Escola Politécnica de Enxeñaría de Ferrol
UNIVERSIDADE DA CORUÑA

TRABAJO FIN DE MÁSTER CURSO 2024/2025

Caracterización de tacos amortiguadores para su uso en simulación

M. U. en Ingeniería Industrial

AUTOR: Lucía Barreiro Varela
TUTORES: Daniel Dopico Dopico
Álvaro López Varela
Nº DE TRABAJO: 2324_MEI_13

ÍNDICE

1. Objetivos
2. Introducción
3. Desarrollo y resultados
   3.1. Tacos metálicos tipo J
   3.2. Tacos helicoidales
   3.3. Tacos elastoméricos
4. Conclusiones y trabajo futuro

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

OBJETIVOS

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

OBJETIVOS

1. Caracterización mecánica de los distintos tipos de tacos amortiguadores más empleados para la protección frente a eventos de choque en el entorno naval

2. Obtención de los coeficientes de rigidez y amortiguamiento

3. Inclusión de los tacos en la simulación multicuerpo

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

INTRODUCCIÓN

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

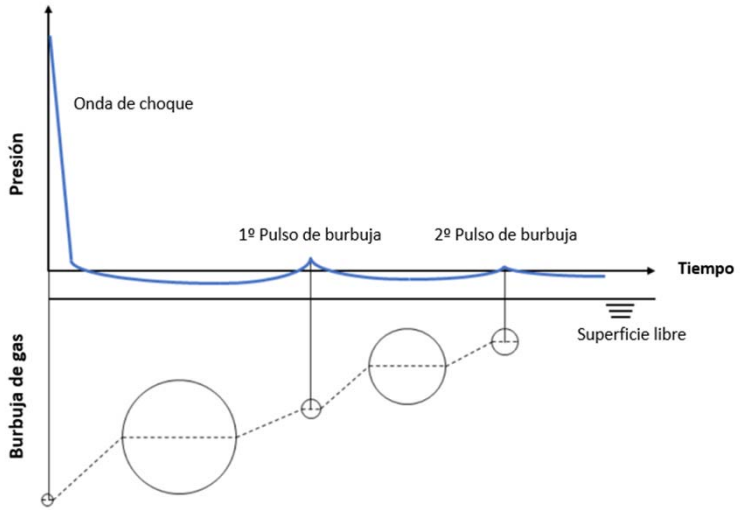
3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

¿Qué es el choque?

Explosión submarina sin contacto directo con el casco del buque



1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

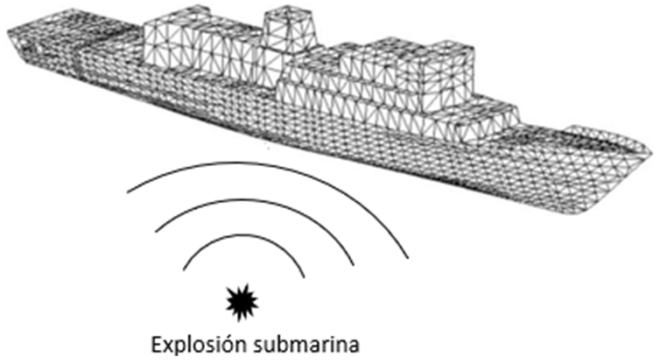
3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

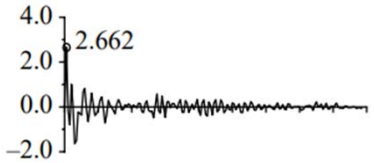
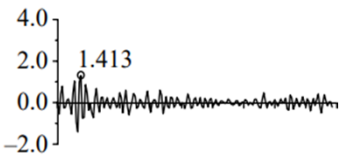
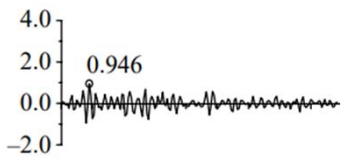
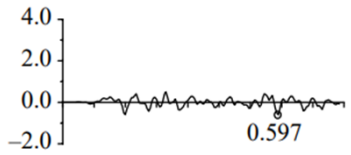
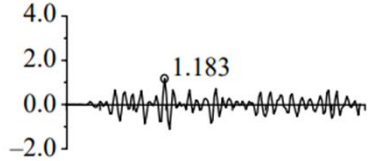
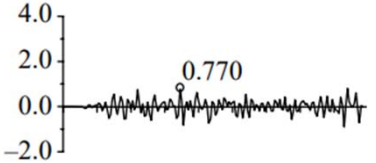
3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

Respuesta del buque a un evento de choque



Aceleración ($x10^3$) [g]

	Dirección vertical	Dirección transversal (estribor-babor)	Dirección longitudinal (proa-popa)
Quilla			
Cubierta superior			

L. Cho-Chung y T. Yuh-Shiou, «Shock responses of a surface ship subjected to noncontact underwater explosions,» Ocean Engineering, vol. 33, nº 5-6, pp. 748-772, 2006

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

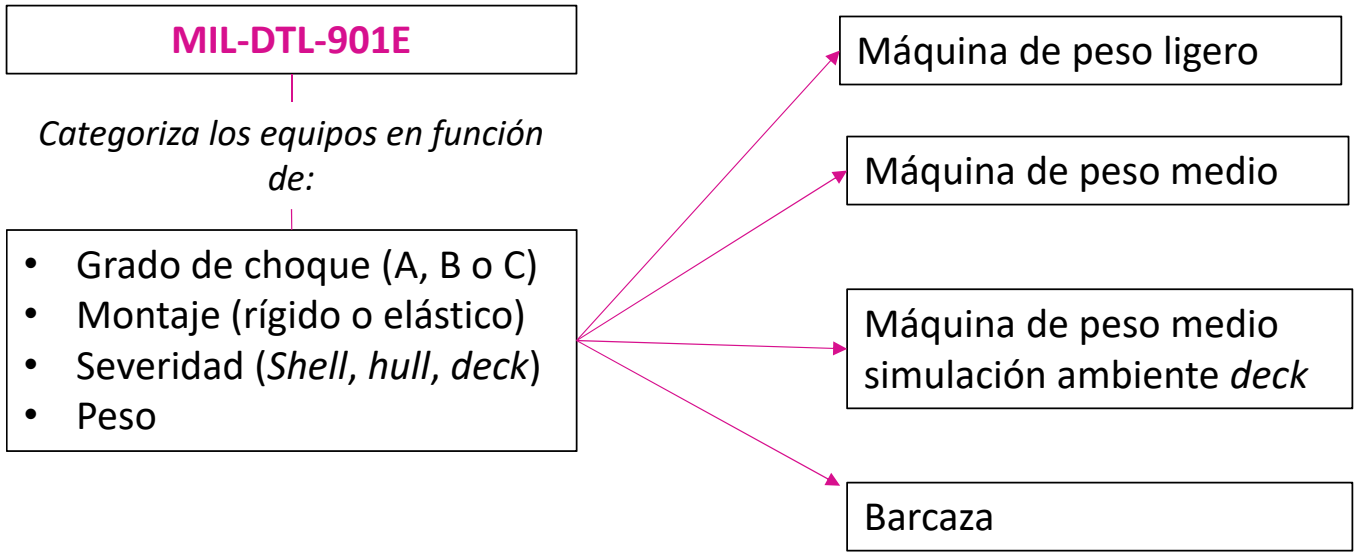
3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

Pruebas de choque

La norma **MIL-DTL-901E** establece los requisitos para las pruebas de choque de equipos y sistemas instalados en buques militares, con el objetivo de asegurar que estos puedan resistir las condiciones de una explosión submarina sin contacto directo, evitando que la operación del buque se vea comprometida.



Tacos amortiguadores

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

Tacos metálicos tipo J

Tacos helicoidales de cable metálico

Tacos elastoméricos

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

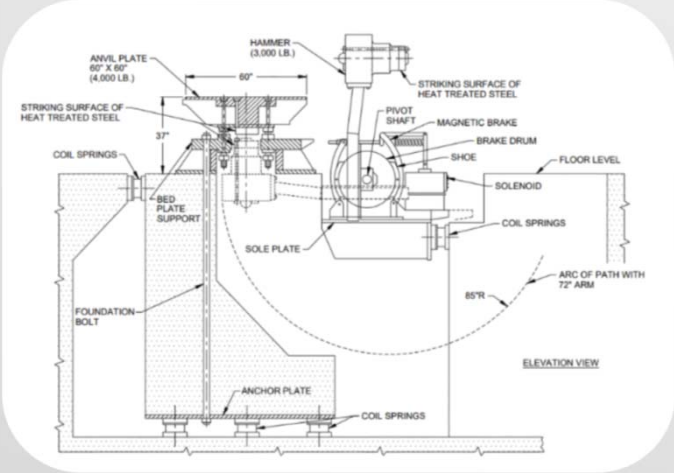
3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

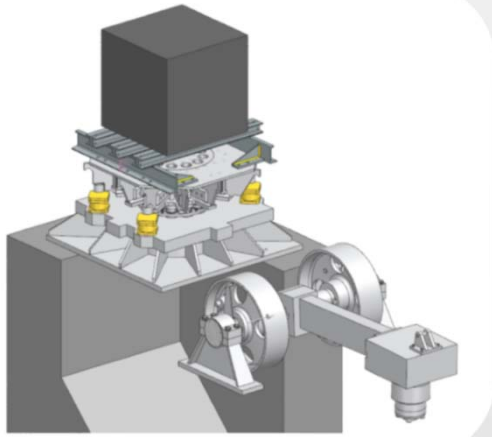
Simulación de pruebas de choque

Máquina de choque de peso medio

Esquema "MWSM"



Modelo de simulación "MWSM"



La norma MIL-DTL- 901E especifica que los equipos se deben probar con los tacos amortiguadores

Caracterización de los tacos

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

DESARROLLO Y RESULTADOS

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

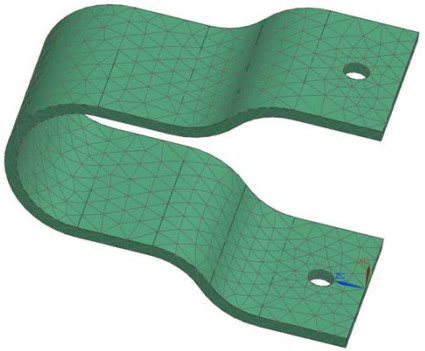
3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

DESARROLLO Y RESULTADOS

TACOS J

Modelo FEM → Cálculo matriz de rigidez → Análisis dinámico → Simulación multicuerpo → Optimización de parámetros



Cálculo de la matriz de rigidez

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

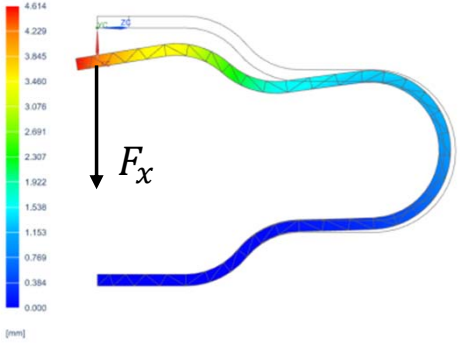
3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

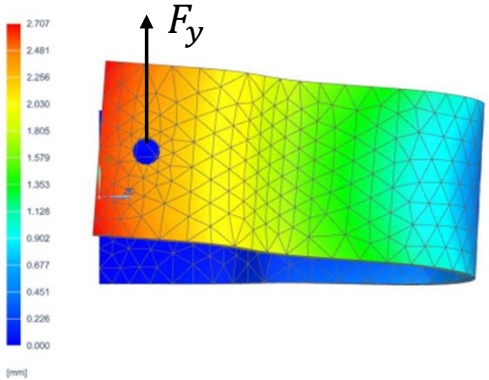
4. Conclusiones y trabajo futuro

$$\mathbf{F} = -\mathbf{K} \cdot \boldsymbol{\delta} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix}$$

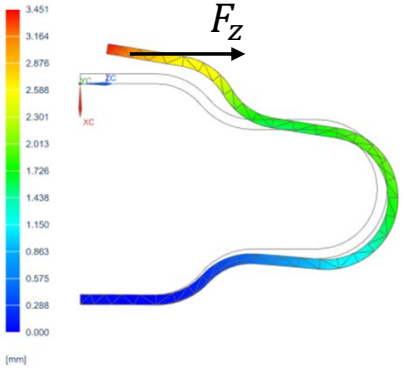
Caso de carga 1:



Caso de carga 2:



Caso de carga 3:



$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 149{,}131 & 0 & 130{,}759 \\ -0{,}002 & 103{,}348 & -0{,}0119 \\ 130{,}759 & 0 & 224{,}252 \end{bmatrix} [N/mm]$$

Análisis dinámico

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

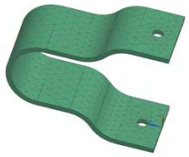
3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

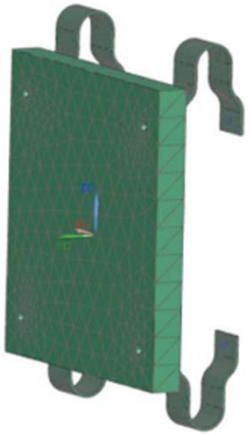
3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

Modelo FEM del modelo del taco seleccionado

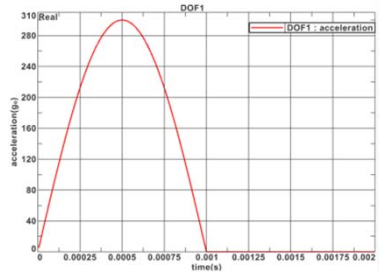


Montaje representativo tacos J



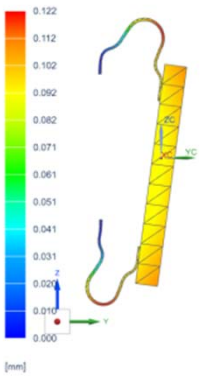
Input de choque

Pulso semi-sinusoidal de 300 g de 2 ms de período



Parámetros de amortiguamiento viscoso (W_3 y W_4)

Modo 1 → 17,30 Hz



Amortiguamiento estructural (G)

Resultados análisis dinámico

1. Objetivos

2. Introducción

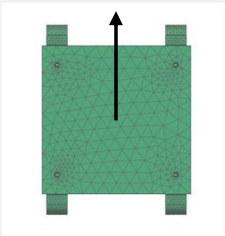
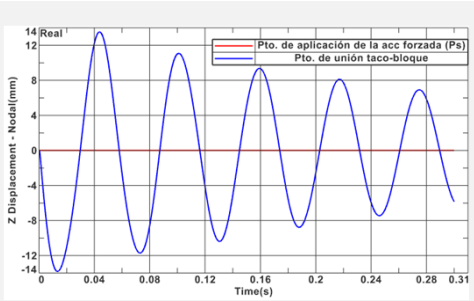
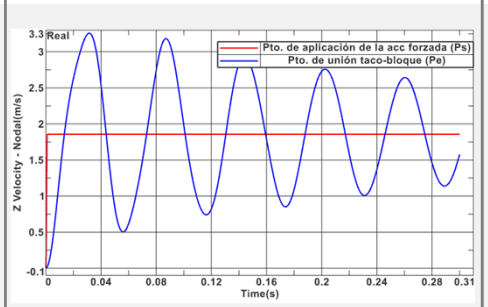
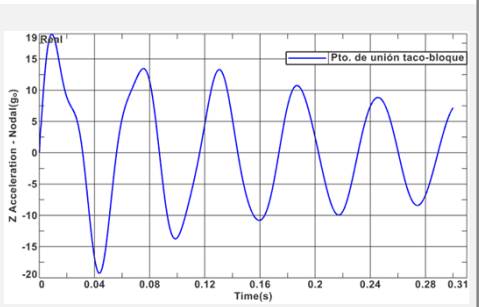
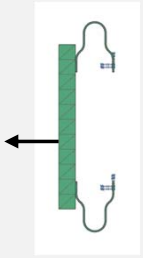
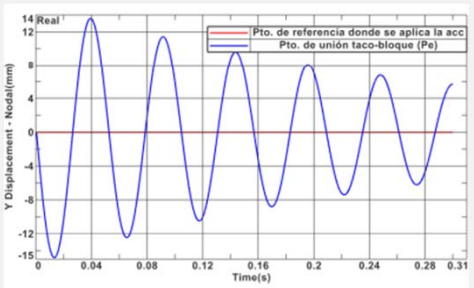
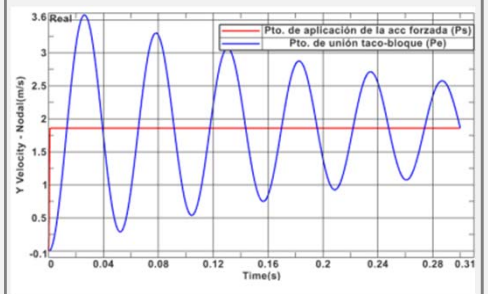
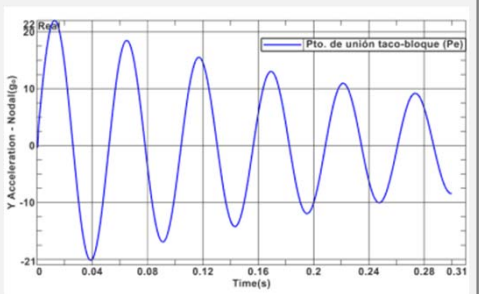
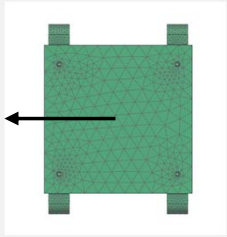
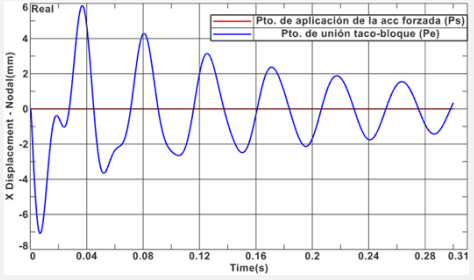
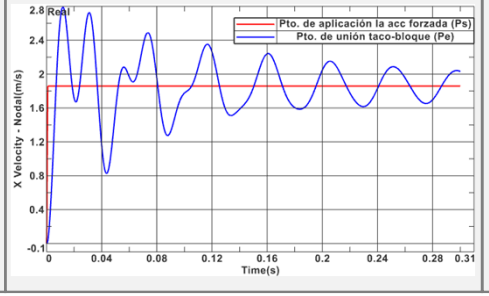
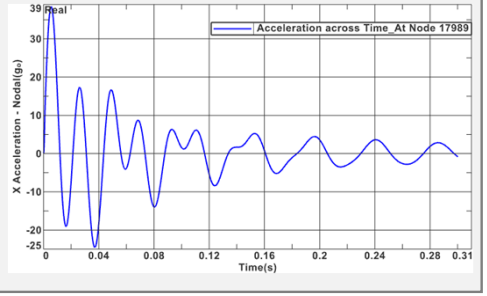
3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

	Posición [mm]	Velocidad [m/s]	Aceleración [g]
Choque vertical 			
Choque transversal 			
Choque longitudinal 			

Simulación modelo multicuerpo

1. Objetivos

2. Introducción

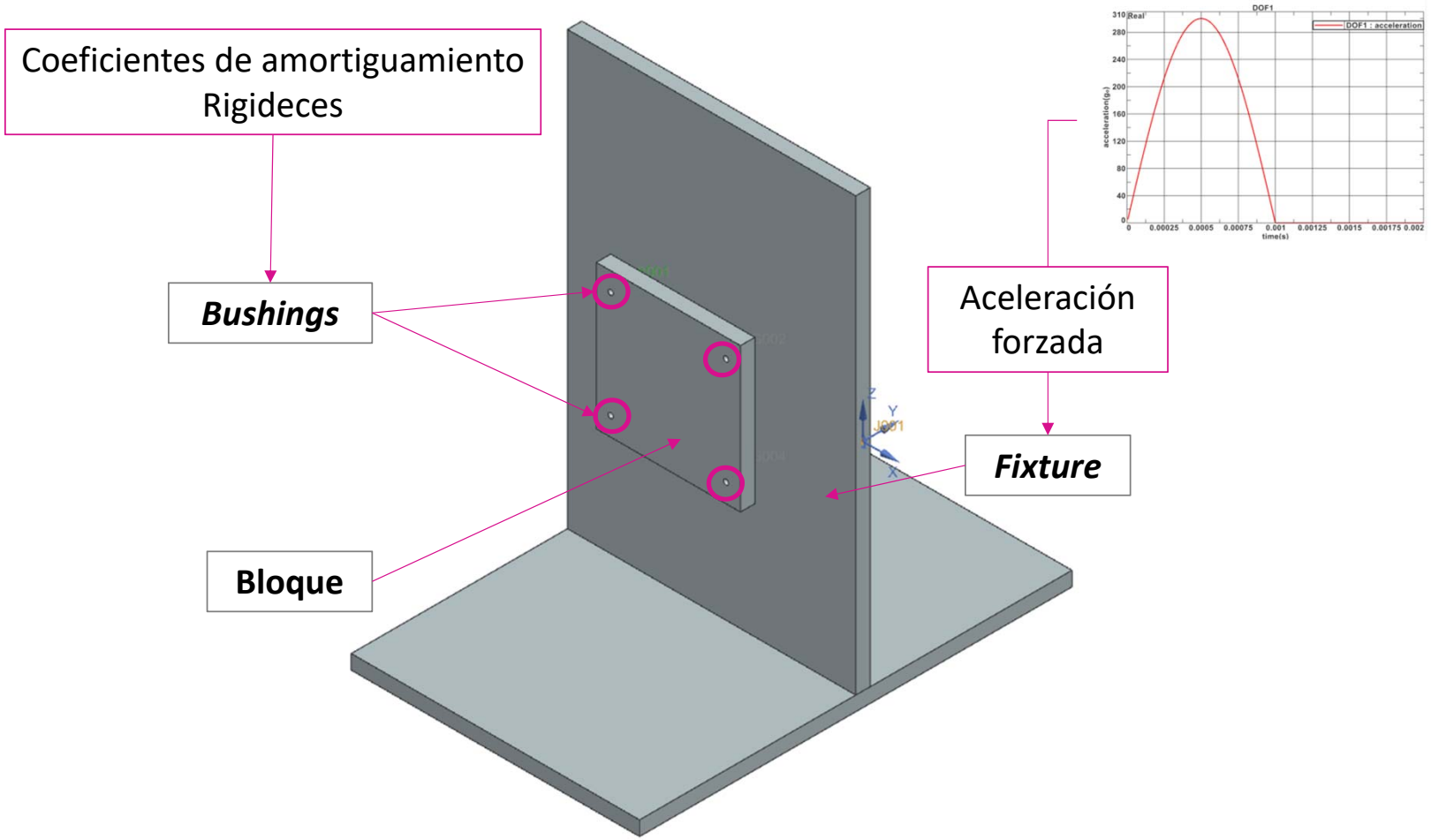
3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro



1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

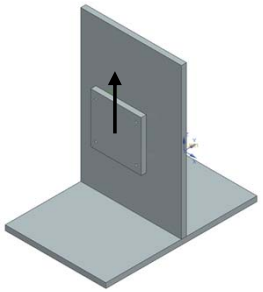
3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

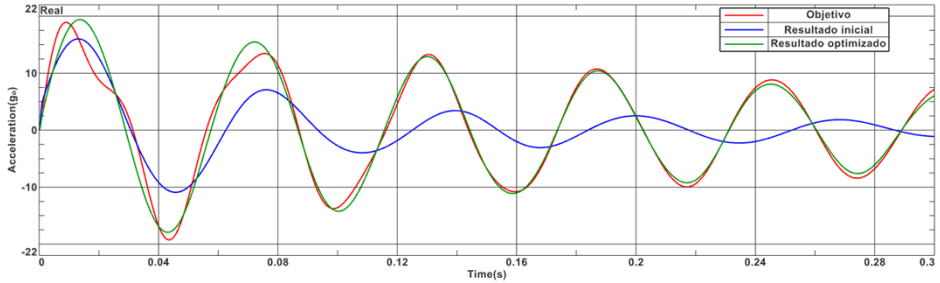
4. Conclusiones y trabajo futuro

Optimización

Choque vertical



Aceleración en la dirección vertical [g]



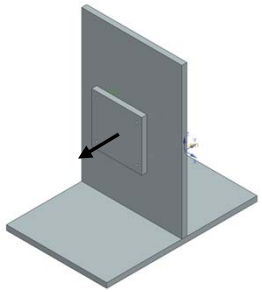
Solución optimizada

$$b_z = 0{,}1845\,\frac{N \cdot s}{mm}$$

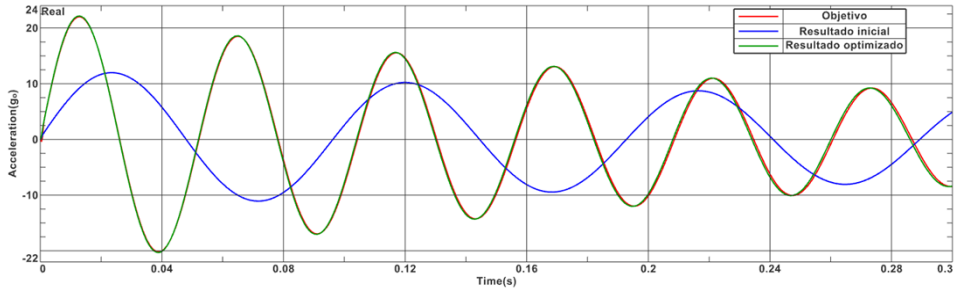
$$k_z = 289{,}8\,\frac{N}{mm}$$

$$k_{\theta x} = 483500\,\frac{N \cdot mm}{º}$$

Choque transversal



Aceleración en la dirección transversal [g]

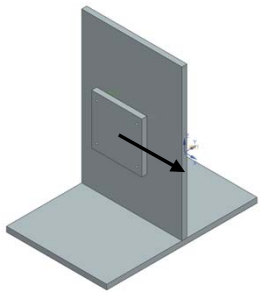


Solución optimizada

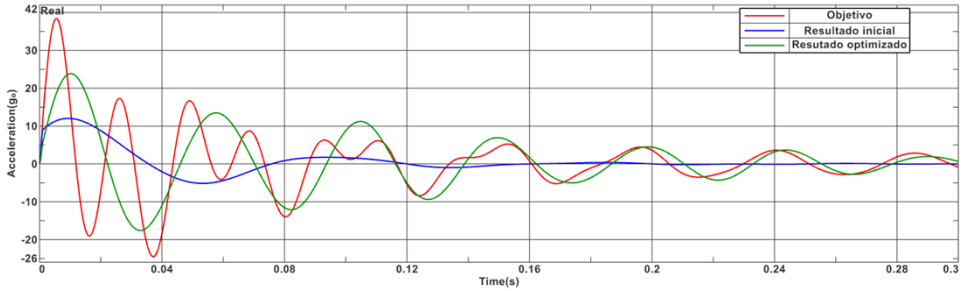
$$b_y = 0{,}164\,\frac{N \cdot s}{mm}$$

$$k_y = 356\,\frac{N}{mm}$$

Choque longitudinal



Aceleración en la dirección longitudinal[g]



Solución optimizada

$$b_x = 0{,}433\,\frac{N \cdot s}{mm}$$

$$k_x = 460{,}1\,\frac{N}{mm}$$

$$k_{\theta z} = 52000\,\frac{N \cdot mm}{º}$$

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

DESARROLLO Y RESULTADOS

TACOS HELICOIDALES

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

DESARROLLO Y RESULTADOS

TACOS HELICOIDALES

Información fabricantes → Cálculo coeficiente de amortiguación → Simulación multicuerpo

Información disponible

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

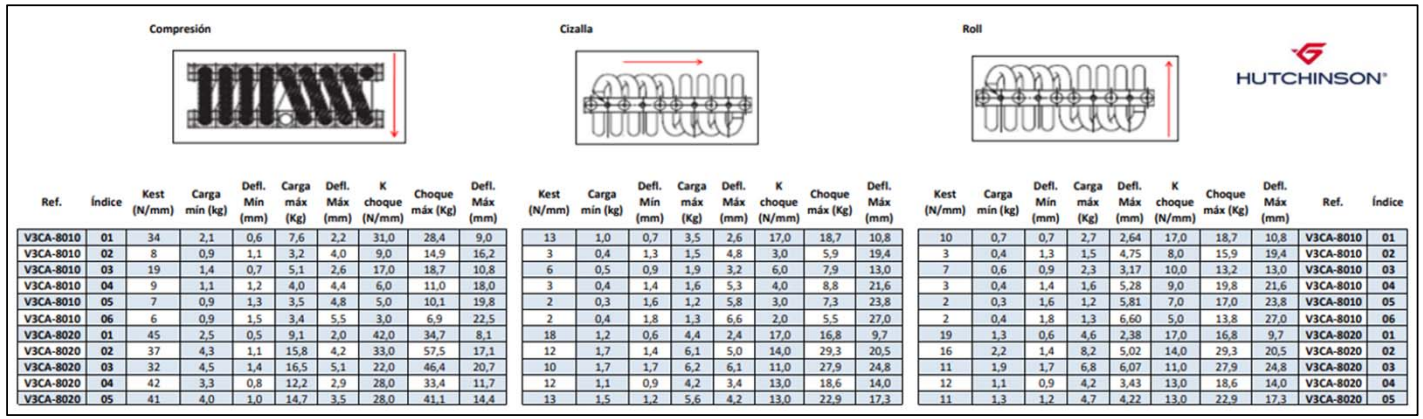
3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

Rigideces promedio de choque



Ref.	Índice	Kest (N/mm)	Carga mín (kg)	Defl. Mín (mm)	Carga máx (Kg)	Defl. Máx (mm)	K choque (N/mm)	Choque máx (Kg)	Defl. Máx (mm)
V3CA-8010	01	34	2,1	0,6	7,6	2,2	31,0	28,4	9,0
V3CA-8010	02	8	0,9	1,1	3,2	4,0	9,0	14,9	16,2
V3CA-8010	03	19	1,4	0,7	5,1	2,6	17,0	18,7	10,8
V3CA-8010	04	9	1,1	1,2	4,0	4,4	6,0	11,0	18,0
V3CA-8010	05	7	0,9	1,3	3,5	4,8	5,0	10,1	19,8
V3CA-8010	06	6	0,9	1,5	3,4	5,5	3,0	6,9	22,5
V3CA-8020	01	45	2,5	0,5	9,1	2,0	42,0	34,7	8,1
V3CA-8020	02	37	4,3	1,1	15,8	4,2	33,0	57,5	17,1
V3CA-8020	03	32	4,5	1,4	16,5	5,1	22,0	46,4	20,7
V3CA-8020	04	42	3,3	0,8	12,2	2,9	28,0	33,4	11,7
V3CA-8020	05	41	4,0	1,0	14,7	3,5	28,0	41,1	14,4

Kest (N/mm)	Carga mín (kg)	Defl. Mín (mm)	Carga máx (Kg)	Defl. Máx (mm)	K choque (N/mm)	Choque máx (Kg)	Defl. Máx (mm)
13	1,0	0,7	3,5	2,6	17,0	18,7	10,8
3	0,4	1,3	1,5	4,8	3,0	5,9	19,4
6	0,5	0,9	1,9	3,2	6,0	7,9	13,0
3	0,4	1,4	1,6	5,3	4,0	8,8	21,6
2	0,3	1,6	1,2	5,8	3,0	7,3	23,8
2	0,4	1,8	1,3	6,6	2,0	5,5	27,0
18	1,2	0,6	4,4	2,4	17,0	16,8	9,7
12	1,7	1,4	6,1	5,0	14,0	29,3	20,5
10	1,7	1,7	6,2	6,1	11,0	27,9	24,8
12	1,1	0,9	4,2	3,4	13,0	18,6	14,0
13	1,5	1,2	5,6	4,2	13,0	22,9	17,3

Kest (N/mm)	Carga mín (kg)	Defl. Mín (mm)	Carga máx (Kg)	Defl. Máx (mm)	K choque (N/mm)	Choque máx (Kg)	Defl. Máx (mm)	Ref.	Índice
10	0,7	0,7	2,7	2,64	17,0	18,7	10,8	V3CA-8010	01
3	0,4	1,3	1,5	4,75	8,0	15,9	19,4	V3CA-8010	02
7	0,6	0,9	2,3	3,17	10,0	13,2	13,0	V3CA-8010	03
3	0,4	1,4	1,6	5,28	9,0	19,8	21,6	V3CA-8010	04
2	0,3	1,6	1,2	5,81	7,0	17,0	23,8	V3CA-8010	05
2	0,4	1,8	1,3	6,60	5,0	13,8	27,0	V3CA-8010	06
19	1,3	0,6	4,6	2,38	17,0	16,8	9,7	V3CA-8020	01
16	2,2	1,4	8,2	5,02	14,0	29,3	20,5	V3CA-8020	02
11	1,9	1,7	6,8	6,07	11,0	27,9	24,8	V3CA-8020	03
12	1,1	0,9	4,2	3,43	13,0	18,6	14,0	V3CA-8020	04
11	1,3	1,2	4,7	4,22	13,0	22,9	17,3	V3CA-8020	05

Amortiguamiento relativo

$$\zeta = \frac{b}{b_{cr}}$$

$$b_{cr} = 2\sqrt{k\,m}$$

$$\mathrm{b} = 2\zeta\sqrt{k\,m}$$

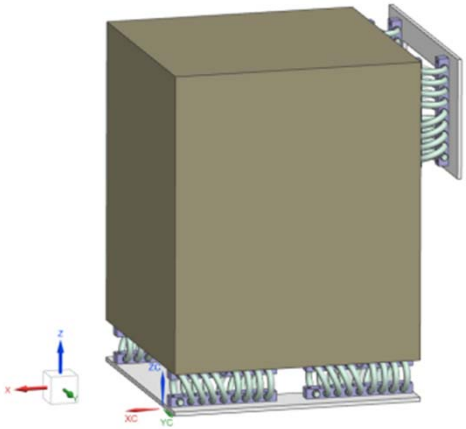
ζ: amortiguamiento. Habitualmente 0,15

b: amortiguamiento

b_{cr}: amortiguamiento crítico

k: rigidez promedio de choque

m: masa del equipo



1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

DESARROLLO Y RESULTADOS

TACOS ELASTOMÉRICOS

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

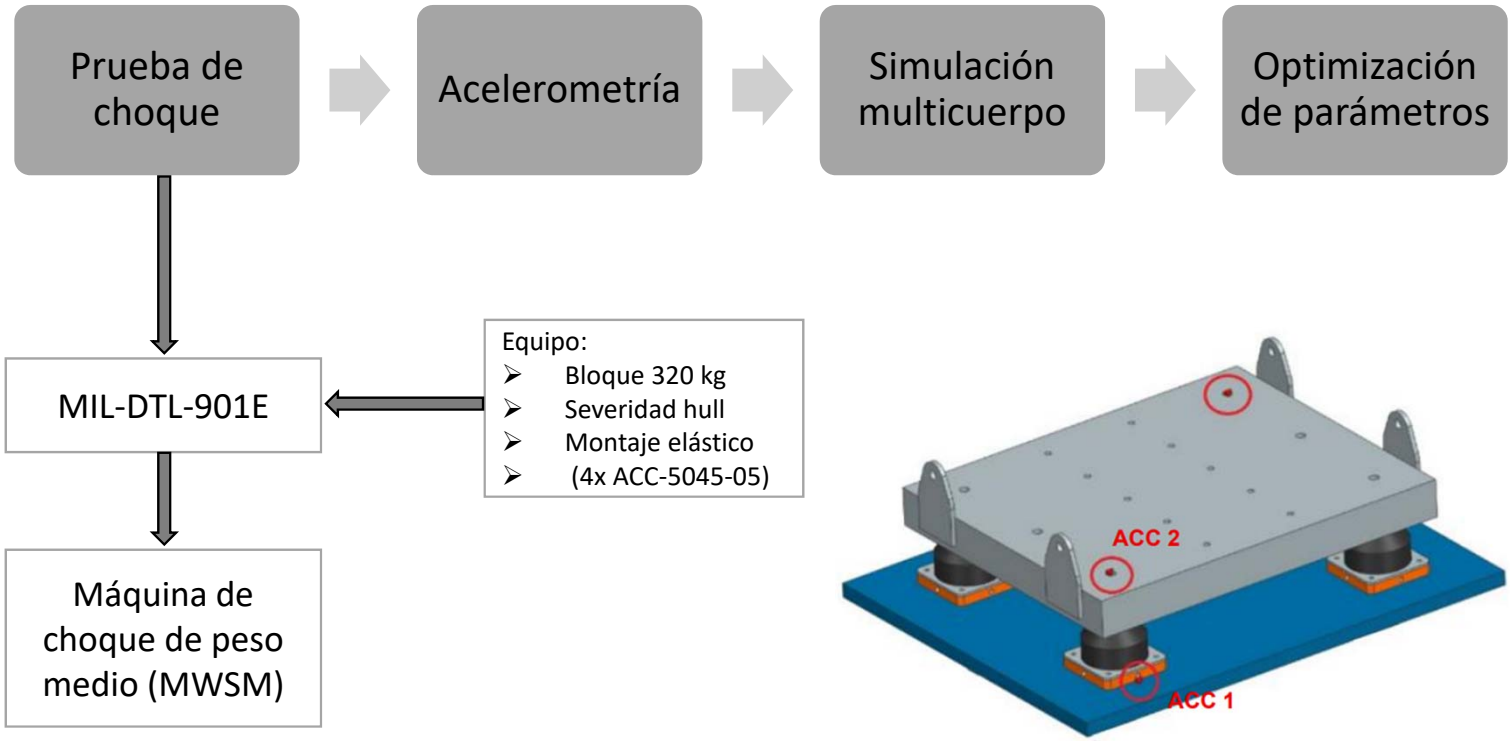
3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

DESARROLLO Y RESULTADOS

TACOS ELASTOMÉRICOS



1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

Ensayo

Montaje horizontal

Montaje inclinado

Simulación modelo multicuerpo

1. Objetivos

2. Introducción

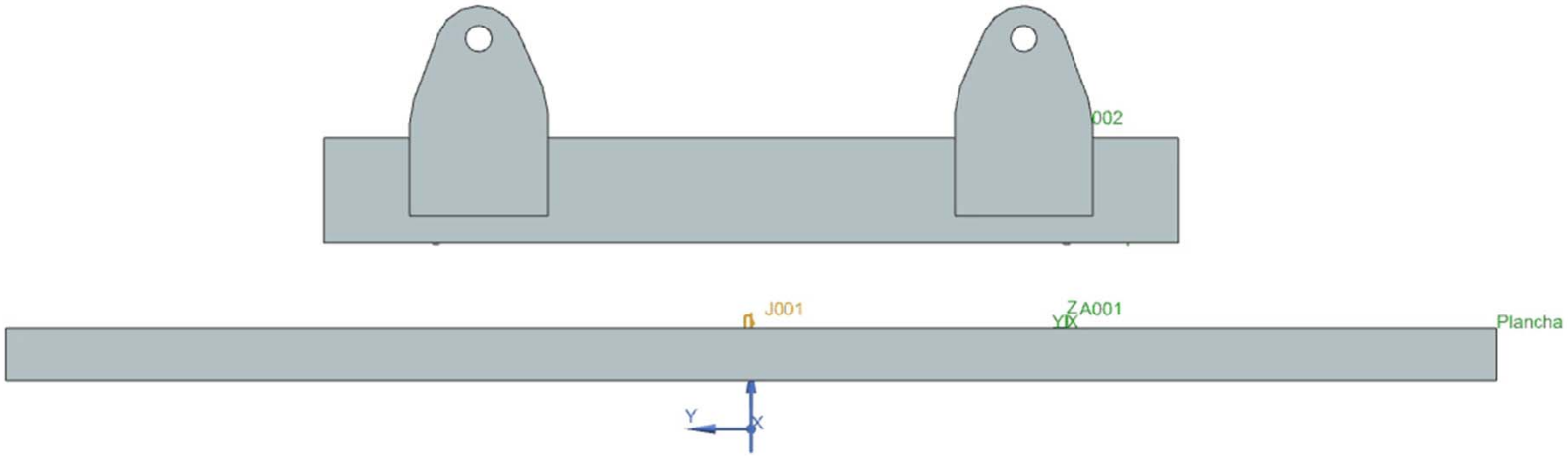
3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro



Optimización

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

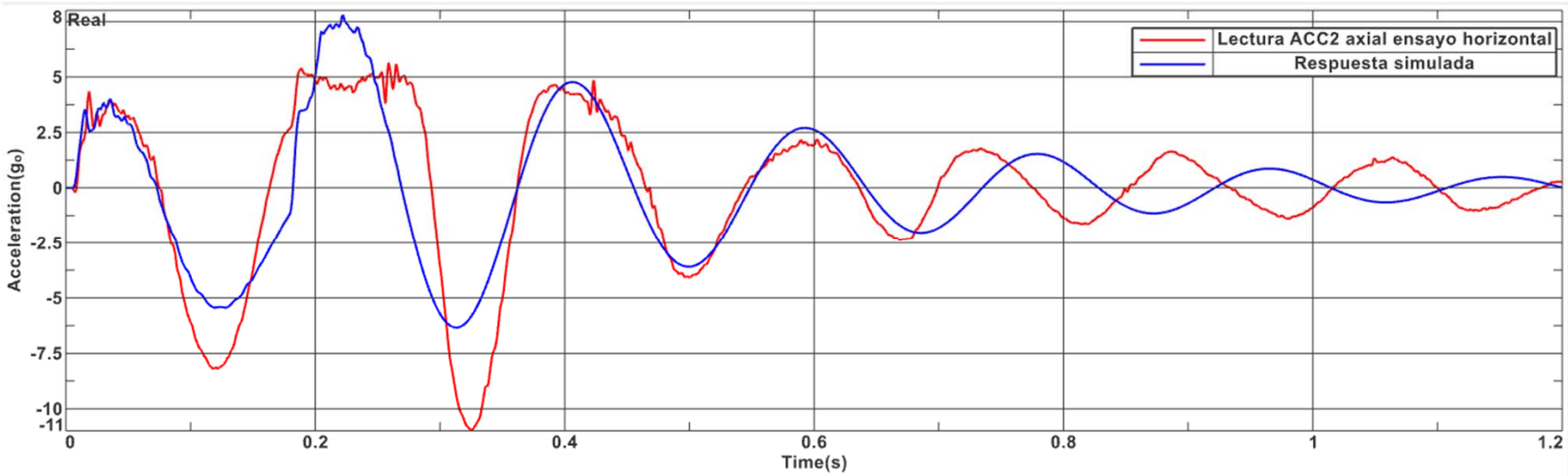
3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

Montaje horizontal ➡

$$b_z = 0{,}5\ \frac{N \cdot s}{mm}$$

$$k_z = 94{,}0\ \frac{N}{mm}$$



Optimización

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

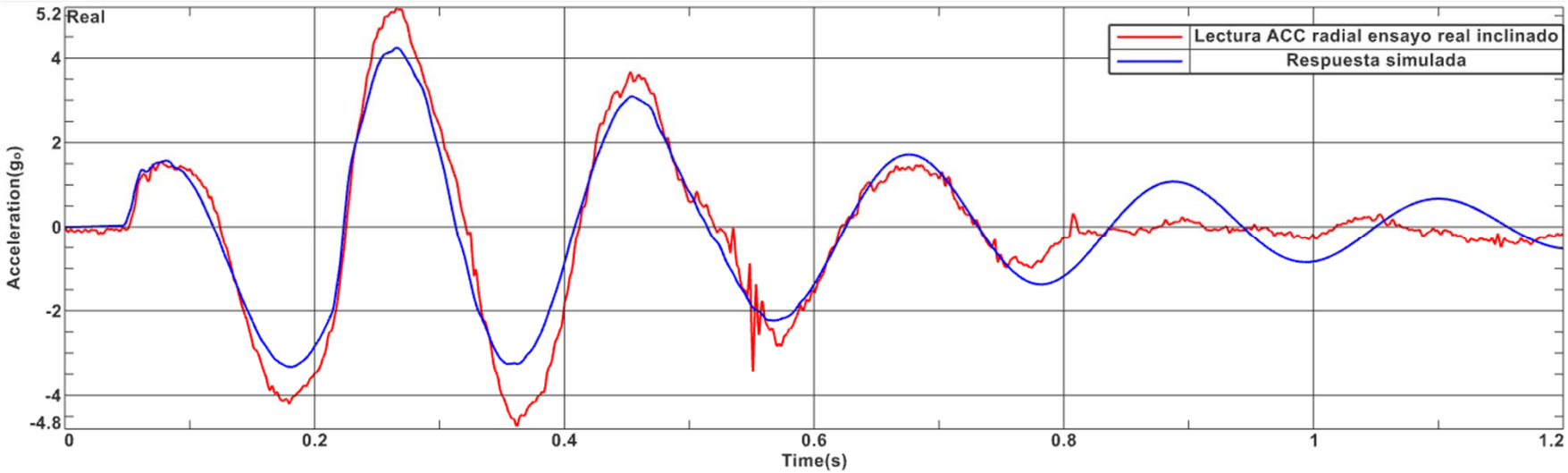
3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

Montaje inclinado →

$$b_{xy} = 0{,}376\ \frac{N \cdot s}{mm}$$

$$k_{xy} = 74{,}0\ \frac{N}{mm}$$



Validación de los resultados

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

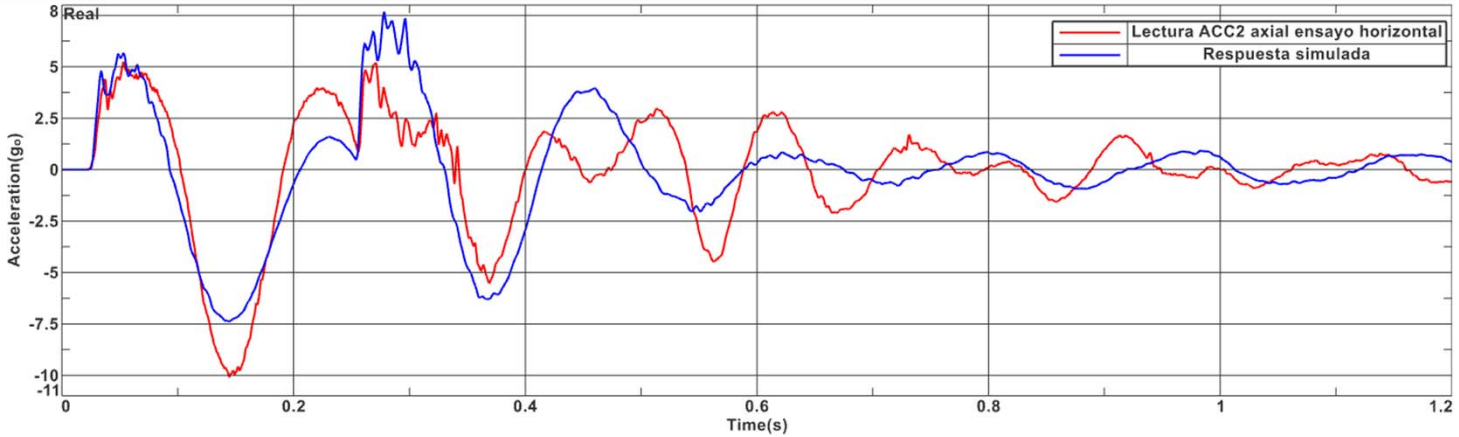
3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

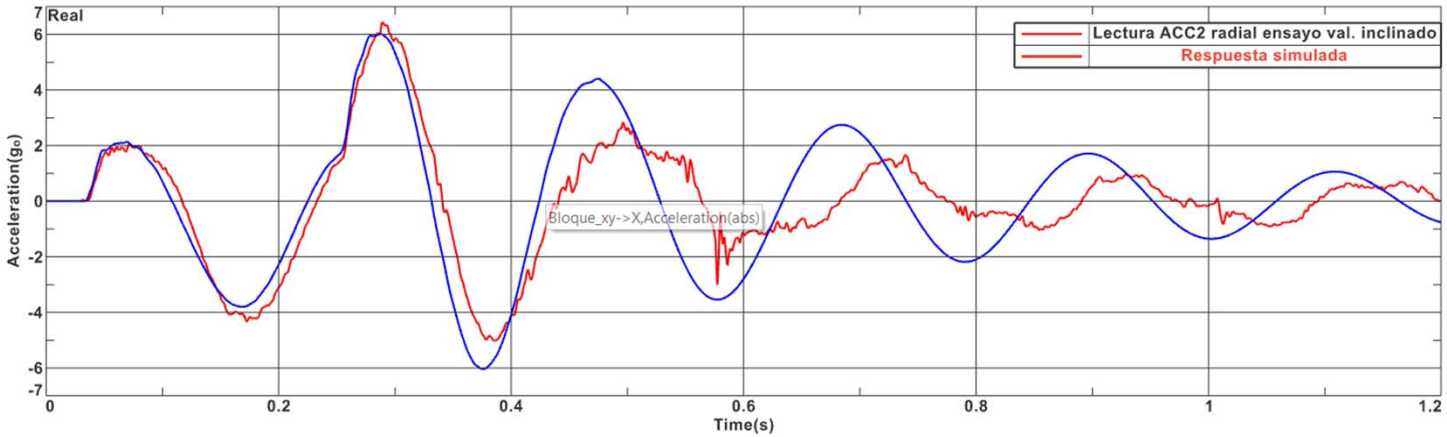
3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

Montaje horizontal



Montaje inclinado



1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

CONCLUSIONES

- ✓ Se ha desarrollado una metodología para la caracterización mecánica de los principales tipos de tacos amortiguadores
- ✓ Se han podido obtener los parámetros de rigidez y amortiguamiento requeridos para su implementación en simulaciones dinámicas multicuerpo
- ✓ Tacos tipo J: se ha demostrado la capacidad del taco para amortiguar las cargas de choque y la posibilidad de obtener una caracterización precisa mediante análisis numérico
- ✓ Tacos helicoidales: los fabricantes proporcionan información suficiente para poder incorporarlos al modelo de simulación multicuerpo
- ✓ Tacos elastoméricos: el modelo resultante es capaz de reproducir de forma satisfactoria la respuesta dinámica del sistema, incluso al someterlo a diferentes severidades de impacto

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

CONCLUSIONES

- ✓ **Se ha desarrollado una metodología para la caracterización mecánica de los principales tipos de tacos amortiguadores**
- ✓ Se han podido obtener los parámetros de rigidez y amortiguamiento requeridos para su implementación en simulaciones dinámicas multicuerpo
- ✓ Tacos tipo J: se ha demostrado la capacidad del taco para amortiguar las cargas de choque y la posibilidad de obtener una caracterización precisa mediante análisis numérico
- ✓ Tacos helicoidales: los fabricantes proporcionan información suficiente para poder incorporarlos al modelo de simulación multicuerpo
- ✓ Tacos elastoméricos: el modelo resultante es capaz de reproducir de forma satisfactoria la respuesta dinámica del sistema, incluso al someterlo a diferentes severidades de impacto

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

CONCLUSIONES

- ✓ Se ha desarrollado una metodología para la caracterización mecánica de los principales tipos de tacos amortiguadores
- ✓ **Se han podido obtener los parámetros de rigidez y amortiguamiento requeridos para su implementación en simulaciones dinámicas multicuerpo**
- ✓ Tacos tipo J: se ha demostrado la capacidad del taco para amortiguar las cargas de choque y la posibilidad de obtener una caracterización precisa mediante análisis numérico
- ✓ Tacos helicoidales: los fabricantes proporcionan información suficiente para poder incorporarlos al modelo de simulación multicuerpo
- ✓ Tacos elastoméricos: el modelo resultante es capaz de reproducir de forma satisfactoria la respuesta dinámica del sistema, incluso al someterlo a diferentes severidades de impacto

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

CONCLUSIONES

- ✓ Se ha desarrollado una metodología para la caracterización mecánica de los principales tipos de tacos amortiguadores
- ✓ Se han podido obtener los parámetros de rigidez y amortiguamiento requeridos para su implementación en simulaciones dinámicas multicuerpo
- ✓ **Tacos tipo J: se ha demostrado la capacidad del taco para amortiguar las cargas de choque y la posibilidad de obtener una caracterización precisa mediante análisis numérico**
- ✓ Tacos helicoidales: los fabricantes proporcionan información suficiente para poder incorporarlos al modelo de simulación multicuerpo
- ✓ Tacos elastoméricos: el modelo resultante es capaz de reproducir de forma satisfactoria la respuesta dinámica del sistema, incluso al someterlo a diferentes severidades de impacto

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

CONCLUSIONES

- ✓ Se ha desarrollado una metodología para la caracterización mecánica de los principales tipos de tacos amortiguadores
- ✓ Se han podido obtener los parámetros de rigidez y amortiguamiento requeridos para su implementación en simulaciones dinámicas multicuerpo
- ✓ Tacos tipo J: se ha demostrado la capacidad del taco para amortiguar las cargas de choque y la posibilidad de obtener una caracterización precisa mediante análisis numérico
- ✓ **Tacos helicoidales: los fabricantes proporcionan información suficiente para poder incorporarlos al modelo de simulación multicuerpo**
- ✓ Tacos elastoméricos: el modelo resultante es capaz de reproducir de forma satisfactoria la respuesta dinámica del sistema, incluso al someterlo a diferentes severidades de impacto

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

CONCLUSIONES

- ✓ Se ha desarrollado una metodología para la caracterización mecánica de los principales tipos de tacos amortiguadores
- ✓ Se han podido obtener los parámetros de rigidez y amortiguamiento requeridos para su implementación en simulaciones dinámicas multicuerpo
- ✓ Tacos tipo J: se ha demostrado la capacidad del taco para amortiguar las cargas de choque y la posibilidad de obtener una caracterización precisa mediante análisis numérico
- ✓ Tacos helicoidales: los fabricantes proporcionan información suficiente para poder incorporarlos al modelo de simulación multicuerpo
- ✓ **Tacos elastoméricos: el modelo resultante es capaz de reproducir de forma satisfactoria la respuesta dinámica del sistema, incluso al someterlo a diferentes severidades de impacto**

1. Objetivos

2. Introducción

3. Desarrollo y resultados

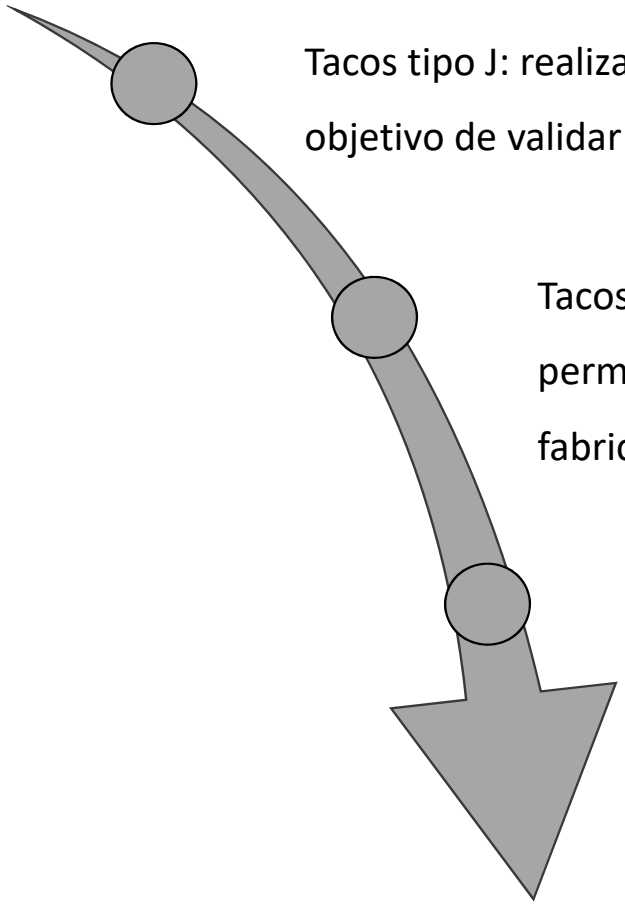
3.1. Tacos J

3.2. Tacos helicoidales

3.3. Tacos elastoméricos

4. Conclusiones y trabajo futuro

TRABAJO FUTURO



Tacos tipo J: realización de ensayos físicos específicos para los tacos tipo J, con el objetivo de validar experimentalmente los modelos desarrollados.

Tacos helicoidales: realización de ensayos de choque reales que permitan contrastar la información proporcionada por los fabricantes y, en su caso, ajustar los parámetros empleados

Tacos elastoméricos: optimizar las propiedades del material elastomérico dentro del modelo 3D

TRABAJO FIN DE MÁSTER CURSO 2024/2025

Caracterización de tacos amortiguadores para su uso en simulación

M. U. en Ingeniería Industrial

Muchas gracias por su atención