

Bienvenid@s

WEBINAR





#WebinarsAEMAC



Pedro Nuno Martins Fernandes

INEGI - Institute of Science and Innovation in Mechanical and Industrial Engineering

Diseño y optimización topológica de una estructura compuesta auto desplegable

27 de Septiembre 2023, 16:00 (Madrid, GMT+2)

INEGI – QUIEN SOMOS

4



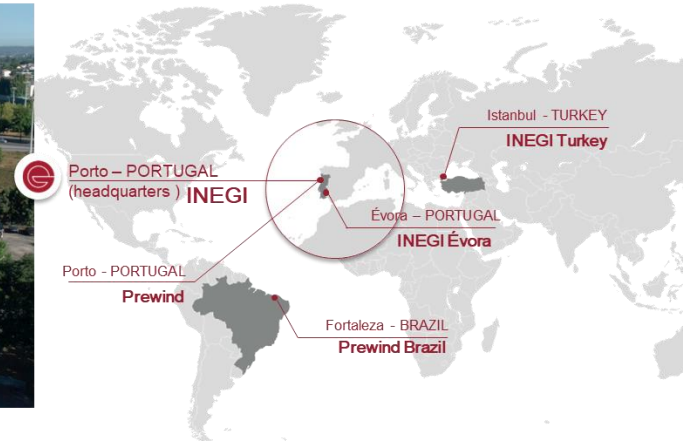
8.272 m²

Facilities - Porto



A Research and Technology Organisation (RTO) focused on research and technology based innovation activities, technology transfer, consulting and technological services. Oriented to the development of industry and economy in general.

Non-profit, private and recognised as a public utility entity.



INEGI – QUIEN SOMOS

5



+600

Customers/year



+250

Staff



~12 M EUR

Turnover (2021)



+120

Innovation Projects with Industry / year



200

International Partners

- +48%** Invoicing
- +75%** Projects with industry
- +25%** International



6

Spin-offs in the market



6

Patents Pending



4

Affiliate Institutions



1,3

PhD Thesis per Researcher



2,7

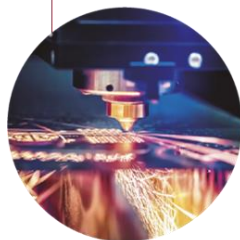
ISI Papers per Researcher

INEGI – QUIEN SOMOS

6



INDUSTRY



CAPITAL GOODS



AERONAUTICS,
SPACE AND DEFENCE



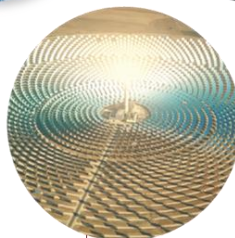
AUTOMOTIVE AND
TRANSPORTS



CIVIL
INFRASTRUCTURES



RENEWABLE
ENERGIES



SEA
ECONOMY



HEALTH
AND SPORT



Diseño y optimización topológica de una estructura compuesta auto desplegable.



CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E ENSINO SUPERIOR



»1. Motivación

- 1.1 Concepto
- 1.2 Caso de estudio

»2. Revisión de la literatura sobre estructuras desplegables

- 2.1 Ensayos y caracterización
- 2.2 Modelización numérica
- 2.3 Diseño y optimización
- 2.4 Resumen

»3. Diseño y optimización de una articulación elástica compuesta auto desplegable

- 3.1 Fundamentos de investigación
- 3.2 Resultados
- 3.3 Contribución
- 3.4 Resumen

»4. Influencia de la relajación en el comportamiento de despliegue de una articulación elástica compuesta CFRP

- 4.1 Caracterización experimental
- 4.2 Correlación numérica y experimental
- 4.3 Contribución
- 4.4 Resumen

»5. Revisión de la literatura - Revisitada

- 5.1 Trayectorias de investigación
- 5.2 Distribución de publicaciones
- 5.3 Contribución
- 5.4 Resumen

»6. Análisis de rendimiento de una articulación elástica auto desplegable compuesta tolerante a daños

- 6.1 Fundamentos de investigación
- 6.2 Análisis de rendimiento
- 6.3 Resultados
- 6.4 Contribución
- 6.5 Resumen

»7. Código en Python para optimización topológica con estrés restringido en ABAQUS®

- 7.1 Análisis de sensibilidad
- 7.2 Casos de estudio
- 7.3 Discussion
- 7.4 Contribución
- 7.5 Resumen

»8. Discusión, conclusiones y trabajo futuro

- 8.1 Sobre el diseño de articulaciones elásticas compuestas
- 8.2 Sobre el uso de un diseño de articulación elástica tolerante al daño
- 8.3 Sobre el uso de optimización topológica para diseñar articulaciones elásticas
- 8.4 Conclusiones y trabajos futuros

»9. Agradecimientos

1.

Motivación

- **ESTRUCTURAS DESPLEGABLES**
 - Estructuras que tienen transitar entre, por lo menos, dos configuraciones funcionales.
- **APLICACIÓN EN EL SECTOR DEL ESPACIO**
 - Permiten utilizar las capacidades de espacio y masa de un lanzador de forma mas eficiente.
- **ESTRUCTURAS AUTO DESPLEGABLES**
 - Estructuras desplegables que no necesitas de un sistema externo para transitar entre configuraciones (ex: utilizando energía elástica)



Utilización de una cinta como sistema auto desplegable (Vyvyan, 1968).

- **DESARROLLO DE SISTEMAS DESPLEGABLES**

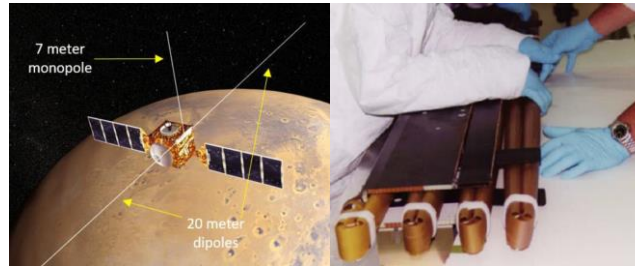
- El concepto de articulación elástica ha marcado el uso de sistemas auto desplegables en aplicaciones espaciales para su uso en las antenas monopolo y dipolo de MARSIS (Mars Advanced Radar for Surface and Ionosphere Sounding).



Articulación elástica en configuración desplegada, parcialmente contraída y totalmente contraída (Mallikarachchi y Pellegrino, 2009).

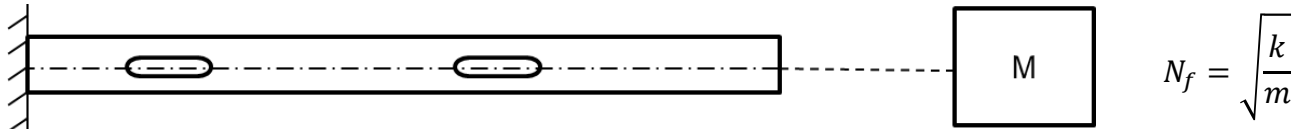
■ DESARROLLO DE SISTEMAS DESPLEGABLES

- El concepto de articulación elástica ha marcado el uso de sistemas auto desplegables en aplicaciones espaciales para su uso en las antenas monopolo y dipolo de MARSIS (Mars Advanced Radar for Surface and Ionosphere Sounding).



Representación de MARSIS (adaptado de N. Grumman, 2007) y fotografía de sus articulaciones elásticas durante su almacenamiento (Marks et al. 2002).

- **COMETH – ANTENNA DEPLOYMENT ARM WITH INTEGRATED ELASTIC HINGES (ARTES AT REF.5B.163)**
 - **Objetivo:** reemplazar un brazo de antena mecánico de un satélite de telecomunicaciones, con una solución de articulación elástica compuesta.



- **Requerimientos:**
 - El diseño no debe iniciar daño durante la operación (Max. IF < 1.0);
 - La primera frecuencia natural de vibración debe ser superior a 1,0 Hz.
- Este requerimiento de frecuencia es 100 veces mayor que la frecuencia natural de las soluciones de bisagras elásticas desplegables de última generación y 20 veces mayor que la frecuencia natural de las antenas monopolo y dipolo de MARSIS (Mallikarachchi y Pellegrino, 2009; Marks et al. 2002).

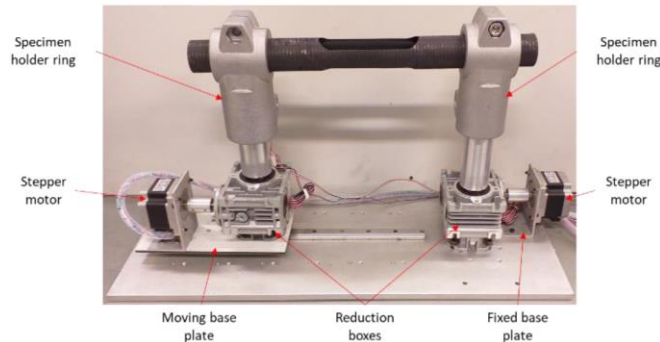


2.

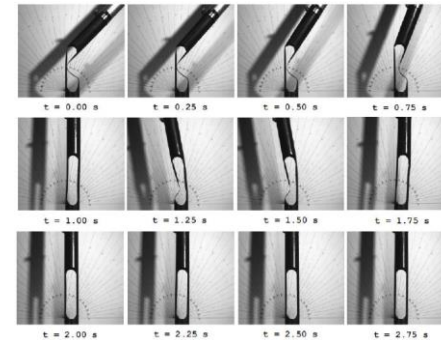
Revisión de la literatura sobre estructuras desplegadas

■ CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL

- Los métodos más utilizados para caracterizar experimentalmente articulaciones y cintas elásticas son: la medición de la curva torque-ángulo y el análisis del comportamiento de despliegue.



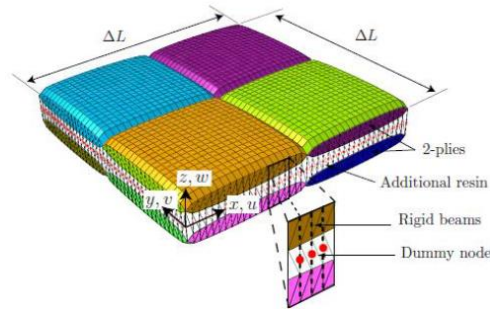
Ejemplo de una configuración utilizada para medir la curva de torque-ángulo de una articulación elástica (basada en el diseño propuesto por Mallikarachchi y Pellegrino, 2008).



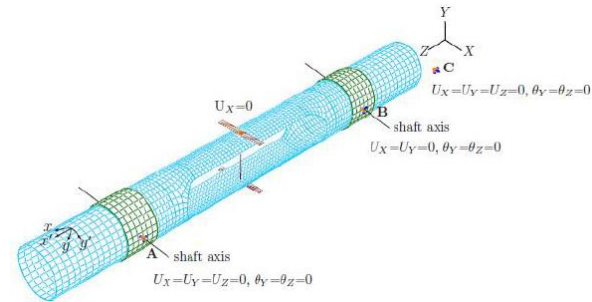
Secuencia de despliegue de una articulación elástica (Mallikarachchi y Pellegrino, 2009).

■ ANÁLISIS MULTIESCALA DE UNA ARTICULACIÓN ELÁSTICA

- Mallikarachchi (2011) adoptó un enfoque multiescala para simular el comportamiento de plegado y despliegue de una articulación elástica.



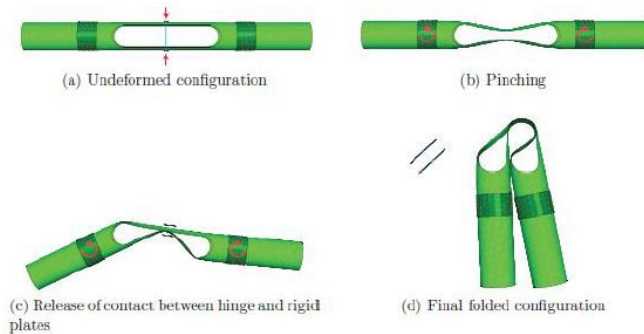
Elemento de volumen representativo del tejido (Mallikarachchi y Pellegrino, 2011).



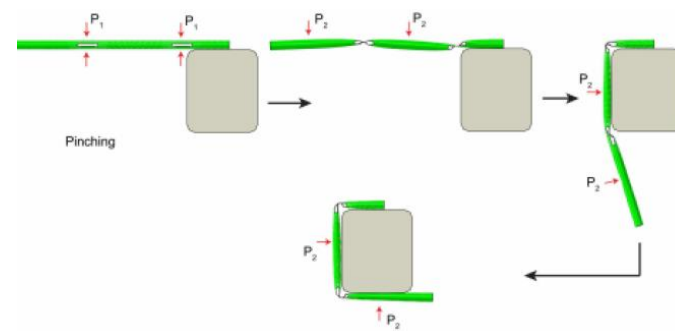
Condiciones de contorno consideradas (Mallikarachchi, 2011).

■ ANÁLISIS MULTIESCALA DE UNA ARTICULACIÓN ELÁSTICA

- Mallikarachchi (2011) adoptó un enfoque multiescala para simular el comportamiento de plegado y despliegue de una articulación elástica.



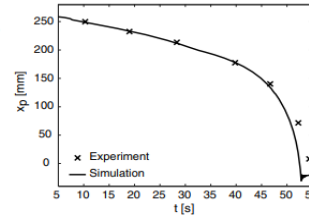
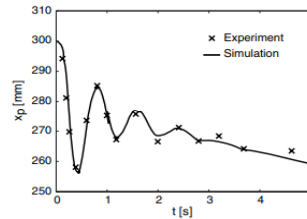
Secuencia de plegado de una articulación elástica en el modelo numérico (Mallikarachchi, 2011).



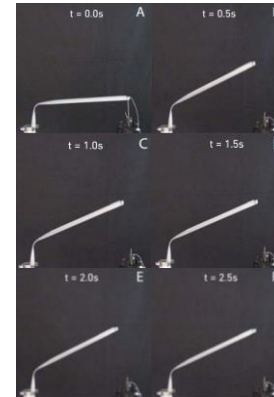
Secuencia de plegado de una antena (Mallikarachchi y Pellegrino, 2011).

■ ANÁLISIS GEOMÉTRICO Y INFLUENCIA DE LA RELAJACIÓN

- Mallikarachchi (2011) adoptó un enfoque multiescala para simular el comportamiento de plegado y despliegue de una articulación elástica.

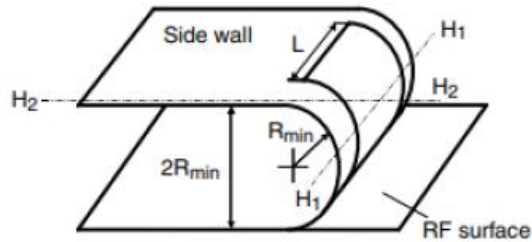


Despliegue numérico y experimental de una cinta de LDPE, después de su almacenamiento (Kwok y Pellegrino, 2013).

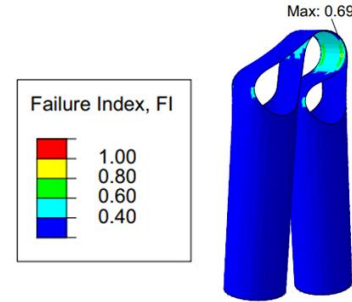


■ DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DESPLEGABLE

- El criterio principal utilizado para diseñar una estructura desplegable es permitir un proceso de retracción completo sin inicio de daños.



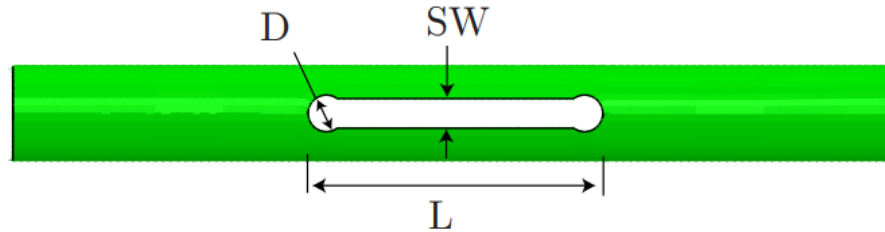
Definición de un radio de plegado mínimo según el criterio de fallo máximo de deformación (Soykasap et al. 2004).



Diseño de una articulación elástica según un criterio de fallo basado en el estrés (Mallikarachchi, 2011).

■ DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DESPLEGABLE

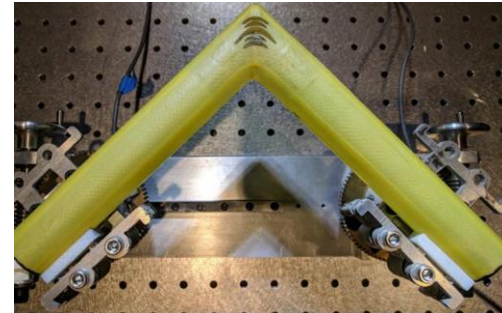
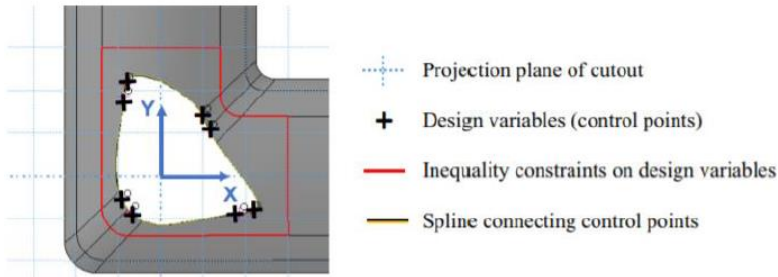
- El criterio principal utilizado para diseñar una estructura desplegable es permitir un proceso de retracción completo sin inicio de daños.



Ejemplo de variables de diseño utilizadas para definir una geometría de articulación elástica en un análisis paramétrico (Mallikarachchi y Pellegrino, 2011).

■ DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DESPLEGABLE

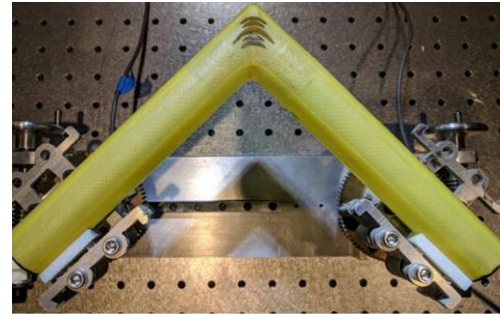
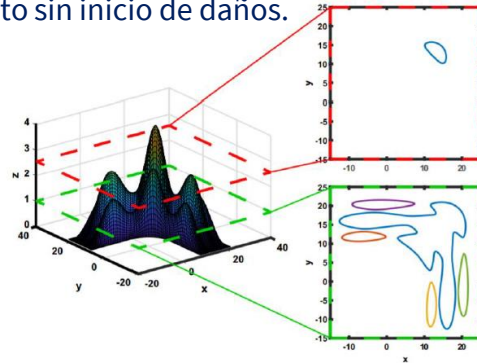
- El criterio principal utilizado para diseñar una estructura desplegable es permitir un proceso de retracción completo sin inicio de daños.



Representación del espacio de diseño y variables de diseño consideradas en una optimización paramétrica de una articulación elástica (Ferraro y Pellegrino, 2019).

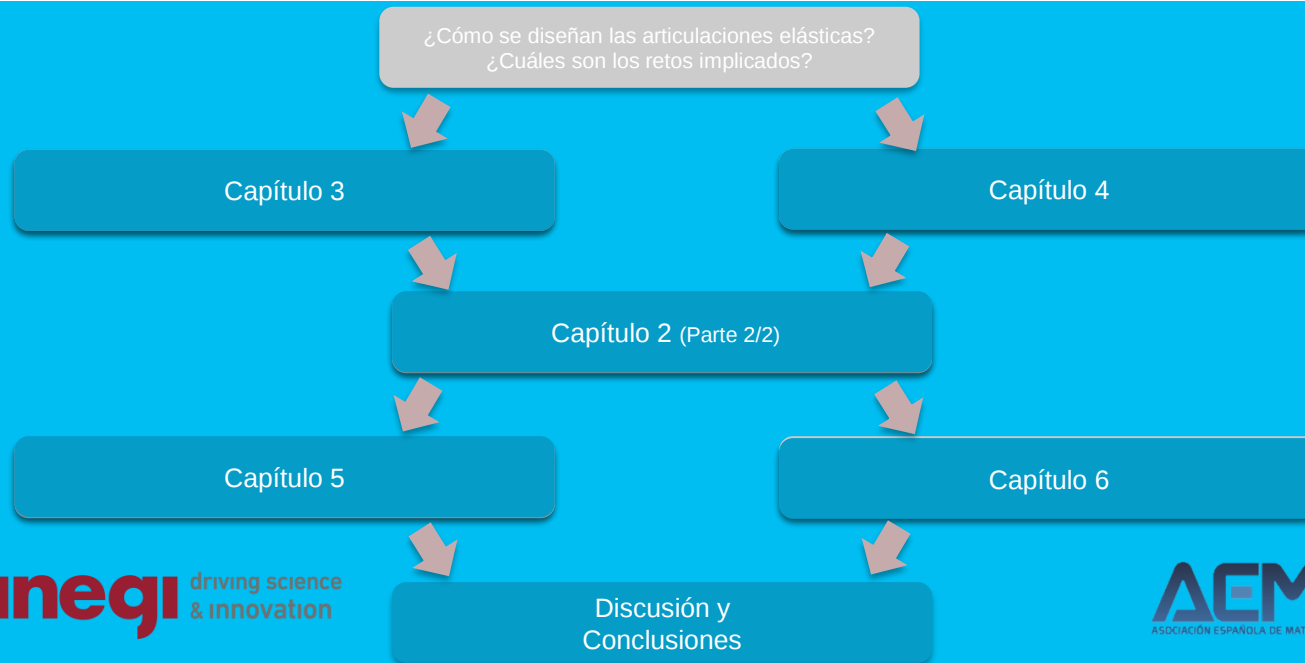
■ DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DESPLEGABLE

- El criterio principal utilizado para diseñar una estructura desplegable es permitir un proceso de retracción completo sin inicio de daños.



Representación del espacio de diseño y variables de diseño consideradas en una optimización paramétrica de una articulación elástica (Ferraro y Pellegrino, 2019).

- Se utilizan dos **procedimientos de prueba experimentales** principales para caracterizar el comportamiento mecánico de bisagras elásticas y / o resortes de cinta.
- Estas pruebas se pueden reproducir numéricamente a través de **modelos dinámicos**.
- Los modelos numéricos deben utilizar **formulaciones explícitas para reducir el costo computacional**.
- El **diseño y optimización** de estructuras desplegadas se **basa en el análisis del estado de tensión y deformación** de puntos críticos, **asumiendo un régimen elástico de funcionamiento**.



3.

Diseño y optimización de una articulación elástica compuesta auto desplegable

■ CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

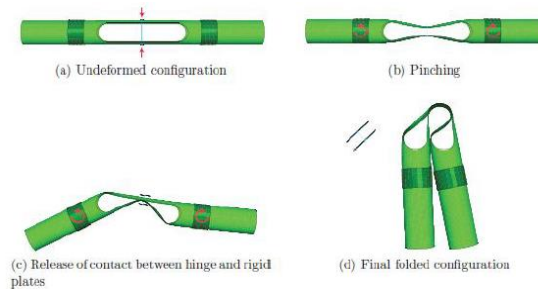
- Se realizó una campaña experimental, según las normas ASTM, para caracterizar las propiedades mecánicas del sistema compuesto AS4/8552.

	Property	Value	Unit
Elastic properties	E_{11}	128	GPa
	E_{22}	7625	MPa
	ν_{12}	0.35	-
	ν_{23}	0.45	-
	G_{12}	4358	MPa
Strength properties	X_t	2300	MPa
	X_c	1200	MPa
	Y_c	220	MPa
	S_{12}	100	MPa

Propiedades elásticas y de resistencia del sistema compuesto AS4/8552 (Lopes et al., 2009; González et al., 2012).

■ MODELIZACIÓN NUMÉRICA

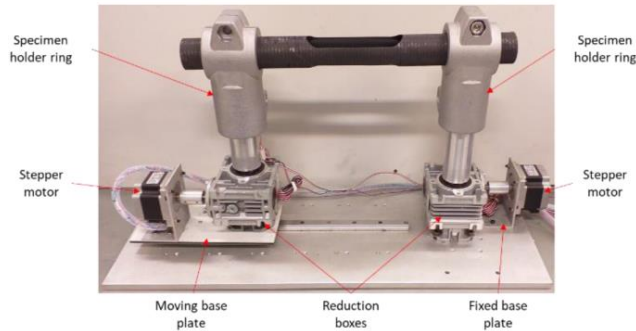
- Los modelos numéricos fueron implementados utilizando el mismo procedimiento descrito en la literatura.



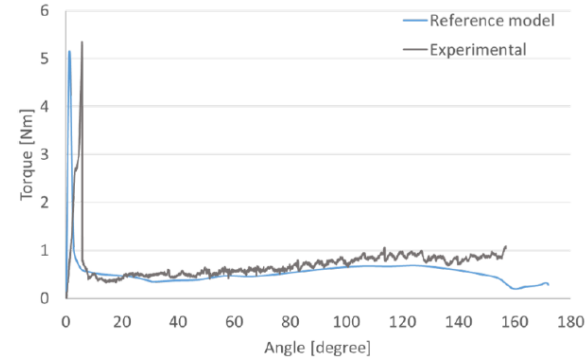
Secuencia de plegado de una articulación elástica en el modelo numérico (Mallikarachchi, 2011).

■ VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

- Se compararon los datos experimentales y numéricos, lo que indica una buena concordancia entre ambos.



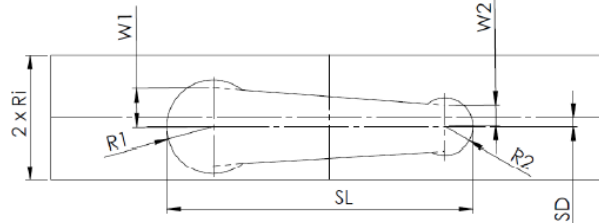
Configuración utilizada para medir la curva de torque y ángulo de una articulación elástica (basada en el diseño propuesto por Mallikarachchi y Pellegrino, 2008).



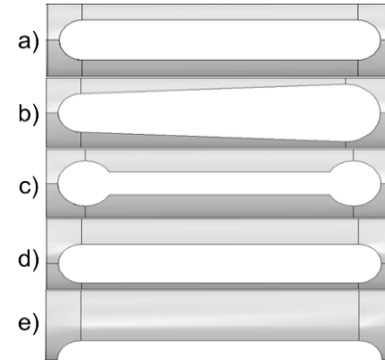
Correlación entre los resultados de las pruebas experimentales y numéricas.

VARIABLES DE DISEÑO

- El diseño de la bisagra elástica se definió en función de nueve variables, a saber:
- El número de capas de la disposición compuesta;
- El ángulo de la capa;
- El radio interno del tubo (R_i);
- El radio de dos círculos en los extremos de la ranura (R_1, R_2);
- Dos líneas que conectan ambos círculos (R_{1r}, R_{2r});
- La longitud de la ranura (S_L);
- El desplazamiento vertical de la ranura (S_D).



Variables de diseño consideradas en el proceso de optimización.



Ejemplos de arquetipos de diseño obtenidos con las variables de diseño utilizadas.

■ **EL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN NO ENCONTRÓ UNA SOLUCIÓN ADECUADA. SIN EMBARGO, SE IDENTIFICÓ UN PATRÓN:**

- El algoritmo prefirió soluciones con un radio interno mayor (hasta 200 mm).
- Se prefirieron anchos de ranura más pequeños (lo que lleva a una menor eliminación de material).
- Las mejores soluciones encontradas comparten cuatro puntos de concentración de estrés.
- Se prefirió un radio de ranura grande (eliminando material cerca de los puntos de concentración de tensión).

Criteria	Value
Azzi-Tsai-Hill	1.24
Hashin	Fibre compression 1.04
	Fibre tension 0.31
	Matrix compression 1.63
	Matrix tension 1.48
Maximum stress	1.22
Tsai Hill	1.25
Tsai Wu	1.40
Max. IF	1.63

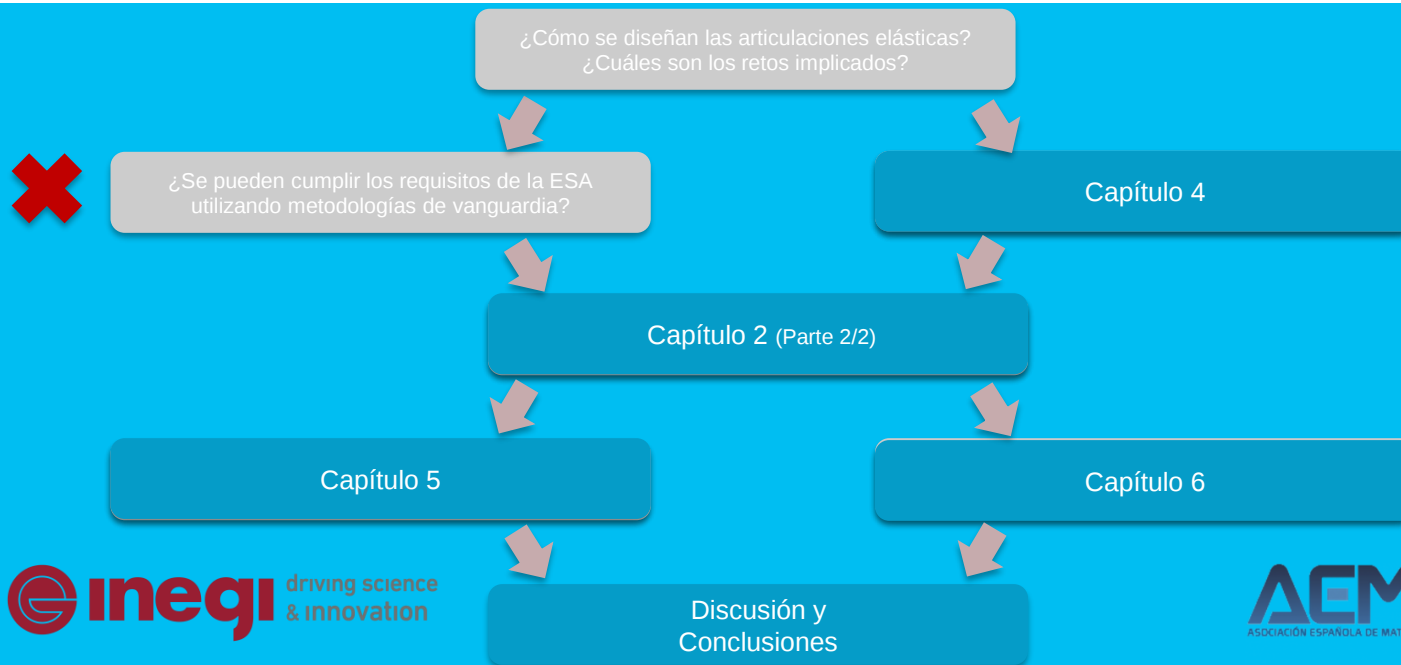
Índices de fallo de la mejor solución encontrada, con una primera frecuencia natural de 1,22 Hz.



Puntos de concentración de estrés observados.

- **LA PRESENTE INVESTIGACIÓN FUE PUBLICADA EN ACTAS DE CONGRESOS ARBITRADAS:**
 - P. Fernandes, R. Marques, R. Pinto, P. Mimoso, J. Rodrigues, A. Silva, João Manuel R.S. Tavares, G. Rodrigues, N. Correia. Design and optimization of a self-deployable composite structure. In **Materiales Compuestos, MAT-COMP'19 - Composites for Industry 4.0, Vigo**, Spain, 2020. ISSN: 2531-0739
- **EL TRABAJO AQUÍ DESARROLLADO CONTRIBUYE A:**
 - **Una mejor comprensión de las metodologías de diseño** utilizadas en el desarrollo de articulaciones elásticas y sus limitaciones;
 - La **identificación de posibles mejoras** en la definición del problema de optimización.

- El **proceso de diseño y optimización descrito en la literatura** no encontró una solución adecuada para este problema en particular.
- Aunque las **variables de diseño** utilizadas permitieron soluciones más diversas, **no permitieron la eliminación de material de los puntos de concentración de tensión.**

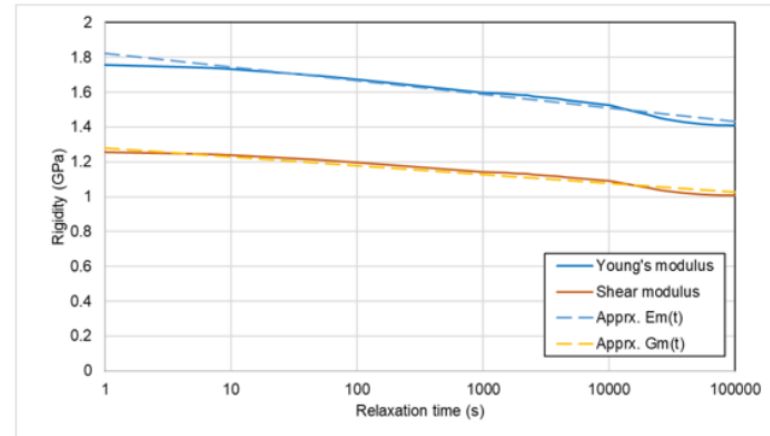


4.

Influencia de la relajación en el comportamiento de despliegue de una articulación elástica compuesta CFRP

■ RELAJACIÓN DEL MATERIAL

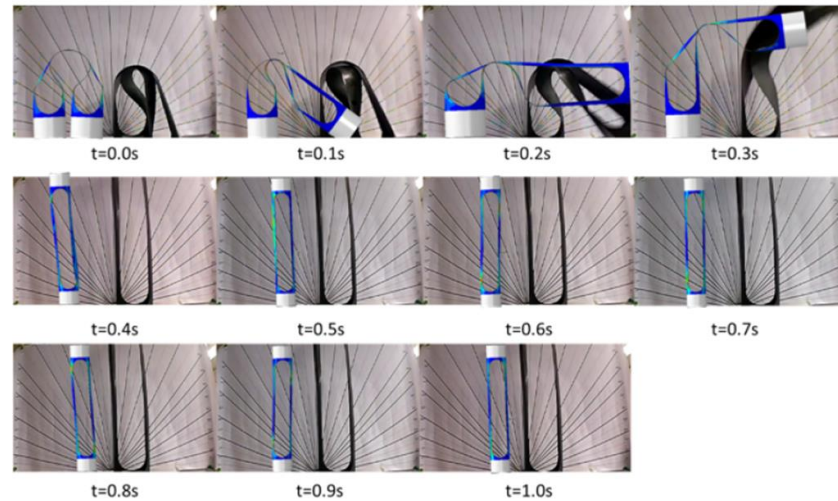
- Las curvas de relajación de las muestras compuestas AS4/8552 se midieron a tres temperaturas distintas.
- Luego, por el principio de superposición tiempo-temperatura (TTS), estos datos se utilizaron para determinar tanto el módulo de Young como las curvas maestras de relajación del módulo de cizallamiento.



Curvas maestras de relajación del módulo de Young y módulo de cizallamiento de AS4/8552.

CORRELACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL

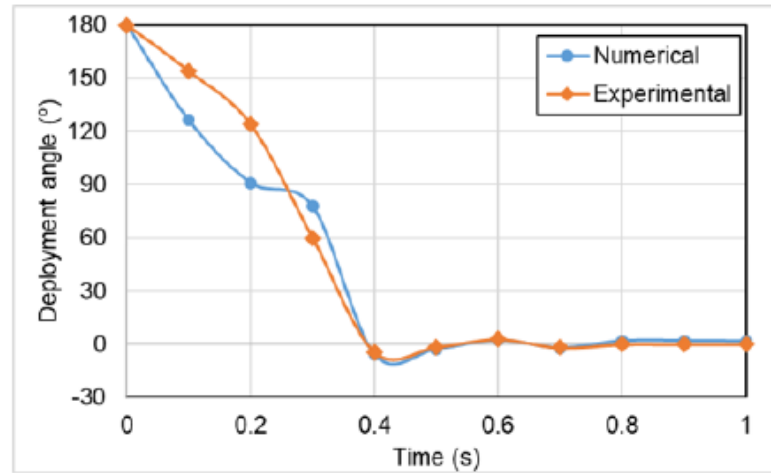
37



Comparación entre el modelo numérico y un conjunto de instantáneas de una prueba de implementación típica.

CORRELACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL

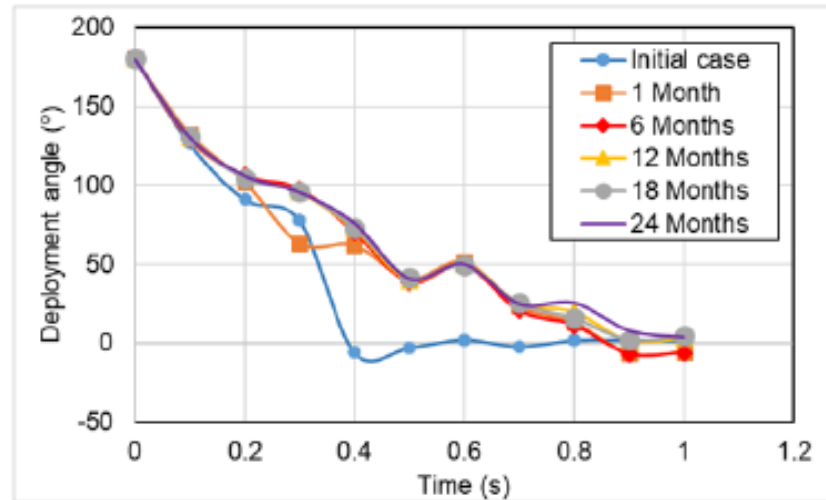
38



Mediciones experimentales y numéricas del ángulo en función del tiempo.

CORRELACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL

39



Comportamiento estimado de despliegue en función del tiempo para diferentes tiempos de relajación.

- **LA PRESENTE INVESTIGACIÓN FUE PUBLICADA EN UNA REVISTA CIENTÍFICA REVISADA POR PARES:**

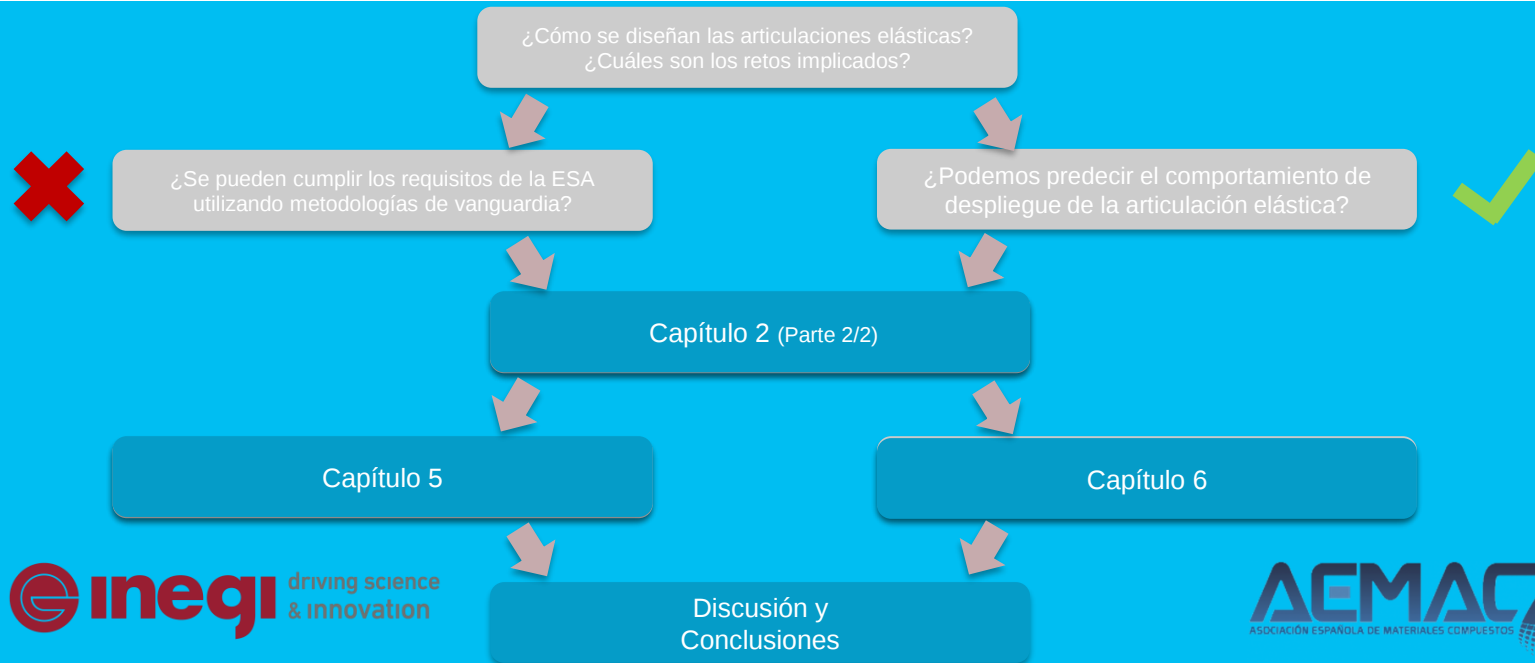
- P. Fernandes, B. Sousa, R. Marques, João Manuel R.S. Tavares, A.T. Marques, R.M. Natal Jorge, R. Pinto, N. Correia. (2021) Influence of relaxation on the deployment behaviour of a CFRP composite elastic-hinge. **Composite Structures**, 259, 113217. doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113217.
- **Mendeley dataset:** <https://data.mendeley.com/datasets/wsfncdwt4t>



- **EL TRABAJO AQUÍ DESARROLLADO CONTRIBUYE A:**

- La **caracterización de la relajación material de AS4/8552**;
- **Ampliar la aplicabilidad de los modelos numéricos** utilizados para predecir el despliegue de cintas para articulaciones elásticas;
- La **definición de una metodología** capaz de **predecir** la influencia de la **relajación** material en el despliegue.

- **El principio de superposición tiempo-temperatura (TTS) permitió predecir la relajación observada** a temperatura ambiente después de, aproximadamente, 24 horas en base a los datos recopilados durante 3 horas de pruebas experimentales a temperaturas de hasta 80 °C.
- **Se implementó un modelo de elementos finitos para estimar el comportamiento de despliegue** de una muestra de articulación elástica. Las predicciones de este modelo se correlacionaron bien con los resultados experimentales.
- **Para tiempos de relajación superiores a 6 meses**, el modelo numérico predice que la **articulación elástica no alcanza una configuración desplegada dentro del intervalo de tiempo de 1.0 s** analizado.
- **La investigación futura debe correlacionar el comportamiento de despliegue numéricamente predicho y experimental** de la bisagra elástica después de la relajación.



5.

Revisión de la literatura - Revisitada



DISTRIBUCIÓN DE PUBLICACIONES

45

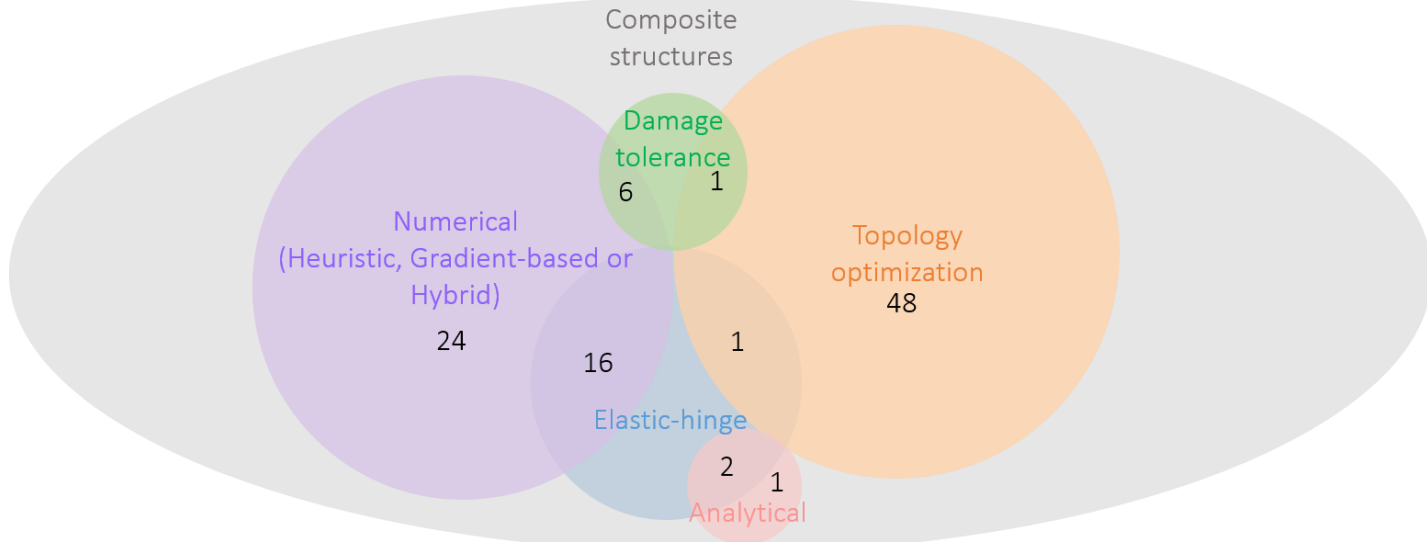
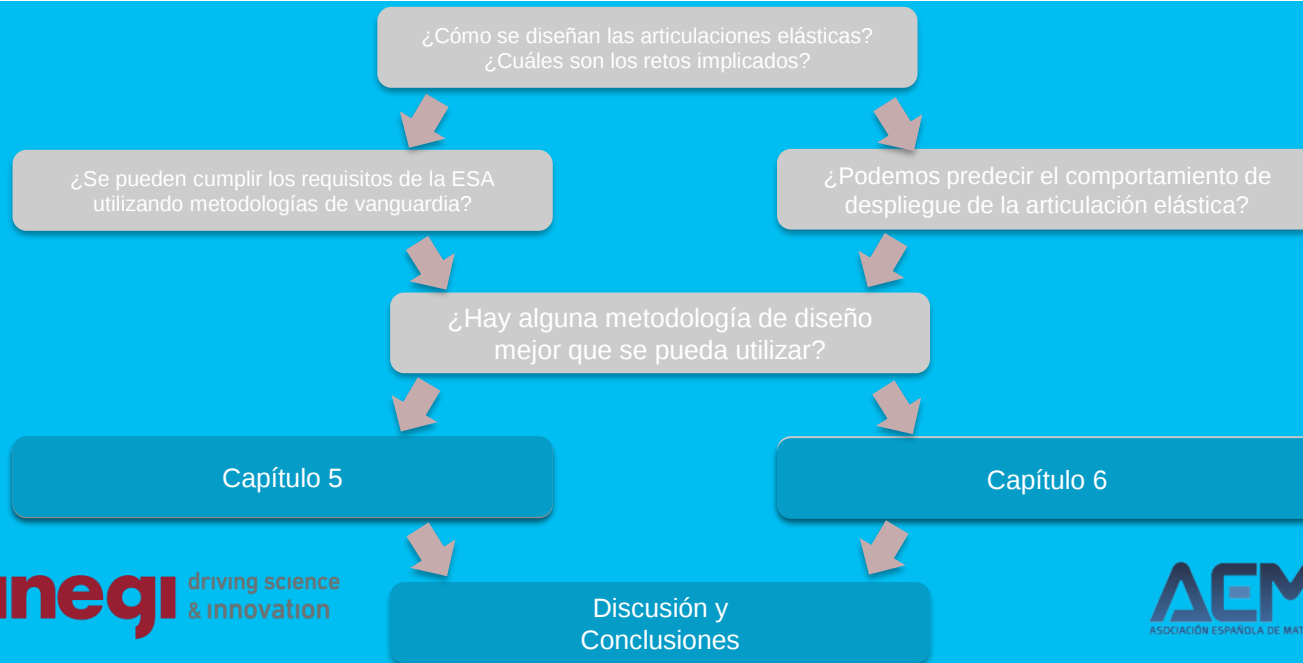


Diagrama de Venn que muestra el número de publicaciones sobre el tema del diseño de estructuras compuestas ordenadas por la metodología y el uso, o no, de la tolerancia al daño.

- **LA PRESENTE INVESTIGACIÓN FUE PUBLICADA EN UNA REVISTA CIENTÍFICA REVISADA POR PARES:**
 - P. Fernandes, R. Pinto, N. Correia. (2021) Design and optimization of self-deployable damage tolerant composite structures: a review. **Composites Part B: Engineering**, **221**, 109029. doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109029.

- **EL TRABAJO AQUÍ DESARROLLADO CONTRIBUYE A:**
 - **La comprensión del enfoque actual y la tendencia en la investigación** relacionada con: estructuras compuestas, tolerancia al daño y optimización de la topología;
 - La **identificación de posibles sinergias** entre estos tres campos;
 - La formulación de **dos hipótesis relacionadas con el diseño de articulaciones elásticas** compuestas.

- La revisión de la literatura **condujo a dos preguntas principales:**
 - **¿Por qué no se utiliza la optimización de topología para esta aplicación en particular?**
 - **¿Podría un diseño de bisagra elástica tolerante al daño ser una posible solución?**
- ¿Por qué restringir su funcionamiento al régimen elástico del material?
 - La estructura solo realizará **1 despliegue en su ciclo de vida;**
 - El nuevo paradigma de los nanosatélites prevé una **renovación de las constelaciones cada 2-3 años.**

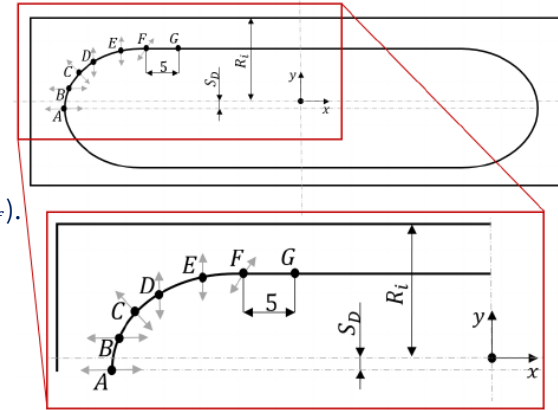


6.

Análisis de rendimiento de una articulación elástica auto desplegable compuesta tolerante a daños

■ VARIABLES DE DISEÑO - REDEFINIDAS

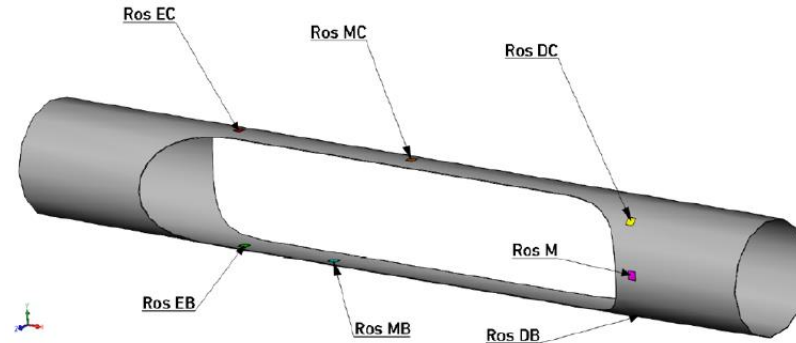
- Para aumentar la diversidad de las soluciones, las variables de diseño definieron:
 - - Los puntos de una curva de nivel (A – F);
 - - El radio interno de la bisagra elástica (R_i);
 - - La posición de la ranura en relación con el eje longitudinal (S_D);
 - - Un factor de escala para habilitar diferentes longitudes de ranura (L_f).
- Para reducir el coste computacional, no se incluyeron las siguientes variables, manteniendo los valores obtenidos previamente:
 - - Orientación de la capa (establecida en 40°);
 - - Número de capas (establecido en 4 capas).



Parametrización de las variables de diseño que definen la ranura de la bisagra elástica. Las flechas grises indican la dirección en la que se permite que se muevan los puntos de control.

- **VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO - REVISADO**

- El proceso se repitió para tener en cuenta los posibles factores de escala y para confirmar la precisión del modelo al predecir el campo tensión-deformación.

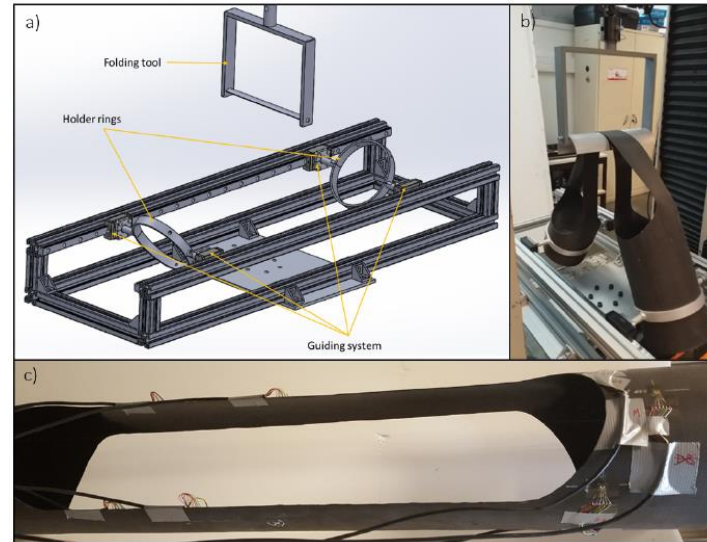


Ubicación de los siete extensómetros instalados en cada articulación elástica.

FUNDAMENTOS DE INVESTIGACIÓN

52

- a) Plataforma utilizada para ejemplares mayores.
- b) Ilustración de la prueba experimental, con el equipo plegable instalado en la máquina de prueba universal.
- c) Detalle de la muestra con las galgas extensométricas instaladas.



- **HIPÓTESIS**
 - Un diseño más rígido tendrá una primera frecuencia natural aumentada.
 - El material con daño causa una reducción local de la rigidez.

- **¿EL AUMENTO DE LA RIGIDEZ GLOBAL COMPENSA LA REDUCCIÓN LOCAL CAUSADA POR EL DAÑO?**

- **METODOLOGÍA**
 - Utilizar un algoritmo genético para diseñar dos bisagras elásticas, maximizando su primera frecuencia natural.
 - Optimizar en las mismas condiciones, excepto por la restricción Max. IF.

- **Diseño elástico (convencional)**
 - Tiene un IF máx. $< 1,0$ (régimen elástico)
- **Diseño tolerante a daños (menos conservador)**
 - Tiene un IF máx. $< 1,1$ (ha iniciado daño)

- **DISEÑOS DE ARTICULACIONES ELÁSTICAS**

- El proceso de optimización condujo a los siguientes diseños:

$$\begin{aligned} \text{Max. } IF &\approx 1,0 \\ N_F &= 1,16 \text{ Hz} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Max. } IF &\approx 1,1 \\ N_F &= 1,34 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Layup
[40°/-40°/-40°/40°]



a) Elastic design

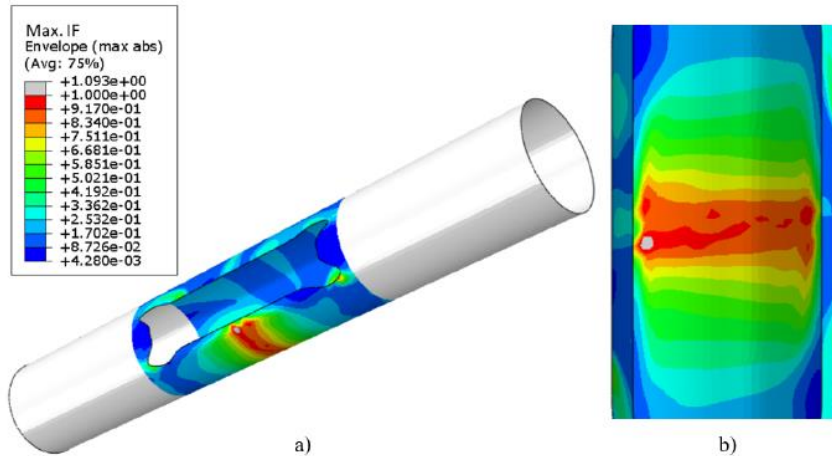


b) Damage tolerant design

Representación de los diseños elásticos (a) y tolerantes a daños (b).

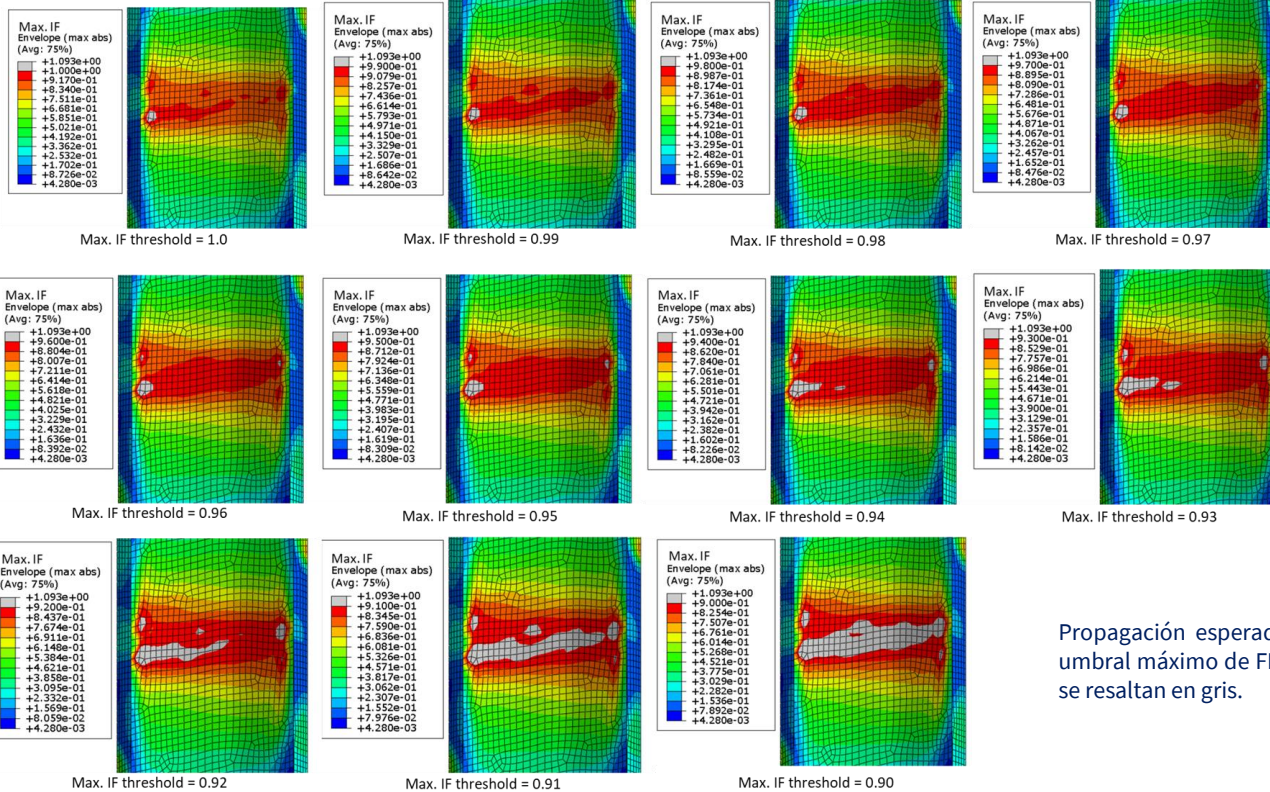
■ INFLUENCIA DEL DAÑO

- El análisis de frecuencia natural se repitió, considerando la eliminación del material dañado.



Layup
[40°/-40°/-40°/40°]

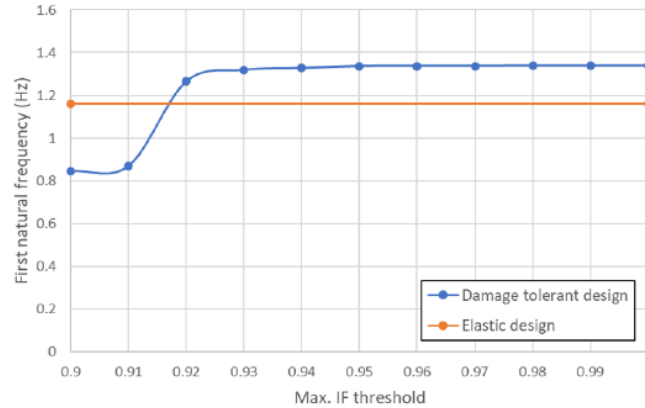
Perspectiva (a) y vista inferior (b) de la distribución Max. IF en la bisagra elástica tolerante al daño.



Propagación esperada del daño en función del umbral máximo de FI. Los elementos eliminados se resaltan en gris.

■ EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO

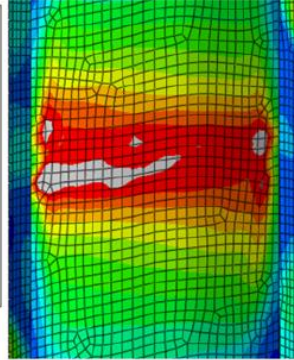
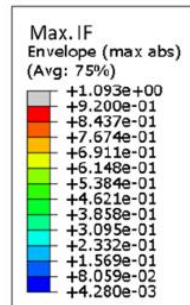
- El diseño tolerante al daño tiene una primera frecuencia natural más alta a menos que el daño se propague más allá de un Max. IF de 0,92.



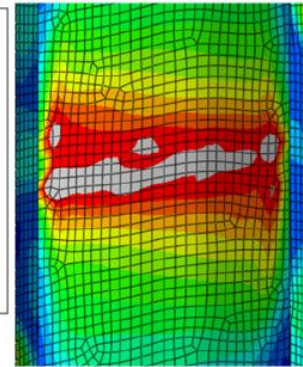
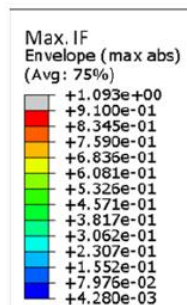
Primera frecuencia natural en función del umbral de Máx. IF.

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO

- El diseño tolerante al daño tiene una primera frecuencia natural más alta a menos que el daño se propague más allá de un Max. IF de 0,92.



Max. IF threshold = 0.92



Max. IF threshold = 0.91

Elementos eliminados cuando el umbral Max. FI = 0,92 y 0,91.

- **LA PRESENTE INVESTIGACIÓN FUE PUBLICADA EN UNA REVISTA CIENTÍFICA REVISADA POR PARES:**

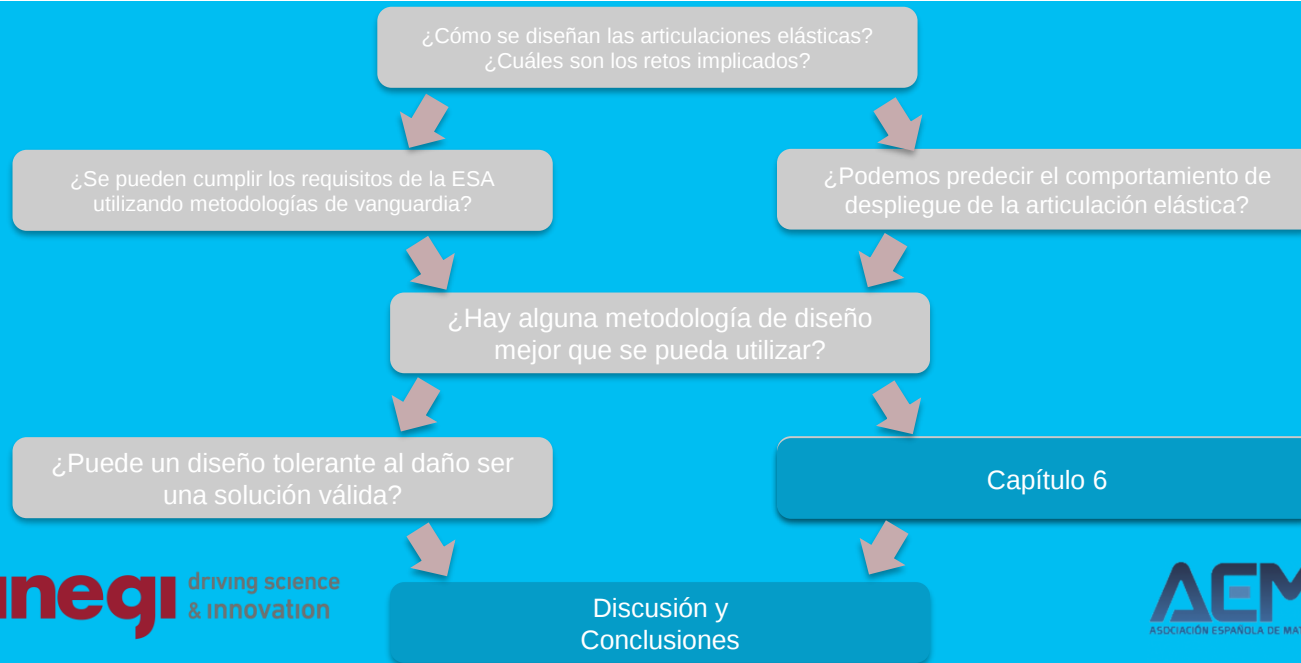
- P. Fernandes, R. Pinto, A. Ferrer, N. Correia. (2022) Performance analysis of a damage tolerant composite self-deployable elastic-hinge. **Composite Structures**, **288**, **115407**. doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115407
- **Mendeley dataset:** <https://data.mendeley.com/drafts/dz4yr438hb>

Incluye
Mendeley
dataset

- **EL TRABAJO AQUÍ DESARROLLADO CONTRIBUYE A:**

- La **evaluación crítica de los requisitos** considerados en el diseño de estructuras desplegables;
- La evaluación y el **análisis de un concepto de diseño tolerante a los daños**;
- La exploración de metodologías de diseño que puedan **promover el uso de estructuras desplegables**.

- **Se desarrollaron dos diseños de articulaciones elásticas**, cada una con una restricción Max. IF distinta.
- **El diseño tolerante al daño tuvo un mejor rendimiento** en términos de primera frecuencia natural de vibración, incluso cuando se tiene en cuenta la influencia de la degradación del material.
- El **aumento de la rigidez global compensó la disminución local** causada por la iniciación del daño.



■ PROBLEMA DE DISEÑO DE BISAGRA ELÁSTICA

Función objetivo:

$$\max: N_f = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Restricción:

$$\text{Max. IF} \leq 1.0$$

Dónde:

$$m = m_{\text{antenna}} + m_{\text{hinge}} \approx m_{\text{antenna}} \\ \therefore m \approx \text{constant}$$

■ MINIMIZACIÓN DE LA FLEXIBILIDAD LIMITADO POR ESTRÉS

Función objetivo:

$$\min: C(\rho) = F u(\rho)$$

Restricción:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma^*$$

m – system mass
 k – system stiffness
 N_f – first natural frequency of vibration
 $\sigma_{\max}$ – maximum stress
 σ^* – maximum allowable stress

C – compliance
 F – external forces
 u – displacements
 ρ – design density

6.

Código en Python para optimización topológica con estrés restringido en ABAQUS®

■ FUNCIONAL DE FLEXIBILIDAD

Dado que la flexibilidad se define como $C(\rho) = F u(\rho)$, su sensibilidad puede determinarse como:

$$\frac{\partial C}{\partial \rho} = F \frac{\partial u}{\partial \rho}.$$

»A partir de $K(\rho) u(\rho) = F$, podemos obtener $\frac{\partial u}{\partial \rho} = -K^{-1} \frac{\partial K}{\partial \rho} K^{-1} F$ y por lo tanto:

$$\frac{\partial C}{\partial \rho} = -F K^{-1} \frac{\partial K}{\partial \rho} K^{-1} F = -u \frac{\partial K}{\partial \rho} u.$$

»El término $\frac{\partial K}{\partial \rho}$ se determina a partir de $K = A \int_{\Omega_e} B_a^T \mathbb{C} B_a dx$. Considerando la matriz de rigidez constitucional $\mathbb{C} = \rho^P \mathbb{C}_0$, la matriz de deformación-desplazamiento, B_a , y P como el factor de penalización de rigidez:

$$\frac{\partial K}{\partial \rho} = \int_{\Omega_e} B_a^T P \rho^{P-1} \mathbb{C}_0 B_a dx = \int_{\Omega_e} \frac{P}{\rho} B_a^T \mathbb{C} B_a dx = \frac{P}{\rho} K.$$

»Llevando a la siguiente expresión, donde $\rho^P u_e^T K_0 u_e$ es aproximadamente igual a la energía de deformación E_e (descuidando el factor de 0.5):

$$\frac{\partial C}{\partial \rho} = -\frac{P}{\rho} \rho^P u_e^T K_0 u_e = -P \frac{E_e}{\rho}.$$

■ FUNCIONAL DE ESTRÉS

Dado que la función "máximo" no es diferenciable, adoptamos la función de aproximación de norma p modificada, definiendo la tensión máxima de von-Mises como:

$$\sigma^{PN}(\rho) = \left(\frac{1}{N_i} \sum_{\Omega} (\sigma_a^{vM}(\rho))^q \right)^{\frac{1}{q}}.$$

» La influencia de la densidad del elemento en la tensión máxima se define por el término $\frac{\partial \sigma^{PN}(\rho)}{\partial \rho}$, obtenido por la regla de la cadena:

$$\frac{\partial \sigma^{PN}(\rho)}{\partial \rho} = \frac{\partial \sigma^{PN}(\rho)}{\partial \sigma_a^{vM}} \frac{\partial \sigma_a^{vM}(\rho)}{\partial \sigma_a} \frac{\partial \sigma_a(\rho)}{\partial \rho}.$$

» Considerando que $\sigma_a^{vM} = (\sigma_a(\rho) M \sigma_a(\rho))^{\frac{1}{2}}$, M la matriz de von-Mises, podemos definir los siguientes dos términos directamente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma^{PN}(\rho)}{\partial \sigma_a^{vM}} &= \left(\frac{1}{N_i} \sum_{\Omega} (\sigma_a^{vM}(\rho))^q \right)^{\frac{1}{q}-1} \frac{1}{N_i} (\sigma_a^{vM}(\rho))^{q-1} \\ \frac{\partial \sigma_a^{vM}(\rho)}{\partial \sigma_a(\rho)} &= (\sigma_a(\rho) M \sigma_a(\rho))^{-\frac{1}{2}} \times \sigma_a(\rho) M \frac{\partial \sigma_a(\rho)}{\partial \rho}. \end{aligned}$$

■ FUNCIONAL DE ESTRÉS

$$\frac{\partial \sigma^{PN}(\rho)}{\partial \rho} = \frac{\partial \sigma^{PN}(\rho)}{\partial \sigma_a^{vM}} \frac{\partial \sigma_a^{vM}(\rho)}{\partial \sigma_a} \frac{\partial \sigma_a(\rho)}{\partial \rho}.$$

»El ultimo término $\frac{\partial \sigma_a(\rho)}{\partial \rho}$ se obtiene de la ley de Hook, considerando un factor de penalización de estrés ρ^β :

$$\sigma_a(\rho) = \rho^\beta \mathbb{C}_0 B_a u(\rho)$$

$$\frac{\partial \sigma_a(\rho)}{\partial \rho} = \beta \rho^{\beta-1} \mathbb{C}_0 B_a u(\rho) + \rho^\beta \mathbb{C}_0 B_a \frac{\partial u(\rho)}{\partial \rho}.$$

»Finalmente, $\frac{\partial u(\rho)}{\partial \rho}$ se obtiene de la ecuación de estado $K(\rho) u(\rho) = F$:

$$\frac{\partial K(\rho)}{\partial \rho} u(\rho) + K(\rho) \frac{\partial u(\rho)}{\partial \rho} = \frac{\partial F(\rho)}{\partial \rho}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial u(\rho)}{\partial \rho} = K^{-1}(\rho) \frac{\partial K(\rho)}{\partial \rho} u(\rho).$$

■ FUNCIONAL DE ESTRÉS

»El funcional de estrés finalmente se puede reescribir de la siguiente manera, considerando $\beta = \frac{1}{2}$:

$$\frac{\partial \sigma^{PN}(\rho)}{\partial \rho} = \frac{\partial \sigma^{PN}(\rho)}{\partial \sigma_a^{vM}} \frac{\partial \sigma_a^{vM}(\rho)}{\partial \sigma_a} \left(\frac{1}{2} \rho^{-\frac{1}{2}} \mathbb{C}_0 B_a u(\rho) - \rho^{\frac{1}{2}} \mathbb{C}_0 B_a K^{-1}(\rho) \frac{\partial K(\rho)}{\partial \rho} u(\rho) \right).$$

»Esta expresión se puede resolver de manera más eficiente utilizando un modelo adjunto, definido por los desplazamientos adjuntos, λ , y las siguientes cargas externas:

$$K(\rho) \lambda = \frac{\partial \sigma^{PN}(\rho)}{\partial \sigma_a^{vM}} \frac{\partial \sigma_a^{vM}(\rho)}{\partial \sigma_a} \mathbb{C}_0 B_a K^{-1}(\rho).$$

»Recordando que $K = A B_a^T \mathbb{C}(\rho) B_a$, y dado que las deformaciones de estado y adjuntas son, respectivamente, $\varepsilon_s = B_a u$ y $\varepsilon_{adj} = B_a \lambda$, the La ecuación se puede simplificar como:

$$\frac{\partial \sigma^{PN}(\rho)}{\partial \rho} = \frac{\partial \sigma^{PN}(\rho)}{\partial \sigma_a^{vM}} \frac{\partial \sigma_a^{vM}(\rho)}{\partial \sigma_a} \left(\frac{1}{2} \rho^{-\frac{1}{2}} \mathbb{C}_0 B_a u(\rho) - \rho^{\frac{1}{2}} \varepsilon_s^T(\rho) \mathbb{C}'(\rho) \varepsilon_{adj}(\rho) \right).$$

■ FUNCIONAL DE ESTRÉS

$$\frac{\partial \sigma^{PN}(\rho)}{\partial \rho} = \frac{\partial \sigma^{PN}(\rho)}{\partial \sigma_a^{vM}} \frac{\partial \sigma_a^{vM}(\rho)}{\partial \sigma_a} \left(\frac{1}{2} \rho^{-\frac{1}{2}} \mathbb{C}_0 B_a u(\rho) - \rho^{\frac{1}{2}} \mathbb{C}_0 B_a K^{-1}(\rho) \frac{\partial K(\rho)}{\partial \rho} u(\rho) \right).$$

»Para mejorar la legibilidad y una discusión crítica posterior, establezcamos los dos términos siguientes:

$$\frac{\partial \sigma^{PN}(\rho)}{\partial \rho} = \partial \sigma_{spf}^{PN}(\rho) + \partial \sigma_u^{PN}(\rho)$$

$$\partial \sigma_{spf}^{PN}(\rho) = \frac{\partial \sigma^{PN}(\rho)}{\partial \sigma_a^{vM}} \frac{\partial \sigma_a^{vM}(\rho)}{\partial \sigma_a} \left(\frac{1}{2} \rho^{-\frac{1}{2}} \mathbb{C}_0 B_a u(\rho) \right)$$

$$\partial \sigma_u^{PN}(\rho) = \frac{\partial \sigma^{PN}(\rho)}{\partial \sigma_a^{vM}} \frac{\partial \sigma_a^{vM}(\rho)}{\partial \sigma_a} \left(-\rho^{\frac{1}{2}} \varepsilon_s^T(\rho) \mathbb{C}'(\rho) \varepsilon_{adj}(\rho) \right)$$

■ ¿SE PUEDE UTILIZAR LA OPTIMIZACIÓN DE TOPOLOGÍA PARA DISEÑAR UNA BISAGRA ELÁSTICA?

»En la implementación actual aquí mostrada, no.

»La literatura considera la simplificación del término $\frac{\partial F(\rho)}{\partial \rho} = 0$ en la derivada tanto de los funcionales de cumplimiento como de estrés.

$$\frac{\partial C}{\partial \rho} = F \frac{\partial u}{\partial \rho}$$

$$\frac{\partial K(\rho)}{\partial \rho} u(\rho) + K(\rho) \frac{\partial u(\rho)}{\partial \rho} = \frac{\partial F(\rho)}{\partial \rho}.$$

0

»Esta simplificación implica la suposición de una carga constante que se aplica en el modelo numérico. Esto no es cierto en el modelo numérico de la articulación elástica, que es impulsado por desplazamiento.

»Sin embargo, aceptar esta simplificación, proponer un proceso derivado diferente, o introducir una aproximación a este término, puede permitir el uso de optimización topológica para diseñar una articulación elástica.

¿SE PUEDE UTILIZAR LA OPTIMIZACIÓN DE TOPOLOGÍA PARA DISEÑAR UNA BISAGRA ELÁSTICA?

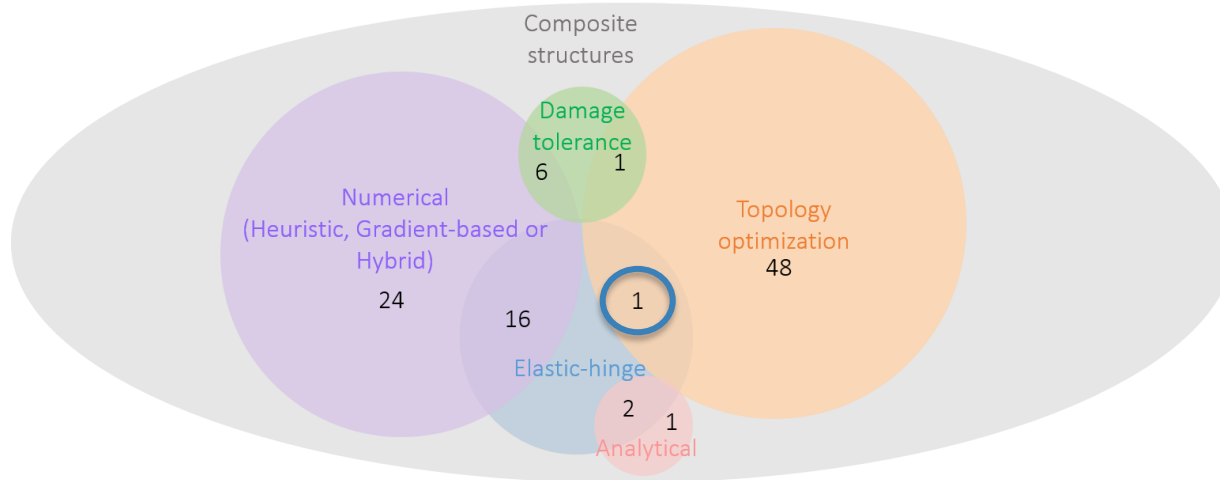


Diagrama de Venn que muestra el número de publicaciones sobre el tema del diseño de estructuras compuestas ordenadas por la metodología y el uso, o no, de la tolerancia al daño.

- ¿SE PUEDE UTILIZAR LA OPTIMIZACIÓN DE TOPOLOGÍA PARA DISEÑAR UNA BISAGRA ELÁSTICA?
 - En (S. Ferraro, 2019) se propone el siguiente supuesto:

$$\frac{\partial \sigma_{VM,e}(\rho, \mathbf{u})}{\partial \rho_e} = \frac{\partial (\rho_e^q)}{\partial \rho_e} \sigma_{VM,e}^0 + \cancel{\rho_e^q \frac{\partial (\sigma_{VM,e}^0)}{\partial \mathbf{u}} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \rho_e}} \approx \frac{\partial (\rho_e^q)}{\partial \rho_e} \sigma_{VM,e}^0$$

(Ecuación citada de S. Ferraro, 2019).

$$\frac{\partial \sigma^{PN}(\rho)}{\partial \rho} = \partial \sigma_{spf}^{PN}(\rho) + \partial \sigma_u^{PN}(\rho)$$

Valor medio de la derivada de tensión observada en el modelo de soporte en L.

Mesh size	ρ	$\frac{\partial \sigma^{PN}(\rho)}{\partial \rho}$	$\partial \sigma_{spf}^{PN}(\rho)$	$\partial \sigma_u^{PN}(\rho)$	$\frac{ \partial \sigma_u^{PN}(\rho) }{ \partial \sigma_{spf}^{PN}(\rho) }$
0,5	1	-0,0088	0,0004	-0,0092	24,037
	0,5	-2304,3703	0,5426	-2304,9129	4248,295
	0,1	-90,9833	1,2132	-92,1965	75,996
1	1	-0,0305	0,0013	-0,0318	23,864
	0,5	-7949,4335	1,8849	-7951,3184	4218,445
	0,1	-313,8380	4,2147	-318,0527	75,462
3	1	-0,2140	0,0096	-0,2236	23,289
	0,5	-3,4697	0,1086	-3,5784	32,936
	0,1	-2206,1706	30,3676	-2236,5382	73,649

■ PROCEDIMIENTO DE VALIDACIÓN

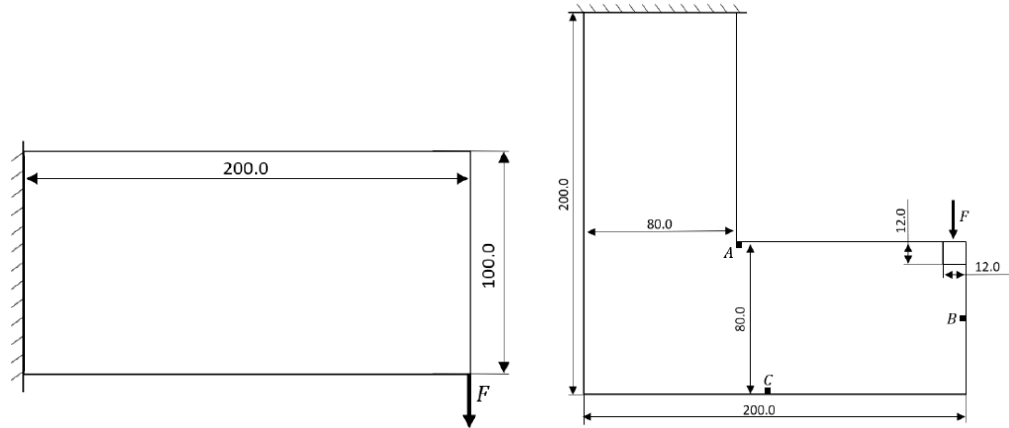
- La formulación aquí mostrada depende de la rigidez y la formulación de cada elemento, que no es accesible en el software comercial. Por lo tanto, la implementación de esta metodología requiere además:
 - **La programación del flujo de datos extraídos de ABAQUS®** (energía de deformación, propiedades del material, dominio de diseño, etc.);
 - **La implementación de la formulación de elementos:**
 - - Dos elementos 2D: CPS4 y CPE4;
 - - Un elemento *shell*: S4;
 - - Un elemento 3D: C3D8.
 - La **validación de la formulación del elemento** implementada, comparándola con ABAQUS®;
 - **La correcta determinación de los gradientes de las funciones objetivo y de restricción**, comparándolas con aproximaciones de diferencias finitas con datos extraídos de ABAQUS®.

- **Conexión con la interfaz ABAQUS® FEA y CAD.**
 - Permite geometrías complejas y la definición de regiones (no) editables;
 - Utiliza un solucionador numérico validado comercialmente.
- Acceso a **múltiples definiciones de problemas de optimización topológica:**
 - Minimización de la flexibilidad;
 - Minimización de la flexibilidad con restricciones de estrés;
 - Minimización del estrés.
- Acceso a **múltiples algoritmos de optimización:**
 - Criterios de optimalidad;
 - Método de Movimientos de Asíntotas (MMA);
 - Sequential Least-Square Programming (SLSQP), de la biblioteca Python SciPy;
 - Trust-constr (método de región de confianza), de la biblioteca Python SciPy.
- **Compatible con elementos 2D y 3D** (CPS4, CPE4 y C3D8).

CASOS DE ESTUDIO

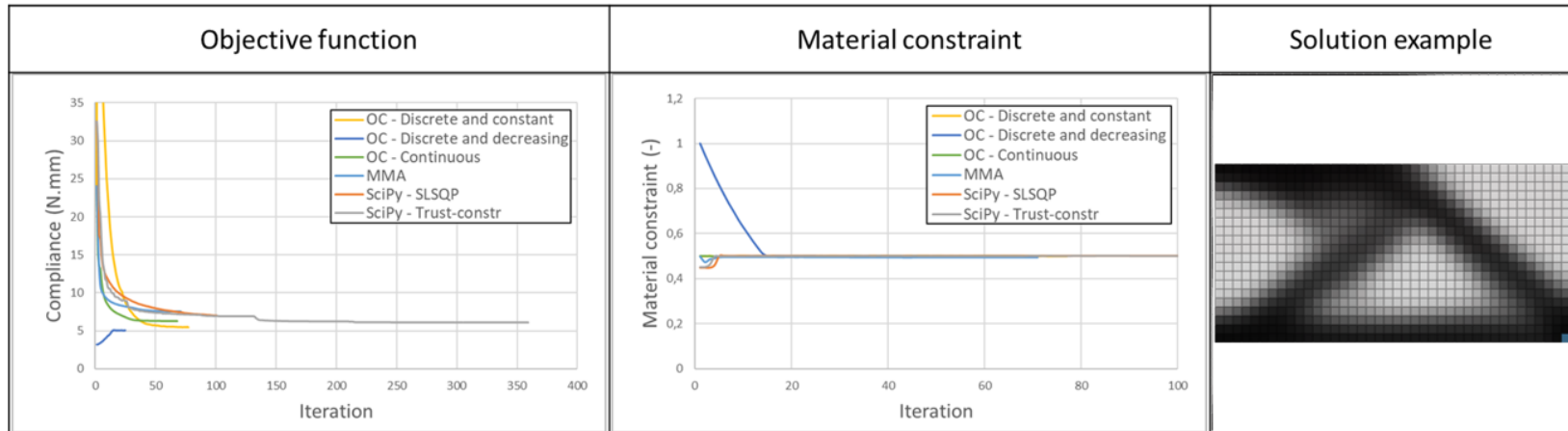
74

- **VIGA EN VOLADIZO Y SOPORTE EN L**
- Los diferentes algoritmos de optimización y enunciados de problemas se probaron utilizando los siguientes dos estudios de caso: haz en voladizo y soporte en L.
- El caso de la viga en voladizo se resolvió considerando la minimización de la flexibilidad.
- El soporte en L considerando todas las declaraciones de problemas implementadas.



Dimensiones y condiciones de contorno de la viga en voladizo (izquierda) y el modelo de soporte en L (derecha).

■ VIGA EN VOLADIZO



Representación gráfica de la función objetivo y restricción de volumen obtenida para la minimización del cumplimiento de la viga en voladizo. La geometría mostrada representa la solución final obtenida por el algoritmo MMA.

CASOS DE ESTUDIO

76

SOPORTE EN L

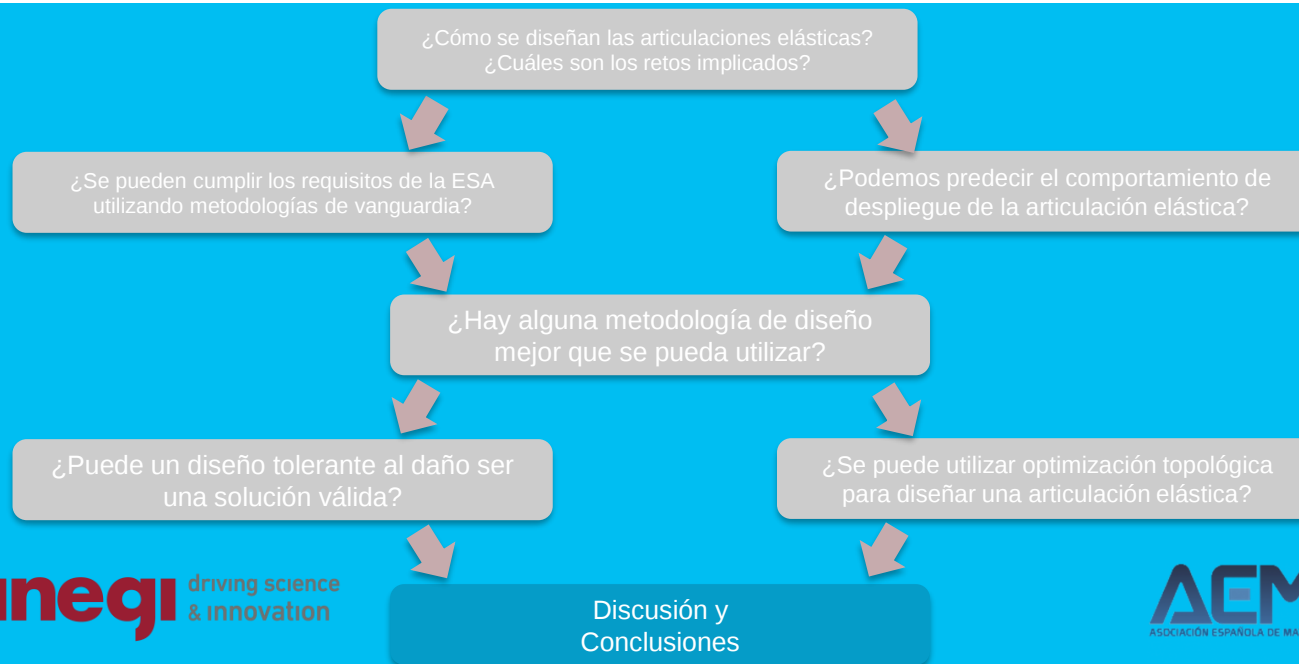
Problem statement	Compliance minimization	Stress constrained compliance minimization	Stress minimization
Objective function			
Solution example	A)	B)	C)

Representación gráfica de la función objetivo y restricción de volumen obtenida para la minimización del cumplimiento de la viga en voladizo. La geometría mostrada representa la solución final obtenida por el algoritmo MMA.

- **LA PRESENTE INVESTIGACIÓN FUE PUBLICADA EN UNA REVISTA CIENTÍFICA REVISADA POR PARES:**
 - P. Fernandes, A. Ferrer, P. Gonçalves, M. Parente, R. Pinto, N. Correia. Stress constrained topology optimization for commercial software: a Python implementation for ABAQUS®. (**Submitted to the Journal of Computational and Materials Science, Elsevier**).
 - **Mendeley dataset:** será publicado con el artículo.
- El trabajo aquí desarrollado contribuye a una mayor investigación en el campo de la optimización de la topología mediante:
 - **Proporcionar un código de fuente abierta** con la implementación de métodos de vanguardia;
 - Permitir el uso de la optimización de la **topología de dominios de diseño complejos**;
 - Permitiendo la exploración y prueba de **diferentes algoritmos de optimización**.



- El problema actual de **diseño de articulación elástica puede aproximarse como el problema de optimización topológica** de minimización de cumplimiento restringido por estrés.
- **Se implementó y validó un código de optimización de topología, compatible con ABAQUS.** El código proporciona las herramientas necesarias para realizar la optimización de topología basada en estrés en problemas 2D y 3D.
- Si no se consideran aproximaciones, el **diseño de una bisagra elástica a través de optimización topológica requiere un mayor desarrollo** del estado del arte, considerando casos de carga variable.



8.

Discusión, conclusiones y trabajo futuro

SOBRE EL DISEÑO DE ARTICULACIONES ELÁSTICAS COMPUESTAS 81

- **El diseño de las articulaciones elásticas plantea dos desafíos principales:** equilibrar los requisitos de flexibilidad y rigidez, y tener en cuenta la influencia de la relajación del material durante el despliegue.
- Considerando el estudio de caso explorado en esta investigación, sólo **el primer desafío no fue superado con las metodologías descritas en la literatura.**
- **Un posible punto de mejora identificado es la reformulación de las variables de diseño**, lo que lleva a un espacio de diseño mayor. Esta observación lleva a la hipótesis del uso de optimización topológica en el proceso de diseño.
- **Se propone una crítica con respecto a los requisitos de diseño**, cuestionando la necesidad de restringir el funcionamiento de la articulación elástica al régimen elástico del material compuesto. Esta observación lleva a la hipótesis de utilizar un diseño de bisagra elástica tolerante al daño.

SOBRE EL USO DE UN DISEÑO DE ARTICULACIÓN ELÁSTICA TOLERANTE AL DAÑO

82

- En igualdad de condiciones, **se utilizó un algoritmo de optimización para diseñar dos articulaciones elásticas:** una convencional y otra tolerante al daño.
- **El diseño de articulación elástica tolerante al daño tenía un rendimiento superior** en términos de la primera frecuencia natural de vibración.
- **El rendimiento** de los diseños de articulaciones elásticas convencionales y tolerantes al daño **sería igual si el daño afectara a todo el material con un $\geq$ máximo de 0,91.**
- El uso de un **diseño tolerante a los daños requiere más investigación y consideraciones particulares**, como tener en cuenta la posible liberación de desechos.

SOBRE EL USO DE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA PARA DISEÑAR ARTICULACIONES ELÁSTICAS

83

- **El problema actual de diseño de articulación elástica puede aproximarse como el problema de optimización topológica** de minimización de flexibilidad restringido por estrés.
- Si no se consideran aproximaciones, **el diseño de una articulación elástica a través de la optimización de la topología requiere un mayor desarrollo** del estado del arte, que incluye:
 - La consideración de casos de carga variable;
 - La consideración de los elementos de *shell*.

- **La investigación desarrollada con esta tesis se centró en el diseño de estructuras desplegables compuestas, llegando a las siguientes conclusiones y objetivos principales:**
- La caracterización de materiales del sistema compuesto AS4/8552;
- La validación de modelos numéricos, capaces de simular el funcionamiento de una estructura desplegable compuesta, a través de la correlación de los datos de deformación observados en la FEA y las pruebas experimentales;
- Se examinaron las metodologías de diseño adoptadas para el desarrollo de estructuras desplegables, lo que llevó a la propuesta de un enfoque de diseño tolerante a los daños;
- La evaluación del enfoque de diseño tolerante a los daños, comparándolo con las metodologías más avanzadas;
- La optimización de la topología de una estructura desplegable mediante el uso de un algoritmo genético;
- La implementación de un código de optimización de topología, escrito en Python, adecuado para problemas 2D y 3D.

- **No obstante, la optimización topológica de las estructuras desplegadas es un proceso complejo que requiere un mayor desarrollo y maduración. Para ello, hay dos vías principales de investigación que deben explorarse en futuras investigaciones:**
- La validación del enfoque de diseño tolerante al daño propuesto a través de extensas pruebas experimentales, analizando la influencia de la iniciación y propagación del daño en el rendimiento de la estructura desplegable;
- La implementación de un proceso de optimización de topología compatible con el uso de elementos *shelly* con el uso de modelos impulsados por desplazamiento.

9.

Agradecimientos

AGRADECIMIENTOS

87

- **Pedro Fernandes agradece lo siguiente:**
- El apoyo financiero de **FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P.**, en el marco de la **beca de doctorado SFRH/BD/145425/2019**;
- **Proyecto COMETH - Antenna Deployment Arm with Integrated Elastic Hinges**, financiado por el **Programa ARTES de la ESA**;

**MUCHAS
GRACIAS**



CONTACTOS



89

Email directo: pnfernandes@inegi.up.pt

Email Institucional: inegi@inegi.up.pt

Teléfono: +351 229 578 710

Website: inegi.pt/en/

Ubicación: Campus da FEUP, Rua Dr. Roberto Frias,
400, 4200-465 Porto