



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERAS INDUSTRIALES**

Grado en Ingeniería Mecánica

**PROTOTIPADO Y SIMULACION DE UNA
MAQUETA DE PUENTE TIPO WARREN
HECHA CON PALITOS DE MADERA**

Autor:

Carlo André Chumacero Goytendía

Tutores:

Foces Mediavilla, Antonio

Magdaleno González, Álvaro

Departamento: Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno, Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras.

Valladolid, mayo 2019



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer al Dr. Antolín Lorenzana Ibán su tiempo, dedicación y orientación a lo largo del desarrollo de este proyecto en el laboratorio de estructuras. Donde he podido aplicar conocimientos teóricos adquiridos durante la carrera, además de aprender y desarrollar mis capacidades en este mundo de las estructuras. Por otra parte, agradecer a Álvaro Magdaleno González la ayuda brindada durante el desarrollo de este proyecto.

Agradecer a mis padres Regina y Winston por toda la ayuda incondicional brindada en todo momento a lo largo de todo este tiempo, a quienes dedico este proyecto.

A mi familia por siempre darme su apoyo y creer en mí.

A mis amigos y compañeros con los que he compartido todas las alegrías y pesares en esta larga y dura carrera.

Por esto y mucho más gracias a todos.



Resumen

El presente Trabajo Fin de Grado se centra en estudiar las propiedades mecánicas, las frecuencias propias y coeficientes de amortiguamiento en una estructura esbelta hecha de madera sometida a variaciones ambientales y de carga. Para ello, se llevará a cabo el prototipado de una estructura en celosía de tipología Warren hecha con palitos de helado en el cual se realizan en la fase experimental ensayos estáticos y dinámicos para estudiar las propiedades mecánicas y el comportamiento de este material sometido a distintas cargas con variación de las condiciones ambientales. Posteriormente se realizará una simulación mediante un programa de elementos finitos que nos ayudará a estimar las propiedades mecánicas del material.

Palabras Clave

Estructura de Madera, Frecuencias propias, Coeficientes de Amortiguamiento, Propiedades Mecánicas, SAP 2000.

Abstract

This Final project degree is focused on the study of the mechanical properties, resonance frequencies and damping coefficients in a wooden slender structure subjected to environmental and load variations. For doing so, the prototype of a Warren typology structure has been manufactured with craft sticks in which the experimental phase will be carried out. Static and dynamic tests will be performed in order to study the mechanical properties and the behaviour of this material under different loads with variations of environmental conditions. After this, a finite element simulation will be carried out, which will help to estimate the mechanical properties of this material.

Key Words

Wooden structures, Natural frequencies, damping coefficients, Mechanical Properties, SAP 2000.



Índice

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 1..... | 21 |
| Introducción y Objetivos | 21 |
| 1.1 Introducción | 21 |
| 1.2 Objetivos..... | 21 |
| 1.2.1 Objetivos Principales | 21 |
| 1.2.2 Objetivos Secundarios..... | 22 |
| Capítulo 2..... | 23 |
| Equipamiento..... | 23 |
| 2.1 Piezas para la construcción de las maquetas | 23 |
| 2.1.1 Palitos de helado | 23 |
| 2.1.2 Barras termofusibles y pistola | 24 |
| 2.1.3 Estructura de Maquetación..... | 24 |
| 2.2.1 Medidor láser. | 27 |
| 2.2.2 Higrómetro..... | 28 |
| 2.2.3 Termómetro..... | 28 |
| 2.2.4 Báscula..... | 29 |
| 2.2.5 Tarjeta de adquisición de datos. | 29 |
| Capítulo 3..... | 33 |
| Prototipado..... | 33 |
| 3.1 Diseño y descripción de la estructura | 33 |
| 3.2 Selección y descripción del material | 34 |
| 3.3 Proceso de montaje..... | 36 |
| 3.4 Estructuras obtenidas | 46 |
| Capítulo 4..... | 47 |
| Ensayos y obtención de datos..... | 47 |
| 4.1.-Metodo de obtención de la constante de rigidez, frecuencias propias de la estructura y coeficientes de amortiguamiento..... | 49 |
| 4.1.1 Excel..... | 54 |
| 4.1.2 Matlab..... | 55 |



| | |
|---|------------|
| 4.2 Primer ensayo T= 19,5°C y Hm=0%. | 65 |
| 4.3 Estudio del comportamiento de la estructura a lo largo de un día..... | 69 |
| 4.4 Estudio del comportamiento de la estructura. | 70 |
| 4.5 Segundo ensayo variando la humedad T= 21,4°C y Hm=61%. | 71 |
| 4.6 Tercer ensayo variando la humedad T= 21,6°C y Hm=54%..... | 74 |
| 4.7 Cuarto ensayo variando la humedad T= 21,6°C y Hm=52%..... | 77 |
| 4.8 Quinto ensayo variando la humedad T= 19,9°C y Hm=4%. | 80 |
| 4.9 Sexto ensayo variando la humedad T= 19,9°C y Hm=60,6%. | 83 |
| 4.10 Séptimo ensayo variando la humedad T= 19,9°C y Hm=54,6%..... | 86 |
| 4.11 Octavo ensayo variando la humedad T= 19,8°C y Hm=51,2%..... | 89 |
| 4.12 Noveno ensayo variando la humedad T= 19,8°C y Hm=45,6%..... | 92 |
| 4.13 Décimo ensayo variando la temperatura T= 13,9°C y Hm=1,5%. | 95 |
| 4.14 Estudio de la variación de las condiciones de temperatura. | 98 |
| 4.15 Undécimo ensayo variando la temperatura T= 21,2°C y Hm=1,5%.... | 99 |
| Capítulo 5..... | 103 |
| Modelado y Simulación | 103 |
| 5.1 Cómo modelar con SAP 2000..... | 103 |
| 5.1.1 Qué es SAP 2000..... | 103 |
| 5.1.2 Modelar con SAP2000. | 104 |
| 5.2 Definición del material. | 108 |
| 5.3 Definición de las secciones..... | 110 |
| 5.4 Simplificación del modelo. | 112 |
| 5.5 Ajuste de las características del modelo | 118 |
| 5.5.1 Simplificación Modelo 2D | 118 |
| 5.5.2 Simplificación del Modelo en 3 dimensiones..... | 129 |
| 5.5.3 Comparación de los modelos simplificados. | 140 |
| Capítulo 6..... | 141 |
| Conclusiones y Líneas de Futuro | 141 |
| 6.1 Objetivos..... | 141 |
| 6.2 Conclusiones..... | 142 |
| 6.2.1 Condiciones Ambientales y Humedad en los ensayos..... | 142 |
| 6.2.2 Constate de Rigidez de la estructura. | 143 |
| 6.2.3 Frecuencias Propias del Sistema. | 144 |



| | |
|--|------------|
| 6.2.4 Coeficientes de Amortiguamiento. | 145 |
| 6.2 Líneas futuras | 146 |
| Bibliografía y webgrafía | 147 |
| Anexos | 149 |
| Anexo 1: Puentes mellizos | 151 |
| 1.1.-Ensayo de obtención de rigidez en los puentes mellizos..... | 152 |
| Anexo 2: Madera laminada encolada | 161 |
| 2.1 Definición..... | 161 |
| 2.2 Aplicaciones..... | 161 |
| 2.3 Materiales..... | 162 |
| 2.4 Tipos..... | 163 |
| 2.5 Dimensiones piezas y características de las láminas. | 163 |
| 2.6 Propiedades..... | 164 |
| 2.7 Durabilidad. | 166 |
| 2.8 Reacción al fuego..... | 166 |
| 2.9 Resistencia al fuego..... | 167 |
| 2.10 Emisión de formaldehído. | 167 |
| 2.11 Resistencia química. | 167 |
| 2.12 Acabado superficial - Mantenimiento en aplicaciones al exterior. | 167 |
| 2.13 Fabricación, almacenamiento y transporte. | 167 |
| 2.14 Marcas de calidad. | 168 |



Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| FIGURA 1: PALITOS DE HELADO. | 23 |
| FIGURA 2: PISTOLA Y BARRAS TERMOFUSIBLES. | 24 |
| FIGURA 3: SOPORTES. | 24 |
| FIGURA 4: CONJUNTO DE SOPORTE UNIDO. | 25 |
| FIGURA 5: GUÍAS CORTADAS. | 25 |
| FIGURA 6: SOPORTE Y GUÍAS FIJADAS. | 26 |
| FIGURA 7: MEDIDOR LÁSER. | 27 |
| FIGURA 8: HIGRÓMETRO. | 28 |
| FIGURA 9: TERMÓMETRO. | 28 |
| FIGURA 10: BASCULA. | 29 |
| FIGURA 11: SIRIUS HD-STG. | 29 |
| FIGURA 12: CONEXIONES SIRIUS HD-STG. | 30 |
| FIGURA 13: CONECTOR MACHO LÁSER CONECTADO A SIRIUS HD-STG. | 30 |
| FIGURA 14: DETALLE DE CONEXIÓN DE LA SALIDA DE ALIMENTACIÓN DEL SIRIUS HD-STG CON EL LÁSER. | 31 |
| FIGURA 15: INTERFAZ DEWESOFT X3 SP4. | 31 |
| FIGURA 16: INTERFAZ DE EXPORTACIÓN DE DATOS DEWESOFT SP4. | 32 |
| FIGURA 17: PUENTE FERROVIARIO CON TIPOLOGÍA WARREN. | 33 |
| FIGURA 18: MAQUETA DE VIADUCTO CON TIPOLOGÍA WARREN REALIZADA CON LEGGO. | 33 |
| FIGURA 19: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA SEGÚN LA ORIENTACIÓN DE LA FIBRA. | 34 |
| FIGURA 20: PALITOS DE HELADO. | 36 |
| FIGURA 21: PALITOS CON DEFECTOS. | 36 |
| FIGURA 22: CARACTERIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LOS PALITOS CON UN PIE DE REY. | 37 |
| FIGURA 23: MONTAJE DE PRUEBA DE LAS TRIANGULACIONES DE LA CELOSÍA. | 38 |
| FIGURA 24: GUÍAS CORTADAS. | 39 |
| FIGURA 25: MONTAJE DE CELOSÍA DE PRUEBA. | 39 |
| FIGURA 26: FIJACIÓN DE GUÑIAS Y SOPORTES. | 40 |
| FIGURA 27: MONTAJE DE 4 CELOSÍAS PARA LOS PUENTES MELLIZOS. | 40 |
| FIGURA 28: RIGIDIZACIÓN DE LAS UNIONES EN LAS CELOSÍAS. | 41 |
| FIGURA 29: MONTAJE ESTRUCTURA DE SOPORTE. | 41 |
| FIGURA 30: MONTAJE DE LA ESTRUCTURA CON LOS SOPORTES. | 42 |
| FIGURA 31: VISTA EN PLANTA Y PERFIL DE LA ESTRUCTURA. | 43 |
| FIGURA 32: PUENTES MELLIZOS SOMETIDOS A CARGA DE 9 TUERCAS. | 43 |
| FIGURA 33: PUENTE MELLIZO DE 1,62 M DE LUZ. | 44 |
| FIGURA 34: MONTAJE DE LAS UNIONES PERPENDICULARES DE LOS NUDOS DE LAS CELOSÍAS. | 44 |
| FIGURA 35: ESTRUCTURA DE 4,10 M DE LUZ. | 45 |
| FIGURA 36: PUENTES MELLIZOS Y PUENTE FINAL. | 46 |
| FIGURA 37: DESPLAZAMIENTO DE UNA VIGA SOMETIDA A UNA CARGA EN LA SECCIÓN MEDIA Y OBTENCIÓN DE LA FLECHA. | 47 |
| FIGURA 38: VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA NATURAL. | 48 |



FIGURA 39: VIGA SIMPLEMENTE APOYADA CON CONCENTRACIÓN DE MASA EN LA SECCIÓN MEDIA.....48

FIGURA 40: PUENTE UBICADO EN LA ZONA DE ENSAYOS.....49

FIGURA 41: LÁSER UBICADO EN LA SECCIÓN MEDIA DEL PUENTE50

FIGURA 42: SIRIUS HD-STG CONECTADO A UN PORTÁTIL Y REGISTRANDO EN DEWESOFT.
.....50

FIGURA 43: CONFIGURACIÓN DEL CANAL 8 EN LA INTERFAZ DE DEWESOFT.....51

FIGURA 44: PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN DEL LÁSER.....52

FIGURA 45: REGISTRO DE LA FLECHA DEL PUENTE FRENTE A EXCITACIONES EXTERNAS.....53

FIGURA 46: INTERFAZ DE EXPORTACIÓN DEL PROGRAMA DEWESOFT.....53

FIGURA 47: DATOS IMPORTADOS Y REPRESENTADOS EN EXCEL.....54

FIGURA 48: INTERFAZ DE IMPORTACIÓN DE DATOS DE MATLAB.....55

FIGURA 49: REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS IMPORTADOS A MATLAB.....56

FIGURA 50: SELECCIÓN DE LOS INTERVALOS DE TIEMPO EN LOS QUE SE REALIZARÁ EL AJUSTE.
.....56

FIGURA 51: BARRA DE HERRAMIENTAS DE MATLAB.....57

FIGURA 52: PROGRAMACIÓN Y REPRESENTACIÓN DE UN INTERVALO DE ESTUDIO.....57

FIGURA 53: INTERFAZ DEL MÓDULO CURVE FITTING TOOL DE MATLAB.....58

FIGURA 54: VENTANA DE LAS OPCIONES DE AJUSTE PARA MEJORAR LA PRECISIÓN.....59

FIGURA 55: REPRESENTACIÓN DEL AJUSTE Y LOS VALORES OBTENIDOS POR MATLAB.....60

FIGURA 56: INTERFAZ DEL FITTING TOOL DE MATLAB.....61

FIGURA 57: INTERFAZ DE MATLAB.....62

FIGURA 58: VALORES DE LOS EXPERIMENTOS CON 3,4,5 Y 6 TUERCAS.....63

FIGURA 59: VALORES DE LOS EXPERIMENTOS CON 0,1,2 Y 3 TUERCAS.....64

FIGURA 60: GRÁFICA DE LA VARIACIÓN DE LA FLECHA EN UN INTERVALO DE TIEMPO DEL
PRIMER ENSAYO.....65

FIGURA 61: GRÁFICA DE DEFORMACIÓN FRENTE A LA CARGA DEL PRIMER ENSAYO.....66

FIGURA 62: EVOLUCIÓN DE LA FLECHA DE LA ESTRUCTURA A LO LARGO DE UN DÍA EN EL
LABORATORIO.....69

FIGURA 63: EVOLUCIÓN DE LA FLECHA DE LA ESTRUCTURA CARGADA EN UN INTERVALO DE
TIEMPO.....70

FIGURA 64: GRÁFICA DE LA VARIACIÓN DE LA FLECHA EN UN INTERVALO DE TIEMPO DEL
SEGUNDO ENSAYO.....71

FIGURA 65: GRÁFICA DE DESPLAZAMIENTO FRENTE A LA CARGA DEL SEGUNDO ENSAYO.....72

FIGURA 66: GRÁFICA DE LA VARIACIÓN DE LA FLECHA EN UN INTERVALO DE TIEMPO DEL TERCER
ENSAYO.....74

FIGURA 67: GRÁFICA DE DESPLAZAMIENTO FRENTE A LA CARGA DEL TERCER ENSAYO.....75

FIGURA 68: GRÁFICA DE LA VARIACIÓN DE LA FLECHA EN UN INTERVALO DE TIEMPO DEL
CUARTO ENSAYO.....77

FIGURA 69: GRÁFICA DE DESPLAZAMIENTO FRENTE A LA CARGA DEL CUARTO ENSAYO.....78

FIGURA 70: GRÁFICA DE LA VARIACIÓN DE LA FLECHA EN UN INTERVALO DE TIEMPO DEL QUINTO
ENSAYO.....80

FIGURA 71: GRÁFICA DE DESPLAZAMIENTO FRENTE A LA CARGA DEL QUINTO ENSAYO.....81

FIGURA 72: GRÁFICA DE LA VARIACIÓN DE LA FLECHA EN UN INTERVALO DE TIEMPO DEL SEXTO
ENSAYO.....83



FIGURA 73: GRÁFICA DE DESPLAZAMIENTO FRENTE A LA CARGA DEL SEXTO ENSAYO.....84

FIGURA 74: GRÁFICA DE LA VARIACIÓN DE LA FLECHA EN UN INTERVALO DE TIEMPO DEL
SÉPTIMO ENSAYO.....86

FIGURA 75: GRÁFICA DE DESPLAZAMIENTO FRENTE A LA CARGA DEL SÉPTIMO ENSAYO.87

FIGURA 76: GRÁFICA DE LA VARIACIÓN DE LA FLECHA EN UN INTERVALO DE TIEMPO DEL
OCTAVO ENSAYO.89

FIGURA 77: GRÁFICA DE DESPLAZAMIENTO FRENTE A LA CARGA DEL OCTAVO ENSAYO.90

FIGURA 78: GRÁFICA DE LA VARIACIÓN DE LA FLECHA EN UN INTERVALO DE TIEMPO DEL
NOVENO ENSAYO.92

FIGURA 79: GRÁFICA DE DESPLAZAMIENTO FRENTE A LA CARGA DEL NOVENO ENSAYO.....93

FIGURA 80: GRÁFICA DE LA VARIACIÓN DE LA FLECHA EN UN INTERVALO DE TIEMPO DEL
DÉCIMO ENSAYO.95

FIGURA 81: GRÁFICA DE DESPLAZAMIENTO FRENTE A LA CARGA DEL DÉCIMO ENSAYO.96

FIGURA 82: EVOLUCIÓN DE LA FLECHA DE LA ESTRUCTURA EN EL LABORATORIO.98

FIGURA 83: GRÁFICA DE LA VARIACIÓN DE LA FLECHA EN UN INTERVALO DE TIEMPO DEL
UNDÉCIMO ENSAYO.99

FIGURA 84: GRÁFICA DE DESPLAZAMIENTO FRENTE A LA CARGA DEL UNDÉCIMO ENSAYO. . 100

FIGURA 85: BARRA DE HERRAMIENTAS DE SAP 2000. 104

FIGURA 86: VENTANA CON LAS OPCIONES DE MODELADO SEGÚN LA TIPOLOGÍA. 105

FIGURA 87: OPCIONES DE MALLADO DE SAP 2000..... 106

FIGURA 88: REPRESENTACIÓN DEL MALLADO EN 2 DIMENSIONES..... 106

FIGURA 89: VISTA DE PERFIL DEL MALLADO EN 2 DIMENSIONES. 107

FIGURA 90: VENTANA DE CONFIGURACIÓN DE MALLADO..... 107

FIGURA 91: VENTANA DE CARACTERÍSTICAS DEL MALLADO..... 108

FIGURA 92: MALLA MODIFICADA VISTA EN 2 DIMENSIONES. 108

FIGURA 93: SELECCIÓN DE MATERIALES EN LA BARRA DE HERRAMIENTAS EN SAP 2000. 108

FIGURA 94: VENTANA DE DEFINICIÓN DE MATERIALES. 109

FIGURA 95: VENTANA DE CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL MATERIAL..... 109

FIGURA 96: SELECCIÓN DE LA DEFINICIÓN DE LA SECCIÓN..... 110

FIGURA 97: VENTANA CON TODAS LAS TIPOLOGÍAS DE SECCIÓN. 110

FIGURA 98: DEFINICIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LAS SECCIONES RECTANGULARES..... 111

FIGURA 99: BOTÓN DE DIBUJAR SECCIONES O CABLES..... 112

FIGURA 100: PROCESO DE DIBUJO DE LAS CELOSÍAS TIPO WARREN EN DOS DIMENSIONES.
..... 112

FIGURA 101: EXTRUSIÓN DE LA SECCIÓN PARA REPRESENTAR LA SECCIÓN EN 3 DIMENSIONES.
..... 113

FIGURA 102: DEFINICIÓN DE GRUPOS DESDE LA BARRA DE HERRAMIENTAS. 113

FIGURA 103: VENTANA DE DEFINICIÓN DE GRUPOS..... 114

FIGURA 104: BOTÓN PARA SELECCIONAR VARIAS SECCIONES. 114

FIGURA 105: CORDONES SUPERIOR E INFERIOR SELECCIONADOS. 115

FIGURA 106: VENTANA DE ASIGNACIÓN DE GRUPOS..... 115

FIGURA 107: BOTÓN DE SELECCIÓN DE GRUPOS. 116

FIGURA 108: SELECCIÓN DE LOS GRUPOS SEGÚN EL TIPO, CORDONES Y DIAGONALES..... 116

FIGURA 109: BOTÓN DE ASIGNACIÓN DE SECCIÓN GEOMÉTRICA. 117

FIGURA 110: ASIGNACIÓN DE SECCIÓN GEOMÉTRICA POR GRUPOS..... 117



| | |
|---|-----|
| FIGURA 111: EXTRUSIÓN DE LA CELOSÍA PARA LA COMPROBACIÓN DE SECCIONES GEOMÉTRICAS. | 118 |
| FIGURA 112: VENTANA DE SIMULACIÓN DE LOS DISTINTOS CASOS. | 119 |
| FIGURA 113: COMPROBACIÓN DE LAS REACCIONES EN LOS APOYOS. | 119 |
| FIGURA 114: VENTANA DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL. | 120 |
| FIGURA 115: MODIFICACIÓN DE LA MASA POR UNIDAD DE VOLUMEN Y COMPROBACIÓN DE LAS REACCIONES. | 121 |
| FIGURA 116: VENTANA DE DEFINICIÓN DE LOS PATRONES DE CARGA. | 122 |
| FIGURA 117: BOTÓN DE DEFINICIÓN DE LOS CASOS DE CARGA. | 122 |
| FIGURA 118: VENTANA DE CONFIGURACIÓN DE LOS CASOS DE CARGA. | 123 |
| FIGURA 119: VENTANA CON TODOS LOS CASOS DE CARGA AÑADIDOS. | 123 |
| FIGURA 120: SELECCIÓN DEL PUNTO DE CARGA EN LA SECCIÓN MEDIA. | 124 |
| FIGURA 121: BOTÓN DE ASIGNACIÓN DE CARGAS COMO FUERZAS. | 125 |
| FIGURA 122: ASIGNACIÓN DE LA MAGNITUD DE LA FUERZA EN EL PUNTO CENTRAL Y SU REPRESENTACIÓN. | 125 |
| FIGURA 123: FLECHA OBTENIDA CON LA SIMULACIÓN DEL CASO F1. | 126 |
| FIGURA 124: VALOR PREDETERMINADO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN SAP 2000. | 127 |
| FIGURA 125: VALORES DE FLECHA OBTENIDAS EN EL MODELO DE 2 DIMENSIONES PARA EL CASO DE 1,2 Y 3 TUERCAS. | 128 |
| FIGURA 126: VALORES DE FLECHA OBTENIDAS EN EL MODELO DE 2 DIMENSIONES PARA EL CASO DE 4,5 Y 6 TUERCAS. | 129 |
| FIGURA 127: VENTANA DE CARACTERÍSTICAS DE MALLADO. | 130 |
| FIGURA 128: MALLA MODIFICADA PARA EL MODELO DE 3 DIMENSIONES. | 131 |
| FIGURA 129: ESTRUCTURA DIBUJADA EN 3 DIMENSIONES. | 131 |
| FIGURA 130: DEFINICIÓN DE LA SECCIÓN PARA LAS DIAGONALES DEL TABLERO SUPERIOR E INFERIOR. | 132 |
| FIGURA 131: EXTRUSIÓN PARA LA COMPROBACIÓN DE LA ORIENTACIÓN DE LAS SECCIONES EN 3 DIMENSIONES. | 133 |
| FIGURA 132: MODIFICACIÓN DEL VALOR DE PESO POR UNIDAD DE VOLUMEN Y COMPROBACIÓN DE LAS REACCIONES. | 134 |
| FIGURA 133: BOTÓN DE ASIGNACIÓN DE CARGAS COMO FUERZAS. | 135 |
| FIGURA 134: APLICACIÓN DE LA CARGA DISTRIBUIDA POR IGUAL EN LAS 2 SECCIONES CENTRALES DE LAS CELOSÍAS. | 135 |
| FIGURA 135: SIMULACIÓN DE CASO DE 1 TUERCA Y COMPROBACIÓN DE LA FLECHA EN LA SECCIÓN CENTRAL EN EL MODELO DE 3 DIMENSIONES. | 136 |
| FIGURA 136: VALOR DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD PREDEFINIDO POR EL MODELO DE 2 DIMENSIONES. | 137 |
| FIGURA 137: VALORES DE FLECHA OBTENIDOS EN EL MODELO DE 3 DIMENSIONES PARA EL CASO DE 1,2 Y 3 TUERCAS. | 138 |
| FIGURA 138: VALORES DE FLECHA OBTENIDOS EN EL MODELO DE 3 DIMENSIONES PARA EL CASO DE 4,5 Y 6 TUERCAS. | 139 |
| FIGURA 139: GRÁFICA DE COMPARACIÓN DE LAS CONSTANTES DE RIGIDEZ DE LOS ENSAYOS ESTÁTICOS. | 143 |
| FIGURA 140: PUENTES MELLIZOS. | 151 |
| FIGURA 141: ESTRUCTURA FINAL DEL PUENTE DE 4,10 M DE LUZ. | 151 |



| | |
|---|-----|
| FIGURA 142: DESPLAZAMIENTO DE UNA VIGA SOMETIDA A UNA CARGA EN LA SECCIÓN MEDIA Y OBTENCIÓN DE LA FLECHA. | 152 |
| FIGURA 143: PUENTE MELLIZO CARGADO CON 9 TUERCAS..... | 152 |
| FIGURA 144: VISTA EN DETALLE DEL PUENTE MELLIZO CARGADO CON 9 TUERCAS. | 153 |
| FIGURA 145: GRÁFICA DE LA FLECHA FRENTE A LAS CARGAS DEL PUENTE MELLIZO 1..... | 155 |
| FIGURA 146: GRÁFICA DE LA FLECHA FRENTE A LAS CARGAS DEL PUENTE MELLIZO 2..... | 157 |
| FIGURA 147: TABLAS DE LAS CLASES RESISTENTES DE MADERA ENCOLADA..... | 165 |



Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| TABLA 1: CARACTERÍSTICAS LÁSER..... | 27 |
| TABLA 2: CONEXIONES SIRIUS HD-STG..... | 30 |
| TABLA 3: RANGO DE VALORES DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA | 35 |
| TABLA 4: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CHOPO EUROPEO..... | 35 |
| TABLA 5: MEDIDAS DE LARGO, CANTO Y ESPESOR DE LOS PALITOS DE HELADO..... | 37 |
| TABLA 6: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS MEDIA DE LOS PALITOS DE HELADO..... | 38 |
| TABLA 7: PARÁMETROS DE LA FRECUENCIA PROPIA DE UNA VIGA SIMPLEMENTE APOYADA CON CONCENTRACIÓN DE MASA..... | 49 |
| TABLA 8: PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DE MOVIMIENTO DE UN SISTEMA SUBAMORTIGUADO. | 59 |
| TABLA 9: VALORES MEDIOS OBTENIDOS PARA EL PRIMER ENSAYO CON 6 TUERCAS. | 61 |
| TABLA 10: CONDICIONES AMBIENTALES Y MASA DEL PUENTE EN EL PRIMER ENSAYO..... | 65 |
| TABLA 11: VALORES DE INCREMENTO DE FLECHA Y FLECHA DEL PRIMER ENSAYO. | 66 |
| TABLA 12: VALOR DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ DEL PUENTE EN EL PRIMER ENSAYO..... | 66 |
| TABLA 13: VALORES DEL ENSAYO DINÁMICO DEL PRIMER ENSAYO. | 67 |
| TABLA 14: VALOR DEL PRODUCTO DE $E \cdot I$ DEL PRIMER ENSAYO..... | 68 |
| TABLA 15: VALORES DE LA FRECUENCIA PROPIA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL DEL PRIMER ENSAYO..... | 68 |
| TABLA 16: VARIACIÓN DE LA FLECHA DE LA ESTRUCTURA A LO LARGO DE UN DÍA. | 69 |
| TABLA 17: VARIACIÓN DE LA FLECHA DE LA ESTRUCTURA CARGADA..... | 70 |
| TABLA 18: CONDICIONES AMBIENTALES Y MASA DEL PUENTE EN EL SEGUNDO ENSAYO..... | 71 |
| TABLA 19: VALORES DE INCREMENTO DE FLECHA Y FLECHA DEL SEGUNDO ENSAYO. | 72 |
| TABLA 20: VALOR DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ DEL PUENTE EN EL SEGUNDO ENSAYO..... | 72 |
| TABLA 21: VALORES DEL ENSAYO DINÁMICO DEL SEGUNDO ENSAYO. | 73 |
| TABLA 22: VALOR DEL PRODUCTO DE $E \cdot I$ EN EL SEGUNDO ENSAYO. | 73 |
| TABLA 23: VALORES DE LA FRECUENCIA PROPIA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL DEL SEGUNDO ENSAYO..... | 73 |
| TABLA 24: CONDICIONES AMBIENTALES Y MASA EN EL TERCER ENSAYO. | 74 |
| TABLA 25: VALORES DE INCREMENTO DE FLECHA Y FLECHA DEL TERCER ENSAYO. | 75 |
| TABLA 26: VALOR DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ DEL PUENTE EN EL TERCER ENSAYO..... | 75 |
| TABLA 27: VALORES DEL ENSAYO DINÁMICO DEL TERCER ENSAYO. | 76 |
| TABLA 28: VALOR DEL PRODUCTO DE $E \cdot I$ EN EL TERCER ENSAYO. | 76 |
| TABLA 29: VALORES DE LA FRECUENCIA PROPIA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL DEL TERCER ENSAYO..... | 76 |
| TABLA 30: CONDICIONES AMBIENTALES Y MASA EN EL CUARTO ENSAYO. | 77 |
| TABLA 31: VALORES DE INCREMENTO DE FLECHA Y FLECHA DEL CUARTO ENSAYO. | 78 |
| TABLA 32: VALOR DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ DEL PUENTE EN EL CUARTO ENSAYO. | 78 |
| TABLA 33: VALORES DEL ENSAYO DINÁMICO DEL CUARTO ENSAYO..... | 79 |
| TABLA 34: VALOR DEL PRODUCTO DE $E \cdot I$ EN EL CUARTO ENSAYO..... | 79 |
| TABLA 35: VALORES DE LA FRECUENCIA PROPIA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL DEL CUARTO ENSAYO..... | 79 |



TABLA 36: CONDICIONES AMBIENTALES Y MASA DEL PUENTE EN EL QUINTO ENSAYO. 80

TABLA 37: VALORES DE INCREMENTO DE FLECHA Y FLECHA DEL QUINTO ENSAYO. 81

TABLA 38: VALOR DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ DEL PUENTE EN EL QUINTO ENSAYO. 81

TABLA 39: VALORES DEL ENSAYO DINÁMICO DEL QUINTO ENSAYO. 82

TABLA 40: VALOR DEL PRODUCTO DE $E \cdot I$ EN EL QUINTO ENSAYO. 82

TABLA 41: VALORES DE LA FRECUENCIA PROPIA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL DEL QUINTO
ENSAYO. 82

TABLA 42: CONDICIONES AMBIENTALES Y MASA DEL PUENTE EN EL SEXTO ENSAYO. 83

TABLA 43: VALORES DE INCREMENTO DE FLECHA Y FLECHA DEL SEXTO ENSAYO. 84

TABLA 44: VALOR DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ DEL PUENTE EN EL SEXTO ENSAYO. 84

TABLA 45: VALORES DEL ENSAYO DINÁMICO DEL SEXTO ENSAYO. 85

TABLA 46: VALOR DEL PRODUCTO DE $E \cdot I$ EN EL SEXTO ENSAYO. 85

TABLA 47: VALORES DE LA FRECUENCIA PROPIA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL DEL SEXTO ENSAYO.
..... 85

TABLA 48: CONDICIONES AMBIENTALES Y MASA DEL PUENTE EN EL SÉPTIMO ENSAYO. 86

TABLA 49: VALORES DE INCREMENTO DE FLECHA Y FLECHA DEL SÉPTIMO ENSAYO. 87

TABLA 50: VALOR DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ DEL PUENTE EN EL SÉPTIMO ENSAYO. 87

TABLA 51: VALORES DEL ENSAYO DINÁMICO DEL SÉPTIMO ENSAYO. 88

TABLA 52: VALOR DEL PRODUCTO DE $E \cdot I$ EN EL SÉPTIMO ENSAYO. 88

TABLA 53: VALORES DE LA FRECUENCIA PROPIA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL DEL SÉPTIMO
ENSAYO. 88

TABLA 54: CONDICIONES AMBIENTALES Y MASA DEL PUENTE EN EL OCTAVO ENSAYO. 89

TABLA 55: VALORES DE INCREMENTO DE FLECHA Y FLECHA DEL OCTAVO ENSAYO. 90

TABLA 56: VALOR DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ DEL PUENTE EN EL OCTAVO ENSAYO. 90

TABLA 57: VALORES DEL ENSAYO DINÁMICO DEL OCTAVO ENSAYO. 91

TABLA 58: VALOR DEL PRODUCTO DE $E \cdot I$ EN EL OCTAVO ENSAYO. 91

TABLA 59: VALORES DE LA FRECUENCIA PROPIA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL DEL OCTAVO
ENSAYO. 91

TABLA 60: CONDICIONES AMBIENTALES Y MASA DEL PUENTE EN EL NOVENO ENSAYO. 92

TABLA 61: VALORES DE INCREMENTO DE FLECHA Y FLECHA DEL NOVENO ENSAYO. 93

TABLA 62: VALOR DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ DEL PUENTE EN EL NOVENO ENSAYO. 93

TABLA 63: VALORES DEL ENSAYO DINÁMICO DEL NOVENO ENSAYO. 94

TABLA 64: VALOR DEL PRODUCTO DE $E \cdot I$ EN EL NOVENO ENSAYO. 94

TABLA 65: VALORES DE LA FRECUENCIA PROPIA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL DEL NOVENO
ENSAYO. 94

TABLA 66: CONDICIONES AMBIENTALES Y MASA DEL PUENTE EN EL DÉCIMO ENSAYO. 95

TABLA 67: VALORES DE INCREMENTO DE FLECHA Y FLECHA DEL DÉCIMO ENSAYO. 96

TABLA 68: VALOR DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ DEL PUENTE EN EL DÉCIMO ENSAYO. 96

TABLA 69: VALORES DEL ENSAYO DINÁMICO DEL DÉCIMO ENSAYO. 97

TABLA 70: VALOR DEL PRODUCTO DE $E \cdot I$ EN EL DÉCIMO ENSAYO. 97

TABLA 71: VALORES DE LA FRECUENCIA PROPIA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL DEL DÉCIMO
ENSAYO. 97

TABLA 72: VARIACIÓN DE LA FLECHA DE LA ESTRUCTURA EN 4 HORAS. 98

TABLA 73: CONDICIONES AMBIENTALES Y MASA DEL PUENTE EN EL UNDÉCIMO ENSAYO. 99

TABLA 74: VALORES DE INCREMENTO DE FLECHA Y FLECHA DEL UNDÉCIMO ENSAYO. 100



| | |
|--|-----|
| TABLA 75: VALOR DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ DEL PUENTE EN EL UNDÉCIMO ENSAYO. . | 100 |
| TABLA 76: VALORES DEL ENSAYO DINÁMICO DEL UNDÉCIMO ENSAYO..... | 101 |
| TABLA 77: VALOR DEL PRODUCTO DE $E \cdot I$ EN EL UNDÉCIMO ENSAYO..... | 101 |
| TABLA 78: VALORES DE LA FRECUENCIA PROPIA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL DEL UNDÉCIMO ENSAYO..... | 101 |
| TABLA 79: CALCULO DEL VALOR DE MASA POR UNIDAD DE VOLUMEN CON LOS DATOS DEFINIDOS POR DEFECTO. | 120 |
| TABLA 80: VALOR DEL PESO POR UNIDAD DE VOLUMEN PARA EL MODELO EN 2 DIMENSIONES. | 121 |
| TABLA 81: VALORES PARA CALCULAR EL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN EL MODELO DE 2 DIMENSIONES. | 127 |
| TABLA 82: VALOR DE MODULO ELÁSTICO EN EL MODELO DE 2 DIMENSIONES..... | 128 |
| TABLA 83: COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE FLECHA OBTENIDOS EN EL UNDÉCIMO ENSAYO Y EL MODELO EN 2 DIMENSIONES..... | 129 |
| TABLA 84: VALORES DEL PESO POR UNIDAD DE VOLUMEN Y DENSIDAD PARA EL MODELO DE 3 DIMENSIONES. | 134 |
| TABLA 85: VALORES DE FLECHA PARA CALCULAR EL VALOR DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA EL MODELO EN 3 DIMENSIONES..... | 137 |
| TABLA 86: VALOR DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD OBTENIDO PARA EL MODELO EN 3 DIMENSIONES. | 138 |
| TABLA 87: COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE FLECHA OBTENIDOS EN EL UNDÉCIMO ENSAYO Y EL MODELO EN 3 DIMENSIONES..... | 139 |
| TABLA 88: VALORES DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS OBTENIDAS PARA EL MODELO DE 2 Y 3 DIMENSIONES. | 140 |
| TABLA 89: COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE FLECHA OBTENIDOS EN EL UNDÉCIMO ENSAYO LOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN DE LOS MODELOS DE 2 Y 3 DIMENSIONES..... | 140 |
| TABLA 90: CONDICIONES AMBIENTALES Y MASA DEL PUENTE EN TODOS LOS ENSAYOS. | 142 |
| TABLA 91: VALORES DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ OBTENIDOS. | 143 |
| TABLA 92: VALORES DE LA FRECUENCIA OBTENIDA EN LOS ENSAYOS PARA TODOS LOS CASOS DE CARGA. | 144 |
| TABLA 93: VALORES DEL COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO RESPECTO AL CRÍTICO OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS PARA TODOS LOS CASOS DE CARGA. | 145 |
| TABLA 94: CONDICIONES AMBIENTALES Y MASA DEL PUENTE MELLIZO 1..... | 154 |
| TABLA 95: VALORES DE FLECHA FRENTE A LAS CARGAS OBTENIDOS EN LOS 3 ENSAYOS ESTÁTICOS DEL PUENTE MELLIZO 1..... | 154 |
| TABLA 96: VALORES DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ OBTENIDOS EN EL PUENTE MELLIZO 1 Y EL VALOR MEDIO OBTENIDO. | 154 |
| TABLA 97: CONDICIONES AMBIENTALES Y MASA DEL PUENTE MELLIZO 2..... | 156 |
| TABLA 98: VALORES DE FLECHA FRENTE A LAS CARGAS OBTENIDOS EN LOS 3 ENSAYOS ESTÁTICOS DEL PUENTE MELLIZO2. | 156 |
| TABLA 99: VALORES DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ OBTENIDOS EN EL PUENTE MELLIZO 2 Y EL VALOR MEDIO OBTENIDO. | 156 |
| TABLA 100: VALOR MEDIO DE LA CONSTANTE DE RIGIDEZ OBTENIDA A PARTIR DE LOS PUENTES MELLIZOS. | 158 |

Capítulo 1

Introducción y Objetivos

1.1 Introducción

Este TFG se desarrolla como parte de un proyecto que se ha desarrollado en el departamento de Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno, Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras.

Se va a trabajar con el modelo de un viaducto con tipología en viga Warren, realizándose maquetas con palitos de helado y sobre el que se realizarán estudios sobre la rigidez estructural, las frecuencias propias y los coeficientes de amortiguamiento en estructuras tridimensionales hechas de madera.

Para realizar estos estudios y poder analizar mejor los parámetros requeridos se realizaron 2 maquetas de 12 triangulaciones y 1,62 m de luz para poder estudiar la rigidez durante el proceso de experimentación se detectó que estas estructuras eran demasiado rígidas por lo que no era viable su utilización para el estudio de frecuencias propias y coeficientes de amortiguamiento por lo que se procedió a unir las 2 estructuras iniciales y añadir triangulaciones para así reducir la rigidez de la estructura quedando así una celosía de 30 vanos y 4,10 m de luz detallado en el *anexo 1.1*

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Principales

El objetivo principal es estudiar las frecuencias propias y coeficientes de amortiguamiento en estructuras de madera, caracterizar las propiedades mecánicas y su comportamiento frente a variaciones de carga para posteriormente simularlo en SAP 2000.

Como segundo objetivo, se quiere tener una construcción permanente en el laboratorio de estructuras en la que se pueda enseñar a los alumnos cómo se comporta una estructura de este tipo con distintas cargas.



El tercer objetivo de este TFG es crear un manual tanto para la construcción de maquetas de estructuras como para experimentar con ellas, los distintos programas que se pueden utilizar para el tratamiento de los datos.

El cuarto objetivo es crear un manual para la utilización de un programa de modelado de elementos finitos.

1.2.2 Objetivos Secundarios

Así mismo dentro de las posibilidades instrumentales del laboratorio se explorarán posibles dependencias con respecto a variables ambientales (temperatura y humedad).

Capítulo 2

Equipamiento

2.1 Piezas para la construcción de las maquetas.

2.1.1 Palitos de helado.

El material seleccionado para este estudio de prototipado de estructuras tridimensionales son palitos de helado como se muestra en la *Figura 1*. Se ha considerado este tipo de material por su esbeltez.



Figura 1: Palitos de helado.

2.1.2 Barras termofusibles y pistola.

Para realizar las uniones de los elementos tipo barra se utilizarán barras termofusibles de 0,012 m de diámetro y una pistola termofusible como se muestra en la *Figura 2*.



Figura 2: Pistola y barras termofusibles.

2.1.3 Estructura de Maquetación.

2.1.3.1 Soportes.

Con la necesidad de asegurar la alineación de los cordones superior e inferior, se idearon unas guías para construir en un primer paso las celosías del puente como se muestra en la *Figura 3* a la vez que nos aseguran un tipo de matriz de referencia para estandarizar el proceso.

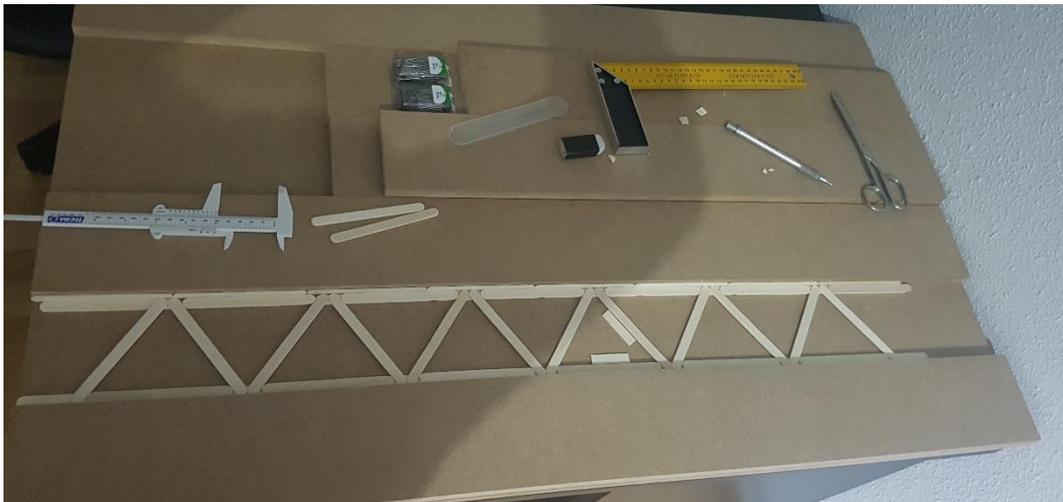


Figura 3: Soportes.

Para la unión de las celosías de forma tridimensional se crearon unas guías en escuadra para asegurar la correcta construcción de estas y una unión perfectamente perpendicular en todos los nudos realizada como se muestra en la *Figura 4* a partir de las guías anteriores ya que la estructura se ideó de forma que esta sea modular.

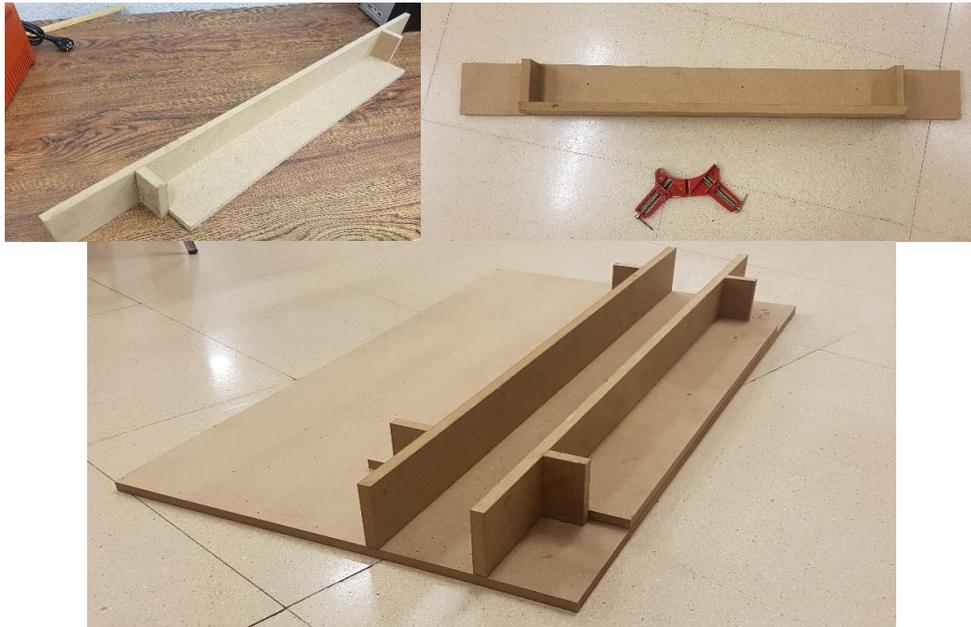


Figura 4: Conjunto de soporte unido.

2.1.3.2 Guías.

Como medida adicional para asegurar la correcta alineación en la fase de construcción se cortaron unas guías a partir de una varilla de madera de 3 m de largo y sección cuadrada de 0,013 m de lado en trozos de 0,05 m de longitud como se muestra en la *Figura 5*.



Figura 5: Guías cortadas.

Estas guías se utilizaron para ambos soportes como se muestra en la *Figura 6*, en el caso de la construcción de las celosías nos aseguran la correcta tangencia de las diagonales, y en caso tridimensional únicamente se utilizaron para garantizar que la celosía estaba correctamente apoyada en la cara del soporte de forma perpendicular para asegurar la geometría requerida.

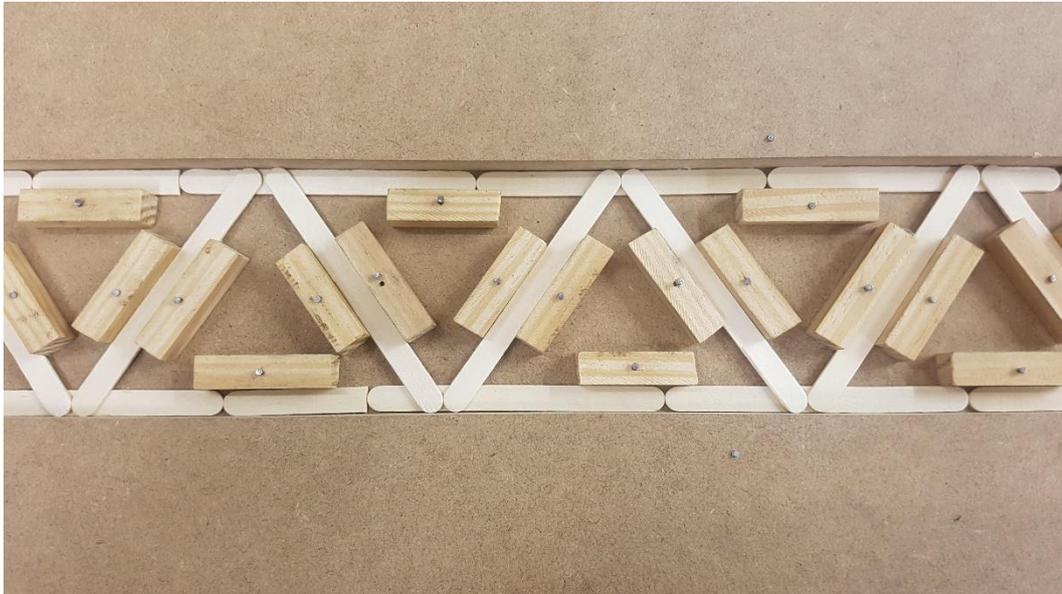


Figura 6: Soporte y guías fijadas.

2.2 Materiales de medición.

2.2.1 Medidor láser.

Para la medida del desplazamiento de la estructura haremos uso de un sensor láser de alta precisión como se muestra en la *Figura 7* del orden de las décimas de milímetro.

Este láser se colocará en el punto medio de la estructura para obtener la medida de la flecha.

Algunas de sus características se presentan en la *Tabla 1*:

| | | |
|---|--------------------------|---------------------|
| Alta resolución | 8×10^{-6} m | (modo-resolución) |
| Linealidad | 0,1 % | (modo-resolución) |
| Tiempo de reacción | $< 660 \times 10^{-6}$ s | (modo de velocidad) |
| Valor de medición independiente de material, color y brillo | | |

Tabla 1: Características láser.

Una diferencia con otros sensores es que el medidor láser necesita alimentación de corriente. Para proporcionarle corriente se utilizará la salida de la tarjeta de adquisición de datos mostrada en la *Figura 14*.



Figura 7: Medidor láser.

2.2.2 Higrómetro.

Este dispositivo mide la humedad en materiales como madera por medio de resistencia como se muestra en la *Figura 8*.



Figura 8: Higrómetro.

2.2.3 Termómetro.

Este dispositivo mide la temperatura y la humedad relativa en el ambiente como se muestra en la *Figura 9*.



Figura 9: Termómetro.

2.2.4 Báscula.

Este dispositivo mide la masa con una precisión de décimas de gramos como se muestra en la *Figura 10*.



Figura 10: Báscula.

2.2.5 Tarjeta de adquisición de datos.

Para tratar la información proporcionada por todos los sensores y ser enviada a un ordenador donde poder registrarla y procesarla se dispone de una tarjeta de adquisición de datos SIRIUS HD-STG como la representada en la *Figura 11*.



Figura 11: Sirius HD-STG.

Este dispositivo dispone de diferentes entradas y salidas como se observa en la *Figura 12*.



Figura 12: Conexiones Sirius HD-STG.

Siendo las más importantes las presentadas en la *Tabla 2*:

| | |
|-----------------|--|
| Entradas | 16 entradas tipo D-SUB para la conexión de sensores. |
| | Entrada de alimentación de corriente. |
| Salidas | Salida tipo USB para conexión con el PC. |
| | Salida de alimentación para sensores. |

Tabla 2: Conexiones SIRIUS HD-STG.

En la *Figura 13* se puede observar un conector macho D-Sub, perteneciente al sensor láser, conectado al SIRIUS HD-STG.



Figura 13: Conector macho láser conectado a SIRIUS HD-STG.

Véase que el conector macho del láser tiene dos cables, uno de ellos será para la alimentación de corriente y el otro para la transmisión de datos, en la *Figura 14* se ve en detalle la conexión tanto de datos como el de alimentación de corriente.

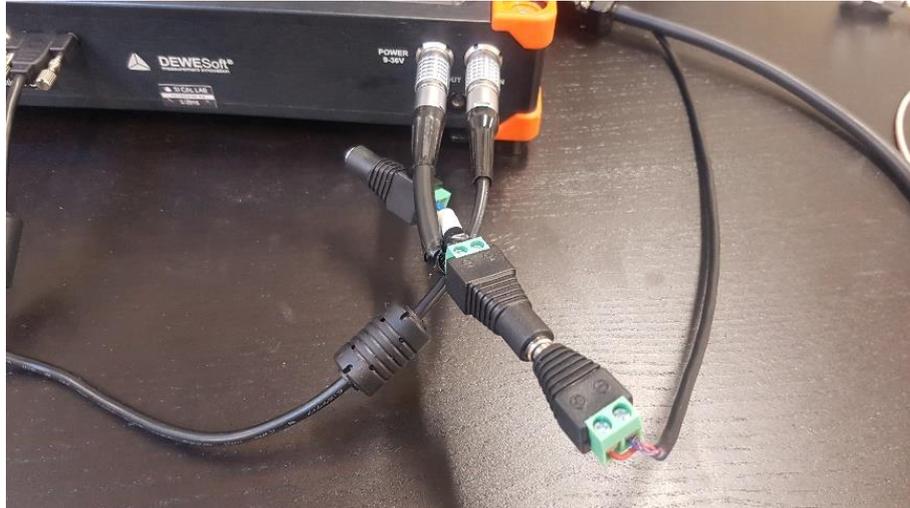


Figura 14: Detalle de conexión de la salida de alimentación del SIRIUS HD-STG con el láser.

2.2.6 Software de adquisición de datos.

El propio fabricante del hardware proporciona el software necesario para medir y registrar los datos proporcionados por los sensores. En este caso se ha utilizado el programa DEWESoft X3 en la versión SP4, en la *Figura 15* se muestra la interfaz.

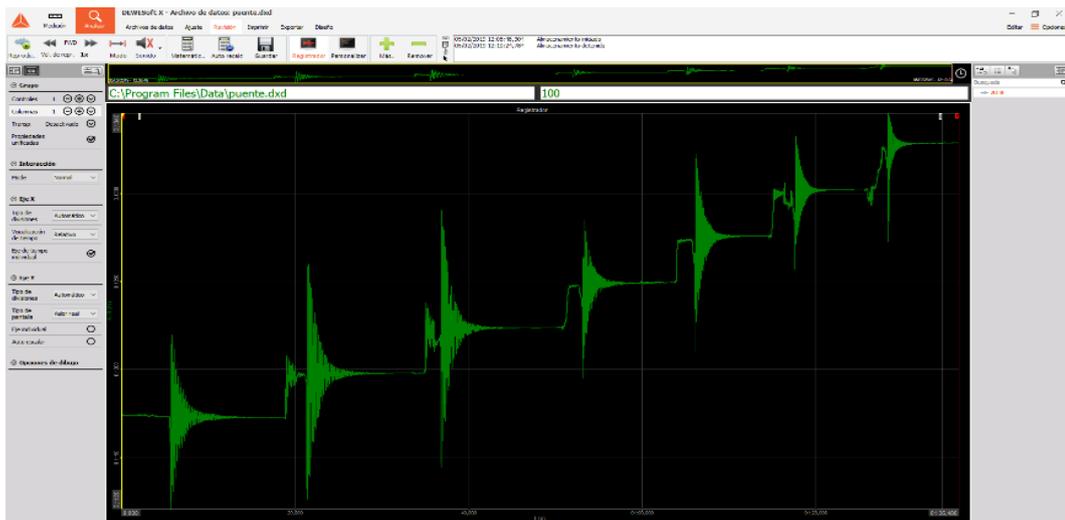


Figura 15: Interfaz DEWESoft X3 SP4

Con este software se dispone de una interfaz que permite visualizar en tiempo real la información que recogen los distintos sensores, así como guardarla para una posterior revisión y exportación en otros tipos de formato (MS Excel, Matlab, etc.) para un tratamiento de dicha información, como se muestra en la *Figura 16*. Su funcionamiento no presenta grandes dificultades por lo que no se analizará de manera más profunda. En la web del fabricante existe un manual completo que junto a la ayuda del propio programa permite resolver las dudas que se puedan presentar durante el proyecto.

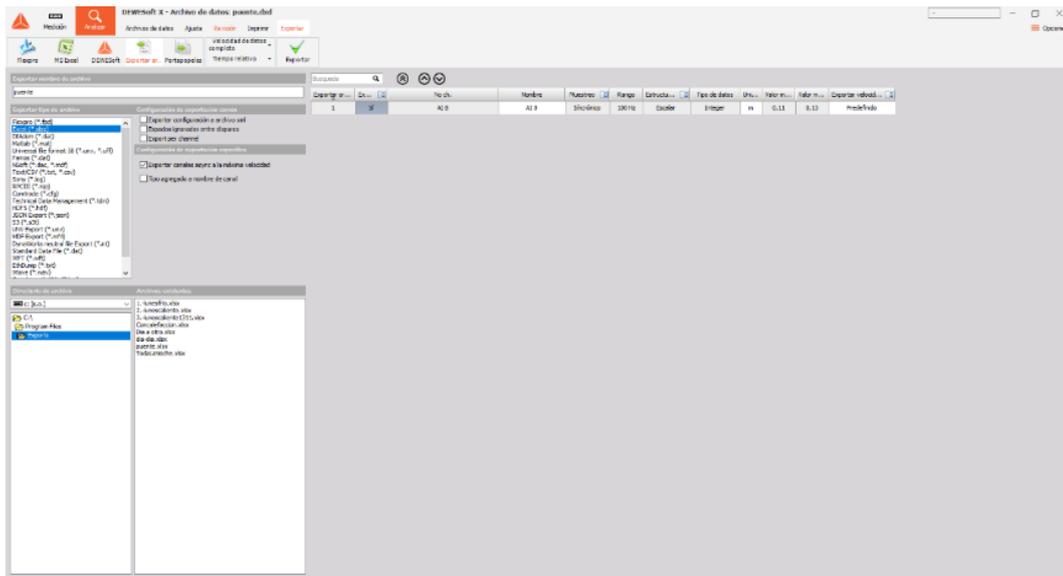


Figura 16: Interfaz de exportación de datos DEWESoft SP4.

Capítulo 3

Prototipado

3.1 Diseño y descripción de la estructura.

Para este TFG se decidió realizar maquetas de un puente ferroviario con tipología en celosa tipo WARREN, con nudos solapados simples como el que se muestra en la *Figura 17*.



Figura 17:Puente ferroviario con tipología Warren.

Como el realizado anteriormente por Fernando Asenjo Cordovés [1] con piezas de lego mostrado en *Figura 18*.



Figura 18: Maqueta de viaducto con tipología Warren realizada con Leggo.

3.2 Selección y descripción del material.

El principal objetivo de este TFG se basa en realizar estudios sobre estructuras esbeltas hechas de madera para lo que se optó por realizarlo con palitos de helado por su esbeltez.

A modo de introducción [3] podemos ver que los arboles están diseñados por la naturaleza para resistir con eficacia los esfuerzos a los que van a estar sometidos durante su vida; principalmente esfuerzos de flexión producidos por la acción del viento y los de compresión producidos por las acciones gravitatorias.

Una característica de la madera es la orientación de las fibras que la componen, que da lugar a que sea un material anisótropo que presenta distintas propiedades mecánicas según la dirección en la que se aplique la carga, por lo que hay que distinguir si se aplica en dirección de la fibra o en dirección perpendicular ya que tanto las resistencias y módulo de elasticidad son mayores en dirección paralela a la fibra que en la dirección perpendicular a esta fibra como se muestra en la *Figura 19*; No obstante para simplificar este estudio se trabajará con la hipótesis de considerar la madera un material isótropo.

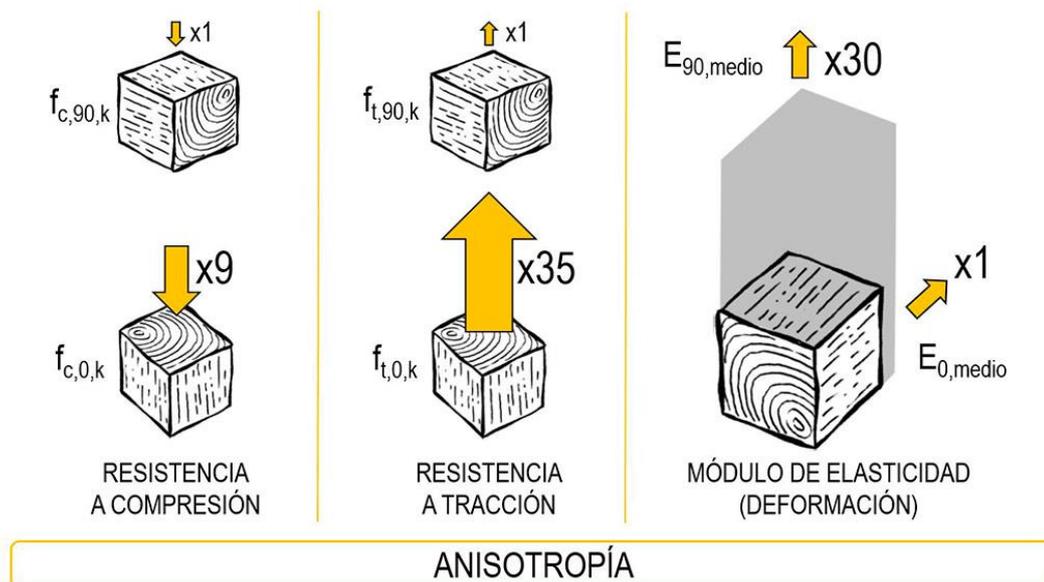


Figura 19: Propiedades mecánicas de la madera según la orientación de la fibra.

A continuación, se recogen las características más significativas de las propiedades mecánicas de la madera estructural (libre de defectos) presentada en la *Tabla 3*.

| Esfuerzo | Rango de Valores | |
|--|------------------|-------|
| Tracción paralela a la fibra | 8 - 18 | [Mpa] |
| Tracción perpendicular a la fibra | 0,3 - 0,4 | [Mpa] |
| Compresión paralela a la fibra | 16 - 23 | [Mpa] |
| Compresión perpendicular a la fibra | 4,3 - 5,7 | [Mpa] |
| Flexión | 14 - 30 | [Mpa] |
| Cortante | 1,7 - 3,0 | [Mpa] |
| Módulo de elasticidad paralelo a la fibra | 7000 - 12 000 | [Mpa] |
| Módulo de elasticidad perpendicular a la fibra | 233 - 400 | [Mpa] |

Tabla 3: Rango de valores de las propiedades mecánicas de la madera

Como se observa en la tabla los valores de los esfuerzos en la dirección perpendicular son mucho menores que a los de la dirección paralela a la fibra. Cabe destacar que los valores de tracción perpendicular a la fibra son del orden de 30 a 70 veces inferior que en dirección paralela y el módulo de elasticidad en dirección perpendicular a la fibra es del orden de 30 veces inferior al de la dirección paralela a la fibra.

Estos palos de helado están fabricados con madera de chopo [2] que presentan las siguientes propiedades mecánicas recogidas en la *Tabla 4*.

| Propiedades Mecánicas | |
|---|----------------------------|
| Densidad | 378 [kg/m ³] |
| Dureza | 0.69 (madera blanda) |
| Propiedades Mecánicas en madera libre de defectos | |
| Resistencia a Flexión | 60 [MPa] |
| Resistencia a Compresión | 30 [MPa] |
| Resistencia a Tracción | 2,7 [MPa] |
| Módulo de Elasticidad (E) | 5.89x10 ³ [MPa] |

Tabla 4: Propiedades mecánicas del chopo europeo

3.3 Proceso de montaje

Como en todo proceso de fabricación, se realizó un control de calidad de la materia prima mostrada en la *Figura 20*, para así estandarizarla y asegurar un mejor proceso de construcción libre de defectos.



Figura 20: Palitos de helado.

Se procede eliminando así las piezas (palitos de helado) que presentan defectos perceptibles a simple vista como se observa en *Figura 21* tales como: estrías, abolladuras, geometría irregular, nudos, falta de material, muescas y deformaciones.

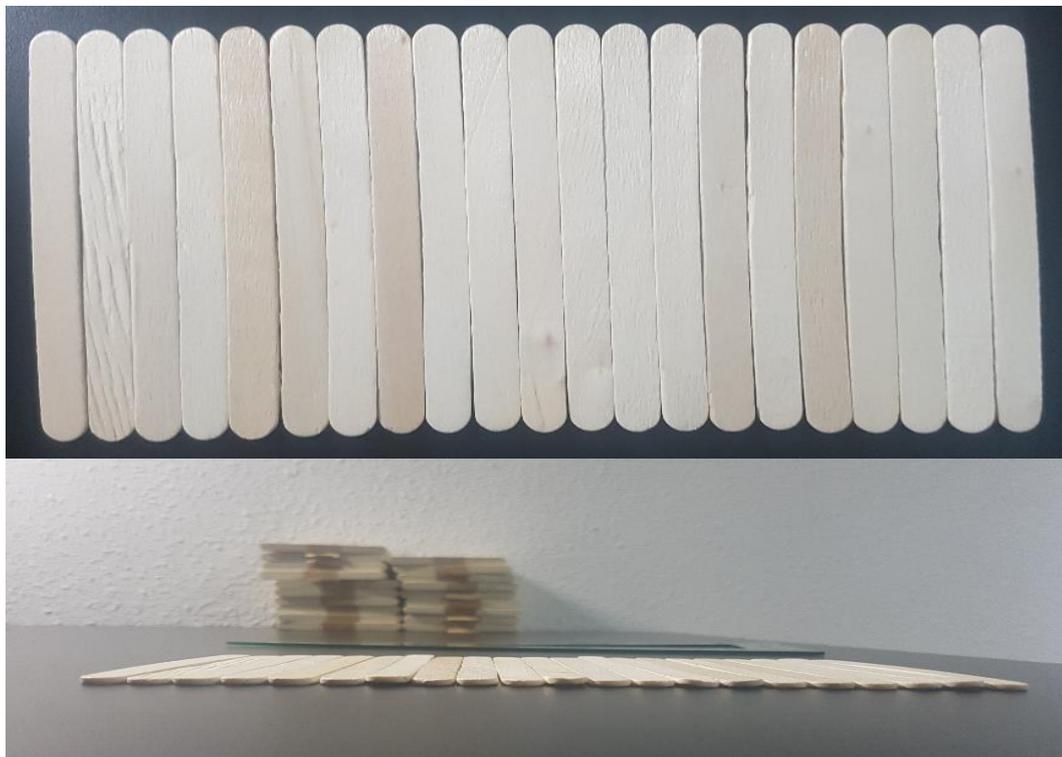


Figura 21: Palitos con defectos.

Una vez seleccionado el material que se utilizará se procede a realizar la caracterización geométrica de los palitos con un pie de rey electrónico con una precisión de centésimas de milímetro mostrado en la *Figura 22*, para



realizar una media del largo, canto y espesor presentados en la *Tabla 5*.

Figura 22: Caracterización de la geometría de los palitos con un pie de rey.

| Longitud | Canto | Espesor |
|----------|--------|---------|
| L [mm] | h [mm] | e [mm] |
| 113,33 | 9,94 | 2,08 |
| 114,19 | 10,06 | 1,99 |
| 113,24 | 9,75 | 1,96 |
| 113,34 | 9,85 | 2,00 |
| 113,37 | 9,86 | 2,05 |
| 113,24 | 9,91 | 2,04 |
| 113,32 | 9,88 | 2,06 |
| 114,30 | 9,92 | 2,02 |
| 113,10 | 9,84 | 2,06 |
| 113,38 | 9,91 | 2,00 |
| 113,38 | 9,89 | 1,93 |
| 113,25 | 9,88 | 1,90 |
| 112,94 | 9,77 | 2,01 |
| 113,06 | 9,81 | 1,94 |
| 114,13 | 10,02 | 1,99 |
| 112,96 | 9,76 | 2,13 |
| 113,34 | 9,93 | 2,02 |
| 113,20 | 9,91 | 1,97 |
| 113,21 | 9,95 | 2,02 |
| 113,38 | 9,89 | 2,11 |
| 113,26 | 9,98 | 2,03 |
| 113,29 | 9,95 | 2,08 |
| 113,30 | 10,01 | 2,07 |
| 113,40 | 9,85 | 2,10 |
| 113,22 | 9,99 | 2,03 |
| 112,93 | 9,82 | 2,05 |
| 113,29 | 9,97 | 2,05 |
| 112,99 | 9,78 | 2,07 |
| 113,37 | 10,06 | 2,01 |
| 113,27 | 9,98 | 2,04 |

Tabla 5: Medidas de largo, canto y espesor de los palitos de helado.

Este estudio se ha realizado sobre 30 palitos de helado, obteniéndose los siguientes valores medios presentados en la *Tabla 6*.

| Longitud | Canto | Espesor |
|----------|--------|---------|
| L [mm] | h [mm] | e [mm] |
| 113,33 | 9,90 | 2,03 |

Tabla 6: Características geométricas media de los palitos de helado.

A continuación, se realizó un montaje simple como se muestra en la *Figura 23* a modo de guía de cómo se realizaría la ejecución de las celosías y el montaje de los nudos, observándose que se precisaba de una plantilla para poder ejecutar la unión perfectamente, asegurando la continuidad y linealidad de los cordones superior e inferior.

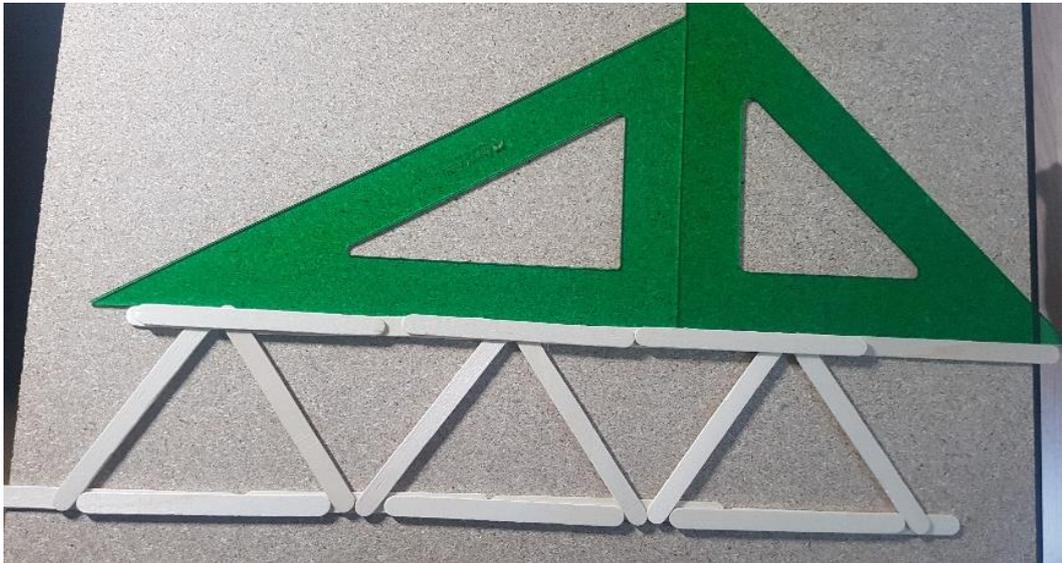


Figura 23: Montaje de prueba de las triangulaciones de la celosía.

Para este cometido se procedió a comprar unos tableros MDF de 0,03 m de espesor de distintas medidas para asegurar la estandarización del montaje con los parámetros establecidos, realizando dos estructuras con estos tableros, una para el montaje de las celosías planas y la segunda para la unión y montaje de la estructura tridimensional.

Otra medida que se optó para realizar un correcto montaje consistió en realizar unas guías como se muestra en la *Figura 24* a partir de un perfil



cuadrado de 3 m de largo y 0,013 m de lado para alinear las diagonales y de este modo crear una plantilla a modo de matriz.

Figura 24: Guías cortadas

Como se observa en la *Figura 25* se muestra la plantilla de las celosías, con la que se procedió a montar una celosía de prueba para comprobar si cumple con los requerimientos de alineación y continuidad de los cordones y la triangulación de las diagonales, obteniéndose así los resultados esperados.



Figura 25: Montaje de celosía de prueba.

Una vez comprobado los tableros y las guías de las diagonales se procedió a fijarlos mediante clavos y tornillos como se muestra en la *Figura 26*. Se enfatiza en el punto de solo unirlos con este tipo de uniones ya que así tendremos una estructura modular que más adelante nos permitirá el desmontaje y utilización de estos mismos tableros y listones.

Como se observa los listones de guía de las diagonales presentan una unión en el centro, de este modo permite el giro de estas para asegurar la unión y el contacto de tangencia en la sección donde se une con los cordones. Otro aspecto que comentar a la hora de ejecutar los cordones tanto superiores e inferiores es asegurar que nunca se produzca un solapamiento de las diagonales con los puntos de unión de estos cordones para evitar puntos de discontinuidad y se produzca siempre la unión sobre un elemento continuo de los cordones.

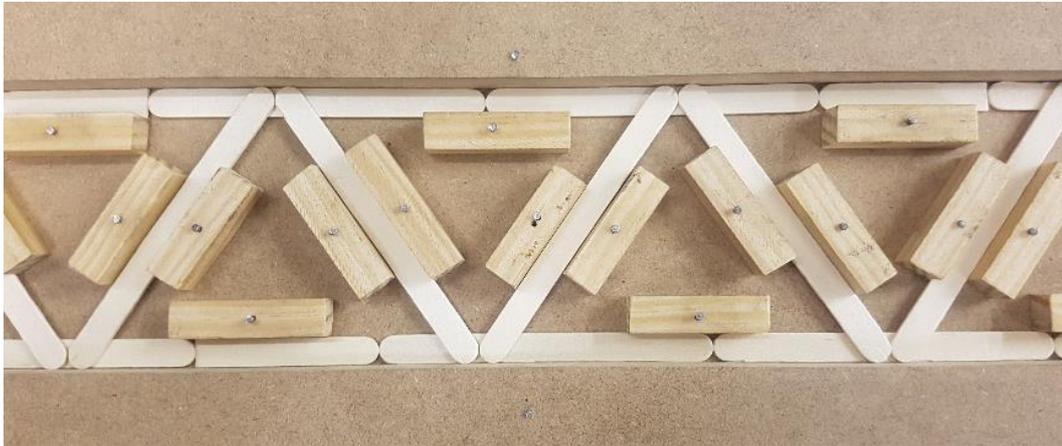


Figura 26: Fijación de guías y soportes.

Como se muestra en la *Figura 27* se realizó el montaje de las 4 celosías de 12 triangulaciones, necesarias para realizar los 2 puentes mellizos planteados en un primer momento para el estudio de este TFG.

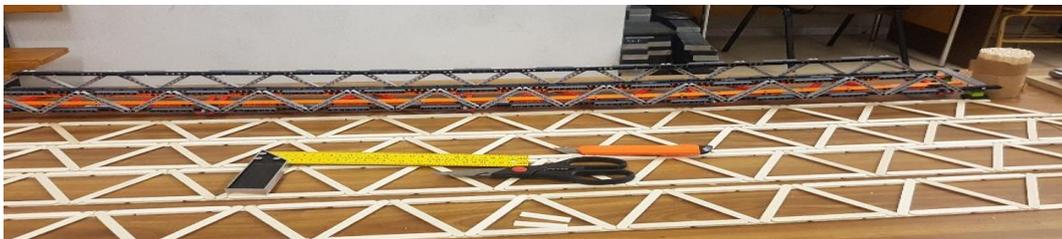


Figura 27: Montaje de 4 celosías para los puentes mellizos.

A continuación, se procedió a reforzar los nudos en los que se unen las diagonales con los cordones tanto superior e inferior con una sección rectangular de 0,05 m como se puede observar en la *Figura 28*.

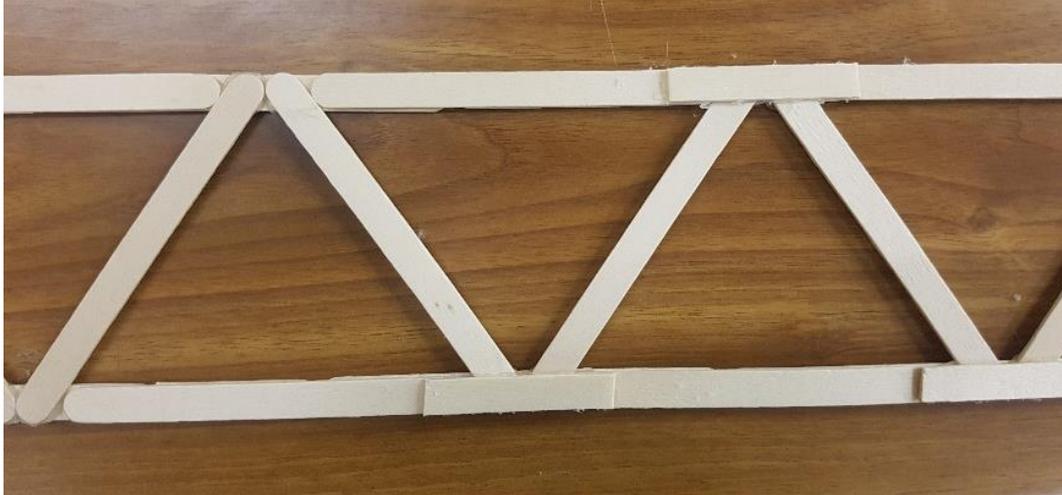


Figura 28: Rigidización de las uniones en las celosías.

Una vez obtenidas las celosías reforzadas en sus nudos, como parte primordial de esta estructura, se procedió al ensamble de los puentes, para lo cual se realizó otra plantilla como soporte estructural y así asegurar la geometría y el correcto montaje de estas, en la que se utilizó los listones anteriormente descritos realizando soportes en escuadra para asegurar la perpendicularidad como se muestra en la *Figura 29*.



Figura 29: Montaje estructura de soporte.

Como primer paso del montaje de la estructura tridimensional se realizó la unión de los nudos alineándolos correctamente con la ayuda de una escuadra, para así asegurar la correcta alineación de estas, cabe recalcar que es conveniente realizar este tipo de unión como primer paso de cara al montaje de la estructura tridimensional tanto en el tablero superior como inferior, ya que la plantilla estará adecuada para asegurar su correcto montaje.

A continuación, se ha realizado el montaje de las diagonales que dan resistencia a torsión de la estructura completa, se adecuó la plantilla para este cometido como se muestra en la *Figura 30* haciendo uso de los soportes en escuadrada descritas anteriormente para asegurar la correcta alineación de estas.



Figura 30: Montaje de la estructura con los soportes.

Como se muestra en la siguiente *Figura 31* se observa el correcto montaje tanto del tablero superior como inferior con una correcta alineación y tangencia entre las secciones fruto de la utilización de la plantilla para la estructura tridimensional.



Figura 31: Vista en planta y perfil de la estructura.

Una vez finalizado el proceso de montaje se obtienen 2 puentes mellizos de 12 triangulaciones, con una luz de 1,62 m y un peso de 0,270 kg, como se muestra en la *Figura 32* cabe destacar que tanto las medidas geométricas como el peso concuerdan a la perfección.



Figura 32: Puentes mellizos sometidos a carga de 9 tuercas.

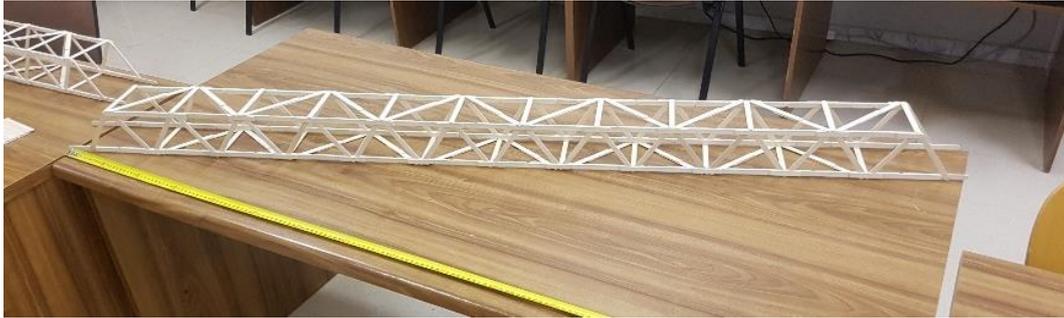


Figura 33: Puente mellizo de 1,62 m de luz.

En el anexo 1.1 se explica el motivo de la decisión del montaje de una única maqueta con mayor luz, donde se procedió a unir los 2 puentes mellizos.

El planteamiento de la nueva maqueta fue de realizar un único puente de 30 triangulaciones y 4,10 m de luz, por lo que se procedió al desmontaje de los puentes mellizos para proceder a su unión, empezando por realizar la unión de las celosías que partía de 24 triangulaciones añadiéndose otras 6 triangulaciones por lado para así dar el total de las 30 triangulaciones requeridas.

Una vez ejecutadas las celosías, se realizó el montaje de la estructura tridimensional con el procedimiento anteriormente descrito, empezando por la unión de los nudos con ayuda de la plantilla y de una escuadra para asegurar la correcta alineación de los nudos como se muestra en la *Figura 34*.



Figura 34: Montaje de las uniones perpendiculares de los nudos de las celosías.

Posteriormente se realizó el montaje de las diagonales, tanto del tablero superior como el del inferior como se muestra en la *Figura 35* obteniéndose la estructura del puente con una luz de 4,10 m.

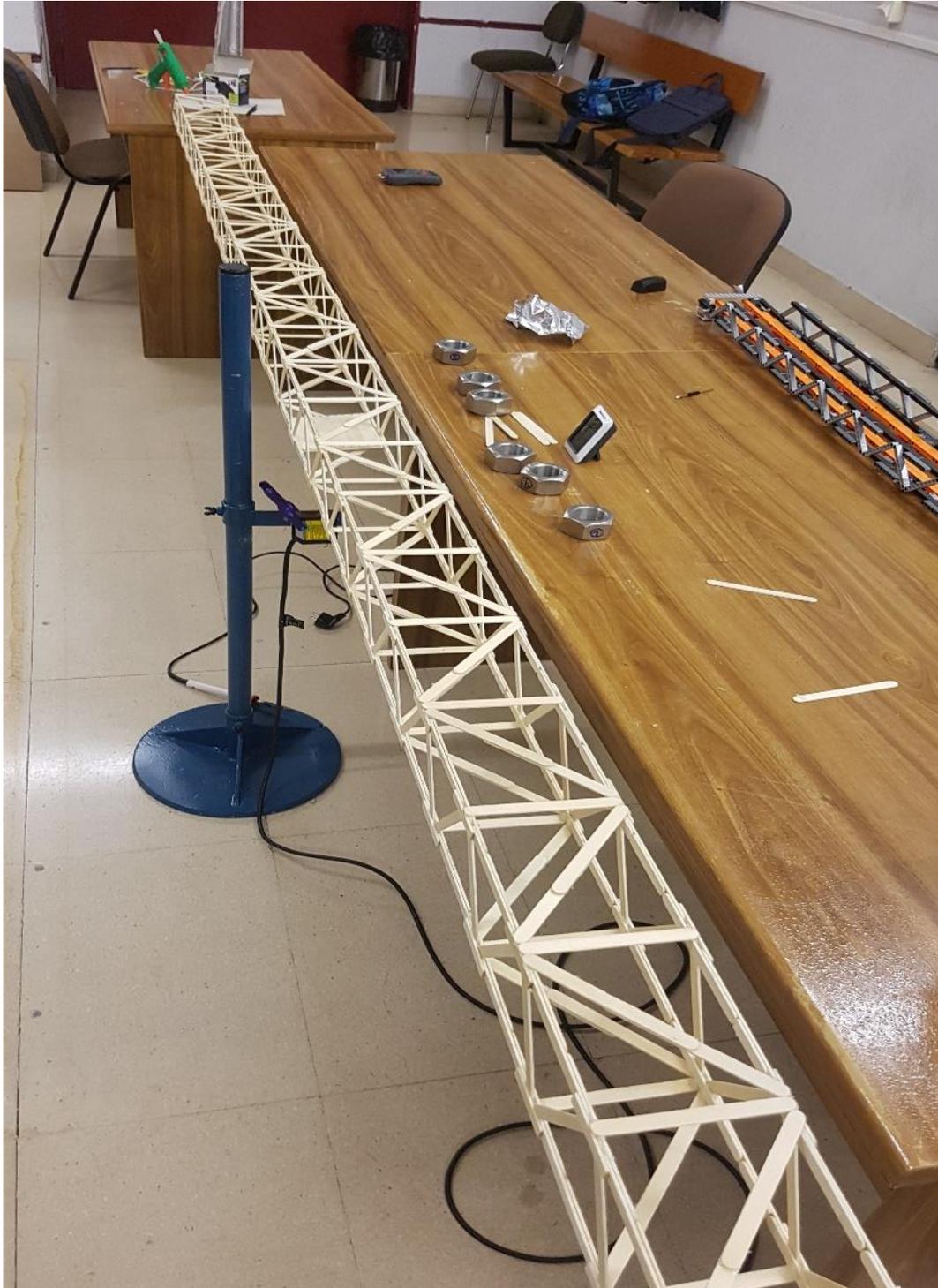


Figura 35: Estructura de 4,10 m de luz.

3.4 Estructuras obtenidas.

Las estructuras obtenidas en los dos procesos de prototipado de los puentes mellizos mostrada en la *Figura 36* como el puente final tienen las siguientes características geométricas, el canto de los puentes fue de 0,095 m y la distancia entre las celosías fue de 0,109 m, obteniéndose una sección rectangular igual en todos los casos. La única medida diferenciadora fue la luz obtenida siendo esta en los puentes mellizos de 1,62 m y en el puente final de 4,10 m.

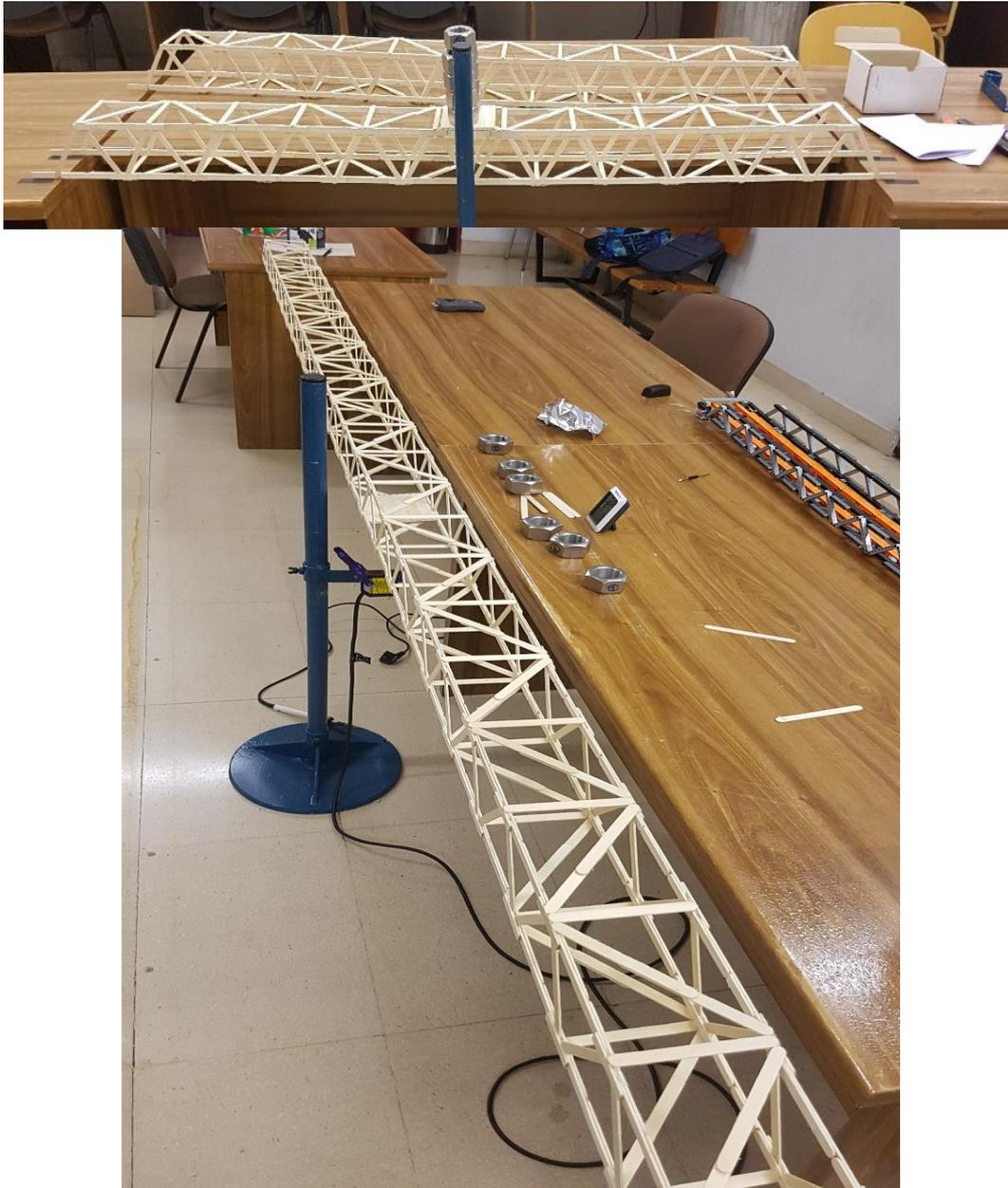


Figura 36: Puentes mellizos y puente final.

Capítulo 4

Ensayos y obtención de datos

En este capítulo se presentará el procedimiento llevado a cabo en los ensayos tanto estáticos como dinámicos realizados, variando distintas condiciones tanto de cargas como ambientales, la obtención de datos y el tratamiento de estos establecido para obtener los parámetros de interés de este TFG.

Como se comentó anteriormente el objetivo de este TFG es caracterizar la rigidez de la estructura mediante un ensayo estático el cual consiste en variar la masa del puente en la que haremos uso de unas tuercas que tienen una masa de 0,328 Kg, que servirán para cargar el puente con hasta 6 tuercas en la sección media que representa el caso más desfavorable y se estimará la rigidez tomando los valores de la flecha δ y la fuerza F aplicada en los 7 casos como se muestra en la *Figura 37*.

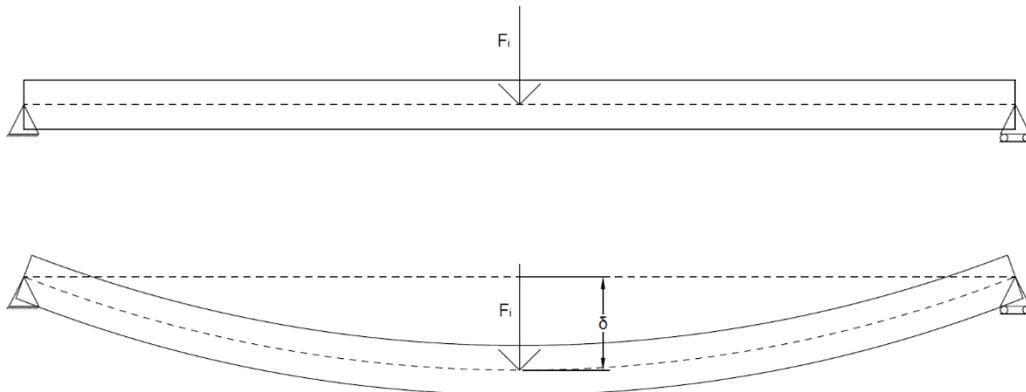


Figura 37: Desplazamiento de una viga sometida a una carga en la sección media y obtención de la flecha.

A continuación, se procedió a realizar el ensayo dinámico. Una vez cargado el puente se procedió a excitar el sistema externamente mediante un golpe y obtener una oscilación para obtener las frecuencias propias ω_n y los coeficientes de amortiguamiento ξ y proceder a graficar.

Como se muestra en la *Figura 38* [6], en un sistema de un grado de libertad el valor de la frecuencia propia ω_n es inversamente proporcional a la masa de la estructura, este procedimiento se repite desde el caso más desfavorable (puente + 6 tuercas) hasta el caso menos desfavorable el cual solo se tiene en cuenta la masa del puente.

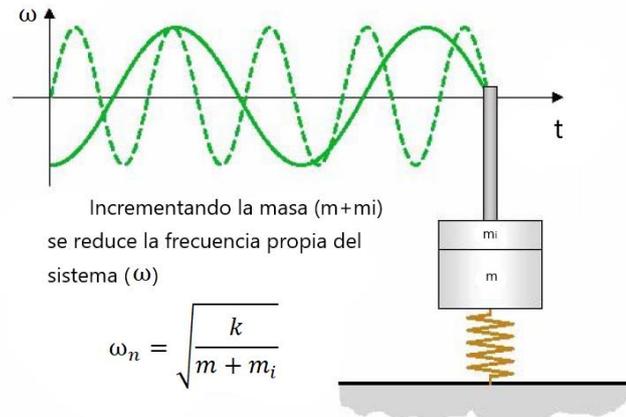


Figura 38: Variación de la frecuencia natural.

Para el caso de una viga simplemente apoyada de 1 grado de libertad con concentración de masa en la sección media se rige por la *ecuación 4.1*.

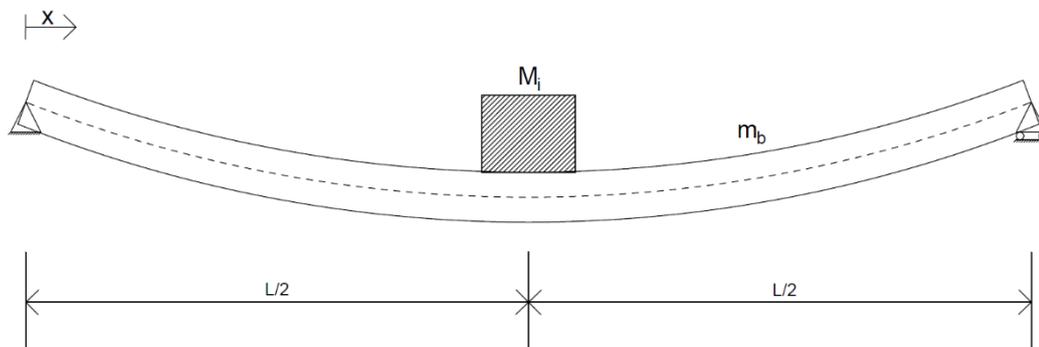


Figura 39: Viga simplemente apoyada con concentración de masa en la sección media.

$$\omega_{teorica} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3 * E * I}{L^3 (M_i + 0,4857 * m_b)}} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Ecuación 4.1: Frecuencia propia de una viga simplemente apoyada con concentración de masa en la sección media.

En la *Tabla 7* que indica el significado de cada parámetro de la ecuación:

| Parámetro | Significado Físico | Unidades |
|------------|-----------------------|----------|
| ω_n | Frecuencia propia | Hz |
| E | Módulo de elasticidad | Pa |
| I | Momento de inercia | m^4 |
| L | Longitud entre apoyos | m |
| M_i | Masa concentrada | kg |
| m_b | Masa de la viga | kg |

Tabla 7: Parámetros de la frecuencia propia de una viga simplemente apoyada con concentración de masa.

4.1.-Metodo de obtención de la constante de rigidez, frecuencias propias de la estructura y coeficientes de amortiguamiento.

En este apartado se va a detallar el procedimiento seguido paso a paso de la experimentación de estos ensayos, la obtención de los datos y el posterior tratamiento de estos por diferentes tipos de software con el fin de elaborar una guía para se pueda replicar con facilidad.

En primer lugar, se dispondrá el emplazamiento del material para realizar este estudio como se muestra en la *Figura 40*. Se apoya el puente sobre 2 mesas previamente marcadas con unas distancias de separación igual en ambos apoyos que simulan apoyos fijo-móvil, en el cual se orienta de modo que apoya el último nodo de la celosía.

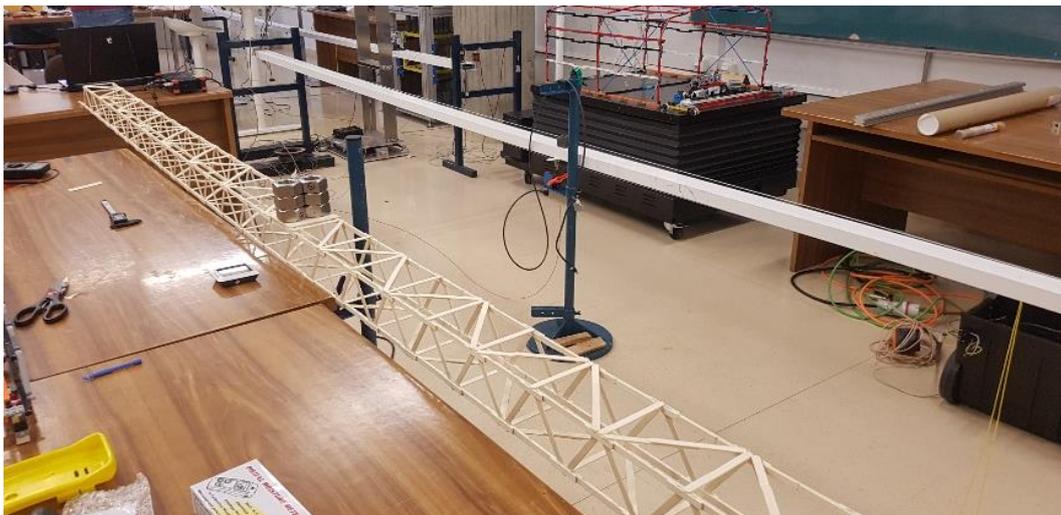


Figura 40: Puente ubicado en la zona de ensayos.

Se coloca el láser en el punto medio de la estructura ($L/2$) como se muestra en la *Figura 41* que medirá la flecha del puente en este punto con una precisión de centésimas de milímetro. En este mismo punto se coloca el tablero construido para distribuir la carga de las tuercas de forma homogénea en toda la estructura.



Figura 41: Láser ubicado en la sección media del puente

Se procedió a conectar el láser al procesador de datos SIRIUS HD-STG y conectar este al portátil para proceder con la configuración de los parámetros de calibración en el software DEWESOFT que está asociado a éste, como se muestra en la *Figura 42*.

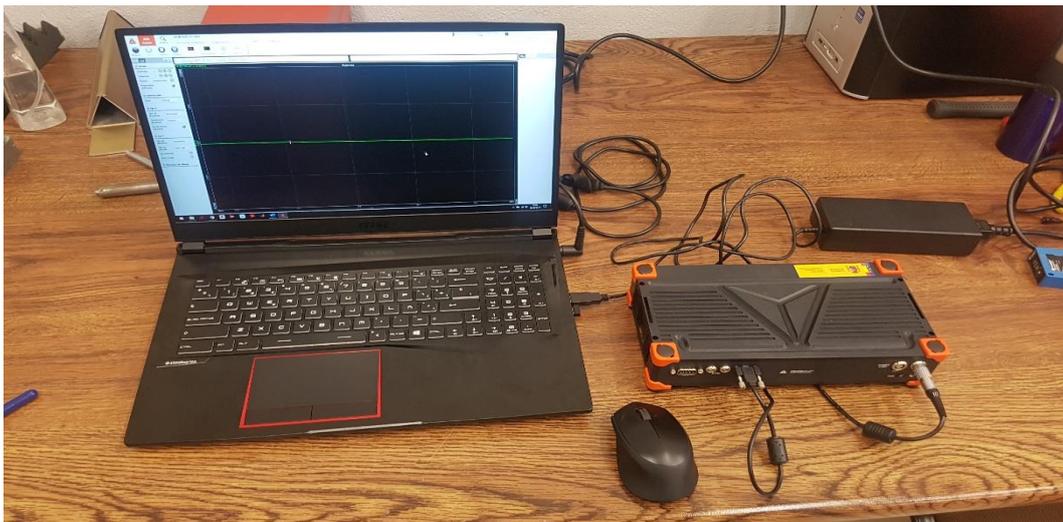


Figura 42: SIRIUS HD-STG conectado a un portátil y registrando en DEWESOFT.

Una vez conectados todos los componentes se procedió a configurar el propio SIRIUS el cual se hace mediante el software DEWESOFT para la correcta lectura de los datos. El primer paso fue identificar el canal al cual estaba conectado, de los 16 que dispone la tarjeta para la toma de datos. Para ello hay que utilizar la pestaña */Measure/Ch.Setup/Analog in/*, donde se muestran todos los canales disponibles, seleccionando el canal de interés. En el caso de la *Figura 43*, se muestra el canal activado.

The screenshot shows the DEWESOFT X3 SP4 software interface. The 'Configuración de Ch.' tab is selected. A table lists 16 channels. Channel 8 is highlighted with a red box and a red arrow pointing to it. The table columns include ID, Utilizado, C, Nombre, Nombre amp, Rango, Medición, Min, Valores, Max, Cantidad física, Uni..., Cero, and Ajuste.

| ID | Utilizado | C | Nombre | Nombre amp | Rango | Medición | Min | Valores | Max | Cantidad física | Uni... | Cero | Ajuste |
|----|-----------|---|--------|----------------|-------|----------|--------|---------|-------|-----------------|--------|------|--------|
| 1 | Utilizado | | AI 1 | SIRIUS+HD-STGS | 10 V | Voltaje | -10,00 | -0,150 | 10,00 | | V | Cero | Ajuste |
| 2 | No usados | | AI 2 | SIRIUS+HD-STGS | 10 V | Voltaje | -10,00 | -0,157 | 10,00 | | V | Cero | Ajuste |
| 3 | No usados | | AI 3 | SIRIUS+HD-STGS | 10 V | Voltaje | -10,00 | -0,040 | 10,00 | | V | Cero | Ajuste |
| 4 | No usados | | AI 4 | SIRIUS+HD-STGS | 10 V | Voltaje | -10,00 | 0,012 | 10,00 | | V | Cero | Ajuste |
| 5 | No usados | | AI 5 | SIRIUS+HD-STGS | 10 V | Voltaje | -10,00 | -0,157 | 10,00 | | V | Cero | Ajuste |
| 6 | No usados | | AI 6 | SIRIUS+HD-STGS | 10 V | Voltaje | -10,00 | -0,003 | 10,00 | | V | Cero | Ajuste |
| 7 | No usados | | AI 7 | SIRIUS+HD-STGS | 10 V | Voltaje | -10,00 | -0,165 | 10,00 | | V | Cero | Ajuste |
| 8 | Utilizado | | AI 8 | SIRIUS+HD-STGS | 10 V | Voltaje | -10,00 | -0,042 | 10,00 | | V | Cero | Ajuste |
| 9 | No usados | | AI 9 | SIRIUS+HD-STGS | 10 V | Voltaje | -10,00 | -0,000 | 10,00 | | V | Cero | Ajuste |
| 10 | No usados | | AI 10 | SIRIUS+HD-STGS | 10 V | Voltaje | -10,00 | -0,144 | 10,00 | | V | Cero | Ajuste |
| 11 | No usados | | AI 11 | SIRIUS+HD-STGS | 10 V | Voltaje | -10,00 | -0,058 | 10,00 | | V | Cero | Ajuste |
| 12 | No usados | | AI 12 | SIRIUS+HD-STGS | 10 V | Voltaje | -10,00 | -0,062 | 10,00 | | V | Cero | Ajuste |
| 13 | No usados | | AI 13 | SIRIUS+HD-STGS | 10 V | Voltaje | -10,00 | -0,002 | 10,00 | | V | Cero | Ajuste |
| 14 | No usados | | AI 14 | SIRIUS+HD-STGS | 10 V | Voltaje | -10,00 | -0,042 | 10,00 | | V | Cero | Ajuste |
| 15 | No usados | | AI 15 | SIRIUS+HD-STGS | 10 V | Voltaje | -10,00 | -0,042 | 10,00 | | V | Cero | Ajuste |
| 16 | No usados | | AI 16 | SIRIUS+HD-STGS | 10 V | Voltaje | -10,00 | -0,097 | 10,00 | | V | Cero | Ajuste |

Figura 43: Configuración del canal 8 en la interfaz de DEWESOFT.

A continuación, una vez activado el canal había que configurarlo para que el SIRIUS tuviera una lectura correcta de la señal. Para este objetivo se seleccionó, para el canal en cuestión la opción Setup, abriendo una ventana auxiliar como la mostrada en la *Figura 44*. En dicha ventana se realiza la configuración de cada uno de los aparatos de medida. En este caso, al tratarse de un láser, se indicó que se estaba utilizando el láser negro en la pestaña */Used sensor/*, con la magnitud medida que en este caso son metros en la pestaña de */Unit/* y se procedió a añadir los valores calibrados para ese láser en la pestaña */By fuction/* donde se indicó la equivalencia de voltios (V) a metros (m) ya calibrados anteriormente por compañeros del laboratorio de estructuras.

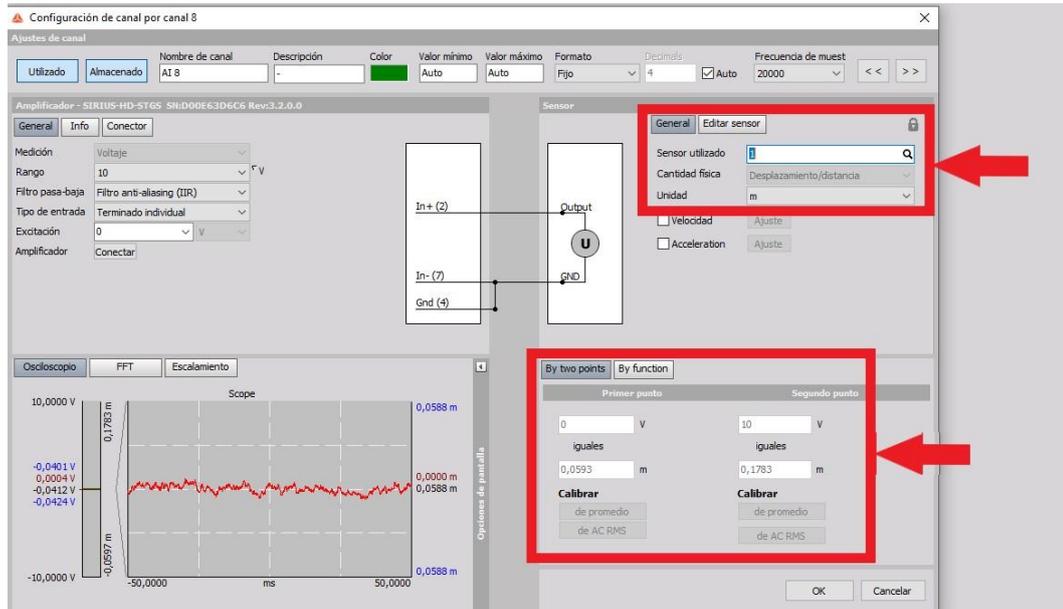


Figura 44: Parámetros de calibración del láser.

Se comprobó el funcionamiento del láser, si registraba los datos correctamente y si se encontraba en el rango de funcionamiento. Se procedió a realizar el primer experimento, para este cometido solo había que nombrar el archivo en este caso “puente” y la frecuencia de muestreo que para estos ensayos se estableció una frecuencia de 100 Hz, como se muestra en la *Figura 45*, se observan las 7 excitaciones del sistema, en el cual se empieza con 6 tuercas y como se observa es el caso que mayor flecha presenta (mayor desplazamiento del punto medio del puente) es el punto más bajo de la gráfica, se sigue con el procedimiento antes expuesto de excitar el sistema con la variación de la masa (quitando tuercas) y dando pequeños golpes, esperando que el sistema se estabilice y procediendo a quitar una tuerca y repetir el ensayo. A simple vista se aprecia va variación de la amplitud, pero eso se debe a la distinta fuerza aplicada en cada ensayo que no afectará en la obtención de los datos como se demostrará más adelante.

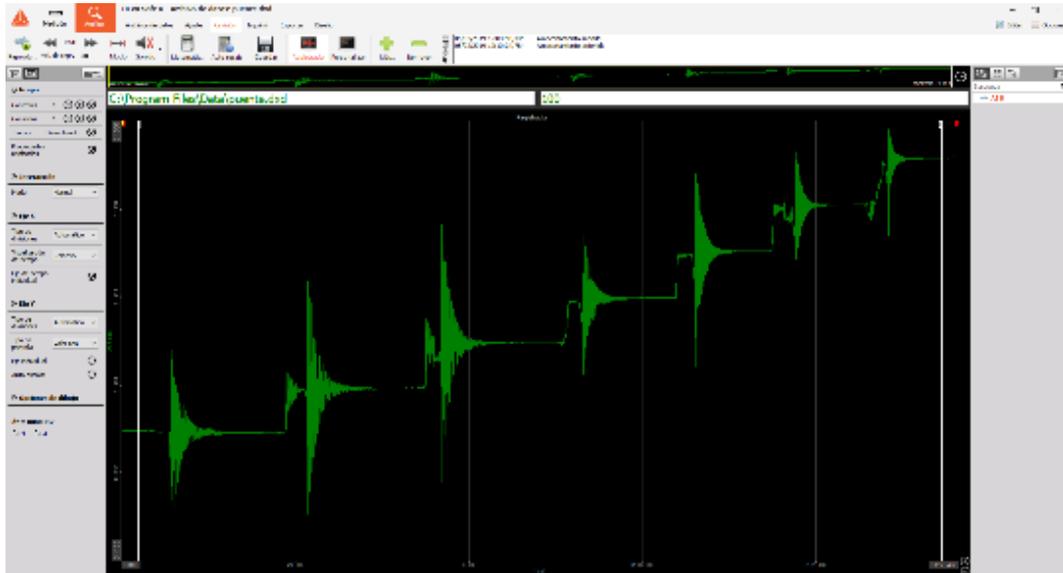


Figura 45: Registro de la flecha del puente frente a excitaciones externas.

Una vez con los datos obtenidos se procede a exportarlo, para este cometido el software está preparado, como se observa en la *Figura 46* hay que seleccionar la pestaña /**Exportar**/ en el cual se tendrá que indicar el nombre del archivo, el tipo de archivo al que se desea exportar que en nuestro caso es en el formato Excel(*.xlsx) y el destino del archivo a exportar, como apunte se puede variar el número de datos por segundo (frecuencia de muestreo) de exportación por si se desea reducir el rango de valores obtenidos en la opción exportar velocidad (Hz) y cambiando el valor predefinido por el valor que se desee en cada caso.

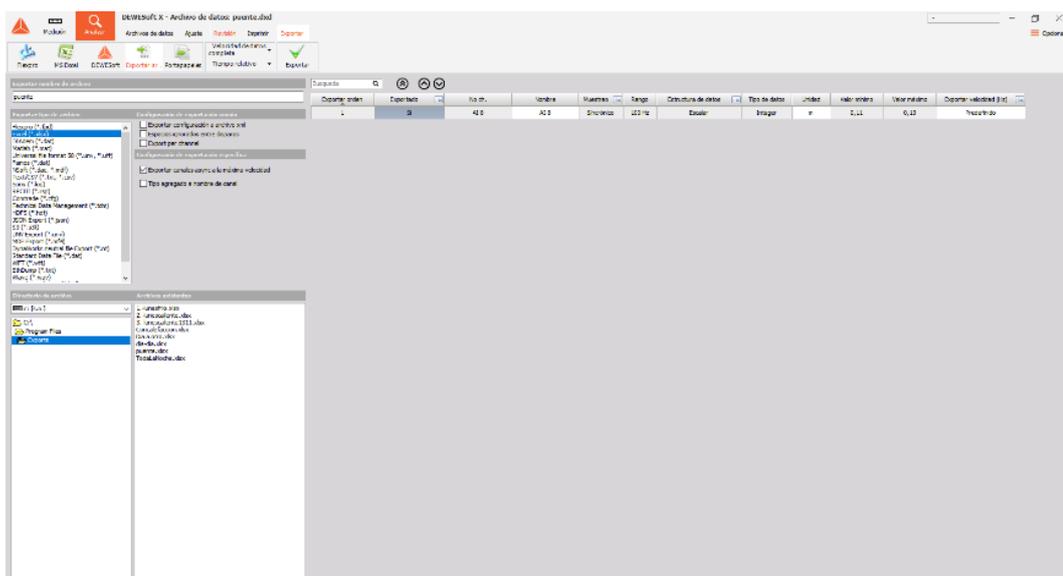


Figura 46: Interfaz de exportación del programa DEWESOFF.

4.1.1 Excel

Como resultado se obtuvo un archivo Excel en el cual se muestran nuestras variables de interés en la primera columna el tiempo en segundos y la segunda columna la flecha del punto medio del puente en metros. El archivo obtenido consta de un experimento de 1 minuto con 36 segundos exportado a 100 Hz nos arroja una tabla de valores de 2 columnas y 9649 filas el cual procedemos a graficar con el sistema de gráficas de Excel para comprobar que los archivos están correctamente exportados, como se observa en la *Figura 47* se comprueba que la gráfica de puntos concuerda con el arrojado por el DEWESoft por lo que damos por correcto este procedimiento de exportación de datos.

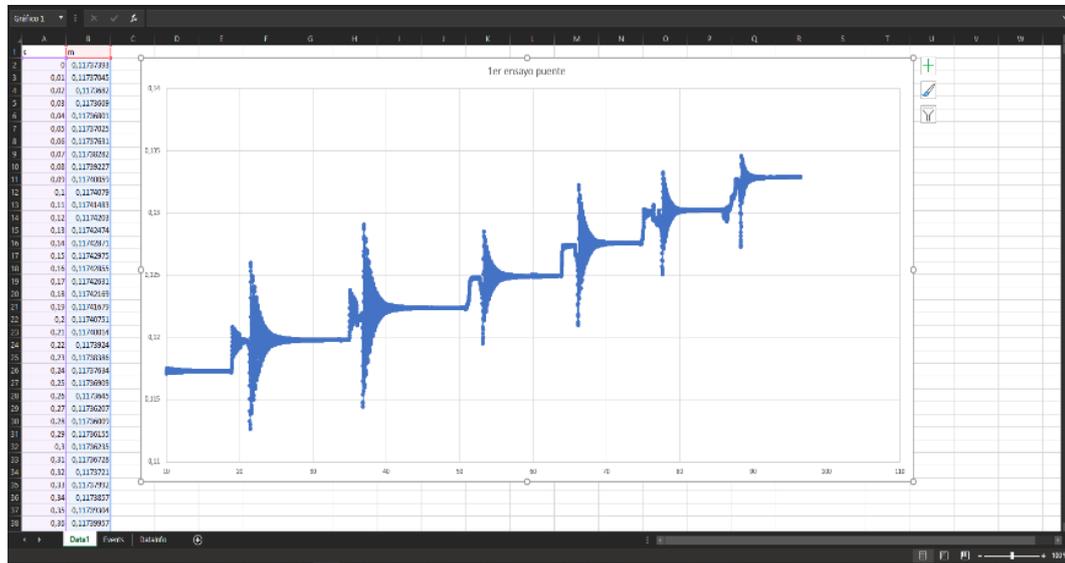


Figura 47: Datos importados y representados en EXCEL.

4.1.2 Matlab

Con los datos obtenidos y exportados se procedió a su tratamiento en Matlab R2017a. Se decidió utilizar este software por su potencia para realizar los cálculos, la forma en que presenta las gráficas y por la herramienta de ajuste de curvas la cual fue el principal motivo por decantarnos por este software.

Se procedió a importar la tabla de valores de Excel anteriormente descrita, para ello hay que utilizar la pestaña */Import Data/* la cual nos abrirá una ventana de explorador de Windows en la que nos pedirá la ubicación del archivo que se desea importar. Para una mejor organización y tratamiento de los datos es mejor crear carpetas individuales para cada experimento e indicarle la ubicación a Matlab; una vez indicada la ubicación de nuestro archivo Excel, Matlab nos muestra una ventana como la que se puede ver en la *Figura 48*, en la cual se observan los datos a importar. En esta ventana solo tendremos que seleccionar la forma en la que queremos que los importe por lo que tendremos que ir a la pestaña de */Output Type/* y seleccionar */Numeric Matrix/*, de este modo Matlab interpretará nuestros datos como una matriz numérica.

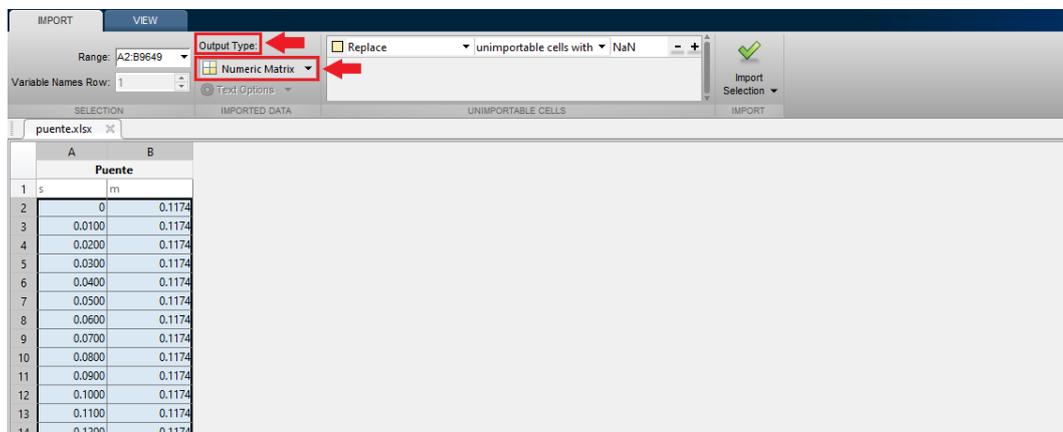


Figura 48: Interfaz de importación de datos de MATLAB.

Una vez se creó la matriz con los datos de nuestro experimento se procedió a renombrarla con el nombre de matriz "M" para que posteriormente al ejecutar los comandos de programación propios del Matlab nos sea más fácil identificarla y crear una secuencia de comandos válida para todos los experimentos. A continuación, se procedió a crear los vectores de tiempo que a partir de ahora se llamarán "T", así como el vector de desplazamiento nombrado "d", con las siguientes líneas de código que se introdujeron en la ventana */Comand Window/* $T = M(:,1);$ / $d = M(:,2);$ / $plot(T,d);$ /.

Como se muestra en la *Figura 49* Matlab nos muestra en la ventana de */Workspace/* la matriz numérica “M” importada a partir del experimento como los vectores creados a partir de esta como Tiempo “T” y Desplazamiento “d” en donde se puede apreciar que son vectores de 1 columna y 9648 filas.

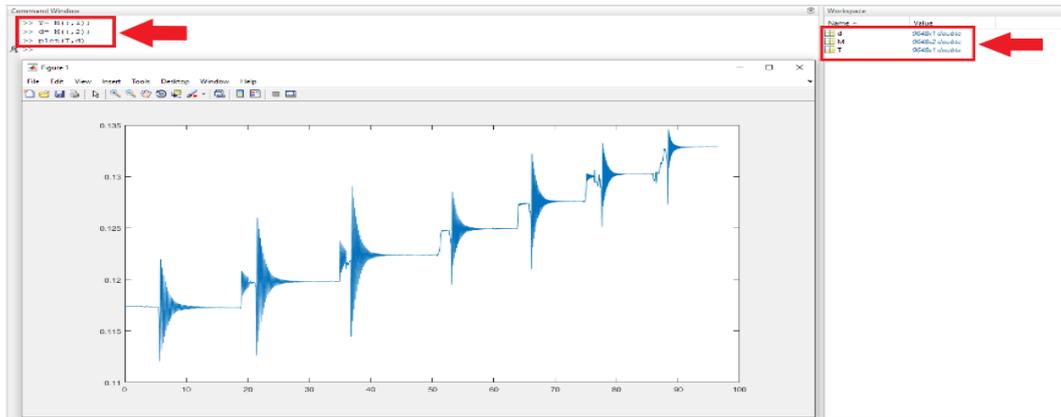


Figura 49: Representación de los datos importados a MATLAB.

El comando “*plot*” nos muestra la gráfica de los datos a estudiar la cual nos sirve para establecer los intervalos de tiempo para cada ensayo y así poder dividir el experimento para cada caso y obtener los datos de interés. Para ello en la ventana de la gráfica se utilizó la herramienta de */data cursor/* la cual nos muestra los valores que tiene en cada punto seleccionado, para así poder segmentar los experimentos en 7 partes como se muestra en la *Figura 50* en los cuales nos interesan los intervalos de tiempo para cada uno de estos ensayos en el cual el primer punto es uno anterior al instante de excitación del sistema y el segundo es un punto en el que el sistema se ha estabilizado.

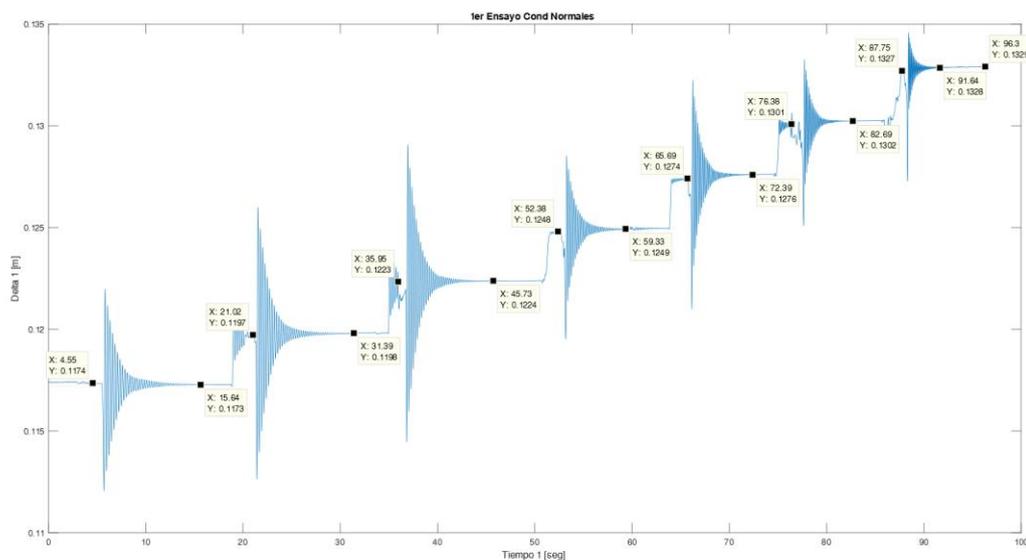


Figura 50: Selección de los intervalos de tiempo en los que se realizará el ajuste.

A continuación, procedemos a crear archivos *script.m* propios del Matlab para crear las líneas de código que segmentarán nuestro experimento en 7 partes. Como se muestra en la *Figura 51* solo se tendrá que hacer clic en la pestaña de */New Script/*.

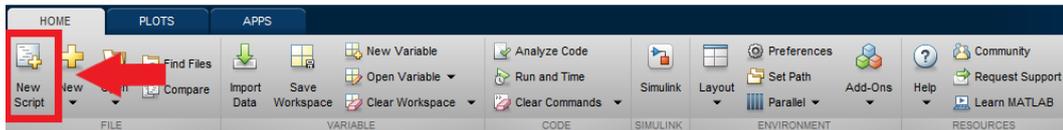


Figura 51: Barra de herramientas de MATLAB.

Esta pestaña nos abrirá una nueva ventana como se muestra en la *Figura 52* en la cual ingresaremos las líneas de código para que el Matlab cree los nuevos vectores de interés para este ensayo, en el cual se indica como primera variable el intervalo de tiempo para el experimento con 6 tuercas llamado *Te6*, los nuevos vectores tiempo y desplazamiento de esta parte del experimento llamado *T61* y *d61*, así como una línea que establece el tiempo de este experimento a 0 segundos mostrado en la quinta línea del código y una línea que muestra la gráfica de este intervalo.

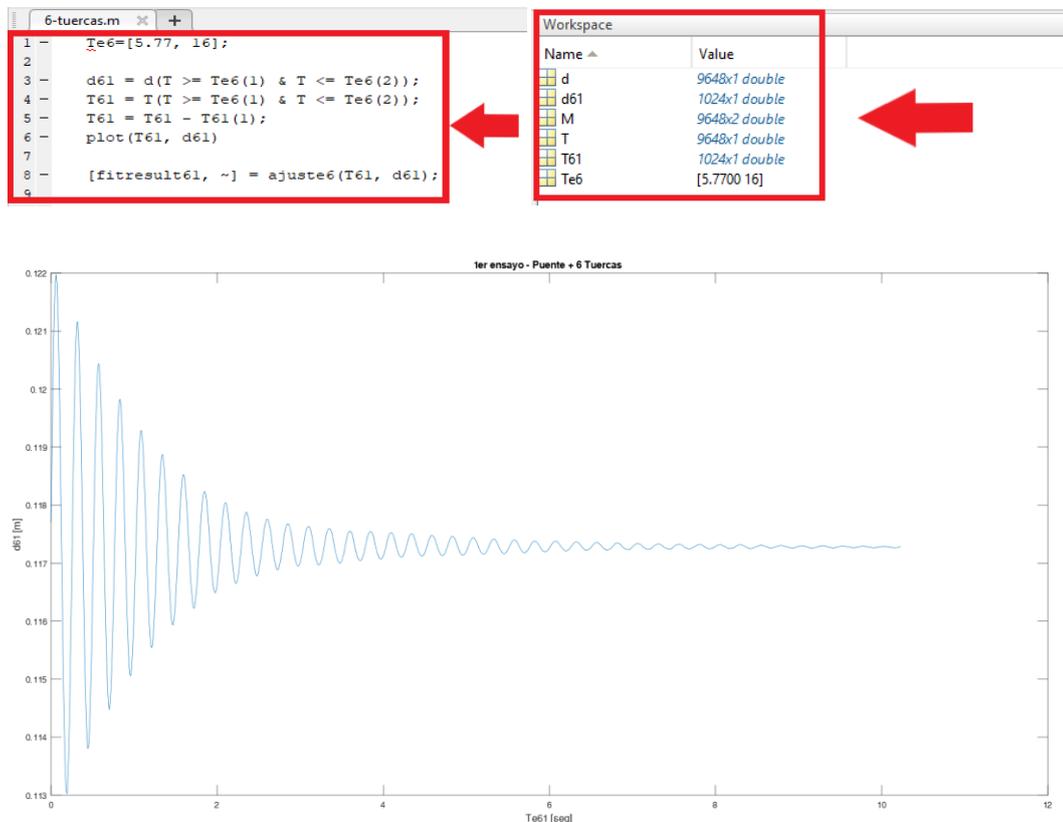


Figura 52: Programación y representación de un intervalo de estudio.

Una vez creados los nuevos vectores de nuestro experimento se procede a ejecutar el comando */cftool/* en la ventana de */Comand Window/* la cual es una herramienta de Matlab para el ajuste de curvas en el cual introduciremos los valores obtenidos en nuestros experimentos para calcular los datos de interés de este TFG.

A continuación, se abrirá la ventana de *Curve Fitting Tool* en la cual tendremos que ir introduciendo los parámetros de nuestro experimento con 6 tuercas, como se muestra en la *Figura 53*. Tendremos que indicar el nombre de la curva en este caso “6 tuercas” y seleccionar los datos que queremos que se interpreten en el eje X “abscisas” e Y “ordenadas” , en los cuales se selecciona el vector T61 y d61 respectivamente. En la parte derecha tendremos que seleccionar el tipo de ecuación que queremos, en este caso en una ecuación personalizada */Custom Equation/* en la que introduciremos nuestra ecuación de movimiento de un sistema subamortiguado de un grado de libertad como se muestra en la *ecuación 4.2*. de las cuales los valores importantes a estudiar son la frecuencia propia del sistema ω y el coeficiente de amortiguamiento respecto al crítico ξ en el dominio del tiempo.

$$y(t) = A * \text{sen} (\omega * t + \varphi) * e^{-\xi * \omega * t} + B \quad (\text{Ec.4.2})$$

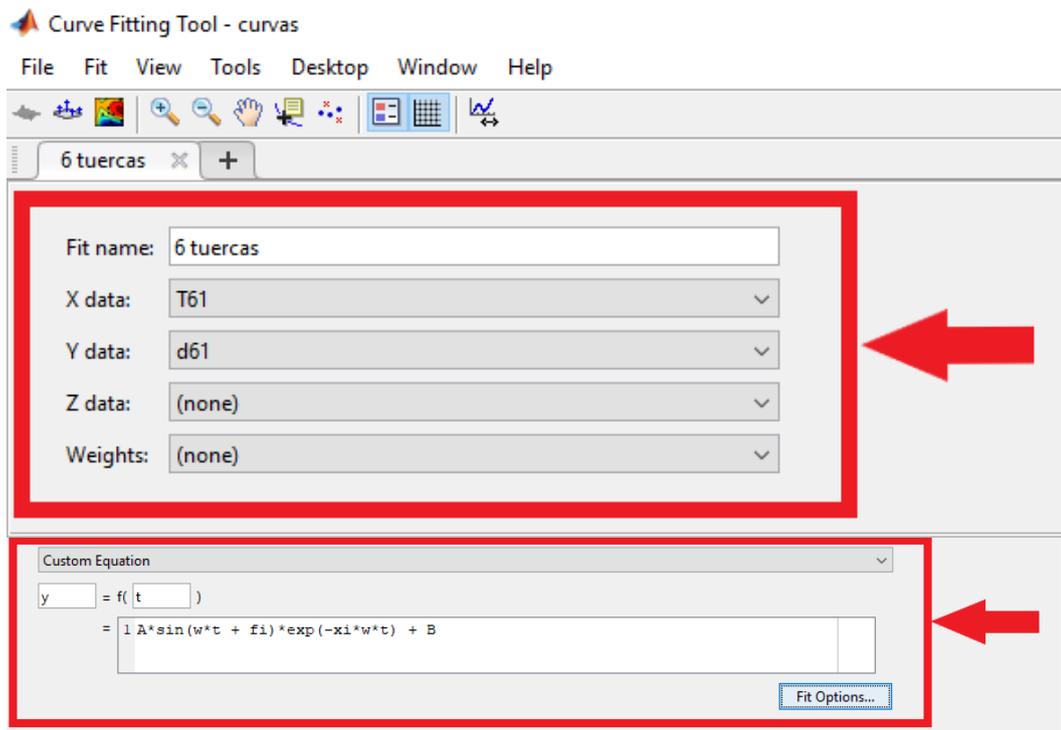


Figura 53: Interfaz del módulo Curve Fitting Tool de MATLAB.

En la *Tabla 8* se indica lo que representa cada parámetro:

| Parámetro | Significado Físico | Unidades |
|-----------|---|--------------|
| A | Amplitud de Onda | m |
| ω | Frecuencia propia de la estructura | rad/s |
| φ | Desfase | rad |
| ξ | Coefficiente de amortiguamiento respecto al critico | Adimensional |
| B | Flecha | m |

Tabla 8: Parámetros de la ecuación de movimiento de un sistema subamortiguado.

Tendremos que establecer un rango de valores en el cual se encuentran las variables de la ecuación anteriormente presentada, como se muestra en la *Figura 54* en las cuales las más representativas son: El valor de la amplitud “**A**” que se podrá establecer con el rango observando en la gráfica, la constante de flecha “**B**” que representa el punto de partida de la flecha de la estructura con esa carga y los valores de la frecuencia “ ω ” que oscila entre los 20 y 70 [rad/s] y coeficiente de amortiguamiento respecto al crítico “ ξ ” que nunca podrá ser negativo y oscila entre valores de 0 a 0.3.

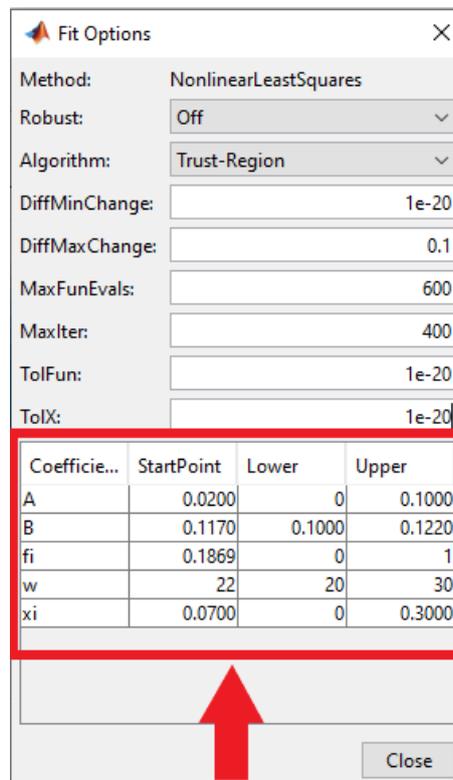
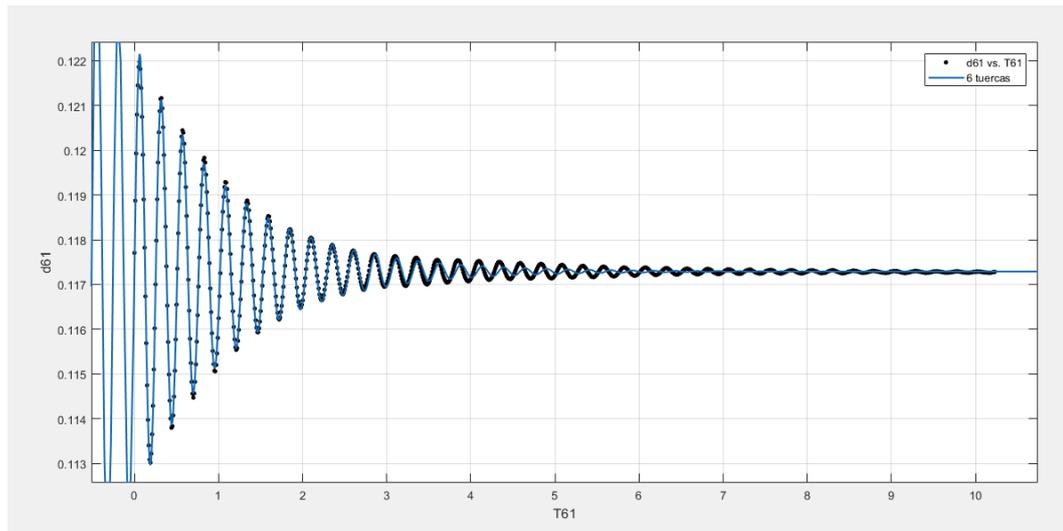


Figura 54: Ventana de las opciones de ajuste para mejorar la precisión.

Una vez establecido el rango de valores Matlab empezará a interpolar hasta llegar a un ajuste con un intervalo de confianza del 95 %, el cual se muestra en la *Figura 55* en la que se representan los puntos como datos obtenidos experimentalmente y la curva el ajuste realizado por Matlab el cual nos muestra tanto la gráfica obtenida como los valores medios del ajuste de estos datos.



General model:

$$f(t) = A \cdot \sin(w \cdot t + fi) \cdot \exp(-xi \cdot w \cdot t) + B$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$A = 0.005143 \quad (0.005098, 0.005189)$$

$$B = 0.1173 \quad (0.1173, 0.1173)$$

$$fi = 0.02198 \quad (0.01328, 0.03068)$$

$$w = 24.67 \quad (24.65, 24.68)$$

$$xi = 0.0368 \quad (0.03634, 0.03726)$$

Goodness of fit:

$$SSE: 7.542e-06$$

$$R\text{-square: } 0.9898$$

$$\text{Adjusted R-square: } 0.9897$$

$$RMSE: 8.603e-05$$

Figura 55: Representación del ajuste y los valores obtenidos por MATLAB.

A la vista del ajuste, Matlab nos presenta los valores requeridos con un ajuste del 98,98 %; para realizar este estudio siendo de principal interés de este TFG la frecuencia propia de la estructura ω [rad/s] y el coeficiente de amortiguamiento respecto al crítico ξ , una vez obtenidos estos datos procedemos a tabularlos como se muestra en la *Tabla 9*.

| Valores medios 1er ensayo 6 tuercas | | | | | | |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------------|------------------|--------|
| M [kg] | F [N] | A [m] | B [m] | ϕ [rad] | ω [rad/s] | ξ |
| 1,968 | 19,306 | 0,0051 | 0,1173 | 0,0219 | 24,67 | 0,0368 |

Tabla 9: Valores medios obtenidos para el primer ensayo con 6 tuercas.

Se repite el procedimiento anteriormente descrito para la obtención de todos los valores para los 7 experimentos correspondientes al primer ensayo, en el cual se crea un fichero *curvas.sfit* en el cual tendremos todos los experimentos correspondientes a cada ensayo como se muestra en la *Figura 56*.

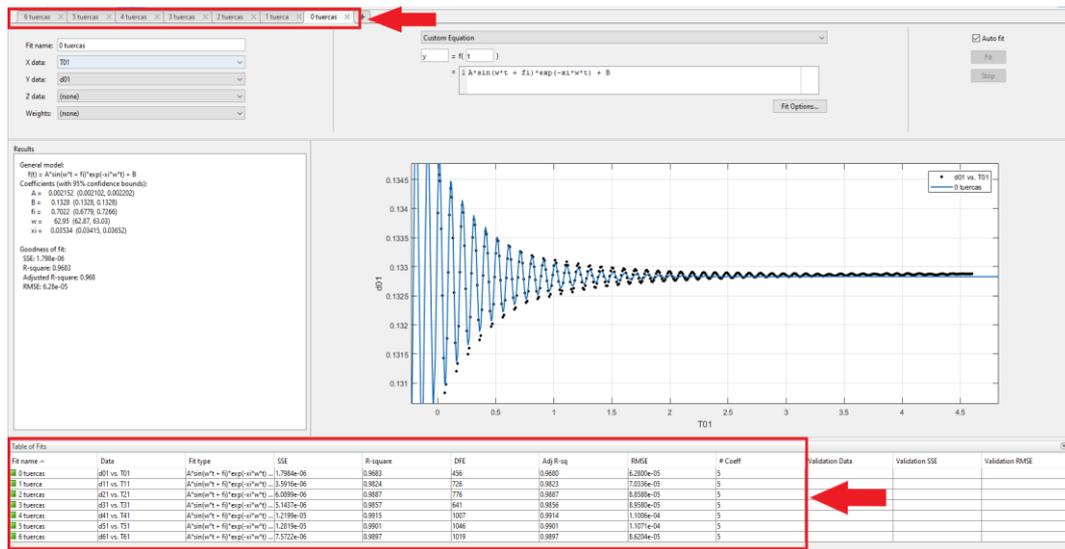


Figura 56: Interfaz del Fitting Tool de MATLAB.

Una vez creado el archivo de ajuste de curvas, como se muestra en la *Figura 57* se procede a crear un archivo *Fitresultados.m* que se muestra en la ventana */Current Folder/* la cual muestra todos los archivos generados y necesarios para realizar cada ensayo. Para ejecutar el fichero solo se tendrá que ir a la pestaña */EDITOR/RUN/*.

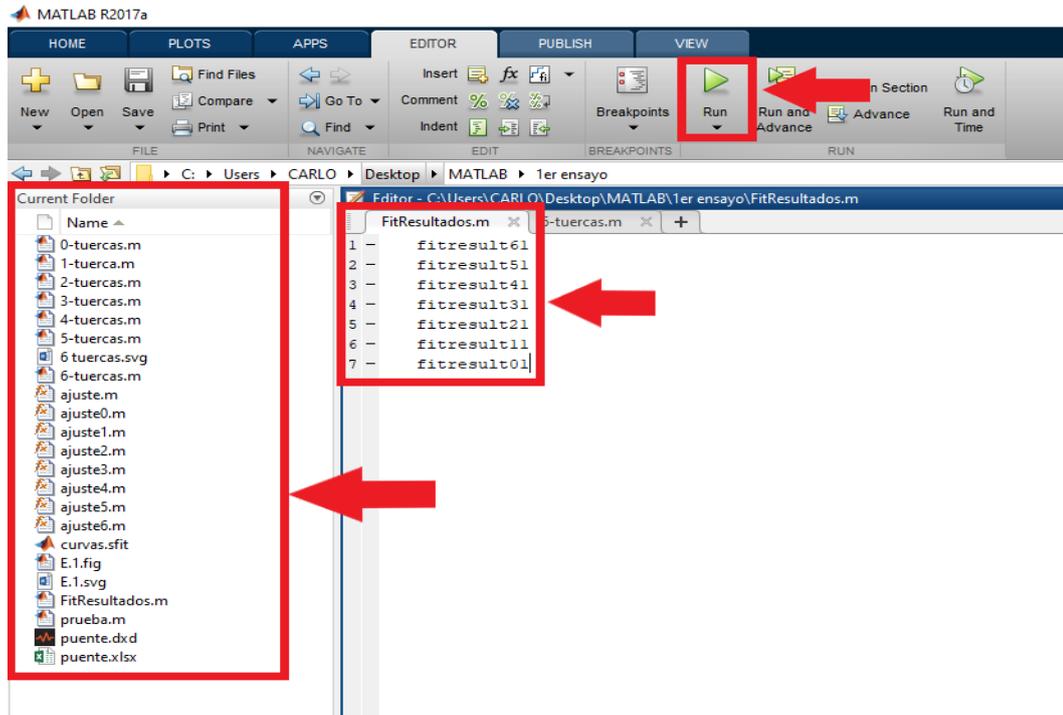


Figura 57: Interfaz de MATLAB.

Este archivo genera la presentación de todos datos obtenidos de forma automática en la ventana de */Comand Window/* por el ajuste. Como se observa en la *Figura 58* y *Figura 59* se muestra la presentación de los datos obtenidos en el primer ensayo.

```
Command Window

fitresult6l =

General model:
fitresult6l(t) = A*sin(w*t + fi)*exp(-xi*w*t) + B
Coefficients (with 95% confidence bounds):
A = 0.005169 (0.005123, 0.005215)
B = 0.1173 (0.1173, 0.1173)
fi = 0.02578 (0.01705, 0.0345)
w = 24.66 (24.65, 24.67)
xi = 0.03722 (0.03675, 0.03769)

fitresult5l =

General model:
fitresult5l(t) = A*sin(w*t + fi)*exp(-xi*w*t) + B
Coefficients (with 95% confidence bounds):
A = 0.006909 (0.00685, 0.006968)
B = 0.1198 (0.1198, 0.1198)
fi = 0.233 (0.2244, 0.2416)
w = 26.48 (26.47, 26.49)
xi = 0.03553 (0.0351, 0.03596)

fitresult4l =

General model:
fitresult4l(t) = A*sin(w*t + fi)*exp(-xi*w*t) + B
Coefficients (with 95% confidence bounds):
A = 0.00748 (0.007419, 0.00754)
B = 0.1224 (0.1223, 0.1224)
fi = 0.04491 (0.03692, 0.0529)
w = 28.74 (28.73, 28.75)
xi = 0.03441 (0.03402, 0.03481)

fitresult3l =

General model:
fitresult3l(t) = A*sin(w*t + fi)*exp(-xi*w*t) + B
Coefficients (with 95% confidence bounds):
A = 0.004002 (0.00395, 0.004054)
B = 0.1249 (0.1249, 0.1249)
fi = 0.3851 (0.3717, 0.3986)
w = 32.33 (32.31, 32.35)
xi = 0.03583 (0.03516, 0.0365)
```



Figura 58: Valores de los experimentos con 3,4,5 y 6 tuercas.

```
Command Window

fitresult31 =

General model:
fitresult31(t) = A*sin(w*t + fi)*exp(-xi*w*t) + B
Coefficients (with 95% confidence bounds):
A = 0.004002 (0.00395, 0.004054)
B = 0.1249 (0.1249, 0.1249)
fi = 0.3851 (0.3717, 0.3986)
w = 32.33 (32.31, 32.35)
xi = 0.03583 (0.03516, 0.0365)

fitresult21 =

General model:
fitresult21(t) = A*sin(w*t + fi)*exp(-xi*w*t) + B
Coefficients (with 95% confidence bounds):
A = 0.005178 (0.005123, 0.005233)
B = 0.1276 (0.1276, 0.1276)
fi = 0.07272 (0.06227, 0.08317)
w = 36.92 (36.9, 36.93)
xi = 0.03414 (0.03362, 0.03465)

fitresult11 =

General model:
fitresult11(t) = A*sin(w*t + fi)*exp(-xi*w*t) + B
Coefficients (with 95% confidence bounds):
A = 0.003427 (0.00338, 0.003474)
B = 0.1302 (0.1302, 0.1302)
fi = 0.4875 (0.4735, 0.5016)
w = 45.19 (45.16, 45.22)
xi = 0.03347 (0.03281, 0.03412)

fitresult01 =

General model:
fitresult01(t) = A*sin(w*t + fi)*exp(-xi*w*t) + B
Coefficients (with 95% confidence bounds):
A = 0.002508 (6.418e-05, 0.004953)
B = 0.1328 (0.1328, 0.1329)
fi = 0.7967 (-0.3062, 1.9)
w = 48.37 (17.88, 78.87)
xi = 0.8554 (-0.06142, 1.772)

fx >> |
```

Figura 59: Valores de los experimentos con 0,1,2 y 3 tuercas.

A continuación, se muestran los datos de los ensayos obtenidos con el procedimiento anteriormente descrito, para en el cual se varían las condiciones ambientales como son la temperatura y humedad. Además de la variación de carga prevista para estos ensayos.

4.2 Primer ensayo T= 19,5°C y Hm=0%.

El primer ensayo se realizó en condiciones normales del laboratorio en el cual se midieron la temperatura, humedad relativa del ambiente y la humedad de la madera como se muestra en la *Tabla 10*.

| Temperatura °C | Humedad Relativa | Humedad Madera | Masa Punte kg |
|----------------|------------------|----------------|---------------|
| 19,5 | 39 % | 0 % | 0,7025 |

Tabla 10: Condiciones ambientales y masa del puente en el primer ensayo.

Se procedió con el procedimiento anteriormente descrito para obtener la gráfica de variación de la flecha en un intervalo de tiempo, como se muestra en la *Figura 60*. En la cual se pueden observar las 7 vibraciones del puente comenzando por el experimento con 6 tuercas que como se observa está en el punto más bajo de la gráfica debido a que tiene mayor flecha por el peso que soporta. Se observa que en el último experimento solo vibra el puente y se estabiliza.

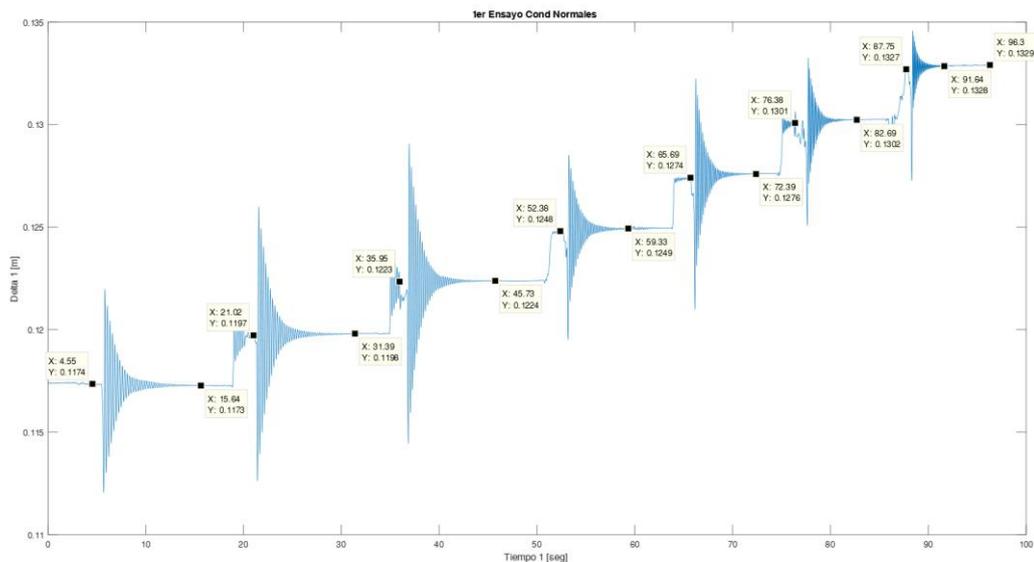


Figura 60: Gráfica de la variación de la flecha en un intervalo de tiempo del primer ensayo.

A la vista de esta gráfica se realiza el procesado de datos descritos anteriormente, con el cual se obtienen los parámetros de la *ecuación 4.2* de interés para el estudio de este TFG.

A continuación, se procede a tabular los valores obtenidos en el ensayo estático como se muestra en la *Tabla 11*, para poder representarlo y realizar un ajuste lineal que relacione la Fuerza F N y la flecha δ m como se observa en la *Figura 61*, en la cual se obtiene la constante de rigidez del puente K N/m que se muestra en la *Tabla 12*.

| N.º de Tuercas | F_i N | u_i m | δ_i m |
|----------------|------------|---------------------|----------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3,22 | 26×10^{-4} | 26×10^{-4} |
| 2 | 6,44 | 26×10^{-4} | 52×10^{-4} |
| 3 | 9,65 | 27×10^{-4} | 79×10^{-4} |
| 4 | 12,87 | 25×10^{-4} | 104×10^{-4} |
| 5 | 16,09 | 26×10^{-4} | 133×10^{-4} |
| 6 | 19,31 | 25×10^{-4} | 155×10^{-4} |

Tabla 11: Valores de incremento de flecha y flecha del primer ensayo.

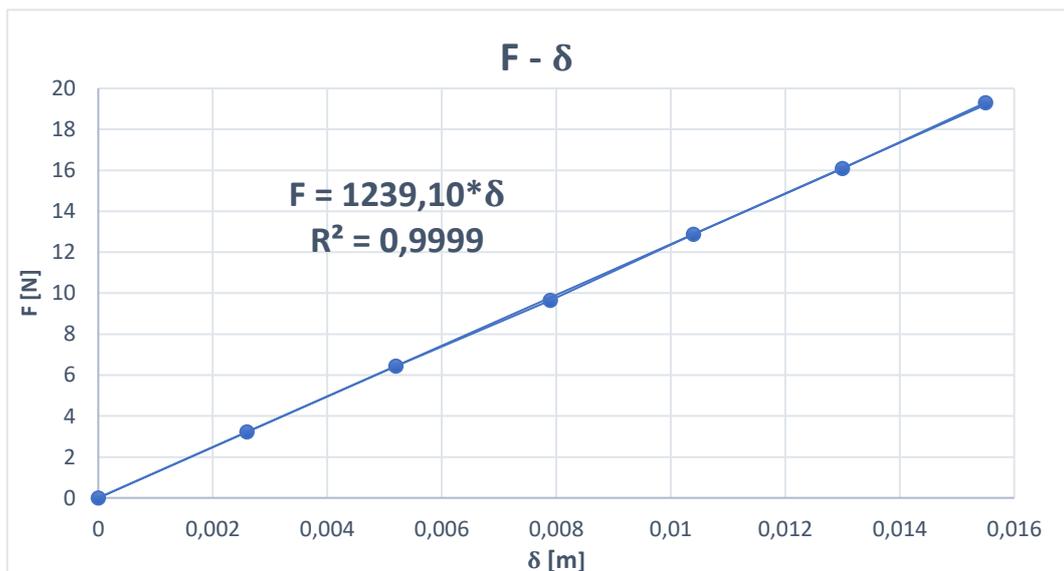


Figura 61: Gráfica de deformación frente a la carga del primer ensayo.

| | |
|--|----------------------|
| Constante de rigidez del puente K | 1239,10 [N/m] |
|--|----------------------|

Tabla 12: Valor de la constante de rigidez del puente en el primer ensayo.

Paralelamente se procedió a tabular los valores obtenidos en el ensayo dinámico obteniendo los valores de la oscilación forzada como se muestra en la *Tabla 13*. En ella la frecuencia propia de la estructura ω_n *rad/s* se pasa al dominio de las frecuencias f_n *Hz*. La cual va disminuyendo según se aumenta la masa, como cabe esperar debido a la *ecuación 4.1* que correlaciona estas 2 variables, otro aspecto importante en este ensayo es que el coeficiente de amortiguamiento respecto al crítico ξ se mantiene constante teniendo solo variaciones en el orden de las milésimas.

| N.º de Tuercas | Masa total kg | A_i m | B_i m | φ_i rad | ω_{n_i} rad/s | f_i Hz | ξ_i |
|----------------|---------------|---------|---------|-----------------|----------------------|----------|---------|
| 0 | 0,7025 | 0,0022 | 0,1328 | 0,7022 | 62,95 | 10,02 | 0,0353 |
| 1 | 1,0305 | 0,0034 | 0,1302 | 0,4875 | 45,19 | 7,19 | 0,0335 |
| 2 | 1,3585 | 0,0052 | 0,1276 | 0,0727 | 36,92 | 5,88 | 0,0341 |
| 3 | 1,6865 | 0,0040 | 0,1249 | 0,3851 | 32,33 | 5,15 | 0,0358 |
| 4 | 2,0145 | 0,0075 | 0,1224 | 0,0449 | 28,74 | 4,57 | 0,0344 |
| 5 | 2,3425 | 0,0069 | 0,1198 | 0,2333 | 26,48 | 4,22 | 0,0355 |
| 6 | 2,6705 | 0,0052 | 0,1173 | 0,0258 | 24,66 | 3,93 | 0,0372 |

Tabla 13: Valores del ensayo dinámico del primer ensayo.

A partir de la *ecuación 4.1* de la frecuencia natural ($\omega_{teorica}$) para una viga simplemente apoyada de 1 grado de libertad, podremos calcular de forma aproximada el valor del producto del módulo de elasticidad (**E**) y el momento de inercia (**I**) para el caso que no está cargado (ausencia de concentración de masa en la sección media) y así calcular diferencia de las frecuencias teóricas y las experimentales.

$$\omega_{teorica} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3 * E * I}{L^3(M_i + 0,4857 * m_b)}}$$

Con el primer ensayo dinámico podremos despejar el producto de **E · I**, debido a que hay ausencia de masa concentrada $M_i = 0$:

$$E * I = \left(\frac{\omega_{experimental} * \pi}{2} \right)^2 * \frac{L^3(M_i + 0,4857 * m_b)}{3}$$

$$E * I = \left(\frac{\omega_{experimental} * \pi}{2} \right)^2 * \frac{L^3(0 + 0,4857 * m_b)}{3}$$



Introduciendo los valores previamente definidos obtendremos en producto de $E \cdot I$ para este ensayo como se muestra en la *Tabla 14*. La cual nos permitirá calcular las frecuencias teóricas en los casos que hay presencia de masa concentrada.

| | |
|-------------|-----------------------------|
| $E \cdot I$ | 1941,52 [N m ²] |
|-------------|-----------------------------|

Tabla 14: Valor del producto de $E \cdot I$ del primer ensayo

Con el producto de $E \cdot I$, procedemos a calcular la frecuencia propia teórica para todos los casos y calcularemos el error cometido entre las frecuencias teóricas y las experimentales halladas presentadas en la *Tabla 15*.

| Masa Tuercas (M _i) kg | Masa Puente (m _b) kg | ω Teórico rad/s | ω Experimental rad/s | f teórica Hz | f Experimental Hz | Error |
|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------|----------------------|-------|
| 0 | 0,7025 | 62,95 | 62,95 | 10,02 | 10,02 | 0,04% |
| 0,3280 | 0,7025 | 44,94 | 45,19 | 7,16 | 7,19 | 0,51% |
| 0,6560 | 0,7025 | 36,81 | 36,92 | 5,86 | 5,88 | 0,25% |
| 0,9840 | 0,7025 | 31,93 | 32,33 | 5,08 | 5,15 | 1,19% |
| 1,3120 | 0,7025 | 28,59 | 28,74 | 4,55 | 4,57 | 0,48% |
| 1,6400 | 0,7025 | 26,11 | 26,48 | 4,16 | 4,22 | 1,34% |
| 1,9680 | 0,7025 | 24,19 | 24,66 | 3,85 | 3,92 | 1,87% |

Tabla 15: Valores de la frecuencia propia teórica y experimental del primer ensayo.

4.3 Estudio del comportamiento de la estructura a lo largo de un día.

Para este ensayo se procedió a estudiar la variación de la flecha de la estructura dejándolo en el laboratorio sometido a las condiciones de la variación de temperatura, en el cual se procedió a graficar el comportamiento de la flecha de la estructura con la variación de la temperatura del laboratorio en un intervalo de tiempo comprendido entre las 14:00 horas hasta las 09:00 horas del día siguiente. Como se muestra en la *Figura 62* se observa que a medida que desciende la temperatura la estructura muestra menos flecha, esto es debido a que las uniones al estar hechas con un material termosensible se rigidizan al descender las temperaturas. Como consecuencia tiene un incremento de rigidez de la estructura y un descenso de la flecha a lo largo del tiempo, al final del ensayo se observa un incremento de la flecha que se produce sobre las 07:00 horas, que corresponde con el momento de encendido del termostato del laboratorio, a pesar de esto la estructura tiende a estabilizarse pasado un tiempo.

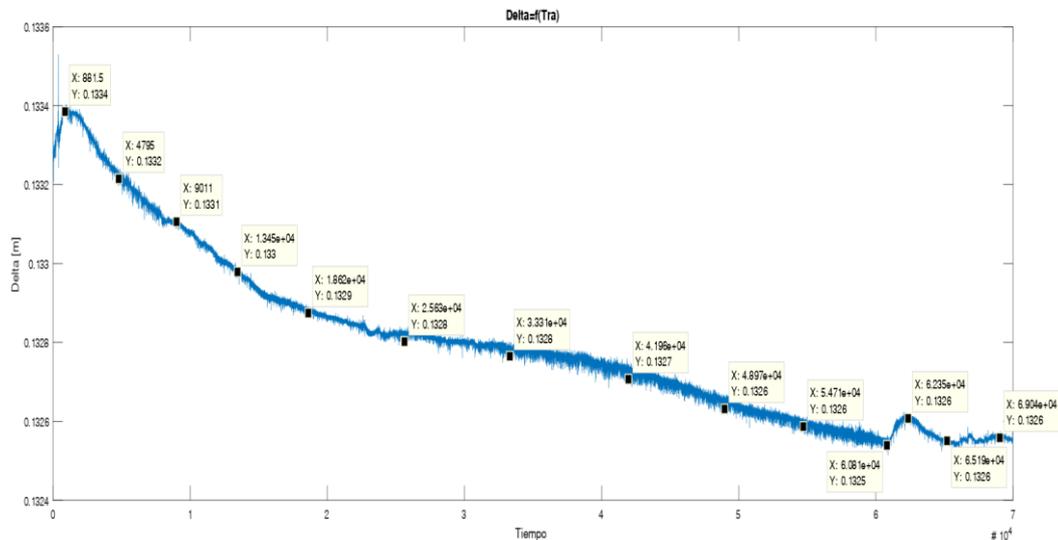


Figura 62: Evolución de la flecha de la estructura a lo largo de un día en el laboratorio.

Se puede pensar que el incremento de rigidez tiene un valor significativo a la vista de la *Figura 62*, pero la escala de δ tiene un orden de 10^{-4} m. Calculamos la variación de la flecha entre los puntos inicial y final y obtenemos un valor de 8×10^{-4} m presentado en *Tabla 16*, por lo que podemos deducir que la variación de la temperatura no es significativa a la hora de afectar en las uniones del puente.

| | |
|---|--|
| Variación de la Flecha δ_i | 8×10^{-4} m |
|---|--|

Tabla 16: Variación de la flecha de la estructura a lo largo de un día.

4.4 Estudio del comportamiento de la estructura.

Para este ensayo se procedió a partir del ensayo anterior en el cual se estudió el comportamiento de la estructura a lo largo de 1 día. En el presente ensayo se pretende caracterizar la variación de la flecha en un intervalo de tiempo con la estructura cargada, además de la variación de temperatura a la que está sometida en el laboratorio.

Como se muestra en la *Figura 63* se procedió a cargar la estructura con 6 tuercas que corresponde el punto de un incremento de la flecha. Una vez estabilizado se procede a estudiar el comportamiento de la flecha a lo largo de 1 hora y 11 minutos. En el instante inicial se tiene una flecha de $11,76 \times 10^{-2}$ m y en punto final se obtiene un valor de $11,46 \times 10^{-2}$ m.

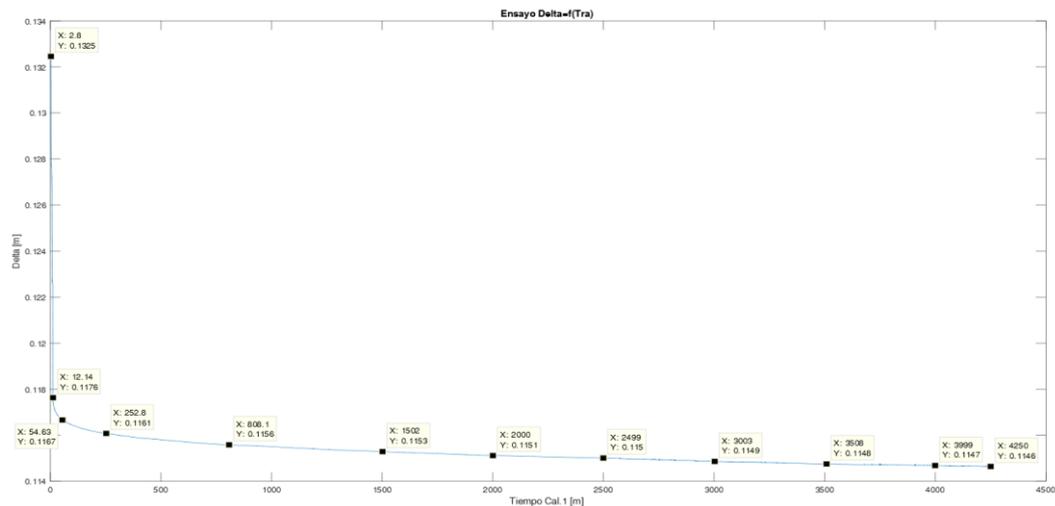


Figura 63: Evolución de la flecha de la estructura cargada en un intervalo de tiempo.

En la *Tabla 17* se presenta el valor de la variación de la flecha. Al ser tan pequeño podemos considerar que la estructura se estabiliza.

| Tiempo [s] | Flecha [m] | Tiempo [s] | Flecha [m] |
|---|------------------------|--|------------------------|
| 3 | $13,25 \times 10^{-2}$ | 2000 | $11,51 \times 10^{-2}$ |
| 12 | $11,76 \times 10^{-2}$ | 2500 | $11,50 \times 10^{-2}$ |
| 55 | $11,67 \times 10^{-2}$ | 3003 | $11,49 \times 10^{-2}$ |
| 253 | $11,61 \times 10^{-2}$ | 3508 | $11,48 \times 10^{-2}$ |
| 808 | $11,56 \times 10^{-2}$ | 3999 | $11,47 \times 10^{-2}$ |
| 1502 | $11,53 \times 10^{-2}$ | 4250 | $11,46 \times 10^{-2}$ |
| Variación de la Flecha δ_i | | 3×10^{-3} m | |

Tabla 17: Variación de la flecha de la estructura cargada.

4.5 Segundo ensayo variando la humedad T= 21,4°C y Hm=61%.

Para el segundo ensayo se procedió a variar las condiciones de humedad de la madera, aplicando mediante un pulverizador gotas de agua sobre toda la estructura de modo que se humedezca de forma homogénea.

Se procedió a medir todos los parámetros ambientales del ensayo como se muestra en la *Tabla 18*.

| Temperatura °C | Humedad Relativa | Humedad Madera | Masa Puente kg |
|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| 21,4 | 33 % | 61 % | 0,7399 |

Tabla 18: Condiciones ambientales y masa del puente en el segundo ensayo.

Se procedió con el procedimiento anteriormente descrito para obtener la gráfica de variación de la flecha en un intervalo de tiempo, como se muestra en la *Figura 64*. En la cual se pueden observar las 7 vibraciones del puente comenzando por el experimento con 6 tuercas que como se observa está en el punto más bajo de la gráfica debido a que tiene mayor flecha por el peso que soporta. Se observa que en el último experimento solo vibra el puente y se estabiliza.

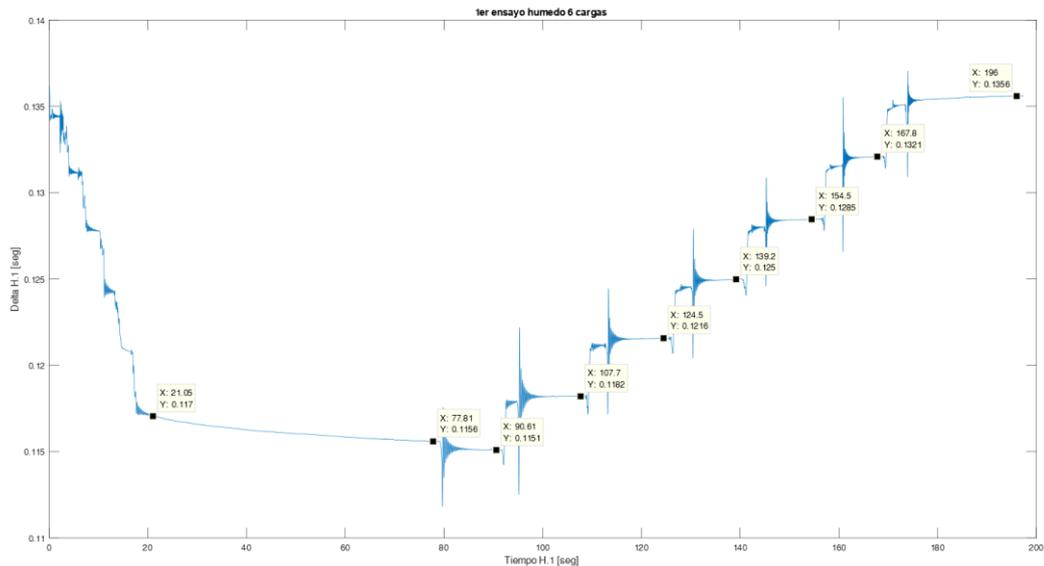


Figura 64: Gráfica de la variación de la flecha en un intervalo de tiempo del segundo ensayo.

A la vista de esta gráfica se realiza el procesado de datos descritos anteriormente, con el cual se obtienen los parámetros de la *ecuación 4.2* de interés para el estudio de este TFG.

A continuación, se procede a tabular los valores obtenidos en el ensayo estático como se muestra en la *Tabla 19*, para poder representarlo y realizar un ajuste lineal entre la Fuerza F N y la flecha δ m como se observa en la *Figura 65*, en la cual se obtiene la constante de rigidez del puente K N/m que se muestra en la *Tabla 20*.

| N.º de Tuercas | F_i N | u_i m | δ_i m |
|----------------|------------|---------------------|----------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3,22 | 34×10^{-4} | 34×10^{-4} |
| 2 | 6,44 | 36×10^{-4} | 70×10^{-4} |
| 3 | 9,65 | 35×10^{-4} | 105×10^{-4} |
| 4 | 12,87 | 34×10^{-4} | 139×10^{-4} |
| 5 | 16,09 | 33×10^{-4} | 172×10^{-4} |
| 6 | 19,31 | 31×10^{-4} | 203×10^{-4} |

Tabla 19: Valores de incremento de flecha y flecha del segundo ensayo.

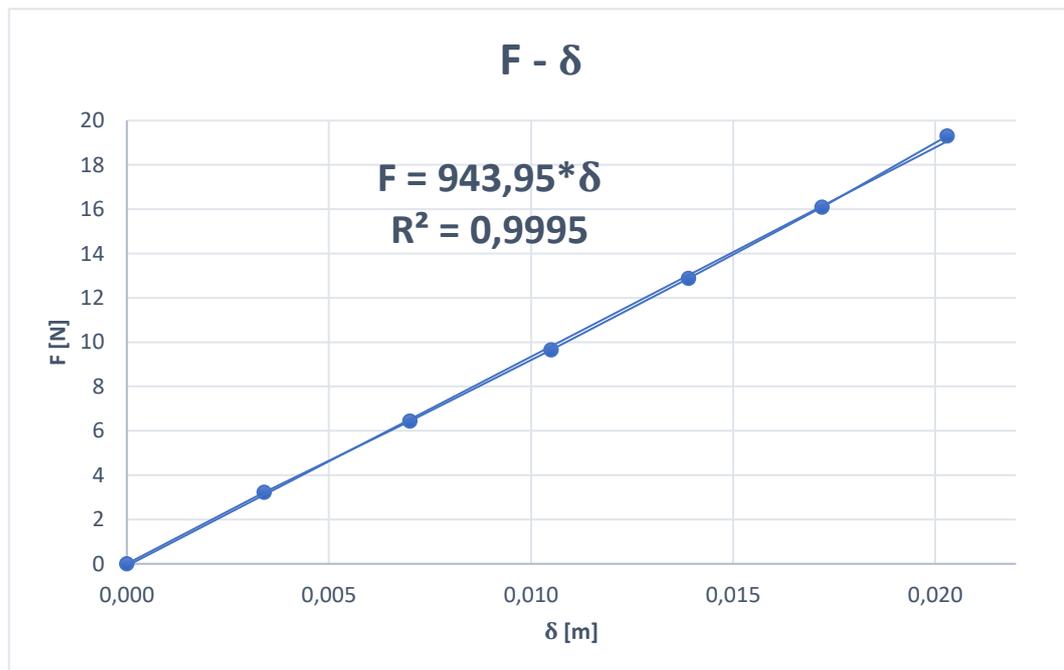


Figura 65: Gráfica de desplazamiento frente a la carga del segundo ensayo.

| | |
|--|---------------------|
| Constante de rigidez del puente K | 943,95 [N/m] |
|--|---------------------|

Tabla 20: Valor de la constante de rigidez del puente en el segundo ensayo.

Paralelamente se procedió a tabular los valores obtenidos en el ensayo dinámico obteniendo los valores de la oscilación forzada como se muestra en la *Tabla 21*. En ella la frecuencia propia de la estructura ω_n **rad/s** se pasa al dominio de las frecuencias f_n **Hz**. La cual va disminuyendo según se aumenta la masa, como cabe esperar debido a la *ecuación 4.1* que correlaciona estas 2 variables, otro aspecto importante en este ensayo es que el coeficiente de amortiguamiento respecto al crítico ξ tiene variaciones en el orden de las centésimas.

| N.º de Tuercas | Masa total kg | A_i m | B_i m | φ_i rad | ω_{n_i} rad/s | f_i Hz | ξ_i |
|----------------|---------------|---------|---------|-----------------|----------------------|----------|---------|
| 0 | 0,7399 | 0,0004 | 0,1354 | 2,04 | 62,39 | 9,92 | 0,0272 |
| 1 | 1,0679 | 0,0007 | 0,1320 | -0,01 | 46,30 | 7,37 | 0,0361 |
| 2 | 1,3939 | 0,0005 | 0,1284 | 2,42 | 38,20 | 6,08 | 0,0368 |
| 3 | 1,7259 | 0,0010 | 0,1249 | -1,17 | 32,38 | 5,15 | 0,0467 |
| 4 | 2,0519 | 0,0006 | 0,1215 | 0,86 | 29,49 | 4,69 | 0,0344 |
| 5 | 2,3799 | 0,0014 | 0,1182 | 0,99 | 25,95 | 4,13 | 0,0474 |
| 6 | 2,7079 | 0,0026 | 0,1151 | -0,11 | 23,18 | 3,69 | 0,0867 |

Tabla 21: Valores del ensayo dinámico del segundo ensayo.

A partir de la *ecuación 4.1* de la frecuencia natural ($\omega_{teorica}$) para una viga simplemente apoyada de 1 grado de libertad, podremos calcular de forma aproximada el valor del producto del módulo de elasticidad (**E**) y el momento de inercia (**I**) para el caso que no está cargado y así calcular diferencia de las frecuencias teóricas y las experimentales.

| | |
|--------------|-----------------------------|
| E · I | 2005,04 [N m ²] |
|--------------|-----------------------------|

 Tabla 22: Valor del producto de $E \cdot I$ en el segundo ensayo.

Con el producto de **E · I**, procedemos a calcular la frecuencia propia teórica para todos los casos y calcularemos el error cometido entre las frecuencias teóricas y las experimentales halladas presentadas en la *Tabla 23*.

| Masa Tuercas (M_i) kg | Masa Puente (m_b) kg | ω Teórico rad/s | ω Experimental rad/s | f teórica Hz | f Experimental Hz | Error |
|---------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------|-------|
| 0 | 0,7399 | 62,33 | 62,39 | 9,93 | 9,92 | 0,04% |
| 0,3280 | 0,7399 | 45,06 | 46,30 | 7,18 | 7,37 | 2,63% |
| 0,6560 | 0,7399 | 37,07 | 38,20 | 5,90 | 6,08 | 2,91% |
| 0,9840 | 0,7399 | 32,23 | 32,38 | 5,13 | 5,15 | 0,42% |
| 1,3120 | 0,7399 | 28,89 | 29,49 | 4,60 | 4,69 | 1,98% |
| 1,6400 | 0,7399 | 26,42 | 25,95 | 4,21 | 4,13 | 1,85% |
| 1,9680 | 0,7399 | 24,48 | 23,18 | 3,90 | 3,69 | 5,68% |

Tabla 23: Valores de la frecuencia propia teórica y experimental del segundo ensayo.

4.6 Tercer ensayo variando la humedad $T= 21,6^{\circ}\text{C}$ y $Hm=54\%$.

Para el tercer ensayo variando las condiciones de humedad se procedió a partir del segundo ensayo variando la humedad dejándolo secar de forma natural durante el periodo de 1 hora.

Se procedió a medir todos los parámetros ambientales del ensayo como se muestra en la *Tabla 24*.

| Temperatura $^{\circ}\text{C}$ | Humedad Relativa | Humedad Madera | Masa Punte kg |
|--------------------------------|------------------|----------------|---------------|
| 21,6 | 33 % | 54 % | 0,7379 |

Tabla 24: Condiciones ambientales y masa en el tercer ensayo.

Se procedió con el procedimiento anteriormente descrito para obtener la gráfica de variación de la flecha en un intervalo de tiempo, como se muestra en la *Figura 66*. En la cual se pueden observar las 7 vibraciones del puente comenzando por el experimento con 6 tuercas que como se observa está en el punto más bajo de la gráfica debido a que tiene mayor flecha por el peso que soporta. Se observa que en el último experimento solo vibra el puente y se estabiliza.

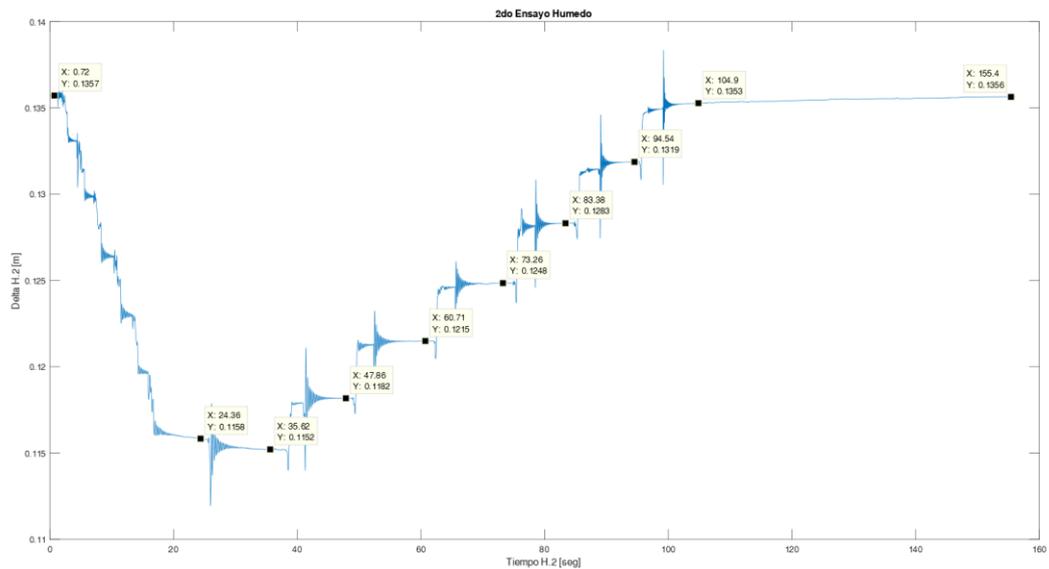


Figura 66: Gráfica de la variación de la flecha en un intervalo de tiempo del tercer ensayo.

A la vista de esta gráfica se realiza el procesado de datos descritos anteriormente, con el cual se obtienen los parámetros de interés para el estudio de este TFG.

A continuación, se procede a tabular los valores obtenidos en el ensayo estático como se muestra en la *Tabla 25*, para poder representarlo y realizar un ajuste lineal entre la Fuerza F N y la flecha δ m como se observa en la *Figura 67*, en la cual se obtiene la constante de rigidez del puente K N/m que se muestra en la *Tabla 26*.

| N.º de Tuercas | F_i N | u_i m | δ_i m |
|----------------|------------|---------------------|----------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3,22 | 34×10^{-4} | 34×10^{-4} |
| 2 | 6,44 | 35×10^{-4} | 69×10^{-4} |
| 3 | 9,65 | 35×10^{-4} | 104×10^{-4} |
| 4 | 12,87 | 33×10^{-4} | 137×10^{-4} |
| 5 | 16,09 | 33×10^{-4} | 170×10^{-4} |
| 6 | 19,31 | 29×10^{-4} | 199×10^{-4} |

Tabla 25: Valores de incremento de flecha y flecha del tercer ensayo.

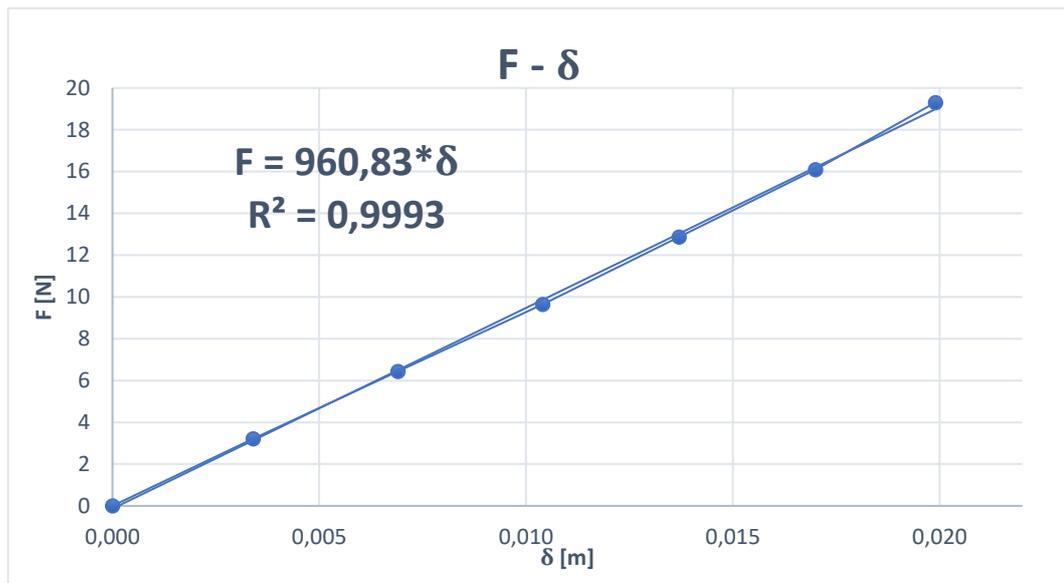


Figura 67: Gráfica de desplazamiento frente a la carga del tercer ensayo.

| | |
|--|---------------------|
| Constante de rigidez del puente K | 960,83 [N/m] |
|--|---------------------|

Tabla 26: Valor de la constante de rigidez del puente en el tercer ensayo.

Paralelamente se procedió a tabular los valores obtenidos en el ensayo dinámico obteniendo los valores de la oscilación forzada como se muestra en la *Tabla 27*. En ella la frecuencia propia de la estructura ω_n [rad/s] se pasa al dominio de las frecuencias f_n Hz. La cual va disminuyendo según se aumenta la masa, como cabe esperar debido a la *ecuación 4.1* que correlaciona estas 2 variables, otro aspecto importante en este ensayo es que el coeficiente de amortiguamiento respecto al crítico ξ tiene variaciones en el orden de las centésimas.

| N.º de Tuercas | Masa total kg | A_i m | B_i m | φ_i rad | ω_{n_i} rad/s | f_i Hz | ξ_i |
|----------------|---------------|---------|---------|-----------------|----------------------|----------|---------|
| 0 | 0,7379 | 0,0004 | 0,1352 | -3,58 | 62,00 | 9,87 | 0,0266 |
| 1 | 1,0659 | 0,0006 | 0,1318 | -0,64 | 46,34 | 7,38 | 0,0324 |
| 2 | 1,3939 | 0,0011 | 0,1283 | 0,07 | 37,17 | 5,92 | 0,0554 |
| 3 | 1,7219 | 0,0014 | 0,1248 | -0,10 | 32,54 | 5,18 | 0,0503 |
| 4 | 2,0499 | 0,0010 | 0,1215 | -0,20 | 29,03 | 4,62 | 0,0446 |
| 5 | 2,3779 | 0,0012 | 0,1182 | -0,23 | 25,66 | 4,08 | 0,0523 |
| 6 | 2,7059 | 0,0017 | 0,1153 | -3,33 | 23,45 | 3,73 | 0,0678 |

Tabla 27: Valores del ensayo dinámico del tercer ensayo.

A partir de la *ecuación 4.1* de la frecuencia natural ($\omega_{teorica}$) para una viga simplemente apoyada de 1 grado de libertad, podremos calcular de forma aproximada el valor del producto del módulo de elasticidad (E) y el momento de inercia (I) para el caso que no está cargado y así calcular diferencia de las frecuencias teóricas y las experimentales.

| | |
|-------------|-----------------------------|
| $E \cdot I$ | 1978,15 [N m ²] |
|-------------|-----------------------------|

 Tabla 28: Valor del producto de $E \cdot I$ en el tercer ensayo.

Con el producto de $E \cdot I$, procedemos a calcular la frecuencia propia teórica para todos los casos y calcularemos el error cometido entre las frecuencias teóricas y las experimentales halladas presentadas en la *Tabla 29*.

| Masa Tuercas (M_i) kg | Masa Puente (m_b) kg | ω Teórico rad/s | ω Experimental rad/s | f teórica Hz | f Experimental Hz | Error |
|---------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------|--------|
| 0 | 0,7379 | 62,00 | 62,00 | 9,87 | 9,87 | 0,49% |
| 0,3280 | 0,7379 | 44,79 | 46,34 | 7,13 | 7,38 | 3,22% |
| 0,6560 | 0,7379 | 36,84 | 37,17 | 5,87 | 5,92 | 3,51% |
| 0,9840 | 0,7379 | 32,02 | 32,54 | 5,10 | 5,18 | 1,05% |
| 1,3120 | 0,7379 | 28,71 | 29,03 | 4,57 | 4,62 | 2,61% |
| 1,6400 | 0,7379 | 26,25 | 25,66 | 4,18 | 4,08 | -1,19% |
| 1,9680 | 0,7379 | 24,33 | 23,18 | 3,87 | 3,69 | -4,99% |

Tabla 29: Valores de la frecuencia propia teórica y experimental del tercer ensayo.

4.7 Cuarto ensayo variando la humedad $T= 21,6^{\circ}\text{C}$ y $Hm=52\%$.

Para el cuarto ensayo variando las condiciones de humedad se procedió a partir del tercer ensayo variando la humedad dejándolo secar de forma natural durante el periodo de 1 hora.

Se procedió a medir todos los parámetros ambientales del ensayo como se muestra en la Tabla 30.

| Temperatura $^{\circ}\text{C}$ | Humedad Relativa | Humedad Madera | Masa Puente kg |
|-----------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| 21,6 | 33 % | 52 % | 0,7353 |

Tabla 30: Condiciones ambientales y masa en el cuarto ensayo.

Se procedió con el procedimiento anteriormente descrito para obtener la gráfica de variación de la flecha en un intervalo de tiempo, como se muestra en la Figura 68. En la cual se pueden observar las 7 vibraciones del puente comenzando por el experimento con 6 tuercas que como se observa está en el punto más bajo de la gráfica debido a que tiene mayor flecha por el peso que soporta. Se observa que en el último experimento solo vibra el puente y se estabiliza.

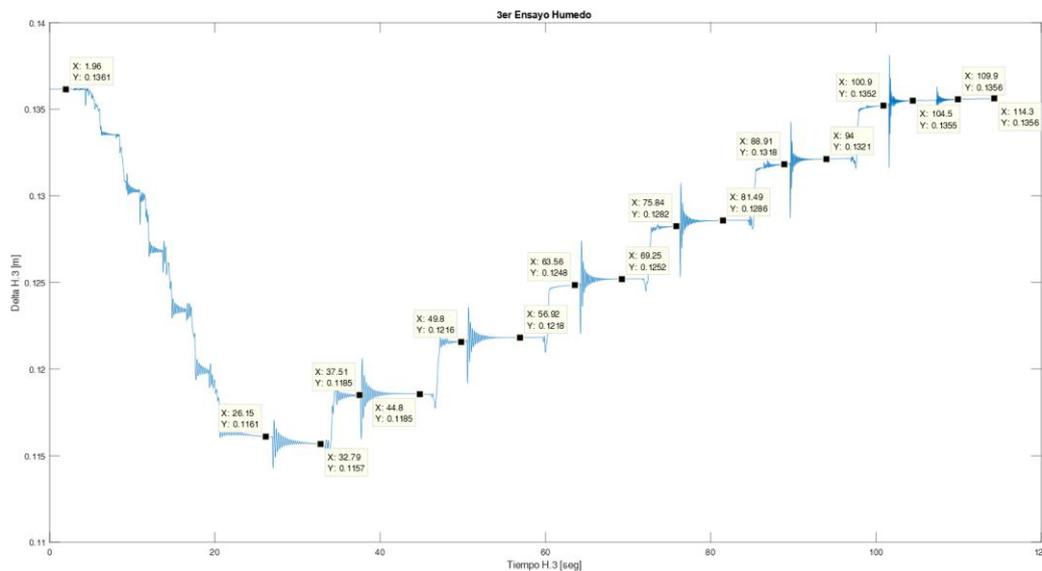


Figura 68: Gráfica de la variación de la flecha en un intervalo de tiempo del cuarto ensayo.

A la vista de esta gráfica se realiza el procesado de datos descritos anteriormente, con el cual se obtienen los parámetros de la ecuación 4.2 de interés para el estudio de este TFG.

A continuación, se procede a tabular los valores obtenidos en el ensayo estático como se muestra en la *Tabla 31*, para poder representarlo y realizar un ajuste lineal entre la Fuerza F N y la flecha δ m como se observa en la *Figura 69*, en la cual se obtiene la constante de rigidez del puente K N/m que se muestra en la *Tabla 32*.

| N.º de Tuercas | F_i N | u_i m | δ_i m |
|----------------|------------|---------------------|----------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3,22 | 35×10^{-4} | 35×10^{-4} |
| 2 | 6,44 | 35×10^{-4} | 70×10^{-4} |
| 3 | 9,65 | 34×10^{-4} | 104×10^{-4} |
| 4 | 12,87 | 34×10^{-4} | 138×10^{-4} |
| 5 | 16,09 | 32×10^{-4} | 170×10^{-4} |
| 6 | 19,31 | 29×10^{-4} | 199×10^{-4} |

Tabla 31: Valores de incremento de flecha y flecha del cuarto ensayo.

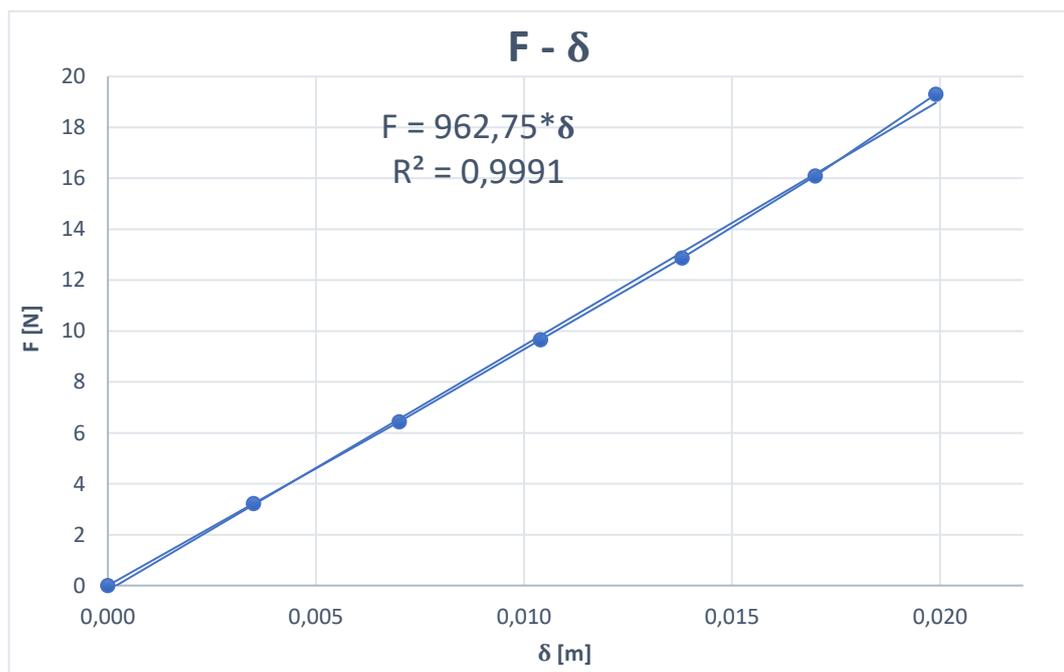


Figura 69: Gráfica de desplazamiento frente a la carga del cuarto ensayo.

| | |
|--|---------------------|
| Constante de rigidez del puente K | 962,75 [N/m] |
|--|---------------------|

Tabla 32: Valor de la constante de rigidez del puente en el cuarto ensayo.

Paralelamente se procedió a tabular los valores obtenidos en el ensayo dinámico obteniendo los valores de la oscilación forzada como se muestra en la *Tabla 33*. En ella la frecuencia propia de la estructura ω_n *rad/s* se pasa al dominio de las frecuencias f_n *Hz*. La cual va disminuyendo según se aumenta la masa, como cabe esperar debido a la *ecuación 4.1* que correlaciona estas 2 variables, otro aspecto importante en este ensayo es que el coeficiente de amortiguamiento respecto al crítico ξ en algunos casos se mantiene constante teniendo solo variaciones en el orden de las milésimas y en otros tiene variación en el orden de las centésimas.

| N.º de Tuercas | Masa total kg | A_i m | B_i m | φ_i rad | ω_{n_i} rad/s | f_i Hz | ξ_i |
|----------------|---------------|---------|---------|-----------------|----------------------|----------|---------|
| 0 | 0,7353 | 0,0002 | 0,1356 | 0,27 | 62,22 | 9,90 | 0,0247 |
| 1 | 1,0633 | 0,0004 | 0,1321 | 0,96 | 46,19 | 7,35 | 0,0303 |
| 2 | 1,3913 | 0,0006 | 0,1286 | -1,04 | 37,81 | 6,02 | 0,0364 |
| 3 | 1,7193 | 0,0005 | 0,1252 | -0,97 | 32,94 | 5,24 | 0,0332 |
| 4 | 2,0473 | 0,0005 | 0,1218 | -0,65 | 29,30 | 4,66 | 0,0345 |
| 5 | 2,3753 | 0,0001 | 0,1186 | -0,66 | 26,59 | 4,23 | 0,0367 |
| 6 | 2,7033 | 0,0012 | 0,1157 | -0,09 | 24,02 | 3,82 | 0,0522 |

Tabla 33: Valores del ensayo dinámico del cuarto ensayo.

A partir de la *ecuación 4.1* de la frecuencia natural ($\omega_{teorica}$) para una viga simplemente apoyada de 1 grado de libertad, podremos calcular de forma aproximada el valor del producto del módulo de elasticidad (**E**) y el momento de inercia (**I**) para el caso que no está cargado y así calcular diferencia de las frecuencias teóricas y las experimentales.

| | |
|--------------|-----------------------------|
| E · I | 1985,31 [N m ²] |
|--------------|-----------------------------|

 Tabla 34: Valor del producto de $E \cdot I$ en el cuarto ensayo.

Con el producto de **E · I**, procedemos a calcular la frecuencia propia teórica para todos los casos y calcularemos el error cometido entre las frecuencias teóricas y las experimentales halladas presentadas en la *Tabla 35*.

| Masa Tuercas (M_i) kg | Masa Punte (m_b) kg | ω Teórico rad/s | ω Experimental rad/s | f teórica Hz | f Experimental Hz | Error |
|---------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------|--------|
| 0 | 0,7353 | 62,22 | 62,00 | 9,91 | 9,87 | 0,14% |
| 0,3280 | 0,7353 | 44,91 | 46,34 | 7,15 | 7,38 | 2,96% |
| 0,6560 | 0,7353 | 36,93 | 37,17 | 5,88 | 5,92 | 3,28% |
| 0,9840 | 0,7353 | 32,10 | 32,54 | 5,11 | 5,18 | 0,83% |
| 1,3120 | 0,7353 | 28,77 | 29,03 | 4,58 | 4,62 | 2,40% |
| 1,6400 | 0,7353 | 26,30 | 25,66 | 4,19 | 4,08 | -1,40% |
| 1,9680 | 0,7353 | 24,37 | 23,18 | 3,88 | 3,69 | -5,21% |

Tabla 35: Valores de la frecuencia propia teórica y experimental del cuarto ensayo.

4.8 Quinto ensayo variando la humedad $T= 19,9^{\circ}\text{C}$ y $H_m=4\%$.

Para el quinto ensayo variando las condiciones de humedad se procedió a partir del cuarto ensayo variando la humedad dejándolo secar de forma natural durante el periodo de 1 hora.

Se procedió a medir todos los parámetros ambientales del ensayo como se muestra en la *Tabla 36*.

| Temperatura $^{\circ}\text{C}$ | Humedad Relativa | Humedad Madera | Masa Punte kg |
|-----------------------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| 19,9 | 32 % | 4 % | 0,7167 |

Tabla 36: Condiciones ambientales y masa del puente en el quinto ensayo.

Se procedió con el procedimiento anteriormente descrito para obtener la gráfica de variación de la flecha en un intervalo de tiempo, como se muestra en la *Figura 70*. En la cual se pueden observar las 7 vibraciones del puente comenzando por el experimento con 6 tuercas que como se observa está en el punto más bajo de la gráfica debido a que tiene mayor flecha por el peso que soporta. Se observa que en el último experimento solo vibra el puente y se estabiliza.

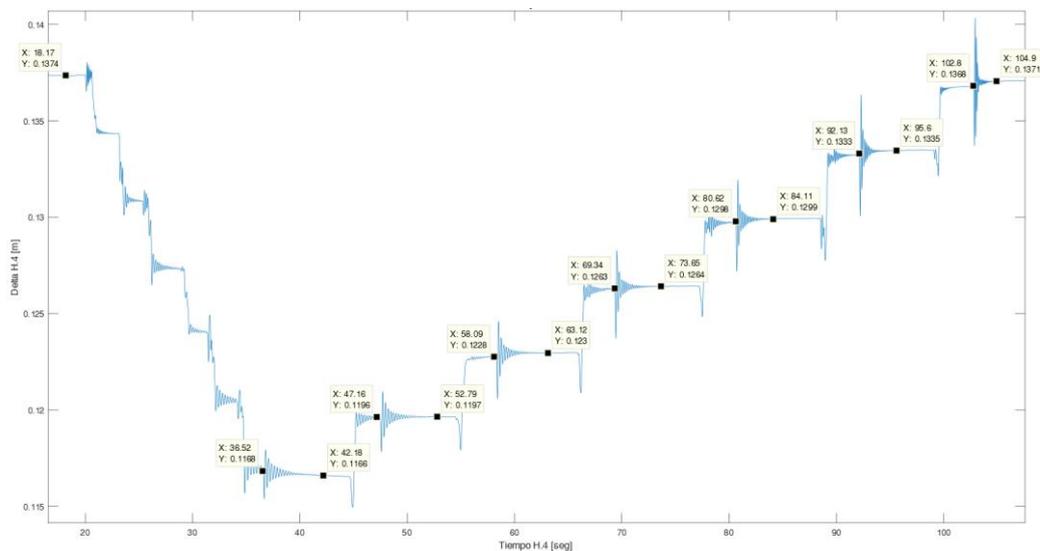


Figura 70: Gráfica de la variación de la flecha en un intervalo de tiempo del quinto ensayo.

A la vista de esta gráfica se realiza el procesado de datos descritos anteriormente, con el cual se obtienen los parámetros de la *ecuación 4.2* de interés para el estudio de este TFG.

A continuación, se procede a tabular los valores obtenidos en el ensayo estático como se muestra en la *Tabla 37*, para poder representarlo y realizar un ajuste lineal entre la Fuerza F N y la flecha δ m como se observa en la *Figura 71*, en la cual se obtiene la constante de rigidez del puente K N/m que se muestra en la *Tabla 38*.

| N.º de Tuercas | F_i N | u_i m | δ_i m |
|----------------|------------|---------------------|----------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3,22 | 36×10^{-4} | 36×10^{-4} |
| 2 | 6,44 | 35×10^{-4} | 71×10^{-4} |
| 3 | 9,65 | 35×10^{-4} | 106×10^{-4} |
| 4 | 12,87 | 34×10^{-4} | 140×10^{-4} |
| 5 | 16,09 | 34×10^{-4} | 174×10^{-4} |
| 6 | 19,31 | 29×10^{-4} | 203×10^{-4} |

Tabla 37: Valores de incremento de flecha y flecha del quinto ensayo.

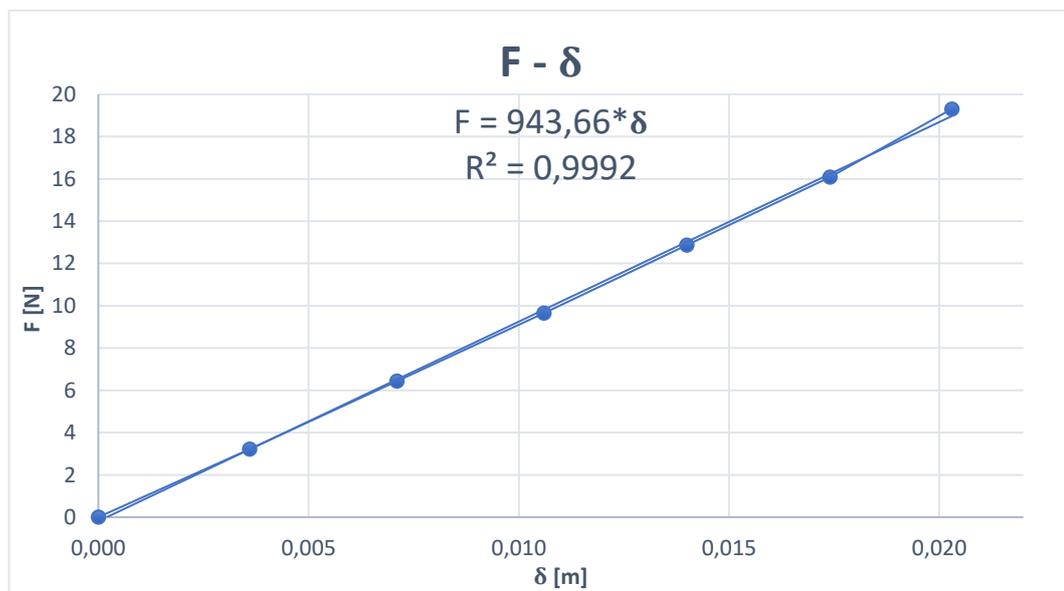


Figura 71: Gráfica de desplazamiento frente a la carga del quinto ensayo.

| | |
|--|---------------------|
| Constante de rigidez del puente K | 943,66 [N/m] |
|--|---------------------|

Tabla 38: Valor de la constante de rigidez del puente en el quinto ensayo.

Paralelamente se procedió a tabular los valores obtenidos en el ensayo dinámico obteniendo los valores de la oscilación forzada como se muestra en la *Tabla 39*. En ella la frecuencia propia de la estructura ω_n *rad/s* se pasa al dominio de las frecuencias f_n *Hz*. La cual va disminuyendo según se aumenta la masa, como cabe esperar debido a la *ecuación 4.1* que correlaciona estas 2 variables, otro aspecto importante en este ensayo es que el coeficiente de amortiguamiento respecto al crítico ξ tiene variaciones en el orden de las centésimas.

| N.º de Tuercas | Masa total kg | A_i m | B_i m | φ_i rad | ω_{ni} rad/s | f_i Hz | ξ_i |
|----------------|---------------|---------|---------|-----------------|---------------------|----------|---------|
| 0 | 0,7167 | 0,0002 | 0,1370 | 4,4610 | 60,1100 | 9,5671 | 0,0305 |
| 1 | 1,0447 | 0,0007 | 0,1334 | 0,0429 | 44,7600 | 7,1240 | 0,0552 |
| 2 | 1,3727 | 0,0006 | 0,1299 | 3,5390 | 36,7400 | 5,8475 | 0,0453 |
| 3 | 1,7007 | 0,0005 | 0,1264 | 1,4020 | 32,1200 | 5,1122 | 0,0378 |
| 4 | 2,0287 | 0,0019 | 0,1230 | 0,0178 | 26,6400 | 4,2400 | 0,0982 |
| 5 | 2,3567 | 0,0014 | 0,1196 | 0,0836 | 25,2000 | 4,0108 | 0,0750 |
| 6 | 2,6847 | 0,0012 | 0,1167 | 0,0976 | 23,4500 | 3,7323 | 0,0603 |

Tabla 39: Valores del ensayo dinámico del quinto ensayo.

A partir de la *ecuación 4.1* de la frecuencia natural ($\omega_{teorica}$) para una viga simplemente apoyada de 1 grado de libertad, podremos calcular de forma aproximada el valor del producto del módulo de elasticidad (**E**) y el momento de inercia (**I**) para el caso que no está cargado y así calcular diferencia de las frecuencias teóricas y las experimentales.

| | |
|--------------|-----------------------------|
| E · I | 1806,08 [N m ²] |
|--------------|-----------------------------|

 Tabla 40: Valor del producto de $E \cdot I$ en el quinto ensayo.

Con el producto de **E · I**, procedemos a calcular la frecuencia propia teórica para todos los casos y calcularemos el error cometido entre las frecuencias teóricas y las experimentales halladas presentadas en la *Tabla 41*.

| Masa Tuercas (M_i) kg | Masa Puente (m_b) kg | ω Teórico rad/s | ω Experimental rad/s | f teórica Hz | f Experimental Hz | Error |
|---------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------|-------|
| 0 | 0,7167 | 60,11 | 60,11 | 9,57 | 9,57 | 0,00% |
| 0,3280 | 0,7167 | 43,12 | 44,76 | 6,87 | 7,12 | 3,62% |
| 0,6560 | 0,7167 | 35,38 | 36,74 | 5,63 | 5,85 | 3,65% |
| 0,9840 | 0,7167 | 30,72 | 32,12 | 4,89 | 5,11 | 4,32% |
| 1,3120 | 0,7167 | 27,52 | 26,64 | 4,38 | 4,24 | 3,33% |
| 1,6400 | 0,7167 | 25,14 | 25,20 | 4,00 | 4,01 | 0,18% |
| 1,9680 | 0,7167 | 23,29 | 23,45 | 3,71 | 3,73 | 0,62% |

Tabla 41: Valores de la frecuencia propia teórica y experimental del quinto ensayo.

4.9 Sexto ensayo variando la humedad T= 19,9°C y Hm=60,6%.

Para el sexto ensayo variando las condiciones de humedad se procedió a partir del quinto ensayo variando la humedad, aplicando mediante un pulverizador gotas de agua sobre toda la estructura de modo que se humedezca de forma homogénea.

Se procedió a medir todos los parámetros ambientales del ensayo como se muestra en la *Tabla 42*.

| Temperatura °C | Humedad Relativa | Humedad Madera | Masa Puente kg |
|----------------|------------------|----------------|----------------|
| 19,9 | 43 % | 60,6 % | 0,7389 |

Tabla 42: Condiciones ambientales y masa del puente en el sexto ensayo.

Se procedió con el procedimiento anteriormente descrito para obtener la gráfica de variación de la flecha en un intervalo de tiempo, como se muestra en la *Figura 72*. En la cual se pueden observar las 7 vibraciones del puente comenzando por el experimento con 6 tuercas que como se observa está en el punto más bajo de la gráfica debido a que tiene mayor flecha por el peso que soporta. Se observa que en el último experimento solo vibra el puente y se estabiliza.

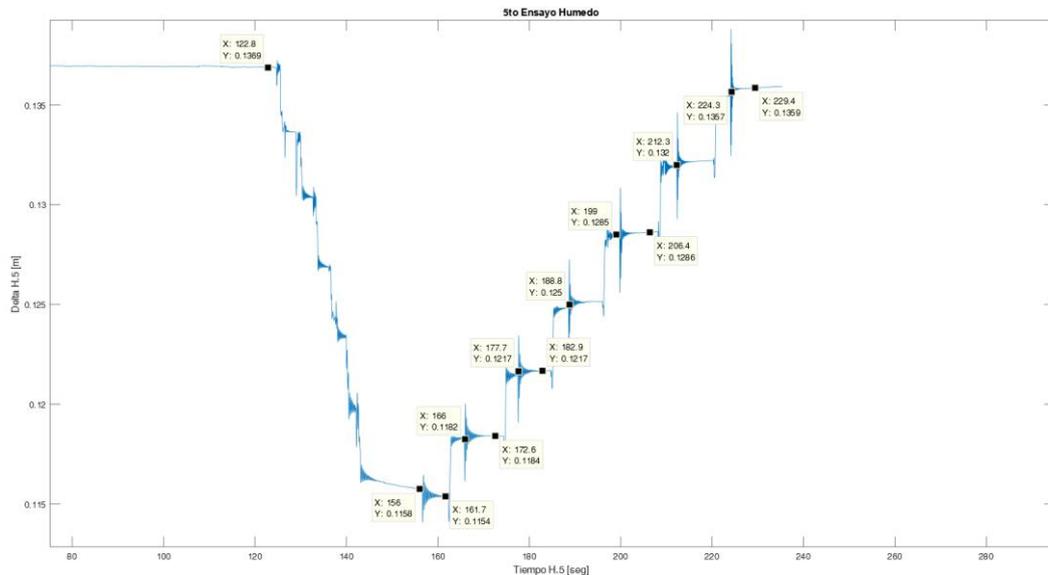


Figura 72: Gráfica de la variación de la flecha en un intervalo de tiempo del sexto ensayo.

A la vista de esta gráfica se realiza el procesado de datos descritos anteriormente, con el cual se obtienen los parámetros de la *ecuación 4.2* de interés para el estudio de este TFG.

A continuación, se procede a tabular los valores obtenidos en el ensayo estático como se muestra en la *Tabla 43*, para poder representarlo y realizar un ajuste lineal entre la Fuerza F N y la flecha δ m como se observa en la *Figura 73*, en la cual se obtiene la constante de rigidez del puente K N/m que se muestra en la *Tabla 44*.

| N.º de Tuercas | F_i N | u_i m | δ_i m |
|----------------|------------|---------------------|----------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3,22 | 37×10^{-4} | 37×10^{-4} |
| 2 | 6,44 | 35×10^{-4} | 72×10^{-4} |
| 3 | 9,65 | 35×10^{-4} | 107×10^{-4} |
| 4 | 12,87 | 34×10^{-4} | 141×10^{-4} |
| 5 | 16,09 | 33×10^{-4} | 174×10^{-4} |
| 6 | 19,31 | 30×10^{-4} | 204×10^{-4} |

Tabla 43: Valores de incremento de flecha y flecha del sexto ensayo.

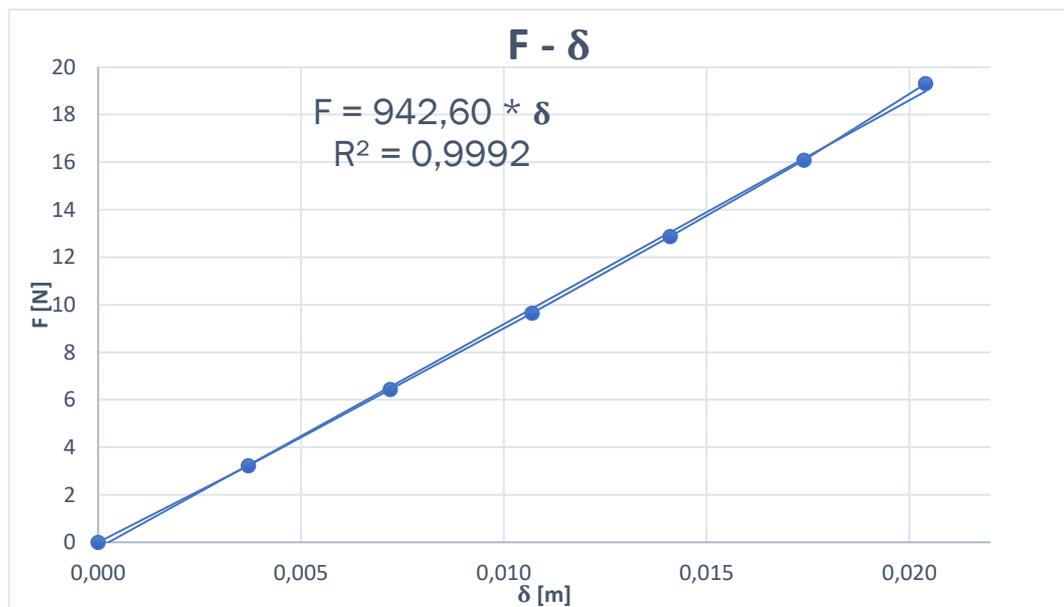


Figura 73: Gráfica de desplazamiento frente a la carga del sexto ensayo.

| | |
|--|---------------------|
| Constante de rigidez del puente K | 942,60 [N/m] |
|--|---------------------|

Tabla 44: Valor de la constante de rigidez del puente en el sexto ensayo.



Paralelamente se procedió a tabular los valores obtenidos en el ensayo dinámico obteniendo los valores de la oscilación forzada como se muestra en la *Tabla 45*. En ella la frecuencia propia de la estructura ω_n *rad/s* se pasa al dominio de las frecuencias f_n *Hz*. La cual va disminuyendo según se aumenta la masa, como cabe esperar debido a la *ecuación 4.1* que correlaciona estas 2 variables, otro aspecto importante en este ensayo es que el coeficiente de amortiguamiento respecto al crítico ξ se mantiene constante teniendo solo variaciones en el orden de las milésimas.

| N.º de Tuercas | Masa total kg | A_i m | B_i m | φ_i rad | ω_{ni} rad/s | f_i Hz | ξ_i |
|----------------|---------------|---------|---------|-----------------|---------------------|----------|---------|
| 0 | 0,7389 | 0,0002 | 0,1358 | 2,6860 | 62,1400 | 9,8902 | 0,0392 |
| 1 | 1,0669 | 0,0004 | 0,1321 | 1,9530 | 46,6100 | 7,4184 | 0,0355 |
| 2 | 1,3949 | 0,0003 | 0,1286 | 0,3337 | 38,4100 | 6,1133 | 0,0338 |
| 3 | 1,7229 | 0,0004 | 0,1251 | 1,2080 | 33,1300 | 5,2730 | 0,0325 |
| 4 | 2,0509 | 0,0005 | 0,1217 | 0,4239 | 29,4500 | 4,6873 | 0,0337 |
| 5 | 2,3789 | 0,0005 | 0,1184 | 1,0090 | 26,6600 | 4,2432 | 0,0355 |
| 6 | 2,7069 | 0,0005 | 0,1154 | 2,3590 | 24,4800 | 3,8962 | 0,0344 |

Tabla 45: Valores del ensayo dinámico del sexto ensayo.

A partir de la *ecuación 4.1* de la frecuencia natural ($\omega_{teorica}$) para una viga simplemente apoyada de 1 grado de libertad, podremos calcular de forma aproximada el valor del producto del módulo de elasticidad (**E**) y el momento de inercia (**I**) para el caso que no está cargado y así calcular diferencia de las frecuencias teóricas y las experimentales.

| | |
|--------------|-----------------------------|
| E · I | 1989,91 [N m ²] |
|--------------|-----------------------------|

Tabla 46: Valor del producto de $E \cdot I$ en el sexto ensayo.

Con el producto de **E · I**, procedemos a calcular la frecuencia propia teórica para todos los casos y calcularemos el error cometido entre las frecuencias teóricas y las experimentales halladas presentadas en la *Tabla 47*.

| Masa Tuercas (M _i) kg | Masa Puente (m _b) kg | ω Teórico rad/s | ω Experimental rad/s | f teórica Hz | f Experimental Hz | Error |
|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------|-------|
| 0 | 0,7389 | 62,14 | 62,14 | 9,89 | 9,89 | 0,00% |
| 0,3280 | 0,7389 | 44,9 | 46,61 | 7,15 | 7,42 | 3,61% |
| 0,6560 | 0,7389 | 36,94 | 38,41 | 5,88 | 6,11 | 3,78% |
| 0,9840 | 0,7389 | 32,11 | 33,13 | 5,11 | 5,27 | 3,03% |
| 1,3120 | 0,7389 | 28,79 | 29,45 | 4,58 | 4,69 | 2,20% |
| 1,6400 | 0,7389 | 26,32 | 26,66 | 4,19 | 4,24 | 1,23% |
| 1,9680 | 0,7389 | 24,39 | 24,48 | 3,88 | 3,90 | 0,30% |

Tabla 47: Valores de la frecuencia propia teórica y experimental del sexto ensayo.

4.10 Séptimo ensayo variando la humedad $T= 19,9^{\circ}\text{C}$ y $Hm=54,6\%$.

Para el séptimo ensayo variando las condiciones de humedad se procedió a partir del sexto ensayo variando la humedad dejándolo secar de forma natural durante el periodo de 1 hora.

Se procedió a medir todos los parámetros ambientales del ensayo como se muestra en la *Tabla 48*.

| Temperatura $^{\circ}\text{C}$ | Humedad Relativa | Humedad Madera | Masa Puente kg |
|-----------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| 19,9 | 44 % | 54,6 % | 0,7339 |

Tabla 48: Condiciones ambientales y masa del puente en el séptimo ensayo.

Se procedió con el procedimiento anteriormente descrito para obtener la gráfica de variación de la flecha en un intervalo de tiempo, como se muestra en la *Figura 74*. En la cual se pueden observar las 7 vibraciones del puente comenzando por el experimento con 6 tuercas que como se observa está en el punto más bajo de la gráfica debido a que tiene mayor flecha por el peso que soporta. Se observa que en el último experimento solo vibra el puente y se estabiliza.

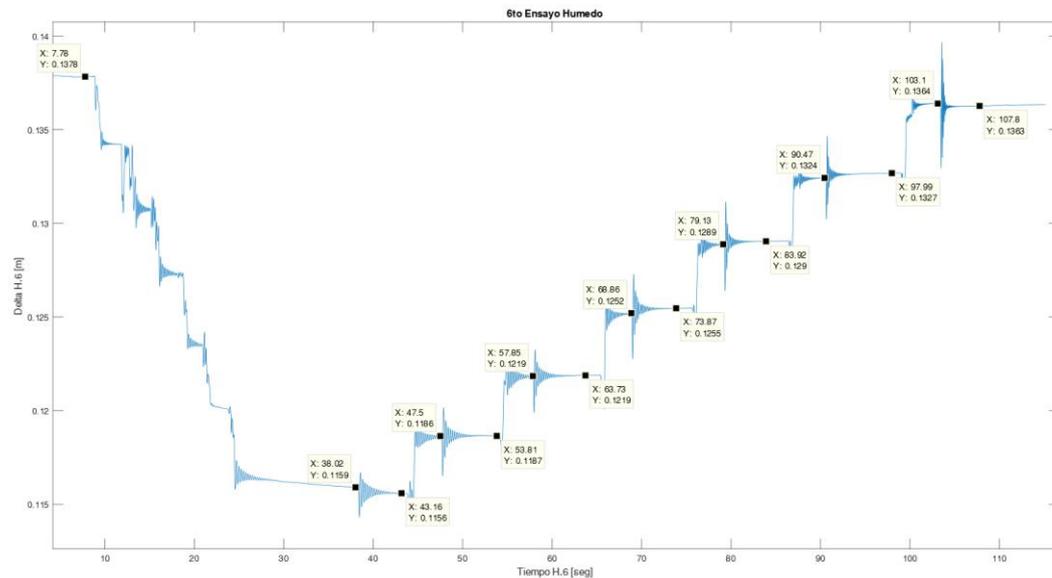


Figura 74: Gráfica de la variación de la flecha en un intervalo de tiempo del séptimo ensayo.

A la vista de esta gráfica se realiza el procesado de datos descritos anteriormente, con el cual se obtienen los parámetros de la *ecuación 4.2* de interés para el estudio de este TFG.

A continuación, se procede a tabular los valores obtenidos en el ensayo estático como se muestra en la *Tabla 49*, para poder representarlo y realizar un ajuste lineal entre la Fuerza F N y la flecha δ m como se observa en la *Figura 75*, en la cual se obtiene la constante de rigidez del puente K N/m que se muestra en la *Tabla 50*.

| N.º de Tuercas | F_i N | u_i m | δ_i m |
|----------------|------------|---------------------|----------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3,22 | 36×10^{-4} | 36×10^{-4} |
| 2 | 6,44 | 36×10^{-4} | 72×10^{-4} |
| 3 | 9,65 | 36×10^{-4} | 108×10^{-4} |
| 4 | 12,87 | 35×10^{-4} | 143×10^{-4} |
| 5 | 16,09 | 32×10^{-4} | 175×10^{-4} |
| 6 | 19,31 | 31×10^{-4} | 206×10^{-4} |

Tabla 49: Valores de incremento de flecha y flecha del séptimo ensayo.

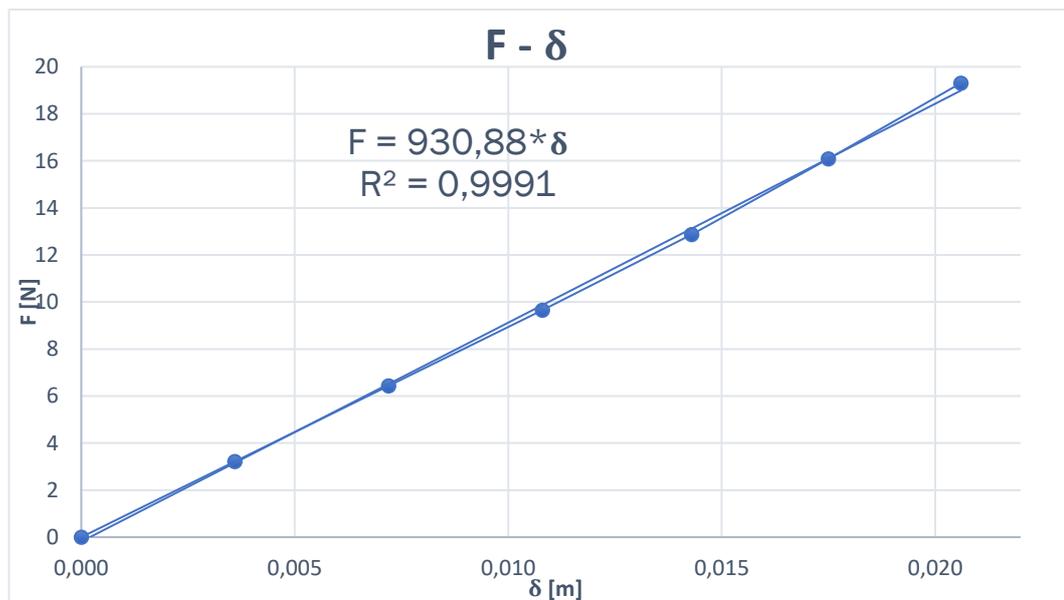


Figura 75: Gráfica de desplazamiento frente a la carga del séptimo ensayo.

| | |
|--|---------------------|
| Constante de rigidez del puente K | 930,88 [N/m] |
|--|---------------------|

Tabla 50: Valor de la constante de rigidez del puente en el séptimo ensayo.

Paralelamente se procedió a tabular los valores obtenidos en el ensayo dinámico obteniendo los valores de la oscilación forzada como se muestra en la *Tabla 51*. En ella la frecuencia propia de la estructura ω_n rad/s que se pasa al dominio de las f_n Hz. La cual va disminuyendo según se aumenta la masa, como cabe esperar debido a la *ecuación 4.1* que correlaciona estas 2 variables, otro aspecto importante en este ensayo es que el coeficiente de amortiguamiento respecto al crítico ξ tiene variaciones en el orden de las centésimas.

| N.º de Tuercas | Masa total kg | A_i m | B_i m | φ_i rad | ω_{n_i} rad/s | f_i Hz | ξ_i |
|----------------|---------------|---------|---------|-----------------|----------------------|----------|---------|
| 0 | 0,7339 | 0,0001 | 0,1362 | 0,0310 | 63,0300 | 10,0318 | 0,0250 |
| 1 | 1,0619 | 0,0004 | 0,1326 | 0,1022 | 46,4600 | 7,3946 | 0,0344 |
| 2 | 1,3899 | 0,0006 | 0,1290 | 3,5470 | 37,8300 | 6,0210 | 0,0442 |
| 3 | 1,7179 | 0,0010 | 0,1254 | 0,0918 | 32,5000 | 5,1727 | 0,0576 |
| 4 | 2,0459 | 0,0007 | 0,1219 | 0,0879 | 29,2700 | 4,6586 | 0,0426 |
| 5 | 2,3739 | 0,0008 | 0,1187 | 0,0794 | 26,4600 | 4,2114 | 0,0450 |
| 6 | 2,7019 | 0,0010 | 0,1156 | 0,0173 | 24,4200 | 3,8867 | 0,0447 |

Tabla 51: Valores del ensayo dinámico del séptimo ensayo.

A partir de la *ecuación 4.1* de la frecuencia natural ($\omega_{teorica}$) para una viga simplemente apoyada de 1 grado de libertad, podremos calcular de forma aproximada el valor del producto del módulo de elasticidad (**E**) y el momento de inercia (**I**) para el caso que no está cargado y así calcular diferencia de las frecuencias teóricas y las experimentales.

| | |
|--------------|-----------------------------|
| E · I | 2033,45 [N m ²] |
|--------------|-----------------------------|

 Tabla 52: Valor del producto de $E \cdot I$ en el séptimo ensayo.

Con el producto de **E · I**, procedemos a calcular la frecuencia propia teórica para todos los casos y calcularemos el error cometido entre las frecuencias teóricas y las experimentales halladas presentadas en la *Tabla 53*.

| Masa Tuercas (M_i) kg | Masa Puente (m_b) kg | ω Teórico rad/s | ω Experimental rad/s | f teórica Hz | f Experimental Hz | Error |
|---------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------|-------|
| 0 | 0,7339 | 63,03 | 63,03 | 10,04 | 10,04 | 0,00% |
| 0,3280 | 0,7339 | 45,47 | 46,46 | 7,24 | 7,40 | 2,08% |
| 0,6560 | 0,7339 | 37,39 | 37,83 | 5,95 | 6,02 | 1,12% |
| 0,9840 | 0,7339 | 32,49 | 32,50 | 5,17 | 5,17 | 0,02% |
| 1,3120 | 0,7339 | 29,12 | 29,27 | 4,64 | 4,66 | 0,46% |
| 1,6400 | 0,7339 | 26,62 | 26,46 | 4,24 | 4,23 | 0,66% |
| 1,9680 | 0,7339 | 24,67 | 24,42 | 3,93 | 3,89 | 1,08% |

Tabla 53: Valores de la frecuencia propia teórica y experimental del séptimo ensayo.

4.11 Octavo ensayo variando la humedad $T= 19,8^{\circ}\text{C}$ y $Hm=51,2\%$.

Para el octavo ensayo variando las condiciones de humedad se procedió a partir del séptimo ensayo variando la humedad dejándolo secar de forma natural durante el periodo de 1 hora.

Se procedió a medir todos los parámetros ambientales del ensayo como se muestra en la Tabla 54.

| Temperatura $^{\circ}\text{C}$ | Humedad Relativa | Humedad Madera | Masa Puente kg |
|-----------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| 19,8 | 42 % | 51,2 % | 0,7286 |

Tabla 54: Condiciones ambientales y masa del puente en el octavo ensayo.

Se procedió con el procedimiento anteriormente descrito para obtener la gráfica de variación de la flecha en un intervalo de tiempo, como se muestra en la Figura 76. En la cual se pueden observar las 7 vibraciones del puente comenzando por el experimento con 6 tuercas que como se observa está en el punto más bajo de la gráfica debido a que tiene mayor flecha por el peso que soporta. Se observa que en el último experimento solo vibra el puente y se estabiliza.

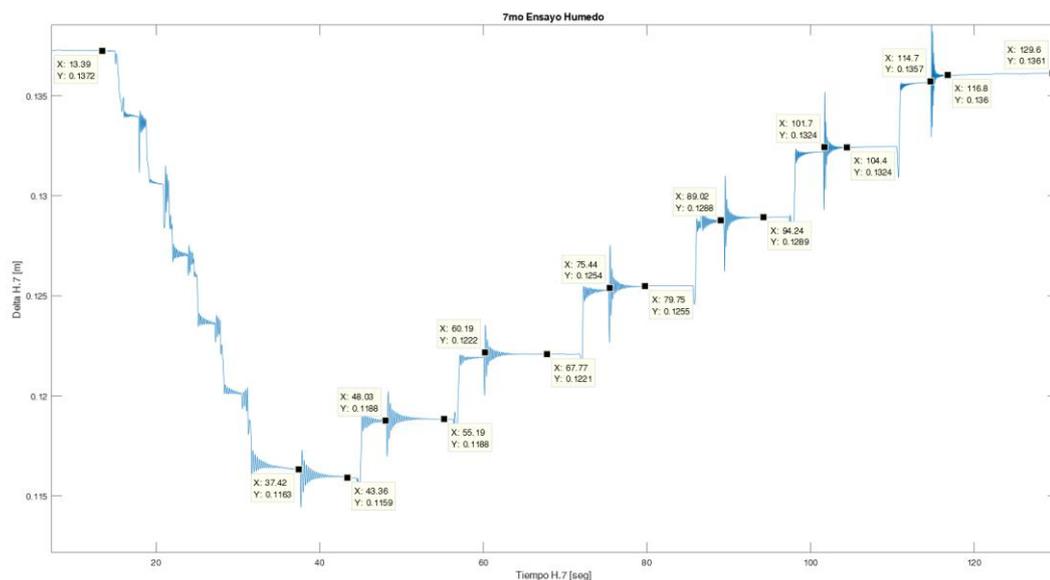


Figura 76: Gráfica de la variación de la flecha en un intervalo de tiempo del octavo ensayo.

A la vista de esta gráfica se realiza el procesado de datos descritos anteriormente, con el cual se obtienen los parámetros de la ecuación 4.2 de interés para el estudio de este TFG.

A continuación, se procede a tabular los valores obtenidos en el ensayo estático como se muestra en la *Tabla 55*, para poder representarlo y realizar un ajuste lineal entre la Fuerza F N y la flecha δ m como se observa en la *Figura 77*, en la cual se obtiene la constante de rigidez del puente K N/m que se muestra en la *Tabla 56*.

| N.º de Tuercas | F_i N | u_i m | δ_i m |
|----------------|------------|---------------------|----------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3,22 | 36×10^{-4} | 36×10^{-4} |
| 2 | 6,44 | 35×10^{-4} | 71×10^{-4} |
| 3 | 9,65 | 34×10^{-4} | 105×10^{-4} |
| 4 | 12,87 | 34×10^{-4} | 139×10^{-4} |
| 5 | 16,09 | 32×10^{-4} | 171×10^{-4} |
| 6 | 19,31 | 29×10^{-4} | 200×10^{-4} |

Tabla 55: Valores de incremento de flecha y flecha del octavo ensayo.

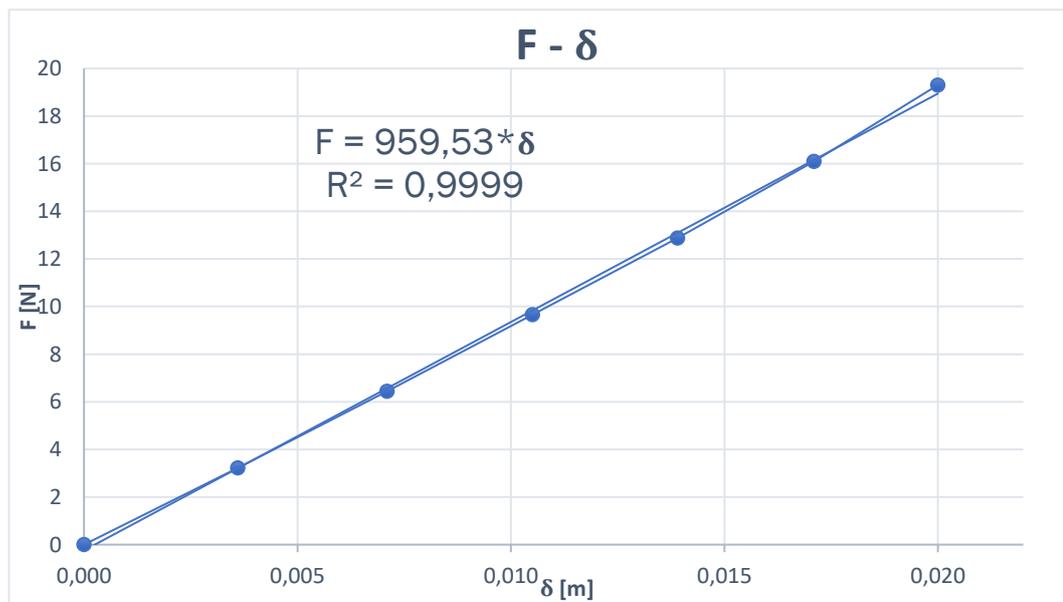


Figura 77: Gráfica de desplazamiento frente a la carga del octavo ensayo.

| | |
|--|---------------------|
| Constante de rigidez del puente K | 959,53 [N/m] |
|--|---------------------|

Tabla 56: Valor de la constante de rigidez del puente en el octavo ensayo.



Paralelamente se procedió a tabular los valores obtenidos en el ensayo dinámico obteniendo los valores de la oscilación forzada como se muestra en la *Tabla 57*. En ella la frecuencia propia de la estructura ω_n [rad/s] se pasa al dominio de las frecuencias f_n Hz. La cual va disminuyendo según se aumenta la masa, como cabe esperar debido a la *ecuación 4.1* que correlaciona estas 2 variables, otro aspecto importante en este ensayo es que el coeficiente de amortiguamiento respecto al crítico ξ tiene variaciones en el orden de las centésimas.

| N.º de Tuercas | Masa total kg | A_i m | B_i m | φ_i rad | ω_{ni} rad/s | f_i Hz | ξ_i |
|----------------|---------------|---------|---------|-----------------|---------------------|----------|---------|
| 0 | 0,7286 | 0,0001 | 0,1360 | 0,4202 | 62,5400 | 9,9538 | 0,0286 |
| 1 | 1,0566 | 0,0005 | 0,1324 | -0,2680 | 45,8600 | 7,2991 | 0,0399 |
| 2 | 1,3846 | 0,0005 | 0,1289 | -0,3120 | 38,1200 | 6,0672 | 0,0392 |
| 3 | 1,7126 | 0,0005 | 0,1255 | -0,1367 | 33,0200 | 5,2555 | 0,0375 |
| 4 | 2,0406 | 0,0007 | 0,1221 | -0,1162 | 29,1000 | 4,6315 | 0,0445 |
| 5 | 2,3686 | 0,0006 | 0,1189 | -0,1510 | 26,5500 | 4,2257 | 0,0349 |
| 6 | 2,6966 | 0,0007 | 0,1160 | 0,1037 | 24,3100 | 3,8692 | 0,0394 |

Tabla 57: Valores del ensayo dinámico del octavo ensayo.

A partir de la *ecuación 4.1* de la frecuencia natural ($\omega_{teorica}$) para una viga simplemente apoyada de 1 grado de libertad, podremos calcular de forma aproximada el valor del producto del módulo de elasticidad (**E**) y el momento de inercia (**I**) para el caso que no está cargado y así calcular diferencia de las frecuencias teóricas y las experimentales.

| | |
|--------------|-----------------------------|
| E · I | 1987,49 [N m ²] |
|--------------|-----------------------------|

Tabla 58: Valor del producto de $E \cdot I$ en el octavo ensayo.

Con el producto de **E · I**, procedemos a calcular la frecuencia propia teórica para todos los casos y calcularemos el error cometido entre las frecuencias teóricas y las experimentales halladas presentadas en la *Tabla 59*.

| Masa Tuercas (M _i) kg | Masa Puente (m _b) kg | ω Teórico rad/s | ω Experimental rad/s | f teórica Hz | f Experimental Hz | Error |
|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------|-------|
| 0 | 0,7286 | 62,54 | 62,54 | 9,96 | 9,96 | 0,00% |
| 0,3280 | 0,7286 | 45,04 | 45,86 | 7,17 | 7,30 | 1,74% |
| 0,6560 | 0,7286 | 37,01 | 38,12 | 5,89 | 6,07 | 2,87% |
| 0,9840 | 0,7286 | 32,15 | 33,02 | 5,12 | 5,26 | 2,58% |
| 1,3120 | 0,7286 | 28,81 | 29,10 | 4,59 | 4,63 | 0,94% |
| 1,6400 | 0,7286 | 26,34 | 26,55 | 4,19 | 4,23 | 0,76% |
| 1,9680 | 0,7286 | 24,41 | 24,31 | 3,89 | 3,87 | 0,44% |

Tabla 59: Valores de la frecuencia propia teórica y experimental del octavo ensayo.

4.12 Noveno ensayo variando la humedad T= 19,8°C y Hm=45,6%.

Para el noveno ensayo variando las condiciones de humedad se procedió a partir del octavo ensayo variando la humedad dejándolo secar de forma natural durante el periodo de 1 hora.

Se procedió a medir todos los parámetros ambientales del ensayo como se muestra en la Tabla 60.

| Temperatura °C | Humedad Relativa | Humedad Madera | Masa Punte kg |
|----------------|------------------|----------------|---------------|
| 19,8 | 41 % | 45,6 % | 0,7274 |

Tabla 60: Condiciones ambientales y masa del puente en el noveno ensayo.

Se procedió con el procedimiento anteriormente descrito para obtener la gráfica de variación de la flecha en un intervalo de tiempo, como se muestra en la Figura 78. En la cual se pueden observar las 7 vibraciones del puente comenzando por el experimento con 6 tuercas que como se observa está en el punto más bajo de la gráfica debido a que tiene mayor flecha por el peso que soporta. Se observa que en el último experimento solo vibra el puente y se estabiliza.

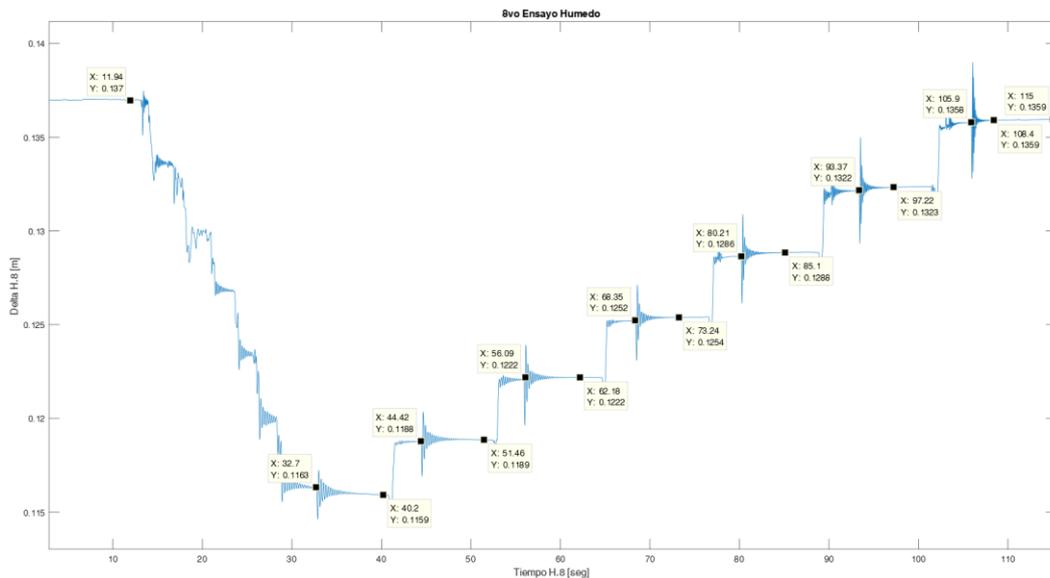


Figura 78: Gráfica de la variación de la flecha en un intervalo de tiempo del noveno ensayo.

A la vista de esta gráfica se realiza el procesado de datos descritos anteriormente, con el cual se obtienen los parámetros de la ecuación 4.2 de interés para el estudio de este TFG.

A continuación, se procede a tabular los valores obtenidos en el ensayo estático como se muestra en la *Tabla 61*, para poder representarlo y realizar un ajuste lineal entre la Fuerza F N y la flecha δ m como se observa en la *Figura 79*, en la cual se obtiene la constante de rigidez del puente K N/m que se muestra en la *Tabla 62*.

| N.º de Tuercas | F_i N | u_i m | δ_i m |
|----------------|------------|---------------------|----------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3,22 | 36×10^{-4} | 36×10^{-4} |
| 2 | 6,44 | 35×10^{-4} | 71×10^{-4} |
| 3 | 9,65 | 34×10^{-4} | 105×10^{-4} |
| 4 | 12,87 | 32×10^{-4} | 137×10^{-4} |
| 5 | 16,09 | 33×10^{-4} | 170×10^{-4} |
| 6 | 19,31 | 29×10^{-4} | 199×10^{-4} |

Tabla 61: Valores de incremento de flecha y flecha del noveno ensayo.

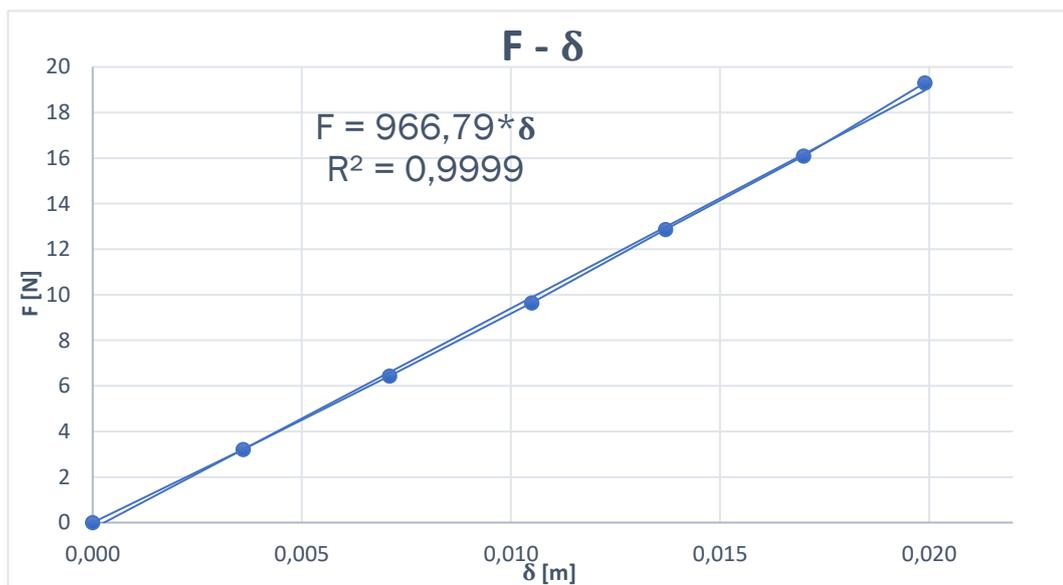


Figura 79: Gráfica de desplazamiento frente a la carga del noveno ensayo.

| | |
|--|---------------------|
| Constante de rigidez del puente K | 966,79 [N/m] |
|--|---------------------|

Tabla 62: Valor de la constante de rigidez del puente en el noveno ensayo.

Paralelamente se procedió a tabular los valores obtenidos en el ensayo dinámico obteniendo los valores de la oscilación forzada como se muestra en la *Tabla 63*. En ella la frecuencia propia de la estructura ω_n rad/s se pasa al dominio de las frecuencias f_n Hz. La cual va disminuyendo según se aumenta la masa, como cabe esperar debido a la *ecuación 4.1* que correlaciona estas 2 variables, otro aspecto importante en este ensayo es que el coeficiente de amortiguamiento respecto al crítico ξ tiene variaciones en el orden de las centésimas.

| N.º de Tuercas | Masa total kg | A_i m | B_i m | φ_i rad | ω_{ni} rad/s | f_i Hz | ξ_i |
|----------------|---------------|---------|---------|-----------------|---------------------|----------|---------|
| 0 | 0,7274 | 0,0002 | 0,1359 | -1,4650 | 61,9800 | 9,8647 | 0,0402 |
| 1 | 1,0554 | 0,0004 | 0,1323 | -0,3452 | 45,9900 | 7,3198 | 0,0377 |
| 2 | 1,3834 | 0,0006 | 0,1288 | -0,6793 | 37,3300 | 5,9414 | 0,0471 |
| 3 | 1,7114 | 0,0004 | 0,1254 | -0,4270 | 32,5900 | 5,1870 | 0,0379 |
| 4 | 2,0394 | 0,0005 | 0,1222 | -0,4429 | 29,0500 | 4,6236 | 0,0370 |
| 5 | 2,3674 | 0,0005 | 0,1189 | -0,1643 | 36,3200 | 5,7807 | 0,0348 |
| 6 | 2,6954 | 0,0006 | 0,1160 | -0,7788 | 24,2200 | 3,8548 | 0,0353 |

Tabla 63: Valores del ensayo dinámico del noveno ensayo.

A partir de la *ecuación 4.1* de la frecuencia natural ($\omega_{teorica}$) para una viga simplemente apoyada de 1 grado de libertad, podremos calcular de forma aproximada el valor del producto del módulo de elasticidad (**E**) y el momento de inercia (**I**) para el caso que no está cargado y así calcular diferencia de las frecuencias teóricas y las experimentales.

| | |
|--------------|-----------------------------|
| E · I | 1948,85 [N m ²] |
|--------------|-----------------------------|

 Tabla 64: Valor del producto de $E \cdot I$ en el noveno ensayo.

Con el producto de **E · I**, procedemos a calcular la frecuencia propia teórica para todos los casos y calcularemos el error cometido entre las frecuencias teóricas y las experimentales halladas presentadas en la *Tabla 65*.

| Masa Tuercas (M_i) kg | Masa Puente (m_b) kg | ω Teórico rad/s | ω Experimental rad/s | f teórica Hz | f Experimental Hz | Error |
|---------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------|-------|
| 0 | 0,7274 | 61,98 | 61,98 | 9,87 | 9,87 | 0,00% |
| 0,3280 | 0,7274 | 44,62 | 45,99 | 7,11 | 7,32 | 2,66% |
| 0,6560 | 0,7274 | 36,66 | 37,33 | 5,84 | 5,94 | 3,79% |
| 0,9840 | 0,7274 | 31,85 | 32,59 | 5,07 | 5,19 | 3,51% |
| 1,3120 | 0,7274 | 28,54 | 29,05 | 4,54 | 4,62 | 1,89% |
| 1,6400 | 0,7274 | 26,08 | 36,32 | 4,15 | 5,78 | 1,71% |
| 1,9680 | 0,7274 | 24,17 | 24,22 | 3,85 | 3,86 | 0,53% |

Tabla 65: Valores de la frecuencia propia teórica y experimental del noveno ensayo.

4.13 Décimo ensayo variando la temperatura $T= 13,9^{\circ}\text{C}$ y $Hm=1,5\%$.

Para el décimo ensayo variando las condiciones de temperatura se procedió a partir del noveno ensayo variando la humedad y la temperatura dejándolo secar de forma natural y enfriar durante todo un fin de semana desde el viernes a las 17:00 hasta el lunes a las 09:19 en la cual se procedió con este ensayo.

Se procedió a medir todos los parámetros ambientales del ensayo como se muestra en la *Tabla 66*.

| Temperatura $^{\circ}\text{C}$ | Humedad Relativa | Humedad Madera | Masa Punte kg |
|-----------------------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| 13,9 | 39 % | 1,5 % | 0,7254 |

Tabla 66: Condiciones ambientales y masa del puente en el décimo ensayo.

Se procedió con el procedimiento anteriormente descrito para obtener la gráfica de variación de la flecha en un intervalo de tiempo, como se muestra en la *Figura 80*. En la cual se pueden observar las 7 vibraciones del puente comenzando por el experimento con 6 tuercas que como se observa está en el punto más bajo de la gráfica debido a que tiene mayor flecha por el peso que soporta. Se observa que en el último experimento solo vibra el puente y se estabiliza.

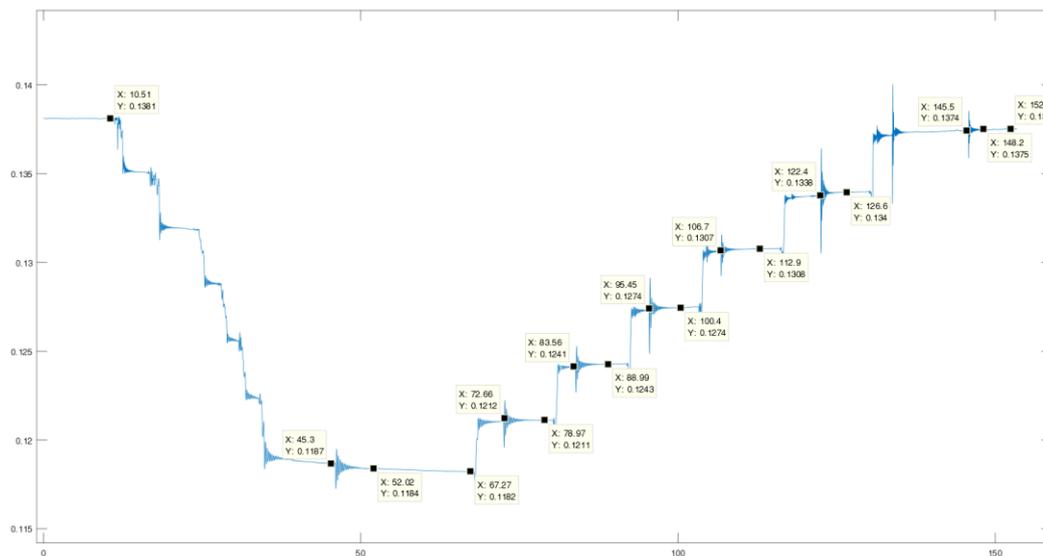


Figura 80: Gráfica de la variación de la flecha en un intervalo de tiempo del décimo ensayo.

A la vista de esta gráfica se realiza el procesado de datos descritos anteriormente, con el cual se obtienen los parámetros de la *ecuación 4.2* de interés para el estudio de este TFG.

A continuación, se procede a tabular los valores obtenidos en el ensayo estático como se muestra en la *Tabla 67*, para poder representarlo y realizar un ajuste lineal entre la Fuerza F N y la flecha δ m como se observa en la *Figura 81*, en la cual se obtiene la constante de rigidez del puente K N/m que se muestra en la *Tabla 68*.

| N.º de Tuercas | F_i N | u_i m | δ_i m |
|----------------|------------|---------------------|----------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3,22 | 36×10^{-4} | 36×10^{-4} |
| 2 | 6,44 | 32×10^{-4} | 68×10^{-4} |
| 3 | 9,65 | 33×10^{-4} | 101×10^{-4} |
| 4 | 12,87 | 31×10^{-4} | 132×10^{-4} |
| 5 | 16,09 | 32×10^{-4} | 164×10^{-4} |
| 6 | 19,31 | 27×10^{-4} | 191×10^{-4} |

Tabla 67: Valores de incremento de flecha y flecha del décimo ensayo.

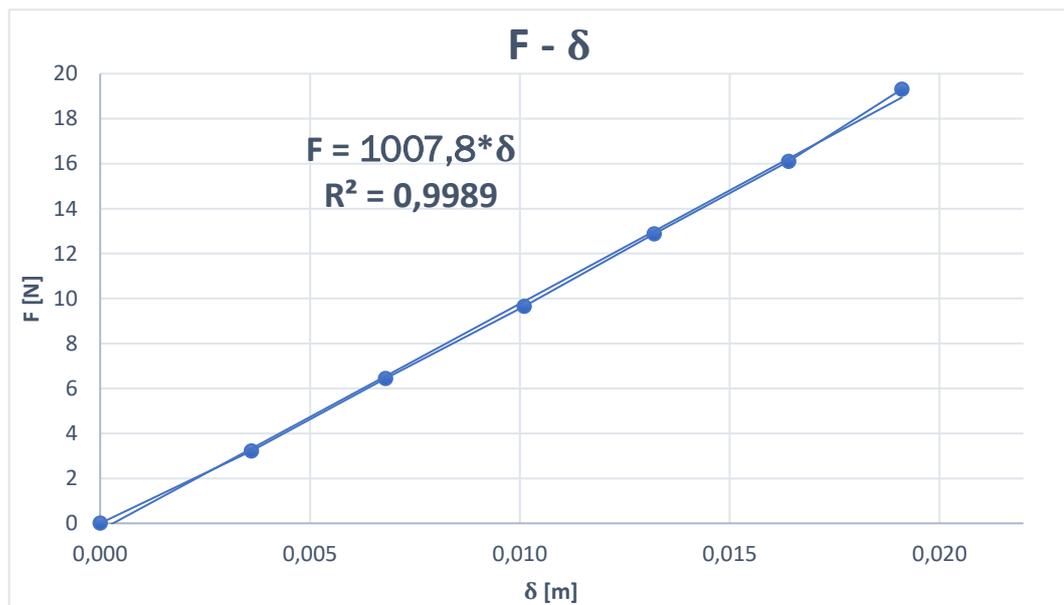


Figura 81: Gráfica de desplazamiento frente a la carga del décimo ensayo.

| | |
|--|----------------------|
| Constante de rigidez del puente K | 1007,80 [N/m] |
|--|----------------------|

Tabla 68: Valor de la constante de rigidez del puente en el décimo ensayo.

Paralelamente se procedió a tabular los valores obtenidos en el ensayo dinámico obteniendo los valores de la oscilación forzada como se muestra en la *Tabla 69*. En ella la frecuencia propia de la estructura ω_n *rad/s* se pasa al dominio de las frecuencias f_n *Hz*. La cual va disminuyendo según se aumenta la masa, como cabe esperar debido a la *ecuación 4.1* que correlaciona estas 2 variables, otro aspecto importante en este ensayo es que el coeficiente de amortiguamiento respecto al crítico ξ tiene variaciones en el orden de las centésimas.

| N.º de Tuercas | Masa total kg | A_i m | B_i m | φ_i rad | ω_{n_i} rad/s | f_i Hz | ξ_i |
|----------------|---------------|---------|---------|-----------------|----------------------|----------|---------|
| 0 | 0,7254 | 0,0002 | 0,1375 | -0,8530 | 63,7700 | 10,1496 | 0,0240 |
| 1 | 1,0534 | 0,0002 | 0,1339 | -2,0550 | 47,1400 | 7,5028 | 0,0537 |
| 2 | 1,3814 | 0,0003 | 0,1307 | -1,0770 | 39,1300 | 6,2279 | 0,0377 |
| 3 | 1,7094 | 0,0004 | 0,1274 | -0,2277 | 33,6600 | 5,3573 | 0,0420 |
| 4 | 2,0374 | 0,0003 | 0,1243 | -0,1991 | 30,0200 | 4,7780 | 0,0332 |
| 5 | 2,3654 | 0,0003 | 0,1211 | 0,0190 | 27,2100 | 4,3307 | 0,0370 |
| 6 | 2,6934 | 0,0006 | 0,1184 | 0,0019 | 24,9000 | 3,9631 | 0,0448 |

Tabla 69: Valores del ensayo dinámico del décimo ensayo.

A partir de la *ecuación 4.1* de la frecuencia natural ($\omega_{teorica}$) para una viga simplemente apoyada de 1 grado de libertad, podremos calcular de forma aproximada el valor del producto del módulo de elasticidad (**E**) y el momento de inercia (**I**) para el caso que no está cargado y así calcular diferencia de las frecuencias teóricas y las experimentales.

| | |
|--------------|-----------------------------|
| E · I | 2057,38 [N m ²] |
|--------------|-----------------------------|

 Tabla 70: Valor del producto de $E \cdot I$ en el décimo ensayo.

Con el producto de **E · I**, procedemos a calcular la frecuencia propia teórica para todos los casos y calcularemos el error cometido entre las frecuencias teóricas y las experimentales halladas presentadas en la *Tabla 71*.

| Masa Tuercas (M _i) kg | Masa Puente (m _b) kg | ω Teórico rad/s | ω Experimental rad/s | f teórica Hz | f Experimental Hz | Error |
|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------|-------|
| 0 | 0,7254 | 63,77 | 63,77 | 10,15 | 10,15 | 0,00% |
| 0,3280 | 0,7254 | 45,88 | 47,14 | 7,31 | 7,50 | 2,63% |
| 0,6560 | 0,7254 | 37,68 | 39,13 | 6,00 | 6,23 | 3,65% |
| 0,9840 | 0,7254 | 32,73 | 33,66 | 5,21 | 5,36 | 2,71% |
| 1,3120 | 0,7254 | 29,33 | 30,02 | 4,67 | 4,78 | 2,26% |
| 1,6400 | 0,7254 | 26,81 | 27,21 | 4,27 | 4,33 | 1,44% |
| 1,9680 | 0,7254 | 24,84 | 24,90 | 3,96 | 3,96 | 0,20% |

Tabla 71: Valores de la frecuencia propia teórica y experimental del décimo ensayo.

4.14 Estudio de la variación de las condiciones de temperatura.

Este ensayo se realizó a partir del décimo ensayo, en el cual se quería estudiar la variación de la flecha en un intervalo de tiempo, de la estructura sin cargas sometida a la variación de temperatura. Se procedió a registrar el comportamiento de la flecha como se muestra en la *Figura 82*.

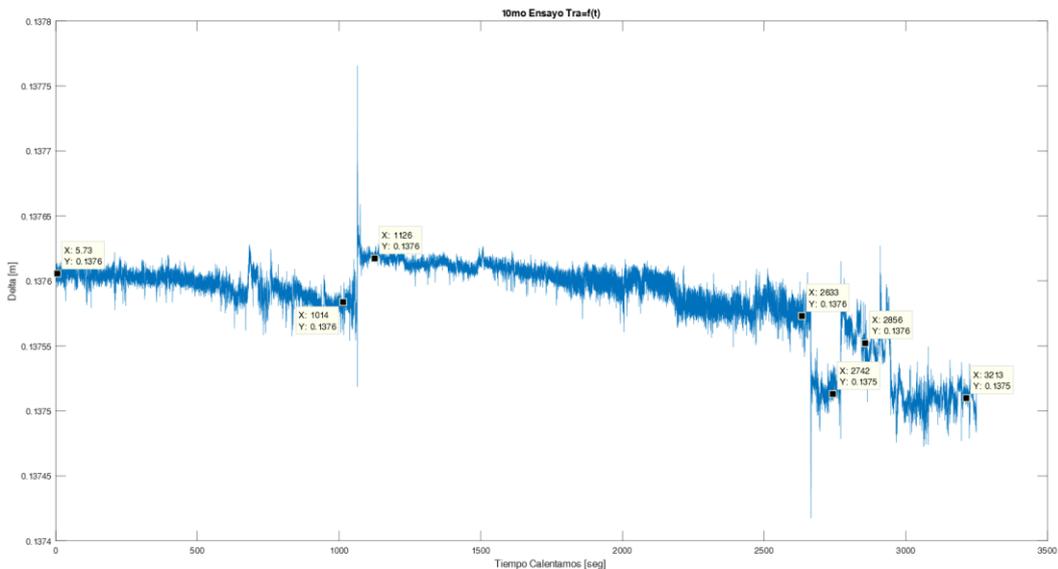


Figura 82: Evolución de la flecha de la estructura en el laboratorio.

Este registro se realizó durante 4 horas como se muestra en la tabla X.X, en el cual se observa que la variación de la flecha tiene una variación en el orden de las decimas de milímetro como se muestra en la *Tabla 72*, por lo que 1×10^{-4} m de variación se considera que la flecha se mantiene constante.

| Tiempo [s] | Flecha [m] |
|---|--|
| 0 | $13,76 \times 10^{-2}$ |
| 1014 | $13,76 \times 10^{-2}$ |
| 1126 | $13,76 \times 10^{-2}$ |
| 2633 | $13,76 \times 10^{-2}$ |
| 2742 | $13,75 \times 10^{-2}$ |
| 2856 | $13,76 \times 10^{-2}$ |
| 3213 | $13,75 \times 10^{-2}$ |
| Variación de la Flecha δ_i | 1×10^{-4} m |

Tabla 72: Variación de la flecha de la estructura en 4 horas.

4.15 Undécimo ensayo variando la temperatura $T= 21,2^{\circ}\text{C}$ y $Hm=1,5\%$.

Para el undécimo ensayo variando las condiciones de temperatura se procedió a partir del décimo ensayo variando la temperatura calentando el laboratorio durante 4 horas hasta las 13.11h en la cual se procedió con este ensayo.

Se procedió a medir todos los parámetros ambientales del ensayo como se muestra en la *Tabla 73*.

| Temperatura $^{\circ}\text{C}$ | Humedad Relativa | Humedad Madera | Masa Punte kg |
|-----------------------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| 21,2 | 35 % | 1,5 % | 0,7025 |

Tabla 73: Condiciones ambientales y masa del puente en el undécimo ensayo.

Se procedió con el procedimiento anteriormente descrito para obtener la gráfica de variación de la flecha en un intervalo de tiempo, como se muestra en la *Figura 83*. En la cual se pueden observar las 7 vibraciones del puente comenzando por el experimento con 6 tuercas que como se observa está en el punto más bajo de la gráfica debido a que tiene mayor flecha por el peso que soporta. Se observa que en el último experimento solo vibra el puente y se estabiliza

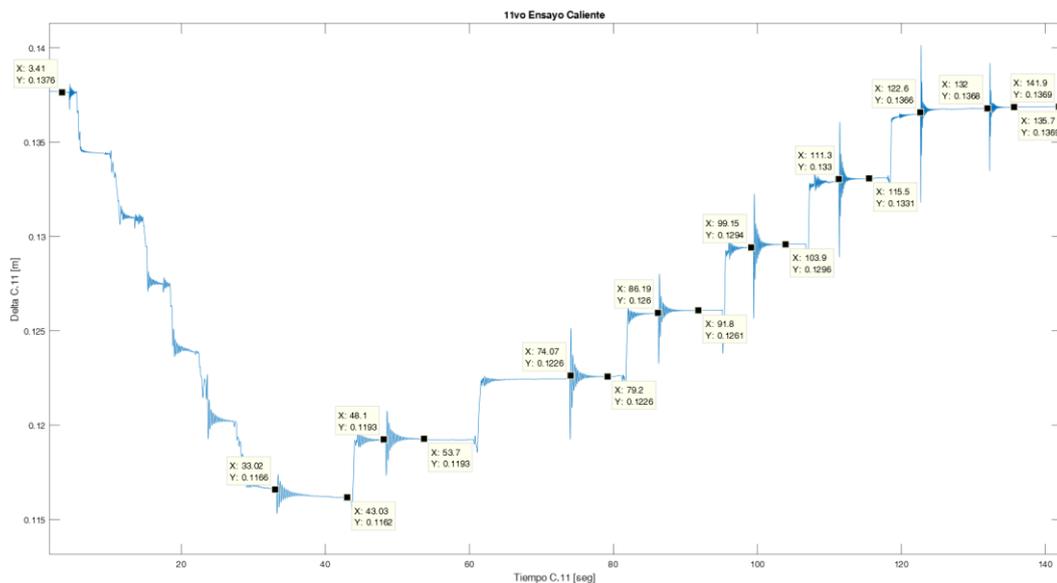


Figura 83: Gráfica de la variación de la flecha en un intervalo de tiempo del undécimo ensayo.

A la vista de esta gráfica se realiza el procesado de datos descritos anteriormente, con el cual se obtienen los parámetros de la *ecuación 4.2* de interés para el estudio de este TFG.

A continuación, se procede a tabular los valores obtenidos en el ensayo estático como se muestra en la *Tabla 74*, para poder representarlo y realizar un ajuste lineal entre la Fuerza F N y la flecha δ m como se observa en la *Figura 84*, en la cual se obtiene la constante de rigidez del puente K N/m que se muestra en la *Tabla 75*.

| N.º de Tuercas | F_i N | u_i m | δ_i m |
|----------------|------------|---------------------|----------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3,22 | 36×10^{-4} | 36×10^{-4} |
| 2 | 6,44 | 35×10^{-4} | 71×10^{-4} |
| 3 | 9,65 | 35×10^{-4} | 106×10^{-4} |
| 4 | 12,87 | 35×10^{-4} | 141×10^{-4} |
| 5 | 16,09 | 33×10^{-4} | 174×10^{-4} |
| 6 | 19,31 | 30×10^{-4} | 204×10^{-4} |

Tabla 74: Valores de incremento de flecha y flecha del undécimo ensayo.

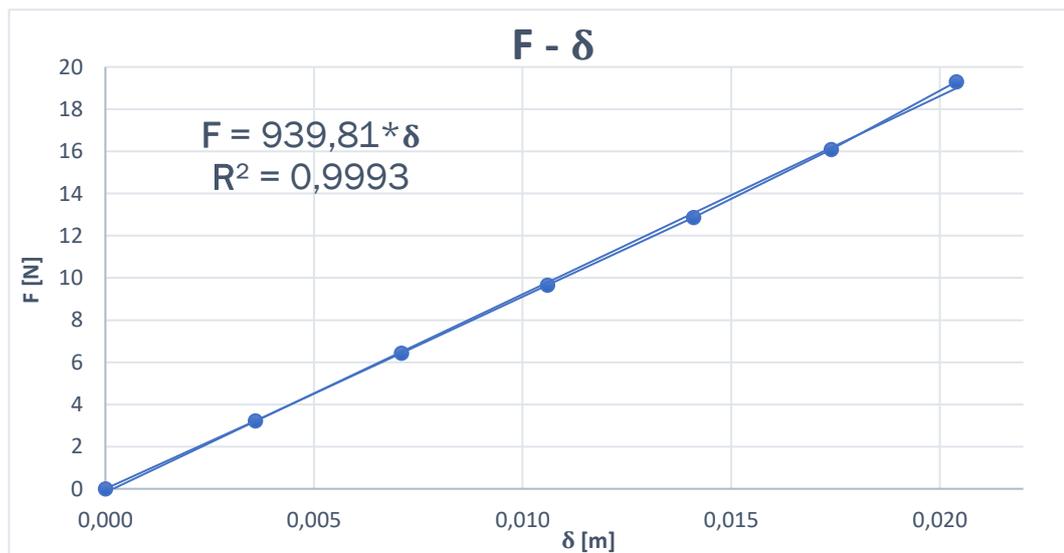


Figura 84: Gráfica de desplazamiento frente a la carga del undécimo ensayo.

| | |
|--|---------------------|
| Constante de rigidez del puente K | 939,81 [N/m] |
|--|---------------------|

Tabla 75: Valor de la constante de rigidez del puente en el undécimo ensayo.

Paralelamente se procedió a tabular los valores obtenidos en el ensayo dinámico obteniendo los valores de la oscilación forzada como se muestra en la *Tabla 76*. En ella la frecuencia propia de la estructura ω_n rad/s se pasa al dominio de las frecuencias f_n Hz. La cual va disminuyendo según se aumenta la masa, como cabe esperar debido a la *ecuación 4.1* que correlaciona estas 2 variables, otro aspecto importante en este ensayo es que el coeficiente de amortiguamiento respecto al crítico ξ tiene variaciones en el orden de las centésimas.

| N.º de Tuercas | Masa total kg | A_i m | B_i m | φ_i rad | ω_{n_i} rad/s | f_i Hz | ξ_i |
|----------------|---------------|---------|---------|-----------------|----------------------|----------|---------|
| 0 | 0,7025 | 0,0004 | 0,1367 | 0,4181 | 62,0500 | 9,8759 | 0,0371 |
| 1 | 1,0305 | 0,0005 | 0,1331 | 0,9870 | 45,1300 | 7,1829 | 0,0642 |
| 2 | 1,3585 | 0,0004 | 0,1296 | 0,2526 | 37,4000 | 5,9526 | 0,0464 |
| 3 | 1,6865 | 0,0005 | 0,1261 | -0,0047 | 32,2300 | 5,1297 | 0,0441 |
| 4 | 2,0145 | 0,0007 | 0,1226 | 0,0380 | 28,5100 | 4,5376 | 0,0469 |
| 5 | 2,3425 | 0,0006 | 0,1193 | 0,0179 | 25,7400 | 4,0968 | 0,0411 |
| 6 | 2,6705 | 0,0005 | 0,1163 | -0,1062 | 23,8200 | 3,7912 | 0,0356 |

Tabla 76: Valores del ensayo dinámico del undécimo ensayo.

A partir de la *ecuación 4.1* de la frecuencia natural ($\omega_{teorica}$) para una viga simplemente apoyada de 1 grado de libertad, podremos calcular de forma aproximada el valor del producto del módulo de elasticidad (E) y el momento de inercia (I) para el caso que no está cargado y así calcular diferencia de las frecuencias teóricas y las experimentales.

| | |
|-------------|-----------------------------|
| $E \cdot I$ | 1886,31 [N m ²] |
|-------------|-----------------------------|

 Tabla 77: Valor del producto de $E \cdot I$ en el undécimo ensayo.

Con el producto de $E \cdot I$, procedemos a calcular la frecuencia propia teórica para todos los casos y calcularemos el error cometido entre las frecuencias teóricas y las experimentales halladas presentadas en la *Tabla 78*.

| Masa Tuercas (M_i) kg | Masa Puente (m_b) kg | ω Teórico rad/s | ω Experimental rad/s | f teórica Hz | f Experimental Hz | Error |
|---------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|----------------|---------------------|-------|
| 0 | 0,7025 | 62,05 | 62,05 | 9,88 | 9,88 | 0,00% |
| 0,3280 | 0,7025 | 44,30 | 45,13 | 7,05 | 7,18 | 1,80% |
| 0,6560 | 0,7025 | 36,28 | 37,40 | 5,78 | 5,95 | 2,94% |
| 0,9840 | 0,7025 | 31,47 | 32,23 | 5,01 | 5,13 | 2,30% |
| 1,3120 | 0,7025 | 28,18 | 28,51 | 4,49 | 4,54 | 1,12% |
| 1,6400 | 0,7025 | 25,74 | 25,74 | 4,10 | 4,10 | 0,00% |
| 1,9680 | 0,7025 | 23,84 | 23,82 | 3,80 | 3,79 | 0,14% |

Tabla 78: Valores de la frecuencia propia teórica y experimental del undécimo ensayo.



Universidad de Valladolid

PROTOTIPADO Y SIMULACION DE UNA MAQUETA DE PUENTE TIPO WARREN HECHA CON PALITOS DE MADERA



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



Capítulo 5

Modelado y Simulación

En este capítulo se va a tratar el modelado del puente mediante un software de elementos finitos el cual es SAP2000, para realizar la simulación y el ajuste, además se pretende realizar una guía para que futuros estudiantes puedan utilizarlo en posteriores TFG's.

5.1 Cómo modelar con SAP 2000.

5.1.1 Qué es SAP 2000.

Se define SAP2000 como un programa (Software) de cálculo estructural basado en elementos finitos. Con este programa se puede modelar y calcular cualquier tipo de estructura, de cualquier envergadura y complejidad; como características a destacar de este son que se puede definir cualquier tipo de material así como el tipo sección geométrica teniendo la posibilidad de variar completamente las propiedades mecánicas y geométricas de los mismos, motivo principal por el cual se optó por la utilización de este programa para este TFG, debido a que el prototipo del puente hecho con palitos de madera tiene secciones variables además del tipo de material que al ser anisótropo presentaba cierta dificultad para definirlo en otros programas comerciales de cálculo de estructuras que están pensados en cumplir la norma y por este motivo no dejar variar las propiedades mecánicas de los materiales.

Este programa permite simular las distintas cargas que se puede presentar en la vida útil de una estructura de forma aislada o combinada, como son las cargas de viento, nieve, impactos, sismos entre otras muchas, otra característica de este programa es que nos permite utilizar factores de multiplicación para amplificar o reducir las cargas según el estudio que se quiera realizar.

El programa posee una amplia biblioteca de los tipos de perfiles estructurales utilizados comercialmente regidos por distintas normativas según el país o continente (europea, americana, china, etc.), se puede seleccionar el perfil normalizado que más se parezca al nuestro y tener la libertad de modificar la geometría libremente

5.1.2 Modelar con SAP2000.

En este apartado se empieza a elaborar la guía paso a paso para el modelado en SAP2000 en la cual se pretende explicar ampliamente todos los pasos seguidos para elaborar el modelo de un puente en celosía tipo Warren que es la estructura para estudiar en este TFG.

Como primer paso para iniciar el modelado de cualquier tipo de estructura tendremos que dirigirnos a la barra de herramientas en la esquina superior izquierda y seleccionar la pestaña **/File/New Model/** como se muestra en la *Figura 85*.

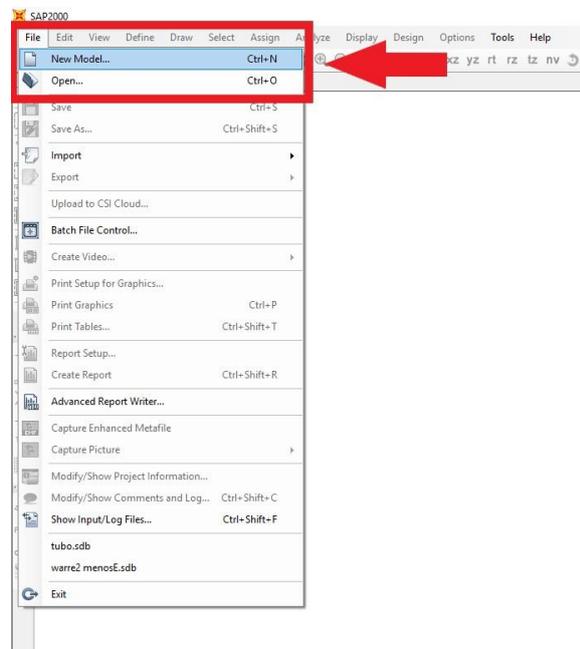


Figura 85: Barra de herramientas de SAP 2000.

A continuación, nos abrirá una ventana en la cual nos aparecerán las diferentes opciones de modelado que presenta el programa como puede ser un modelo en 2D o 3D como se muestra en la *Figura 86*, tendremos que seleccionar las unidades del sistema internacional y para nuestro caso la opción **/Select Template/Grid Only/**. Como se puede apreciar el programa también nos presenta la opción **/2D Trusses/** de elegir una celosía en 2D, pero esta opción se descartó porque es más complicado modificar los parámetros geométricos.

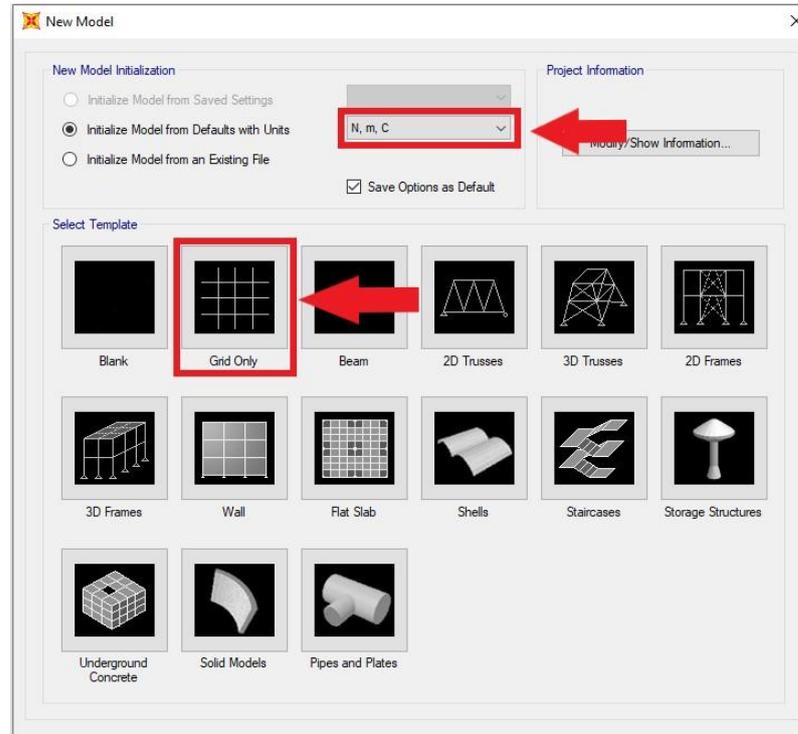


Figura 86: Ventana con las opciones de modelado según la tipología.

Una vez seleccionada la opción de */Grid Only/* se abre una ventana para la configuración de la malla como se muestra en la *Figura 87*, en la cual nos presentan 3 bloques a configurar, el primer bloque */Number of Grid Lines/* se refiere al número de líneas que presenta nuestra malla. En este caso trabajaremos en el plano XZ debido a que en el programa la gravedad actúa en la dirección del eje Z. Primero seleccionaremos el número de líneas que se presentan en el eje X el cual representa el número total de nudos de nuestra celosía en viga Warren que consta de 61 nudos, en el eje Y se selecciona 1 única línea debido a que no trabajaremos en esa dirección y nos es indiferente el número de líneas en esa dirección y por último en el eje Z pondremos un total de 2 líneas sobre las cuales irán el cordón superior y el cordón inferior.

El segundo bloque */Grid Spacing/* se refiere al espaciado entre el número de líneas definidas en el primer bloque en el cual introduciremos la distancia que habrá entre el número de nudos en cada dirección, en este caso al tener 61 nudos y una distancia total de 4,10 m la distancia a introducir es el resultado del cociente de 4.10 m entre 60 nudos que da como resultado $68,33 \times 10^{-3}$ m, cabe destacar que a la hora de dividir los nudos no se tiene en cuenta el primer nudo ya que el programa ya lo tiene en cuenta como nudo de referencia; en el eje Z introduciremos la distancia entre las líneas medias de los cordones superior e inferior siendo ésta de 0,085 m y por último la distancia en el eje Y es indiferente sabiendo que tenemos un problema en el plano XZ.

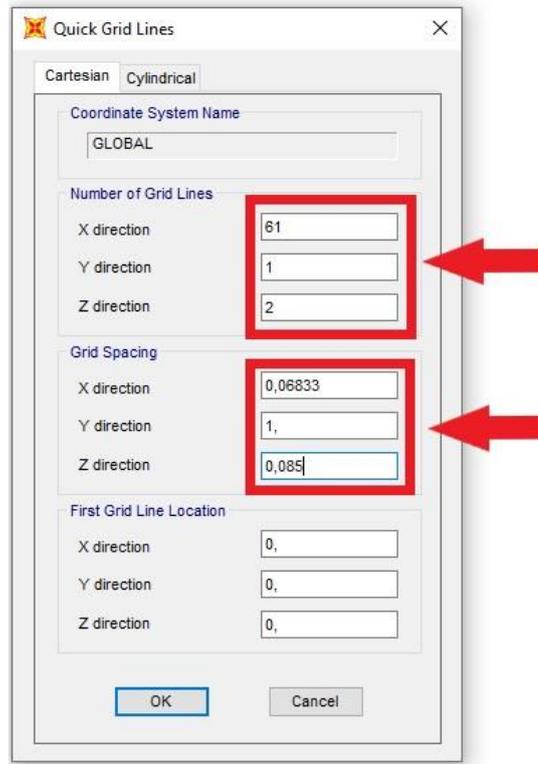


Figura 87: Opciones de mallado de SAP 2000.

Una vez aceptada la configuración se presenta el mallado requerido para realizar nuestra estructura como se muestra en la *Figura 88*. A partir de este punto cerraremos la vista del mallado en 3D y trabajaremos en la vista de 2D.

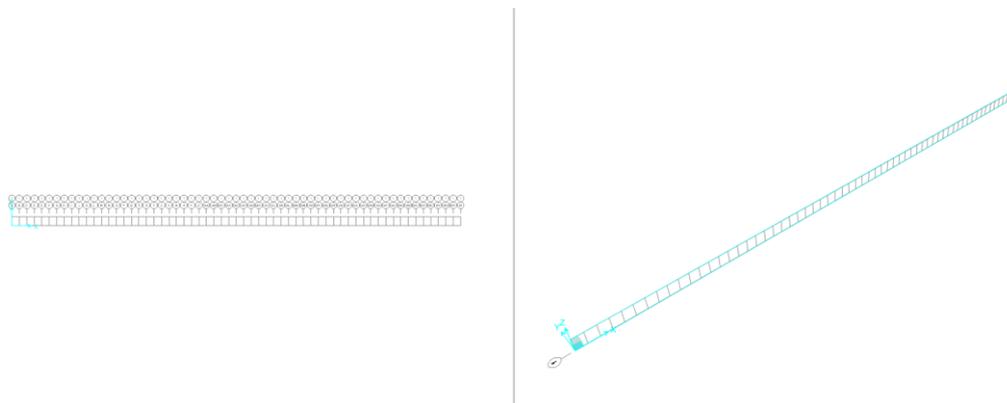


Figura 88: Representación del mallado en 2 dimensiones.

Se selecciona la vista del plano sobre el cual trabajaremos que en este caso es el plano XZ como se muestra en la *Figura 89*.

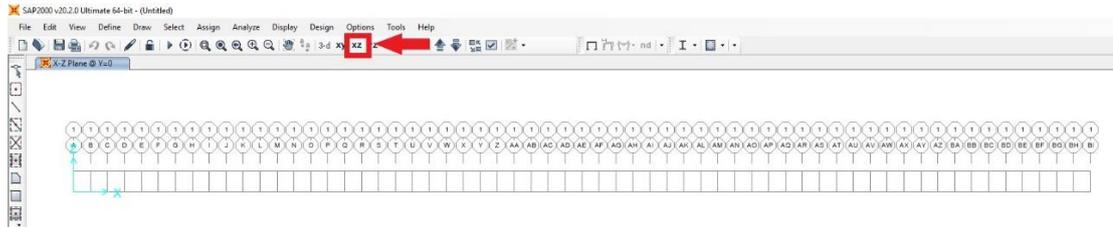


Figura 89: Vista de perfil del mallado en 2 dimensiones.

El mallado también muestra una nomenclatura en orden alfabético en todos los nudos en cual ocultaremos haciendo clic con el botón derecho sobre la malla en la cual se desplegará una ventana con las opciones que se pueden modificar como se muestra en la *Figura 90*. En esta seleccionaremos la opción de */Edit Grid Data/* que abrirá otra ventana */Coordinate/Grid Systems/* la cual muestra los sistemas de referencia de los mallados realizados en nuestro caso al solo realizar uno se genera uno genérico con el nombre de GLOBAL el cual seleccionaremos y seguidamente haremos clic en */Modify/Show Systems/*.

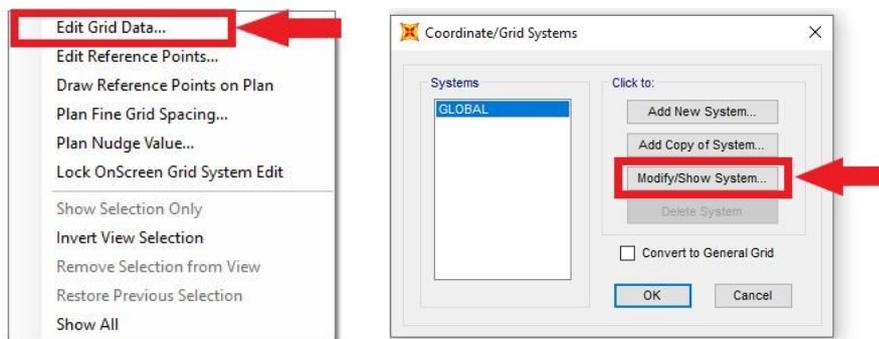


Figura 90: Ventana de configuración de mallado.

Esta desplegará una ventana donde se muestra toda la información del mallado realizado como se muestra en la *Figura 91*. Se puede observar toda la información, nomenclatura de cada nudo y la distancia entre ellos en cada eje.

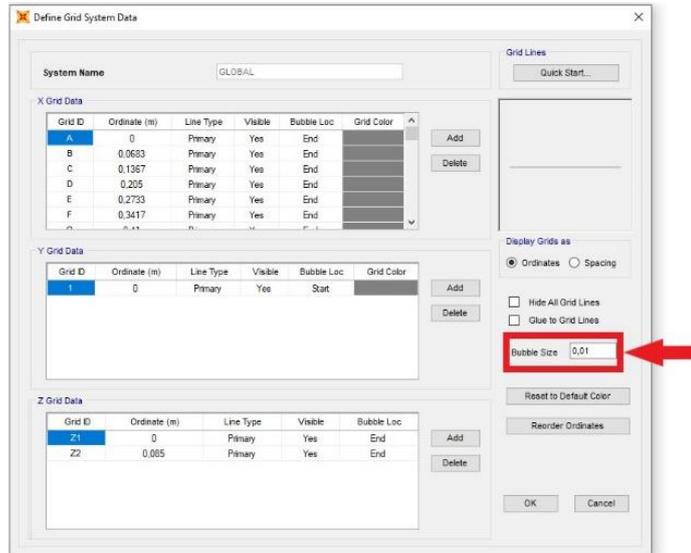


Figura 91: Ventana de características del mallado.

Con esta modificación se visualiza mejor el mallado realizado dejando todo listo para empezar a construir nuestra estructura como se muestra en la Figura 92.

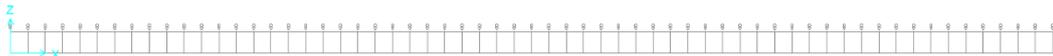


Figura 92: Malla modificada vista en 2 dimensiones.

5.2 Definición del material.

Una vez establecida la malla procedemos a definir el material con el que trabajamos, que para este caso se definió como material la madera. Para este cometido nos dirigimos a la barra de herramientas pestaña **/materials/** como se muestra en la Figura 93.

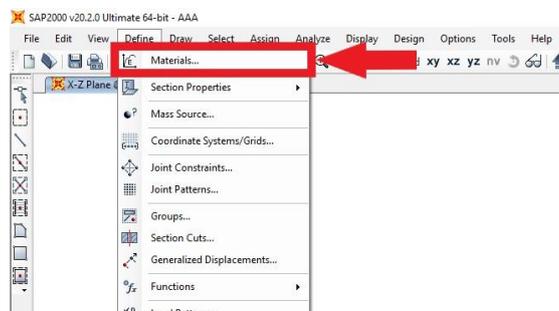


Figura 93: Selección de materiales en la barra de herramientas en SAP 2000.

La cual nos abrirá una ventana **/Define Materials/** en la cual daremos clic en **/Add New Material/** para añadir un nuevo material. Como se muestra en la *Figura 94* viene definido un material por defecto. Seguidamente se abrirá otra ventana en la cual tendremos que seleccionar la región del material y el tipo de material que para el caso en el que nos encontramos seleccionaremos **/Europe/** y en tipo de material **/Other/** ya que la opción de madera no está contemplada entre las posibles opciones a ser seleccionadas.

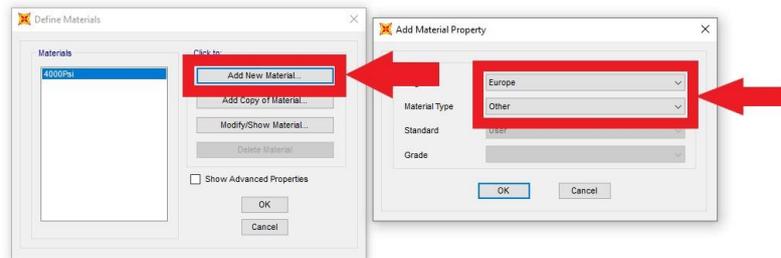


Figura 94: Ventana de definición de materiales.

A continuación, se mostrará la ventana de configuración del material que se conforma por 3 bloques como se muestra en la *Figura 95*. El primer bloque **/General Data/** se refiere a la nomenclatura que queremos darle al material que en este caso solo modificaremos en nombre y escribiremos madera.

El segundo bloque se refiere al peso por unidad de volumen y la densidad del material que de momento dejaremos las que vienen por defecto; El tercer bloque se refiere a las propiedades mecánicas del material, como el módulo elástico E, el coeficiente de poisson U, el coeficiente de expansión térmica A y el módulo de cortadura G que dejaremos los valores establecidos por defecto ya que más adelante se comentará como modificar estos valores para validar el modelo.

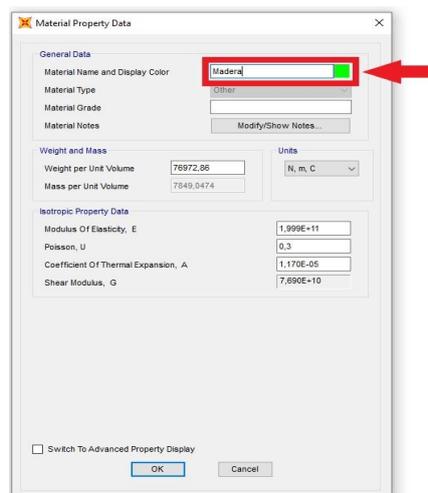


Figura 95: Ventana de características mecánicas del material.

5.3 Definición de las secciones.

Una vez seleccionado el tipo de material que utilizaremos en la simulación, se procedió a definir las secciones que en el caso de este TFG tenemos una sección rectangular establecidas por la geometría de los palitos de helado.

Para este cometido haremos clic en la pestaña **/Define/Sección Properties/Frame Sections/** como se observa en la *Figura 96*.

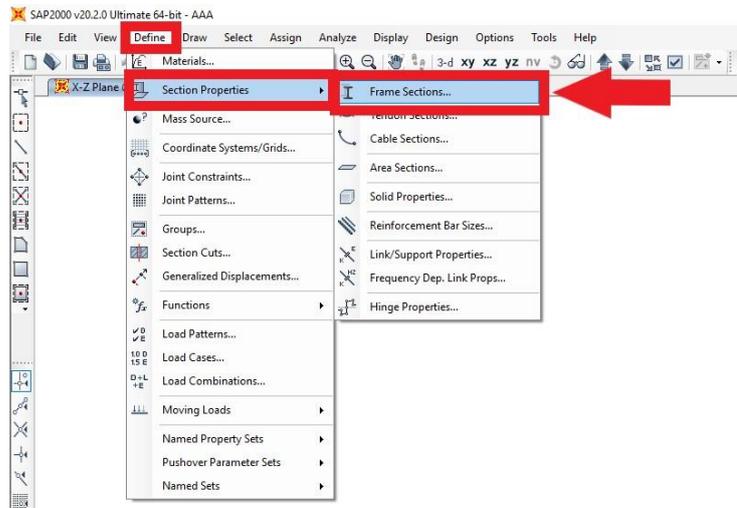


Figura 96: Selección de la definición de la sección.

A continuación, se presentará una ventana como se observa en la *Figura 97*. **/Frame Properties/** en la cual haremos clic en la opción **/Add New Property/** debido a que no tenemos un perfil normalizado y en el tipo de sección seleccionaremos **/Rectangular/**.

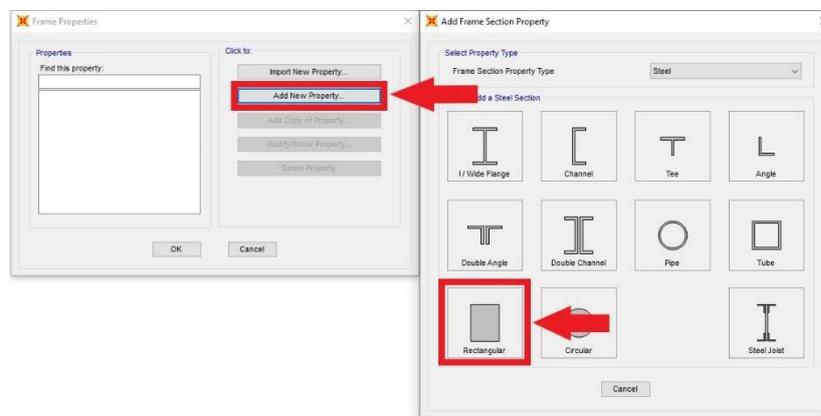


Figura 97: Ventana con todas las tipologías de sección.

Se presentará una ventana en la deberemos introducir los datos de la geometría, primero debemos establecer los tipos de secciones que introduciremos que en el caso de este TFG comprende de dos tipos la sección 1 se establecerá para las diagonales del puente en la que se considera solo una barra de canto 0,01 m y canto de 0,002 m, para la sección 2 que se utilizara en los cordones superior e inferior se considera un solapamiento de 2 barras por lo que esta sección tendrá la misma medida de canto que la primera es decir 0,01 m pero con dobles espesor el cual se establecerá en 0,004 m. Como se observa en la *Figura 98* se nos muestra una ventana con 3 bloques, en el primer bloque **/Section Name/** introduciremos el nombre de cada sección; En el segundo bloque **/Dimensions/** introduciremos los datos requeridos para cada tipo, en el cual el canto es denominado **/Depth/** y el espesor **/Width/** ambas medidas deberán ser introducidas en el sistema internacional de longitud (metros). Como último paso en el tercer bloque **/Material/** seleccionaremos madera como el material definido en el apartado anterior.

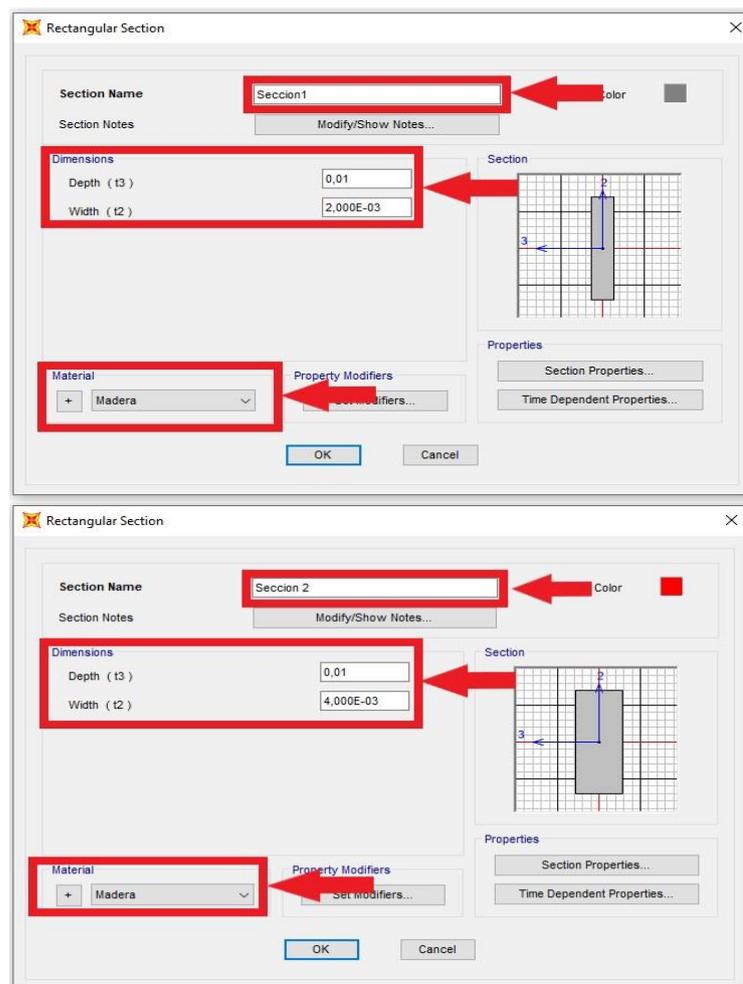


Figura 98: Definición de las dimensiones de las secciones rectangulares.

5.4 Simplificación del modelo.

En este apartado se definirá la simplificación de la estructura para su modelado partiendo de que se realizará un modelado en 2 dimensiones. Para este cometido solo se tendrá en cuenta la mitad de la estructura simplificándolo a una sola celosía tipo Warren estableciendo la sección 1 para las diagonales y la sección 2 para los cordones superior e inferior.

Se procede a dibujar la estructura como se muestra en la *Figura 99* tendremos que dirigirnos a la barra de herramientas y hacer clic en la opción de */Draw Frame/Cable/*.

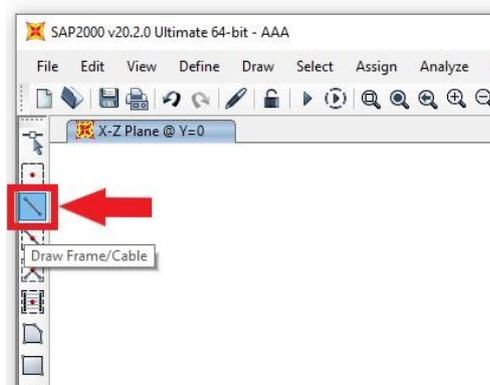


Figura 99: Botón de dibujar secciones o cables.

Una vez seleccionada esta opción solo tendremos que ir uniendo los nodos a partir del mallado previamente definido. Como se muestra en la *Figura 100* iremos uniendo los nodos para conseguir la geometría requerida. Primero se realizó el modelado de las diagonales seguido del cordón inferior y cordón superior en ese orden.

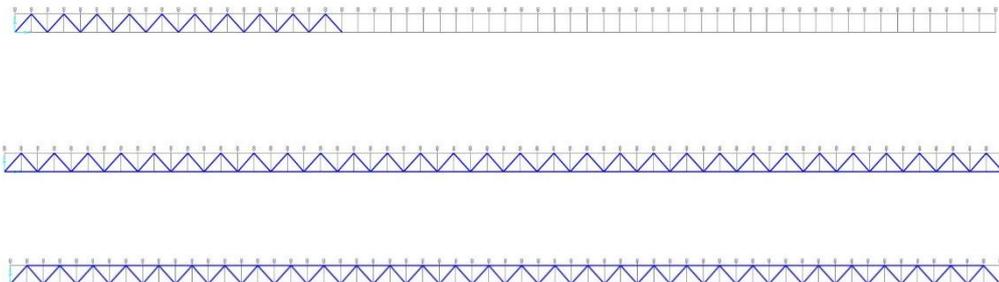


Figura 100: Proceso de dibujo de las celosías tipo Warren en dos dimensiones.

Para comprobar la orientación de las secciones seleccionaremos en la barra de herramientas la pestaña /*Display Options/General Options/View Type/Extrude*/ como se muestra en la *Figura 101*, se comprueba que esta correctamente orientadas las secciones tanto de los cordones superior e inferior como el de las diagonales.

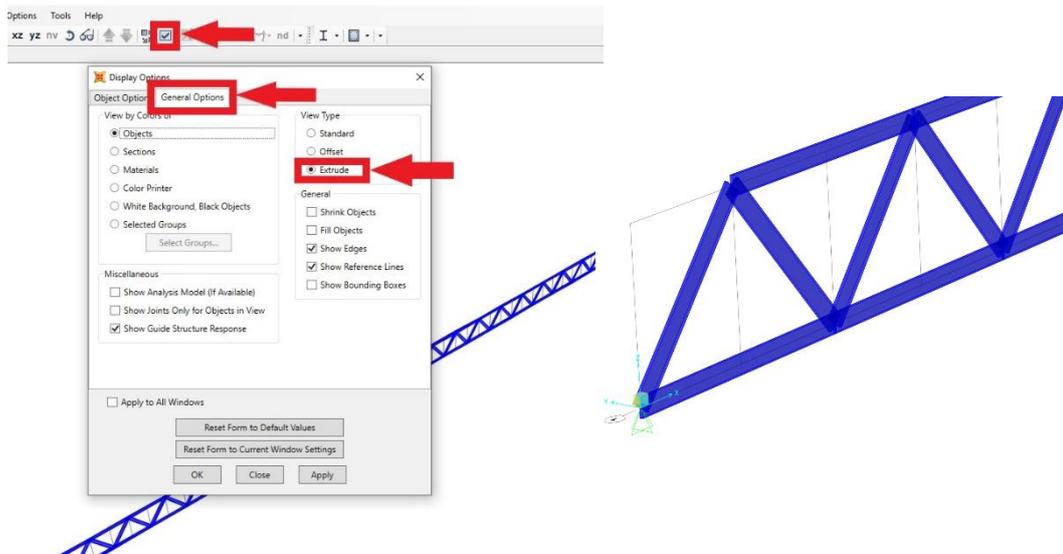


Figura 101: Extrusión de la sección para representar la sección en 3 dimensiones.

A continuación, se procedió a diferenciar las secciones en 2 grupos, el primero grupo compuesto por las diagonales de sección 1 definida previamente y los cordones de sección 2. Para este cometido tendremos que crear 2 grupos con lo que nos dirigiremos a la barra de herramientas a la pestaña /*Define/Groups*/ como se muestra en la *Figura 102*.

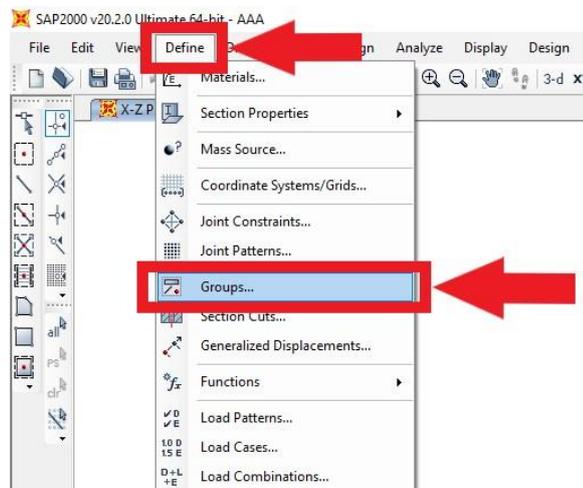


Figura 102: Definición de grupos desde la barra de herramientas.

Se presentará una ventana como la que se muestra en la *Figura 103* /*Define Group Names*/ en la cual deberemos crear los grupos requeridos por lo que seleccionaremos /*Add New Group*/ y nos presentará otra ventana llamada /*Group Definition*/ en la cual solo tendremos que indicar el nombre del grupo en /*Group Name*/ una vez definido el nombre daremos a la pestaña de OK y se creará el grupo, repetimos el procedimiento para añadir los dos grupos llamados Cordones y Diagonales.

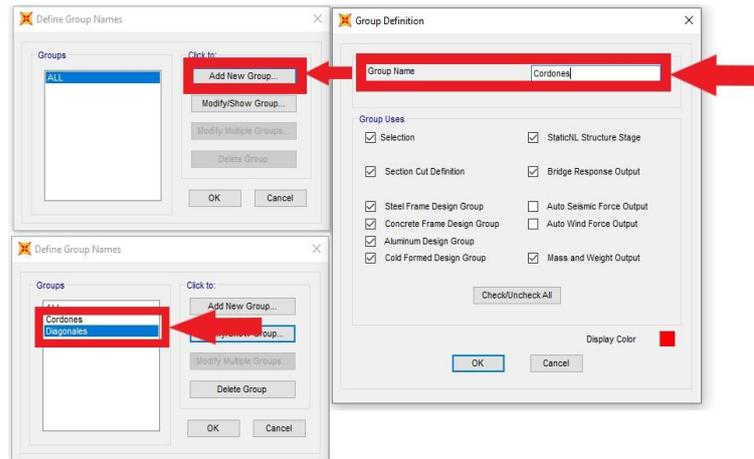


Figura 103: Ventana de definición de grupos.

Seguidamente se procede a seleccionar los elementos que componen cada grupo, para este cometido nos dirigimos a la pestaña /*Select/Select/Pointer Windows*/. Como se muestra en la *Figura 104*.

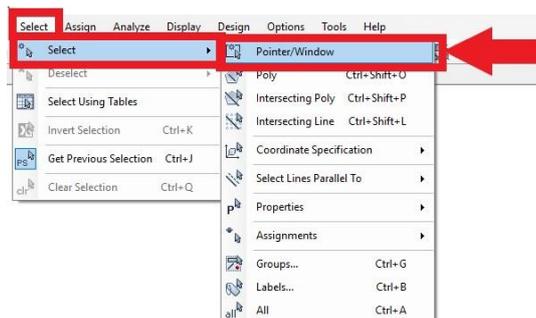


Figura 104: Botón para seleccionar varias secciones.

Podremos crear áreas de selección como las que se muestra en la *Figura 105* en las cuales tendremos que rodear completamente las secciones que queremos que seleccionen, una vez seleccionadas nos aparecerá las barras seleccionadas con un trazo continuo y un x en las uniones de dichas barras.

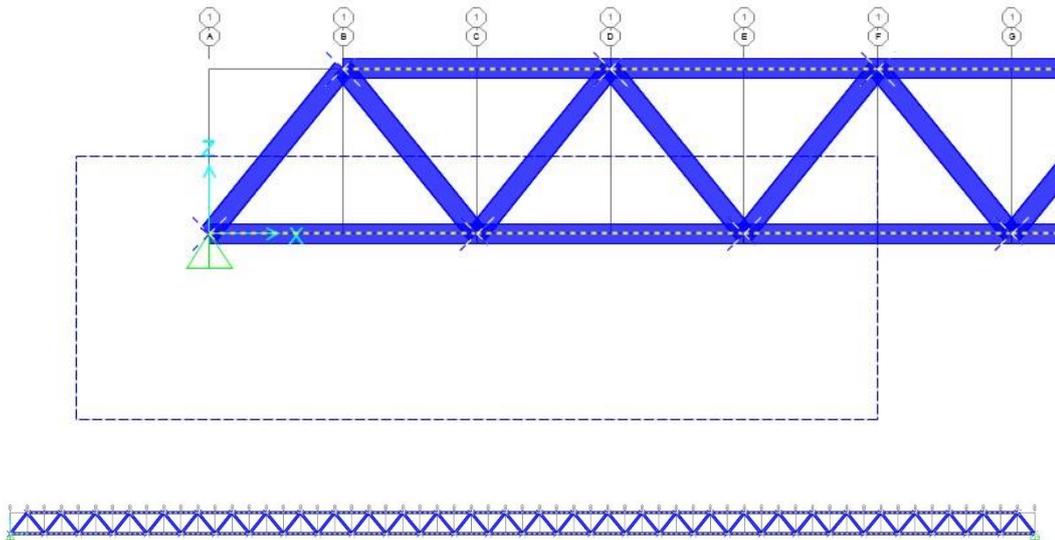


Figura 105: Cordones superior e inferior seleccionados.

Una vez seleccionado las secciones procederemos a asignar el grupo al que pertenecer definido previamente como se muestra en la *Figura 106* para este cometido nos dirigimos a la pestaña */Assign/Assign to Group/* el cual nos presentará una ventana */Assign to Groups/* en la cual deberemos seleccionar el nombre del grupo y dar a */Apply/*, se repite el proceso para ambos grupos seleccionando primero los elementos y luego asignándolos al grupo que pertenecen.

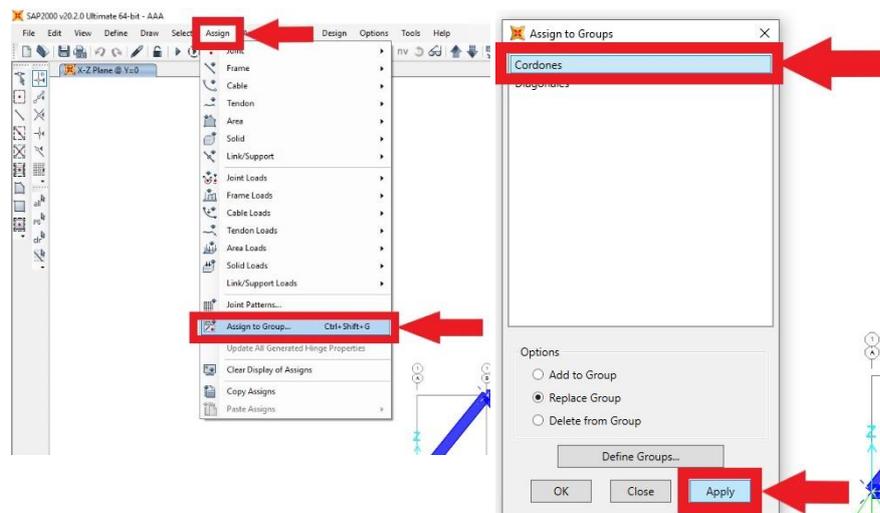


Figura 106: Ventana de asignación de grupos.

Con los grupos creados nos será más fácil hacer modificaciones de propiedades geométrica o mecánica con solo indicar que grupo queremos modificar, esto en estructuras más complejas facilita el manejo de distintos tipos de secciones. Como se observa en la *Figura 107* para este cometido nos dirigimos a la barra de herramientas **/Select/Select/Groups/**.

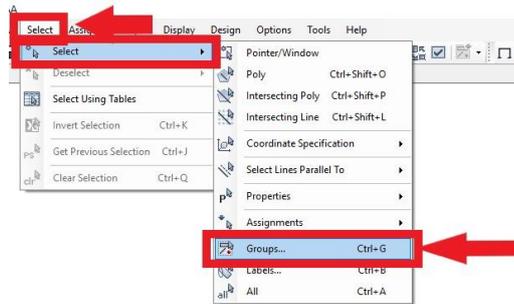


Figura 107: Botón de selección de grupos.

La cual nos mostrará una ventana llamada **/Select by Groups/** como se muestra en la *Figura 108* en la cual podremos indicar el grupo que queremos seleccionar con solo indicar el nombre y hacer clic en el botón **/Select/** una vez realizada la operación se muestra el grupo seleccionado con un trazo de línea discontinua de color blanco que nos indica que esta seleccionado. También podemos seleccionar varios grupos con solo indicar en nombre y hacer clic en **/Select/** o quitar uno de los grupos mencionado dando clic a **/Deselect/**.

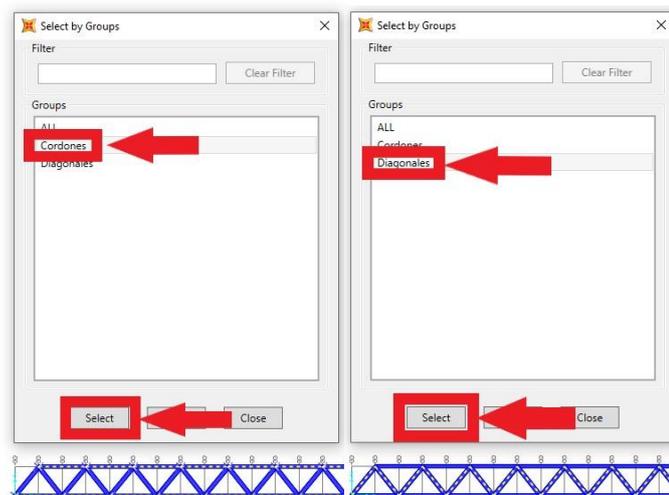


Figura 108: Selección de los grupos según el tipo, cordones y diagonales.

Para modificar las secciones de los grupos nos dirigimos a la barra de herramientas a la pestaña */Assign/Frame/Frame Sections/* como se muestra en la Figura 109.

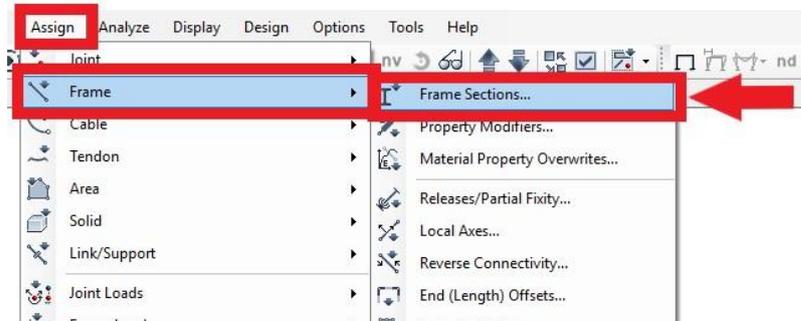


Figura 109: Botón de asignación de sección geométrica.

Nos mostrará una ventana */Frame Properties/* en la cual indicaremos con el grupo seleccionado la sección que le vamos a asignar previamente definido. Como se muestra en la Figura 110 con cada grupo seleccionado le asignamos la sección que le corresponde, en el caso de las diagonales se le indica que es de tipo sección 1 (espesor simple) y para los cordones se indica que es de tipo sección 2 (espesor doble).

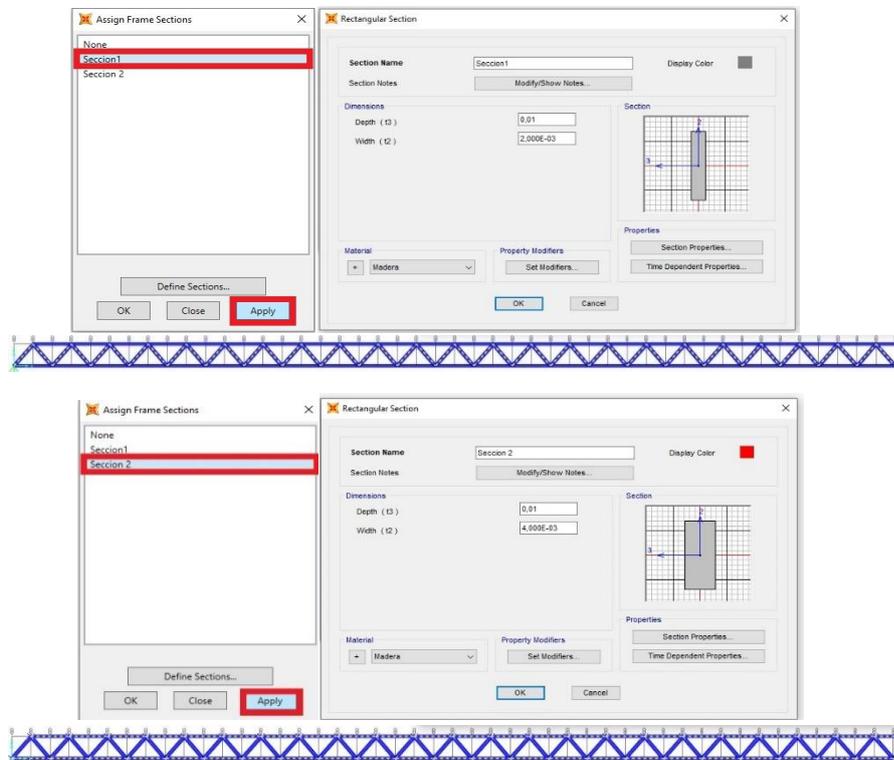


Figura 110: Asignación de sección geométrica por grupos.

Una vez asignadas las secciones para cada tipo de grupo se comprueba que se allá hecho correctamente, para esto en la barra de herramientas nos dirigimos a la vista /3-D/ y se nos presentará la vista de la estructura como se muestra en la *Figura 111* en la cual comprobamos que los cordones tienen una sección doble y las diagonales una sección simple.

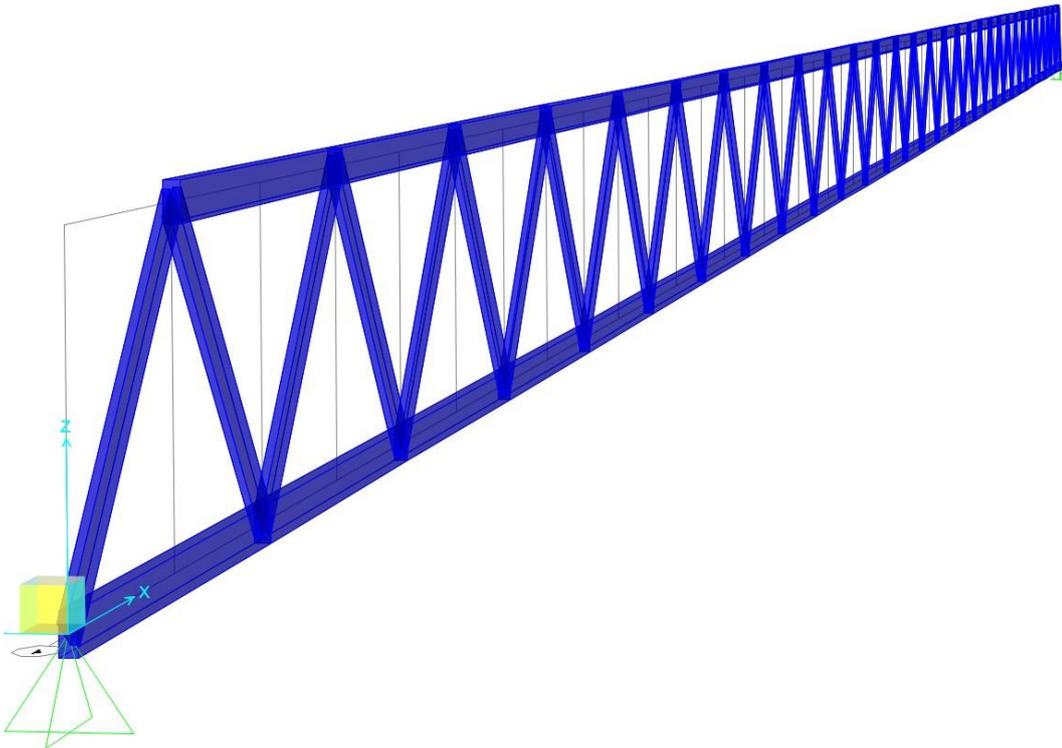


Figura 111: Extrusión de la celosía para la comprobación de secciones geométricas.

5.5 Ajuste de las características del modelo

5.5.1 Simplificación Modelo 2D

Con toda la geometría definida previamente procederemos a modificar las características físicas y mecánicas del modelo con el fin de ajustar los resultados a los valores obtenidos experimentalmente, para este cometido tendremos que modificar la densidad del material y el módulo de elasticidad partiendo de la hipótesis de que hemos simplificado la estructura tridimensional a solo una celosía plana por lo representaría la mitad de la estructura teniendo en cuenta que la masa de los tableros superior e inferior se reparten para cada cercha.

El primer paso para ajustar la masa/peso del modelo para el problema estático solo tendremos en cuenta la masa de la estructura y ajustaremos la masa/peso para obtener las reacciones requeridas en los apoyos. Para esto nos dirigiremos a la barra de herramientas */Run Analysis/* que nos mostrará una ventana */Set Load Cases to Run/* como se observa en la *Figura 112* en la cual podremos seleccionar que tipo de caso queremos simular en la sección de */Action/* haciendo clic en */Run/Do Not Run Case/* en función de si se quiere o no simular cada caso. En nuestro caso daremos a simular el caso */DEAD/* y */MODAL/* haciendo clic en */Run Now/*.

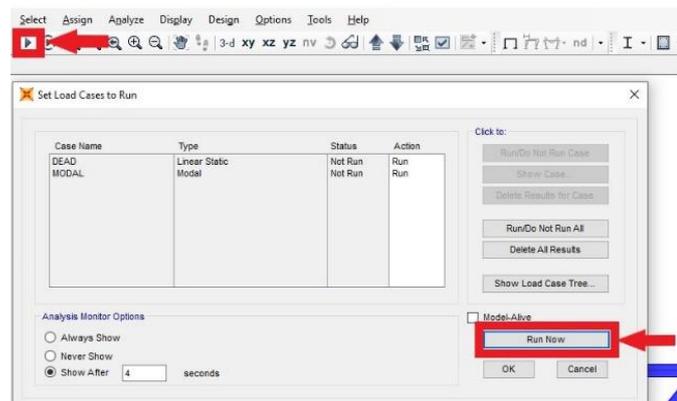


Figura 112: Ventana de simulación de los distintos casos.

Una vez ejecutados los casos a simular nos dirigimos a la barra de herramientas al bloque que muestra la deformada y los esfuerzos y haremos clic en */Show Forces/Stresses/Joints/* como se muestra en la *Figura 113* la cual nos mostrará una ventana */Display Joint Reactions/* en la cual deberemos indicar el caso que queremos que nos muestre que en nuestro caso es */DEAD/* (peso muerto) y en el bloque de */Display Types/* seleccionaremos */Arrows/* que nos mostrará los esfuerzos en forma de flechas como se muestra en la parte inferior izquierda de la figura. En la cual obtenemos una reacción de 17,45 [N] en cada apoyo, con este valor podremos modificar el peso para ajustarlo a nuestro modelo real.

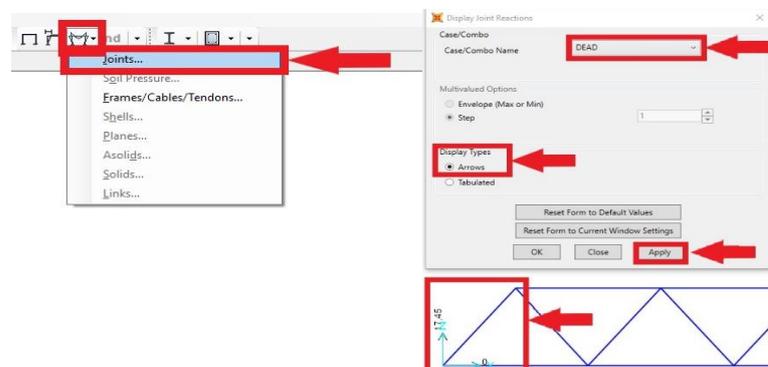
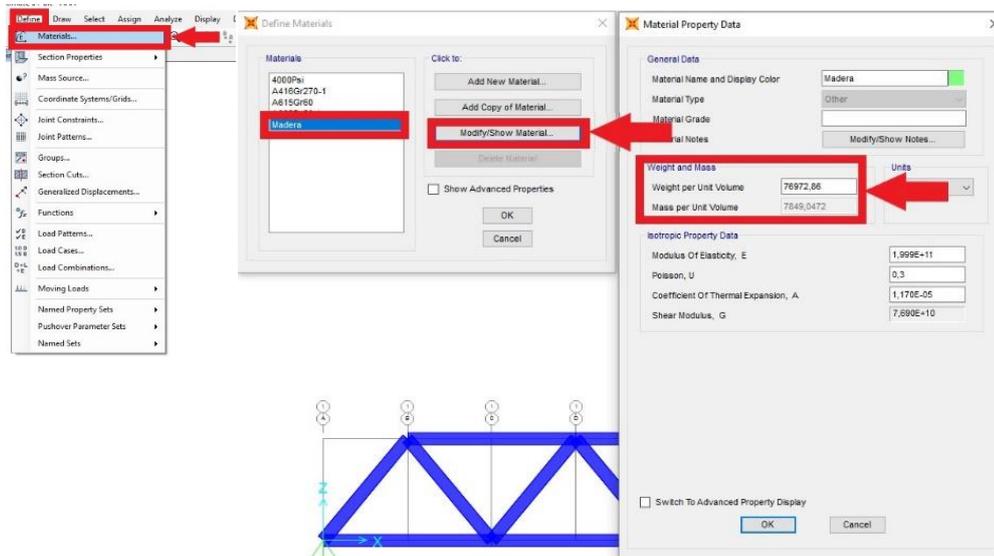


Figura 113: Comprobación de las reacciones en los apoyos.

Con los valores de las reacciones verticales obtenidas procedemos a realizar la modificación de la masa de nuestra estructura para ajustar al de nuestro modelo real. Como se muestra en la *Figura 114* para este cometido nos dirigiremos a la barra de herramientas /**Define/Materials**/ la cual nos mostrará una ventana /**Define Materials**/ en la que deberemos seleccionar el material que queremos modificar haremos clic en /**Modify/Show Material**/ y nos mostrará otra ventana /**Material Property Data**/ en la cual observamos el valor por defecto que nos dio SAP2000 siendo el peso por unidad de volumen de 76.972,86 [N/m³] sabemos que con este valor obtenemos unas reacciones



verticales en los apoyos de valor 17,45 [N] y en total 34,90 [N].

Figura 114: Ventana de propiedades mecánicas del material.

Estableceremos el valor de la masa del puente el cual será fijado por el último ensayo realizado en el capítulo 4, como se muestra en la *Tabla 79* el cual nos da una masa total de 0,7025 [Kg] y un peso total de 6,89 [N], por lo que cada apoyo soportaría la mitad del esfuerzo de valor 3,45 [N].

Con estos valores podremos hacer un cálculo rápido con una simple regla de 3, como se muestra en la *Tabla 80*, por el cual podremos despejar el valor de peso por unidad de volumen requerido.

| Peso por unidad de Volumen [N/m ³] | Reacción Vertical en cada apoyo [N] |
|---|--|
| 76 972,86 | 17,45 |
| X | 3,45 |

Tabla 79: Calculo del valor de masa por unidad de volumen con los datos definidos por defecto.

| Peso por unidad de Volumen [N/m ³] | Densidad [kg/m ³] |
|--|----------------------------------|
| 15 218,13 | 7849,08 |

Tabla 80: Valor del peso por unidad de volumen para el modelo en 2 dimensiones.

Se observa que se obtiene un valor muy alto para un material como la madera, pero esta hipótesis es válida debido a que incluye la mitad del peso del tablero superior e inferior descrito anteriormente como principal hipótesis de la simplificación del modelo.

Con este valor nos dirigimos a */Define/Materials/Define Materials/ /Modify/Show Material/Material Property Data/* en la cual modificaremos el valor de peso por unidad de volumen de al valor calculado previamente de 15.218,13 [N/m³] como se muestra en la *Figura 115*.

Con este valor volvemos a ejecutar el modelo con el procedimiento anteriormente descrito, para comprobar que el valor de las reacciones se ajusta a nuestro modelo real. Como se observa en la *Figura 115* se obtiene el valor esperado para cada apoyo.

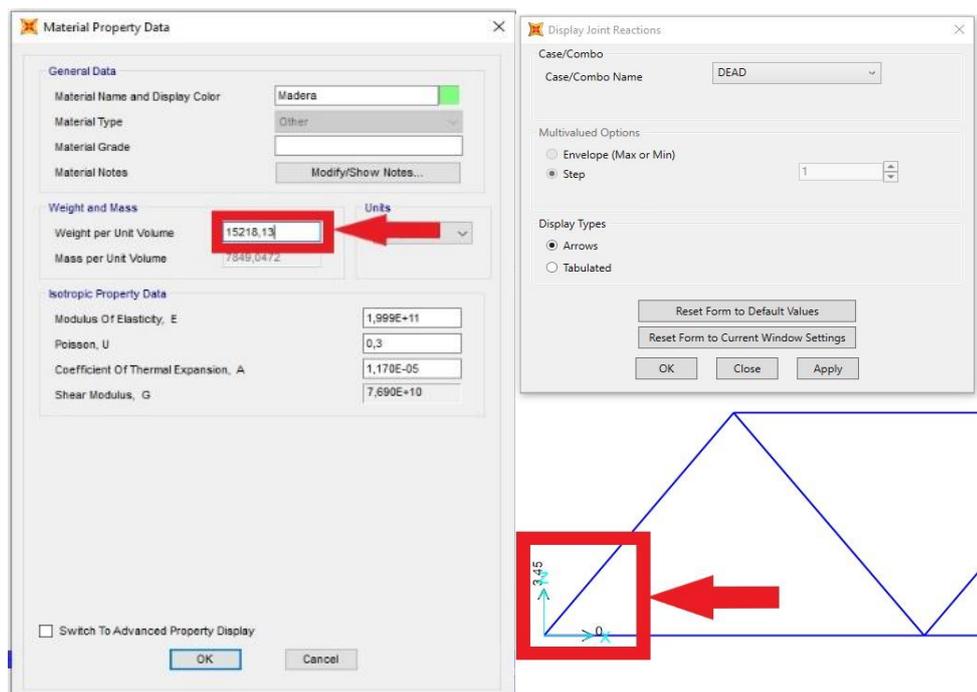


Figura 115: Modificación de la masa por unidad de volumen y comprobación de las reacciones.

Una vez ajustado en el modelo estático procedemos a ajustar el valor del módulo de elasticidad de nuestro modelo para calcular la flecha para cada tipo de carga aplicada en el centro de la celosía.

Para este cometido procedemos a definir los estados de carga que varía en función del número de tuercas que se colocan sobre el puente, como se muestra en la *Figura 116* nos dirigimos a la barra de herramientas a la pestaña de */Define/Load Patterns/* la cual nos mostrará una ventana */Define Load Patterns/* en la cual tendremos que introducir el nombre de la carga en */Load Pattern Name/* el cual definimos como “F”, en */Type/* seleccionamos “Other” y en */Self Weight Multiplier/* colocamos en valor de 1 que establece un factor multiplicativo en tanto por 1 (1 equivale al 100% de la carga). Una vez colocados todos los valores hacemos clic en */Add New Load Pattern/* con lo que se añade el patrón de carga a nuestra lista.

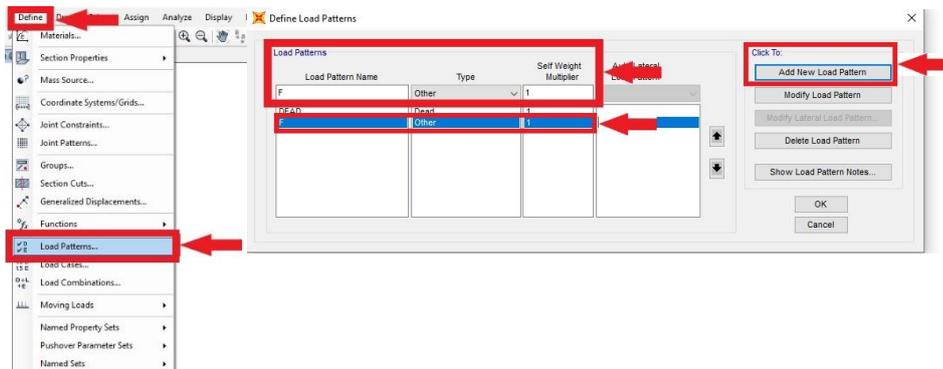


Figura 116: Ventana de definición de los patrones de carga.

A continuación, procedemos a definir casos de carga en los que podemos combinar distintos tipos de carga previamente definidos. En nuestro caso crearemos 6 casos de carga para establecer los 6 estados de carga estudiados en el capítulo 4 y presentados en la *Tabla 74*. Para crear estos casos nos dirigimos a la barra de herramientas */Define/Load Cases/* como se muestra en la *Figura 117*.

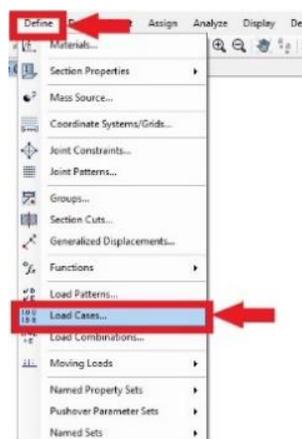


Figura 117: Botón de definición de los casos de carga.

Como se observa en la *Figura 118* se presentará una ventana llamada */Define Load Cases/* en la cual nos presenta las cargas definidas previamente */Load Case/* para definir un caso de carga haremos clic en */Add New Load Case/* que nos presentará otra ventana llamada */Load Case Data/* que se compone de 5 bloques, en el primero */Load Case Name/* deberemos introducir el nombre del caso de carga, en el tercer bloque */Loads Applied/* deberemos seleccionar el tipo de carga que queremos que se añada a este caso de carga, deberemos seleccionar primero */Load Pattern/* en */Load Name/* seleccionaremos el tipo de carga definido previamente que queremos añadir y por último la */Scale Factor/* que es el factor multiplicativo de la carga. Los bloques segundo, cuarto y quinto los dejaremos por defecto. Una vez finalizado todo o expuesto previamente haremos clic en */OK/* y se creará el estado de carga.

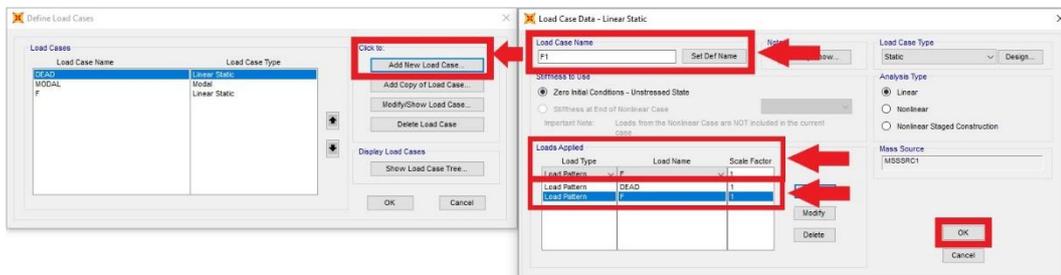


Figura 118: Ventana de configuración de los casos de carga.

Repetimos el proceso hasta definir todos los casos de carga, que para el objetivo de este proyecto se requieren 6, las cuales se presentan en la *Figura 119* llamadas F_X donde X representa el factor multiplicativo de la carga definida previamente como F .

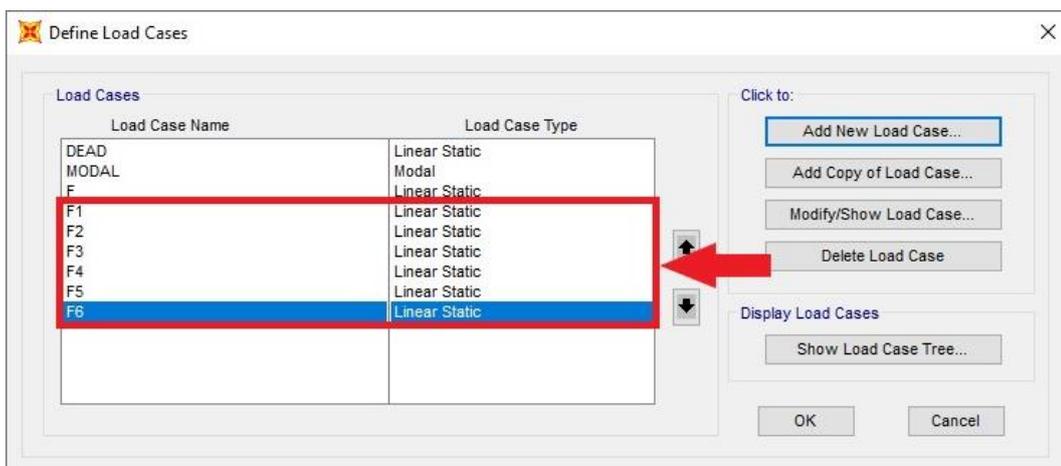


Figura 119: Ventana con todos los casos de carga añadidos.

Seguidamente procederemos a realizar los 6 estados de carga para comparar la flecha obtenida para cada una de ellas presentada en la *Tabla 74* del undécimo ensayo presentado en el capítulo 4.

Para este cometido tendremos que aplicar una carga de valor F en el medio de la estructura como se realizó en los ensayos reales del capítulo 4. Para seleccionar el punto de aplicación de la carga como se muestra en la *Figura 120* nos dirigimos a la barra de herramientas a la pestaña de */Select/Select/Pointer/Window/* y nos dirigimos al punto que queremos seleccionar que en este caso es el punto medio de la estructura se nos presentará una "X" en forma de línea blanca discontinua.

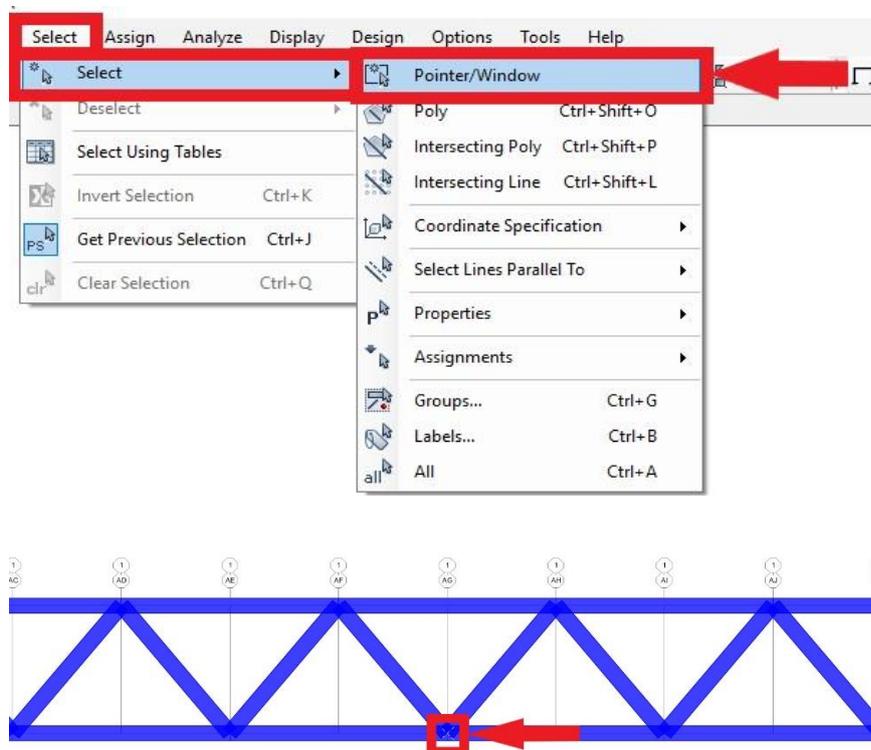


Figura 120: Selección del punto de carga en la sección media.

Con el punto seleccionado procedemos a asignar el tipo de carga que queremos para ese punto, para este cometido como se muestra en la *Figura 121* nos dirigimos a la barra de herramientas a la pestaña de */Assign/Joint Loads/Forces/*.

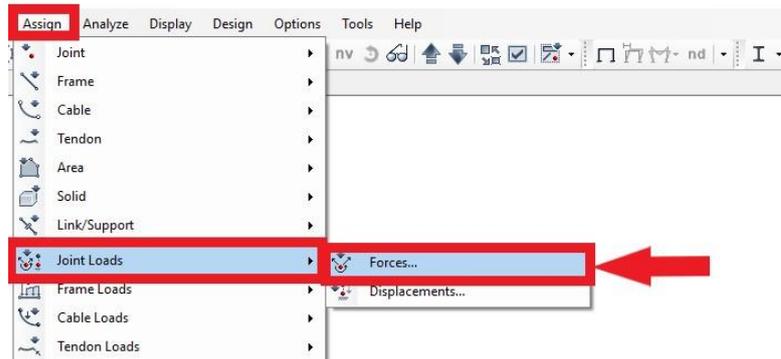


Figura 121: Botón de asignación de cargas como fuerzas.

Se nos presentará una ventana como la que se muestra en la *Figura 122* llamada */Assign Joint Forces/* la cual presenta 3 bloques, en el primero bloque */General/* debemos seleccionar el tipo de carga a asignar que en este caso en la definida previamente con F, en el segundo bloque */Forces/* se nos presenta los 2 tipos de esfuerzos que podemos asignar que son la Fuerza en los 3 ejes y el Momento en los 3 ejes, para nuestro caso de estudio procedemos a asignar una fuerza de valor -3,22 [N] en el eje “Z” con valor negativo para indicar que la dirección de la fuerza es hacia abajo. Una vez asignado el tipo de carga y el valor daremos a aplicar y aparecerá la carga creada en forma de vector con su dirección y magnitud.

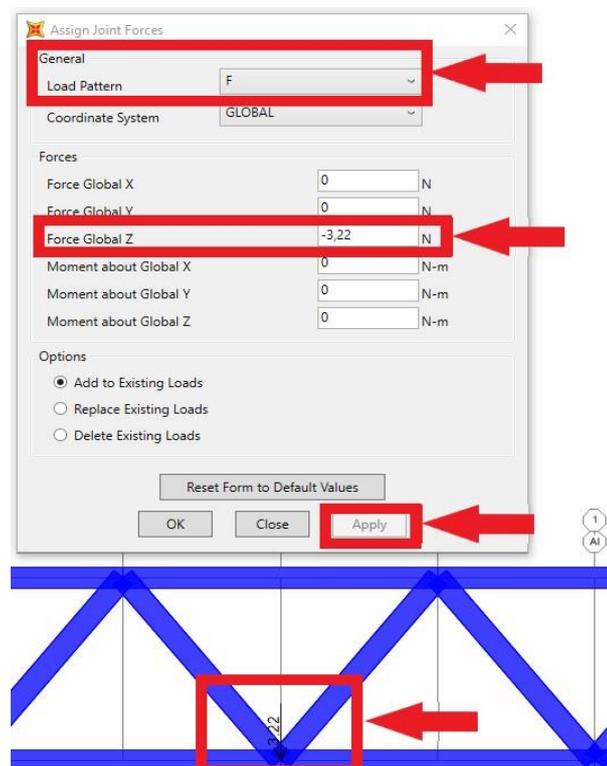


Figura 122: Asignación de la magnitud de la fuerza en el punto central y su representación.

Con la carga establecida en el punto deseado podemos iniciar la simulación de los distintos estados de carga, para esto nos dirigimos a la barra de herramientas para hacer clic en **/Run Analysis/** el cual nos presentará una ventana como se muestra en la *Figura 123*. En la cual solo habilitaremos los casos que queremos estudiar, para el primer ensayo solo seleccionamos el caso de carga previamente definido como F1 el cual combinada la carga del peso propio (DEAD) y la carga de una fuerza (F) para lo cual haremos clic en **/Run/Do Not Run Case/** y seguidamente iniciar la simulación dando clic en **/Run Now/**.

Con la simulación iniciado deberemos colocar el cursor sobre el punto del que requerimos los datos que para este proyecto es el punto intermedio denominado punto 33 el cual nos arroja el valor de la flecha en ese punto con un valor de 6×10^{-4} m.

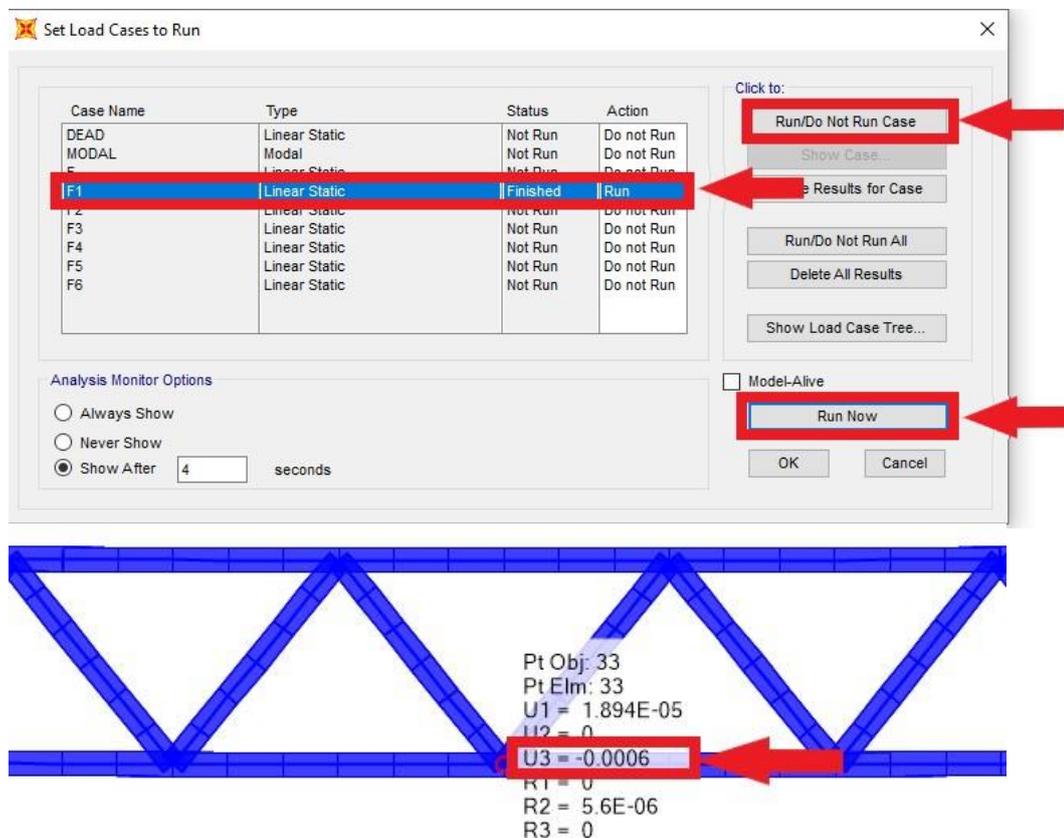


Figura 123: Flecha obtenida con la simulación del caso F1.

Con el valor obtenido en la simulación del modelo procedemos a compararlo con el valor de flecha obtenido experimentalmente en el undécimo experimento presentado en el capítulo 4 y presentado en la *Tabla 81*. Con estos valores procedemos a ajustar el módulo de elasticidad (E) que dejamos con el valor por defecto como se muestra en la *Figura 124*.

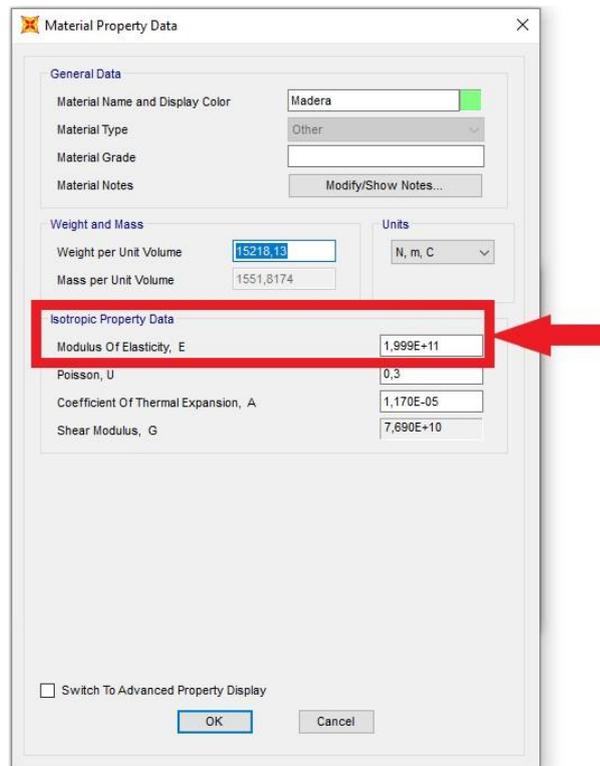


Figura 124: Valor predeterminado del módulo de elasticidad en SAP 2000.

| Modelo | Modulo Elástico (E) [Pa] | Flecha Obtenida [m] |
|--------------|-----------------------------|------------------------|
| Simulado | $1,999 \times 10^{11}$ | 6×10^{-4} |
| Experimental | X | 36×10^{-4} |

Tabla 81: Valores para calcular el módulo de elasticidad en el modelo de 2 dimensiones.

Para ajustar este valor tendremos que hacerlo por aproximación de prueba y error debido a que el módulo de elasticidad en una estructura en celosía no tiene una relación directa con la flecha que esta presenta.

Ajustando el módulo de elasticidad (E) del modelo para tratar de ajustar los valores experimentales del undécimo ensayo presentados en la *Tabla 82* se obtuvo un valor de:

| Modelo | Modulo Elástico (E) [Pa] | Flecha Obtenida [m] |
|--------------|-----------------------------|------------------------|
| Experimental | $2,440 \times 10^{10}$ | 204×10^{-4} |

Tabla 82: Valor de modulo elástico en el modelo de 2 dimensiones.

Una vez ajustado el módulo de elasticidad se procede a comprobar la flecha en el punto medio para los distintos casos de carga definidos previamente.

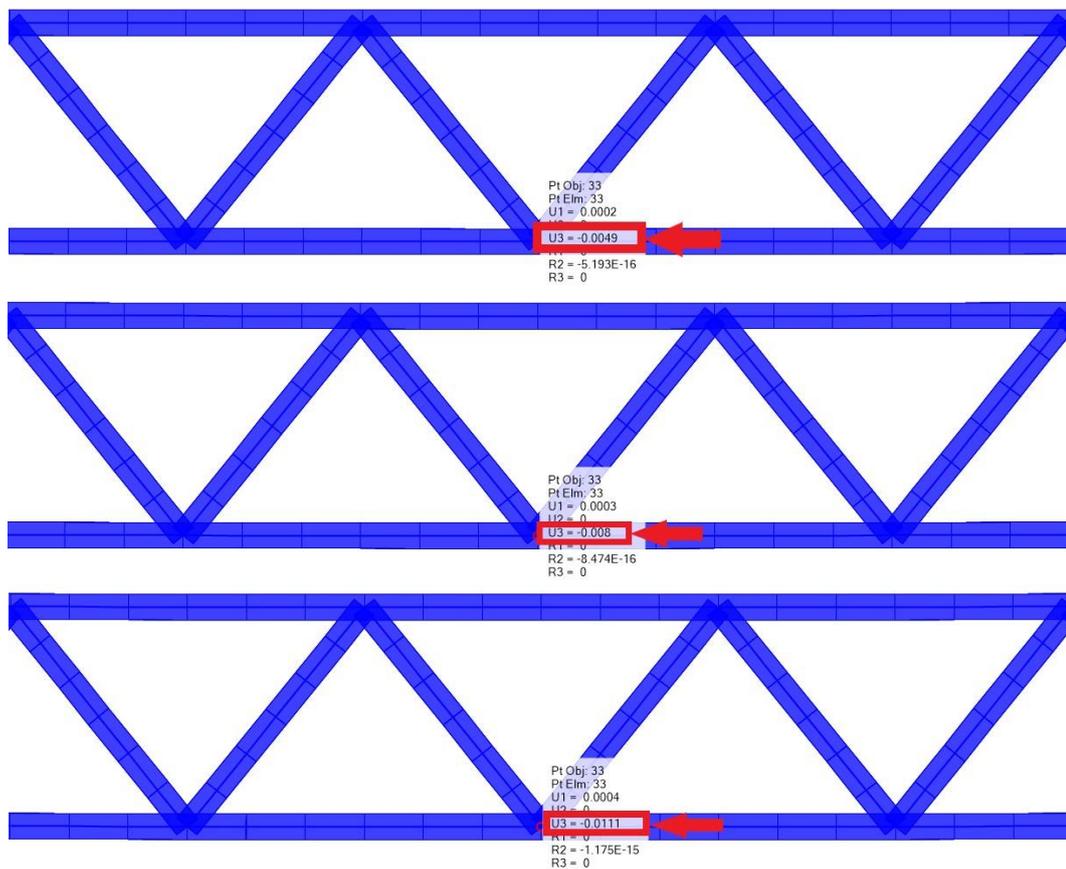


Figura 125: Valores de flecha obtenidas en el modelo de 2 dimensiones para el caso de 1,2 y 3 tuercas.

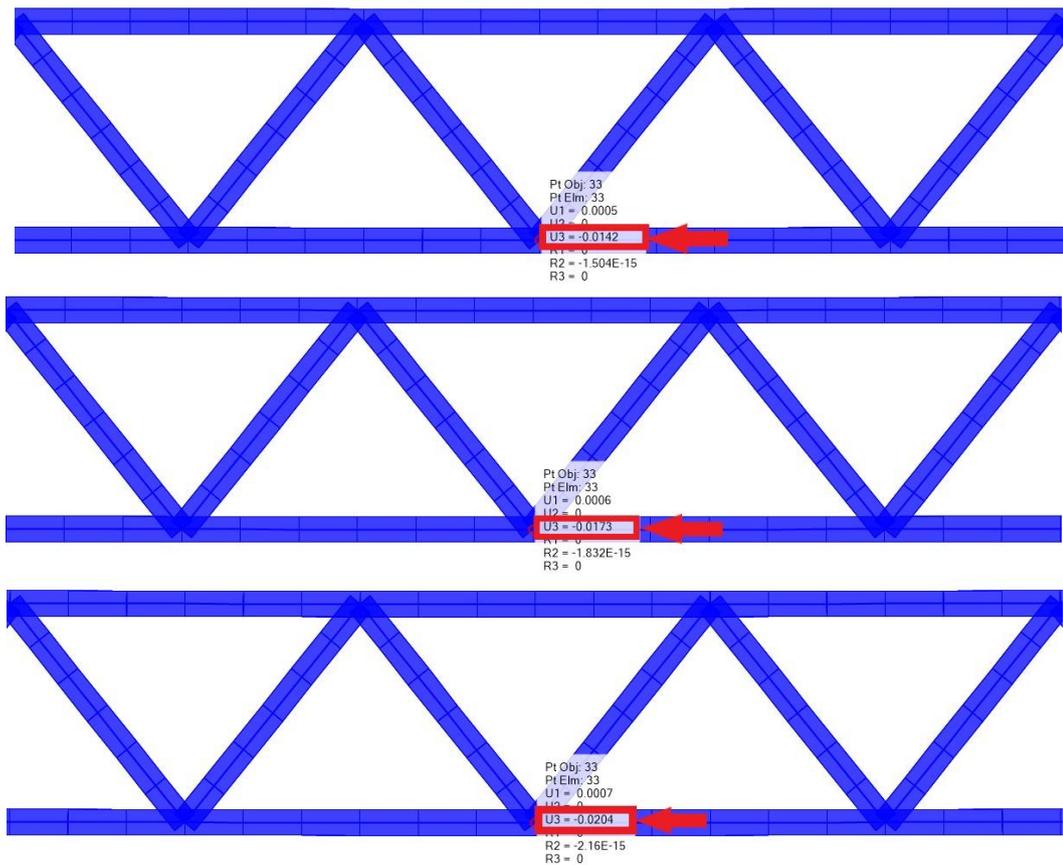


Figura 126: Valores de flecha obtenidas en el modelo de 2 dimensiones para el caso de 4,5 y 6 tuercas.

Como se observa en las *Figura 125* y *Figura 126* obtenemos los valores de la flecha en el punto medio del modelo simplificado 2D, obteniendo así la *Tabla 83* donde se procede a comparar los valores del modelo experimental y el modelo simulado.

| N.º Tuercas | F_i [N] | δ_i Experimental [m] | δ_i Modelo 2D [m] |
|-------------|-----------|-----------------------------|--------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3,22 | 36×10^{-4} | 49×10^{-4} |
| 2 | 6,44 | 71×10^{-4} | 80×10^{-4} |
| 3 | 9,65 | 106×10^{-4} | 111×10^{-4} |
| 4 | 12,87 | 141×10^{-4} | 142×10^{-4} |
| 5 | 16,09 | 174×10^{-4} | 173×10^{-4} |
| 6 | 19,31 | 204×10^{-4} | 204×10^{-4} |

Tabla 83: Comparación de los valores de flecha obtenidos en el undécimo ensayo y el modelo en 2 dimensiones.

5.5.2 Simplificación del Modelo en 3 dimensiones.

A continuación, procedemos a modelar la estructura en las 3 dimensiones, para comprobar los valores hallados en el modelo simplificado 2D y comprobar si la simplificación anterior es válida a la hora de modelar parámetros.

Para este cometido tendremos que modificar algunos parámetros del mallado en el cual tendremos que añadir una línea en nuestra cuadrícula definida previamente, para esto haremos clic derecho /**Edit Grid Data/Modify/Show System/** el cual nos mostrará una ventana como la que se muestra en la *Figura 127* en la que tendremos que añadir una línea en el eje “Y”, teniendo en cuenta siempre que las distancias que todo SAP 2000 son siempre la de las líneas medias de las secciones.

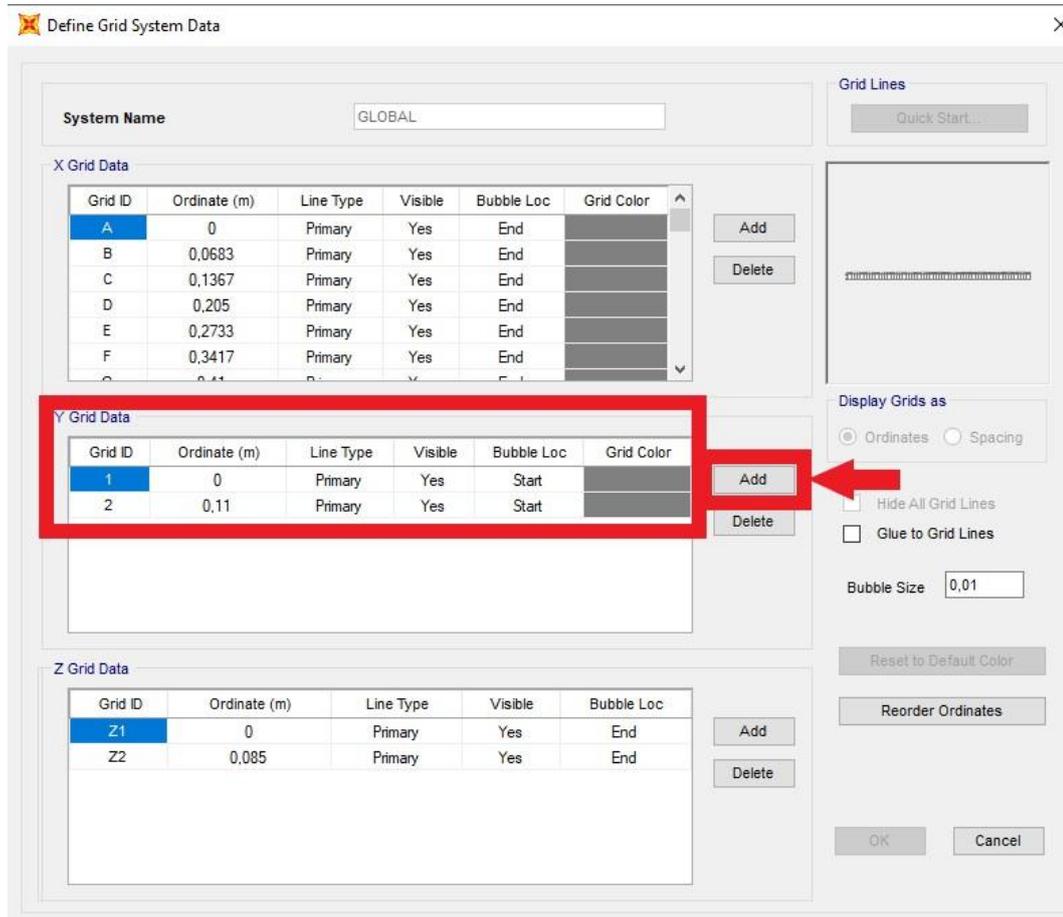


Figura 127: Ventana de características de mallado.

El cual nos mostrará el nuevo mallado como se muestra en la *Figura 128*, como se observa ahora tendremos un mallado para realizar una estructura en 3 dimensiones.

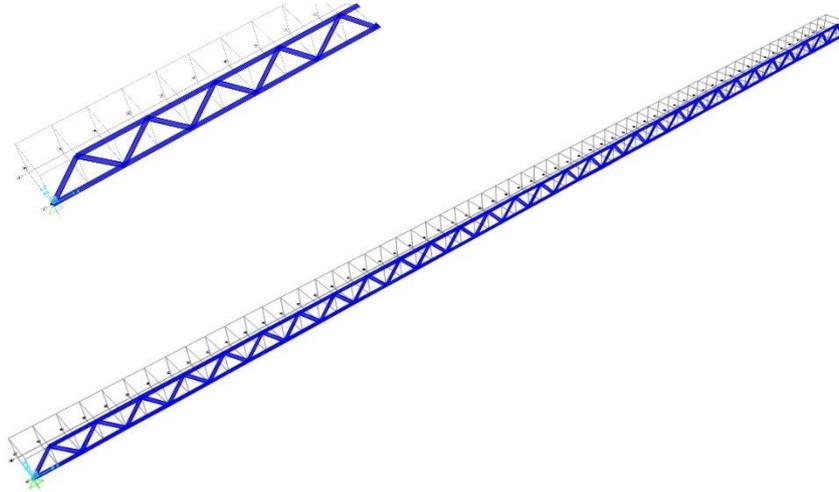


Figura 128: Malla modificada para el modelo de 3 dimensiones.

Una vez establecido el mallado en 3 dimensiones procedemos a dibujar la estructura como se explicó en el apartado anterior, tendremos que crear una celosía paralela a la existente con las mismas características y unas diagonales para los tableros superior e inferior como se muestra en la *Figura 129*.

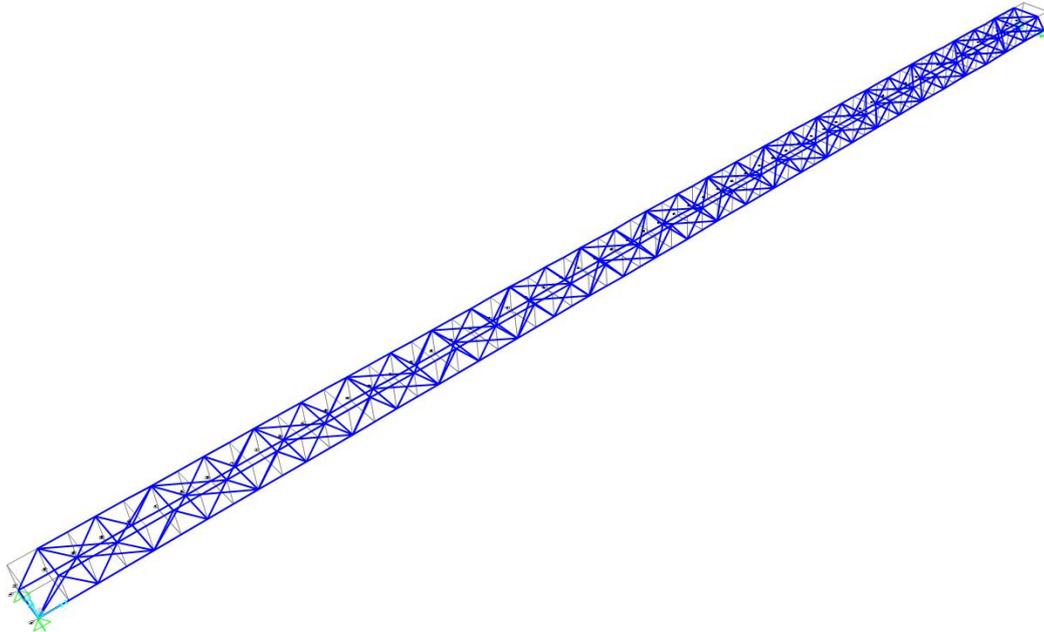


Figura 129: Estructura dibujada en 3 dimensiones.

Con la estructura ya dibujada, deberemos definir las secciones como se hizo en el apartado anterior. Las los celosías laterales comparten las mismas características es decir los cordones con el tipo de sección 2 (doble espesor) y las diagonales con tipo de sección 1 (espesor simple) definidas previamente en el apartado anterior.

Ahora tendremos que definir un nuevo tipo de sección para las diagonales de los tableros superior e inferior las cuales son como las de sección tipo 1 es decir espesor simple con la única modificación que tendremos que intercambiar de posición el canto y sección debido a que estas barras tienen una disposición horizontal contraria al resto de la estructura que denominaremos Sección 3. Para este cometido nos dirigimos a **/Frame Properties/** en la cual haremos clic en la opción **/Add New Property/** debido a que no tenemos un perfil normalizado, en el tipo de sección seleccionaremos **/Rectangular/**. Nos mostrará una ventana como la que se muestra en la **Figura 130** en la que deberemos introducir las características de la sección, como se explicó en el apartado anterior.

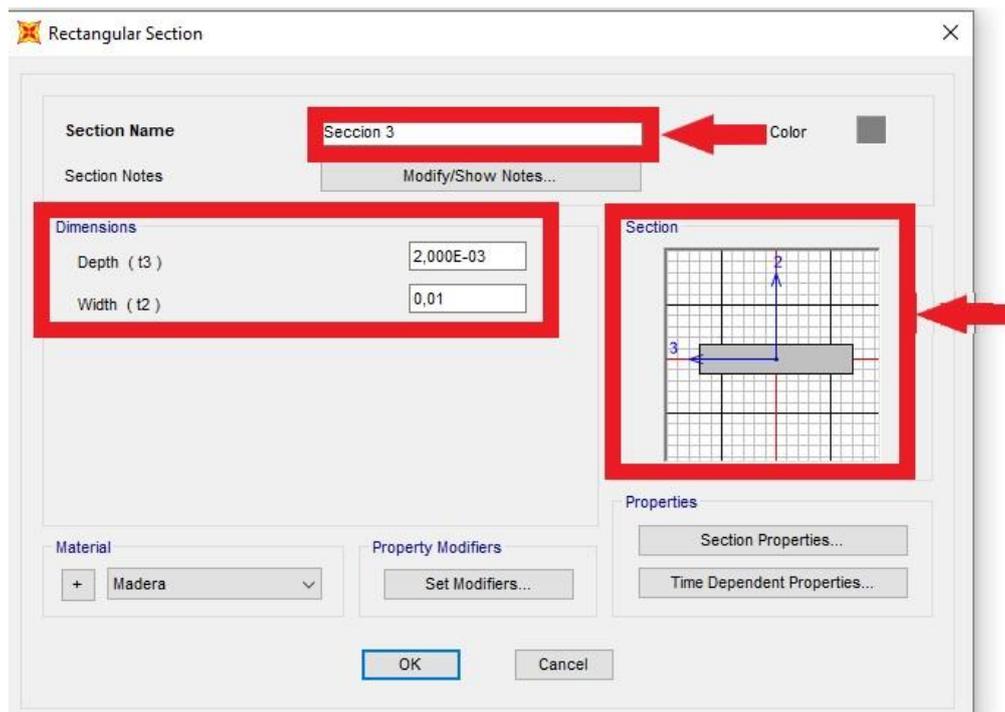


Figura 130: Definición de la sección para las diagonales del tablero superior e inferior.

Una vez definida las secciones de la estructura con la geometría que le corresponde realizamos una comprobación de orientación de los perfiles, para comprobar la orientación de las secciones seleccionaremos en la barra de herramientas la pestaña */Display Options/General Options/View Type /Extrude/* como se muestra en la *Figura 131*, se comprueba que esta correctamente orientadas las secciones tanto de los cordones superior e inferior como el de las diagonales tanto laterales como las superiores e inferiores que tienen una orientación distinta.

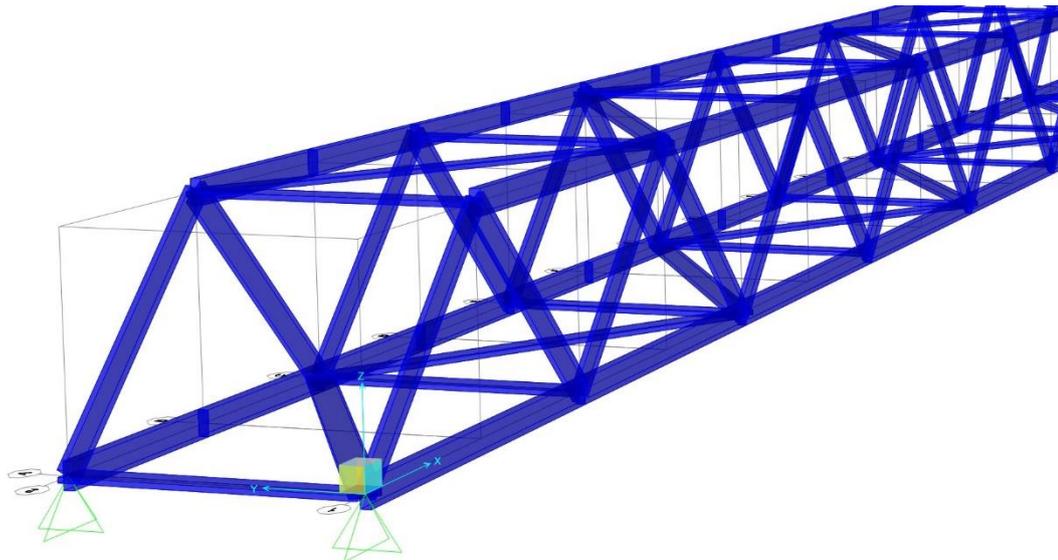


Figura 131: Extrusión para la comprobación de la orientación de las secciones en 3 dimensiones.

Con la estructura verificada procedemos a realizar el ajuste de la densidad del material para realizar el cálculo estático de reacción en los apoyos, cabe destacar que en una estructura de 3 dimensiones las reacciones no son iguales en todos los apoyos por lo que tendremos que realizar una equivalencia con la suma de todas las reacciones.

A diferencia del modelo simplificado en 2 dimensiones tendremos que realizar el ajuste con toda la masa del puente, como establecimos en el apartado anterior el valor de la masa del puente el cual será fijado por el undécimo ensayo realizado en el capítulo 4, como se muestra en la *Tabla 73* el cual nos da una masa total de 0,7025 [Kg] y un peso total de 6,89 [N], por lo que el sumatorio de las reacciones de los apoyos no tendría que dar este valor.

Como se realizó en el apartado anterior se procede a realizar el ajuste para el cual obtenemos una densidad y un peso por unidad de volumen como el que se muestra en la *Figura 132* y presentados en la *Tabla 84*. El cual nos da el valor esperado de reacción en los apoyos que sumados nos da un valor de 6,89 [N].

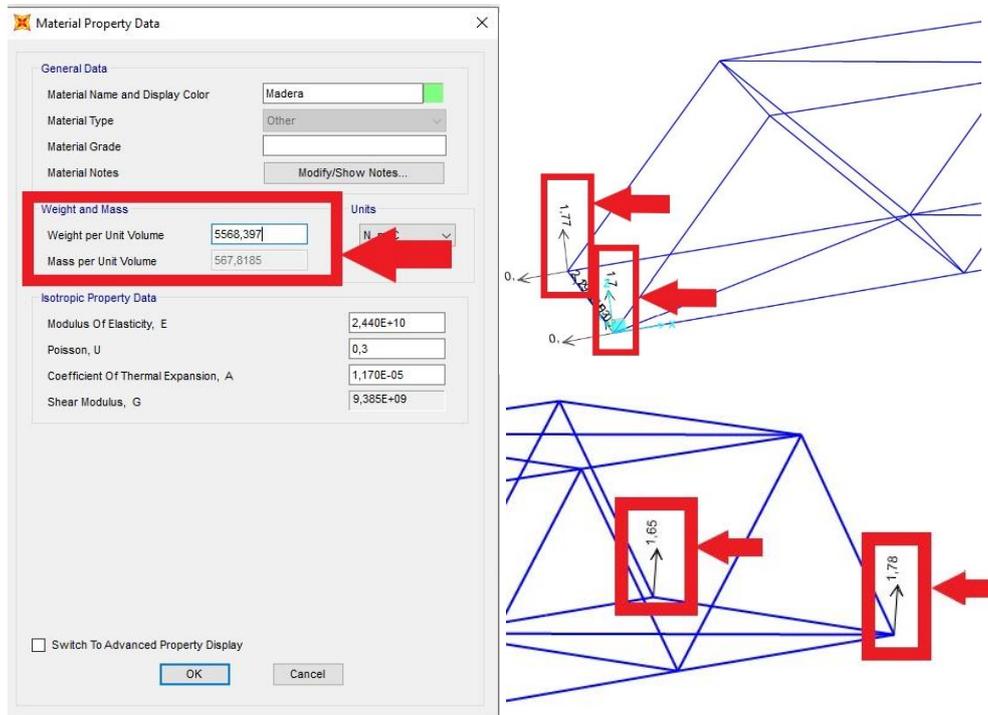


Figura 132: Modificación del valor de peso por unidad de volumen y comprobación de las reacciones.

| Peso por unidad de Volumen [N/m ³] | Densidad [kg/m ³] |
|---|----------------------------------|
| 5568,40 | 567,82 |

Tabla 84: Valores del peso por unidad de volumen y densidad para el modelo de 3 dimensiones.

Seguidamente procederemos a realizar los 6 estados de carga, como se realizó en modelo simplificado en 2 dimensiones tendremos que definir la carga de una tuerca con valor 3,22 [N] que en este caso al ser un modelo tridimensional se dividirá por partes igual en los puntos medios de ambas celosías y les corresponderá una carga de 1,61 [N], con los puntos seleccionados procedemos a asignar el tipo de carga que queremos para estos puntos, para este cometido como se muestra en la *Figura 133* nos dirigimos a la barra de herramientas a la pestaña de **/Assign/ Joint Loads/ Forces/**.

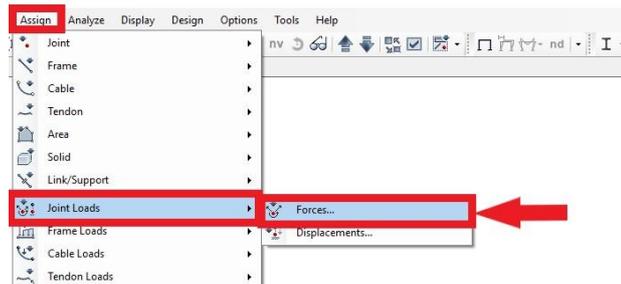


Figura 133: Botón de asignación de cargas como fuerzas.

Se nos presentará una ventana como la que se muestra en la *Figura 134* llamada **/Assign Joint Forces/** en el segundo bloque **/Forces/** se nos presenta los 2 tipos de esfuerzos que podemos asignar que son la Fuerza en los 3 ejes y el Momento en los 3 ejes, para nuestro caso de estudio procedemos a asignar una fuerza de valor -1,61 [N] en el eje “Z” con valor negativo para indicar que la dirección de la fuerza es hacia abajo. Una vez asignado el tipo de carga y el valor daremos a aplicar y aparecerá la carga creada en forma de vector con su dirección y magnitud.

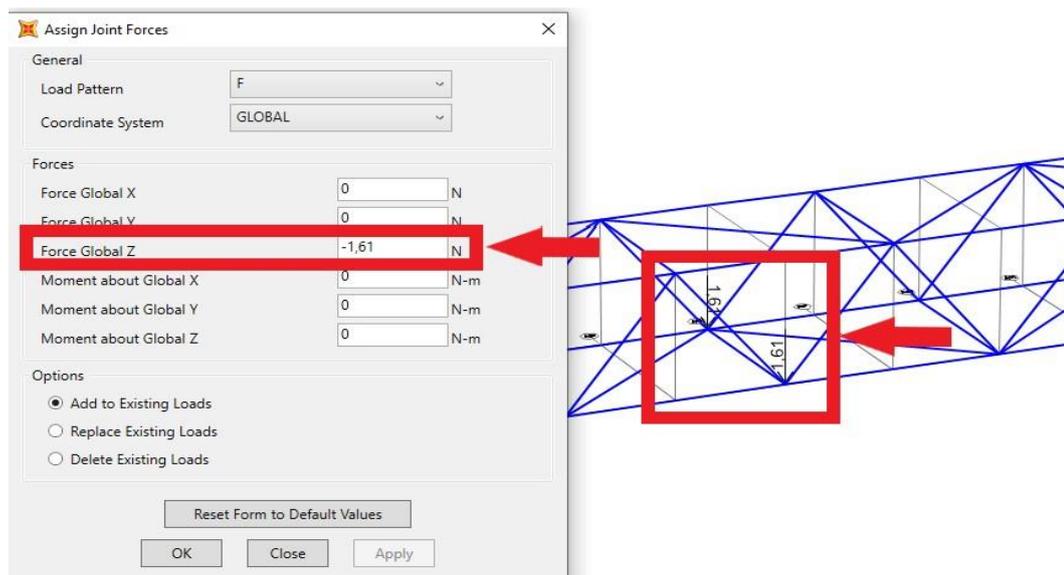


Figura 134: Aplicación de la carga distribuida por igual en las 2 secciones centrales de las celosías.

Con la carga establecida en los puntos deseado podemos iniciar la simulación de los distintos estados de carga, para esto nos dirigimos a la barra de herramientas para hacer clic en **/Run Analysis/** el cual nos presentará una ventana como se muestra en la *Figura 135*. En la cual solo habilitaremos los casos que queremos estudiar, para el primer ensayo solo seleccionamos el caso de carga previamente definido como F1 el cual combinada la carga del peso propio (DEAD) y la carga de una fuerza (F) para lo cual haremos clic en **/Run/Do Not Run Case/** y seguidamente iniciar la simulación dando clic en **/Run Now/**.

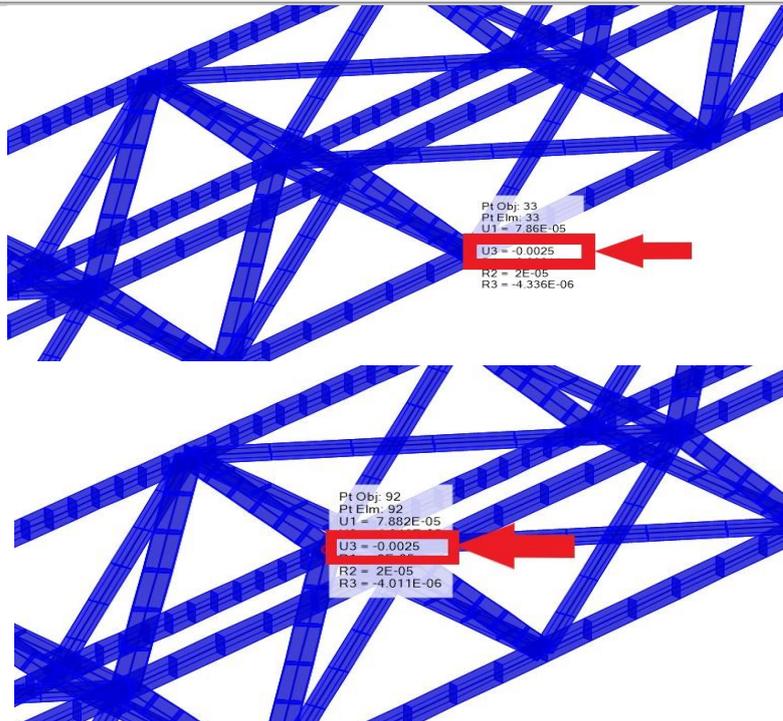
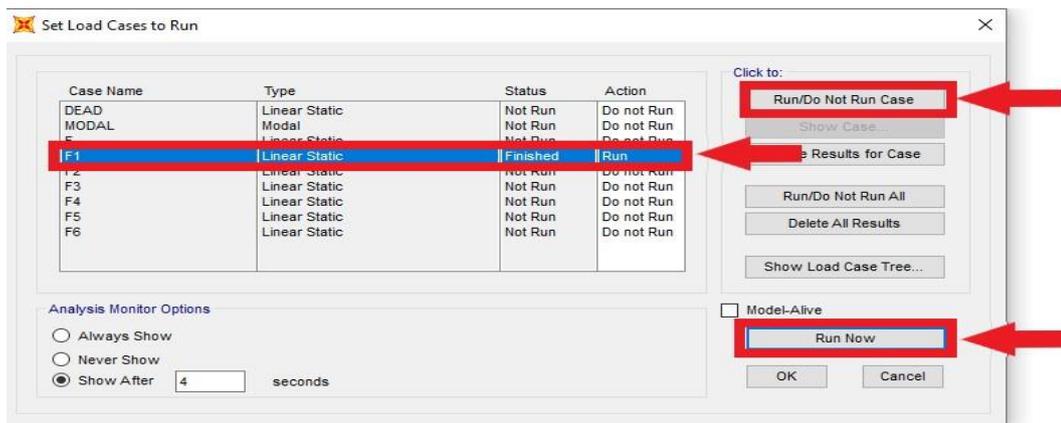


Figura 135: Simulación de caso de 1 tuerca y comprobación de la flecha en la sección central en el modelo de 3 dimensiones.

Con la simulación iniciada deberemos colocar el cursor sobre el punto del que requerimos los datos que para este proyecto son los puntos intermedios denominados punto 33 y 92 puntos que nos da el valor de la flecha en esos puntos con un valor de 0,0025 m.

Partiendo del valor de módulo de elasticidad definido en el modelo de 2 dimensiones mostrado en la *Figura 136* se realizó el ajuste.

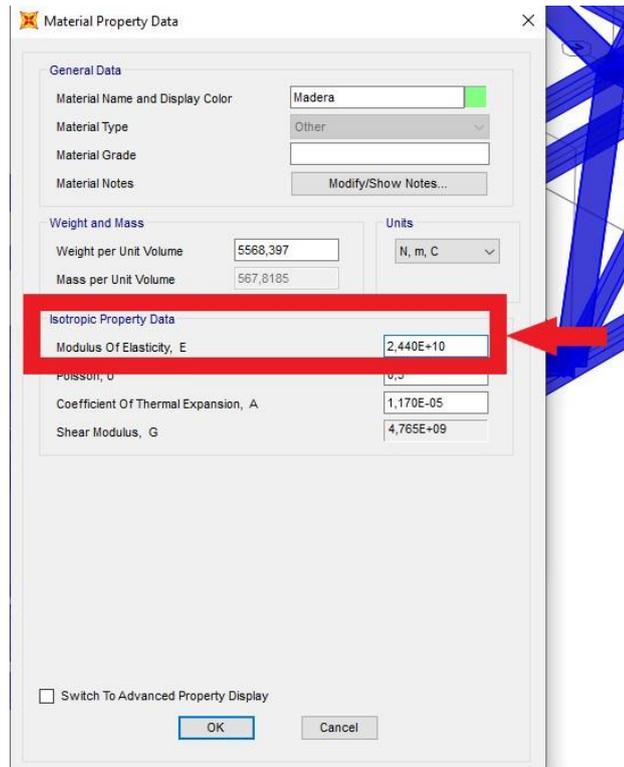


Figura 136: Valor del módulo de elasticidad predefinido por el modelo de 2 dimensiones.

Como se muestra en la *Tabla 85* buscaré un valor que nos aproxime el valor de la flecha obtenida experimentalmente.

| Modelo | Modulo Elástico (E) [Pa] | Flecha Obtenida [m] |
|--------------|-----------------------------|------------------------|
| Simulado | 2,440x10 ¹⁰ | 25x10 ⁻⁴ |
| Experimental | X | 36x10 ⁻⁴ |

Tabla 85: Valores de flecha para calcular el valor del módulo de elasticidad para el modelo en 3 dimensiones.

Para ajustar este valor tendremos que hacerlo por aproximación de prueba y error debido a que el módulo de elasticidad en una estructura en celosía no tiene una relación directa con la flecha que esta presenta.

Ajustando el módulo de elasticidad (E) del modelo para tratar de ajustar los valores experimentales del undécimo ensayo presentados en la *Tabla 86* se obtuvo un valor de:

| Modelo | Modulo Elástico (E) [Pa] | Flecha Obtenida [m] |
|--------------|---------------------------------|------------------------|
| Experimental | $1,239 \times 10^{10}$ | 204×10^{-4} |

Tabla 86: Valor del módulo de elasticidad obtenido para el modelo en 3 dimensiones.

Una vez ajustado el módulo de elasticidad se procede a comprobar la flecha en el punto medio para los distintos casos de carga definidos previamente.

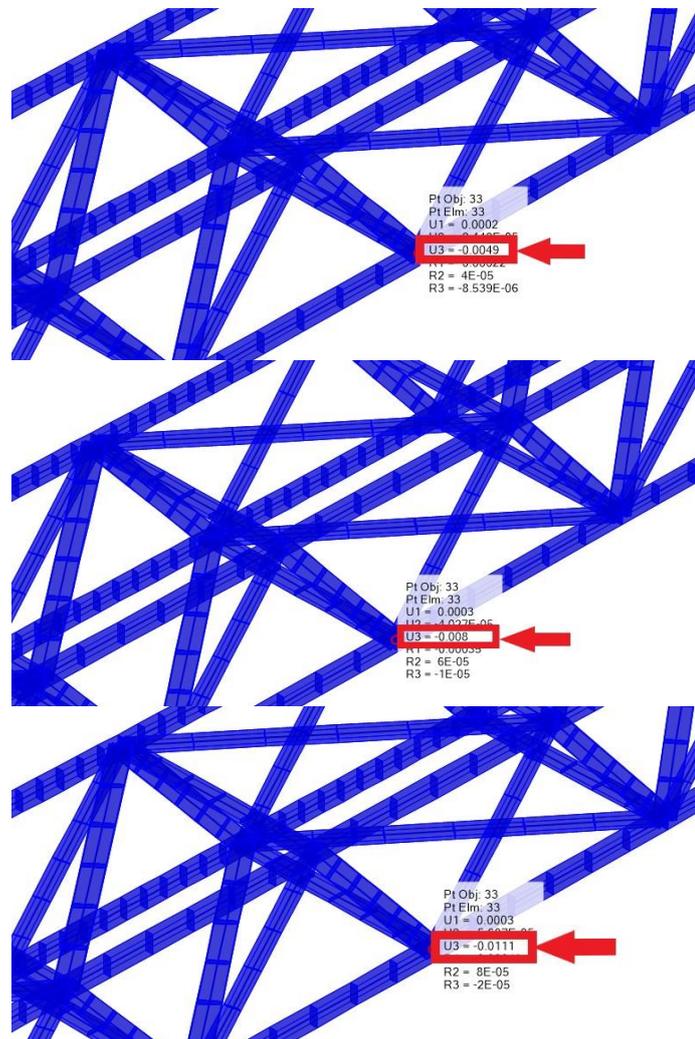


Figura 137: Valores de flecha obtenidos en el modelo de 3 dimensiones para el caso de 1,2 y 3 tuercas.

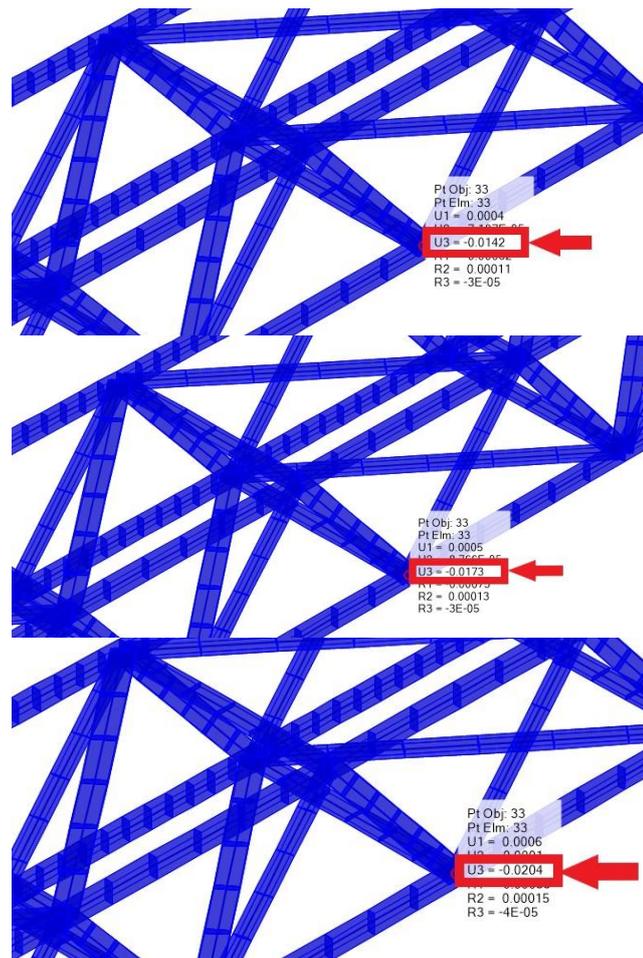


Figura 138: Valores de flecha obtenidos en el modelo de 3 dimensiones para el caso de 4,5 y 6 tuercas.

Como se observa en las *Figura 137* y *Figura 138* obtenemos los valores de la flecha en el punto medio del modelo 3D, obteniendo así la *Tabla 87* donde se procede a comparar los valores del modelo experimental y el modelo simulado.

| N.º Tuercas | F_i [N] | δ_i Experimental [m] | δ_i Modelo 3D [m] |
|-------------|--------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3,22 | 36×10^{-4} | 49×10^{-4} |
| 2 | 6,44 | 71×10^{-4} | 80×10^{-4} |
| 3 | 9,65 | 106×10^{-4} | 111×10^{-4} |
| 4 | 12,87 | 141×10^{-4} | 142×10^{-4} |
| 5 | 16,09 | 174×10^{-4} | 173×10^{-4} |
| 6 | 19,31 | 204×10^{-4} | 204×10^{-4} |

Tabla 87: Comparación de los valores de flecha obtenidos en el undécimo ensayo y el modelo en 3 dimensiones.

5.5.3 Comparación de los modelos simplificados.

A continuación, se presenta los resultados obtenidos en el capítulo de simulación de los modelos tanto simplificado en 2 Dimensiones y el modelo real en 3 Dimensiones como se muestra en la *Tabla 88*.

| Modelo simplificado | Modulo Elástico (E) [Pa] | Peso por unidad de Volumen [N/m ³] | Densidad [kg/m ³] |
|---------------------|--------------------------|--|-------------------------------|
| 2-D | 2,440x10 ¹⁰ | 15 218,13 | 1551,82 |
| 3-D | 1,239 x10 ¹⁰ | 5568,39 | 567,82 |

Tabla 88: Valores de las propiedades mecánicas obtenidas para el modelo de 2 y 3 dimensiones.

Se observa que para el modelo simulado en 3 dimensiones se obtienen unos valores coherentes del módulo de elasticidad (E) y una densidad que está dentro de un rango aceptable para el material estudiado (conjunto madera y pegamento).

En la *Tabla 89* se muestra los valores de flecha obtenido a partir de los valores establecidos y mostrado en la *Tabla 88* anteriormente presentada, en los cuales se compara ambos modelos simulados con los valores obtenidos experimentalmente en el undécimo ensayo. Para lo cual se ajustó el valor para la mayor flecha presentada en el caso que el puente está cargado con 6 tuercas.

Se observa que la flecha no se ajusta con precisión en todos los casos, pero el orden de variación es del orden de las décimas de milímetro por lo que se puede dar por válida esta simulación.

| N.º de Tuercas | F _i [N] | δ _i Experimental [m] | δ _i Modelo 2D [m] | δ _i Modelo 3D [m] |
|----------------|--------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3,22 | 36 x10 ⁻⁴ | 49 x10 ⁻⁴ | 49 x10 ⁻⁴ |
| 2 | 6,44 | 71 x10 ⁻⁴ | 80 x10 ⁻⁴ | 80 x10 ⁻⁴ |
| 3 | 9,65 | 106 x10 ⁻⁴ | 111 x10 ⁻⁴ | 111 x10 ⁻⁴ |
| 4 | 12,87 | 141 x10 ⁻⁴ | 142 x10 ⁻⁴ | 142 x10 ⁻⁴ |
| 5 | 16,09 | 174 x10 ⁻⁴ | 173 x10 ⁻⁴ | 173 x10 ⁻⁴ |
| 6 | 19,31 | 204 x10 ⁻⁴ | 204 x10 ⁻⁴ | 204 x10 ⁻⁴ |

Tabla 89: Comparación de los valores de flecha obtenidos en el undécimo ensayo los obtenidos en la simulación de los modelos de 2 y 3 dimensiones.

Capítulo 6

Conclusiones y Líneas de Futuro

En este capítulo se presentará los resultados obtenidos en todos los ensayos llevados a cabo durante el desarrollo de este TFG, así como la exposición de los objetivos cumplidos.

Se comentarán los valores obtenidos, las posibles causas que a estos afecta y cómo desarrollar estudios en posibles líneas futuras de investigación.

6.1 Objetivos.

Los objetivos propuestos en el capítulo 1 para el desarrollo de este TFG se exponen a continuación:

El objetivo de desarrollar el prototipado de la estructura se cumplió en todos los casos, primero con la realización de los 2 puentes mellizos planteados inicialmente para realizar el desarrollo de este TFG, así como la posterior unión que dio la obtención de la estructura final expuesta en el capítulo 3 con la que se realizaron los estudios para este TFG.

Se ha cumplido el objetivo de crear una guía para que futuros estudiantes puedan realizar este tipo de estudio en todo tipo de estructuras, el procesamiento de los datos en Matlab, como el modelado de estructuras en SAP 2000.

Se consiguió el objetivo de modelar la estructura en SAP 2000, se realizó para dos casos, primero en la simplificación del modelo en 2 dimensiones y posteriormente el modelo en 3 dimensiones para así obtener los parámetros establecidos por el modelo experimental y compararlos.

El objetivo de caracterizar el material utilizado (madera + pegamento) en la experimentación se consiguió mediante el ajuste del modelo en SAP 2000 consiguiendo valores lógicos para las características mecánicas del material a ensayar expuestos en el capítulo 5 en los que obtuvieron la densidad del material como el módulo de elasticidad de la estructura.



6.2 Conclusiones.

Este apartado presentará los valores obtenidos durante la fase de experimentación presentada en el capítulo 4 y llevada a cabo durante el desarrollo de este TFG.

Este apartado cobra principal importancia debido a que representa el objetivo principal de investigación y desarrollo de este TFG el cual pretende caracterizar las propiedades mecánicas, las frecuencias propias de la estructura y los coeficientes de amortiguamiento del material (Madera y Pegamento) medido como conjunto y que por el cual no podremos aislar conclusiones de dependencias de las propiedades de la madera con la temperatura y humedad como era uno de los objetivos.

6.2.1 Condiciones Ambientales y Humedad en los ensayos.

En este apartado se presenta en la *Tabla 90* las condiciones ambientales y de humedad a la hora de realizar los ensayos que posteriormente nos servirán para establecer una relación con los datos obtenidos, presentándose así las variables más importantes durante los ensayos.

| N.º de Ensayo | Temperatura [°C] | Humedad Relativa | Humedad Madera | Masa Puente [Kg] |
|---------------|------------------|------------------|----------------|------------------|
| 1er Ensayo | 19,5 | 39 % | 0 % | 0,7025 |
| 2do Ensayo | 21,4 | 33 % | 61 % | 0,7399 |
| 3er Ensayo | 21,6 | 33 % | 54 % | 0,7379 |
| 4to Ensayo | 21,6 | 33 % | 52 % | 0,7353 |
| 5to Ensayo | 19,9 | 32 % | 4 % | 0,7167 |
| 6to Ensayo | 19,9 | 43 % | 60,6 % | 0,7389 |
| 7mo Ensayo | 19,9 | 44 % | 54,6 % | 0,7339 |
| 8vo Ensayo | 19,8 | 42 % | 51,2 % | 0,7286 |
| 9no Ensayo | 19,8 | 41 % | 45,6 % | 0,7274 |
| 10mo Ensayo | 13,9 | 39 % | 1,5 % | 0,7254 |
| 11mo Ensayo | 21,2 | 35 % | 1,5 % | 0,7025 |

Tabla 90: Condiciones ambientales y masa del puente en todos los ensayos.

6.2.2 Constate de Rigidez de la estructura.

A continuación, se presenta una *Tabla 91* con todos los valores obtenidos durante los 11 ensayos realizados.

| Ensayo | Constante de rigidez del puente [K] | Condiciones Ambientales y Humedad |
|-------------|-------------------------------------|---|
| 1er Ensayo | 1.239,10 [N/m] | T ^{ra} Ambiente 20 °C Humedad Madera 0% |
| 2do Ensayo | 943,95 [N/m] | Humedad Madera 61% |
| 3er Ensayo | 960,83 [N/m] | Humedad Madera 54% |
| 4to Ensayo | 962,75 [N/m] | Humedad Madera 52% |
| 5to Ensayo | 943,66 [N/m] | Humedad Madera 4% |
| 6to Ensayo | 942,60 [N/m] | Humedad Madera 61% |
| 7mo Ensayo | 930,88 [N/m] | Humedad Madera 54% |
| 8vo Ensayo | 959,53 [N/m] | Humedad Madera 51% |
| 9no Ensayo | 966,79 [N/m] | Humedad Madera 47% |
| 10mo Ensayo | 1.007,80 [N/m] | T ^{ra} Ambiente 14 °C |
| 11mo Ensayo | 939,81 [N/m] | T ^{ra} Ambiente 21 °C |

Tabla 91: Valores de la constante de rigidez obtenidos.

Como se muestra en la *Figura 139* se obtiene una rigidez media de valor $K = 981,61$ [N/m] con un coeficiente de correlación $R^2 = 99,93\%$, como se observa se muestra un valor que claramente se aleja del resto siendo esta la gráfica del primer ensayo en el cual no se había modificado la humedad del material por lo que la estructura presentaba mayor rigidez, también se puede apreciar que la rigidez de la estructura ha descendido claramente al modificar la humedad en el material.

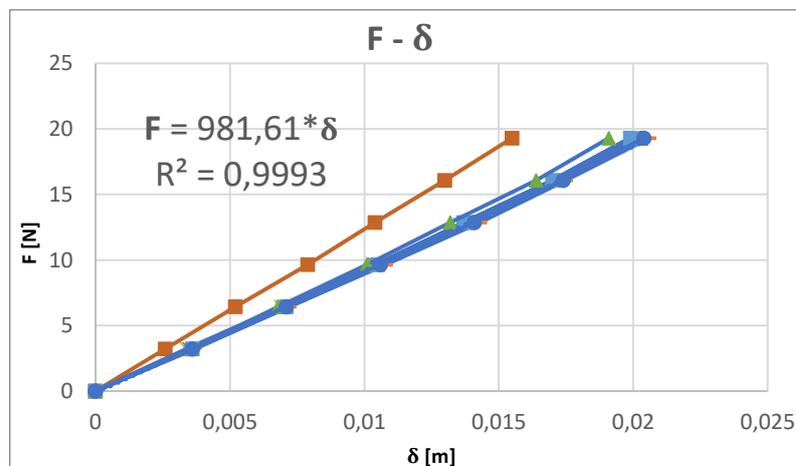


Figura 139: Gráfica de comparación de las constantes de rigidez de los ensayos estáticos.



6.2.3 Frecuencias Propias del Sistema.

En este apartado se muestra uno de los valores de principal estudio de este TFG, Como se observa en la *Tabla 92*.

| f_i [Hz] | | | | | | | |
|-------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| N.º Tuercas | | | | | | | |
| Ensayo | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1er | 10,0191 | 7,1924 | 5,8762 | 5,1456 | 4,5742 | 4,2145 | 3,9249 |
| 2do | 9,9210 | 7,3691 | 6,0799 | 5,1536 | 4,6936 | 4,1302 | 3,6893 |
| 3ro | 9,8679 | 7,3755 | 5,9160 | 5,1791 | 4,6204 | 4,0840 | 3,7323 |
| 4to | 9,9029 | 7,3516 | 6,0178 | 5,2427 | 4,6634 | 4,2321 | 3,8230 |
| 5to | 9,5671 | 7,1240 | 5,8475 | 5,1122 | 4,2400 | 4,0108 | 3,7323 |
| 6to | 9,8902 | 7,4184 | 6,1133 | 5,2730 | 4,6873 | 4,2432 | 3,8962 |
| 7mo | 10,0318 | 7,3946 | 6,0210 | 5,1727 | 4,6586 | 4,2114 | 3,8867 |
| 8vo | 9,9538 | 7,2991 | 6,0672 | 5,2555 | 4,6315 | 4,2257 | 3,8692 |
| 9no | 9,8647 | 7,3198 | 5,9414 | 5,1870 | 4,6236 | 4,7807 | 3,8548 |
| 10mo | 10,1496 | 7,5028 | 6,2279 | 5,3573 | 4,7780 | 4,3307 | 3,9631 |
| 11mo | 9,8759 | 7,1829 | 5,9526 | 5,1297 | 4,5376 | 4,0968 | 3,7912 |

Tabla 92: Valores de la frecuencia obtenida en los ensayos para todos los casos de carga.

Como se presentó en el capítulo 4 la frecuencia natural tiene una dependencia con la masa del sistema, la cual se comprobó utilizando la *ecuación 4.1* en la que ajusta los valores teóricos con los experimentales obtenidos en la parte experimental de este TFG.

Como se observa en la *Tabla 92* la frecuencia natural disminuye con la temperatura en condiciones secas, lo que podría indicar que la rigidez y por consecuencia el módulo de elasticidad también se ven disminuidos con la temperatura.



6.2.4 Coeficientes de Amortiguamiento.

En este apartado se muestra uno de los valores de principal estudio de este TFG, Como se observa en la *Tabla 93*.

| ξ_i | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| N.º Tuercas | | | | | | | |
| Ensayo | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1er | 0,0353 | 0,0335 | 0,0341 | 0,0358 | 0,0344 | 0,0355 | 0,0372 |
| 2do | 0,0272 | 0,0361 | 0,0368 | 0,0467 | 0,0344 | 0,0474 | 0,0867 |
| 3ro | 0,0266 | 0,0324 | 0,0554 | 0,0503 | 0,0446 | 0,0523 | 0,0678 |
| 4to | 0,0247 | 0,0303 | 0,0364 | 0,0332 | 0,0345 | 0,0367 | 0,0522 |
| 5to | 0,0305 | 0,0552 | 0,0453 | 0,0378 | 0,0982 | 0,0750 | 0,0603 |
| 6to | 0,0392 | 0,0355 | 0,0338 | 0,0325 | 0,0337 | 0,0355 | 0,0344 |
| 7mo | 0,0250 | 0,0344 | 0,0442 | 0,0576 | 0,0426 | 0,0450 | 0,0447 |
| 8vo | 0,0286 | 0,0399 | 0,0392 | 0,0375 | 0,0445 | 0,0349 | 0,0394 |
| 9no | 0,0402 | 0,0377 | 0,0471 | 0,0379 | 0,0370 | 0,0348 | 0,0353 |
| 10mo | 0,0240 | 0,0537 | 0,0377 | 0,0420 | 0,0332 | 0,0370 | 0,0448 |
| 11mo | 0,0371 | 0,0642 | 0,0464 | 0,0441 | 0,0469 | 0,0411 | 0,0356 |

Tabla 93: Valores del coeficiente de amortiguamiento respecto al crítico obtenidos en los ensayos para todos los casos de carga.

Como se muestra en la *Tabla 93* los valores para el coeficiente de amortiguamiento podemos concluir que no se ven afectados por los parámetros estudiados (masa, humedad y temperatura), ya que estos no presentan una tendencia o variación clara respecto a estas variables.



6.2 Líneas futuras

Para posteriores estudios se proponen las siguientes consideraciones a fin de obtener datos más característicos de la madera y su comportamiento en estructuras.

Se propone realizar los mismos estudios con mejores medios, es decir mejores aparatos de medición como puede ser el higrómetro y termómetro, tener un entorno más controlado de volumen más reducido que se puede conseguir mediante una cámara climática la cual nos permitirá tener más rango de variables ambientales y tener controladas todas estas variables ambientales y realizar contrastes más significativos de variables como la temperatura que se podrá variar entre -20 °C y 50 °C y combinarlo con variaciones de humedad en un rango de 0% al 100% de humedad en la madera.

Respecto al material se propone utilizar una viga de madera maciza, para así poder caracterizar mejor las propiedades mecánicas de la madera y el comportamiento estructural que esta presenta al someterse a distintos cambios ambientales y sometido a cargas variables, para así poder sacar conclusiones más claras sobre este material sin dependencia de otro material que se pueda utilizar al realizar la unión de una estructura.

Bibliografía y webgrafía

Bibliografía

- Balachandran, B. Vibrations. Thomson (2006). ISBN 970-686-495-4. I/Bc 534.-BALvib.
- Thompson, W.T. Theory of Vibration with applications. 4ª ed. Chapman & Hall (1993). ISBN 01391532333. I/Bc 531.1-THOthe.
- Kelly, S.G. Mechanical Vibrations. Mc Graw Hill (1996). ISBN 0078442664.
- Inman, D.J. Engineering vibration. Pearson Prentice-Hall, 3ª ed. (2009). ISBN 0131919415. I/Bc 534.-INMeng.
- Weaver, W. Timoshenko, S.P. Young, D.H. Vibration Problems in Engineering. John Wiley and Sons (1990). ISBN 047163228.

Webgrafía:

[1] Simulación mediante elementos tipo barra de maquetas de estructuras tridimensionales. Enlace: <https://uvadoc.uva.es/>. Fecha de la última consulta: mayo de 2019.

[2] Manual técnico de formación para la caracterización de madera de uso estructural. Enlace: <http://normadera.tknika.net>. Fecha de la última consulta: mayo de 2019.

[3] Características de la madera como material estructural. Enlace: <http://mizuage.es>. Fecha de la última consulta: mayo de 2019.

[4] Madera laminada encolada. Enlace: <http://infomader.net/>. Fecha de la última consulta: mayo de 2019.

[5] Asociación española del comercio e industria de la madera. Enlace: <http://aeim.org/>. Fecha de la última consulta: mayo de 2019.



Universidad de Valladolid

PROTOTIPADO Y SIMULACION DE UNA MAQUETA DE PUENTE
TIPO WARREN HECHA CON PALITOS DE MADERA



[6] Bruel & Kjaer Beyond Measure. Enlace: <https://www.bksv.com/es-ES>.
Fecha de la última consulta: mayo de 2019.



Anexos



Universidad de Valladolid

PROTOTIPADO Y SIMULACION DE UNA MAQUETA DE PUENTE TIPO WARREN HECHA CON PALITOS DE MADERA



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Anexo 1: Puentes mellizos

Este anexo sucedió a partir del planteamiento inicial de realizar el estudio rigidez de los 2 puentes mellizos planteados inicialmente, con el cual se pretendía realizar todos los estudios de este TFG. Estos puentes presentaban características similares con una luz de 1,62 m y un peso de 0,27 kilogramos en ambos casos; cabe destacar que coincidían exactamente tanto en luz salvada como en el peso de cada uno de ellos.



Figura 140: Puentes mellizos.

A consecuencia de que los puentes mellizos resultaron muy rígidos para realizar los ensayos dinámicos se procedió posteriormente a unirlos y realizar uno de mayor luz con un total de 4,10 m y un peso de 0,7025 kilogramos.

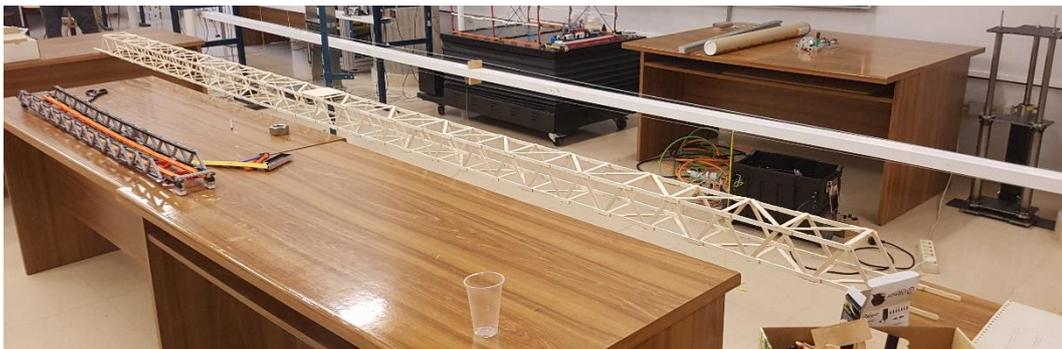


Figura 141: Estructura final del puente de 4,10 m de luz.

1.1.-Ensayo de obtención de rigidez en los puentes mellizos.

Para este apartado se realizó el estudio de la rigidez de los 2 puentes mellizos construidos inicialmente, en el cual se procedió a realizar un ensayo estático el cual consistía en cargar el puente con unas tuercas que tienen una masa de 0,328 kg, con las cuales cargaremos el puente con hasta 9 tuercas en la sección media que representa el caso más desfavorable y se estimará la rigidez tomando los valores de la flecha δ y la fuerza F aplicada en los 10 casos como se muestra en la *Figura 143* en la cual se parte del puente sin carga que presenta el caso más favorable hasta realizar la carga de las 9 tuercas el cual presenta el caso más desfavorable que presentará la mayor flecha. Este procedimiento se repitió 3 veces para cada uno de los puentes.

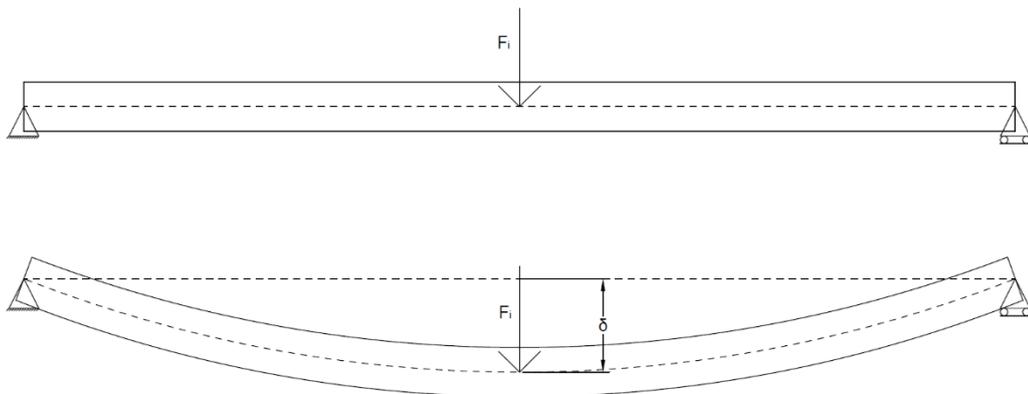


Figura 142: Desplazamiento de una viga sometida a una carga en la sección media y obtención de la flecha.

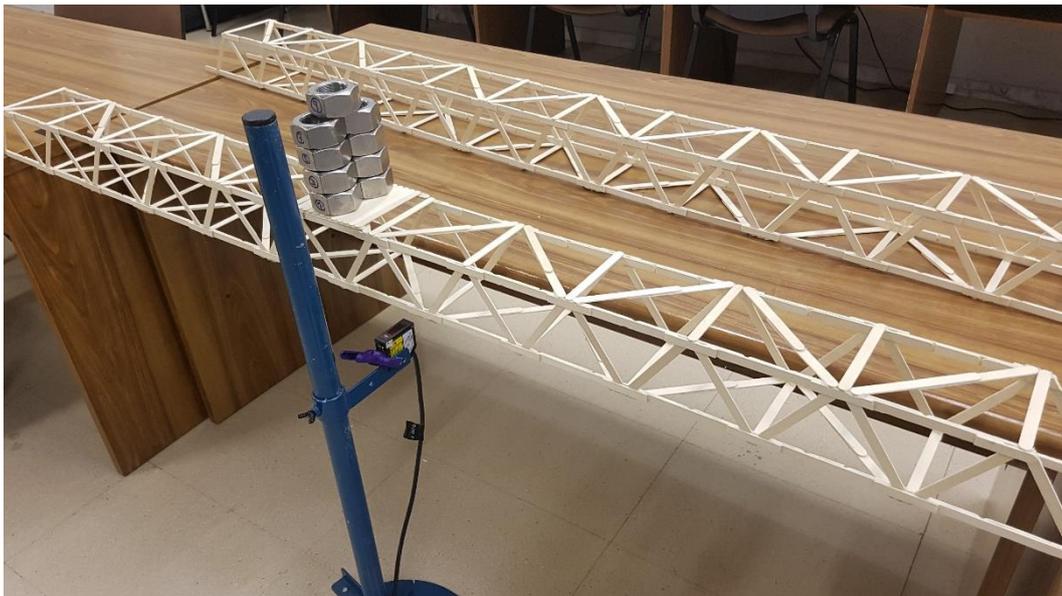


Figura 143: Puente mellizo cargado con 9 tuercas.

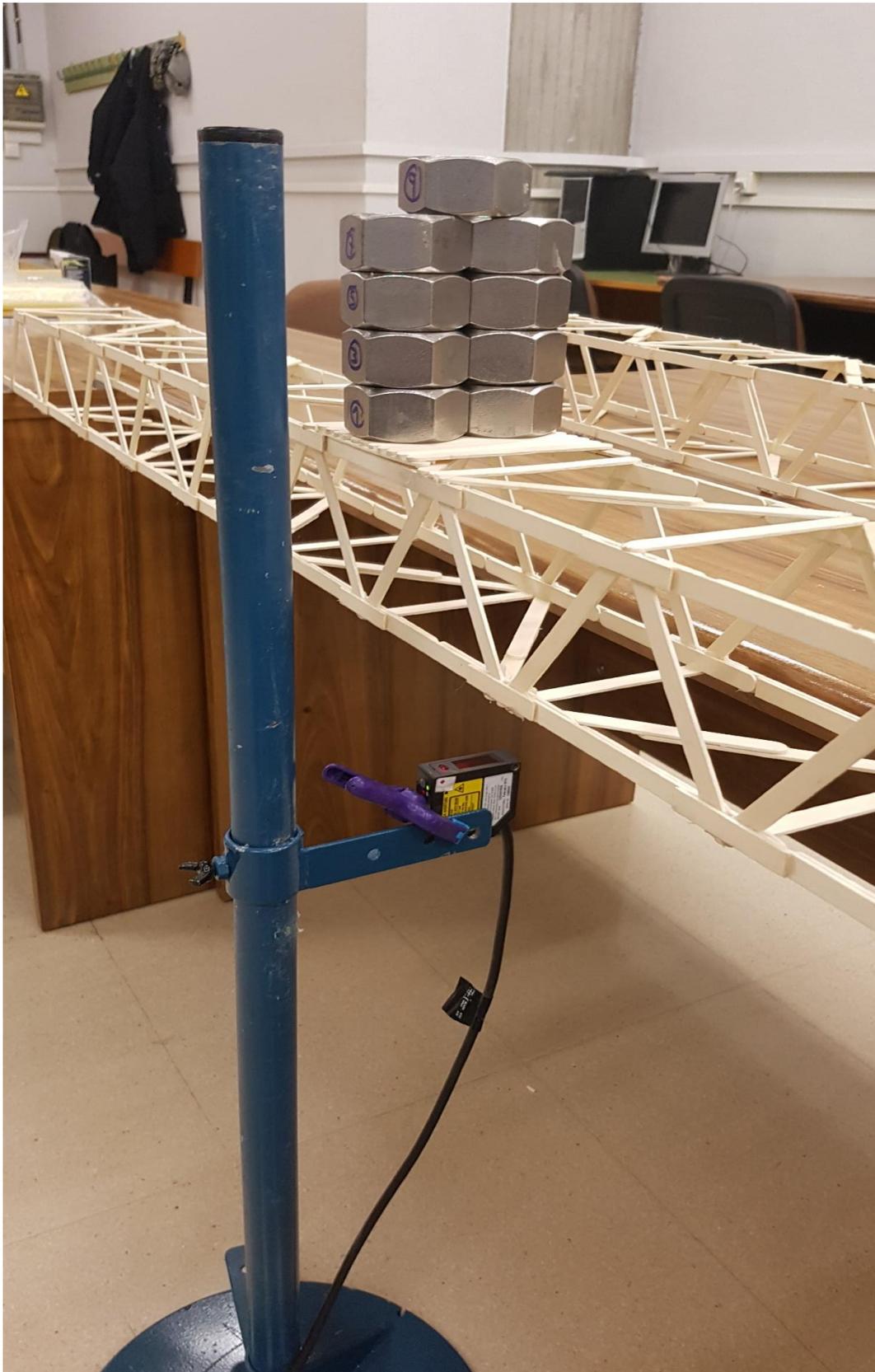


Figura 144: Vista en detalle del puente mellizo cargado con 9 tuercas.

1.1.1. Puente mellizo 1.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos del ensayo estático del primero puente mellizo que se realizaron en condiciones normales del laboratorio en la cual se midieron la temperatura, humedad relativa del ambiente y la humedad de la madera como se muestra en la *Tabla 94*.

| Temperatura °C | Humedad Relativa | Humedad Madera | Peso Puente kg |
|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| 18,1 | 39 % | 0 % | 0,270 |

Tabla 94: Condiciones ambientales y masa del puente mellizo 1.

A continuación, se procede a tabular los valores obtenidos en los 3 ensayos estáticos llevados a cabo como se muestra en la *Tabla 95*, para poder representarlo y realizar un ajuste lineal entre la Fuerza F_N y la flecha δ_m como se observa en la *Figura 145*, en la cual se obtiene la constante de rigidez del puente K_N/m que se muestra en la *Tabla 96*.

| N.º Tuercas | F_i N | δ_{1_i} m | δ_{2_i} m | δ_{3_i} m |
|-------------|------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3,22 | 3×10^{-4} | 2×10^{-4} | 2×10^{-4} |
| 2 | 6,44 | 5×10^{-4} | 4×10^{-4} | 4×10^{-4} |
| 3 | 9,65 | 7×10^{-4} | 6×10^{-4} | 6×10^{-4} |
| 4 | 12,87 | 9×10^{-4} | 8×10^{-4} | 8×10^{-4} |
| 5 | 16,09 | 11×10^{-4} | 10×10^{-4} | 10×10^{-4} |
| 6 | 19,31 | 14×10^{-4} | 13×10^{-4} | 13×10^{-4} |
| 7 | 22,52 | 16×10^{-4} | 15×10^{-4} | 15×10^{-4} |
| 8 | 25,74 | 18×10^{-4} | 17×10^{-4} | 17×10^{-4} |
| 9 | 28,96 | 20×10^{-4} | 19×10^{-4} | 19×10^{-4} |

Tabla 95: Valores de flecha frente a las cargas obtenidos en los 3 ensayos estáticos del puente mellizo 1.

| Constante Rigidez | K_1 N/m | K_2 N/m | K_3 N/m | K_{media} N/m |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------------|
| Puente 1 | 14 597 | 14 972 | 14 972 | 14 847 |

Tabla 96: Valores de la constante de rigidez obtenidos en el puente mellizo 1 y el valor medio obtenido.

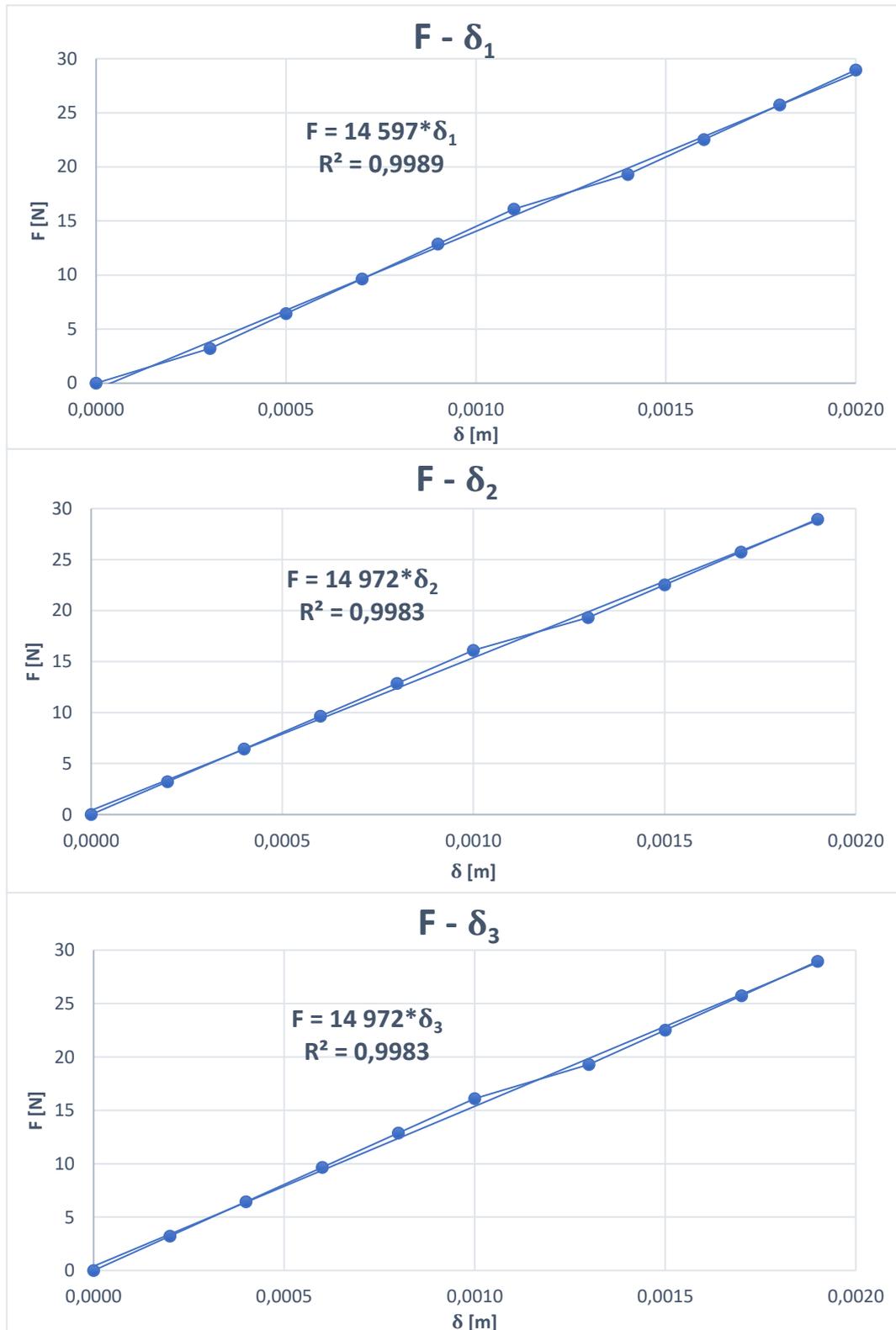


Figura 145: Gráfica de la flecha frente a las cargas del puente mellizo 1.

1.1.2 Puente mellizo 2.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos del ensayo estático del segundo puente mellizo que se realizaron en condiciones normales del laboratorio en la cual se midieron la temperatura, humedad relativa del ambiente y la humedad de la madera como se muestra en la *Tabla 97*.

| Temperatura °C | Humedad Relativa | Humedad Madera | Peso Puente Kg |
|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| 18,3 | 39 % | 0 % | 0,270 |

Tabla 97: Condiciones ambientales y masa del puente mellizo 2.

A continuación, se procede a tabular los valores obtenidos en el ensayo estático como se muestra en la *Tabla 98*, para poder representarlo y realizar un ajuste lineal entre la Fuerza F [N] y la flecha δ [m] como se observa en la *Figura 146*, en la cual se obtiene la constante de rigidez del puente K [N/m] que se muestra en la *Tabla 99*.

| N.º Tuercas | F_i N | δ_{1_i} m | δ_{2_i} m | δ_{3_i} m |
|-------------|------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3,22 | 2×10^{-4} | 2×10^{-4} | 2×10^{-4} |
| 2 | 6,44 | 5×10^{-4} | 4×10^{-4} | 4×10^{-4} |
| 3 | 9,65 | 6×10^{-4} | 6×10^{-4} | 6×10^{-4} |
| 4 | 12,87 | 8×10^{-4} | 8×10^{-4} | 8×10^{-4} |
| 5 | 16,08 | 10×10^{-4} | 10×10^{-4} | 10×10^{-4} |
| 6 | 19,31 | 12×10^{-4} | 12×10^{-4} | 12×10^{-4} |
| 7 | 22,52 | 14×10^{-4} | 14×10^{-4} | 14×10^{-4} |
| 8 | 25,74 | 16×10^{-4} | 16×10^{-4} | 16×10^{-4} |
| 9 | 28,96 | 18×10^{-4} | 18×10^{-4} | 18×10^{-4} |

Tabla 98: Valores de flecha frente a las cargas obtenidos en los 3 ensayos estáticos del puente mellizo2.

| Constante Rigidez | K_1 N/m | K_2 N/m | K_3 N/m | K_{media} N/m |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------------|
| Puente 2 | 16 294 | 16 505 | 16 088 | 16 296 |

Tabla 99: Valores de la constante de rigidez obtenidos en el puente mellizo 2 y el valor medio obtenido.

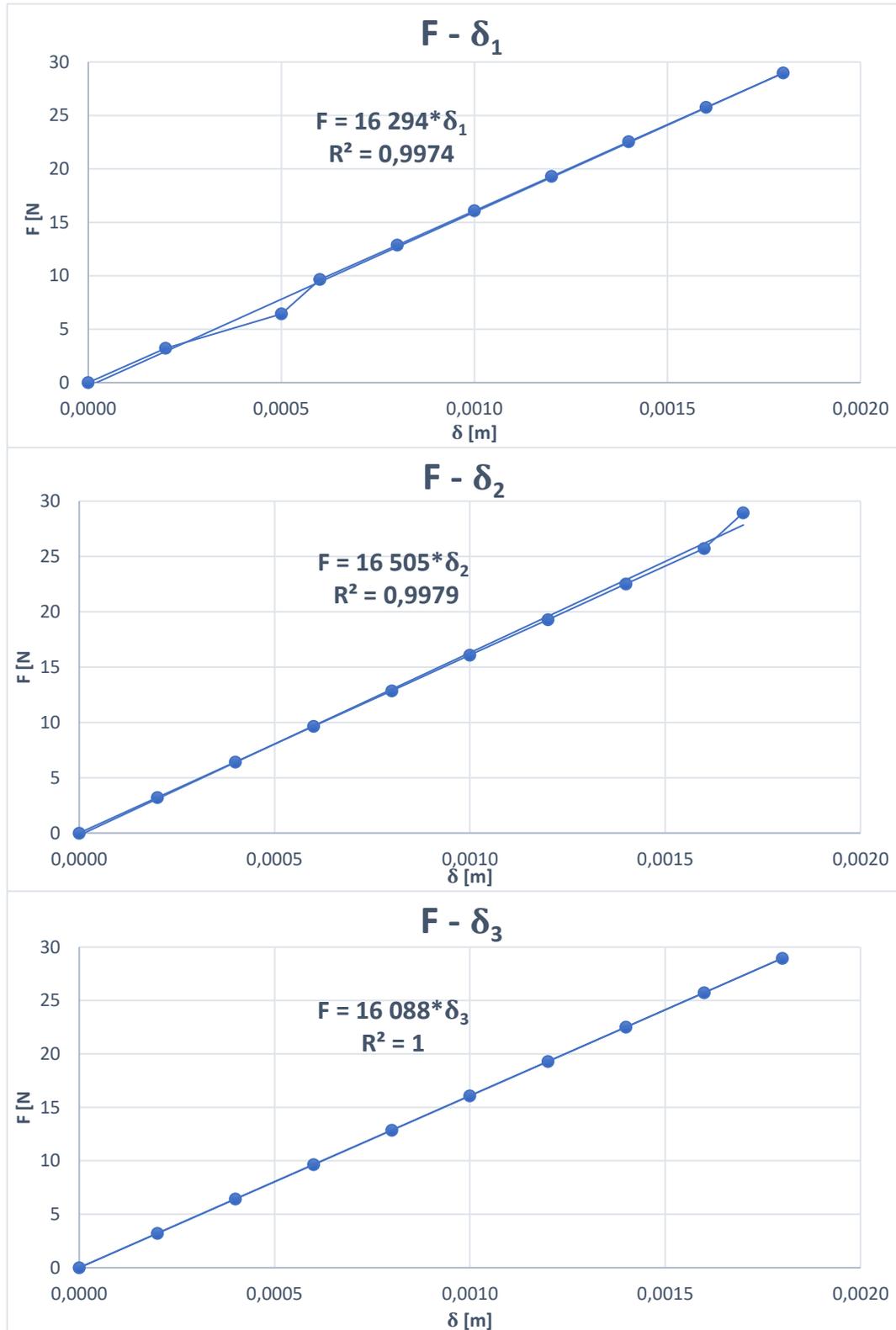


Figura 146: Gráfica de la flecha frente a las cargas del puente mellizo 2.



1.1.3 Comparación de resultados obtenidos.

Como se presenta en la *Tabla 100* desarrollado en los apartados anteriores los puentes mellizos presentan una constante de rigidez muy alta.

| Constante Rigidez | Puente 1 | Puente 2 | Media |
|-------------------|----------|----------|--------|
| K N/m | 14 847 | 16 296 | 15 572 |

Tabla 100: Valor medio de la constante de rigidez obtenida a partir de los puentes mellizos.

Por lo que se optó por reducir esta rigidez y así poder estudiar mejor las frecuencias propias y los coeficientes de amortiguamiento, se decidió unirlos y crear un puente de mayor luz.

Partiendo de que la estructura se comporta como una viga simple apoyada en la que el valor de la flecha se rige por la siguiente *ecuación 8.1*.

$$\delta = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Y aplicando la ecuación que relaciona la fuerza F con la constante de rigidez de la estructura K y la flecha δ presentada en la *ecuación 8.2*.

$$F = K \cdot \delta \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Sustituyendo la ecuación 8.1 en la ecuación 8.2 obtenemos.

$$F = K \cdot \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

Operando se puede despejar la constante de rigidez K [N/m].

$$K = \frac{48 \cdot E \cdot I}{L^3}$$

Con el producto de $E \cdot I$ igual en ambos casos podemos calcular que para una longitud de 4,1 m se obtiene una rigidez 16 veces menor

$$\frac{K_{L=1,6 \text{ m}}}{K_{L=4,1 \text{ m}}} = \frac{(4,1 \text{ m})^3}{(1,6 \text{ m})^3} = 16,83$$



$$K_{L=4,1\text{ m}} = \frac{K_{L=1,6\text{ m}}}{16,83}$$

Por este motivo se decidió unir los 2 puentes mellizos y añadir 6 triangulaciones para obtener la longitud de la estructura que nos de esta disminución en la constante de rigidez K .

$$K(L = 1.6\text{ m}) = \frac{48 \cdot E \cdot I}{L^3} \approx 16\,000\text{ N/m}$$

$$K(L = 4.1\text{ m}) = \frac{48 \cdot E \cdot I}{L^3} \approx 1\,000\text{ N/m}$$



Universidad de Valladolid

PROTOTIPADO Y SIMULACION DE UNA MAQUETA DE PUENTE TIPO WARREN HECHA CON PALITOS DE MADERA



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Anexo 2: Madera laminada encolada

2.1 Definición.

Se obtiene encolando dos o más láminas de madera en dirección paralela al eje de las láminas. Las láminas se obtienen encolando entre sí, mediante uniones dentadas, piezas de madera aserrada con un espesor comprendido entre 6 y 45 mm.

2.2 Aplicaciones.

Las estructuras de madera laminada encolada resultan especialmente indicadas para:

- Vigas:
 - Luces de 30 a 70 m en edificios de uso público, comercial o deportivo.
 - Luces moderadas de 8 a 14 m en construcciones pequeñas y medias (normalmente elementos prefabricados)
- Pilares
- Estructura de cubierta de peso propio reducido.
- Estructuras que requieren resistencia frente a determinados agentes químicos, como por ejemplo almacenes de sal para eliminar la nieve – hielo de las carreteras.
- Cuando se pretende un aspecto estético especial.
- Existe la necesidad de estructuras con elevada estabilidad al fuego.
- Estructuras en situaciones de difícil mantenimiento.

Ejemplos de aplicaciones:

- normales: iglesias, gimnasios, polideportivos, piscinas, centros comerciales, hangares, fábricas, bodegas, puentes, etc.;
- particulares: en ambientes agresivos y corrosivos, en los que otros materiales ven limitado su uso: piscinas cubiertas, plantas químicas, naves para uso de ganado, ambientes industriales agresivos, edificios en la costa marítima, etc.



2.3 Materiales.

2.3.1 Madera aserrada.

Los elementos unitarios son tablas de madera aserrada con las que, por yuxtaposición mediante unión dentada encolada, se constituye cada lámina, las cuales, por superposición mediante encolado de sus caras, dan lugar a la pieza, en una lógica constructiva similar a la de la albañilería y la cantería.

- Especies

La especie más utilizada en Europa es la *Picea abies*, que comercialmente se conoce como abeto, abeto rojo, píceo o falso abeto para las clases de uso 1 y 2. Y en segundo lugar el pino silvestre, principalmente cuando se requiere un tratamiento en profundidad para las clases de uso 3.2 y 4.

En España también se emplean el Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), el Roble (*Quercus robur* y *Q. petraea*), el Castaño (*Castanea sativa*); y en menor medida el Fresno (*Fraxinus excelsior*), el Haya (*Fagus sylvatica*) y el Iroko (*Chlorophora excelsa*, *Chlorophora regia*). Actualmente, se están llevando a cabo acciones para su inclusión en la norma.

- Calidad o clase resistente de la madera

La madera utilizada en las láminas estará clasificada de acuerdo con la norma UNEEN 14081-1.

- Contenido de humedad

El contenido de humedad de cada lámina deberá encontrarse en rango del 6 % al 15 %, a no ser que el fabricante del adhesivo requiera un margen más estrecho. La variación del contenido de humedad de las láminas dentro de una pieza no deberá ser mayor que el 5 %.

2.3.2 Láminas.

Se obtienen uniando por la testa mediante unión dentada las piezas de madera clasificadas.



2.3.3 Adhesivos.

Los más utilizados en la actualidad, según la clase de servicio 1, 2 o 3, son:

- Melamina-Urea-Formaldehído (MUF).
- Resorcina-Fenol-Formaldehído (RPF).
- Poliuretano (PU).

Si se aplican productos protectores antes del encolado de las láminas deberá documentarse que se cumplen las especificaciones para la combinación de adhesivo y producto protector.

2.3.4 Herrajes y conectores metálicos.

Deben ser resistentes a la corrosión o estar protegidos contra ella.

2.3.5 Tornillería.

La norma de referencia para especificarla es la DIN 1052-T2.

2.4 Tipos.

Existen dos tipos según el laminado:

-**Madera laminada horizontal:** Sus planos de encolado son perpendiculares a la dimensión mayor de la sección transversal, es el formato más habitual;

-**Madera laminada vertical:** Sus planos de encolado son perpendiculares a la dimensión menor de la sección transversal. Éste último es menos frecuente y el proceso de fabricación es diferente al anterior.

Así mismo existen otros 2 tipos según las clases resistentes de las láminas utilizadas:

- **Madera laminada homogénea (GLh):** Todas las láminas utilizadas son de la misma clase resistente.

- **Madera laminada combinada (GLc):** Las láminas exteriores tienen una clase resistente superior a las utilizadas en su interior, y cumplen con la proporción definida en la normativa entre láminas exteriores e interiores.

En los últimos borradores de la norma prEN 14080 se relacionan las clases resistentes de la madera laminada con las resistencias de la unión dentada de la lámina ($f_{m,j,k}$)

2.5 Dimensiones piezas y características de las láminas.

Al tratarse de un producto fabricado ex proceso sus dimensiones no están normalizadas, aunque pueden suministrarse sin problemas si el mercado así lo requiere.



- Anchura:

La gama de anchuras depende de la anchura de la lámina, las más habituales son: 80, 100, 110, 130, 140, 160, 180, 200 y 220 mm (siendo el máximo de 280 mm).

- Altura:

Es función del grueso de lámina empleado. En la norma se indica un grueso de lámina máximo permitido de 45 mm para la clase de servicio 1 y 2; y de 35 mm (< 41 mm) para la clase de servicio 3.

- Orientación de las láminas:

Todas las láminas deberán tener el corazón hacia el mismo lado, con la excepción de las piezas destinadas a la clase de servicio 3 en las que las láminas extremas en cada lado deberán tener el corazón mirando hacia el exterior.

2.6 Propiedades.

1.2.5.1 Contenido de humedad.

Deberá ser el más cercana posible a la humedad media de equilibrio higroscópico correspondiente a la ubicación de la obra:

- 12% para clases de servicio 1 y 2.
- 18% para clase de servicio 3.

1.2.5.2 Clases resistentes.

Están definidas en la norma UNE-EN 1194, que distingue 8 clases resistentes, que se exponen en las tablas siguiente (*):

- 4 cuando la composición es homogénea (todas las láminas son de la misma clase resistente).
- 4 cuando es combinada (las láminas extremas son de una clase resistente superior).

(*) en los últimos borradores de la norma UNE-EN 14080 se modifican ligeramente estos valores.



| CLASES RESISTENTES | COMPOSICIÓN HOMOGÉNEA | | | |
|---|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | GL 24h | GL 28h | GL 32h | GL 36h |
| Valores característicos N/mm ² | | | | |
| Resistencia flexión | 24 | 28 | 32 | 36 |
| Resistencia tracción - paralela - perpendicular | 16,5 0,4 | 19,5 0,45 | 22,5 0,5 | 26,0 0,6 |
| Resistencia compresión - paralela - perpendicular | 24 2,7 | 26,5 3,0 | 29 3,3 | 31 3,6 |
| Resistencia cortante - cortadura y torsión | 2,7 | 3,2 | 3,8 | 4,3 |
| Módulo de elasticidad - paralelo: - medio - característico - perpendicular | 11.600 9.400 390 | 12.600 10.200 420 | 13.700 11.100 420 | 14.700 11.900 490 |
| Módulo de cortante (medio) | 720 | 780 | 850 | 910 |
| Densidad característica (kg/m ³) | 380 | 410 | 430 | 450 |
| Clase resistente requerida en las láminas | C24/C18 | C30/C24 | C40/C30 | - |

Tabla Clases resistentes de madera laminada encolada combinada, según la norma UNE-EN 1194.

| CLASES RESISTENTES | COMPOSICIÓN COMBINADA | | | |
|---|---|--|--|--|
| | GL 24c | GL 28c | GL 32c | GL 36c |
| Valores característicos N/mm ² | | | | |
| Resistencia flexión | 24 | 28 | 32 | 36 |
| Resistencia tracción - paralela - perpendicular | 14,0 0,35 | 16,5 0,4 | 19,5 0,45 | 22,5 0,5 |
| Resistencia compresión - paralela - perpendicular | 21 2,4 | 24 2,7 | 26,5 3,0 | 29 3,3 |
| Resistencia cortante - cortadura y torsión | 2,2 | 2,7 | 3,2 | 3,8 |
| Módulo de elasticidad - paralelo: - medio - característico - perpendicular | 11.600 (11.500) 9.400 (-) 390 (300) | 12.600 (12.500) 10.200 (-) 390 (300) | 13.700 (13.500) 11.100 (-) 420 (300) | 14.700 (14.500) 11.900 (-) 460 (300) |
| Módulo de cortante (medio) | 590 (650) | 720 (650) | 780 (650) | 850 (650) |
| (Módulo cortante por rodadura) | - (65) | -(65) | - (65) | - (65) |
| Densidad característica (kg/m ³) | 350 | 380 | 410 | 430 |
| Clase resistente requerida en las láminas | C24/C18 | C30/C24 | C40/C30 | - |

Tabla Clases resistentes de madera laminada encolada combinada, según la norma UNE-EN 1194.

Figura 147: Tablas de las clases resistentes de madera encolada.



2.7 Durabilidad.

No hay que olvidar en este tema la importancia del diseño constructivo de la estructura que evite la exposición innecesaria a la intemperie y la posibilidad de retención de agua. Un correcto diseño puede rebajar el riesgo de deterioro.

En la práctica no existen problemas de durabilidad en piezas situadas en las clases de uso 1 (interior) y 2 (interior y bajo cubierta sin exposición directa al agua de lluvia), prácticamente cualquier especie es apta. En la clase de uso 3.1 y de forma especial en las 3.2, 4 y 5 se requiere una especie de mayor durabilidad natural o un tratamiento químico de protección.

Normalmente las especies coníferas habituales en estructuras no presentan durabilidad natural suficiente (casi siempre incorporan parte de albura que no es durable) y, por tanto, para su empleo en clases de uso 3.1, 3.2, 4 y 5 requieren tratamiento. Para la elección del tipo de tratamiento adecuado puede consultarse el Documento Básico de Seguridad Estructural – Madera y la norma UNE EN 335-2 que define las clases de uso.

La especie más utilizada en Europa es el abeto (*Picea abies* L. Karst), que no es impregnable, por lo que su uso queda limitado a las clases de uso 1 y 2. El pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), es la especie más utilizado para la clase de uso 3, ya que se puede tratar en profundidad.

Se puede elegir una especie con la durabilidad natural suficiente para la clase de uso que corresponda a la estructura, o aplicar el tratamiento adecuado de protección siempre que la madera sea suficientemente impregnable antes de obtener las láminas y de encolarlas entre sí (es la práctica más habitual), o aplicar el tratamiento a la pieza de madera laminada encolada.

2.8 Reacción al fuego.

Su clase de reacción al fuego, según la norma UNE-EN 14080, es D-s2-d0 siempre que cumpla que su:

- Densidad media mínima sea igual o superior a 380 kg/m³.
- Espesor total mínimo de la pieza sea igual o superior 40 mm.

Si el fabricante define una clase de reacción al fuego diferente, tiene que aportar el correspondiente informe de ensayo y de clasificación de acuerdo con la norma UNE-EN 13501-1.



2.9 Resistencia al fuego.

La resistencia al fuego de la estructura en la que interviene la madera laminada encolada se calculará de acuerdo con el DB de Seguridad contra Incendio o de acuerdo con la norma UNE-EN1995-1-2. El parámetro dependiente de la madera es la velocidad de carbonización, que toma los valores eficaces de: 0,5 a 0,7 mm/min en madera aserrada de frondosas y madera laminada encolada.

2.10 Emisión de formaldehído.

De acuerdo con la norma UNE-EN 14080, si el adhesivo utilizado en la fabricación de la madera laminada contiene formaldehído deberá clasificarse de acuerdo con la norma UNEEN 717-1 en las siguientes clases de emisión E1 o E2.

2.11 Resistencia química.

Al no reaccionar con el medio ambiente ni con agentes oxidantes o reductores, se convierte en un material adecuado para su utilización en ambientes agresivos y corrosivos, en los que los metales ven limitadas sus aplicaciones.

2.12 Acabado superficial - Mantenimiento en aplicaciones al exterior.

Al igual que cualquier otro producto de madera colocado al exterior deben recibir acabados que protegen la madera frente a los rayos infrarrojos (calentamiento) y ultravioletas (oxidación).

2.13 Fabricación, almacenamiento y transporte.

Fabricación

Los equipos, las condiciones ambientales de fabricación, el proceso de fabricación, y el autocontrol deberán realizarse de acuerdo con las especificaciones de la norma UNE-EN 386 o por la norma UNE-EN 14080 que sustituirá próximamente a la anterior. Lo habitual es que el fabricante se someta de forma voluntaria a un control externo por un organismo de reconocido prestigio.



Almacenaje, transporte y montaje

Se recomienda aplicar un sellante, imprimación o recubrir las antes de que salgan de fábrica. Durante el almacenaje, transporte y montaje se evitará someter las piezas a tensiones superiores a las previstas.

Los elementos de madera laminada encolada almacenadas en obra deberán protegerse adecuadamente frente a la intemperie. En el caso que sea posible se recomienda cubrirlos para evitar la acción de la lluvia y del sol. Se deben almacenar sobre rastreles para evitar su contacto con el suelo y sobre suelos correctamente drenados.

Una vez colocados no es conveniente superar el plazo de un mes sin la protección de la cobertura.

Fendas – Delaminaciones

Normalmente aparecen fendas de secado, debido a la variación de las condiciones ambientales. En ocasiones muy particulares pueden aparecer delaminaciones que son fendas más aparatosas originadas principalmente por una mala fabricación.

2.14 Marcas de calidad.

Sello de Calidad AITIM para la fabricación de estructuras de madera laminada encolada (www.aitim.es)

Se basa en la comprobación de la adecuación de los medios materiales y humanos, la implantación de un control de calidad interno y un control externo periódico especificados en las normas UNE-EN correspondientes. Los ensayos de las muestras tomadas en fábrica se realizan en laboratorios acreditados. Certificado del Instituto Otto - Graf. (www.mpa.uni-stuttgart.de/ Stuttgart, Alemania) Su funcionamiento es similar al del Sello AITIM, pero utiliza la norma DIN 1052. Parte 1: "Construcciones de madera. Cálculo y ejecución" para el mercado Ü.

Certificación

Acerbois

Glulam

(www.acerbois.org/Acerspagnol/Lien_1espa.html Francia)

Su funcionamiento es similar al del Sello AITIM.



MARCADO CE

Este producto está afectado por la Directiva Europea de Productos de la Construcción. La norma armonizada que regula su marcado CE es la UNE-EN 14.080, que entró en vigor con carácter voluntario el 1 de abril de 2006 y es obligatorio a partir del 1 de diciembre de 2011.

PLIEGO DE CONDICIONES

Véase apartado específico de “Pliegos de Condiciones” de la página web de AITIM.

- Especie
- Contenido de humedad
- Dimensiones y tolerancias
- Propiedades mecánicas
- Clases resistentes
- Calidad de encolado
- Emisión de formaldehído
- Tratamiento protector preventivo
- Productos de acabado superficial
- Mantenimiento - Resistencia al fuego
- Marcado CE
- Sellos o Marcas de Calidad Voluntaria
- Almacenamiento de productos - Herrajes