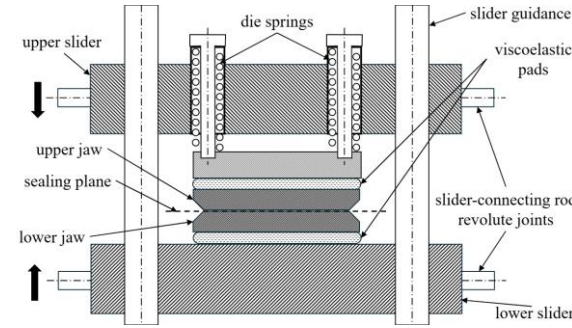
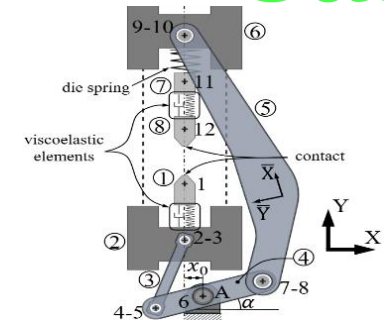
eXPERIMENT

AL



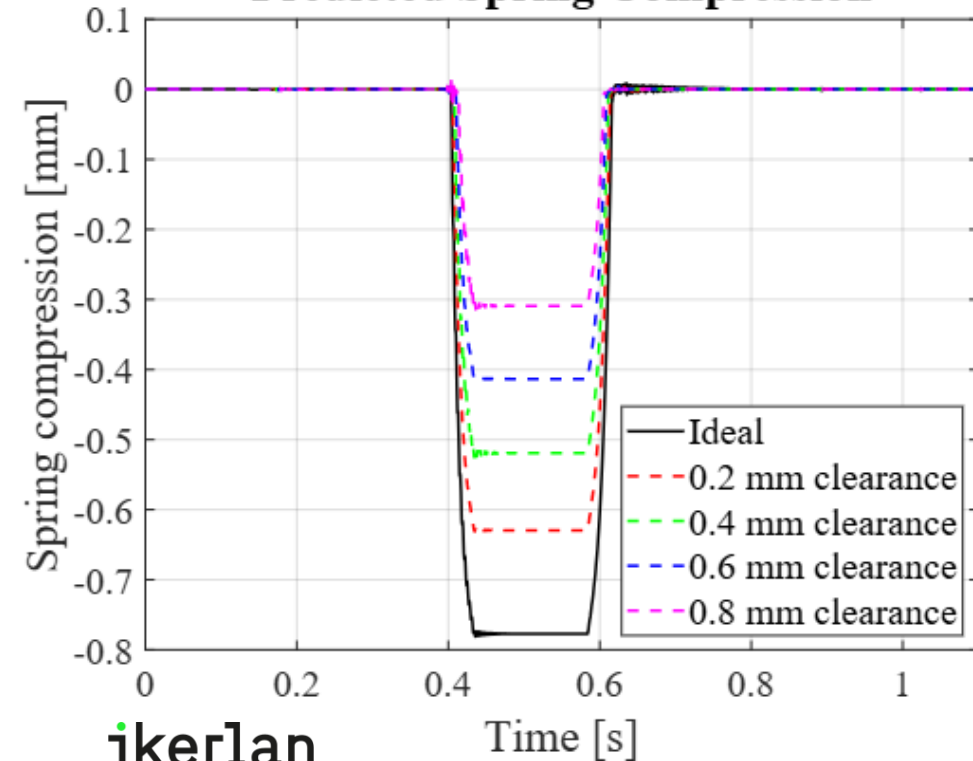
La comparación de las señales de ambos acelerómetros permite detectar la presencia de impactos.

Caso Industrial

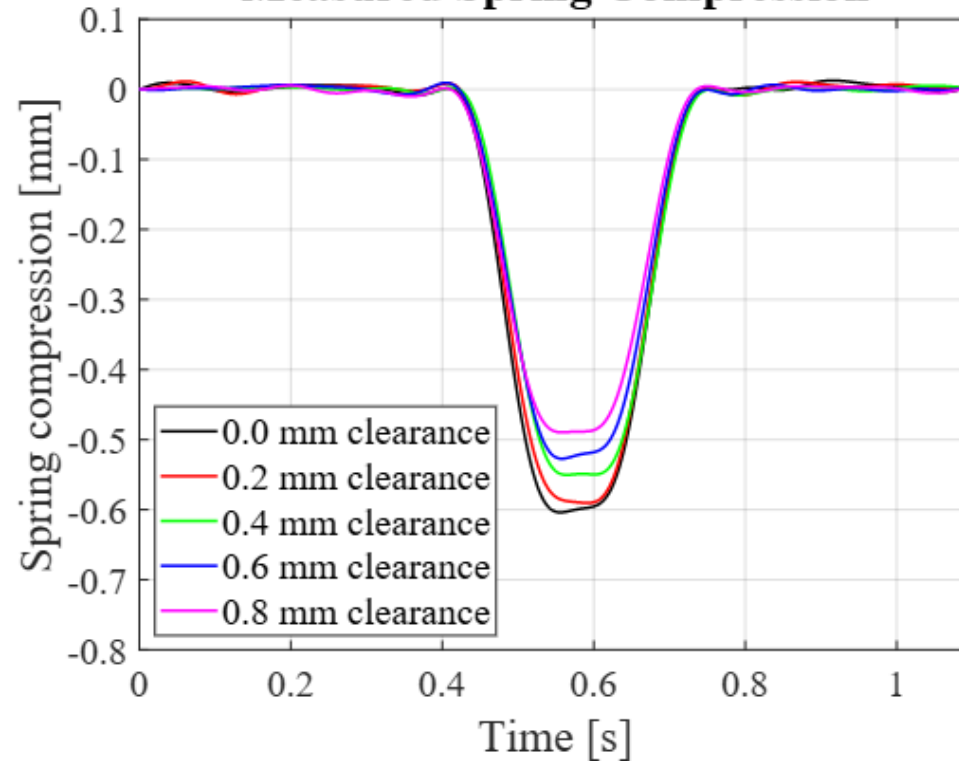


Mediciones del palpador

Predicted Spring Compression

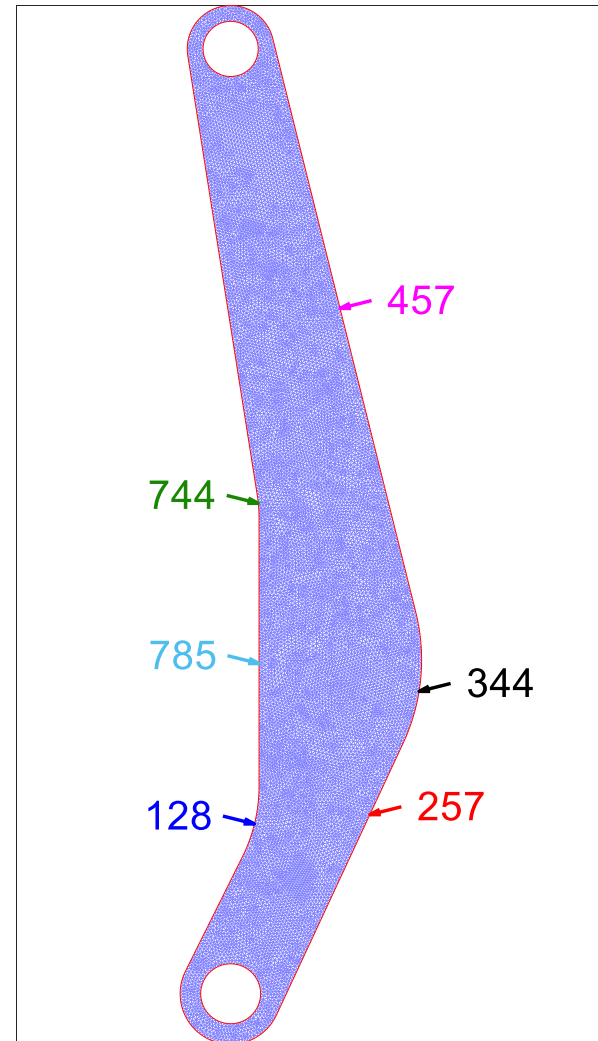
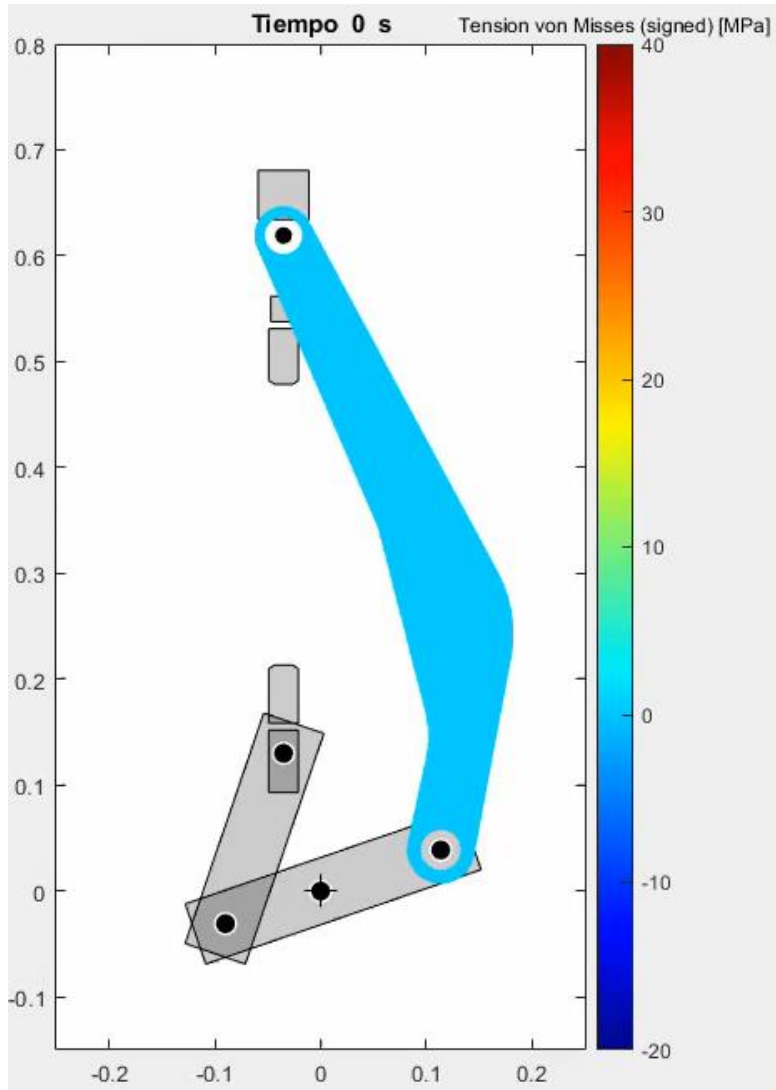


Measured Spring Compression

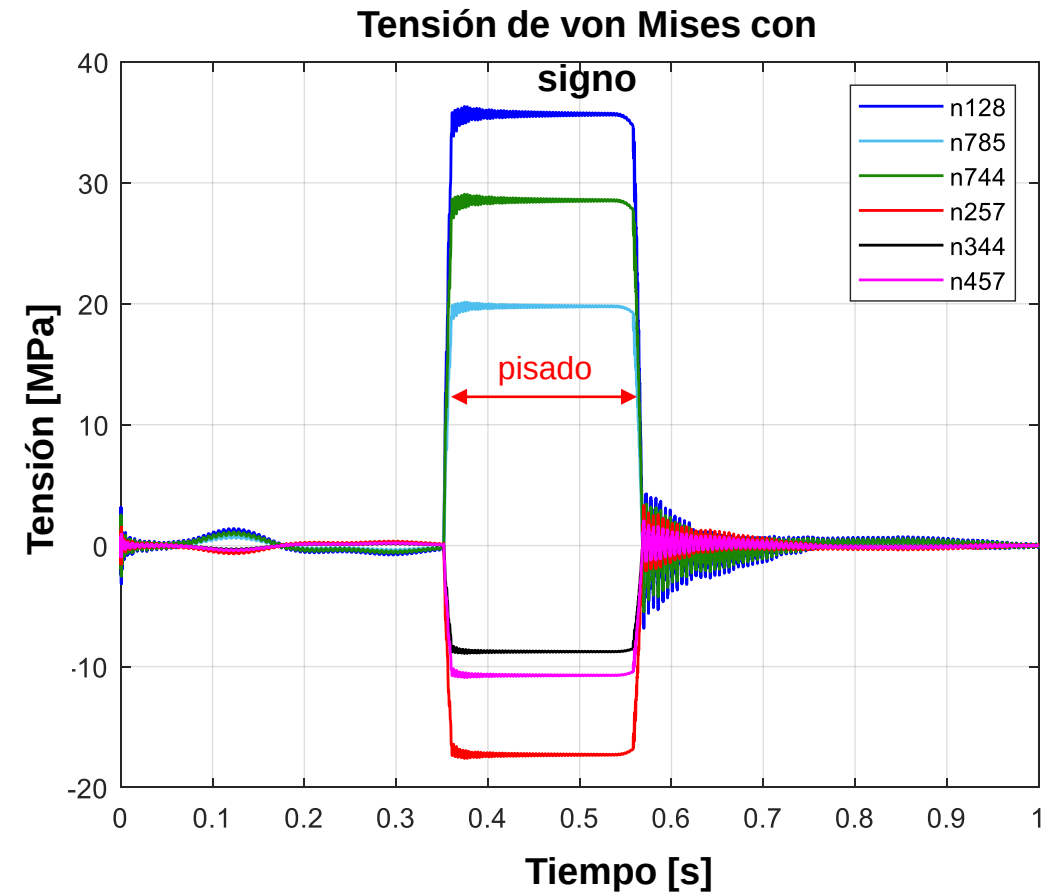


La presencia de holguras se traduce en menor compresión de los muelles y en menor fuerza de sellado.

Caso Industrial

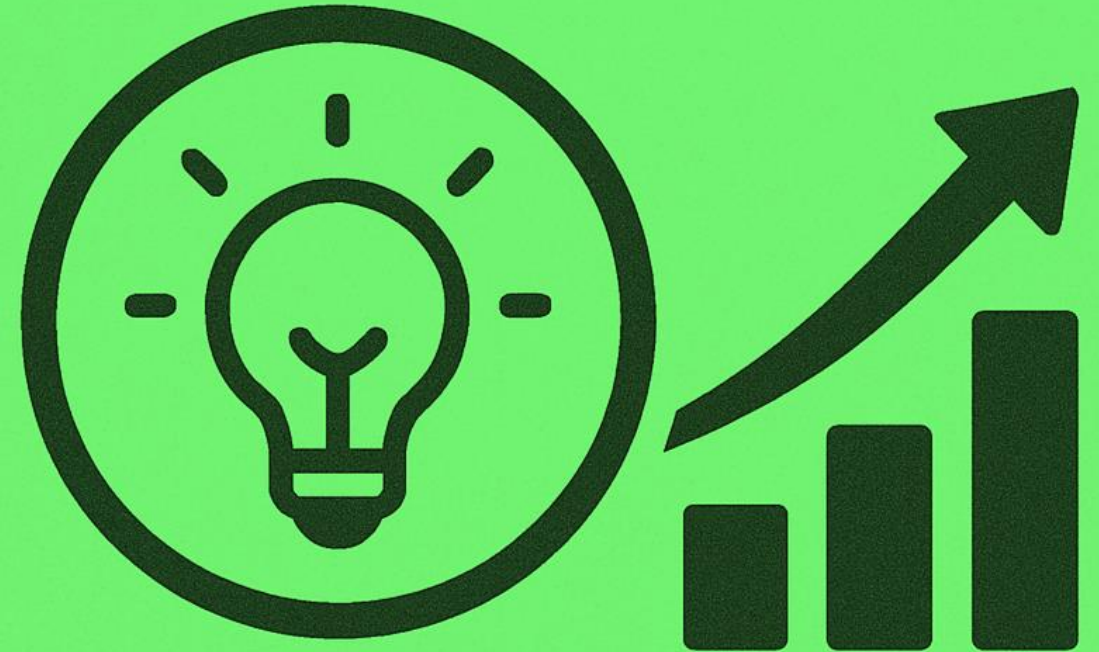


La consideración de flexibilidad en la biela permite obtener el campo de tensiones.



7.

Conclusiones y trabajo futuro.



Conclusiones.



Modelos de holguras, desgaste y flexibilidad

Se ha desarrollado un análisis del efecto de las holguras, desgaste y flexibilidad en mecanismos planos con juntas imperfectas. Se ha observado que:

- La presencia de holguras modifica el comportamiento dinámico.
- La flexibilidad disminuye el efecto de los impactos producidos por las holguras.
- El desgaste incrementa la presencia de impactos y el valor de las fuerzas en las juntas con holgura.
- Factores como la velocidad de accionamiento o el tamaño de holgura influyen mucho en el efecto de la flexibilidad y del desgaste en el comportamiento dinámico.



Fatiga

Se ha desarrollado un modelo de análisis a fatiga a partir de la consideración de flexibilidad en los cuerpos. Se ha hecho un estudio sobre el efecto de las holguras y el desgaste en el comportamiento a fatiga:

- El modelo de análisis a fatiga es más eficiente que técnicas FEM.
- Se ha propuesto una metodología para análisis de alto número de ciclos.
- Se ha estudiado el efecto de las holguras y el desgaste en la evolución del comportamiento a fatiga.
- Cuando se considera desgaste, la fatiga sigue una tendencia no lineal.



Caso industrial

Se ha estudiado el efecto de las holguras en un caso industrial real:

- Se ha desarrollado un modelo dinámico que identifica los eventos críticos del movimiento de la máquina.
- Se ha observado que la presencia de holguras empeora el comportamiento de la máquina, su funcionalidad y su eficiencia.

Trabajo Futuro.



Modelos de holguras, desgaste y flexibilidad

Los modelos de holguras y desgaste pueden mejorarse de muchas formas:

- Desarrollando modelos de distintos tipos de juntas: pares prismáticos, cilíndricos, juntas esféricas...
- Consideración de contactos y mapas de desgaste en 3D.
- Consideración de varias holguras en un mismo mecanismo.
- Implementación de otros modelos de contacto.



Fatiga

Hay distintos caminos que pueden seguirse de cara al estudio y desarrollo de modelos de análisis a fatiga:

- Modelos de fatiga probabilísticos.
- Modelos de fatiga considerando propagación de grieta.
- Desarrollo de un análisis de sensibilidad acerca de todos los factores que afectan a la fatiga.



Caso industrial

Los resultados experimentales actuales dan pie a:

- Continuar mejorando el modelo, calibrando todos los parámetros que intervienen él.
- Desarrollar un modelo que involucre fenómenos más complejos como holguras en más juntas.
- Aplicación de las metodologías desarrolladas al mantenimiento predictivo de máquinas.

Publicaciones



Mechanism and Machine Theory
Volume 194, April 2024, 105583



15 citas

A multibody-dynamics based method for the estimation of wear evolution in the revolute joints of mechanisms that considers link flexibility

M. López-Lombardero ^a ✉, J. Cuadrado ^b, M. Cabello ^a, F. Martínez ^a, D. Dopico ^b,
A. López-Varela ^b



Mechanism and Machine Theory
Volume 203, 15 November 2024, 105805



3 citas

Simulating fatigue damage on planar mechanisms considering wear in revolute joints with clearance

M. López-Lombardero ^a ✉, J. Cuadrado ^b, M. Cabello ^a, F. Martínez ^a, D. Dopico ^b,
A. López Varela ^{b c}

Conferencias

1. M. López-Lombardero, A. Remírez, M. Cabello, and J. Cuadrado, "**Multibody fatigue assessment in industrial mechanisms considering wear in revolute joints**," presented at the 10th ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics, Budapest, Hungary, 12-15 December, 2021.
2. M. López-Lombardero, J. Cuadrado, M. Cabello, and F. Martínez, "**Numerical considerations for simulating wear in revolute joints**," presented at The 6th International Conference on Multibody System Dynamics and The 10th Asian Conference on Multibody System Dynamics, New Delhi, India, 16-20 October 2022.
3. M. López-Lombardero, J. Cuadrado, M. Cabello, F. Martínez, D. Dopico, and Á. López-Varela, "**Contact pressure profile influence on wear prediction for MBS revolute joints models**", presented at the 11th ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics, Lisbon, Portugal, 24-28 July, 2023.

¡Muchas gracias!

Para más información síguenos en:

