



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**Departamento: Economía y Administración de Empresas**

**Área de Conocimiento: Organización de empresas**

# **TRABAJO FIN DE GRADO**

## **SALUD ESTRUCTURAL Y MANTENIMIENTO PREDICTIVO CON COMSOL MULTIPHYSICS**

Grado en Ingeniería de Organización Industrial

Autor: Yaco Galdeano Daverio

Tutor: D. José Pino Díaz

Cotutor: D. Manuel Díaz Rodríguez

MÁLAGA, Junio de 2020



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## **DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD DEL PROYECTO/TRABAJO FIN DE GRADO**

D./ Dña.: Yaco Galdeano Daverio

DNI/Pasaporte: 50323322-N Correo electrónico: gdyaco@gmail.com

Titulación: Ingeniería de Organización Industrial

Título del Proyecto/Trabajo: SALUD ESTRUCTURAL Y MANTENIMIENTO  
PREDICTIVO CON COMSOL MULTIPHYSICS

### **DECLARA BAJO SU RESPONSABILIDAD**

Ser autor del texto entregado y que no ha sido presentado con anterioridad, ni total ni parcialmente, para superar materias previamente cursadas en esta u otras titulaciones de la Universidad de Málaga o cualquier otra institución de educación superior u otro tipo de fin.

Así mismo, declara no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual, así como que las fuentes utilizadas han sido citadas adecuadamente.

En Málaga, a 15 de Junio de 2020

Fdo.: .....



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## Resumen

En este trabajo fin de grado se presentan diferentes análisis de detección de daños, se detalla cuáles son los parámetros más comúnmente utilizados en el campo conocido como salud estructural y en el mantenimiento predictivo.

Se ha realizado dos simulaciones de estructuras civiles, para facilitar la obtención de datos necesarios para la creación de un algoritmo predictivo que será llevado a cabo por la Universidad de Málaga.

Se detalla los beneficios que adquiere la industria al realizar simulaciones por el método de elementos finitos, y al hacer uso de las ciencias de datos.

**Palabras clave:** Simulación, FEM, métodos numéricos, algoritmo, mantenimiento predictivo, salud estructural, COMSOL Multiphysics.

## Abstract

This final thesis of bachelor degree includes different analysis of damage detection, and it explains in detail which are the most common used in the field known as structural health and in the predictive maintenance.

Two structural simulations have been carried out, to obtain the necessary data for the creation of a predictive algorithm which will be achieved by the University of Malaga.

It is studied in detail the benefits of the industry with the simulations by the method of finite elements, and using the science of data such as the predictive maintenance.

**Key words:** Simulation, FEM, numerical methods, algorithm, predictive maintenance, structural health, COMSOL multi physics.



### ***Agradecimientos.***

*Qué poca gratitud lograré expresar en este apartado, que intenta resumir el reconocimiento y respeto que he encontrado y recibido en estos años de carrera universitaria. Finaliza un periodo de descubrimientos.*

*Las dos primeras palabras que se escribieron en este documento borrador, fueron: “para Gloria”, un sencillo impulso que sirvió de motivación para realizar este trabajo fin de grado y un sinfín de metas más. Enormemente agradecido a Gloria Inés Daverio de Oro, mi madre. También agradecerles a mis hermanas Axe y Xelú.*

*No me puedo olvidar de amigos y compañeros que han formado parte de esta etapa. Con especial hincapié en Javier Hernández Teruelo, un gran amigo que une el norte con el sur de España de por vida. A Fernando Esquete, recordarle que con un apoyo se mueve le mundo. Agradecer a Beatriz Jimenez Yago por su felicidad. A Lucía Dionisio Barrantes, siempre amiga y compañera. Y a mi gran amigo y compañero de estudios y proyectos Mattia Bessana.*

*Para finalizar, agradecer a todos los profesores que pusieron el peldaño adecuado para formarme como Ingeniero de Organización Industrial. Agradezco a mi tutor José Pino Díaz y al equipo de investigación de la universidad de Málaga, Manuel Díaz y Daniel R. Torres, por el apoyo y pautas aportadas.*



<b>I. Índice de tablas</b> .....	8
<b>II. Índice de Imágenes</b> .....	8
<b>III. Índice de Figuras</b> .....	9
<b>1. Introducción</b> .....	12
<b>1.1. Contexto</b> .....	12
<b>1.2. Motivación</b> .....	13
<b>1.3. Antecedentes.</b> .....	15
<b>2. Objeto y alcance</b> .....	16
<b>2.1. Objeto</b> .....	16
<b>2.2. Alcance</b> .....	16
<b>3. Marco Teórico</b> .....	17
<b>3.1. Monitoreo Estructural</b> .....	17
<b>3.1.1. Análisis de formas de deflexión operacional.</b> .....	18
<b>3.1.2. Análisis modal clásico</b> .....	19
<b>3.1.3. Ensayos de vibración en tierra</b> .....	19
<b>3.1.4. Análisis modal operacional</b> .....	20
<b>3.1.5. Salud estructural</b> .....	21
<b>3.1.5.1. Sensores y Parámetros SHM</b> .....	22
<b>3.1.5.2. Detección y Localización de daños</b> .....	26
<b>3.2. Dinámica Estructural.</b> .....	28
<b>3.3. Simulación Numérica por el Método de Elementos Finitos.</b> .....	33
<b>4. Metodología</b> .....	36
<b>5. Software Comsol Multiphysics.</b> .....	37
<b>5.1. Breve manual de COMSOL Multiphysics</b> .....	37
<b>6. Simulaciones.</b> .....	41



<b>6.1. Simulación Puente.....</b>	<b>41</b>
<b>6.1.1. Dimensiones.....</b>	<b>42</b>
<b>6.1.2. Materiales .....</b>	<b>43</b>
<b>6.1.3. Físicas, Cargas y Restricciones.....</b>	<b>45</b>
6.1.3.1. Cáscara (Shell) .....	45
6.1.3.2. Vigas (Celosía).....	48
<b>6.1.4. Multifísica.....</b>	<b>57</b>
<b>6.1.5. Mallado.....</b>	<b>58</b>
<b>6.1.6. Estudio de frecuencias propias.....</b>	<b>59</b>
6.1.6.1. Datos obtenidos del estudio Frecuencias Propias.	61
<b>6.1.7. Estudio en estado estacionario. ....</b>	<b>66</b>
6.1.7.1. Datos obtenidos del estudio estacionario. ....	68
<b>6.1.8. Acceso al informe generado por COMSOL     Multiphysics.....</b>	<b>69</b>
<b>6.2. Simulación Viga.....</b>	<b>69</b>
<b>6.2.1. Dimensiones, Funciones y Parámetros .....</b>	<b>70</b>
<b>6.2.2. Materiales. ....</b>	<b>71</b>
<b>6.2.3. Física, Cargas y Restricciones. ....</b>	<b>72</b>
<b>6.2.4. Estudio en el dominio del tiempo.....</b>	<b>72</b>
6.2.4.1. Obtención de Datos. ....	73
<b>6.2.5. Acceso al informe generado por COMSOL     Multiphysics.....</b>	<b>74</b>
<b>7. Aplicación Industrial.....</b>	<b>74</b>
<b>8. Conclusiones. ....</b>	<b>76</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>79</b>





<b>Anexo I: Reporte de la Simulación Puente Generado por COMSOL.....</b>	<b>84</b>
<b>Anexo II: Reporte de la Simulación Viga Generado por COMSOL.....</b>	<b>84</b>

## I. Índice de tablas

<b>Tabla I.</b> Diferencias clave entre redes de sensores cableadas y redes de sensores inalámbricos para SHM. [1].....	<b>22</b>
<b>Tabla II.</b> Métodos de detección de daños. [1].....	<b>27</b>
<b>Tabla III.</b> Parámetros globales.....	<b>42</b>
<b>Tabla IV.</b> Propiedades Acero estructural.....	<b>44</b>
<b>Tabla V.</b> Propiedades Hormigón. ....	<b>44</b>
<b>Tabla VI.</b> Ecuaciones de material tipo “Shell” elástico lineal [26] ...	<b>45</b>
<b>Tabla VII.</b> Ecuaciones de material tipo Viga, elástico lineal [26] .....	<b>49</b>
<b>Tabla VIII.</b> Ecuaciones que modelan las vigas del cordón superior e inferior. [26] .....	<b>50</b>
<b>Tabla IX.</b> Ecuaciones que modelan el comportamiento de las vigas que forman la triangulación principal. [26].....	<b>52</b>
<b>Tabla X.</b> Ecuaciones que modelan el comportamiento de las vigas transversales del pavimento. [26] .....	<b>54</b>
<b>Tabla XI.</b> Ecuaciones que modelan el comportamiento de las vigas transversales superiores.[26] .....	<b>56</b>
<b>Tabla XII</b> Frecuencias propias y sus respectivas frecuencias angulares.....	<b>61</b>
<b>Tabla XIII</b> Definición de matriz de carga.....	<b>68</b>

## II. Índice de Imágenes

<b>Imagen 1</b> Ej. Sistema ODS. [11].....	<b>18</b>
<b>Imagen 2</b> Ej. Análisis modal clásico. [11] .....	<b>19</b>
<b>Imagen 3</b> Ej. Ensayo de vibración en tierra. [11] .....	<b>20</b>



<b>Imagen 4</b> Ej. Análisis Modal Operacional. [11] .....	21
<b>Imagen 5</b> Ej. SHM. [11].....	21
<b>Imagen 6</b> Puente de celosía Pratt. [28] .....	41

### III. Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Modelo de estructura de un grado de libertad amortiguada. Oscilador simple no amortiguamiento.[34].....	29
<b>Figura 2.</b> Modelo de estructura de un grado de libertad amortiguada. Oscilador simple no amortiguamiento.[34].....	29
<b>Figura 3</b> Movimiento armónico simple. [23].....	32
<b>Figura 4</b> Sólido sin mallado. Elaboración propia utilizando Comsol Multiphysics.....	34
<b>Figura 5</b> Sólido con mallado grueso. Elaboración propia utilizando Comsol Multiphysics. ....	35
<b>Figura 6</b> Sólido con mallado fino. Elaboración propia utilizando Comsol Multiphysics. ....	35
<b>Figura 7</b> Modelo en blanco o Asistente de Modelo.....	37
<b>Figura 8</b> Selección dimensión de espacio. ....	38
<b>Figura 9</b> Física. ....	38
<b>Figura 10</b> Selección de física. ....	39
<b>Figura 11</b> Selección de Estudio.....	39
<b>Figura 12</b> Interfaz COMSOL Multiphysics. ....	40
<b>Figura 13</b> Puente de celosía Pratt.....	42
<b>Figura 14</b> Declaración de geometría.....	43
<b>Figura 15</b> Materiales que componen el puente.....	44
<b>Figura 16</b> Pavimento del puente. Contorno definido como cáscara (Shell).....	45
<b>Figura 17</b> Valores iniciales del pavimento. ....	46
<b>Figura 18</b> Declaración acción de la gravedad en el pavimento.....	47



<b>Figura 19</b> Restricción de movimiento puente. ....	47
<b>Figura 20</b> Celosía del alma. ....	48
<b>Figura 21</b> Valores iniciales en las vigas. ....	49
<b>Figura 22</b> Cordón superior e inferior. ....	50
<b>Figura 23</b> Sección transversal viga cordón principal, tipo casilla. ....	51
<b>Figura 24</b> Orientación de la sección de la viga ....	51
<b>Figura 25</b> Triangulación principal. ....	52
<b>Figura 26</b> Sección transversal de viga montantes y diagonales, tipo casilla. ....	53
<b>Figura 27</b> Vigas transversales en el pavimento. ....	53
<b>Figura 28</b> Sección transversal tipo perfil H para vigas transversales del pavimento. ....	54
<b>Figura 29</b> Orientación establecida para las vigas transversales superiores. ....	57
<b>Figura 30</b> Acoplamiento Multifísico. ....	57
<b>Figura 31</b> Mallado. ....	59
<b>Figura 32</b> Declaración del estudio de frecuencias propias. ....	60
<b>Figura 33</b> Primera forma de modo ....	62
<b>Figura 34</b> Segunda forma de modo. ....	62
<b>Figura 35</b> Tercera forma de modo. ....	63
<b>Figura 36</b> Cuarta forma de modo. ....	63
<b>Figura 37</b> Quinta forma de modo. ....	64
<b>Figura 38</b> Sexta forma de modo ....	64
<b>Figura 39</b> Séptima, octava, novena y décima formas de modo. ....	65
<b>Figura 40</b> Undécima forma de modo. ....	65
<b>Figura 41</b> Duodécima forma de modo. ....	66
<b>Figura 42</b> Preparación del puente para el estudio estacionario. ....	66
<b>Figura 43</b> Definición de puntos a lo largo del pavimento. ....	67
<b>Figura 44</b> Peso camión 12000Kg. ....	67
<b>Figura 45</b> Definición de cargas puntuales ....	67
<b>Figura 46</b> Momento de flexión local en dirección y ....	69
<b>Figura 47</b> viga sometida a cargas dinámicas. ....	70



<b>Figura 48</b> Parámetros globales. ....	70
<b>Figura 49</b> Función de entrada rectangular. ....	71
<b>Figura 50</b> Definición del material para la viga. ....	71
<b>Figura 51</b> Mecánica de sólidos. ....	72
<b>Figura 52</b> Definición de carga como condicional. ....	72
<b>Figura 53</b> Estudio en el dominio del tiempo. ....	72
<b>Figura 54</b> Desplazamientos. ....	73
<b>Figura 55</b> Barrido Paramétrico. ....	73
<b>Figura 56</b> Gráfica de desplazamientos. ....	74
<b>Figura 57</b> Diagrama mantenimiento predictivo en la industria .....	76



## 1. Introducción

### 1.1. Contexto

Este trabajo de fin de grado se ha llevado a cabo como soporte del proyecto de investigación en ciencias computacionales de la Universidad de Málaga, liderado por el Dr. Manuel Díaz, esta investigación pretende crear un algoritmo, que sea capaz de predecir anomalías estructurales.

En sus comienzos, este algoritmo se nutrirá de los datos obtenidos en este trabajo fin de grado, al simular estructuras civiles con el software Comsol Multiphysics. Más adelante, el proyecto de investigación pretende monitorizar ciertas estructuras civiles, y obtener así datos reales. A partir de esto, se hará una comparación de los datos sensorizados con los simulados y ajustar así el algoritmo predictivo.

EL presente TFG abordará el problema en cuestión: obtener datos de estructuras civiles a través del software COMSOL Multiphysics, desde un prisma de un Ingeniero de Organización Industrial. Las competencias serán propias del conocimiento adquirido en las asignaturas del Grado: Física, Matemáticas, Programación, Materiales y Maquinas, Control Automático y de Procesos, Fiabilidad Industrial, Mantenimiento Industrial, Modelado y Simulación, Métodos de Optimización, y Diseño Asistido por Ordenador. Además, se han adquirido competencias complementarias y externas al Grado: asistencia a seminarios *online* impartidas por COMSOL, participación en los foros de debates propios de COMOSL y asistencia al curso de programación en Python de la Universidad de Málaga.



## 1.2. Motivación

La capacidad innata del ser humano para crear refugios y sortear los obstáculos que la naturaleza le presenta, nos ha permitido sobrevivir y crecer como especie. En un principio el crear un refugio para protegernos del frío y la lluvia, más adelante, el ingenio de comunicar mediante un puente dos lugares separados por un río. Hasta el punto de crear infraestructuras fuera de nuestro planeta. Este aprendizaje ha llevado siglos basándose en la experiencia, en el ensayo y error. Los daños en estructuras civiles han causado innumerables desastres en el transcurso de la historia, lo cual siempre actúa de llamada a la comunidad científica.

Las estructuras no solo deben cumplir con su cometido, sino prolongar su utilidad en el tiempo. Este factor determinante hizo que surgieran nuevas ciencias e intereses, una frase que recoge de mejor manera la intención de mis palabras es la utilizada en el libro de Resistencia de los Materiales- Mc Graw Hill- 3ª edición en castellano, *sin temor a equivocarnos, podríamos afirmar que sin la existencia de la teoría de la Elasticidad la Resistencia de los Materiales se reduciría a una serie de "recetas" para resolver la innumerable casuística de los cuerpos elásticos como elementos resistentes que se presentan en la práctica.*

Es lógico afirmar que en todo momento las estructuras se ven sometidas al deterioro, perdiéndose así la utilidad y beneficio que pretenden. A raíz de esto, el mantenimiento intenta apaciguar el deterioro mediante técnicas activas, es decir, el ser humano se encuentra presente. Estas técnicas son conocidas como mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo.

Con los avances de las últimas décadas, la utilización de sensores y el monitoreo, ha permitido avanzar en el mantenimiento, convirtiéndolos en una poderosa



herramienta. El monitoreo de la salud estructural (*Structural Health Monitoring-SHM*) es una de las aplicaciones en la que los sensores distribuidos en una estructura, se utilizan para evaluar la “salud” de ella. [1]

Estos sistemas podrían extender la vida útil de numerosas estructuras al permitir la detección temprana de daños, eliminar el costo de las inspecciones rutinarias y, lo más importante, mejorar la seguridad pública. El monitoreo de la salud estructural, ha ganado interés en la investigación debido a su capacidad de reducir costes asociados a la instalación y el mantenimiento de la estructura.

Con la llegada del monitoreo, y la obtención de grandes volúmenes de datos, surgieron a su vez nuevas ciencias, llamadas ciencias de datos. Sin entrar en mucho detalle, gran parte de estas nuevas ciencias se centran en la creación de algoritmos que permiten predecir acontecimientos futuros o acontecimientos desconocidos, también conocido como aprendizaje automático. De ahí, se logra pasar de un mantenimiento preventivo a un mantenimiento predictivo. Es importante reafirmar que el mantenimiento predictivo no pretende eliminar las acciones del mantenimiento preventivo, sino determinar cuando son necesarias estas acciones preventivas, es decir, tomar decisiones de mantenimiento en función de los datos obtenidos.

El monitoreo y posteriormente la aplicación de ciencias de datos, no solo se utiliza en la ingeniería civil. Esto ha dado paso a la cuarta revolución industrial, la industria 4.0, y se está utilizando en infinidad de aplicaciones.

Debido al auge que está experimentando la ciencia de datos, quise iniciarme y conocer con mayor profundidad sus aplicaciones. Esta motivación, me llevo a



contactar con el equipo de investigación de D. Manuel Díaz de la Universidad de Málaga, ofreciéndome la posibilidad de realizar el trabajo fin de grado y de aportar a su investigación con la simulación y obtención de datos en estructuras civiles.

### 1.3. Antecedentes.

El monitoreo de salud estructural (SHM) se refiere a los procedimientos de monitoreo automatizado que tienen como objetivo evaluar el estado de daños de estructuras aeroespaciales, civiles o mecánicas.

Una detección temprana de fallas, por ejemplo, grietas o corrosión, tiene el potencial de reducir en gran medida el costo de mantenimiento durante la vida útil de una estructura y puede ayudar a prevenir catástrofes.

Si a la creciente reducción en coste de los sensores le añadimos los avances computacionales de la época, justifica la transición actual de un mantenimiento preventivo basado en inspecciones rutinarias a un mantenimiento preventivo basado en datos, también conocido como mantenimiento predictivo. [2]

El monitoreo de salud estructural (SHM) basado en datos es un tema muy amplio y se ha estudiado desde puntos de vista diferentes, sobre todo en el ámbito civil, industrial y aeroespacial. Las tecnologías de evaluación y pruebas utilizadas son no destructivas (NDE/NDT), estas pruebas a menudo son clasificadas en dos categorías: basado en ondas o basado en vibraciones. [3]

Estas líneas de trabajo se centran principalmente en la generación de señales de diagnósticos y el procesamiento de señales, y tienen como objetivo medir el cambio en las señales recibidas después de enviar y generar un estrés de diagnóstico, señal de excitación, u ondas ultrasónicas a lo largo de la estructura.





Alternativamente, trabajan considerando los cambios en las frecuencias naturales y la forma modal de las ondas obtenidas, como consecuencia de los cambios o fallas estructurales. [4][5][6]

Además, se suele acompañar el estudio teniendo en cuenta las vibraciones producidas por acontecimientos medioambientales, vientos, oleaje, fuerzas dinámicas o lluvia, normalmente.[7][8][9]

A pesar de los numerosos trabajos relacionados con la identificación de daños estructurales, solo unos pocos combinan técnicas de aprendizaje automático junto con simulaciones numéricas.[10]

## **2. Objeto y alcance.**

### **2.1. Objeto**

El objeto del TFG es contribuir a la investigación en el campo conocido como “salud estructural” y mantenimiento predictivo, y aportar un nuevo enfoque desde una metodología basada en simulaciones numéricas, haciendo uso del software Comsol Multiphysics. El trabajo abarca desde la simulación de la estructura, hasta la obtención de datos y da a conocer el potencial y las ventajas asociadas a dicho mantenimiento.

### **2.2. Alcance**

Este proyecto abarca desde la simulación de la estructura, hasta la obtención de datos. A su vez, explicará lo que se entiende por mantenimiento predictivo y por salud estructural. Se dará a conocer el potencial y las ventajas asociadas de dicho mantenimiento.



Este trabajo no pretende incluir la creación de un algoritmo predictivo ni el análisis de los datos obtenidos.

### **3. Marco Teórico.**

Para definir un marco teórico apropiado vamos a distinguir tres disciplinas relevantes: Monitoreo Estructural, Dinámica Estructural y Simulación Numérica.

#### **3.1. Monitoreo Estructural**

Es importante aclarar cómo se lleva a cabo el monitoreo estructural, para más adelante profundizar en conceptos físicos y matemáticos que se encuentran implícitos en él.

Todas las estructuras, sean grandes o pequeñas, se ven sometidas a fuerzas físicas que influyen en su comportamiento. Por ejemplo, los álabes de un aerogenerador marino que vibran en mitad de un temporal, un avión cuando entra en una zona de turbulencias, un puente con flujo peatonal y vehicular, o una máquina expuesta a sus propias vibraciones. Todas estas fuerzas ponen a prueba la integridad de las estructuras.

Es por ello, que las estructuras deben ser resistentes y rígidas, no obstante, un sobredimensionamiento excesivo puede resultar tan innecesario como costoso. Sobre todo, si el peso importa.

Como consecuencia, conocer el comportamiento de las estructuras en condiciones operativas permite a los ingenieros optimizar los diseños, controlar la integridad estructural y maximizar el rendimiento. Diferentes análisis se llevan a cabo para conocer dicho comportamiento, según Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S [11], empresa fundada en 1942 en tecnología

avanzada de medida y gestión de la calidad del ruido y las vibraciones, expone algunos de ellos:

### 3.1.1. Análisis de formas de deflexión operacional.

El análisis de formas de deflexión operacional (ODS) es un estudio muy utilizado tanto para las estructuras en sus diversas condiciones de uso como para la determinación de los patrones de vibración de máquinas. Los patrones de vibración se muestran como modelos geométricos animados de la estructura. Lo que se observa es la combinación de la función de fuerza que actúa sobre la estructura y las propiedades dinámicas de esta.

La función de fuerza, como es lógico, depende de las condiciones de uso. Por ejemplo, en el caso de una maquinaria influyen factores como la velocidad del motor, la carga, la presión, la temperatura o el caudal. En el caso de las estructuras de ingeniería civil, se pueden tener en cuenta las fuerzas ambientales, como el viento, oleaje o tráfico. El análisis ODS se suele dividir en tres dominios: temporal, espectral y aceleración. [11]

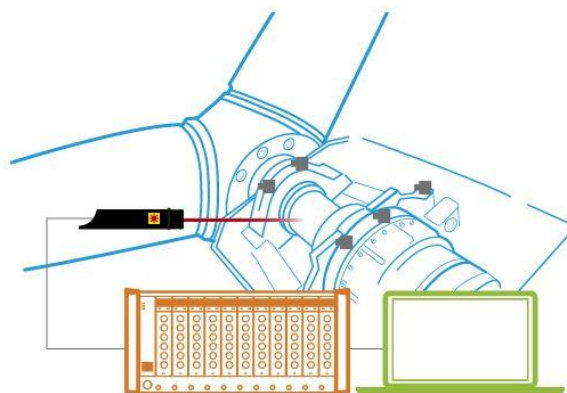


Imagen 1 Ej. Sistema ODS. [11]

### 3.1.2. Análisis modal clásico.

En el análisis modal clásico se logra un modelo de las propiedades dinámicas de una estructura excitándola con fuerzas medibles y conocidas, determinando así la relación respuesta/excitación.

El estudio abarca desde pruebas de movilidad sencillas, con un martillo de impacto móvil y un acelerómetro fijo, hasta ensayos de grandes estructuras con múltiples vibradores y centenares de acelerómetros. Se utiliza en una gran diversidad de ensayos, con fines de verificación y optimización, certificación, resolución de problemas y comparación con cotas de referencia. [11]

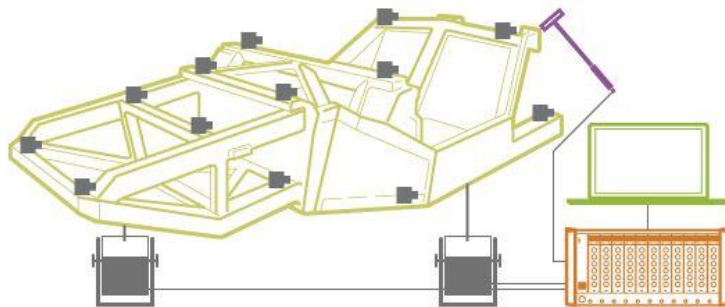
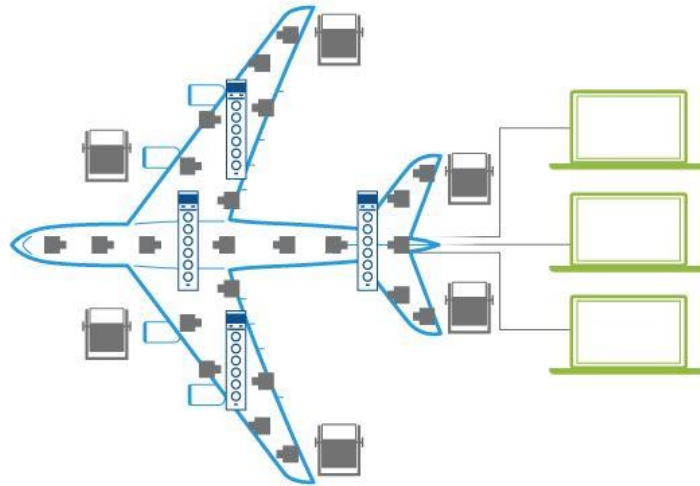


Imagen 2 Ej. Análisis modal clásico. [11]

### 3.1.3. Ensayos de vibración en tierra

Los ensayos de vibraciones en tierra (GVT) de aeronaves sirven para determinar los parámetros modales de una aeronave. Comúnmente se lleva a cabo en fases avanzadas del proyecto. El resultado se utiliza para refinar los modelos analíticos de la aeronave, con el objetivo de predecir las condiciones de flameo (combinaciones de altitud y velocidad) y definir una envolvente de vuelo segura antes de proceder con el primer ensayo de vuelo. Después de los ensayos de vuelo se vuelven a ajustar los modelos analíticos, se hacen los cálculos finales de las condiciones de flameo y la aeronave obtiene su certificación de navegabilidad

aérea. Las GVT son obligatorias para cualquier aeronave nueva o que se modifique. [11]



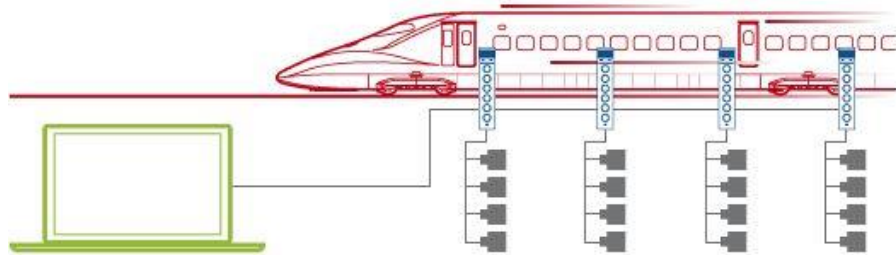
**Imagen 3** Ej. Ensayo de vibración en tierra. [11]

#### 3.1.4. Análisis modal operacional

En el análisis modal operacional (OMA) se centra en la reacción de una estructura a las fuerzas ambientales y operativas (que constituyen una entrada no sujeta a medición). El OMA se utiliza para la caracterización modal en condiciones de funcionamiento reales y en situaciones donde es difícil o imposible, excitar la estructura de forma artificial. El tamaño físico, la forma o la ubicación de muchas estructuras, ya sean mecánicas o de ingeniería civil dificulta su excitación por medios artificiales.

Además, las estructuras de ingeniería civil también reciben cargas de fuerzas ambientales (viento, oleaje, altas y bajas temperaturas). Por otra parte, las estructuras mecánicas, como aeronaves, vehículos, embarcaciones y maquinaria, presentan vibraciones propias de su funcionamiento. Todas esas fuerzas, se consideran fuerzas de entrada en el OMA, ya que darían lugar a resultados

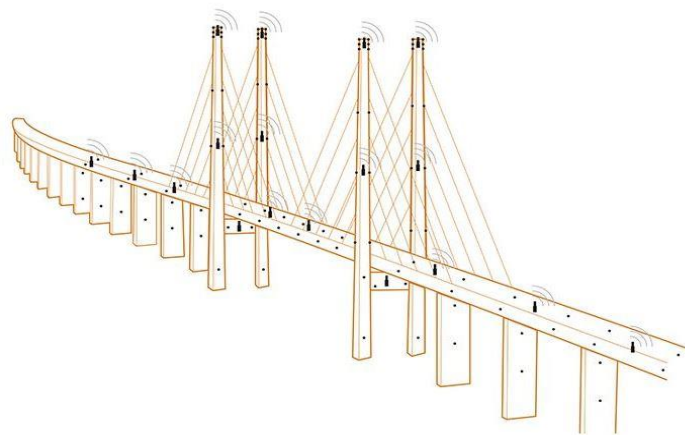
erróneos en el análisis modal clásico. El OMA se puede llevar a cabo in situ mientras se encuentra en funcionamiento en condiciones normales; el tiempo de configuración es reducido y se evitan periodos improductivos. [11]



**Imagen 4** Ej. Análisis Modal Operacional. [11]

### 3.1.5. Salud estructural

Las estructuras se deterioran con el paso del tiempo debido al uso, condiciones ambientales y sucesos accidentales. La monitorización de salud estructural (SHM), normalmente continua y a largo plazo, permite llevar un seguimiento del estado estructural y determinar medidas de gestión, como planificar labores de mantenimiento y reparación. [11]



**Imagen 5** Ej. SHM. [11]

### 3.1.5.1. Sensores y Parámetros SHM.

En general, SHM (*Structural Health Monitoring*) requiere la instalación de un gran número de sensores a lo largo de la estructura. Los datos recopilados se procesan de manera que se puedan tomar decisiones sobre el estado general de la estructura. Históricamente, los sistemas SHM se llevaban a cabo utilizando redes de sensores cableados, sin embargo, la alta confiabilidad y los bajos costos de instalación y mantenimiento de sensores inalámbricos (WSN) los han convertido en una alternativa convincente[1][12][13]. En este apartado se proporcionará una descripción general de los componentes y procesos involucrados en el monitoreo de la salud estructural (SHM) de redes de sensores inalámbricos (WSN).

En la **Tabla I** se presenta un resumen de las diferencias clave entre redes de sensores cableados y redes de sensores inalámbricos para SHM. [1]

Metric	Wired Sensor Networks	Wireless Sensor Networks
Cost	Very high, real world examples costing \$10,000 to \$25, 000 [8]	Low, each sensor node costing approximately \$500 [8]
Deployment Time	Very long, one real world example taking several days [9]	Short, same real world example taking a half hour [9]
Lifespan	Long, typically limited by hardware lifespan	Short, typically limited by node battery lifespan
Number of Sensors	Typically low due to sensor installation difficulty	Typically higher due to ease of sensor installation
Connection Bandwidth	High bandwidth due to wired connection	Limited bandwidth and unreliable connection
Data Rate	High sensor data rates	Lower sensor data rates but higher than conventional WSNs
Sensor Synchronicity	Very high due to wired connections.	Concern due to wireless connection.

**Tabla I.** Diferencias clave entre redes de sensores cableadas y redes de sensores inalámbricos para SHM. [1]



Una de las consideraciones más importantes al diseñar un sistema SHM es la selección de sensores y que parámetros son convenientes detectar. Comúnmente, factores como el consumo de energía del sensor y los parámetros a detectar, influyen en el diseño general de la red. Otros como la selección del algoritmo de detección y localización de daños también influyen en el diseño.[14] [1]

Los parámetros más utilizados para detectar y monitorizar en los sistemas SHM son:

- **Carga.** Fuerzas que actúan en la estructura. Las posibles cargas son, cargas ambientales, como la velocidad del viento, y las cargas debidas al paso de vehículos o peatones, pudiendo ser estas cargas estáticas o dinámicas.
- **Respuesta de carga global.** Son la respuesta de la estructura a una carga determinada que se pueda medir en toda la estructura. Por lo general, los parámetros medidos son la aceleración y la velocidad de una estructura.
- **Respuesta de carga local.** Respuesta de la estructura a una carga determinada que solo se puede medir en una parte específica de la estructura. Los más comunes son: presión, roturas y tensiones.
- **Factores medioambientales.** Normalmente se suele medir las condiciones medioambientales circundantes a la estructura. Los parámetros de medida incluyen: la temperatura, salinidad, humedad y la acidez atmosférica.





Hasta la fecha, de todos los parámetros anteriormente mencionados, los más comúnmente medidos son la aceleración y la velocidad estructural.[1]

Uno de los desafíos que plantea la medición de respuestas de cargas globales, como la aceleración y la velocidad, se debe a su naturaleza global, ya que es difícil detectar la ubicación exacta del daño [14]. Para capturar correctamente la respuesta de una estructura, los sensores deben instalarse a una velocidad de muestreo adecuada durante un período de tiempo suficiente. Las frecuencias de los modos dominantes son típicamente alrededor de 10 Hz, sin embargo, las frecuencias de muestreo se pueden elegir en valores superiores de 100 Hz. Tasas de muestreo más altas pueden utilizarse para la detección y localización de daños. A su vez, frecuencias más altas permiten recopilar mayor información de la estructura. [1]

La detección y adquisición de los parámetros anteriores requiere la utilización de sensores específicos, a continuación se indicarán los sensores más comunes en los sistemas SHM.

- **Acelerómetros.** Normalmente acelerómetros piezoeléctricos, ya que son ligeros, pequeños y funcionan en amplios rangos de aceleración y frecuencia. [1]
- **Galga extensiométrica.** Estos pueden clasificarse como piezoresistivos o basados en un extensómetro incorporado. Los piezoresistivos generan señales con una frecuencia realmente baja (<1 Hz)[15][16]. Los medidores de deformación empotrados se pueden usar para medir deformaciones dentro de estructuras de concreto [17]. Las galgas extensométricas de empotramiento son sensibles a las condiciones



ambientales como el clima y, en consecuencia, deben protegerse con cerramientos. [1]

- **Sensores de corrosión.** Estos sensores suelen medir el cambio resistivo de los alambres propios del sensor, pudiendo medir así la corrosión general de una estructura.[18]

- **Transductores diferenciales de voltaje lineal (Linear voltaje Differential Transducer-LVDT).** Los LVDT se utilizan para la medición de desplazamiento

y consisten en una carcasa metálica hueca en la que un núcleo o eje se mueve libremente hacia adelante y hacia atrás a lo largo del eje de medición [1]. El núcleo está hecho de un material magnéticamente conductor y un conjunto de bobina rodea el eje metálico. Cuando ocurre un desplazamiento, el núcleo se mueve, se induce un voltaje diferencial en la salida secundaria. La magnitud del voltaje de salida cambia linealmente con la magnitud del desplazamiento del núcleo.[19]

- **Sensores de fibra óptica.** El tipo más común de sensor de fibra óptica es el sensor de rejilla Bragg (FBG) [20]. Estos sensores se pueden usar para medir parámetros tales como deformación, temperatura, presión y otros parámetros modificando una fibra para que la cantidad a medir module la intensidad, fase, polarización y longitud de onda o tiempo de tránsito de la luz en la fibra. Los sensores de fibra óptica se han desarrollado para medir la temperatura y la tensión simultáneamente con una precisión muy alta.



No obstante, hay que recalcar que los sensores más utilizados son los acelerómetros piezoeléctricos debido a su bajo costo y facilidad de uso. Como resultado, la mayoría de los métodos de detección y localización de daños se han desarrollado para estos sensores. [1]

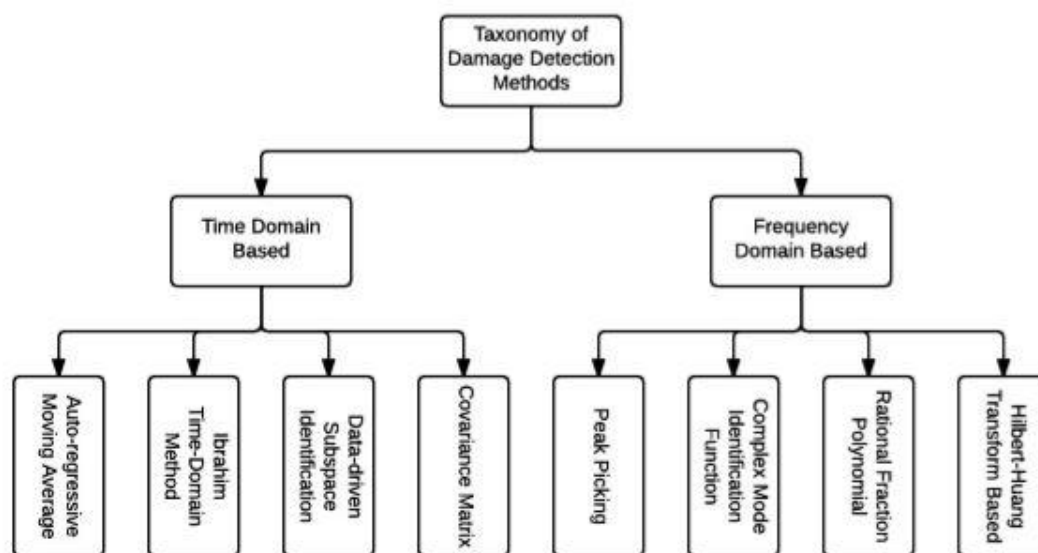
### 3.1.5.2. Detección y Localización de daños.

Los datos recopilados por los sensores, aún sin procesar deben tratarse de manera que se puedan extraer características como los parámetros modales de la estructura. Estas características son utilizadas tanto en la detección de daños como en la localización. El resto de esta sección presenta las técnicas de detección y localización de daños comúnmente utilizadas.

- **Métodos de detección de daños**

Los parámetros más comúnmente utilizados en la detección de daños, son parámetros modales como la frecuencia natural y la forma modal. La estimación del parámetro modal se puede realizar tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia [21]. Una vez que se extraen los parámetros modales, se utilizan algoritmos de detección de daños para determinar si se ha producido o no un daño estructural.

En la **Fig. 1** se ilustra un diagrama de los métodos de detección de daños.



**Tabla II.** Métodos de detección de daños. [1]

En el análisis del dominio del tiempo, los datos de series temporales recopilados de un nodo sensor se procesan directamente para extraer parámetros modales. Las técnicas comúnmente utilizadas son: el método de mínimos cuadrados de dos etapas o también conocido como el método promedio móvil autorregresivo (ARMA), el método Ibrahim timedomain (ITD), el método impulsado por la función de respuesta al impulso (IRF), y el método de la matriz de covarianza [21].

En el análisis del dominio de frecuencia, los datos de series de tiempo recopilados se transforman del dominio del tiempo al dominio de frecuencia a través de transformaciones como la Transformada rápida de Fourier (FFT) y la Transformada Wavelet (WT). En la literatura, los métodos de detección de daños basados en el dominio de frecuencia incluyen el método de selección de picos (PP), el método de función de identificación de modo complejo (CMIF) y el



método polinomial de fracción racional (RFP) [21]. La ventaja de los métodos del dominio de la frecuencia sobre los métodos del dominio del tiempo es que obtienen menos ruido. Entendiéndose ruido como toda señal no deseada que se mezcla con la señal útil.

- **Métodos de localización de daños**

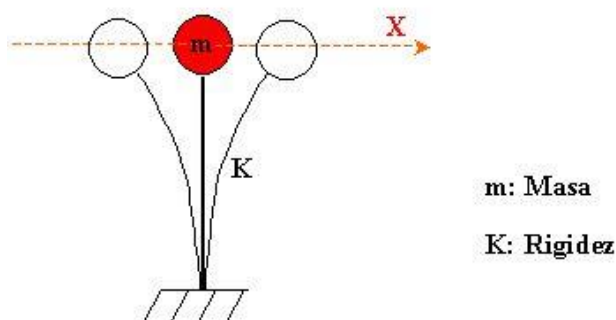
Una vez que se ha detectado el daño estructural, es necesario determinar la ubicación del daño. Este proceso se denomina localización de daños, que requiere la instalación de suficientes sensores de manera que se proporcione una cobertura de sensores suficiente para ubicar los daños en cualquier parte de la estructura. La cobertura insuficiente del sensor puede provocar la detección de daños sin localización.

Las técnicas de localización de daños comúnmente utilizadas se basan en la frecuencia, en la forma del modo, en la matriz de flexibilidad, en la matriz de rigidez y en la máquina de vectores de soporte (support vector machine based).[1], [7], [22]

### 3.2. Dinámica Estructural.

Al modelar estructuras no siempre es posible en los problemas que se presentan en ingeniería obtener soluciones matemáticas rigurosas. En realidad, sólo en algunos casos simples pueden obtenerse soluciones analíticas. Cuando en los problemas entran en detalle y se tienen en cuenta las propiedades de los materiales, distribución de carga y condiciones de contorno complejas, es necesario introducir simplificaciones o idealizaciones para reducir el problema a una solución matemática que sea capaz de dar resultados aceptables desde un punto de vista coherente y desde la seguridad.

Para intentar explicar qué se entiende por el estudio de la dinámica estructural, comenzaremos mostrando un ejemplo sencillo (**Fig.1**), estructuras con un grado de libertad. Según el libro “Dinámica Estructural: Teoría y Cálculo” escrito por el Dr. Mario Paz explica que, en dinámica estructural, *el número de coordenadas independientes necesario para especificar la configuración o posición de un sistema en cualquier instante de tiempo se conoce como el número de grados de libertad. Toda estructura continua tiene un número infinito de grados de libertad. Sin embargo, el proceso de selección o idealización de un modelo matemático apropiado permite reducir los grados de libertad a un número discreto y en algunos casos a uno solo.*



**Figura 1.** Modelo de estructura de un grado de libertad amortiguada.

Oscilador simple no amortiguamiento.[34]

Considerando el sistema que presentamos en la **Figura 1**, un sistema masa-resorte, cuando se encuentra en equilibrio, el muelle representado por la varilla con una constante de rigidez  $[K]$  no ejerce ninguna fuerza sobre la masa  $[m]$ . Cuando éste se ve desplazado una distancia  $x$  de su posición de equilibrio, el muelle ejerce una fuerza contraria  $Kx$ , que viene dada por la ley de Hooke.

Aplicando la segunda ley de Newton ( $\vec{F} = m\vec{a}$ ), se tiene:

$$-K \cdot x = m a_x \quad \text{ec. 1}$$



es decir;

$$a_x = -\frac{k}{m} x \quad \text{ec.2}$$

La aceleración es proporcional al desplazamiento y el signo negativo indica que la aceleración y el desplazamiento tienen sentido contrario. Esta es una característica que define al movimiento armónico simple y puede utilizarse para identificar sistemas que presentan esta clase de movimiento.

La aceleración se define como la derivada segunda con respecto al tiempo del vector posición; por lo tanto, la ecuación obtenida anteriormente es una ecuación diferencial. Tal y como resalta el Dr. Mario Diaz en su libro *Dinámica Estructural: Teoría y Cálculo*, “se debe recordar que la ecuación establecida por Newton es directamente aplicable sólo a cuerpos idealizados, o sea, a cuerpos que tienen masa, pero no volumen. Sin embargo, como se demuestra en mecánica elemental, la ley del movimiento de Newton es aplicable directamente a cuerpos de dimensiones finitas que tienen movimiento de traslación.”

La ec.1 se puede expresar como:

$$m\ddot{x} + Kx = 0 \quad \text{ec.3}$$

La ecuación obtenida, es una ecuación diferencial de segundo orden homogénea.

$$x = A \cos wt \quad \text{ec.5}$$

o

$$x = B \sin wt \quad \text{ec.6}$$



Donde  $A$  y  $B$  son constantes que dependen de la iniciación del movimiento, mientras que  $w$  es una propiedad física del sistema. La aplicación conjunta de la ecuación (ec.5) en la ecuación (ec.3) nos da:

$$(-mw^2 + k) A \cos wt = 0 \quad \text{ec.7}$$

Para que esta ecuación se satisfaga en cualquier instante de tiempo, el factor entre paréntesis debe ser igual a cero, o sea

$$w^2 = \frac{k}{m} \quad \text{ec.8}$$

o

$$w = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{ec.9}$$

La raíz positiva de la ecuación se conoce como la frecuencia natural del sistema.

Debido a que las ecuaciones (ec.5) y la ecuación (ec.6) son soluciones de la ecuación (ec.3) y a que esta ecuación diferencial es lineal, la superposición de estas dos soluciones, es también una solución.

$$x = A w \text{sen } wt + B \cos wt \quad \text{ec.10}$$

La expresión de la velocidad  $\dot{x}$ , se encuentra realizando la primera derivada de la posición  $x$ .

$$\dot{x} = -A w \text{sen } wt + B \cos wt \quad \text{ec.11}$$



A continuación, debemos determinar las constantes de integración A y B. Estas constantes están determinadas por valores conocidos del movimiento del sistema, que casi invariablemente son el desplazamiento  $x_0$  y la velocidad  $v_0$  al iniciarse el movimiento, o sea en el instante  $t = 0$ , conocidas como condiciones iniciales.

Después de sustituir  $t = 0$  y  $x = x_0$ , e  $\dot{x} = v_0$  en las ecuaciones (ec.10) y (ec.11) nos da:

$$x_0 = A$$

$$v_0 = B\omega$$

Finalmente sustituyendo los valores A y B obtenemos la expresión de desplazamiento  $x$  del oscilador simple en función del tiempo.

$$x = x_0 \cos \omega t + \frac{v_0}{\omega} \operatorname{sen} \omega t$$

Describiendo así el movimiento del oscilador simple sin amortiguamiento que modela estructuras de un grado de libertad.

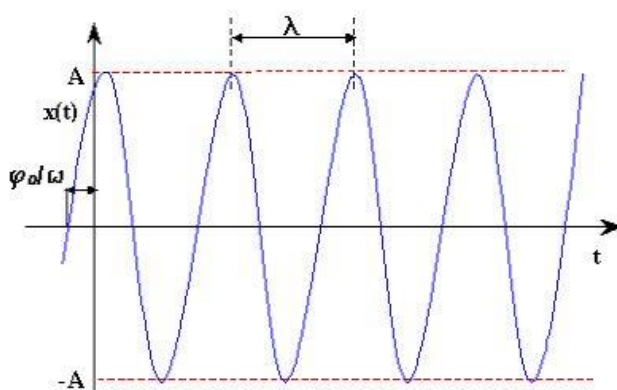


Figura 3 Movimiento armónico simple. [23]



Siguiendo con este razonamiento, en dinámica estructural se estudia el comportamiento del sistema ante diferentes entradas de excitación. No hay que olvidar que el ejemplo anteriormente descrito (sistema masa-resorte) es una idealización, una aproximación más cercana a la realidad sería un sistema subamortiguado, es decir, no oscila libremente, esto es debido al rozamiento (o a un amortiguador) y acabaría parándose. Es por ello que la dinámica estructural contempla diferentes excitaciones y diferentes sistemas más complejos para conocer el comportamiento y modelar la estructura.

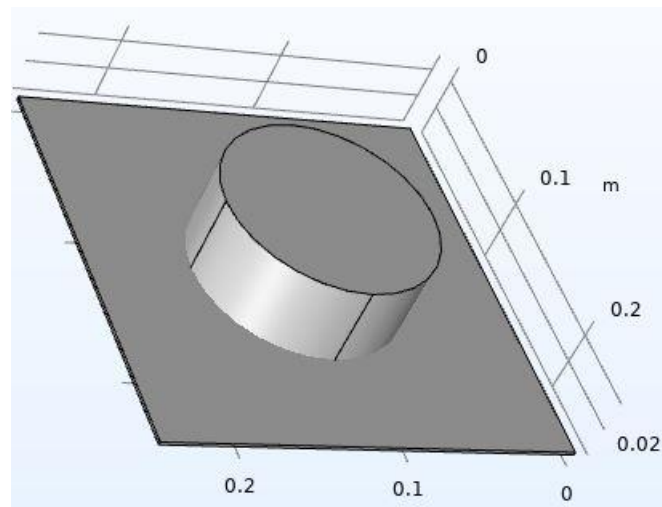
Algunos fenómenos en particular, se estudian detenidamente en dinámica estructural, como la resonancia y el flameo. Ya que se sabe, que si una estructura alcanza algunos de estos estados puede llegar a colapsar. Un ejemplo de flameo fue el ocurrido en el mítico puente de Tacoma-Narrows (Seattle) el 17 de noviembre de 1940, donde a raíz de la energía suministrada por el viento, el puente comenzó a oscilar hasta tal punto de provocar su colapso cuatro meses después de su inauguración. Un fenómeno similar ocurrió en junio del 2000 en Londres, en el puente conocido como el Puente del Milenio, la estructura entró en resonancia debido a la excitación provocada por el caminar de los peatones, éste sin llegar a colapsar. Este fenómeno se debe a que si la frecuencia impulsora (en un oscilador forzado) es muy parecida a la frecuencia natural del sistema, este oscilará con una amplitud relativamente grande, entrando así en resonancia.

### **3.3. Simulación Numérica por el Método de Elementos Finitos.**

Lo que propone esta metodología es una aproximación que permite al ingeniero resolver infinidad de problemas complejos, sin embargo, al ser una aproximación, no proporciona una solución fiel a la realidad, sino que, le posibilita obtener una solución aproximada, que junto con el juicio del ingeniero puede ser más que suficiente para la resolución de un problema práctico.

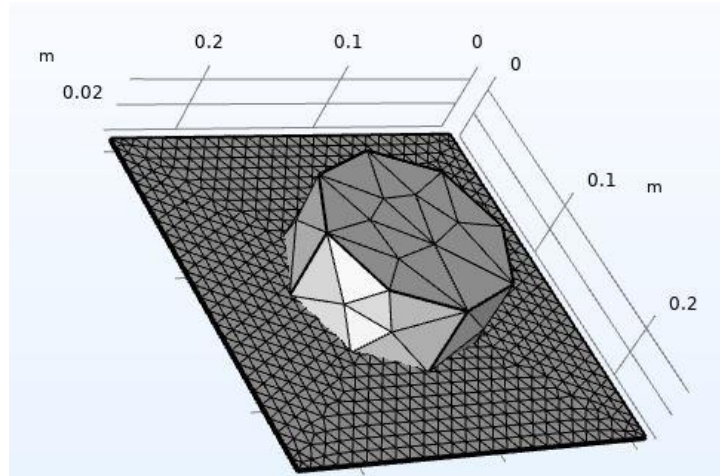
Tal y como indica su nombre (método de elementos finitos-FEM) el método consiste en subdividir el sólido en pequeñas secciones (elementos) interconectadas entre sí a través de los nudos de los elementos, formando una malla, de manera que, el campo de desplazamientos en el interior de cada elemento provocados por una fuerza externa, puede expresarse en función de los desplazamientos que sufren los nudos del elemento (desplazamientos nodales). Una vez conocidos los desplazamientos, y aplicando la ciencia del campo de la mecánica estructural, podríamos determinar de una forma aproximada, las tensiones, deformaciones y otros parámetros implícitos en el sistema.

En las siguientes figuras (**Fig.4-fig.6**) mostraremos un ejemplo ilustrativo de lo anteriormente explicado.



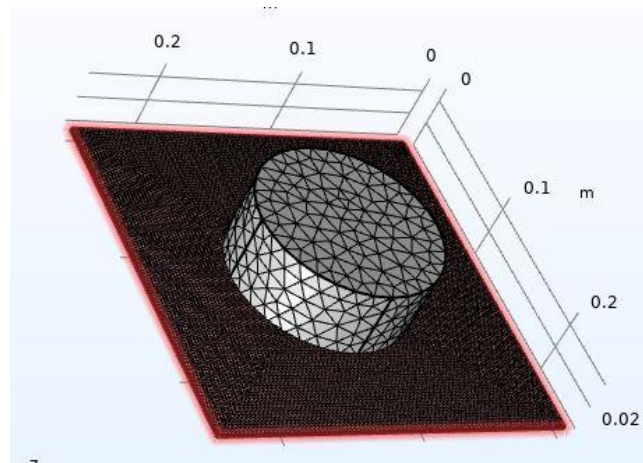
**Figura 4** Sólido sin mallado. Elaboración propia utilizando Comsol Multiphysics.

Una modelización por elementos finitos del objeto presentado en la figura 4 empleando una malla de geometrías regulares puede ser como la que presentamos en la figura 5.



**Figura 5** Sólido con mallado grueso. Elaboración propia utilizando Comsol Multiphysics.

Como podemos observar el sólido ha sido dividido en elementos geométricos, de forma que estos elementos se suponen conectados a través de sus vértices. Con un número mayor de elementos, mayor refinado, se consiguen aproximaciones mayores, como mostramos en la figura 6.



**Figura 6** Sólido con mallado fino. Elaboración propia utilizando Comsol Multiphysics.

Es debido a estas consideraciones, que inevitablemente la solución que se obtendrá es una aproximación a la solución real del problema en la figura (Fig.4).



Sin entrar en detalle, en un problema a analizar por el Método de los Elementos Finitos, en algunos casos conoceremos las fuerzas exteriores aplicadas en algunos de sus nudos y los valores de los desplazamientos en otros, que junto con la teoría de la mecánica estructural sirve para realizar simulaciones o calcular parámetros o situaciones complejas.

#### **4. Metodología.**

El objetivo de esta simulación es obtener datos que se aproximen a datos obtenidos con sensores en un escenario real. Es por ello que se van a realizar dos simulaciones, un puente de celosía Pratt, sometido al paso de diferentes vehículos y viento, y una viga sometida a cargas dinámicas. En el caso del puente se hará un estudio en estado estacionario, para obtener datos como tensiones y desplazamientos, y un estudio de frecuencias propias, para obtener los modos principales de vibración. Esta simulación ha sido posible gracias a los archivos y debates en foros que ofrece COMSOL en su página web [23].

Por otro lado, es conveniente obtener datos procedentes de un estudio en el dominio del tiempo y de un sistema sometido a cargas dinámicas, para ello en la segunda simulación se ha aproximado un puente como una viga biapoyada. Esta aproximación se ha llevado a cabo ya que una de las maneras de simular cargas dinámicas es conocer los factores que determinan el comportamiento de vibración o la frecuencia natural del sistema. En el caso del puente, al ser un sistema complejo, puede llegar a ser difícil y en todo caso, tal vez, no se llegue a una buena aproximación. Es por ello que aproximar el puente al comportamiento de una viga biapoyada y dando como entrada el modo de vibración que tiene la viga o la frecuencia natural de la misma, puede ser más que suficiente para obtener datos relevantes. [24]

## 5. Software Comsol Multiphysics.

Según la página oficial de COMSOL Multiphysics define su producto como: *una herramienta de modelado y análisis para prototipaje virtual de fenómenos físicos. COMSOL Multiphysics puede modelar virtualmente cualquier fenómeno físico que un ingeniero o científico pueda describir con ecuaciones diferenciales parciales (PDE), incluyendo transferencia de calor, movimiento de fluidos, electromagnetismo y mecánica estructural, soportando la integración de problemas de diferentes campos - Multifísica.*[25]

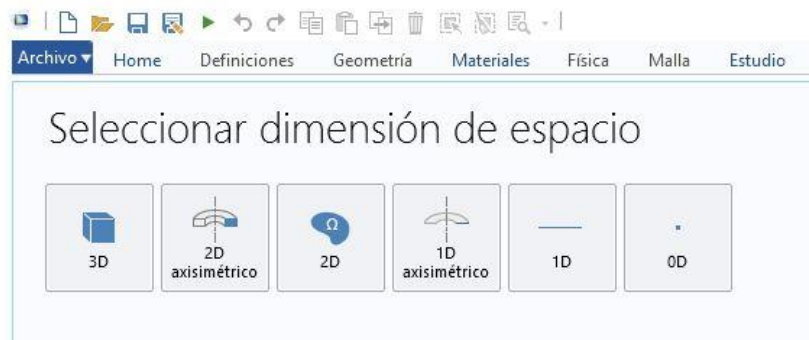
### 5.1. Breve manual de COMSOL Multiphysics.

Al iniciar el programa, el asistente de COMSOL nos dará dos opciones: asistente de modelo o modelo en blanco, es preferible la ayuda ofrecida por el asistente de modelo, Fig.7.



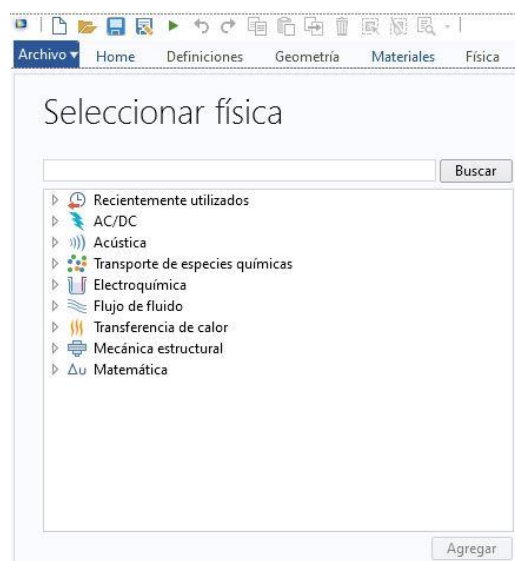
**Figura 7** Modelo en blanco o Asistente de Modelo

Seleccionar dimensiones del espacio: En función del modelo que se va a realizar seleccionaremos un modelo u otro. Fig.8. Para nuestros modelos hemos realizado una simulación en el espacio 3D y otra en 2D.



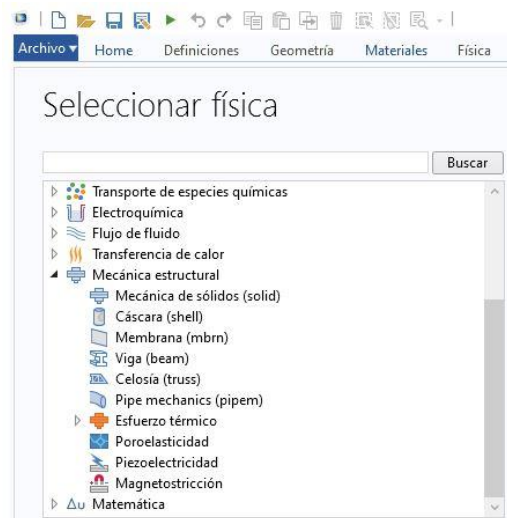
**Figura 8** Selección dimensión de espacio.

Seleccionar Física: Aparecen un listado de Físicas que el programa puede simular, el cual, es bastante amplio. Fig.9. Cada módulo trabaja con unas ecuaciones propias, en ciertos estudios las físicas están relacionadas y, por tanto, algunas ecuaciones aparecen en ambos estudios. El programa permite seleccionar varias físicas para realizar estudios complementarios (Multifísica).



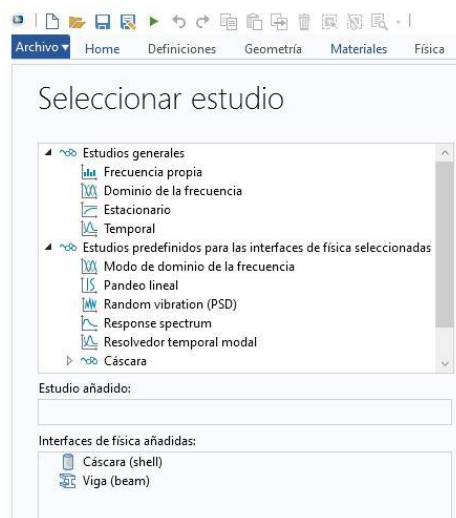
**Figura 9** Física.

Para la primera simulación, abrimos el módulo de mecánica estructural, se ha seleccionado para el estudio del puente el nodo Cáscara (Shell) y el nodo Viga (beam). Para la segunda simulación, el caso de viga sometidas a cargas dinámicas, se ha seleccionado en nodo Viga (beam) únicamente.




**Figura 10** Selección de física.

Selección de Estudio: En este apartado, y según la física seleccionada, el programa facilita la selección de estudios correspondientes, es decir, los estudios permitidos a nivel matemático para la física seleccionada. Fig.9



**Figura 11** Selección de Estudio.



Una vez seleccionado el estudio, hacemos click en , y ya estamos listos para comenzar el modelado y la simulación. La interfaz que se muestra al usuario, según las físicas y estudios seleccionadas, es similar a la que se muestra en la Figura 12.

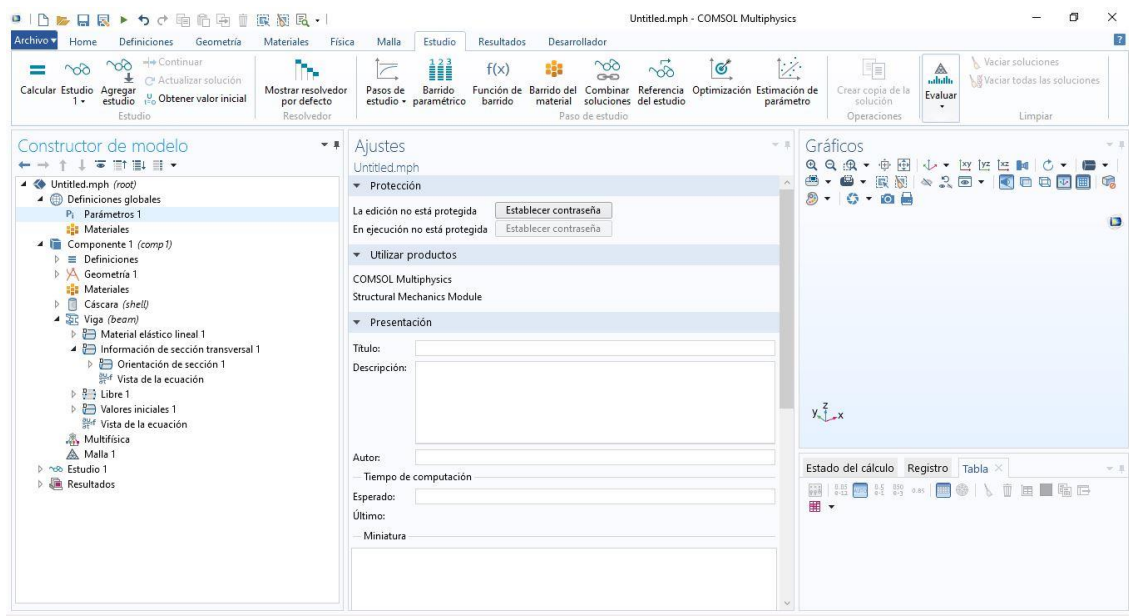


Figura 12 Interfaz COMSOL Multiphysics.

Otros pasos globales a realizar en toda simulación en COMSOL Multiphysics son:

- Diseño de Geometría.
- Materiales.
- Especificaciones en Física.
- Tipo de mallado.
- Tipo de estudio.
- Resultado.

## 6. Simulaciones.

### 6.1. Simulación Puente.

La estructura elegida a simular ha sido un puente de celosía Pratt (**Img.6**). La celosía Pratt forma parte de lo que se conoce como triangulaciones primarias, junto con otras como Howe, Warren, en K, en rombo, etc. Se ha elegido este tipo de estructura reticulada por sus numerosas aplicaciones. Se utilizan, en general, como elementos resistentes para cubiertas, vigas principales de edificación, antenas, torres, puentes y soportes de maquinaria.

Su ventaja principal radica en que las diagonales, que son las barras más largas de la celosía del alma, están sometidas, generalmente, a tracción; mientras que los montantes (barras más cortas y perpendiculares) resisten a compresión. [26]



**Imagen 6** Puente de celosía Pratt. [28]

En los párrafos venideros se explicará cómo se ha simulado un puente de celosía Pratt, se comenzará explicando las dimensiones, materiales, secciones, cargas y restricciones presentes en el modelo. Por último, se hará un estudio de frecuencias propias y de estado estacionario.

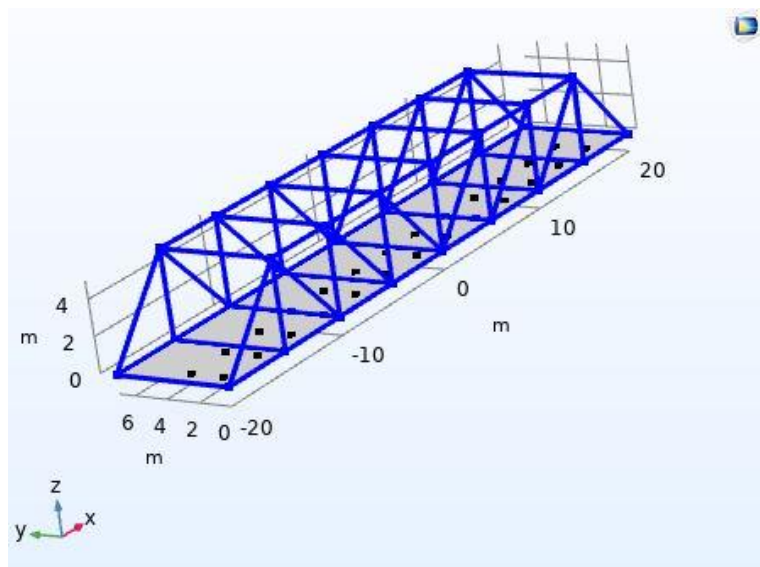


Figura 13 Puente de celosía Pratt.

### 6.1.1. Dimensiones

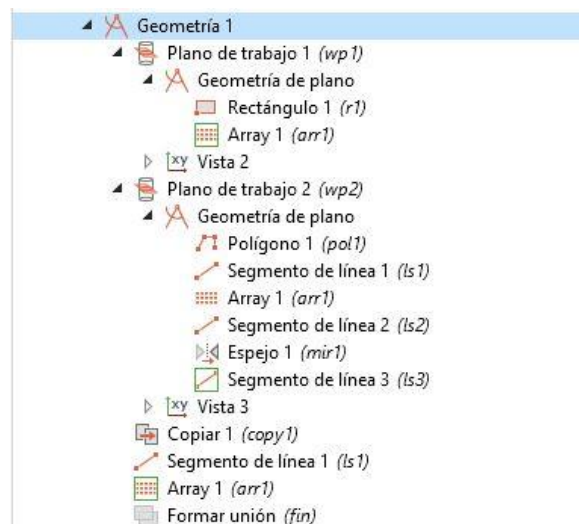
La longitud del puente es de 40 m, el ancho de la carretera es de 7 m y la altura es de 5 m.

Antes de comenzar a definir la geometría, introducimos unos parámetros globales, largo, ancho, espaciado y alto. Tal y como se muestra en la siguiente tabla (**Tabla 2**). Estos parámetros sirven de llamada durante la realización de la geometría y el modelado.

Parámetros			
Nombre	Expresión	Valor	Descripción
Ancho	7[m]	7 m	Ancho del puente
Altura	5[m]	5 m	Altura del puente
Espaciado	5[m]	5 m	Espaciado entre miembros del puente
Largo	40[m]	40 m	Largo total del puente

Tabla III. Parámetros globales.

Comenzamos configurando la geometría, se podría haber importado un archivo desde otro software CAD, como *Solid Edge* o *Autocad*, pero *Comsol* permite generar geometrías aún más complejas que la que presento. Sin ahondar demasiado en la realización de la geometría, *Comsol Multiphysics* permite generar geometrías sencillas que se repiten a lo largo de un espacio, ya sea bidimensional o tridimensional, declarando “arrays de repetición”. En este caso generando un rectángulo que se repite  $\frac{\text{Largo}}{\text{Espaciado}}$  veces para obtener el pavimento. Realizamos un procedimiento similar, para generar la celosía del puente (**Fig 14**).



**Figura 14** Declaración de geometría.

### 6.1.2. Materiales

Una vez obtenida la geometría, definimos los materiales que componen el puente. Se ha elegido de la biblioteca de materiales propios del software, acero estructural para la celosía y hormigón o concreto para el pavimento. Tal y como se muestra en la **Figura 13**.

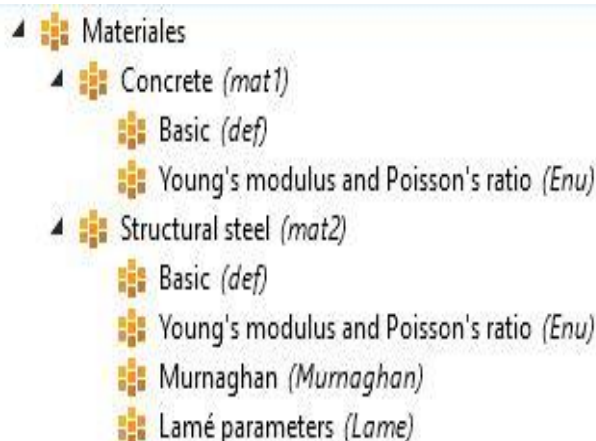


Figura 15 Materiales que componen el puente

Las propiedades que se utilizan para el acero estructural en esta simulación de mecánica de sólidos son: Densidad, Modulo de Young y Coeficiente de Poisson.

Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grupo de propiedad
<input checked="" type="checkbox"/> Densidad	rho	7850[kg/m <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	Básico
<input checked="" type="checkbox"/> Módulo de Young	E	200e9[Pa]	Pa	Módulo de Young y coeficiente de Poisson
<input checked="" type="checkbox"/> Coeficiente de Poisson	nu	0.30	1	Módulo de Young y coeficiente de Poisson
Permeabilidad relativa	mur_is...	1	1	Básico
Capacidad térmica con presión constante	Cp	475[J/(kg*K)]	J/(kg*K)	Básico
Conductividad térmica	k_iso ;...	44.5[W/(m*K)]	W/(m*K)	Básico
Conductividad eléctrica	sigma_i...	4.032e6[S/m]	S/m	Básico
Permitividad relativa	epsilon...	1	1	Básico
Coeficiente de expansión térmica	alpha_i...	12.3e-6[1/K]	1/K	Básico
Módulo elástico de tercer orden de Murnaghan	l	-3.0e11[Pa]	N/m <sup>2</sup>	Murnaghan
Módulo elástico de tercer orden de Murnaghan	m	-6.2e11[Pa]	N/m <sup>2</sup>	Murnaghan
Módulo elástico de tercer orden de Murnaghan	n	-7.2e11[Pa]	N/m <sup>2</sup>	Murnaghan
Parámetro de Lamé $\lambda$	lambLa...	1.15e11[Pa]	N/m <sup>2</sup>	Parámetros de Lamé
Parámetro de Lamé $\mu$	muLame	7.69e10[Pa]	N/m <sup>2</sup>	Parámetros de Lamé

Tabla IV. Propiedades Acero estructural.

Y para el hormigón, son las mismas propiedades con valores que se muestran en la siguiente tabla:

Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grupo de propiedad
<input checked="" type="checkbox"/> Densidad	rho	2300[kg/m <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	Básico
<input checked="" type="checkbox"/> Módulo de Young	E	25e9[Pa]	Pa	Módulo de Young y coeficiente de Poisson
<input checked="" type="checkbox"/> Coeficiente de Poisson	nu	0.20	1	Módulo de Young y coeficiente de Poisson
Coeficiente de expansión térmica	alpha_iso ; al...	10e-6[1/K]	1/K	Básico
Conductividad térmica	k_iso ; kii = k...	1.8[W/(m*K)]	W/(m*K)	Básico
Capacidad térmica con presión constante	Cp	880[J/(kg*K)]	J/(kg*K)	Básico

Tabla V. Propiedades Hormigón.

### 6.1.3. Físicas, Cargas y Restricciones.

#### 6.1.3.1. Cáscara (Shell)

Para la carretera o pavimento, Comsol permite utilizar la física “Cáscara” (Shell) dentro del apartado mecánica estructural, se usa para modelar cáscaras estructurales en límites 3D. Estos son estructuras delgadas planas o curvas, que tienen una gran rigidez a la flexión. Se pueden utilizar para analizar tanto cáscaras finas (teoría de Kirchhoff) como gruesas (teoría de Mindlin).[27]

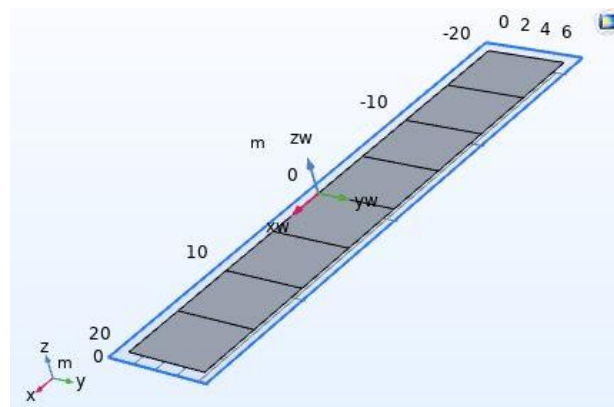


Figura 16 Pavimento del puente. Contorno definido como cáscara (Shell).

#### Material elástico lineal

Dentro de esta física (Shell), COMSOL permite definir que el material se comporte como elástico lineal, y cumple las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \sigma_{ad,m} + \mathbf{C} : \gamma_{el}, \quad \gamma_{el} = \gamma - \gamma_0 - \gamma_{th} - \gamma_{hs} \\ \sigma_b &= \sigma_{ad,b} + \frac{d}{2} \mathbf{C} : \chi_{el}, \quad \chi_{el} = \chi - \chi_0 - \chi_{th} - \chi_{hs} \\ \sigma_s &= \sigma_{ad,s} + \frac{5}{6} \mathbf{C} : \zeta_{el}, \quad \zeta_{el} = \zeta - \zeta_0 \\ \sigma_{inplane} &= \sigma_m + z \sigma_b \\ \sigma_{ad} &= \sigma_0 + \sigma_{ext} + \sigma_d \\ \mathbf{C} &= \mathbf{C}(E, \nu) \end{aligned}$$

Tabla VI. Ecuaciones de material tipo “Shell” elástico lineal [26]

## Thickness and offset

Para definir el grosor del pavimento se utiliza el nodo *Thickness and offset*, el grosor definido es de 30[cm]. También se ha añadido una corrección de desplazamiento de la cáscara (offset).

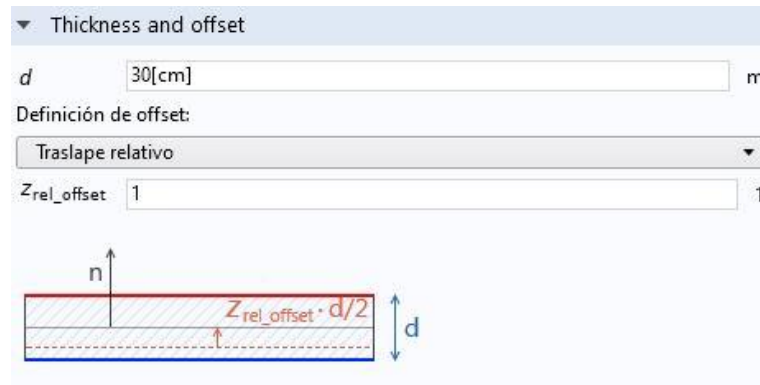


Figura 15. Grosor y corrección de desplazamiento.

## Valores Iniciales

El nodo valor inicial, agrega valores iniciales para el desplazamiento y el campo de velocidad, así como para el desplazamiento normal de la cáscara (Shell) y el campo de velocidad. En este caso el pavimento se encuentra en reposo al inicio de la simulación.

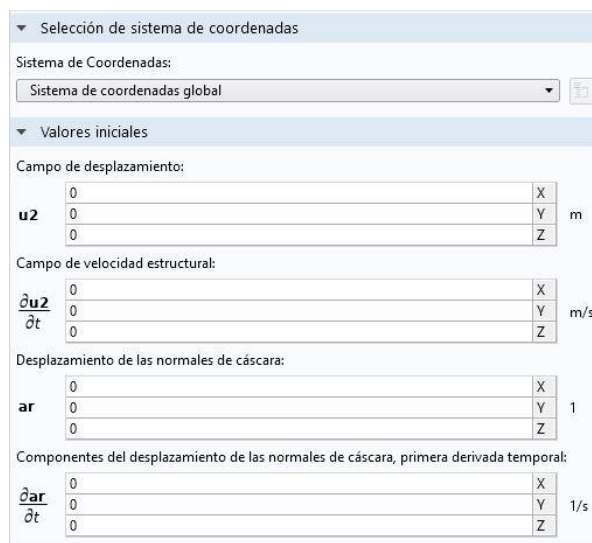


Figura 17 Valores iniciales del pavimento.

## Gravedad

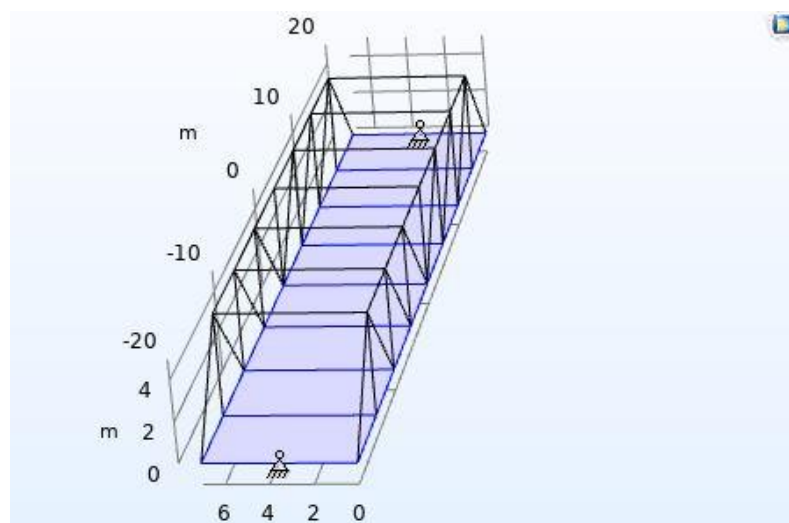
En todo el contorno definido como pavimento actúa la fuerza de la gravedad.



**Figura 18** Declaración acción de la gravedad en el pavimento.

## Restricciones de movimiento

La primera y última viga se encuentran fijas, no se les permite desplazamiento. El campo de desplazamiento “u” es nulo.



**Figura 19** Restricción de movimiento puente.



### 6.1.3.2. Vigas (Celosía)

La física vigas (beams) que se encuentra dentro del módulo mecánica estructural, se usa para modelar elementos estructurales esbeltos, que tienen una rigidez a la flexión significativa. La formulación permite la no linealidad geométrica, con grandes rotaciones y pequeñas deformaciones, y las vigas se pueden modelar en límites 2D y bordes 3D. [27]

Se pueden usar dos supuestos diferentes sobre la física:

- Teoría de Euler (o Euler-Bernoulli). Esta formulación está destinada a vigas delgadas y no tiene en cuenta las deformaciones de corte.
- Teoría de Timoshenko. En esta formulación que extiende la teoría de la viga a vigas "gruesas", se tienen en cuenta las deformaciones de corte. En un análisis dinámico, también se incluyen los efectos inerciales de la rotación. [27]

En el caso que presentamos se ha utilizado la teoría Euler-Bernoulli.

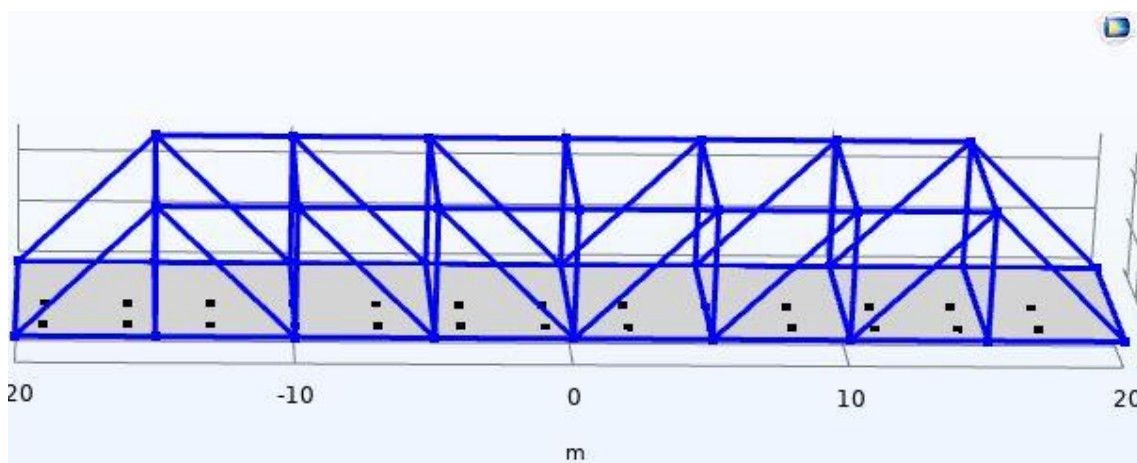


Figura 20 Celosía del alma.

## Material elástico lineal

Las vigas de la celosía se comportan como material elástico lineal. Cumpliendo las siguientes ecuaciones:

$$N = EA \left( \frac{du}{dx} - \epsilon_{inel} - \epsilon_{ni} \right) + N_i$$

$$M_z = EI_{zz} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \theta_{sz,inel} - \theta_{siz} \right) + M_{iz}$$

$$M_y = EI_{yy} \left( -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \theta_{sy,inel} - \theta_{siy} \right) + M_{iy}$$

$$M_x = GJ \left( \frac{d\theta_x}{dx} - \theta_{six} \right) + M_{ix}$$

$$G = G(E, \nu)$$

Tabla VII. Ecuaciones de material tipo Viga, elástico lineal [26]

## Valores Iniciales

Las vigas se encuentran en reposo al comienzo de la simulación.

Valores iniciales			
Campo de desplazamiento:			
<b>u</b>	0	X	m
	0	Y	
	0	Z	
Campo de velocidad estructural:			
$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$	0	X	m/s
	0	Y	
	0	Z	
Campo de rotación:			
<b>th</b>	0	X	rad
	0	Y	
	0	Z	
Velocidad angular:			
$\frac{\partial \mathbf{th}}{\partial t}$	0	X	rad/s
	0	Y	
	0	Z	

Figura 21 Valores iniciales en las vigas.

## Gravedad

Fuerzas de gravedad actúan en toda la celosía.

### Cordón superior e inferior.

Son los conjuntos de elementos superior e inferior que forman la cabeza superior e inferior respectivamente. Normalmente el cordón superior está sometido a compresión, mientras que el inferior está sometido a tracción. Fig.20

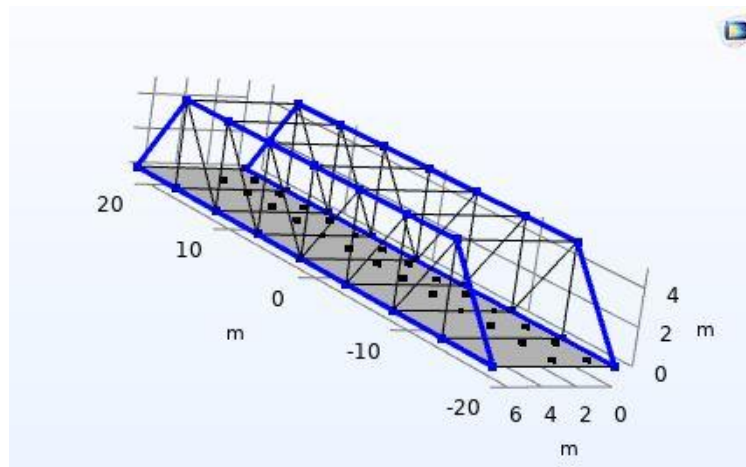


Figura 22 Cordón superior e inferior.

Las ecuaciones que modelan el comportamiento de estas vigas son:

$$\sigma_n = \frac{N}{A}, \quad \sigma_{bk} = \frac{M_y z_k}{I_{yy}} - \frac{M_z y_k}{I_{zz}}$$

$$\tau_{t,max} = \frac{|M_x|}{W_t}, \quad \tau_{sz,ave} = \frac{T_z}{A}, \quad \tau_{sy,ave} = \frac{T_y}{A}$$

$$\tau_{sz,max} = \mu_z \tau_{sz,ave}, \quad \tau_{sy,max} = \mu_y \tau_{sy,ave}$$

$$A = 2(h_y t_z + h_z t_y) - 4t_y t_z, \quad I_{zz} = \frac{t_z h_y^3 + t_y^3 (h_z - 2t_z)}{6} + \frac{t_y (h_z - 2t_z)(h_y - t_y)^2}{2}$$

$$\mu_y = \frac{(h_y^2 h_z - (h_y - 2t_y)^2 (h_z - 2t_z))A}{16t_z I_{zz}}$$

$$I_{yy} = \frac{t_y h_z^3 + t_z^3 (h_y - 2t_y)}{6} + \frac{t_z (h_y - 2t_y)(h_z - t_z)^2}{2}$$

$$\mu_z = \frac{(h_z^2 h_y - (h_z - 2t_z)^2 (h_y - 2t_y))A}{16t_y I_{yy}}$$

$$J = \frac{2(h_y - t_y)^2 (h_z - t_z)^2}{\frac{h_y - t_y}{t_z} + \frac{h_z - t_z}{t_y}}, \quad W_t = 2(h_y - t_y)(h_z - t_z) \min(t_y, t_z)$$

Tabla VIII. Ecuaciones que modelan las vigas del cordón superior e inferior. [26]

La sección que se ha elegido para las vigas que componen los cordones principales (superior e inferior) ha sido de tipo casilla, con las siguientes dimensiones:

▼ Definición de sección transversal

Secciones comunes

Tipo de sección:  
Casilla

Ancho en dirección local y:  
 $h_y$  200[mm] m

Ancho en dirección local z:  
 $h_z$  200[mm] m

Grosor de pared, dirección local y:  
 $t_y$  16[mm] m

Grosor de pared, dirección local z:  
 $t_z$  16[mm] m

**Figura 23** Sección transversal viga cordón principal, tipo casilla.

A su vez, se ha definido la orientación de las vigas. Tal y como se muestra en la siguiente figura.

▼ Orientación de sección

Método de orientación:  
Vector de orientación

Vector que define la dirección local y:

0	X
1	Y
0	Z

Rotación del vector al rededor del eje de viga:  
 $\phi$  0 rad

**Figura 24** Orientación de la sección de la viga

## Triangulación.

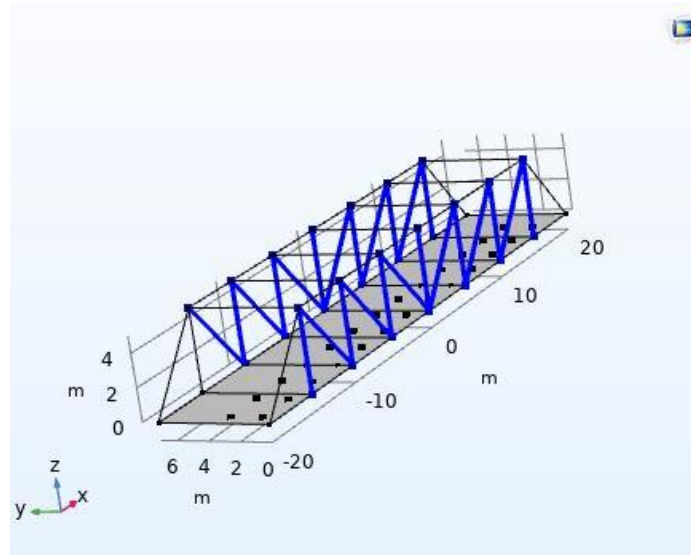


Figura 25 Triangulación principal.

Las ecuaciones que modelan el comportamiento de estas vigas que forman la triangulación de la celosía son:

$$\sigma_n = \frac{N}{A}, \quad \sigma_{bk} = \frac{M_y z_k}{I_{yy}} - \frac{M_z y_k}{I_{zz}}$$

$$\tau_{t,\max} = \frac{|M_x|}{W_t}, \quad \tau_{sz,\text{ave}} = \frac{T_z}{A}, \quad \tau_{sy,\text{ave}} = \frac{T_y}{A}$$

$$\tau_{sz,\max} = \mu_z \tau_{sz,\text{ave}}, \quad \tau_{sy,\max} = \mu_y \tau_{sy,\text{ave}}$$

$$A = 2(h_y t_z + h_z t_y) - 4t_y t_z, \quad I_{zz} = \frac{t_z h_y^3 + t_y^3 (h_z - 2t_z)}{6} + \frac{t_y (h_z - 2t_z)(h_y - t_y)^2}{2}$$

$$\mu_y = \frac{(h_y^2 h_z - (h_y - 2t_y)^2 (h_z - 2t_z))A}{16t_z I_{zz}}$$

$$I_{yy} = \frac{t_y h_z^3 + t_z^3 (h_y - 2t_y)}{6} + \frac{t_z (h_y - 2t_y)(h_z - t_z)^2}{2}$$

$$\mu_z = \frac{(h_z^2 h_y - (h_z - 2t_z)^2 (h_y - 2t_y))A}{16t_y I_{yy}}$$

$$J = \frac{2(h_y - t_y)^2 (h_z - t_z)^2}{\frac{h_y - t_y}{t_z} + \frac{h_z - t_z}{t_y}}, \quad W_t = 2(h_y - t_y)(h_z - t_z) \min(t_y, t_z)$$

Tabla IX. Ecuaciones que modelan el comportamiento de las vigas que forman la triangulación principal. [26]

La sección que se ha elegido para las vigas que componen los montantes y las diagonales de la celosía del alma, ha sido también tipo casilla. Con valores como se muestran a continuación.

Definición de sección transversal

Secciones comunes

Tipo de sección:

Casilla

Ancho en dirección local y:

$h_y$  200[mm] m

Ancho en dirección local z:

$h_z$  100[mm] m

Grosor de pared, dirección local y:

$t_y$  12.5[mm] m

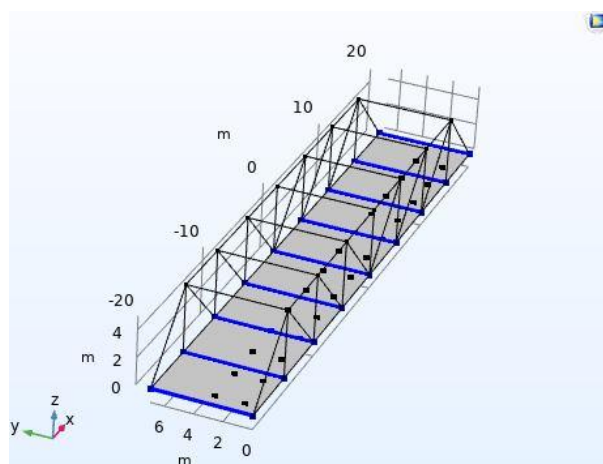
Grosor de pared, dirección local z:

$t_z$  12.5[mm] m

**Figura 26** Sección transversal de viga montantes y diagonales, tipo casilla.

Se ha definido la misma orientación que en la **figura 23** para los montantes y diagonales.

### Vigas transversales en pavimento.



**Figura 27** Vigas transversales en el pavimento.

Las ecuaciones que modelan el comportamiento de estas vigas son:

$$\sigma_n = \frac{N}{A}, \sigma_{bk} = \frac{M_y z_k}{I_{yy}} - \frac{M_z y_k}{I_{zz}}$$

$$\tau_{t,max} = \frac{|M_x|}{W_t}, \tau_{sz,ave} = \frac{T_z}{A}, \tau_{sy,ave} = \frac{T_y}{A}$$

$$\tau_{sz,max} = \mu_z \tau_{sz,ave}, \tau_{sy,max} = \mu_y \tau_{sy,ave}$$

$$A = 2h_z t_y + t_z (h_y - 2t_y), I_{zz} = \frac{2h_z t_y^3 + t_z (h_y - 2t_y)^3}{12} + \frac{t_y h_z (h_y - t_y)^2}{2}$$

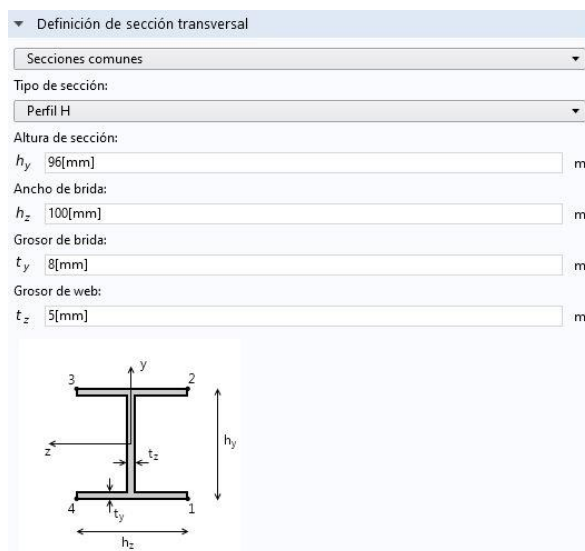
$$\mu_y = \frac{(4h_z t_y (h_y - t_y) - t_z (h_y - 2t_y)^2) A}{8t_z I_{zz}}$$

$$I_{yy} = \frac{2t_y h_z^3 + t_z^3 (h_y - 2t_y)}{12}, \mu_z = \frac{(h_z^2 - 2t_z^2) A}{8I_{yy}}$$

$$J = \frac{2t_y^3 h_z + t_z^3 (h_y - 2t_y)}{3}, W_t = \frac{J}{\max(t_y, t_z)}$$

**Tabla X.** Ecuaciones que modelan el comportamiento de las vigas transversales del pavimento. [26]

La sección que se ha elegido para las vigas transversales que componen el pavimento, ha sido tipo perfil H. Con valores como se muestran a continuación:



**Figura 28** Sección transversal tipo perfil H para vigas transversales del pavimento.

A continuación, se define la orientación de estas vigas:

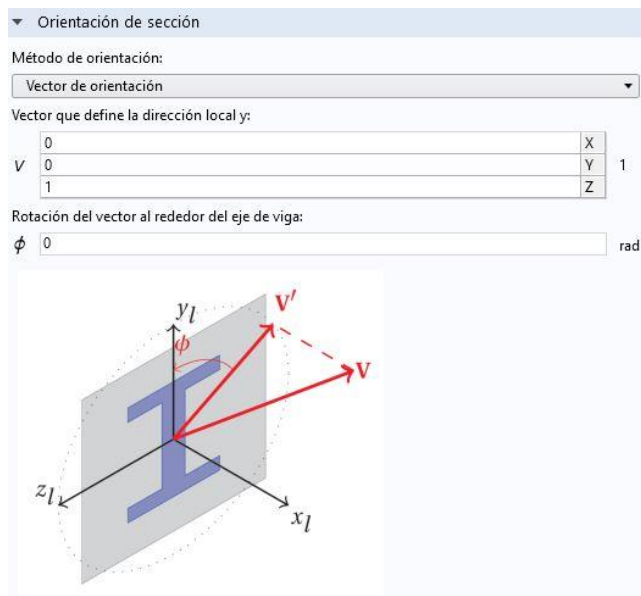


Figura 30. Orientación de la sección de la viga

### vigas transversales superiores

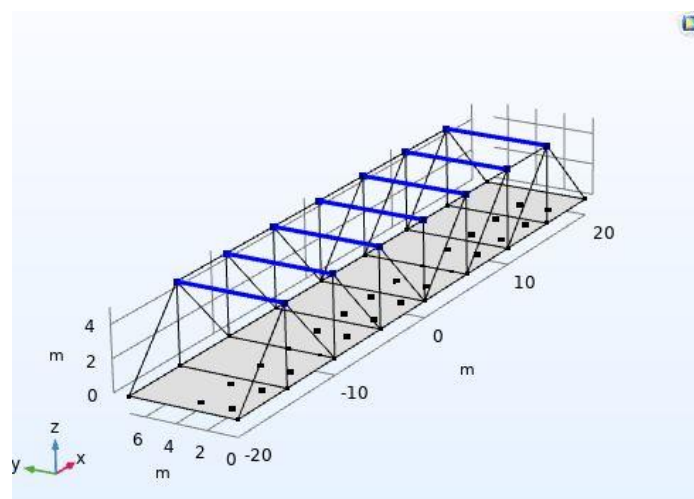


Figura 31. Vigas transversales superiores



Las ecuaciones que modelan el comportamiento de estas vigas son:

$$\sigma_n = \frac{N}{A}, \quad \sigma_{bk} = \frac{M_y z_k}{I_{yy}} - \frac{M_z y_k}{I_{zz}}$$

$$\tau_{t,max} = \frac{|M_x|}{W_t}, \quad \tau_{sz,ave} = \frac{T_z}{A}, \quad \tau_{sy,ave} = \frac{T_y}{A}$$

$$\tau_{sz,max} = \mu_z \tau_{sz,ave}, \quad \tau_{sy,max} = \mu_y \tau_{sy,ave}$$

$$A = h_y h_z, \quad I_{zz} = \frac{h_y^3 h_z}{12}, \quad \mu_y = 1.5$$

$$I_{yy} = \frac{h_y h_z^3}{12}, \quad \mu_z = \mu_y$$

$$J = \frac{q h_y^2 h_z^2}{3} \left( 1 - \frac{192q}{\pi^5} \left( \tanh\left(\frac{\pi}{2q}\right) + \frac{1}{243} \tanh\left(\frac{3\pi}{2q}\right) \right) \right), \quad q = \min\left(\frac{h_y}{h_z}, \frac{h_z}{h_y}\right)$$

$$W_t = J \left( \sqrt{q h_y h_z} \left( 1 - \frac{8}{\pi^2} \left( \frac{1}{\cosh\left(\frac{\pi}{2q}\right)} + \frac{1}{9 \cosh\left(\frac{3\pi}{2q}\right)} \right) \right) \right)^{-1}$$

**Tabla XI.** Ecuaciones que modelan el comportamiento de las vigas transversales superiores.[26]

La sección que se ha elegido para las vigas transversales que componen el pavimento, ha sido de tipo rectángulo. Con valores como se muestran a continuación:

▼ Definición de sección transversal

Secciones comunes ▼

Tipo de sección:  
Rectángulo ▼

Ancho en dirección local y:  
 $h_y$  100[mm] m

Ancho en dirección local z:  
 $h_z$  50[mm] m

**Figura 33.** Sección tipo rectángulo para vigas transversales superiores.

La orientación definida para las vigas transversales superiores es la siguiente:

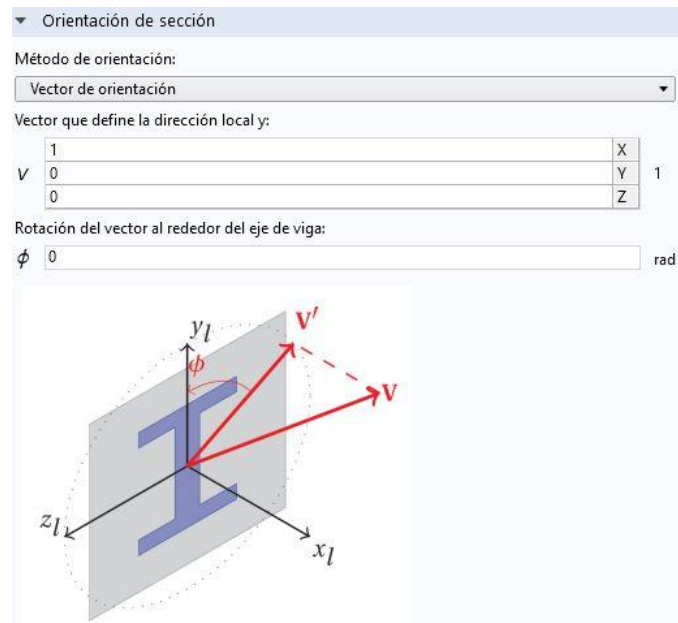


Figura 29 Orientación establecida para las vigas transversales superiores.

#### 6.1.4. Multifísica

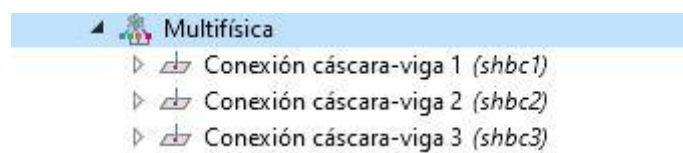
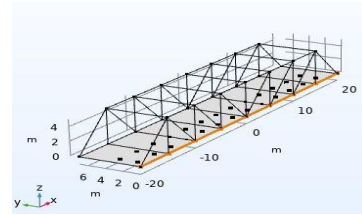


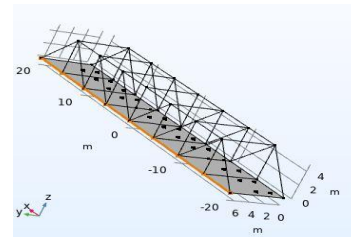
Figura 30 Acoplamiento Multifísico.

Es necesario definir el acoplamiento multifísico entre la cáscara (Shell) y las Vigas (beams), en este caso se ha declarado tres acoplamientos:

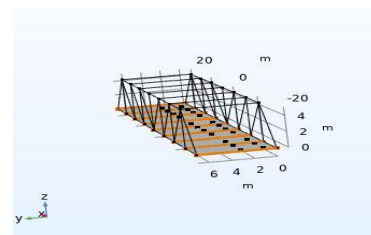
- Cordón inferior derecho con el pavimento.



- Cordón inferior izquierdo con el pavimento.



- Vigas transversales inferiores con el pavimento.



### 6.1.5. Mallado

El tipo de mallado que se ha utilizado, ha sido tipo “más fino”. Este es un mallado que proporciona COMSOL, para obtener soluciones precisas. A su vez, le comunicamos al “resolvedor” que este mallado sea controlado por las físicas declaradas en el modelo.

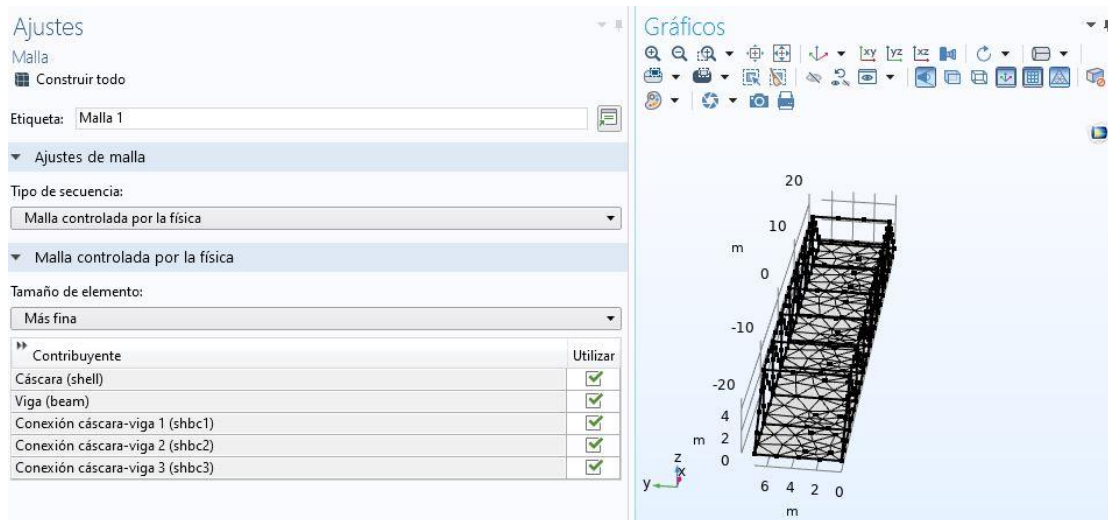


Figura 31 Mallado.

### 6.1.6. Estudio de frecuencias propias.

Las frecuencias propias o las frecuencias naturales son ciertas frecuencias discretas en las que un sistema es propenso a vibrar. Cuando vibra a cierta frecuencia propia, una estructura se deforma en una forma correspondiente, el modo propio. Un análisis de frecuencia propia solo puede proporcionar la forma del modo, no la amplitud de ninguna vibración física. El tamaño real de la deformación solo se puede determinar si se conoce una excitación real junto con las propiedades de amortiguación.[25]

Ajustes  
Frecuencia propia  
Calcular Actualizar solución

Etiqueta: Frecuencia propia

Configuración del estudio

Método de búsqueda frecuencias propias: Manual

Número deseado de frecuencias propias:  12

Unidad: Hz

Buscar frecuencias propias en torno a:  1[Hz] Hz

Método de búsqueda en todo cambio de frecuencia propia: Más cerca en valor absoluto

Use real symmetric eigenvalue solver: Automático

Real symmetric eigenvalue solver consistency check  
 Incluir no linealidad geometría

Selección de físicas y variables

Modificar configuración de modelo para paso de estudio

Interfaz de física	Resuelve para	Discretización
Cáscara (shell)	<input checked="" type="checkbox"/>	Ajustes de física
Viga (beam)	<input checked="" type="checkbox"/>	Ajustes de física

Acoplamientos Multifísicos	Resuelve para
Conexión cáscara-viga 1 (shbc1)	<input checked="" type="checkbox"/>
Conexión cáscara-viga 2 (shbc2)	<input checked="" type="checkbox"/>
Conexión cáscara-viga 3 (shbc3)	<input checked="" type="checkbox"/>

**Figura 32** Declaración del estudio de frecuencias propias.

Con este estudio se podrá conocer cuáles son los modos principales de vibración de la estructura. En este caso, se le ha pedido al “resolvedor” que halle 12 modos principales de vibración.

Este estudio es realmente interesante, ya que permite conocer que frecuencias pueden hacer entrar a la estructura en resonancia, debido a que si la frecuencia impulsora (la excitación) es muy parecida a la frecuencia natural del sistema, este oscilará con una amplitud relativamente grande.

La determinación de las frecuencias propias de una estructura es una parte importante de la ingeniería estructural. [25] Algunos objetivos de dicho análisis son:

- Asegurarse de que una excitación periódica no provoque una resonancia que pueda generar tensiones excesivas o emisiones de ruido.
- Determinar que una excitación periódica provocará una resonancia en, por ejemplo, un vibrador piezoeléctrico



- Comprobar si un análisis cuasiestático de una estructura es apropiado en función del hecho de que todas las frecuencias naturales son altas en comparación con el contenido de frecuencia de la carga.
- Investigar opciones adecuadas de pasos de tiempo o frecuencias para un análisis de respuesta dinámica posterior.
- Proporcionar modos propios para un análisis posterior basado en la superposición de modos.
- Proporcionar información sobre cómo los cambios de diseño pueden afectar una determinada frecuencia propia al estudiar su forma de modo.

Cuando una estructura vibra a cierta frecuencia propia, se deforma en una forma correspondiente, el modo propio. Un análisis de frecuencia propia solo puede proporcionar la forma del modo, no la amplitud de ninguna vibración física. El tamaño real de la deformación solo se puede determinar si se conoce una excitación real junto con las propiedades de amortiguamiento. [25]

#### 6.1.6.1. Datos obtenidos del estudio Frecuencias Propias.

Frecuencia propia (Hz)	Frecuencia angular (rad/s)
3,06394577	19,251339
3,46897009	21,7961819
4,07321497	25,5927645
4,38359759	27,542956
5,31730767	33,4096294
5,32415944	33,4526804
5,32455592	33,4551715
5,32765017	33,4746133
5,33676144	33,5318611
5,33794302	33,5392851
5,34615317	33,590871
5,75581679	36,1648635

Tabla XII Frecuencias propias y sus respectivas frecuencias angulares.

Para la primera frecuencia propia 3,06394577 Hz, la forma de modo es la siguiente:

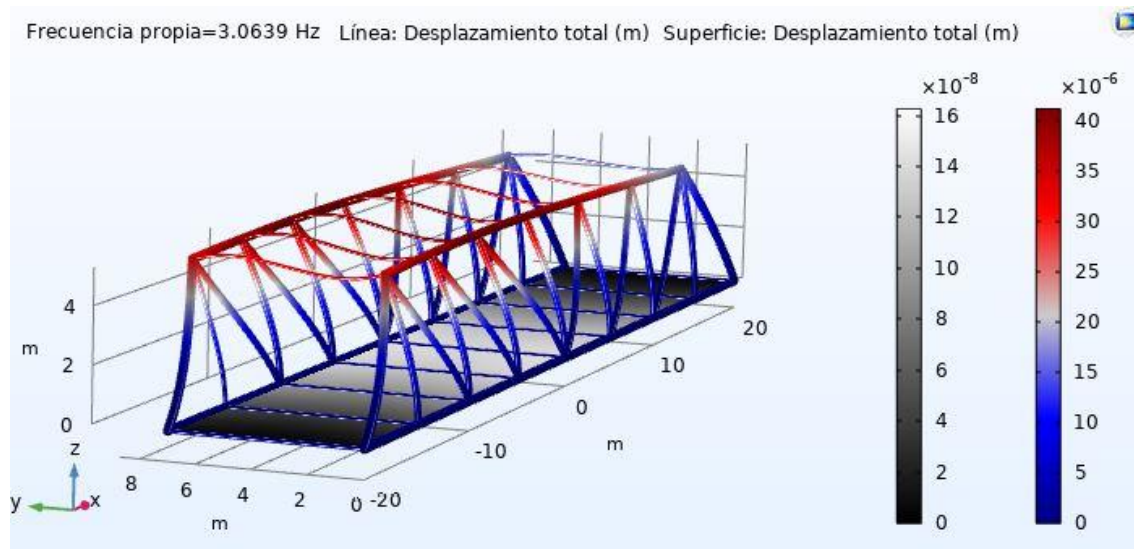


Figura 33 Primera forma de modo

Para la segunda frecuencia propia 3,46897009 Hz, su forma de modo es:

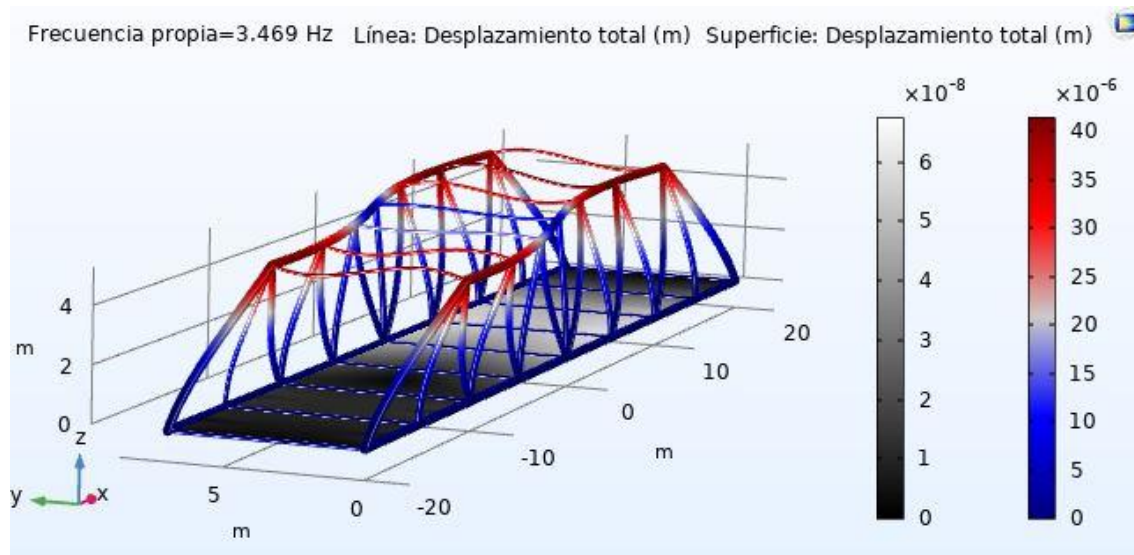


Figura 34 Segunda forma de modo.

Para la tercera 4,07321497 Hz

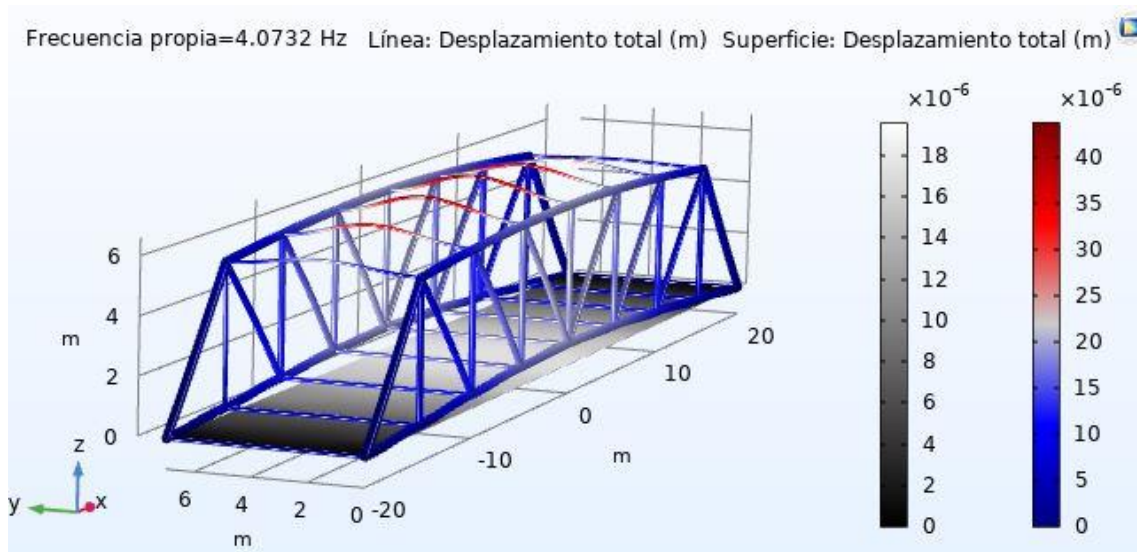


Figura 35 Tercera forma de modo.

Para la cuarta 4,38359759 Hz

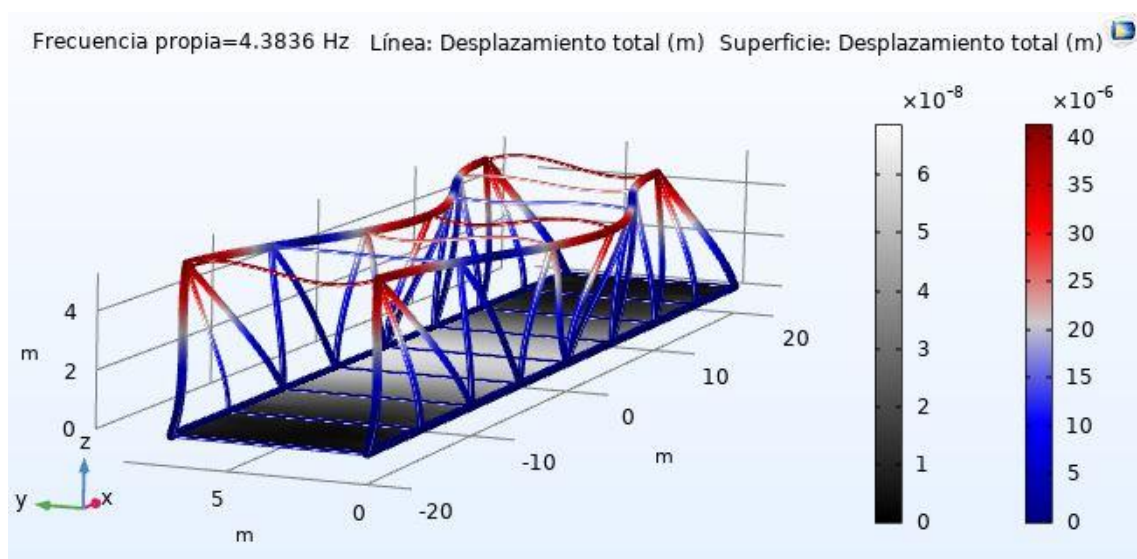


Figura 36 Cuarta forma de modo.



Para la frecuencia propia 5,31730767 Hz

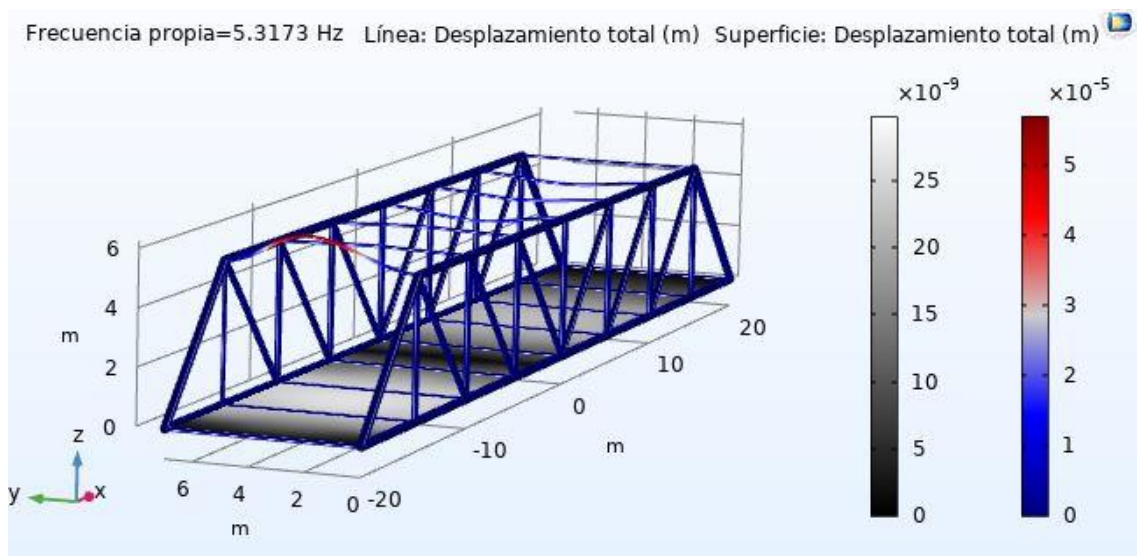


Figura 37 Quinta forma de modo.

Para la sexta frecuencia propia 5,32415944 Hz

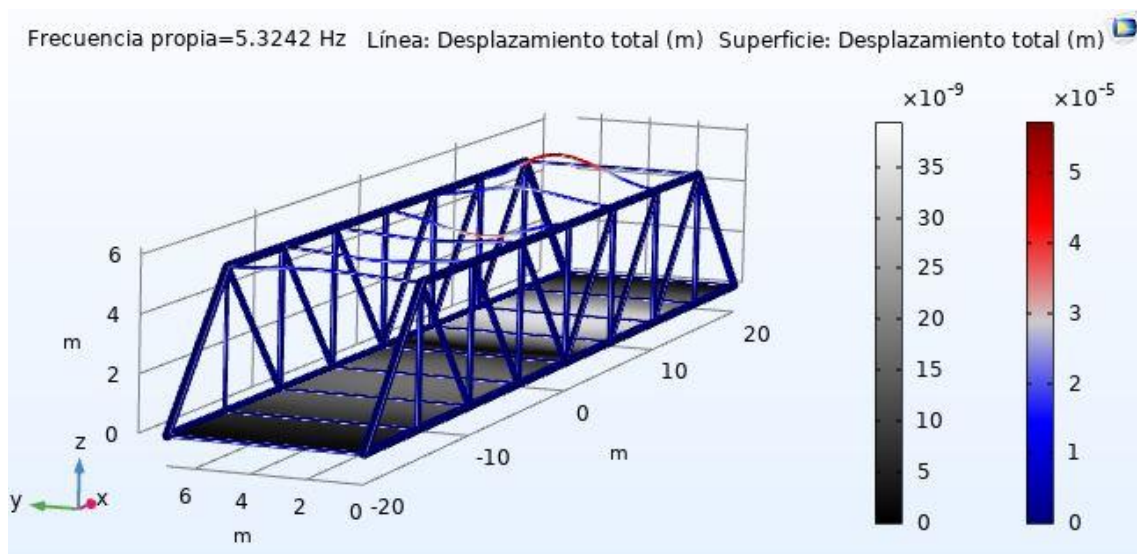


Figura 38 Sexta forma de modo

Para la séptima, octava, novena y décima frecuencia propia 5,32765017 Hz, 5,33676144 Hz, 5,33794302 Hz, 5,34615317 Hz, respectivamente, su forma de modo se presenta a continuación.

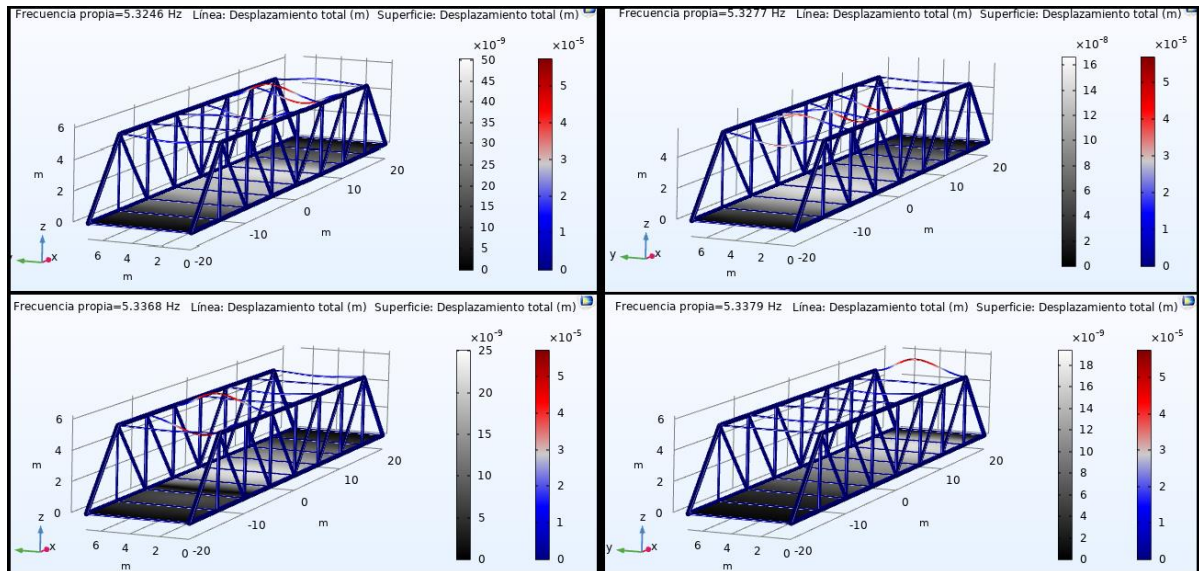


Figura 39 Séptima, octava, novena y décima formas de modo.

Para la undécima frecuencia propia 5,34615317 Hz, su modo de forma es el siguiente:

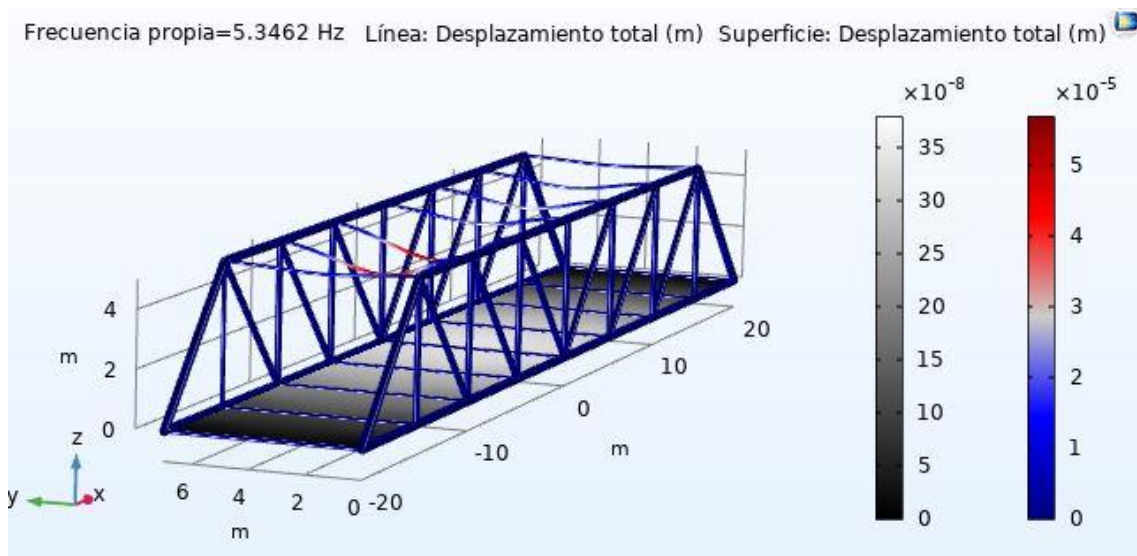


Figura 40 Undécima forma de modo.

La duodécima forma de modo, provocada por la frecuencia propia 5,75581679 Hz es:

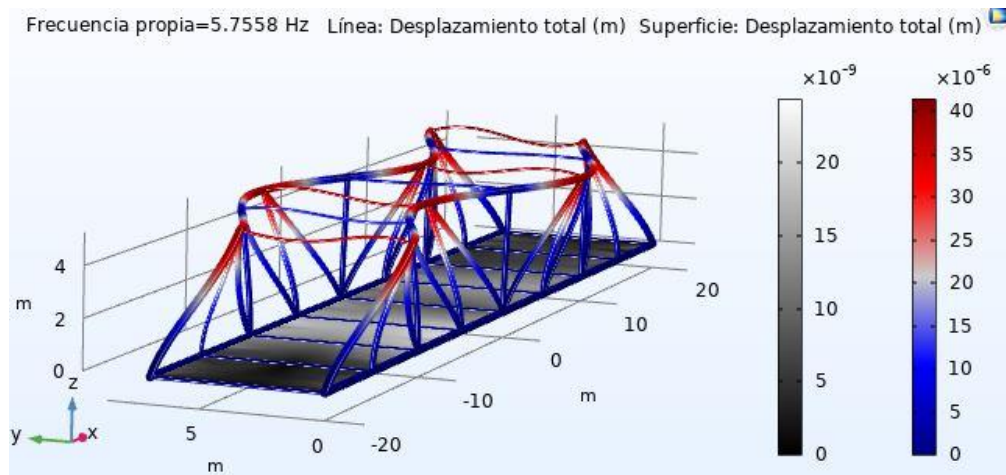


Figura 41 Duodécima forma de modo.

Además de las frecuencias propias, se han calculado otros datos, como la aceleración total que experimentan las vigas en sus tres componentes (x,y,z) en 32 puntos definidos en el puente, en el estudio de frecuencias propias. Estos otros datos obtenidos vienen recogidos en el **Anexo I: Reporte de la Simulación Puente Generado por COMSOL**. Además, se ha de verificar si las aceleraciones obtenidas, que calcula COMSOL en función de las frecuencias propias, son o no relevantes.

### 6.1.7. Estudio en estado estacionario.

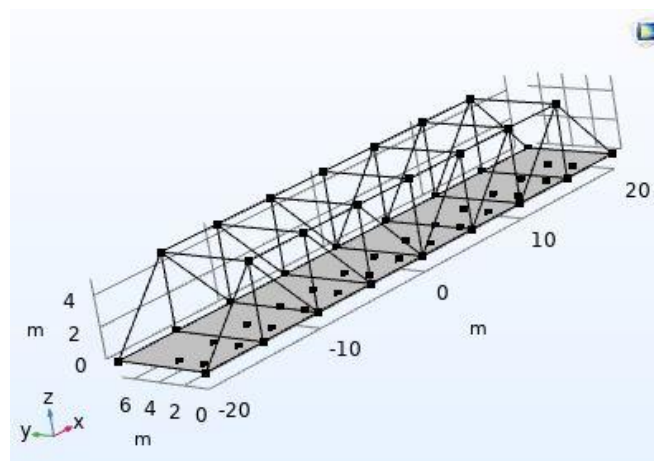


Figura 42 Preparación del puente para el estudio estacionario.

El estudio estacionario se usa cuando las variables de campo no cambian con el tiempo. Para realizar el estudio estacionario y simular cómo se comporta el

puente ante cargas estáticas puntuales, en este caso el peso de un camión, se han definido 26 puntos a lo largo del pavimento.

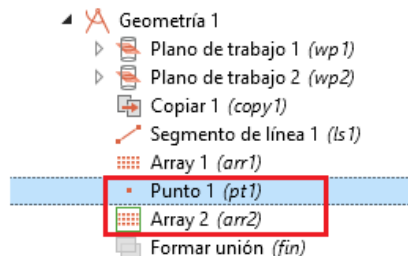


Figura 43 Definición de puntos a lo largo del pavimento.

Con anterioridad, se ha creado un nuevo parámetro global llamado `Peso_camion`.

<code>Peso_camion</code>	12000[kg]	12000 kg	Peso del camión
--------------------------	-----------	----------	-----------------

Figura 44 Peso camión 12000Kg

En la física cáscara (Shell) se ha definido cada una de las cargas en cada uno de los puntos.

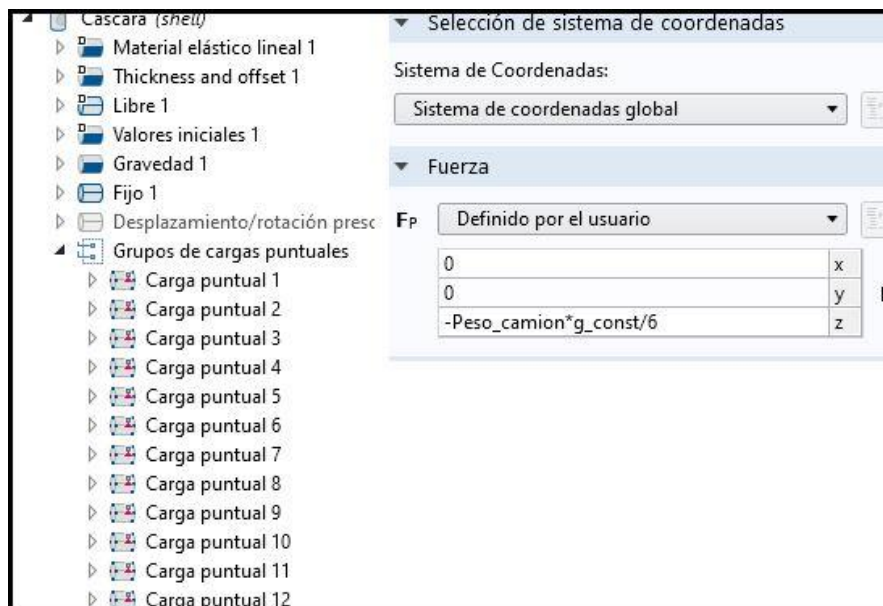


Figura 45 Definición de cargas puntuales

Donde la fuerza que se ha estimado que ejerce el camión en cada uno de los puntos es  $-\frac{\text{Peso}_{\text{camión}} \cdot g}{6}$ . [28]

Como se quiere conocer la respuesta del puente ante el peso del camión en diferentes posiciones del puente. Se ha realizado una extensión en el estudio estacionario, donde se varía el peso que ejerce el camión en los puntos definidos y la posición del camión a lo largo del puente. [23]

COMSOL permite definir casos de carga a través de una matriz. Donde uno puede definir las cargas que se encuentran activadas y le puede dar un “peso” a ese valor, un múltiplo de la carga ya definida en la física. Tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Definir casos de carga																										
Caso de carga	Ig1	Peso	Ig2	Peso	Ig3	Peso	Ig4	Peso	Ig5	Peso	Ig6	Peso	Ig7	Peso	Ig8	Peso	Ig9	Peso	Ig10	Peso	Ig11	Peso	Ig12	Peso		
Posición 1 camión 1	<input checked="" type="checkbox"/>	2.0	<input checked="" type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0
Posición 2 camión 1	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input checked="" type="checkbox"/>	2.0	<input checked="" type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0
Posición 3 camión 1	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input checked="" type="checkbox"/>	2.0	<input checked="" type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0
Posición 4 camión 1	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input checked="" type="checkbox"/>	2.0	<input checked="" type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0
Posición 5 camión 1	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input checked="" type="checkbox"/>	2.0	<input checked="" type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0
Posición 6 camión 1	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input checked="" type="checkbox"/>	2.0	<input checked="" type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0
Posición 1 camión 2	<input checked="" type="checkbox"/>	0.5	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0
Posición 2 camión 2	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input checked="" type="checkbox"/>	0.5	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0
Posición 3 camión 2	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input checked="" type="checkbox"/>	0.5	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0
Posición 4 camión 2	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input checked="" type="checkbox"/>	0.5	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0
Posición 5 camión 2	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input checked="" type="checkbox"/>	0.5	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0
Posición 6 camión 2	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input checked="" type="checkbox"/>	0.5	<input checked="" type="checkbox"/>	0.25	<input type="checkbox"/>	1.0
posición 1 vehicul...	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0
posición 2 vehicul...	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0
posición 3 vehicul...	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0
posición 4 vehicul...	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0
posición 5 vehicul...	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0
posición 6 vehicul...	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0	<input type="checkbox"/>	1.0

Tabla XIII Definición de matriz de carga.

Como se puede observar en la tabla anterior, solo unas pocas casillas se encuentran activadas. En este caso se realizará el estudio estacionario para dos camiones, pudiendo variar el estudio añadiendo más cargas en diferentes posiciones.

#### 6.1.7.1. Datos obtenidos del estudio estacionario.

Se han obtenido tensiones tanto en el pavimento como en las vigas, desplazamientos, momentos y fuerzas cortantes. Los datos se encuentran en el

**Anexo I:** Reporte de la Simulación Puente Generado por COMSOL.

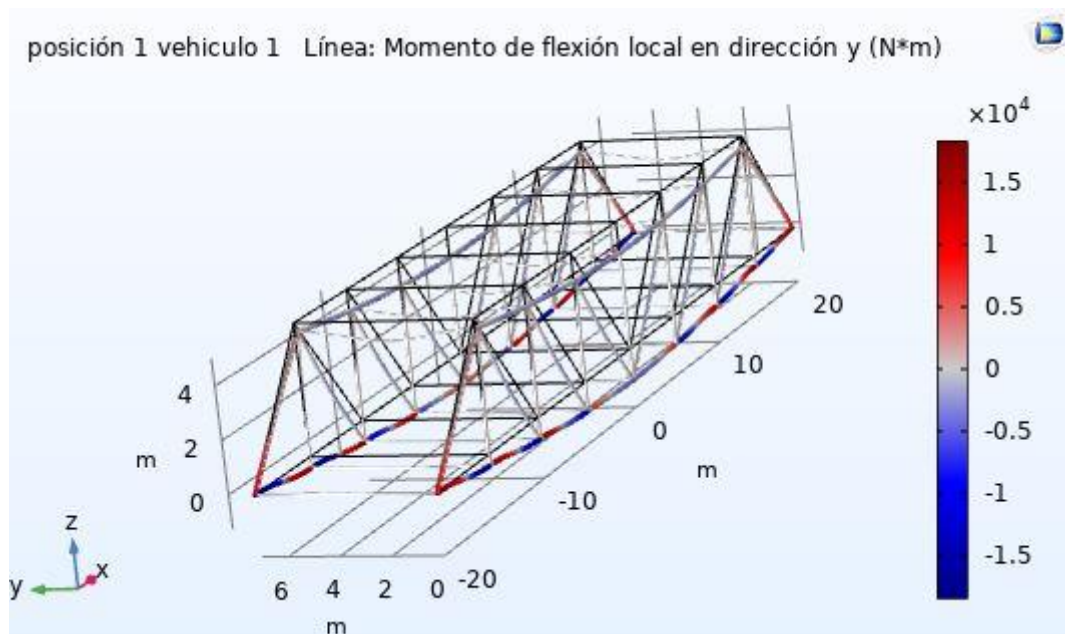


Figura 46 Momento de flexión local en dirección y

### 6.1.8. Acceso al informe generado por COMSOL Multiphysics

En el siguiente link ( [Informe](#) ) podrán tener acceso al informe completo generado por COMSOL, donde podrán visualizar las declaraciones realizadas en la simulación junto con los datos obtenidos.

### 6.2. Simulación Viga.

Como ya se advirtió en el punto 4, **Metodología**, es conveniente obtener datos procedentes de un estudio en el dominio del tiempo y de un sistema sometido a cargas dinámicas. Para ello, se ha aproximado un puente como una viga biapoyada, de cuatro tramos. Esta aproximación se ha llevado a cabo ya que una de las maneras de simular cargas dinámicas es conocer los factores que determinan el comportamiento de vibración o la frecuencia natural del sistema. En el caso del puente, al ser un sistema complejo, puede llegar a ser difícil y en todo caso, tal vez, no se llegue a una buena aproximación. Es por ello que aproximar el puente al comportamiento de una viga y dando como entrada el modo de vibración que tiene la viga o la frecuencia natural de la misma, puede ser más que suficiente para obtener datos relevantes. [24]



Figura 47 viga sometida a cargas dinámicas

### 6.2.1. Dimensiones, Funciones y Parámetros

Antes de comenzar a definir la geometría es conveniente definir algunos parámetros globales, que servirán de llamada a lo largo del modelado.

Parámetros			
Nombre	Expresión	Valor	Descripción
altura_viga	0.3[m]	0.3 m	altura viga
ancho_pulso	2[m]	2 m	ancho de pulso
espaciado	10[m]	10 m	espaciado entre miembros
espacio_pulsos	10[m]	10 m	distancia entre pulsos
f0	$\sqrt{25e9[\text{Pa}] \cdot \text{altura\_viga}^2 / (12 \cdot 2300[\text{kg/m}^3] \cdot \text{espaciado}^4)} \cdot \pi / 2$	4.4849 1/s	estimación primera frecuencia natural
longitud_total	espaciado*numero_espaciado	40 m	longitud total de la viga
numero_espaciado	4	4	numero de miembros
presion_carga	0.1[MPa]	1E5 Pa	presión que ejerce la carga
Tend	longitud_total/velocidad_carga	2 s	tiempo que tarda en alcanzar el final de la viga
Tstep1	1/50*f0	0.089699 1/s	tiempo escalón basado en la frecuencia natural
Tstep2	ancho_pulso/velocidad_carga/2	0.05 s	tiempo escalón basado en la velocidad de carga
velocidad_carga	20[m/s]	20 m/s	velocidad de la carga
velocidad_critica	f0*2*espaciado	89.699 m/s	velocidad crítica

Figura 48 Parámetros globales.

Se puede observar en la figura anterior, que tanto la longitud total de la viga 40 [m] como el ancho de la viga 0.3[m] es la misma que la del puente de la simulación anterior, esto se ha realizado para asemejar una simulación con la otra.

El ancho de cada tramo entre los soportes es de 10[m]. Una serie de pulsos de carga móvil pasan sobre la viga de izquierda a derecha a una velocidad de 20[m/s]. El espacio entre los pulsos de carga es también de 10[m], y el ancho de cada pulso es de 2[m].

Según la teoría de vigas [35], la primera frecuencia natural de una viga simplemente apoyada se puede estimar como:

$$f_0 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12pw^4}}$$

Este valor es independiente del número de tramos [35] [24].

“E” módulo de Young y “p” densidad se obtienen del material.

La primera velocidad crítica de la carga moviéndose a lo largo de la viga, viene dada por:

$$v_c = 2wf_0 ;$$

donde w, es la longitud del tramo 10[m].

La carga dinámica se define con una función de entrada rectangular (pulso), la carga ejerce una presión sobre la viga de 0.1[MPa].

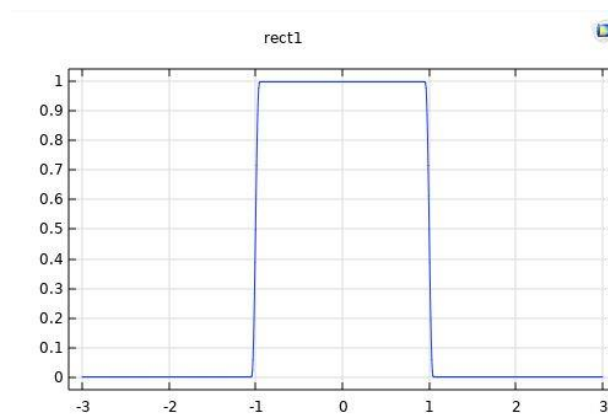


Figura 49 Función de entrada rectangular.

### 6.2.2. Materiales.

El material que se ha definido para la viga es de hormigón o concreto.

Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grupo de propiedad
<input checked="" type="checkbox"/> Densidad	rho	2300[kg/...	kg/m <sup>3</sup>	Básico
<input checked="" type="checkbox"/> Módulo de Young	E	25e9[Pa]	Pa	Módulo de Young y coefici...
<input checked="" type="checkbox"/> Coeficiente de Poisson	nu	0.20	1	Módulo de Young y coefici...
Coeficiente de expansión térmica	alpha_i...	10e-6[1/K]	1/K	Básico
Conductividad térmica	k_iso ; ...	1.8[W/(...	W/(m·K)	Básico
Capacidad térmica con presión c...	Cp	880[J/(kg...	J/(kg·K)	Básico

Figura 50 Definición del material para la viga.



### 6.2.3. Física, Cargas y Restricciones.

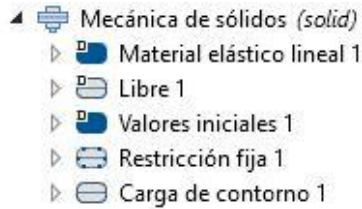


Figura 51 Mecánica de sólidos.

La viga se comporta como material elástico lineal. Los soportes de la viga tienen restricción fija, es decir, no sufren desplazamientos. Y la fuerza que ejerce las diferentes cargas sobre la viga se define como condicional, tal y como se muestra a continuación:



Figura 52 Definición de carga como condicional.

### 6.2.4. Estudio en el dominio del tiempo.

El estudio comienza en  $t=0$ , y acaba cuando la primera carga alcanza el final de la viga.

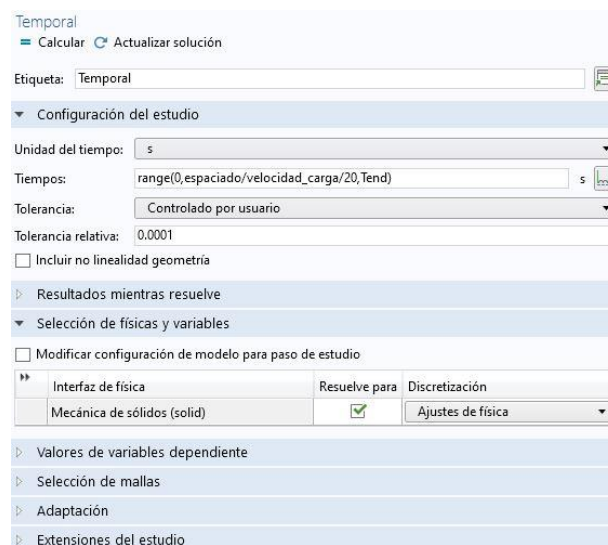


Figura 53 Estudio en el dominio del tiempo.

### 6.2.4.1. Obtención de Datos.

Se ha obtenido las aceleraciones, velocidad y desplazamientos registradas en 15 puntos de la viga, provocados por las cargas dinámicas definidas. Los datos se encuentran en el **Anexo II: Reporte de la Simulación Viga Generado por COMSOL**.

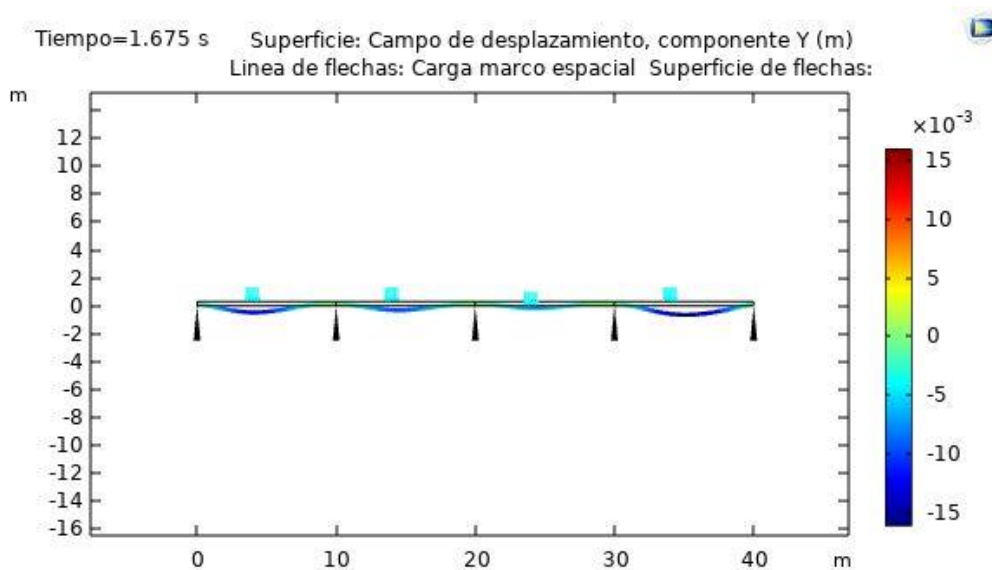


Figura 54 Desplazamientos.

Dentro del estudio en el dominio del tiempo se ha realizado un estudio paramétrico (barrido paramétrico). Esto, se ha realizado para conocer como varía el desplazamiento que sufre la viga, frente a la velocidad de la carga y la distancia entre pulsos (entre cargas).

Barrido paramétrico

Calcular Actualizar solución

Etiqueta: Barrido paramétrico

Configuración del estudio

Tipo de barrido: Combinaciones especificadas

Nombre de parámetro	Lista de valores de parámetros	Unidad de los parámetros
velocidad_carga (velocidad c)	20[m/s] velocidad_critica velocidad_critica velocidad_critica	m/s
espacio_pulsos (distancia en	longitud_total*2 longitud_total*2 espaciado*2 espaciado	m

Figura 55 Barrido Paramétrico.

La velocidad crítica  $v_c = 2wf_0 = 89,699$  [m/s], hará que la primera frecuencia natural se excite, ya que la carga incrementará las deformaciones del tramo. Esta vibra en su primera frecuencia natural. La carga recorre la longitud de un tramo durante medio período de la vibración y, por lo tanto, siempre excitará la viga en la misma fase, entrando en resonancia. [24]

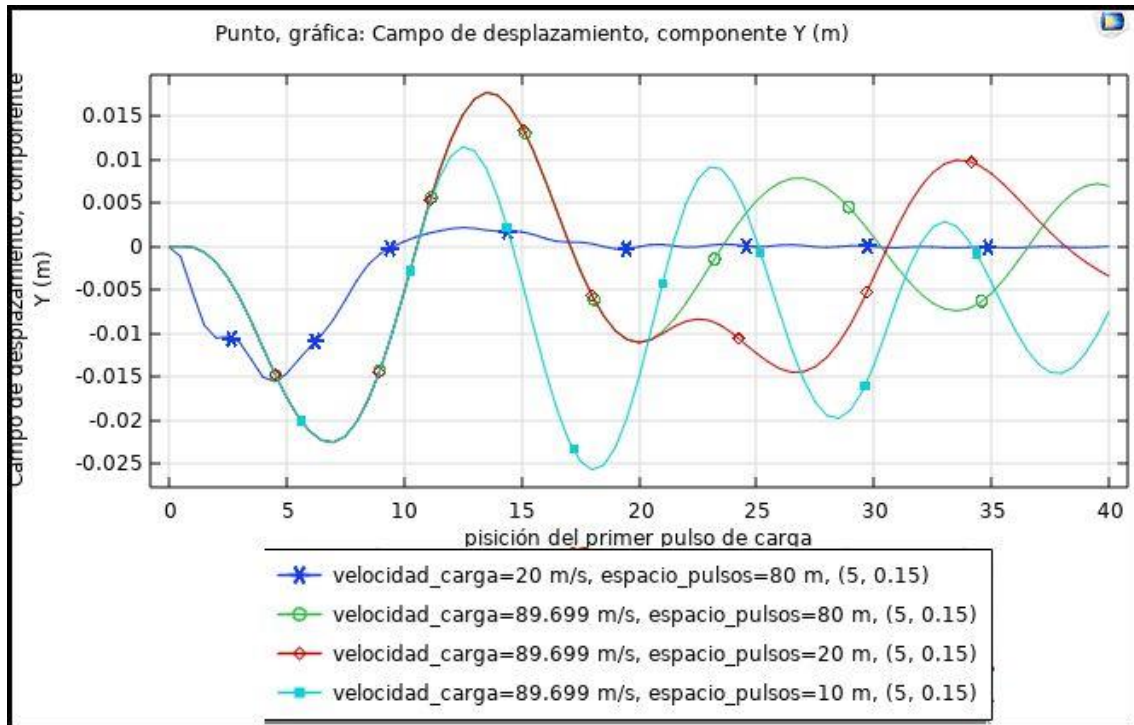


Figura 56 Gráfica de desplazamientos.

### 6.2.5. Acceso al informe generado por COMSOL Multiphysics

En el siguiente link ([Informe](#)) podrán tener acceso al informe completo generado por COMSOL, donde podrán visualizar las declaraciones realizadas en la simulación junto con los datos obtenidos.

## 7. Aplicación Industrial.

La rápida mejora de la capacidad informática y la puesta en marcha de la infraestructura de comunicación 5G, junto con la combinación de tecnologías, IoT, computación en la nube y el procesamiento de grandes volúmenes de datos, permiten no sólo la aparición del mantenimiento predictivo, sino que son el nuevo foco de investigación y desarrollo de la próxima etapa en la industria [29].

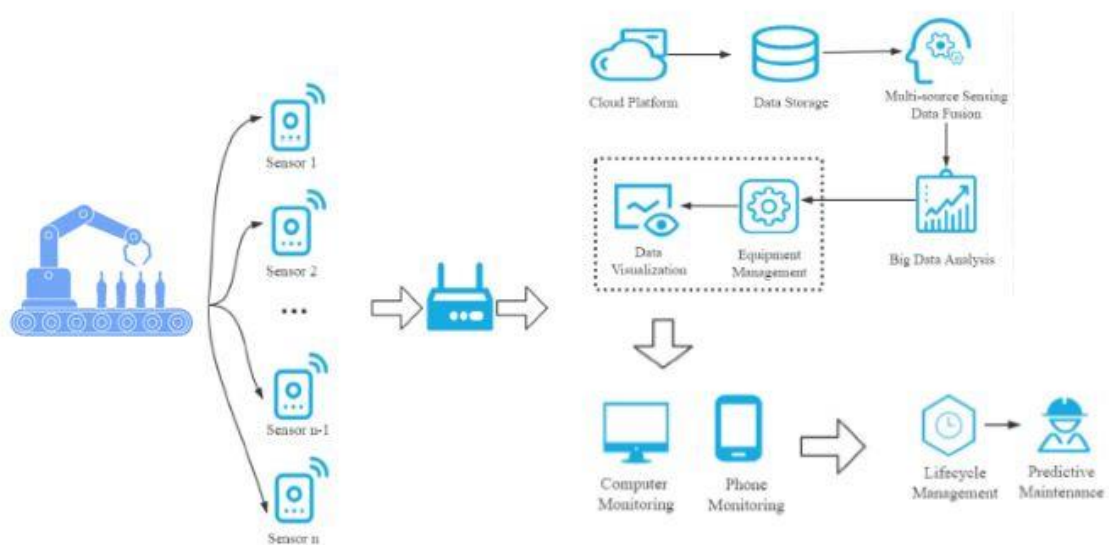


Turbinas eólicas, motores Diesel, cajas de cambios, rodamientos y otros equipos mecánicos generalmente requieren de un mantenimiento manual y la reparación de averías. [30][31][32]. Además, debido a la incapacidad de diagnosticar la falla del equipo mecánico a tiempo, ocurren accidentes laborales ocasionados por la falla mecánica. [29]

En un entorno monitorizado, o un entorno IoT, se puede recopilar una gran cantidad de datos procedentes de dispositivos mecánicos en un corto periodo de tiempo.

Cómo utilizar los datos recopilados de manera eficiente, y mejorar la precisión de la predicción de fallas, es un problema de las ciencias de datos. [29]. Al igual que en el monitoreo estructural, se suelen utilizar múltiples sensores relacionados con la vibración, aceleración, temperatura, presión, entre otros. Esta acción de monitoreo, está cambiando la forma en que se toman las decisiones en la industria, en áreas importantes como la programación, gestión del mantenimiento y mejora de la calidad.[33]

En la industria se exige un servicio de mantenimiento integral en sus equipos de producción, para garantizar una alta disponibilidad y evitar tiempos de inactividad de la máquina. En este contexto, el aprendizaje automático se puede utilizar de manera eficiente, para una toma de decisiones de mantenimiento óptima. La combinación de los datos con información sobre las fallas crea un conjunto de datos útiles e información para la gestión del mantenimiento.



**Figura 57** Diagrama mantenimiento predictivo en la industria

La arquitectura del procedimiento del mantenimiento predictivo, es la que se muestra en la figura anterior (Fig.57). Comprende tres módulos: (I) adquisición de datos (II) módulo de procesamiento de datos y ciencia de datos y (III) actuación en el mantenimiento. [33]

Además, no solo el monitoreo y las ciencias de datos aportan ventajas competitivas y mejores tomas de decisiones a la industria. La simulación de procesos, simulaciones de la maquinaria ante posibles demandas de producción y/o posibles accidentes, y el modelado de productos, están a la orden del día. La mayor parte de ellos, hacen uso de la simulación por el método de elementos finitos (FEM). Esto ayuda a conocer con anterioridad el comportamiento de las instalaciones, de los productos, obtener datos relevantes y tomar así decisiones acertadas. Logrando significativas reducciones en costes y altos estándares de calidad.

## 8. Conclusiones.

Un ingeniero, entre sus funciones, debe tomar decisiones acertadas que estén fundamentadas en metodologías científicas y debe seguir un procedimiento en función de los datos obtenidos para alcanzar una solución que no exceda en



costes. Es por ello, que tanto la simulación numérica como la ciencia de datos toman un papel crucial en la industria y en la sociedad, ya que se quiere conocer con antelación comportamientos y acontecimientos futuros para la toma de decisiones.

En la industria se exige un servicio de mantenimiento integral en sus equipos de producción, para garantizar una alta disponibilidad y evitar tiempos de inactividad en la maquinaria. En este contexto, el aprendizaje automático se puede utilizar de manera eficiente, para una toma de decisiones de mantenimiento óptima. La combinación del monitoreo junto con información sobre las fallas crea un conjunto de datos útiles e información para la gestión del mantenimiento.

En este trabajo fin de grado se han realizado dos simulaciones, con el objetivo de obtener datos que se asemejen a datos obtenidos en comportamientos reales en estructuras civiles. En cualquier caso, si la diferencia de las simulaciones con la realidad es amplia, no tiene mayor trascendencia, ya que el objetivo principal es aportar datos que procedan de una metodología científica, es decir, si ponemos como ejemplo la obtención de un desplazamiento, que este desplazamiento sea fruto de una carga o una acción externa al sistema.

Lo interesante es obtener datos que puedan ser clasificados, que puedan ser reconocidos por un algoritmo, el cual pueda predecir si se trata de un desplazamiento provocado por el paso de un vehículo, de varios, de un camión, si se trata del viento, etc. En este trabajo fin de grado se han obtenido alrededor de 6800 datos, sin variar ninguna característica establecida para el sistema como: dimensiones, propiedades de los materiales, mayor número de cargas, diferente climatología, diferentes restricciones en el modelado, etc.

Una de líneas futuras de este proyecto es cambiar las propiedades de los materiales que forman el sistema, simulando el deterioro que sí se presenta en la realidad. El objetivo de este cambio, es contar con un mayor volumen de datos, para que el algoritmo pueda ser entrenado, alcance una mayor precisión, y pueda identificar no solo lo que sucede en la estructura, sino las anomalías pertinentes.

Para finalizar, conocer qué datos son los adecuados para la creación de un algoritmo predictivo en el mantenimiento, qué análisis se utilizan hoy en día para la identificación de daños, y aplicar los conocimientos adquiridos en la carrera para logra una simulación de un modelo de elementos finitos, me ha ayudado a



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



comprender la importancia de esta rama en la ingeniería, y como puede ayudar a la toma de decisiones.



## Bibliografía

- [1] A. B. Noel, A. Abdaoui, T. Elfouly, M. H. Ahmed, A. Badawy, and M. S. Shehata, "Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1403–1423, Jul. 2017.
- [2] C. Bigoni and J. S. Hesthaven, "Simulation-based Anomaly Detection and Damage Localization: an application to Structural Health Monitoring," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 363, May 2020.
- [3] "NDT avanzado y NDE - Acuren." [Online]. Available: <https://www.acuren.com/inspection/advanced-nde-ndt/>. [Accessed: 26-Apr-2020].
- [4] M. Gresil, A. Poohsai, and N. Chandarana, "Guided Wave Propagation and Damage Detection in Composite Pipes Using Piezoelectric Sensors," in *Procedia Engineering*, 2017, vol. 188, pp. 148–155.
- [5] X. Lin and F. G. Yuan, "Diagnostic Lamb waves in an integrated piezoelectric sensor/actuator plate: analytical and experimental studies," *Smart Mater. Struct.*, vol. 10, no. 5, pp. 907–913, Oct. 2001.
- [6] J. B. Ihn and F. K. Chang, "Detection and monitoring of hidden fatigue crack growth using a built-in piezoelectric sensor/actuator network: I. Diagnostics," *Smart Mater. Struct.*, vol. 13, no. 3, pp. 609–620, Jun. 2004.
- [7] S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, and D. W. Shevitz, "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review," Los Alamos, NM, May 1996.
- [8] Y. Ou, E. N. Chatzi, V. K. Dertimanis, and M. D. Spiridonakos,





- “Vibration-based experimental damage detection of a small-scale wind turbine blade,” *Struct. Heal. Monit. An Int. J.*, vol. 16, no. 1, pp. 79–96, Jan. 2017.
- [9] J. T. Kim, Y. S. Ryu, H. M. Cho, and N. Stubbs, “Damage identification in beam-type structures: Frequency-based method vs mode-shape-based method,” *Eng. Struct.*, vol. 25, no. 1, pp. 57–67, Jan. 2003.
- [10] K. Zgonc and J. D. Achenbach, “A neural network for crack sizing trained by finite element calculations,” *NDT E Int.*, vol. 29, no. 3, pp. 147–155, Jun. 1996.
- [11] “Dinámica estructural – Brüel & Kjær.” [Online]. Available: <https://www.bksv.com/es-ES/Applications/product-vibration/structural-dynamics>. [Accessed: 05-Mar-2020].
- [12] N. Xu *et al.*, “A wireless sensor network for structural monitoring,” in *SenSys’04 - Proceedings of the Second International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 2004, pp. 13–24.
- [13] J. P. Lynch, “A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring,” *Shock Vib. Dig.*, vol. 38, no. 2, pp. 91–128, Mar. 2006.
- [14] J. Ou and H. Li, “Structural health monitoring in mainland china: Review and future trends,” *Structural Health Monitoring*, vol. 9, no. 3, pp. 219–231, May-2010.
- [15] S.-J. Lee, I. You, G. Zi, and D.-Y. Yoo, “Experimental Investigation of the Piezoresistive Properties of Cement Composites with Hybrid Carbon Fibers and Nanotubes,” *Sensors*, vol. 17, no. 11, p. 2516, Nov. 2017.



- [16] H. N. Li, D. S. Li, and G. B. Song, "Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering," *Engineering Structures*, vol. 26, no. 11. Elsevier BV, pp. 1647–1657, 2004.
- [17] "AOMS LumiCon | Monitoreo inalámbrico de concreto." [Online]. Available: [https://www.aoms-tech.com/concrete-monitoring/?utm\\_adgroup=cm&utm\\_keyword=b-%2Bconcrete%2Bmonitoring&utm\\_device=c&utm\\_adposition=&utm\\_campaign=skag&utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_content=v1&utm\\_term=%2Bconcrete%2Bmonitoring&hsa\\_src=g&hsa\\_tgt=kwd-423031114445&hsa\\_ad=432532344956&hsa\\_net=adwords&hsa\\_mt=b&hsa\\_acc=8138420402&hsa\\_kw=%2Bconcrete%2Bmonitoring&hsa\\_ver=3&hsa\\_grp=101611451518&hsa\\_cam=9584136413&gclid=Cj0KCQjwy6T1BRDXARIsAIqCTXq8kHHjXvMv8NX9dZwTPx8hGpAziOpP9q2xcVqtTVHliwxgyj1mvrIaAuIuEALw\\_wcB](https://www.aoms-tech.com/concrete-monitoring/?utm_adgroup=cm&utm_keyword=b-%2Bconcrete%2Bmonitoring&utm_device=c&utm_adposition=&utm_campaign=skag&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_content=v1&utm_term=%2Bconcrete%2Bmonitoring&hsa_src=g&hsa_tgt=kwd-423031114445&hsa_ad=432532344956&hsa_net=adwords&hsa_mt=b&hsa_acc=8138420402&hsa_kw=%2Bconcrete%2Bmonitoring&hsa_ver=3&hsa_grp=101611451518&hsa_cam=9584136413&gclid=Cj0KCQjwy6T1BRDXARIsAIqCTXq8kHHjXvMv8NX9dZwTPx8hGpAziOpP9q2xcVqtTVHliwxgyj1mvrIaAuIuEALw_wcB). [Accessed: 29-Apr-2020].
- [18] "DESARROLLAN SENSOR PARA MONITOREAR LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO – UNIVERSITAM." [Online]. Available: <https://universitam.com/academicos/noticias/desarrollan-sensor-para-monitorear-la-corrosion-en-estructuras-de-concreto/>. [Accessed: 29-Apr-2020].
- [19] "Transductores diferenciales de variación lineal." [Online]. Available: <https://es.omega.com/technical-learning/transductores-de-desplazamiento-variable-lineal.html>. [Accessed: 29-Apr-2020].
- [20] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication,"



*Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, no. 10, pp. 647–649, May 1978.

- [21] B. Peeters and C. E. Ventura, “Comparative study of modal analysis techniques for bridge dynamic characteristics,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 17, no. 5, pp. 965–988, Sep. 2003.
- [22] S. W. Doebling, C. R. Farrar, and M. B. Prime, “A summary review of vibration-based damage identification methods,” *Shock Vib. Dig.*, vol. 30, no. 2, pp. 91–105, 1998.
- [23] “Puente Truss Pratt.” [Online]. Available: <https://www.comsol.com/model/pratt-truss-bridge-8511>. [Accessed: 24-May-2020].
- [24] “How to Make Boundary Conditions Conditional in Your Simulation | COMSOL Blog.” [Online]. Available: <https://www.comsol.com/blogs/how-to-make-boundary-conditions-conditional-in-your-simulation/>. [Accessed: 24-May-2020].
- [25] “COMSOL Multiphysics 5.5.” [Online]. Available: <https://www.addlink.es/productos/comsol-multiphysics>. [Accessed: 08-May-2020].
- [26] “Libro ESTRUCTURAS DE ACERO 2. Uniones y sistemas estructurales. 2ªEdición Ampliada y Actualizada - Libros Técnicos online - Comprar - Precio.” [Online]. Available: <https://belliscovirtual.com/fondo-editorial-general/34-estructuras-de-acero-2-uniones-y-sistemas-estructurales-2edicion-ampliada-y-actualizada.html>. [Accessed: 08-May-2020].
- [27] “Software de modelado COMSOL Multiphysics®.” [Online]. Available: <https://www.comsol.com/>. [Accessed: 18-May-2020].



- [28] “Modelos de cargas para puentes.” [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/vincent250miles/modelos-de-cargas-para-puentes>. [Accessed: 26-May-2020].
- [29] M. Huang, Z. Liu, and Y. Tao, “Mechanical fault diagnosis and prediction in IoT based on multi-source sensing data fusion,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 102, Jul. 2020.
- [30] Y. Pan, R. Hong, J. Chen, J. Singh, and X. Jia, “Performance degradation assessment of a wind turbine gearbox based on multi-sensor data fusion,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 137, pp. 509–526, Jul. 2019.
- [31] N. Sawalhi, R. B. Randall, and D. Forrester, “Separation and enhancement of gear and bearing signals for the diagnosis of wind turbine transmission systems,” *Wind Energy*, vol. 17, no. 5, pp. 729–743, 2014.
- [32] X. Li, W. Zhang, and Q. Ding, “Diagnóstico de fallas de dominio cruzado de rodamientos de elementos rodantes utilizando redes neuronales generativas profundas,” *IEEE Trans. Ind.*, 2018.
- [33] M. Calabrese *et al.*, “SOPHIA: An event-based IoT and machine learning architecture for predictive maintenance in industry 4.0,” *Inf.*, vol. 11, no. 4, Apr. 2020.
- [34] “Teoría de estructuras 01.” [Online]. Available: <http://www.demecanica.com/TeoriaEst/TeoriaEst.htm>. [Accessed: 29-Apr-2020].
- [35] M. Paz, *Dinámica Estructural*.



### **Anexo I: Reporte de la Simulación Puente Generado por COMSOL.**

El informe (un reporte completo de la simulación junto con la ampliación “.mph”) y los datos en archivo “.csv” se encuentran en el CD proporcionado a la Universidad de Málaga. Además, en el apartado **6.1.8. Acceso al informe generado por COMSOL Multiphysics**, tienen un link de acceso de descarga del informe completo.

### **Anexo II: Reporte de la Simulación Viga Generado por COMSOL.**

El informe (un reporte completo de la simulación junto con la ampliación “.mph”) y los datos en archivo “.csv” se encuentran en el CD proporcionado a la Universidad de Málaga. Además, en el apartado **6.2.5. Acceso al informe generado por COMSOL Multiphysics**, tienen un link de acceso de descarga del informe completo.