



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERAS INDUSTRIALES**

Grado en Ingeniería Mecánica

**Auscultación y modelado dinámicos de la
pasarela peatonal Va-20 pk-6**

Autor:

Pablo Maximiliano Canicio Gómez

Tutores:

**Antolín Lorenzana Ibán
Álvaro Magdaleno González**

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

Valladolid, junio 2019

Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar las gracias a mi familia porque sin ellos no estaría en donde me encuentro ahora mismo. Ellos que han estado en todo momento a mi lado celebrando mis éxitos como animándome en las desilusiones con la misma fuerza que al principio de todo. Por todo ello, y por más, les doy las gracias.

A mis amigos que, también, merecen tomar parte en mi Trabajo Fin de Grado porque sin ellos no sería quién soy ni estaría donde estoy.

Por último, agradecer enormemente tanto a Antolín como a Álvaro por darme esta oportunidad de seguir aprendiendo sobre el maravilloso mundo que son las estructuras. También a mis compañeros Carlo y Moisés por haberme ayudado en los ensayos y haber hecho de este trabajo algo especial.

Resumen

En este Trabajo Fin de Grado, se busca obtener los dos primeros modos de flexión vertical de la estructura de la pasarela situada en el PK-6,00 de la VA-20. Para ello, se realiza una serie de ensayos, en los que se excita dicha estructura con la vibración del tránsito de los viandantes.

El trabajo se ha desarrollado con un conjunto de acelerómetros dispuestos a mitad y a un cuarto de la pasarela, y se ha recogido la información de cada simulación. Posteriormente, se ha modelado con el programa de cálculo estructural SAP2000, observando el mismo comportamiento tanto en la realidad como en el modelo.

Así, se consigue un modelo computacional lo suficientemente fiable para que los resultados de cualquier simulación que se realice sobre él sean lo más parecidos y precisos a los datos que se obtendrían en un ensayo experimental.

Palabras clave

Pasarela, vibraciones, modos, SAP2000, acelerómetro.

Abstract

In this paper we seek to obtain the first two modes of vertical bending of the footbridge located at PK-6,00 of the VA-20. Therefore, some tests are made to excite the structure with the vibration induced by the crossing of a group of people.

The tests have been carried out with the help of of accelerometers located in the middle and a quarter of the footbridge collecting all the data. Then we have developed a model with a specific software of calculation of structures named SAP2000 comparing the reality with the model.

This is the way to obtain a reliable model with results good enough in any simulation with the results of the in situ tests.

Keywords

Footbridge, vibrations, modes, SAP2000, accelerometer.

Índice

Resumen	5
Abstract.....	6
Índice.....	8
Índice de ilustraciones.....	12
Índice de tablas.....	18
1. Introducción	19
1.1- Justificación	19
1.2-Objetivos	20
2. Antecedentes	21
3. Descripción de la pasarela.....	23
3.1-Descripción	23
4. Antecedentes campaña experimental	25
5. Campaña experimental y resultados.....	26
5.1-Material empleado	26
5.1.1- Flexómetro.....	26
5.1.2- Placa de fuerza triangular (TFP).....	26
5.1.3-Cableado.....	27
5.1.4- Acelerómetros	28
5.1.5- SIRIUS HD-STG	28
5.1.6-Telémetro BOSCH PLR 15	29
5.1.7-Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI)	29
5.2-Experimentación sobre la pasarela.....	30
5.2.1-Preparación del equipo.....	30
5.2.2-Ensayos.....	35
5.3-Procesamiento de resultados obtenidos	40
6. Planteamiento simplificado	45
6.1-Análisis estático.....	46
6.2-Análisis modal	49
6.3-Viga equivalente	50
6.3.1-Sección de la viga equivalente.....	50
6.3.2-Frecuencias	52
6.3.3- Estimación dl estado tensional ante la sobrecarga de uso	53
6.3.3.1-Resultados con formulación matemática	54

6.3.3.2-Resultados SAP2000	56
6.3.3.3-Comparación resultados	57
6.3.3.4- Comparación con resultados experimentales	58
7. Modelado realista de la pasarela	59
7.1- Definición del material	59
7.2- Definición de las secciones	60
7.3-Simplificación cerramientos laterales de rejillas y la chapa de paso peatonal	62
7.3.1-Aporte de las rejillas	62
7.3.2-Aporte tablero de paso peatonal.....	64
7.3.3-Aporte de los travesaños	65
7.3.4-Aporte de los cordones del tablero	66
7.4-Rigidización de los nudos	67
7.5-Patrones de carga	70
7.5.1-Grupo 4 personas puntuales en centro de vano	70
7.6-Resultados modelo 2D.....	71
7.6.1-Diagramas de esfuerzos.....	71
7.6.1.1-Cordón superior	71
7.6.1.1.1-Caso de 4 personas en centro de vano	71
7.6.1.1.2-Caso de sobrecarga de uso	73
7.6.1.2-Cordón inferior	75
7.6.1.2.1-Caso de 4 personas en centro de vano	75
7.6.1.2.2-Caso de sobrecarga de uso	77
7.6.1.3-Diagonal	79
7.6.1.3.1-Caso de 4 personas en centro de vano	79
7.6.1.3.2-Caso de sobrecarga de uso	81
7.6.1.4-Montantes laterales	83
7.6.1.4.1- Caso de 4 personas en centro de vano	84
7.6.1.4.2- Caso de sobrecarga de uso	86
7.6.2- Pandeo local.....	88
7.6.3-Pandeo por vuelco o pandeo lateral.....	91
7.6.4-Flecha	92
7.6.5-Deformada en el primer y segundo modo armónico	93
7.7-Modelado 3D de la pasarela	93
7.7.1-Configuración inicial	93

7.7.2-Soporte de cruce de cuatro brazos.....	94
7.7.3-Cordones de tablero	97
7.7.4-Travesaños	98
7.7.5-Tablero	99
7.7.6-Rejillas triangulares	100
7.7.7-Rigidización de nudos.....	101
7.7.8-Patrones de cargas	102
7.8-Resultados modelo 3D.....	104
7.8.1-Diagramas de esfuerzos.....	104
7.8.1.1-Brazo soporte interior	105
7.8.1.1.1- Caso de 4 personas en centro de vano	105
7.8.1.1.2- Caso de sobrecarga de uso	108
7.8.1.2-Brazo soporte exterior	110
7.8.1.2.1- Caso de 4 personas en el centro de vano	110
7.8.1.2.2- Caso de sobrecarga de uso	112
7.8.1.3-Diagonal	114
7.8.1.3.1- Caso de 4 personas en el centro de vano	114
7.8.1.3.2- Caso de sobrecarga de uso	116
7.8.1.4-Cordones del tablero	118
7.8.1.4.1- Caso de 4 personas en el centro de vano	118
7.8.1.4.2- Caso de sobrecarga de uso	121
7.8.1.5-Travesaños interiores.....	123
7.8.1.5.1- Caso de 4 personas en el centro de vano	123
7.8.1.5.2- Caso de sobrecarga de uso	125
7.8.1.6-Travesaños extremo	127
7.8.1.6.1- Caso de 4 personas en el centro de vano	127
7.8.1.6.2- Caso de sobrecarga de uso	130
7.9.2-Flecha	132
7.9.3- Pandeo local.....	134
7.9.4- Pandeo por vuelco o pandeo lateral.....	135
7.9.5- Deformada en el primer y segundo modo.....	135
8. Comparativa de resultados obtenidos	137
9. Conclusiones y línea de futuro.....	137
Bibliografía	140

ANEXOS.....	142
ANEXO 1: Colección de pasarelas metálicas tipo PM-1	143
ANEXO 2: Cuaderno de campo	161
ANEXO 3: Método alternativo	164
ANEXO 4: Cómo modelar con SAP2000 la pasarela bajo estudio	170
ANEXO 5: Otros programas de modelado. SolidWorks	187
1. Geometría y montaje	187
2. Análisis estático	191
2.1- Caso 1: Sobrecarga de uso.....	195
2.2- Caso 2: Grupo 4 personas en el centro del vano.....	195
3. Resultados de flecha	196
3.1- Caso 1: Sobrecarga de uso.....	196
3.2- Caso 2: Grupo 4 personas en el centro del vano.....	196
4. Comparación de resultados con el modelado de SAP2000 en 2D.....	196

Índice de ilustraciones

Ilustración 1- Puente de bambú sobre el río Serayu (Java, Indonesia)	19
Ilustración 2- Puente de vidrio de Zhangjiajie (China).....	20
Ilustración 3- Rolling Bridge (Londres)	20
Ilustración 4- Vista aérea VA-20 en el PK-6,00 (1998-2003 Quinquenal)	22
Ilustración 5- Vista aérea VA-20 en el PK-6,00 (2004 Vuelo PNOA)	22
Ilustración 6- Vista aérea VA-20 en el PK-6,00 (2017 Vuelo PNOA)	23
Ilustración 7- Celosía tipo Warren.....	24
Ilustración 8- Rejillas del cerramiento	24
Ilustración 9- Partes pasarela	24
Ilustración 10- Zonas de medición	25
Ilustración 11- Flexómetro de 8 metros	26
Ilustración 12- Placa de Fuerza Triangular (TFP)	27
Ilustración 13- a) Cable TFP; b) Cable macho-macho (5 y 10 m); c) Alargador (20 y 25 m)	27
Ilustración 14- Alargador de 50 metros	28
Ilustración 15- Acelerómetro MMF KS76C.100.....	28
Ilustración 16- SIRIUS SD-STG	29
Ilustración 17- Telémetro BOSCH PRL 15	29
Ilustración 18- Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI)	30
Ilustración 19- Posiciones de los acelerómetros	31
Ilustración 20- Identificación sobre pasarela de los acelerómetros y en los planos en los van a trabajar	32
Ilustración 21- Alargadores de 50m a pleno uso conectados a los cables y al SIRIUS etiquetados	32
Ilustración 22- Identificación de los cables.....	33
Ilustración 23- Identificación cables en la entrada del SIRIUS HD-STG y, ésta, conectada al ordenador	33
Ilustración 24- TFP instalada	34
Ilustración 25- Acelerómetro 8V (vertical) colocado con cable fijado al suelo	34
Ilustración 26- Acelerómetros vertical y horizontal con cable fijado al suelo	35
Ilustración 27- Instantánea a mitad del ensayo	37
Ilustración 28- a) Llegada a posición retorno tras cruce de dos integrantes (izquierda); b) Vuelta corriendo (derecha).....	38
Ilustración 29- Lateral estimado para el tránsito	39
Ilustración 30- Paso pato a 2,25 Hz	40
Ilustración 31- Especificaciones del ensayo en la configuración del DEWESoft	41
Ilustración 32- Respuestas temporales de los 7 acelerómetros y la TFP en la configuración 1	41
Ilustración 33- Acelerómetro 2v y señal respuesta de la TFP	42
Ilustración 34- FRF en el punto 2v.....	43
Ilustración 35- Evolución del primer modo ((4,470 Hz)	44
Ilustración 36- Evolución del segundo modo (12,451 Hz).....	44
Ilustración 37- Forma del sistema subamortiguado.....	45
Ilustración 38- Viga biapoyada y biempotrada.....	46
Ilustración 39- Viga biapoyada con carga puntual centrada	47

Ilustración 40- Viga biempotrada con carga puntual centrada	47
Ilustración 41- Viga biapoyada con carga distribuida	48
Ilustración 42-Viga biempotrada con carga distribuida	48
Ilustración 43- Tres primeros modos armónicos	49
Ilustración 44-Expresiones para cálculo de las diversas frecuencias.....	50
Ilustración 45-Sección viga equivalente.....	51
Ilustración 46-Crear sección genérica con parámetros geométricos.....	52
Ilustración 47-Disposición de la sobrecarga de uso.....	54
Ilustración 48-Combinación de cargas.....	54
Ilustración 49-Fiagrama de momentos obtenido tras simulación.....	56
Ilustración 50-Valor de la flecha en sección media.....	56
Ilustración 51-Diagrama de momentos obtenido tras simulación	57
Ilustración 52-Valor de la flecha en sección media.....	57
Ilustración 53-Valor de la flecha en sección media.....	58
Ilustración 54-Valor de la flecha en sección media.....	59
Ilustración 55- Propiedades acero S275	60
Ilustración 56- Asignación perfil con sus propiedades tubo 140X80X5	61
Ilustración 57- Asignación perfil con sus propiedades tubo 140X140X8.....	61
Ilustración 58- Nudo en 3D (izq.) y 2D (dcha.) correctamente ejecutado.....	62
Ilustración 59- Pasarela en 3D con todas las secciones bien orientadas	62
Ilustración 60-Propiedades elemento área.....	63
Ilustración 61- Indicación de los dos tipos áreas asignados	63
Ilustración 62- Masas asignadas a cada elemento área	64
Ilustración 63- Carga distribuida debida a las rejillas	64
Ilustración 64- Masa lineal debida a la chapa de paso	65
Ilustración 65- Carga distribuida debida al tablero	65
Ilustración 66- Masa de travesaños sobre los nodos.....	66
Ilustración 67- Cargas puntuales de los travesaños	66
Ilustración 68- Masa lineal debida a los cordones.....	67
Ilustración 69- Carga distribuida debida a los cordones.....	67
Ilustración 70- Escalas empleadas en los planos del proyecto.....	68
Ilustración 71- Contribución a unión rígida de nudo esquina	68
Ilustración 72- Contribución a unión rígida de nudo intermedio	69
Ilustración 73- Rigidez total inducida a todos los nudos (color negro)	69
Ilustración 74-Rigidizar nudo	70
Ilustración 75- Carga aplicada en nudo central.....	70
Ilustración 76- Diagrama de esfuerzos sobre el plano XZ	71
Ilustración 77- Diagrama axiles	72
Ilustración 78-Diagramas de cortantes, flectores y desplazamientos en ambas direcciones	72
Ilustración 79- Diagrama tensiones a través de criterio de Von Mises.....	73
Ilustración 80- Diagrama de axiles y torsores.....	74
Ilustración 81- Diagramas de cortantes y flectores en ambas direcciones.....	74
Ilustración 82- Diagrama tensiones a través de criterio de Von Mises.....	75
Ilustración 83- Diagrama de axiles y torsores.....	76
Ilustración 84- Diagramas de cortantes y flectores en ambas direcciones.....	76

Ilustración 85- Diagrama tensiones a través de criterio de Von Mises.....	77
Ilustración 86- Diagrama de axiles y torsosres.....	78
Ilustración 87- Diagramas de cortantes y flectores en ambas direcciones.....	78
Ilustración 88- Diagrama tensiones a través de criterio de Von Mises.....	79
Ilustración 89- Diagrama de axiles y torsosres.....	80
Ilustración 90- Diagramas de cortantes y flectores en ambas direcciones.....	80
Ilustración 91- Diagrama tensiones a través de criterio de Von Mises.....	81
Ilustración 92- Diagrama de axiles y toorsosres.....	82
Ilustración 93- Diagramas de cortantes y flectores en ambas direcciones.....	82
Ilustración 94- Diagrama tensiones a través de criterio de Von Mises.....	83
Ilustración 95- Montante a estudiar	84
Ilustración 96- Diagrama de axiles y torsosres.....	84
Ilustración 97- Diagramas de cortantes y flectores en ambas direcciones.....	85
Ilustración 98- Diagrama tensiones a través de criterio de Von Mises.....	85
Ilustración 99- Diagramas de axiles y torsosres.....	86
Ilustración 100- Diagramas de cortantes y flectores en ambas direcciones	87
Ilustración 101- Diagrama tensiones a través de criterio de Von Mises	87
Ilustración 102- Diagrama esfuerzos en 3D	88
Ilustración 103- Primer modo de pandeo	89
Ilustración 104- Primer modo de pandeo con la sobrecarga	89
Ilustración 105- Pandeo con 4 personas (factor pandeo=87,7507)	89
Ilustración 106- Pandeo con sobrecarga de uso (factor pandeo=27,43622)	89
Ilustración 107- Pandeo con 4 personas (factor pandeo=68,7771)	90
Ilustración 108- Pandeo con sobrecarga de uso (factor pandeo=24,6059).....	90
Ilustración 109- Pandeo con 4 personas (factor pandeo=68,4771)	90
Ilustración 110- Pandeo con sobrecarga de uso (factor pandeo=24,4980).....	90
Ilustración 111- Pandeo con 4 personas (factor pandeo=68,4664)	90
Ilustración 112- Pandeo con sobrecarga de uso (factor pandeo=24,4938).....	90
Ilustración 113-Vuelco en el caso de 4 personas ($\beta =6,25$).....	91
Ilustración 114-Vuelco en el caso de sobrecarga de uso ($\beta =2,32$)	91
Ilustración 115-Flecha caso de 4 personas en el centro del vano.....	92
Ilustración 116-Flecha 4 personas sin tener en cuenta el peso propio de la pasarela	92
Ilustración 117-Flecha caso de la sobrecarga de uso.....	92
Ilustración 118- Primer y segundo modo armónicos de flexión en el plano.....	93
Ilustración 119- Configuración de la malla de trabajo	94
Ilustración 120- Vista alzado y su corte (izq.) y vista en planta	94
Ilustración 121- Prolongación de arista viga tubular.....	95
Ilustración 122- Generación de perfil variable	96
Ilustración 123- Configuración de intervalos de variación.....	96
Ilustración 124- Vigas sección variable. Extrude a la izquierda.	97
Ilustración 125- Cordones del tablero en 2D	97
Ilustración 126- Cordones del tablero en 3D.....	98
Ilustración 127- Travesaños de la pasarela (verticales según vista de plano XY).....	98
Ilustración 128- Vista travesaños en 3D	99
Ilustración 129- Módulos representativos del tablero	99

Ilustración 130- Introducción de masa superficial	100
Ilustración 131- Masa distribuida por cada área triangular	100
Ilustración 132- Carga distribuida debida a las rejillas para el estudio estático	101
Ilustración 133- Nudos rigidizados de los soportes	101
Ilustración 134- Celosías Warren con nudos rigidizados	102
Ilustración 135- Nudos rigidizados de travesaños con cordones de tablero.....	102
Ilustración 136- Carga debida a las rejillas.....	103
Ilustración 137- Carga debida al tablero.....	104
Ilustración 138- Carga distribuida representativa del grupo de personas	104
Ilustración 139- Diagramas de esfuerzos pasarela completa	105
Ilustración 140- Diagrama axiles y torsos sobre brazo interior	106
Ilustración 141- Diagrama de cortantes y flectores es ambas direcciones.....	107
Ilustración 142- Diagrama de tensiones normales	107
Ilustración 143- Diagrama axiles y torsos sobre brazo interior.....	108
Ilustración 144- Diagrama de cortantes y flectores es ambas direcciones.....	109
Ilustración 145- Diagrama de tensiones normales	109
Ilustración 146- Diagrama axiles y torsos sobre brazo interior.....	110
Ilustración 147- Diagrama de cortantes y flectores es ambas direcciones.....	111
Ilustración 148- Diagrama de tensiones normales	111
Ilustración 149- Diagrama axiles y torsos sobre brazo interior.....	112
Ilustración 150- Diagrama de cortantes y flectores es ambas direcciones.....	113
Ilustración 151- Diagrama de tensiones normales	113
Ilustración 152- Ubicación de la diagonal de estudio	114
Ilustración 153- Diagrama de axiles y torsos	115
Ilustración 154- Diagrama de cortantes y flectores en ambas direcciones	115
Ilustración 155- Diagrama de tensiones normales	116
Ilustración 156- Diagrama de axiles y torsos	117
Ilustración 157- Diagrama de cortantes y flectores en ambas direcciones	117
Ilustración 158- Diagrama de tensiones normales	118
Ilustración 159- Ubicación del cordón estudiado	119
Ilustración 160- Diagrama axiles y torsos.....	119
Ilustración 161- Diagrama de cortantes y flectores en ambas direcciones	120
Ilustración 162- Diagrama de tensiones normales	120
Ilustración 163- Diagrama axiles y torsos.....	121
Ilustración 164- Diagrama de cortantes y flectores en ambas direcciones	122
Ilustración 165- Diagrama de tensiones normales	122
Ilustración 166- Travesaño a estudiar.....	123
Ilustración 167- Diagrama de axiles y torsos	124
Ilustración 168- Diagrama de cortantes y flectores en ambas direcciones	124
Ilustración 169- Diagrama de tensiones normales	125
Ilustración 170- Diagrama de axiles y torsos	126
Ilustración 171- Diagrama de cortantes y flectores en ambas direcciones	126
Ilustración 172- Diagrama de tensiones normales	127
Ilustración 173- Travesaño a estudiar.....	128
Ilustración 174- Diagrama de axiles y torsos	129
Ilustración 175- Diagrama de cortantes y flectores en ambas direcciones	129

Ilustración 176-Diagrama de tensiones normales	130
Ilustración 177-Diagrama de axiles y torsores	131
Ilustración 178-Diagrama de cortantes y flectores en ambas direcciones	131
Ilustración 179-Diagrama de tensiones normales	132
Ilustración 180-Deformada con peso propio y la sobrecarga	133
Ilustración 181-Deformada con la fuerza F	133
Ilustración 182-Pandeo barandilla delantera ($\beta=71,15$)	134
Ilustración 183-Pandeo barandilla trasera ($\beta=73,09$)	134
Ilustración 184-Primer modo de vuelco ($\beta=20,59$)	135
Ilustración 185-Primer modo armónico de flexión sobre el plano ($f=4,356$ Hz)	136
Ilustración 186-Segundo modo armónico de flexión sobre el plano ($f=12,477$ Hz)	136
Ilustración 187- Vista en alzado y planta de la pasarela con la disposición de los acelerómetros con su dirección de medición	161
Ilustración 188- Aplicación android	164
Ilustración 189- Datos en documento .txt	165
Ilustración 190- Obtención de la frecuencia media en Excel	166
Ilustración 191- Valor entrada de frecuencia para que el programa reconozca	166
Ilustración 192- Evolución temporal y evolución en el eje X	167
Ilustración 193- Evolución en eje Y y el Z	167
Ilustración 194- Señal en el eje Z sin la tendencia lineal	167
Ilustración 195- FFT ejecutada	168
Ilustración 196- FFT con sus 5 picos más representativos	168
Ilustración 197- Dominancia del primer modo a 4,4861 Hz	168
Ilustración 198- Dominancia del segundo modo a 37,445 Hz	169
Ilustración 199-SAP2000 (pantalla de inicio del programa)	170
Ilustración 200-Opción de modelado para un nuevo modelo	171
Ilustración 201-Vía 1 y 2	171
Ilustración 202-Configuración malla	172
Ilustración 203-Zona trabajo y de visualización 3D	172
Ilustración 204-Plano de trabajo XZ	173
Ilustración 205-Modificación tamaño burbujas	173
Ilustración 206-Pantalla de trabajo limpia	174
Ilustración 207-Introducción de materiales	174
Ilustración 208-Características generales	174
Ilustración 209-Propiedades modificables	175
Ilustración 210-Agregar perfiles	175
Ilustración 211-Tipologías secciones	176
Ilustración 212-Perfiles librería "Euro.pro"	176
Ilustración 213-Añadir sección manualmente	177
Ilustración 214-Propiedades modificables perfil	177
Ilustración 215-Comandos de dibujo	177
Ilustración 216-Condiciones de contorno a nivel de nudo	178
Ilustración 217-Pasarela dibujada	178
Ilustración 218-Definición elemento área	178
Ilustración 219-Asignación masa puntual	179
Ilustración 220-Asignación masa lineal	179

Ilustración 221-Cargas puntuales en barra	179
Ilustración 222-Ruta de asignación de carga superficial.....	180
Ilustración 223-Menú para asignación del valor de la carga.....	180
Ilustración 224-Menú de configuración de los casos de carga	181
Ilustración 225-Tipos de estudios a realizar	181
Ilustración 226-Correr modelo	181
Ilustración 227- 1) Forma indeformada; 2) Deformada; 3) Esfuerzos/Reacciones..	182
Ilustración 228-Opción para modificar el mallado	182
Ilustración 229-Introducción de elementos de mallado	183
Ilustración 230-Opción para visualizar diagramas de esfuerzos.....	183
Ilustración 231-Menú desplegado y opción a marcar para los diagramas.....	184
Ilustración 232-Ventana de opciones de visualización	185
Ilustración 233-Visualización diagramas	186
Ilustración 234-Estructura dibujada	187
Ilustración 235-Opciones para asignar sección a las barras.....	188
Ilustración 236-Opciones de perfiles.....	188
Ilustración 237-Asignación de perfil 140.140.8 a montantes y cordones	189
Ilustración 238-Asignación de perfil 140.80.5 a las diagonales.....	189
Ilustración 239-Celosía Warren montada	189
Ilustración 240-Tabla de valores límite de garganta de soldadura dependientes del espesor de los perfiles que se unen.....	190
Ilustración 241-Introducir cordón de soldadura	190
Ilustración 242-Paredes seleccionadas para ser soldadas	191
Ilustración 243-Visualización del cordón de soldadura ejecutado.....	191
Ilustración 244-Módulo de simulaciones.....	192
Ilustración 245-Comienzo para el nuevo modelo	192
Ilustración 246-Análisis estático.....	193
Ilustración 247-Asignación material.....	193
Ilustración 248-Geometría fija	194
Ilustración 249-Nudos empotrados.....	194
Ilustración 250-Mallado celosía.....	195
Ilustración 251-Cargas aplicadas	195
Ilustración 252-Deformada de la estructura con tabla de desplazamientos	196
Ilustración 253-Deformada de la estructura con tabla de desplazamientos	196

Índice de tablas

Tabla 1- Comprobación de mediciones (en cm)	26
Tabla 2- Checklist.....	30
Tabla 3-Coeficientes amortiguamiento	45
Tabla 4-Relación entre frecuencias para los distintos casos	53
Tabla 5-Comparación resultados	58
Tabla 6-Comparación resultados con los experimentales	59
Tabla 7- Dimensiones secciones que conforman la celosía Warren.....	60
Tabla 8- Secciones de la pasarela	93
Tabla 9- Perfiles brazo tubular	95
Tabla 10-Comparativa entre flechas y frecuencias	137
Tabla 11- Acelerómetros con sus canales correspondientes	161
Tabla 12- Ficheros de cada ensayo	162
Tabla 13- Dimensiones secciones que conforman la celosía Warren	187
Tabla 14-Comparación de flechas para ambos casos entre SAP2000 y SolidWorks para el modelado 2D	197

1. Introducción

1.1- Justificación

Los puentes peatonales o pasarelas en sus inicios fueron ejecutados para sobrepasar canales de agua o atravesar un valle. A medida que se iba avanzando en el tiempo y con la llegada de los caminos ferroviarios, también se emplearon como pasos a distinto nivel para atravesarlos sin peligro alguno. También se les da uso para pasar por vías urbanas. Su construcción puede realizarse con un gran abanico de materiales, desde sus inicios con piedra o madera (*Ilustración 1*) como actualmente de acero, hormigón armado, materiales compuestos e incluso incorporándoles cristal.



Ilustración 1- Puente de bambú sobre el río Serayu (Java, Indonesia)

Pero cada vez se buscan diseños más sorprendentes y novedosos, y con ellos nuevas técnicas de construcción, tanto que podemos estar hablando de pasarelas fijas como móviles o rodantes como el “Rolling Bridge” (*Ilustración 3*) diseñado por Thomas Heatherwick. A partir de unos módulos triangulares que cuando se desenrolla a través de unas bombas hidráulicas da lugar a una estructura de tipología Warren. Todo esto da pie a problemáticas que necesitarán de un estudio minucioso como puede ser la cuantía de su amortiguamiento, las luces a salvar, entre otras.

Respecto al amortiguamiento, aspecto de especial interés en este Trabajo Fin de Grado, hay que tener en cuenta que las pasarelas deben tener un buen amortiguamiento ya no solo por el buen comportamiento de la estructura sino también por el bienestar de los usuarios. Esto quiere decir que al transitar sobre ellas no puede tener unas vibraciones excesivas ya que afectaría al confort, por tanto, además de cumplir la normativa para este tipo de construcciones especiales debe ser objeto de cumplimiento el Estado Último de Servicio (ELS).

En los últimos años además de hacer que se salven grandes luces y en lugares a unas alturas vertiginosas, se busca que también se integren todo lo posible en el medio en el que se encuentran. Un ejemplo claro de esto es el puente de vidrio de Zhangjiajie (*Ilustración 2*).

Con el avance de los años el cálculo de estas estructuras paso de ser a mano a emplear programas que a medida que avanzaba la tecnología éstos eran cada vez más potentes. Gracias a ellos se ha permitido aumentar la complejidad de estas y con un tiempo de cálculo muy reducido. Además, muchos de estos programas llevan incorporados la normativa vigente como es el CTE (Código Técnico de la Edificación) [1]. Algunos de estos programas son CypeCAD [2], Diamonds [3], ANSYS [4], SAP2000 [5], SolidWorks [6], etc. Todos ellos con una gran potencia de cálculo.



Ilustración 2- Puente de vidrio de Zhangjiajie (China)

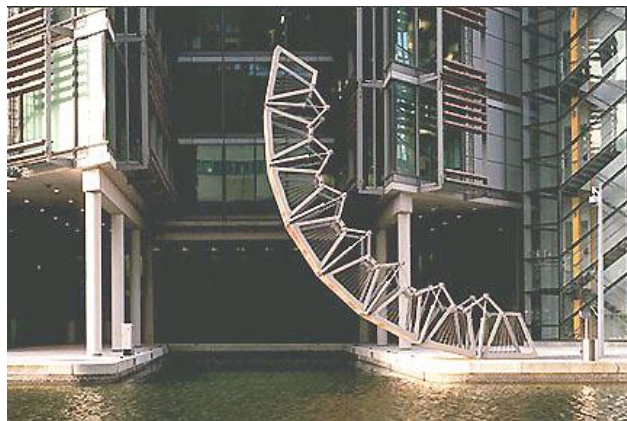


Ilustración 3- Rolling Bridge (Londres)

1.2-Objetivos

Cuando se decidió la realización de este TFG se plantearon una serie de objetivos más ambiciosos que otros en función de cómo iba evolucionando el susodicho. Lo que cabe esperar de este TFG se enumera a continuación.

- El aprendizaje de un software comercial como es el SAP2000 con el que modelaremos la pasarela a tratar en 2D y 3D.

- Realizar una serie de ensayos experimentales in situ en donde se sitúa la pasarela con equipos profesionales.

- Poder obtener unos resultados que demuestren que lo realizado experimentalmente y lo modelado con el software tiene una desviación muy pequeña, concluyendo con que se ha realizado un buen modelo.

- La observación de los dos primeros modos a flexión en el propio plano de la celosía excitando a la estructura por medio del del tránsito de viandantes.

- Simplificar el modelo 3D a otro, más sencillo, con una única viga compararlo con éste y con las expresiones teóricas.

2. Antecedentes

La pasarela peatonal se encuentra ubicada sobre la Ronda Interior Sur, VA-20 situada en las proximidades del PK-6,00 y la confluencia de las calles c/Arribes del Duero y la c/Picos de Europa del municipio de Valladolid (*Ilustración 4, 5 y 6*).

Esta pasarela es de carácter municipal, pero fue construida por la Junta de Castilla y León.

Actualmente la VA-20 o también denominada como “Avenida Zamora” es una calle de Valladolid.

La citada pasarela se incluía dentro del proyecto de construcción de la obra “*Ronda Interior Sur de Valladolid. Fase II desde la intersección C-601 a la intersección C-610*”. Su promotor fue la Junta de Castilla y León, mencionado anteriormente. El proyecto fue ejecutado entre los años 1999 y 2003 por la empresa CYOPSA.

El diseño de la pasarela está basado en la “Colección de Pasarelas Metálicas. Tipo PM-1”. Obras de paso de carreteras de 1979. MOPU. Dirección General de Carreteras [7].

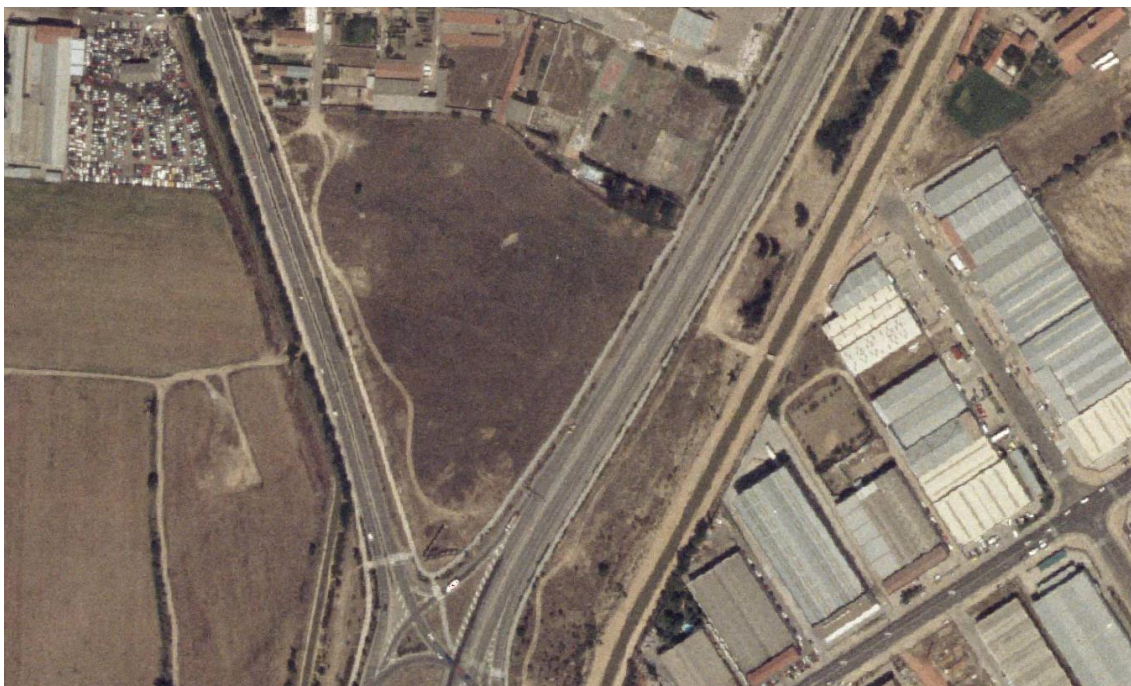


Ilustración 4- Vista aérea VA-20 en el PK-6,00 (1998-2003 Quinquenal)



Ilustración 5- Vista aérea VA-20 en el PK-6,00 (2004 Vuelo PNOA)

Aprobada por la Orden del 22 de septiembre de 1980 por el Ministerio de Obras Públicas y Urbanismos (MOPU). Este documento fue posteriormente modificado

por la Orden del 4 de junio de 1992 (BOE nº145, de 17 de junio). A día de hoy esta colección de pasarelas se encuentra anulada.

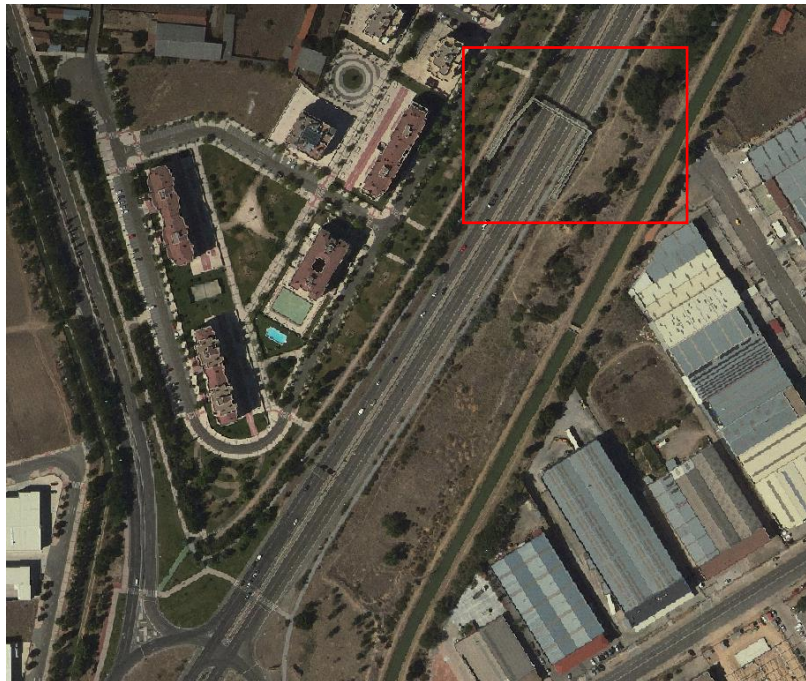


Ilustración 6- Vista aérea VA-20 en el PK-6,00 (2017 Vuelo PNOA)

3. Descripción de la pasarela

3.1-Descripción

La pasarela consta de dos zonas bien definidas. Tenemos la zona de rampas, que son dos, y la zona de paso de peatones. Las rampas se caracterizan por tener los accesos con una pendiente de 10° , una meseta intermedia horizontal y un tramo de paso. La luz total de las rampas es de 25 m. En segundo lugar, la zona de paso tiene una luz total de 35 m con un ancho útil para el tránsito de 2,36 m. Consta de 14 módulos de 2,5 m cada uno.

Toda ella ha sido construida con acero S275. Lleva una imprimación con su respectivo acabado a modo de protección frente a agentes atmosféricos.

La chapa de piso se apoya sobre un emparrillado de largueros y viguetas conformando así el tablero. Los largueros son tubos 80.60.6 y las viguetas 90.50.6. La chapa es de 6 m de espesor.

Las vigas principales son en celosía formadas por tubos y describiendo una tipología Warren. Por último, los soportes donde se sujeta la pasarela (la zona de paso peatonal) conforman cuatro brazos tubulares de sección variable que finalmente concurren en una misma sección, tubular también, cuadrada.

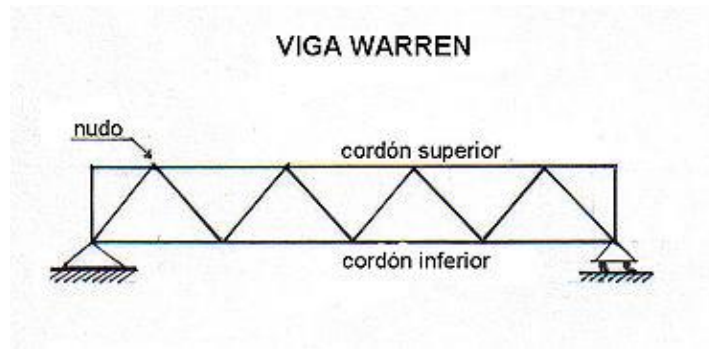


Ilustración 7- Celosía tipo Warren

A modo de cerramiento se han dispuesto en el área interior a cada uno de los triángulos una serie de rejillas que nos aportarán carga permanente sobre la pasarela.



Ilustración 8- Rejillas del cerramiento

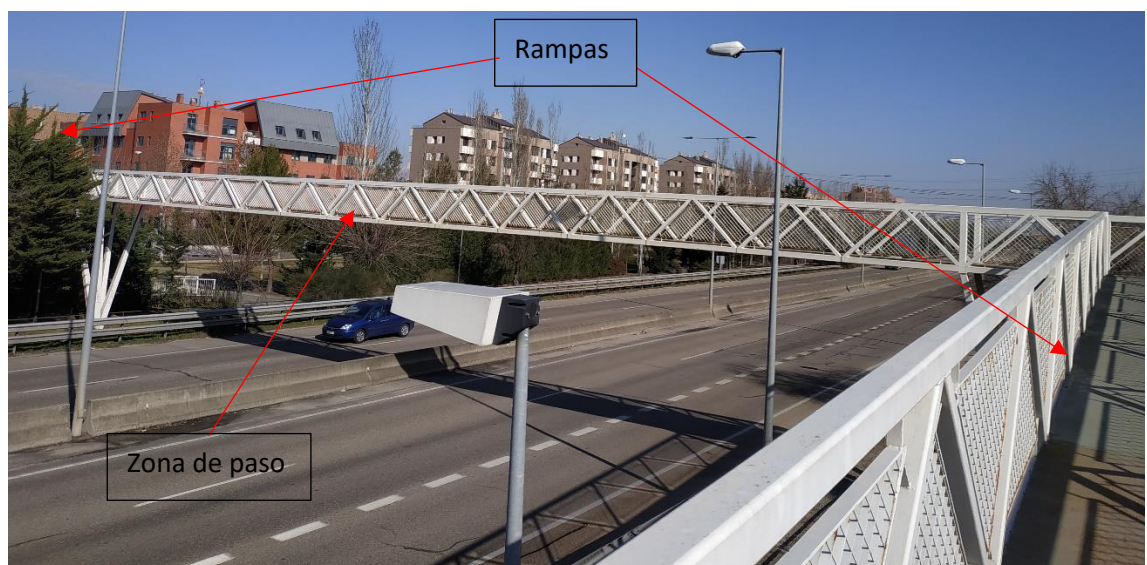


Ilustración 9- Partes pasarela

4. Antecedentes campaña experimental

Antes de empezar el diseño de la pasarela con SAP2000 se optó por hacer una comprobación del plano. Dicha comprobación consiste en ver lo que difiere la medida que nos proporcionaba el plano con la realidad, si se aprecia alguna discrepancia entre los módulos, altura entre chapa de paso y altura media de la barandilla y de las secciones que conforman la pasarela. Esto es debido a que, en gran cantidad de ocasiones, por no decir en la mayoría, en la ejecución de cualquier obra se van haciendo modificaciones de forma que avanza el proyecto. Por ello se quiso asegurar que todo estaba correcto.

Para ello se cogieron una serie de parámetros a medir como recoge la *Ilustración 10*. Se realizaron una serie de diez mediciones por cada elemento. Número mínimo para asegurar una cierta fiabilidad en las medidas. Luego se obtuvo su valor promedio y se comparó con el que se mostraba en el plano.

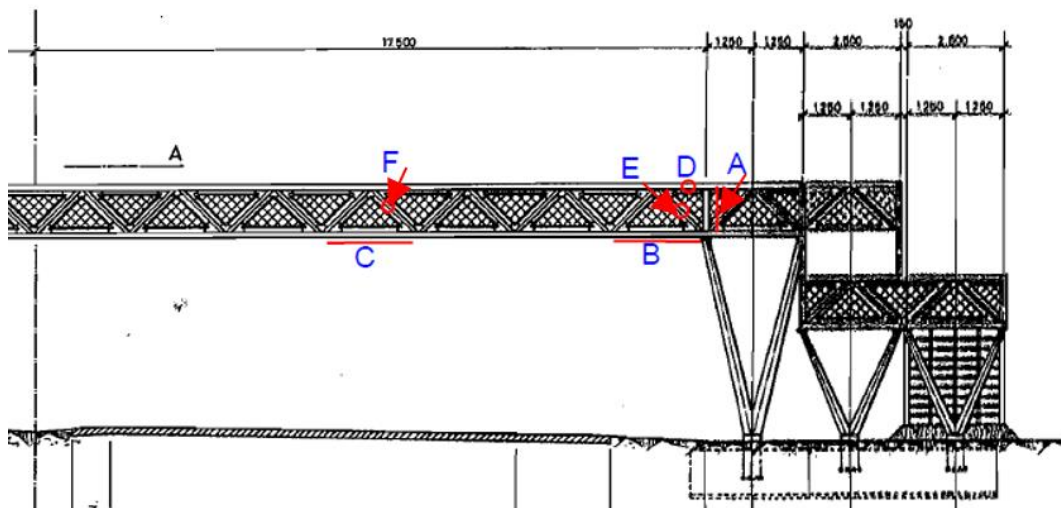


Ilustración 10- Zonas de medición

A continuación, se podrá observar que las secciones proporcionadas en el plano pueden considerarse correctas, a excepción de sus espesores ya que no es posible sin aparatos especiales conocer de cuanto se tratan por lo que se considerarán correctos. Se produce cierto error durante su medición ya que con un flexómetro no tenemos más que 1 milímetro de incertidumbre y su forma de medir muy rudimentaria.

Los resultados se muestran en la *Tabla 1-Comprobación de mediciones (en cm)*.

Tabla 1- Comprobación de mediciones (en cm)

	A	B	C	D(bxb)		E(bxh)		F(bxh)	
				b	b	h	b	b	h
	116,9	249,8	250,3	13,9	13,9	8	13,9	8	14,2
	117,1	250	250	13,9	13,9	8	13,9	7,9	14,1
	117,1	249,8	250	13,8	13,9	8	14,1	7,9	14,1
	116,8	250	250,1	13,9	13,9	8	14,1	8	14
	116,8	250	250,1	13,7	13,8	7,8	14	8	13,9
	116,8	250,1	250	13,9	13,9	7,8	14,1	8	14,1
	116,4	249,8	249,9	13,9	13,9	7,8	13,9	7,7	13,9
	116,6	249,8	249,8	13,8	13,9	8	14	7,8	14
	116,6	249,7	250,4	13,8	14	8,1	14,2	7,8	14
	116,5	249,1	250,2	14	13,9	8	14	7,9	13,8
Prom.	116,76	249,81	250,08	13,86	13,9	7,95	14,02	7,9	14,01
Real	118	250	250	14	14	8	14	8	14

5. Campaña experimental y resultados

5.1-Material empleado

5.1.1- Flexómetro

Usado para las comprobaciones de conformidad entre los planos y la obra.



Ilustración 11- Flexómetro de 8 metros

5.1.2- Placa de fuerza triangular (TFP)

Empleada para poder calcular la fuerza de excitación aplicada a la cuarta parte de la longitud del vano de la pasarela.

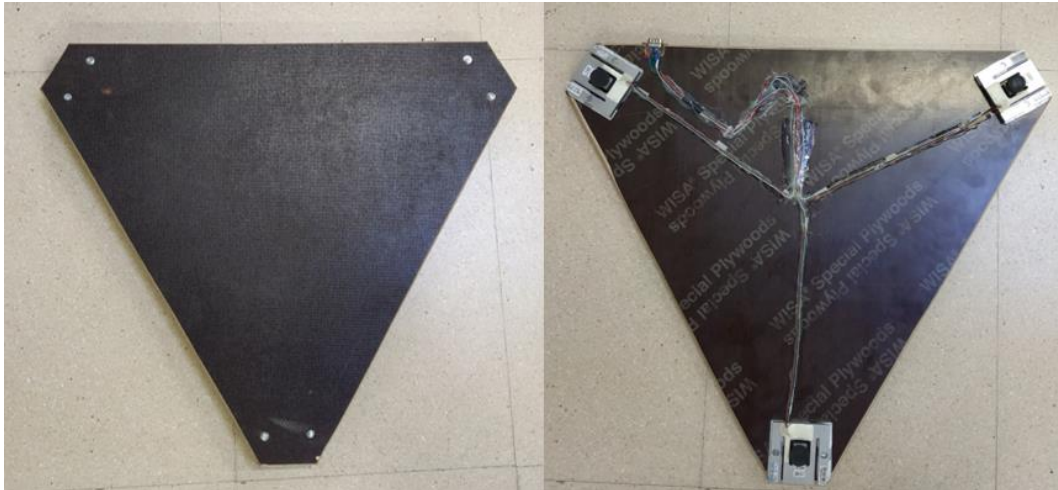


Ilustración 12- Placa de Fuerza Triangular (TFP)

5.1.3-Cableado

Los cables usados son de diversas longitudes. Se tiene el cable que se conectaba con la TFP con un adaptador específico de ésta. El resto distinguimos entre los que directamente se conectan a los acelerómetros y sus alargadores. Estos últimos son de tipo macho-hembra. Se usarán alargadores de 20, 25 y 50 m. Los cables macho-macho son de 5 y 10 m.



Ilustración 13- a) Cable TFP; b) Cable macho-macho (5 y 10 m); c) Alargador (20 y 25 m)



Ilustración 14- Alargador de 50 metros

5.1.4- Acelerómetros

Elemento más sensible de todos. Encargado de medir valores de aceleración sobre un único eje por lo que se dispondrán de tal forma que se pueda obtener valores de aceleración horizontal como vertical. Llevarán roscados un imán en su punta para poder fijarlo sobre la pasarela.



Ilustración 15- Acelerómetro MMF KS76C.100

5.1.5- SIRIUS HD-STG

Una vez que se conecte la SIRIUS HD-STG a un ordenador y se tengan todos los canales de entrada listos en el software comenzará a recibir toda la información. Luego todos estos datos se deberán procesar.

El equipo que se empleó disponía de un total de 16 canales, aunque no se usaron todos ellos. A partir de cables macho-macho con cierre de seguridad se conectó tanto a la TFP como a los distintos acelerómetros.



Ilustración 16- SIRIUS SD-STG

5.1.6-Telémetro BOSCH PLR 15

Instrumento de medición láser bastante preciso. Empleado para obtención de la flecha en el caso de las 4 personas sobre sección central de la pasarela. Sus dimensiones son de 10 x 3,6 x 2,3 cm.



Ilustración 17- Telémetro BOSCH PRL 15

5.1.7-Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI)

Se usará como fuente de alimentación durante todos los ensayos ya que en la pasarela no se dispone de forma alguna para conectarse a la red. En él se conectará el SIRIUS SD-STG.



Ilustración 18- Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI)

5.2-Experimentación sobre la pasarela

5.2.1-Preparación del equipo

Todos los materiales deben comprobarse que se encuentran en correcto funcionamiento y que se dispone de todos ellos. Se efectúa una *checklist* donde queda reflejado todo lo mencionado. Posteriormente se van colocando con cuidado en el baúl móvil.

Tabla 2- Checklist

Lista Material Salida Campaña					
MATERIAL	UNIDADES		DISPONIBLE	FUNCIONA	
Cables 5 m	12	2 rollos	SI	SI	
Cables 10 m	4	1 rollo	SI	SI	
Cables 20 m	1	1 rollo	SI	SI	
Cables 25 m	2	2 rollos	SI	SI	
Cables 50 m	5	5 rollos	SI	SI	
Cable TFP	1	1 rollo	SI	SI	
TFP	-	1	SI	SI	
Bases magnéticas	-	8	SI	SI	
Acelerómetros	-	8	SI	SI	
Adaptadores SIRIUS	-	8	SI	SI	
Generador eléctrico (SAI)	-	1	SI	SI	
Flexómetro 8m	-	1	SI	SI	
Telémetro	-	1	SI	SI	

En un baúl se llevó todo el equipo mostrado en la lista a la pasarela cuyo acceso se hacía a través de la c/Arribes del Duero. Antes de que se empezara a

proceder al despliegue de todo el material y a tirar cable previamente se estudió donde se iban a disponer cada uno de los acelerómetros para los distintos ensayos.

Se establecieron en puntos estratégicos de la pasarela la posición de los acelerómetros. En algunos puntos se decidió estudiar la aceleración en dos planos, es decir, en vertical y en horizontal. Éstos se dispusieron cada cuarto de la pasarela (comienzo del vano, a un cuarto, centro pasarela, a tres cuartos y al final).

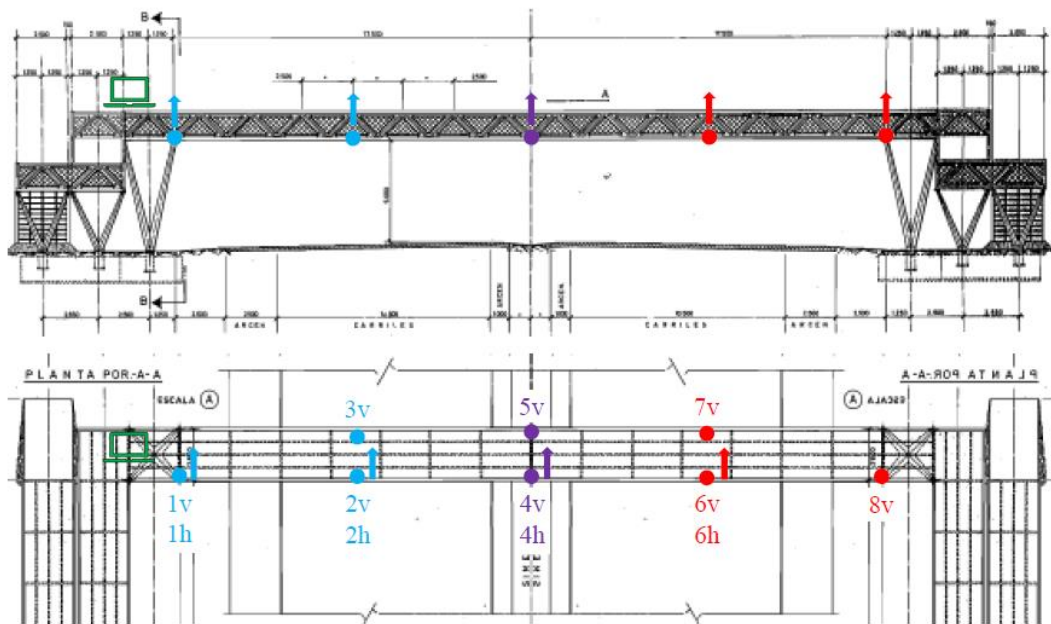


Ilustración 19- Posiciones de los acelerómetros

Una vez establecidas las posiciones se marcó con una tiza los distintos números, se puede apreciar en la *Ilustración 70*, para así una rápida identificación de los tramos. Se fijaron en sus posiciones a través de unas bases magnéticas.

Se comienza a desenrollar los alargadores de cable hasta las distintas posiciones ya que el cable que conecta al acelerómetro es de longitud reducida. Para tener todos los cables identificados desde su salida de la SIRIUS hasta el cable al que va conectado y, este cable, a su acelerómetro todos llevan una etiqueta con la posición que les correspondiera (*Ilustración 22*).

Todos los cables se fijaban al suelo con cinta de carrozero (*Ilustración 25 y 26*) para que no se enredaran y para que durante los distintos tránsitos sobre la pasarela se evitasen posibles tropiezos e incomodidades esquivándoles.

Los ensayos serán todos monitorizados con el ordenador al cuál se conectará el SIRIUS HD-STG (*Ilustración 23*).



Ilustración 20- Identificación sobre pasarela de los acelerómetros y en los planos en los van a trabajar



Ilustración 21- Alargadores de 50m a pleno uso conectados a los cables y al SIRIUS etiquetados

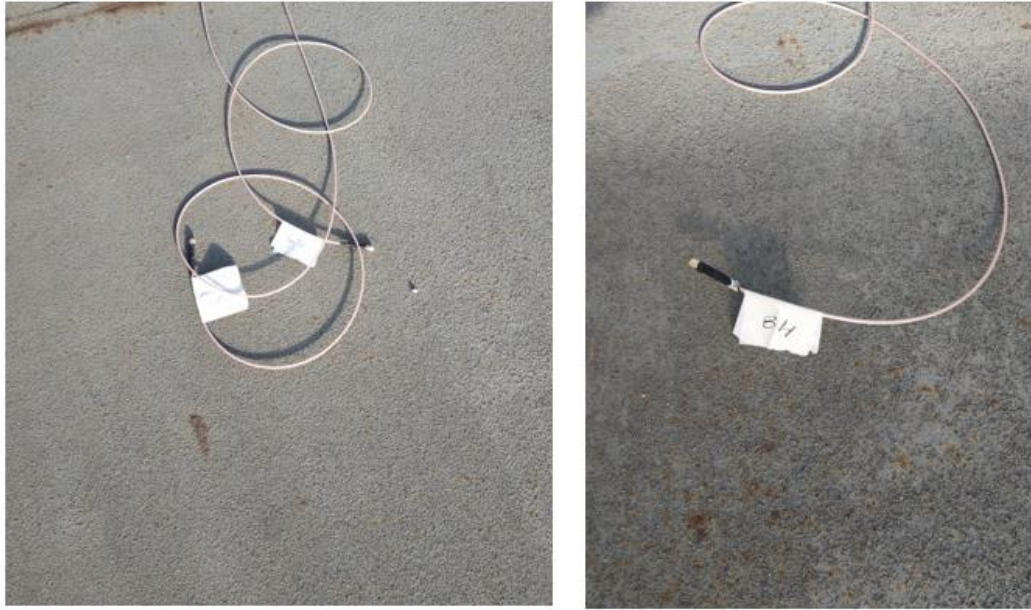


Ilustración 22- Identificación de los cables



Ilustración 23- Identificación cables en la entrada del SIRIUS HD-STG y, ésta, conectada al ordenador



Ilustración 24- TFP instalada



Ilustración 25- Acelerómetro 8V (vertical) colocado con cable fijado al suelo



Ilustración 26- Acelerómetros vertical y horizontal con cable fijado al suelo

5.2.2-Ensayos

Previamente a definir los ensayos practicados hay que hacer una distinción entre vibraciones libres y forzadas, ya que estas últimas se producen cuando se excita a la pasarela externamente durante un cierto periodo de tiempo. Uno de los aspectos que incomoda en este tipo de estructuras es el mal amortiguamiento que presentan, luego un aspecto que también se buscará es conocer a través de estos ensayos el coeficiente de amortiguamiento que presenta para los distintos modos.

Todos los ensayos se caracterizan en que son análisis modales. Se tiene como objetivo la obtención de las propiedades modales más características de la estructura. Desde sus frecuencias y formas modales hasta su amortiguamiento. A través de prácticas dinámicas (diversas formas de tránsito o excitación puntual sobre placa de carga) se realizará toda la experimentación. Además, se obtuvo el valor de la flecha a través de un medidor láser sobre el punto medio del vano cuando 4 personas se situaban sobre esa sección. El incremento de flecha fue de 2 mm.

Para comenzar ya con todo el equipo montado y dispuesto de tal manera que no produzca dificultades al tránsito se ejecuta un OMA (Ensayo Modal Operacional). Con este tipo de ensayo lo que se busca es obtener la información con el solo uso de las acciones ambientales. Estos efectos en todo tipo de obra

civil se deben principalmente a efectos del viento, el tráfico (factor muy importante por ser la VA-20 una zona de aglomeración de coches de manera continua ya que la pasarela se encuentra en las inmediaciones del hospital Río Hortega y del polígono San Cristobal).

Este tipo de ensayo se realiza para las dos configuraciones establecidas con las ubicaciones de ellos acelerómetros.

Tras la actuación para registrar la información relevante de los agentes ambientales se procede a registrar la respuesta con cargas conocidas. La técnica empleada para ello es gracias a los EMAs (Ensayos Modales Experimentales) donde se supondrá que la única fuerza de excitación es la provocada por las acciones humanas sobre la TFP. Como las acciones ambientales son imposibles de eliminar se asume que los resultados incluirán algo de ruido.

Por último, se procede con otras formas de excitaciones como tránsitos dinámicos andando y corriendo y, además, en algunos de ellos se tratará de marcar el paso a diferentes frecuencias.

El objetivo de este último grupo de ensayos será conocer el grado de cumplimiento del estado límite de servicio respecto a vibraciones inducidas por los tránsitos peatonales.

Los ensayos ejecutados sobre la TFP se realizaron para las dos configuraciones de acelerómetros disponibles. La que controla la mitad de pasarela más próxima al ordenador con la placa SIRIUS y, la segunda configuración, aquella que registra la información debida a la mitad más alejada. Como queda representado en la *Ilustración 19*.

Un total de 5 ensayos se realizaron sobre la TFP, de los cuales uno de ellos tuvo que ser abortado por la presencia de un transeúnte en pleno ensayo. En este tipo de ensayos in situ no es de extrañar que surjan este tipo de imprevistos. Finalmente se recogieron 3 ensayos sobre la configuración 1 y el restante sobre la configuración 2.

DEWESoft es el programa que se encarga de interpretar los datos que le llegan de los acelerómetros y de la TFP, cada acelerómetro por un canal distinto y la célula de carga por otro. Se configura para que registre a 500 muestras por segundo (S/s) y que con toda la información recogida se realicen un determinado número de medias. En cada ensayo se realizarán un número diferente de medias. Luego, para concluir, la información recogida esta lista para hacer el paso al dominio de la frecuencia.

El desarrollo de los ensayos con la TFP no fue más subirse sobre la placa y alterna varios tipos de movimientos (comúnmente denominados bouncings, como saltos sin despegar los pies) como se muestra en la *Ilustración 27*.



Ilustración 27- Instantánea a mitad del ensayo

Una vez finalizada la primera parte de la experimentación con la TFP se retira y se deja la pasarela libre al tránsito. Esto es debido a que la segunda parte de la experimentación tiene como objetivo la realización de distintas formas de circulación sobre la pasarela.

El grupo total en el ensayo es de 5 personas, luego se establecerán distintas situaciones de paso individual y grupales. Para comenzar la circulación sobre la pasarela será individual (*Ilustración 28*) pasando cada uno de los individuos excepto el responsable en vigilar el ordenador para una correcta respuesta por parte de los acelerómetros.

Las primeras circulaciones consisten en una ida y vuelta por el vano de la pasarela por el centro del tablero. La ida se ejecuta caminando a paso libre sin la ayuda de un metrónomo que marque una frecuencia determinada del paso. Una vez que se llega al final se esperan un par de segundos aproximadamente y se comienza a correr hasta haber retornado al punto de partida. Así hasta completar el recorrido las 4 personas escogidas para este ensayo. Algunos de las primeras circulaciones las vueltas también se hicieron caminando y

entrecruzándose sujetos a mitad de vano con parada simulando una situación real entre dos desconocidos saludándose.



Ilustración 28- a) Llegada a posición retorno tras cruce de dos integrantes (izquierda); b) Vuelta corriendo (derecha)

Todo el grupo, los 5 integrantes, se dispone a realizar un tránsito, aún sin metrónomo, con una distancia entre personas de aproximadamente un módulo de la pasarela, es decir, dos metros y medio. La idea es que en el momento que se encuentra todos a la vez circulando por la pasarela el paso del grupo sea el mismo sin coordinamiento alguno. El resultado no fue admisible por la mala sincronización entre los integrantes, luego no fue un ensayo concluyente.

Los ensayos que van a partir de ahora irán ayudados con un metrónomo, responsable de que se camine a un valor determinado de frecuencia. Además, ya no se respetará la propia circulación por el centro del tablero, sino que se circulará por el lateral marcado por las posiciones 1-2-4-6-8 de los acelerómetros.

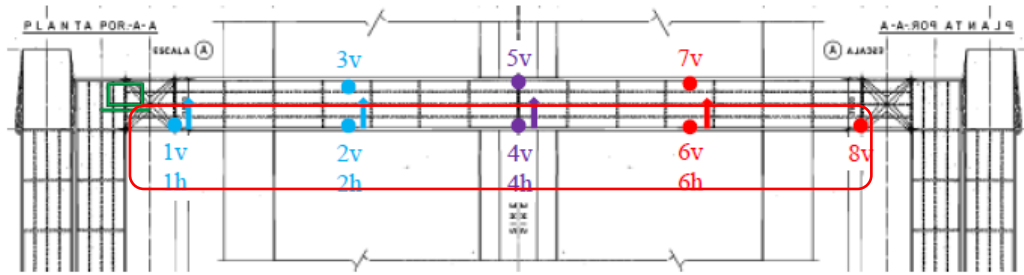


Ilustración 29- Lateral estimado para el tránsito

Uno de los integrantes realizará dos tránsitos a una frecuencia de 2,25 Hz. Se ha seleccionado dicha frecuencia de paso ya que los ensayos previos se saben que el primer modo de flexión vertical está aproximadamente a 4,5 Hz. Andando a 2,25 Hz (subamortiguado) se podrá excitar dicho modo. Nótese que no es posible caminar a 4,5 Hz. El primer tránsito ejecutado por el centro del tablero a paso “pato”, es decir, con las piernas bien abiertas y apoyando todo el peso del cuerpo sobre cada pierna al dar un paso, como si se tratase de un balanceo. Luego camina por el lateral descrito en la *Ilustración 29* a la frecuencia mencionada.

El resto de los integrantes realizan el mismo trayecto a 2,25 Hz por el lateral a continuación del primero. Luego repiten tránsito subiendo la frecuencia hasta los 4,5 Hz. Estos últimos con valor de frecuencia mayor se efectúan por el centro del tablero de la pasarela y no por el lateral como ocurría anteriormente.



Ilustración 30- Paso pato a 2,25 Hz

5.3-Procesamiento de resultados obtenidos

Únicamente se procesarán los resultados obtenidos para el ensayo “EMA22” (como se observa en el registro del cuaderno de campo). Éste hace referencia al ensayo sobre la TFP sobre la configuración 1 y a una velocidad de 500 muestras por segundo.

Todos los canales deben configurarse de manera correcta y comprobar que cada uno de los acelerómetros recoja de manera correcta la información al ser movido. Una vez que el DEWESoft tenga toda la configuración ya se está libre de recabar resultados. Para que toda señal sea fácilmente reconocible se asigna un criterio de colores.

Canales						
No ch.	Rango	Nombre de canal	Amplificador	Rango escalado	Min	Max
AI 1	500	1v	16049; DSI-ACC-0.16Hz (10000 mV) SN: D054BCA571	-de -970,3 a 970,3 m/s2	-0,2116	0,1902
AI 2	500	3v	16047; DSI-ACC-0.16Hz (10000 mV) SN: D054BCAC39	-de -970,3 a 970,3 m/s2	-3,227	2,902
AI 3	500	2h	16048; DSI-ACC-0.16Hz (10000 mV) SN: D054BC8194	-de -981,1 a 981,1 m/s2	-0,9007	1,107
AI 4	500	2v	15006; DSI-ACC-0.16Hz (10000 mV) SN: D054BCAC50	-de -966,6 a 966,6 m/s2	-3,116	2,958
AI 6	500	5v	16045; DSI-ACC-0.16Hz (10000 mV) SN: D054BCA570	-de -974,2 a 974,2 m/s2	-4,39	4,47
AI 7	500	4h	15008; DSI-ACC-0.16Hz (10000 mV) SN: D054BCAC3A	-de -975,7 a 975,7 m/s2	-0,6517	0,6375
AI 8	500	4v	15009; DSI-ACC-0.16Hz (10000 mV) SN: D054BCAC46	-de -978,6 a 978,6 m/s2	-4,238	4,209
AI 9	500	1h	15010; DSI-ACC-0.16Hz (10000 mV) SN: D054BCB082	-de -977,4 a 977,4 m/s2	-0,5402	0,3457
AI 11	500	TFP	TFP; SIRIUS-HD-STGS (Bridge; 2 mV/V ... 100 Hz (BU); Exc 5 V);...	-de -9760 a 9719 N	13,87	3514
Modal test (An...	500	Ave Count	Math 0 (Modal test)	-de 0 a 100	7	7
Modal test (An...	500	Info	Math 0 (Modal test)	-de 0 a 5	0	0
Modal test (An...	0,0	Reject last	Math 0 (Modal test)	Reject last de 0 a 1	0	0
Modal test (An...	0,0	Reset point	Math 0 (Modal test)	Reset point de 0 a 1	0	0
Modal test (An...	500	Coherence_1Z+/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de 0 a 1	0	0
Modal test (An...	500	TF_1Z+/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de -1 a 1	0	0
Modal test (An...	500	Coherence_2Z+/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de 0 a 1	0	0
Modal test (An...	500	TF_2Z+/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de -1 a 1	0	0
Modal test (An...	500	Coherence_2Y-/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de 0 a 1	0	0
Modal test (An...	500	TF_2Y-/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de -1 a 1	0	0
Modal test (An...	500	Coherence_3Z+/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de 0 a 1	0	0
Modal test (An...	500	TF_3Z+/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de -1 a 1	0	0
Modal test (An...	500	Coherence_4Z+/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de 0 a 1	0	0
Modal test (An...	500	TF_4Z+/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de -1 a 1	0	0
Modal test (An...	500	Coherence_4Y-/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de 0 a 1	0	0
Modal test (An...	500	TF_4Y-/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de -1 a 1	0	0
Modal test (An...	500	Coherence_5Z+/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de 0 a 1	0	0
Modal test (An...	500	TF_5Z+/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de -1 a 1	0	0
Modal test (An...	500	Coherence_6Z+/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de 0 a 1	0	0
Modal test (An...	500	TF_6Z+/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de -1 a 1	0	0
Modal test (An...	500	Coherence_6Y-/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de 0 a 1	0	0
Modal test (An...	500	TF_6Y-/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de -1 a 1	0	0
Modal test (An...	500	Coherence_7Z+/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de 0 a 1	0	0
Modal test (An...	500	TF_7Z+/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de -1 a 1	0	0
Modal test (An...	500	Coherence_8Z+/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de 0 a 1	0	0
Modal test (An...	500	TF_8Z+/ZZ+	Math 0 (Modal test)	-de -1 a 1	0	0
Formula 1 (Fó...	500	TFPpoor	*TFP*-894	-de -1,065E4 a 8825 N	-880,1	2620

Ilustración 31- Especificaciones del ensayo en la configuración del DEWESoft

Las señales de los distintos acelerómetros previo se muestran en la Ilustración 32.

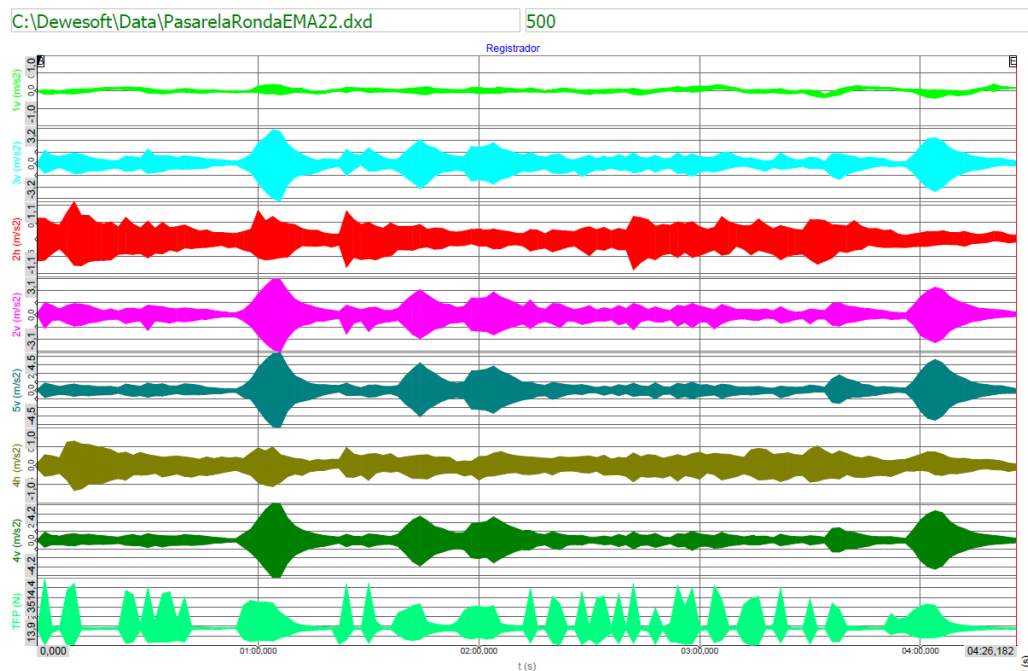


Ilustración 32- Respuestas temporales de los 7 acelerómetros y la TFP en la configuración 1

Las señales que aportarán interés y las cuales se van a estudiar son las del acelerómetro en la posición “2v” frente a la señal de la TFP.

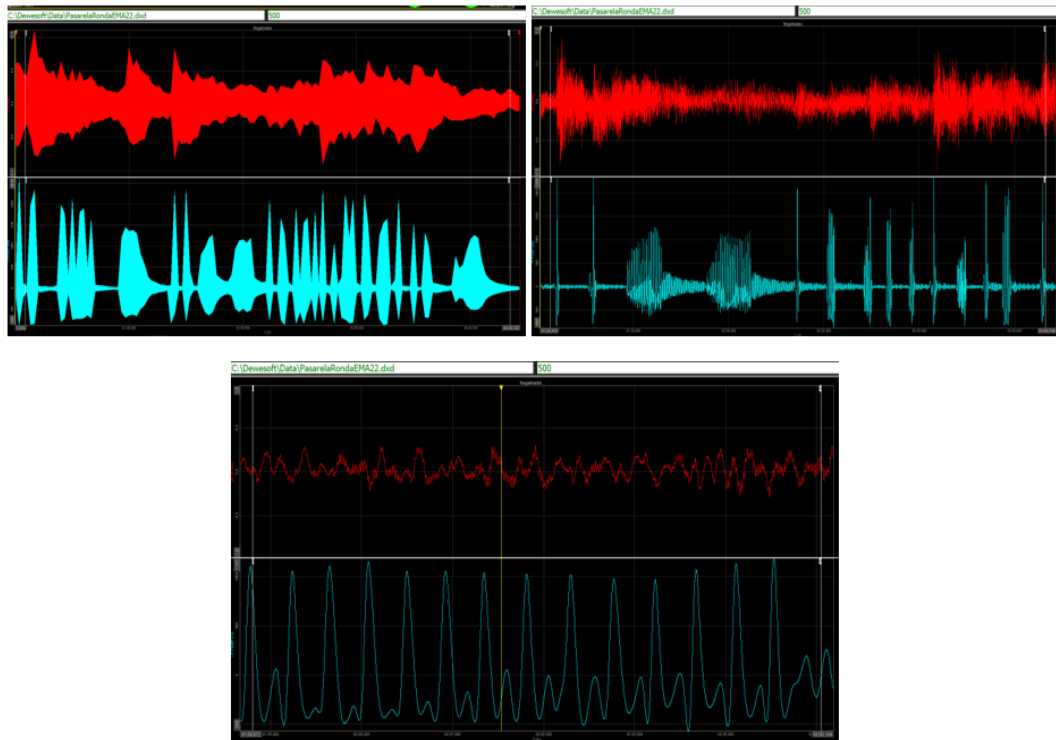


Ilustración 33- Acelerómetro 2v y señal respuesta de la TFP

Para apreciar la forma que adquieren estas señales se ha ido acotando el intervalo temporal. Es decir, las 3 secuencias de la *Ilustración 33* son zooms progresivos en el eje horizontal (tiempo).

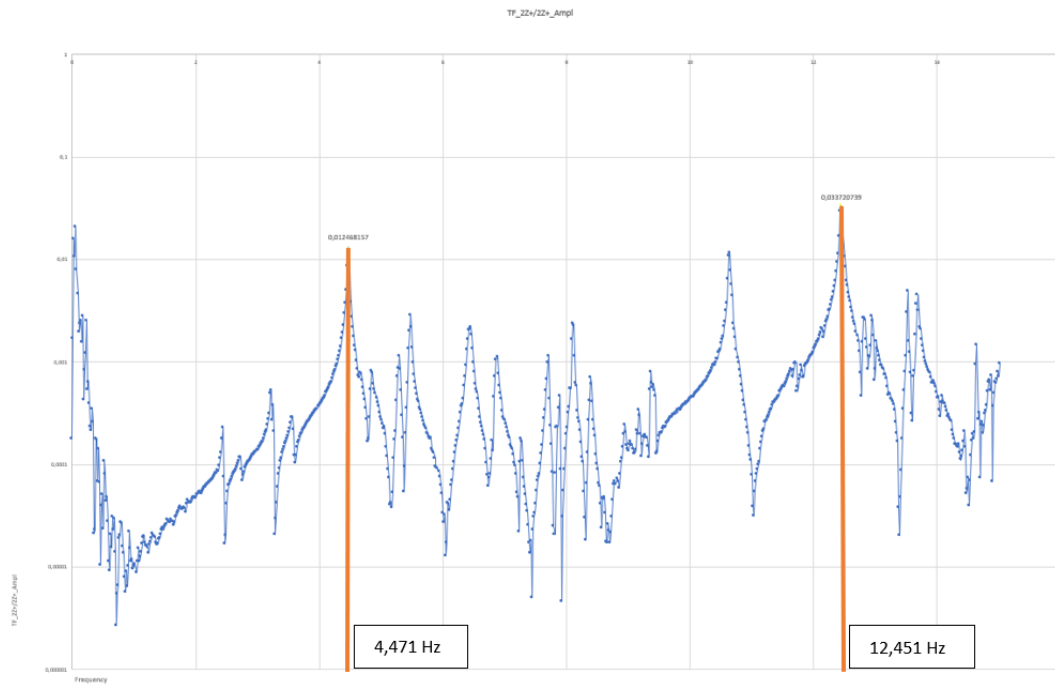


Ilustración 34- FRF en el punto 2v

Dentro del ensayo “EMA22” se va a analizar la correlación del acelerómetro 2v y la TFP. Se recoge bajo el nombre “TF_2Z+/2Z+” y técnicamente se conoce como “función respuesta en frecuencia” o FRF. El relacionar estas dos nos proporciona la gráfica de la *Ilustración 34*. Todos los datos recogidos se han exportado a un documento .xls y se han graficado. Lo que viene a representar es la relación entre las amplitudes respuesta de y salida del acelerómetro para cada fuerza de entrada en esa posición para cada valor de frecuencia.

Los dos picos que se encuentran marcados representan los dos primeros modos de flexión vertical que se están tratando en determinar. Se hallan a valores de frecuencia de 4,470 Hz y de 12,451 Hz. Pinchando en la aplicación Dewesoft sobre esos picos muestra una animación de la forma modal. Secuencias de dichas animaciones se muestran en las *Ilustraciones 35 y 36*.

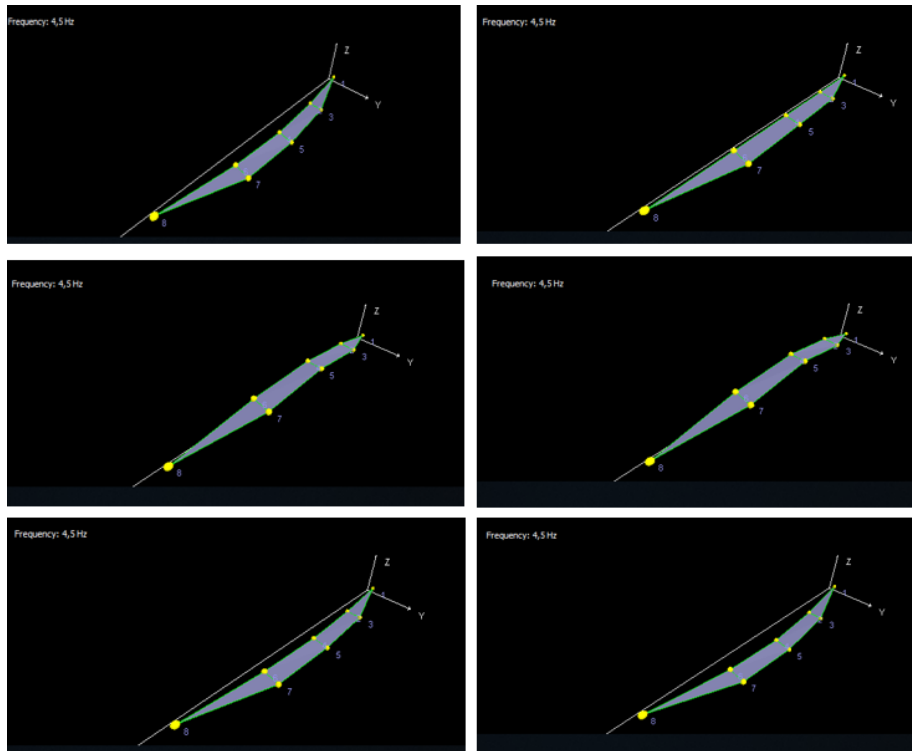


Ilustración 35- Evolución del primer modo ((4,470 Hz)

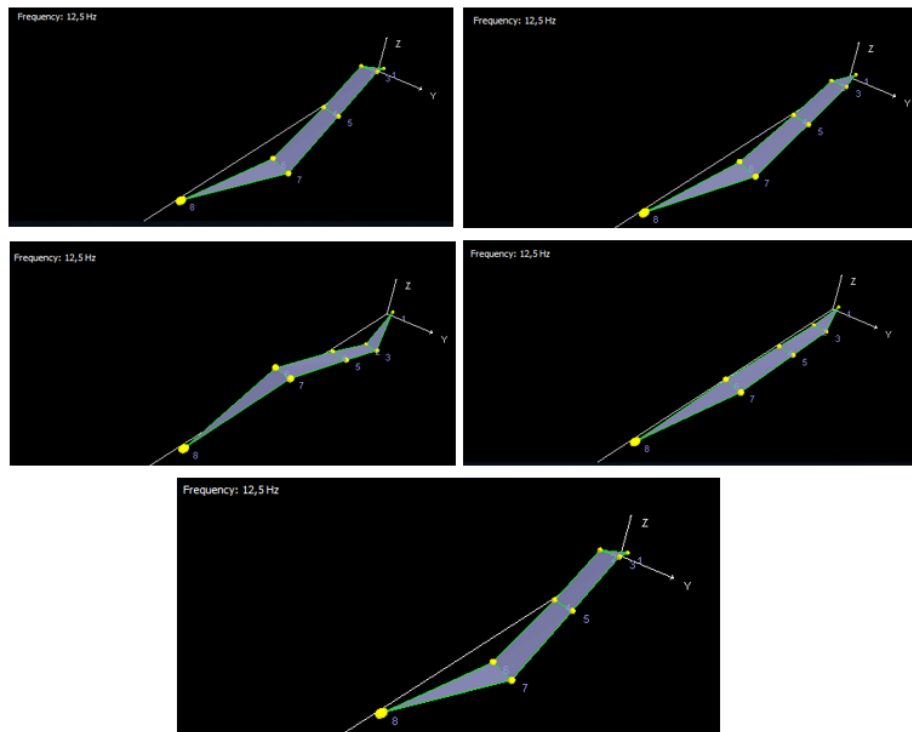


Ilustración 36- Evolución del segundo modo (12,451 Hz)

Además de la frecuencia a la que se producen los distintos modos, resulta interesante conocer como es el amortiguamiento en cada uno de éstos. Este valor lo da Dewesoft, resultando los coeficientes mostrados en la *Tabla 3*.

Tabla 3-Coeficientes amortiguamiento

Damping modo 1 (4,470 Hz)	0,302%
Damping modo 2 (12,451 Hz)	0,175%

Ambos son muy inferiores a 1. Luego, esto indica que es un sistema subamortiguado. El sistema oscila en torno su posición de equilibrio con un decaimiento muy lento de la amplitud.

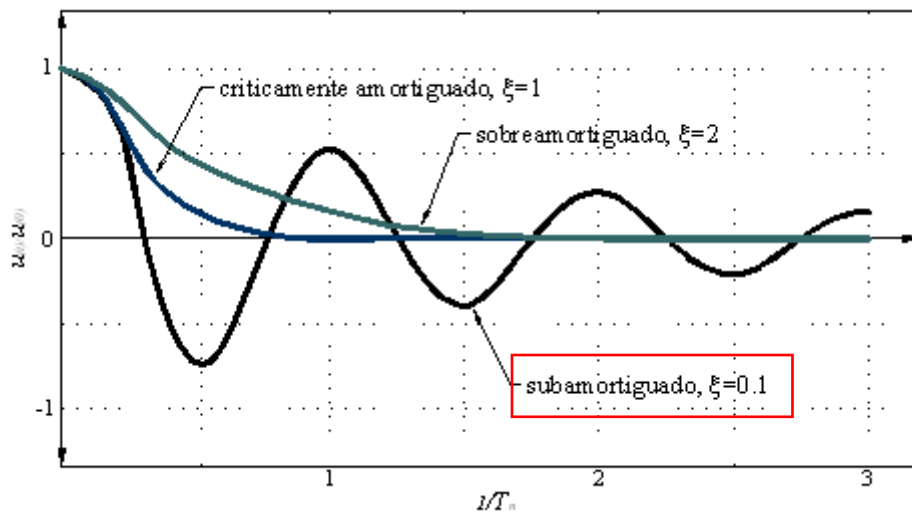


Ilustración 37- Forma del sistema subamortiguado

En la *Ilustración 37* se muestran las típicas respuestas libres tras una excitación unitaria. Nótese que el primer modo de flexión vertical tiene tan solo $\xi=0,00302$ de manera que la respuesta tardaría mucho más en amortiguarse que lo mostrado en dicha ilustración para $\xi=0,1$. Este tipo de comportamientos muy poco amortiguados son típicos de estructuras esbeltas metálicas y son la razón por las que el estudio que se está llevando a cabo es de interés.

6. Planteamiento simplificado

El ejemplo más aclaratorio y el que siempre se ha explicado ha sido el caso de una viga biapoyada o biempotrada (*Ilustración 38*). Esto es por el juego que puede dar por muy simple que parezca el ejemplo. Se estudiará solamente el estudio del caso estático y del modal ya que en este Trabajo Fin de Grado no procede comentar otros aspectos.

Se representan los dos modelos ya que la estructura real se encuentra en una situación intermedia, es decir, no es ni biapoyada ni biempotrada. Esto quiere decir que los apoyos se comportan como elásticos.

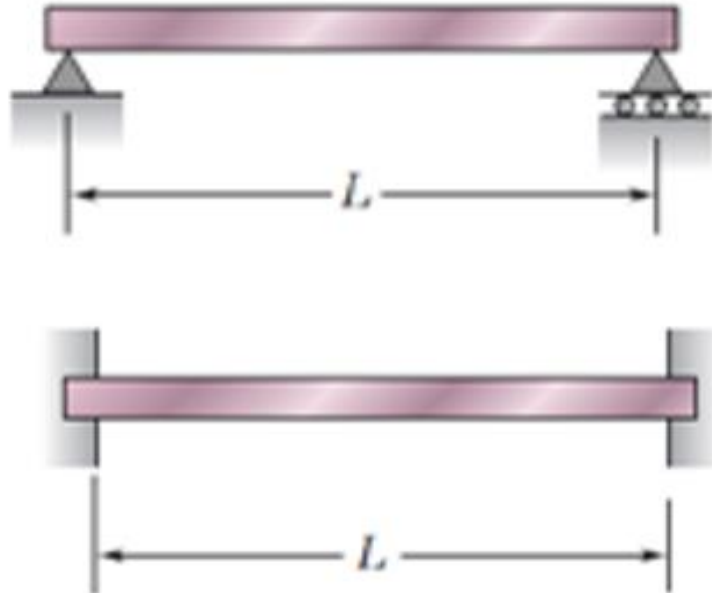


Ilustración 38- Viga biapoyada y biempotrada

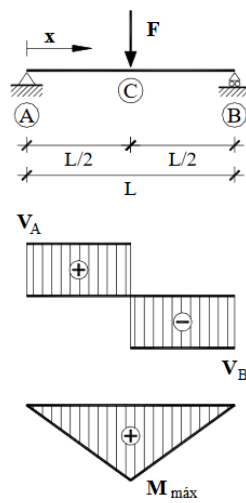
6.1-Análisis estático

Este tipo de ejemplo ya ha sido estudiado para gran multitud de casos por lo que para casos de carga aplicada en una sección determinada podemos encontrarlo en cientos de prontuarios. En estos ya están calculados sus reacciones como el valor de flecha máxima. En las *Ilustraciones 39, 40, 41 y 42* se muestran las expresiones genéricas para los distintos casos.

El incremento de flecha que se obtuvo en el capítulo anterior fue de 2 mm para el caso de carga debido a 4 peatones aplicada en el punto medio siendo así dónde se obtiene el valor de flecha máxima.

Para poder obtenerse el valor de flecha en el punto medio se empleará un medidor láser.

VIGA SIMPLE APOYADA: carga puntual F centrada.



Reacciones y solicitaciones

Reacciones: $R_A = R_B = \frac{F}{2}$

Cortantes: $V_{AC} = \frac{F}{2}$ $V_{CB} = -\frac{F}{2}$

Flectores: $M_{AC} = \frac{F}{2}x$ $M_{CB} = \frac{F}{2}(L-x)$

$M_{\text{máx}} = M_C = \frac{FL}{4}$ para $x = \frac{L}{2}$

Deformaciones

Giros: $\varphi_A = -\frac{FL^2}{16EI}$ $\varphi_B = \frac{FL^2}{16EI}$ $\varphi_C = 0$

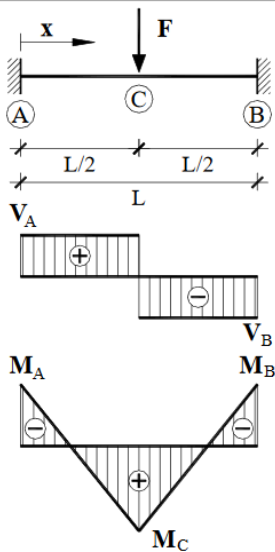
Elástica: $y_{AC} = \frac{FL^2x}{16EI} \left(1 - \frac{4x^2}{3L^2}\right)$ $y_{CB} = \frac{FL^2(L-x)}{12EI} \left(\frac{3}{4} - \frac{(L-x)^2}{L^2}\right)$

Flecha máxima:

$$y_{\text{máx}} = y_C = \frac{FL^3}{48EI} \quad \text{para } x = \frac{L}{2}$$

Ilustración 39- Viga biapoyada con carga puntual centrada

VIGA SIMPLE EMPOTRADA: carga puntual F centrada.



Reacciones y solicitaciones

Reacciones: $R_A = R_B = \frac{F}{2}$

Cortantes: $V_{AC} = \frac{F}{2}$ $V_{CB} = -\frac{F}{2}$

Flectores: $M_{AC} = \frac{FL}{8} \left(4\frac{x}{L} - 1\right)$ $M_{CB} = \frac{FL}{8} \left(3 - 4\frac{x}{L}\right)$

$M_A = M_B = -\frac{FL}{8}$ $M_{\text{máx}} = M_C = \frac{FL}{8}$ para $x = \frac{L}{2}$

Deformaciones

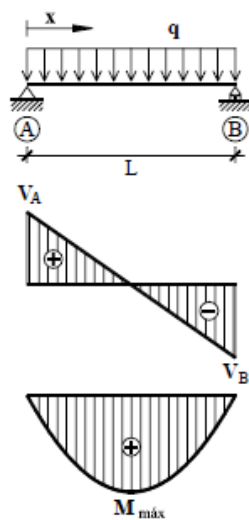
Elástica: $y_{AC} = \frac{FLx^2}{48EI} \left(3 - 4\frac{x}{L}\right)$ $y_{CB} = \frac{F(L-x)^2}{48EI} (4x - L)$

Flecha máxima:

$$y_{\text{máx}} = y_C = \frac{FL^3}{192EI} \quad \text{para } x = \frac{L}{2}$$

Ilustración 40- Viga biempotrada con carga puntual centrada

VIGA SIMPLE APOYADA: carga uniforme q en todo el vano.



Reacciones y solicitaciones

Reacciones: $R_A = R_B = \frac{qL}{2}$

Cortantes: $V_{AB} = q\left(\frac{L}{2} - x\right)$ $V_A = -V_B = \frac{qL}{2}$

Flectores: $M_{AB} = \frac{qx}{2}(L-x)$

$M_{\max} = \frac{qL^2}{8}$ para $x = \frac{L}{2}$

Deformaciones

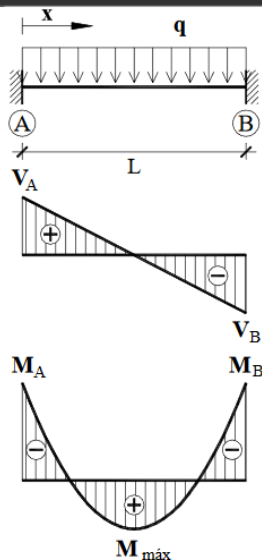
Giros: $\varphi_A = -\frac{qL^3}{24EI}$ $\varphi_B = \frac{qL^3}{24EI}$

Elástica: $y_{AB} = \frac{qx}{24EI}(x^3 - 2Lx^2 + L^3)$

Flecha máxima: $y_{\max} = \frac{5qL^4}{384EI}$ para $x = \frac{L}{2}$

Ilustración 41- Viga biapoyada con carga distribuida

VIGA SIMPLE EMPOTRADA: carga uniforme q en todo el vano.



Reacciones y solicitaciones

Reacciones: $R_A = R_B = \frac{qL}{2}$

Cortantes: $V_{AB} = q\left(\frac{L}{2} - x\right)$ $V_A = -V_B = \frac{qL}{2}$

Flectores: $M_{AB} = -\frac{q}{12}(L^2 - 6Lx + 6x^2)$ $M_A = M_B = -\frac{qL^2}{12}$

$M_{\max} = \frac{qL^2}{24}$ para $x = \frac{L}{2}$ $M_x = 0$ para $x = 0,2113L$

Deformaciones

Elástica: $y_{AB} = \frac{qL^4}{24EI}\left(\frac{x}{L} - \frac{x^2}{L^2}\right)^2$

Flecha máxima: $y_{\max} = \frac{qL^4}{384EI}$ para $x = \frac{L}{2}$

Ilustración 42-Viga biempotrada con carga distribuida

También hay que tener en cuenta el peso propio de la pasarela que indirectamente ya genera una flecha determinada, pero que es imposible de medir.

El valor de estas flechas en ciertos casos puede llegar a ser un factor bastante preocupante, por eso hay que tener en todo momento presente la normativa. Ésta dirá que valores máximos y admisibles son en los que tiene que oscilar la flecha de la pasarela.

Con las expresiones correspondientes a la carga distribuida mostradas en las Ilustraciones 41 y 42 se podrá hacer la comprobación tensional bajo la máxima

carga considerada en el proyecto, que se corresponde con el caso de la sobrecarga de uso junto al peso propio.

6.2-Análisis modal

El comportamiento dinámico de una estructura es uno de los aspectos con especial interés para su estudio. Hay que tener sumo cuidado cuando se aplica una carga armónica con una frecuencia muy próxima a la frecuencia natural de la estructura ya que de ser así podría generar tales oscilaciones que pudieran llegar al colapso de ésta, o bien, de no colapsar, reducir su vida media en fatiga.

Los modos de vibración son característicos de cada estructura. Para el caso de una cuerda vibrante se muestra en la *Ilustración 43*.

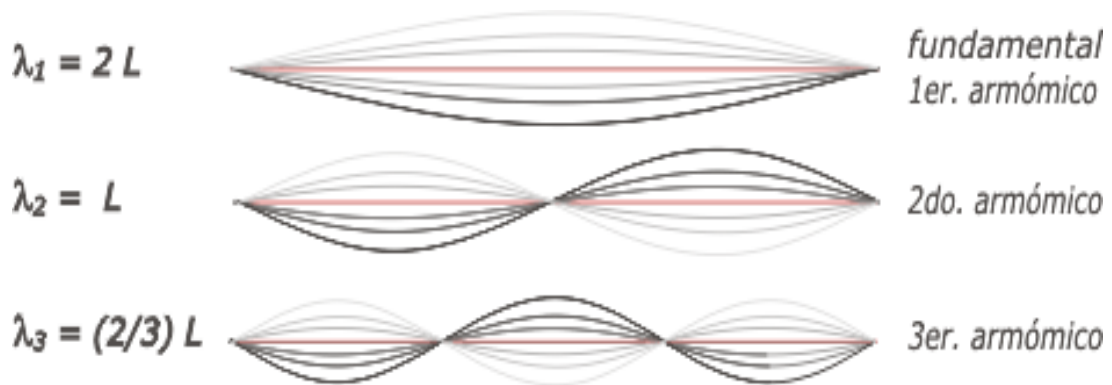


Ilustración 43- Tres primeros modos armónicos

En ingeniería civil son objeto de interés los primeros modos por sus bajas frecuencias.

También la tipología y material de las secciones juegan un papel importante ya que la frecuencia es una función de su inercia (I) y módulo de elasticidad (E). También depende de la masa por unidad lineal (ρ). Concretamente responde a la fórmula siguiente,

$$f_i(\text{Hz}) = \frac{\lambda_i^2}{2\pi L^2} \left(\frac{EI}{\rho} \right)^{1/2}$$

Se obtendrán los valores de los dos primeros modos tanto para el caso de la situación de biapoyada como el de la biempotrada. Se usarán las expresiones analíticas de la *Ilustración 44*.

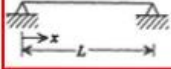
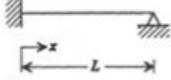
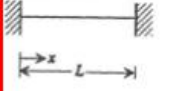
Boundary Conditions	$\lambda_i, i = 1, 2, 3, \dots$	Mode Shapes	$\beta_i, i = 1, 2, 3, \dots$
1. Pinned-pinned 	$i\pi$	$\sin \frac{i\pi x}{L}$	
2. Fixed-pinned 	3.92660231 7.06858275 10.21017612 13.35176878 16.49336143 $(4i + 1)\pi/4, i > 5$	$\cosh \frac{\lambda_i x}{L} - \cos \frac{\lambda_i x}{L} - \beta_i \left(\sinh \frac{\lambda_i x}{L} - \sin \frac{\lambda_i x}{L} \right)$	$\frac{\cosh \lambda_i - \cos \lambda_i}{\sinh \lambda_i - \sin \lambda_i}$
3. Fixed-fixed 	4.73004074 7.85320462 10.99560790 14.13716550 17.27875970 $(2i + 1)\pi/2, i > 5$	$\cosh \frac{\lambda_i x}{L} - \cos \frac{\lambda_i x}{L} - \beta_i \left(\sinh \frac{\lambda_i x}{L} - \sin \frac{\lambda_i x}{L} \right)$	$\frac{\cosh \lambda_i - \cos \lambda_i}{\sinh \lambda_i - \sin \lambda_i}$

Ilustración 44-Expresiones para cálculo de las diversas frecuencias

6.3-Viga equivalente

Los parámetros referidos al módulo de elasticidad y a la masa vienen definidos en [6].

$$E = 2,1 * 10^{11} Pa$$

$$m = 16.000 kg$$

$$L = 35 m$$

El último parámetro que estimar es la masa por unidad lineal,

$$\rho = \frac{m}{L} = \frac{16.000}{35} = 457,142 \frac{kg}{m}$$

6.3.1-Sección de la viga equivalente

La sección de la viga se asemejará a un perfil genérico de alma llena, es decir, un perfil donde su masa únicamente se concentra en sus alas dejando el alma con un espesor infinitamente pequeño. El área viene de la suma de las áreas de los cuatro cordones de la pasarela sin tener en cuenta los cordones del tablero. El canto del perfil es igual a la distancia entre cordones (líneas medias). La inercia se obtendrá aplicando Steiner.

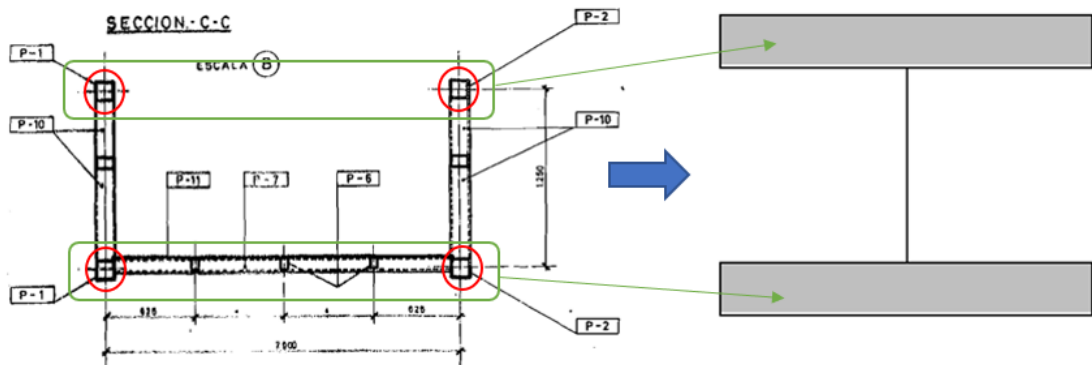


Ilustración 45-Sección viga equivalente

Luego las propiedades de la nueva sección son las siguientes,

$$A = 4 * A_{140.140.8} = 4 * 4,22 * 10^{-3} = 1,688 * 10^{-2} m^2$$

$$I = 2 * \left(2 * \left(I_{140.140.8} + 2 * A_{140.140.8} * \left(\frac{h}{2} \right)^2 \right) \right)$$

$$= 2 * (2 * (0 + 2 * 4,22 * 10^{-3} * 0,625^2)) = 6,593 * 10^{-3} m^4$$

$$h = 1,25 m$$

$$W = \frac{I}{\left(\frac{h}{2} \right)} = \frac{6,593 * 10^{-3}}{1,25/2} = 1,0548 * 10^{-2} m^3$$

Éstas serán las propiedades que se usarán en las fórmulas presentadas anteriormente y, también, en la correspondiente simulación mediante SAP. En la *Ilustración 45* se muestra la forma de generar una sección a partir de propiedades geométricas.

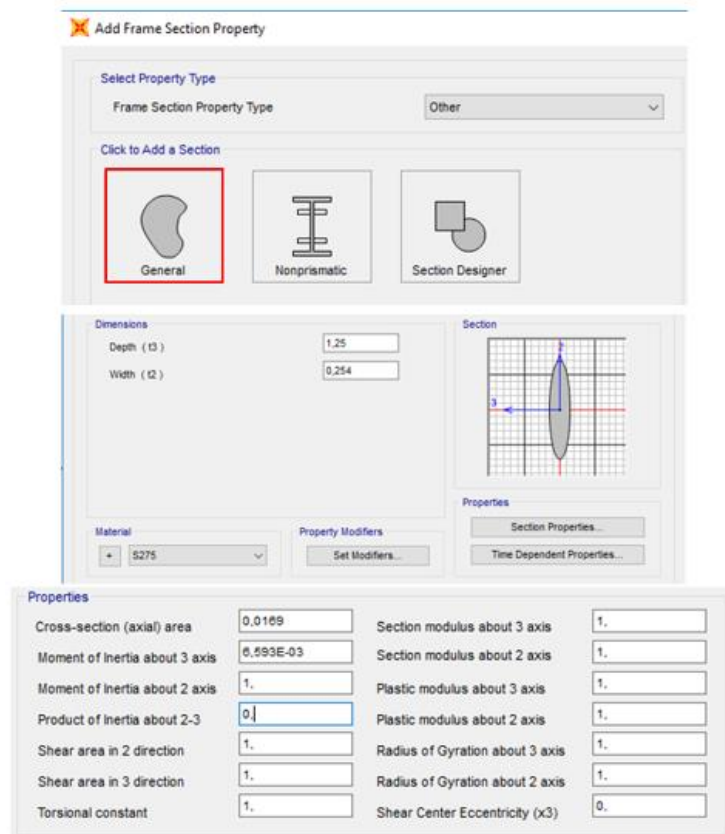


Ilustración 46-Crear sección genérica con parámetros geométricos

6.3.2-Frecuencias

- Caso biapoyada:

$$f_{modo\ 1} = \frac{(1 * \pi)^2}{2\pi * 35^2} \left(\frac{EI}{\rho}\right)^{1/2} = \frac{1,57}{35^2} \left(\frac{EI}{\rho}\right)^{1/2} = 2,2304\ Hz$$

$$f_{modo\ 2} = \frac{(2 * \pi)^2}{2\pi * 35^2} \left(\frac{EI}{\rho}\right)^{1/2} = \frac{6,283}{35^2} \left(\frac{EI}{\rho}\right)^{1/2} = 8,9259\ Hz$$

- Caso biempotrada:

$$f_{modo\ 1} = \frac{(4,73004074)^2}{2\pi * 35^2} \left(\frac{EI}{\rho}\right)^{1/2} = \frac{3,5608}{35^2} \left(\frac{EI}{\rho}\right)^{1/2} = 5,0586\ Hz$$

$$f_{modo\ 2} = \frac{(7,85320462)^2}{2\pi * 35^2} \left(\frac{EI}{\rho}\right)^{1/2} = \frac{9,81553}{35^2} \left(\frac{EI}{\rho}\right)^{1/2} = 13,9444\ Hz$$

Los resultados que se obtuvieron de forma experimental son los que se muestran a continuación,

$$f_{modo\ 1} = 4,470\ Hz$$

$$f_{modo\ 2} = 12,451\ Hz$$

Se sacará la relación que aparece entre los dos primeros modos y se compararán las dos situaciones con lo experimental.

Tabla 4-Relación entre frecuencias para los distintos casos

	Biapoyado	Biempotrado	Experimental
Relación f_2/f_1	4,0019	2,7565	2,7855

Se aprecia una alta proximidad del resultado experimental con el que se ha calculado para el caso biempotrado. Es tan próximo que se podría decir que la pasarela se encuentra prácticamente empotrada en sus extremos.

6.3.3- Estimación dl estado tensional ante la sobrecarga de uso

Como bien se comentó previamente la longitud de la viga se mantiene constante, y ésta será de 35 metros. La masa debe ser exactamente la misma que la de toda la pasarela siendo de aproximadamente 16.000 kilogramos. Al conservarse el mismo tipo de acero, el S275, el módulo de Young también es el mismo. En cambio, la densidad no será de 7.850 kg/m^3 , sino que se hacen ajustes en ella hasta que el sumatorio de las reacciones den como resultado el valor de la masa total. Finalmente se obtiene un valor de $27.049,8725 \text{ kg/m}^3$.

Las cargas que se tienen en cuenta son distribuidas en la totalidad de la viga. Éstas serán la referida al peso propio y otra debida a la sobrecarga de uso. Ambas se multiplicarán por un coeficiente ponderador que rige la normativa. A la carga de uso se le multiplica por el ancho de la pasarela que son 2,50 m para pasar así a una carga lineal.

$$q_{PP} = \frac{\text{masa} * \text{gravedad}}{\text{longitud viga}} = \frac{16.000 * 9,81}{35} = 4.484,571 \frac{N}{m}$$

$$q_{USO} = 400 \frac{kg}{m^2} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 2,50 m = 9.810 \frac{N}{m}$$

Los ponderadores proporcionados por el CTE son de 1,5 para la sobrecarga de uso y de 1,35 para el peso propio.

$$\gamma_{PP} = 1,35 ; \gamma_{USO} = 1,50$$

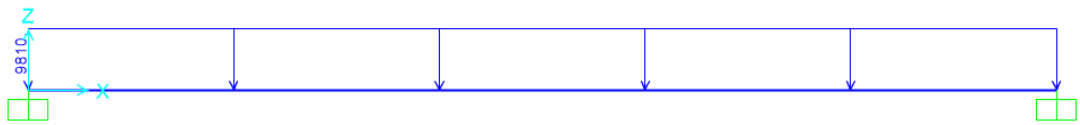


Ilustración 47-Disposición de la sobrecarga de uso

Para la combinación entre el peso propio y la sobre carga de uso se generará una combinación de carga que recogerá cada uno de los patrones (peso propio y sobrecarga de uso) multiplicados por sus ponderadores.

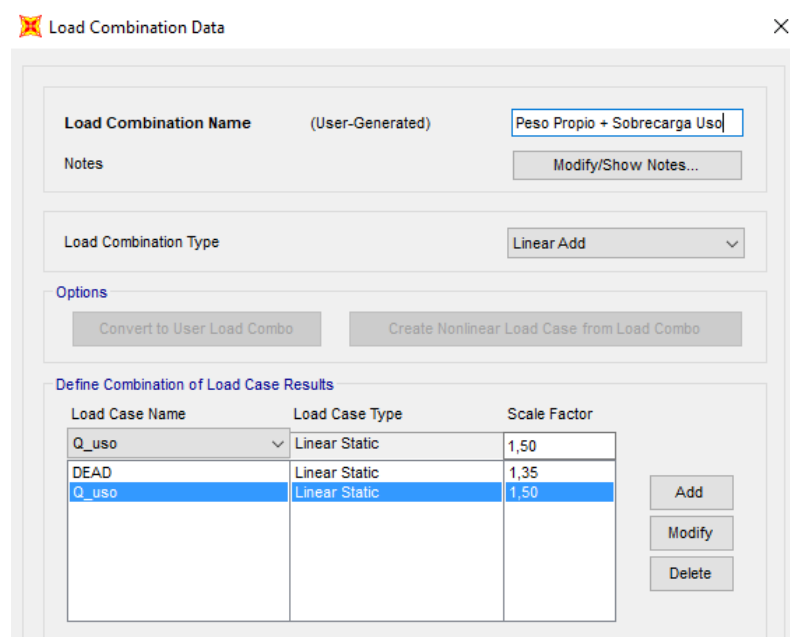


Ilustración 48-Combinación de cargas

6.3.3.1-Resultados con formulación matemática

Se estudiará tanto para el caso de viga biapoyada como para el de viga biempotrada.

- Caso 1: Biapoyada

$$M_{max} = \frac{(q_{PP} * \gamma_{PP} + q_{USO} * \gamma_{USO}) * L^2}{8}$$

$$= \frac{(4.764,857 * 1,35 + 9.810 * 1,5) * 35^2}{8} = 3.238.219,65 \text{ Nm}$$

Por tanto,

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W} = \frac{3.238.219,65}{1,0548 * 10^{-2}} = 306.998.449,9 \text{ Pa} = 306,998 \text{ MPa}$$

Luego, la flecha es tal que,

$$\delta = \frac{5 * (q_{PP} * \gamma_{PP} + q_{USO} * \gamma_{USO}) * L^4}{384 * E * I}$$

$$= \frac{5 * (4.764,857 * 1,35 + 9.810 * 1,5) * 35^4}{384 * 2,1 * 10^{11} * 6,593 * 10^{-3}} = 0,2984 \text{ m}$$

Por tanto,

$$\delta = 0,2984 \text{ m}$$

También se calculó en el apartado anterior el valor de la frecuencia en cada uno de sus modos,

$$f_{modo 1} = 2,2304 \text{ Hz}$$

$$f_{modo 2} = 8,9259 \text{ Hz}$$

- Caso 2: Biempotrada

$$M_{max} = \frac{(q_{PP} * \gamma_{PP} + q_{USO} * \gamma_{USO}) * L^2}{12}$$

$$= \frac{(4.764,857 * 1,35 + 9.810 * 1,5) * 35^2}{12} = 2.158.813,105 \text{ Nm}$$

Por tanto,

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W} = \frac{2.158.813,105}{1,0548 * 10^{-2}} = 204.665.633,8 \text{ Pa} = 204,665 \text{ MPa}$$

Luego, la flecha es tal que,

$$\delta = \frac{(q_{PP} * \gamma_{PP} + q_{USO} * \gamma_{USO}) * L^4}{384 * E * I} = \frac{(4.764,857 * 1,35 + 9.810 * 1,5) * 35^4}{384 * 2,1 * 10^{11} * 6,593 * 10^{-3}}$$

$$= 0,05968 \text{ m}$$

Por tanto,

$$\delta = 0,05968 \text{ m}$$

También se calculó en el apartado anterior el valor de la frecuencia en cada uno de sus modos,

$$f_{modo 1} = 5,0586 \text{ Hz}$$

$$f_{modo 2} = 13,9444 \text{ Hz}$$

6.3.3.2-Resultados SAP2000

Los resultados obtenidos con SAP2000 son los siguientes para ambos casos. Cabe destacar que como no mostraba el diagrama de tensiones se tuvo que realizar a través de la expresión matemática, pero con el valor de momento máximo que sí que ofrecía el programa.

- Caso 1: Biapoyada

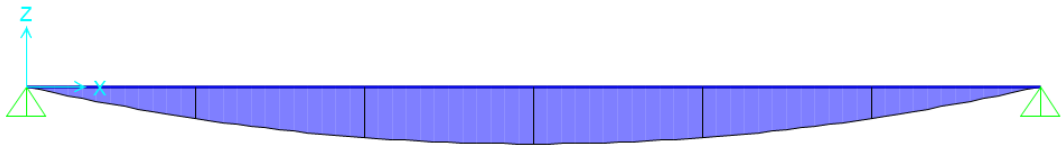


Ilustración 49-Diagrama de momentos obtenido tras simulación

La simulación obtiene un valor máximo de 2.159.591,22 Nm en el apoyo. Luego se puede calcular el valor de tensión máxima según SAP2000.

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W} = \frac{3.239.386,83}{1,0548 * 10^{-2}} = 307.109.104,1 Pa = 307,109 MPa$$

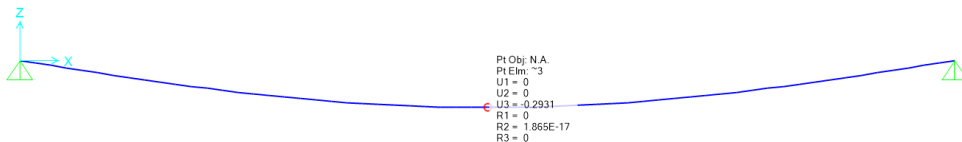


Ilustración 50-Valor de la flecha en sección media

La flecha obtenida es,

$$\delta = 0,2931 \text{ m}$$

También se obtuvieron las frecuencias en el análisis modal y fueron las siguientes,

$$f_{modo 1} = 2,2309 \text{ Hz}$$

$$f_{modo 2} = 8,9124 \text{ Hz}$$

- Caso 2: Biempotrada

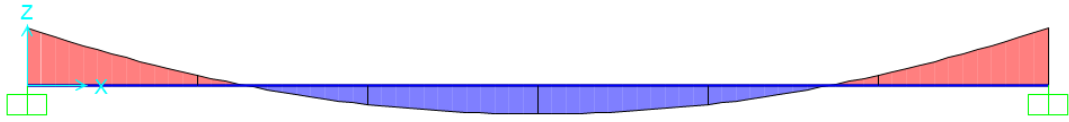


Ilustración 51-Diagrama de momentos obtenido tras simulación

Las áreas rojas representan los momentos flectores negativos y la azul los de valor positivo.

La simulación obtiene un valor máximo de 2.159.591,22 Nm en el apoyo. Luego se puede calcular el valor de tensión máxima según SAP2000.

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W} = \frac{2.159.591,22}{1,0548 * 10^{-2}} = 204.739.402,7 Pa = 204,739 MPa$$

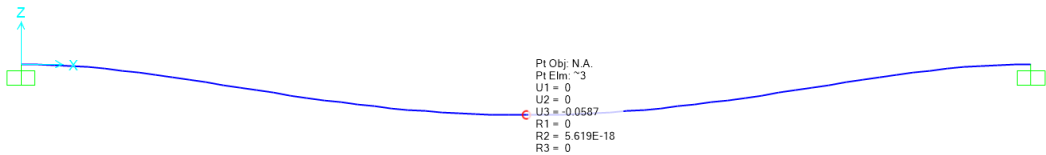


Ilustración 52-Valor de la flecha en sección media

La flecha obtenida es,

$$\delta = 0,0587 \text{ m}$$

También se obtuvieron las frecuencias en el análisis modal y fueron las siguientes,

$$f_{modo 1} = 5,0539 \text{ Hz}$$

$$f_{modo 2} = 13,8680 \text{ Hz}$$

6.3.3.3-Comparación resultados

En la *Tabla 5* se recogen todos los resultados y donde quedan comparados para los dos casos que se tienen. Se puede comprobar como en caso de ser

biapoyada la viga falla por plastificación, en cambio, la biempotrada se queda por debajo del límite elástico.

Tabla 5-Comparación resultados

	Formulación matemática		SAP2000	
	Biapoyada	Biempotrada	Biapoyada	Biempotrada
σ (Mpa)	306,998	204,665	307,109	204,739
δ (m)	0,2984	0,05968	0,2931	0,0587
f_1 (Hz)	2,2304	5,0586	2,2309	5,0539
f_2 (Hz)	8,9259	13,9444	8,9124	13,8680

6.3.3.4- Comparación con resultados experimentales

Únicamente se pueden comparar los valores de frecuencia para cada modo y la flecha para cuando se sitúa la carga de 4 peatones sobre el centro de la pasarela.

- Caso 1: Biapoyada

$$\delta = \frac{F * L^3}{48 * E * I} = \frac{3200 * 35^3}{48 * 2,1 * 10^{11} * 6,593 * 10^{-3}} = 0,00206 \text{ m}$$

La flecha obtenida es,

$$\delta = 0,00206 \text{ m}$$

Tras la simulación con SAP2000 se obtiene,

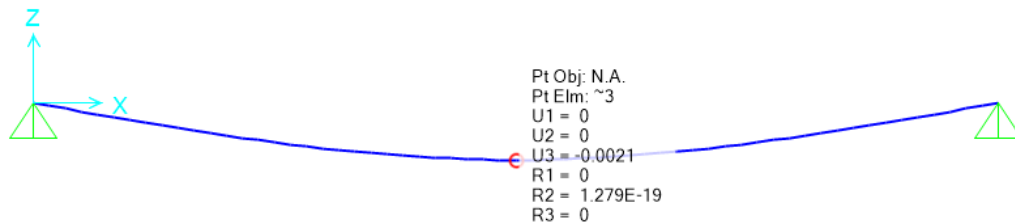


Ilustración 53-Valor de la flecha en sección media

$$\delta_{SAP} = 0,0021 \text{ m}$$

- Caso 2: Biempotrada

$$\delta = \frac{F * L^3}{192 * E * I} = \frac{3200 * 35^3}{192 * 2,1 * 10^{11} * 6,593 * 10^{-3}} = 0,000516 \text{ m}$$

La flecha obtenida es,

$$\delta = 0,000516 \text{ m}$$

Tras la simulación con SAP2000 se obtiene,

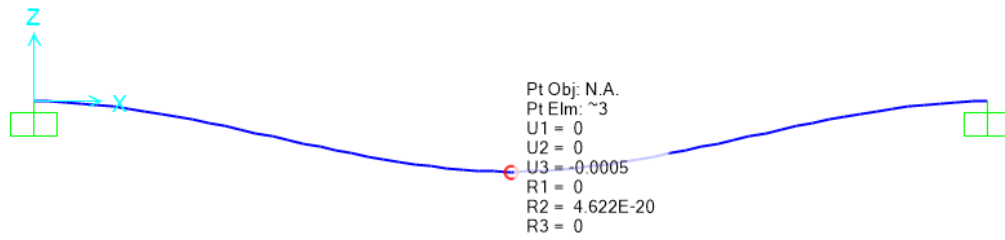


Ilustración 54-Valor de la flecha en sección media

$$\delta_{SAP} = 0,0005 \text{ m}$$

Por tanto, la comparación de los resultados obtenidos a través de la formulación matemática y del SAP2000 con los experimentales son los que se muestran en la *Tabla 6*.

Tabla 6-Comparación resultados con los experimentales

	Formulación matemática		SAP2000		Experimental
	Biapoyada	Biempotrada	Biapoyada	Biempotrada	
δ (m)	0,00206	0,000516	0,0021	0,0005	0,002
f_1 (Hz)	2,2304	5,0586	2,2309	5,0539	4,47
f_2 (Hz)	8,9259	13,9444	8,9124	13,868	12,451

7. Modelado realista de la pasarela

7.1- Definición del material

El acero estructural empleado es el A-42b según la norma MV-102 “Acero laminado para estructuras de edificación” (BOE de 14 de diciembre de 1976). Lleva un recubrimiento con una pintura de minio de plomo a base de resina epoxi para la capa de imprimación. Esta última apreciación no interviene más que si lo que se busca es una durabilidad determinada en la estructura, pero no al carácter resistente (es un recubrimiento).

Para la selección de material en el programa se marcará la opción de acero y el tipo de acero que se emplea es el S275.

Las propiedades del acero S275 adoptado son las que se muestran a continuación,

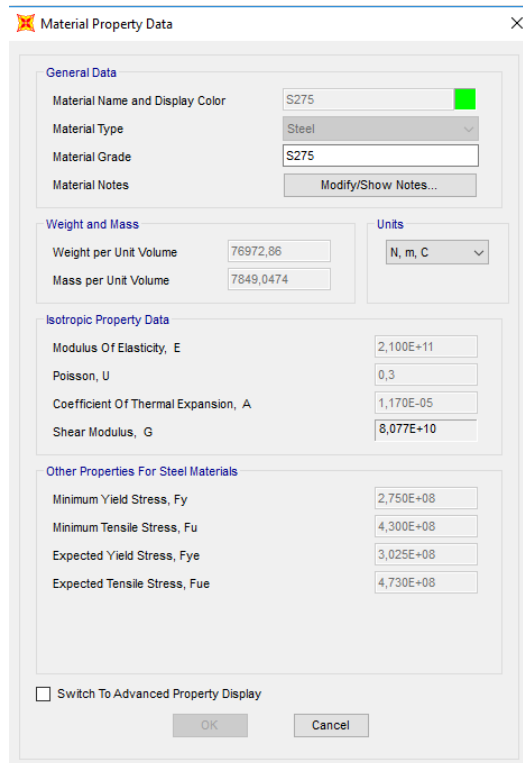


Ilustración 55- Propiedades acero S275

7.2- Definición de las secciones

A partir de los planos de la pasarela y atendiendo al caso de una pasarela con luz de 35 metros, según su cuadro de caracterización de secciones acudimos a las denotadas como P-8, P-9 y P-10 reflejando sus dimensiones en la tabla adjunta a continuación.

Tabla 7- Dimensiones secciones que conforman la celosía Warren

Cordones	□140.140.8
Diagonales	□140.80.5

El siguiente paso que queda es definir las en el programa de cálculo atendiendo a una de sus librerías que lleva incorporada. La librería que se emplea es la *Euro.pro*. Se cargan en nuestra biblioteca los dos tipos de perfiles que se emplearán. Luego se seleccionan las secciones implicadas y asignamos su perfil.

Section Name: TUBO140x80x5 Display Color: ■

Section Notes:

Dimensions

Outside depth (t3) :

Outside width (t2) :

Flange thickness (tf) :

Web thickness (tw) :

Section

Properties

Cross-section (axial) area	2,100E-03	Section modulus about 3 axis	7,825E-05
Moment of Inertia about 3 axis	5,478E-06	Section modulus about 2 axis	5,644E-05
Moment of Inertia about 2 axis	2,258E-06	Plastic modulus about 3 axis	9,625E-05
Product of Inertia about 2-3	0,	Plastic modulus about 2 axis	6,475E-05
Shear area in 2 direction	1,400E-03	Radius of Gyration about 3 axis	0,0511
Shear area in 3 direction	8,000E-04	Radius of Gyration about 2 axis	0,0328
Torsional constant	4,882E-06	Shear Center Eccentricity (x3)	0,

Ilustración 56- Asignación perfil con sus propiedades tubo 140X80X5

Section Name: TUBO140X140X8 Display Color: ■

Section Notes:

Extract Data from Section Property File

c:\program files\computers and structures\sap2000 20\euro.pro

Dimensions

Outside depth (t3) :

Outside width (t2) :

Flange thickness (tf) :

Web thickness (tw) :

Section

Properties

Cross-section (axial) area	4,224E-03	Section modulus about 3 axis	1,759E-04
Moment of Inertia about 3 axis	1,231E-05	Section modulus about 2 axis	1,759E-04
Moment of Inertia about 2 axis	1,231E-05	Plastic modulus about 3 axis	2,093E-04
Product of Inertia about 2-3	0,	Plastic modulus about 2 axis	2,093E-04
Shear area in 2 direction	2,240E-03	Radius of Gyration about 3 axis	0,054
Shear area in 3 direction	2,240E-03	Radius of Gyration about 2 axis	0,054
Torsional constant	1,840E-05	Shear Center Eccentricity (x3)	0,

Ilustración 57- Asignación perfil con sus propiedades tubo 140X140X8

En el caso de la sección $\square 140.80.5$ al no encontrarla en la propia librería procedimos a añadir una nueva sección con sus dimensiones.

Una vez asignadas las distintas secciones a cada una de las vigas se giran todas aquellas mal definidas y las restauramos a su correcta posición.



Ilustración 58- Nudo en 3D (izq.) y 2D (dcha.) correctamente ejecutado

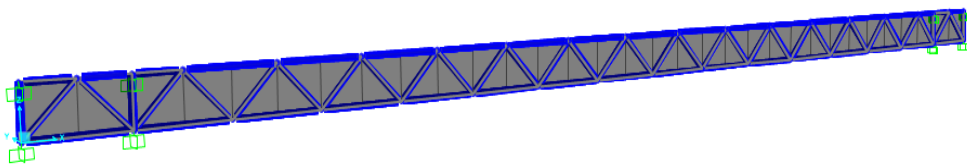


Ilustración 59- Pasarela en 3D con todas las secciones bien orientadas

7.3-Simplificación cerramientos laterales de rejillas y la chapa de paso peatonal

Se ha propuesto una solución para estas dos acciones en donde las rejillas se sustituirán por una masa superficial aplicada en el lugar donde se encuentran ubicadas. Y para el emparrillado se simplificará a la distribuida aplicada a una celosía.

7.3.1-Aporte de las rejillas

Como bien se ha mencionado anteriormente lo primero que se ejecutará es la asignación de los elementos tipo área a cada uno de los triángulos implicados. Se dará a las áreas aplicadas las propiedades "None", para que no generen ningún aporte extra de masa a la estructura. Aparecen dos tipologías de triángulos, unos que se referenciarán a la zona central de la celosía y el otro tipo se ubican en los extremos laterales. Casualmente el área de estos últimos es la mitad de los centrales, por ello realizaremos dos cálculos distintos.

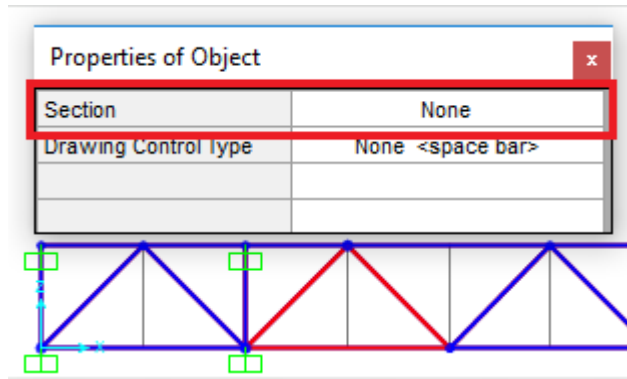


Ilustración 60-Propiedades elemento área

$$m_{rejilla} = 13,99 \text{ kg}$$

- Triángulo central:

$$base = 2,5 \text{ m} ; altura = 1,25 \text{ m}$$

$$Área = 1,5625 \text{ m}^2$$

$$masa_{superficial} = \frac{masa_{rejilla}}{Área} = \frac{13,99}{1,5625} = 8,9536 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

- Triángulo extremo:

$$base = 1,25 \text{ m} ; altura = 1,25 \text{ m}$$

$$Área = 0,78125 \text{ m}^2$$

$$masa_{superficial} = \frac{\left(\frac{masa_{rejilla}}{2}\right)}{Área} = \frac{\left(\frac{13,99}{2}\right)}{0,78125} = 8,9536 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

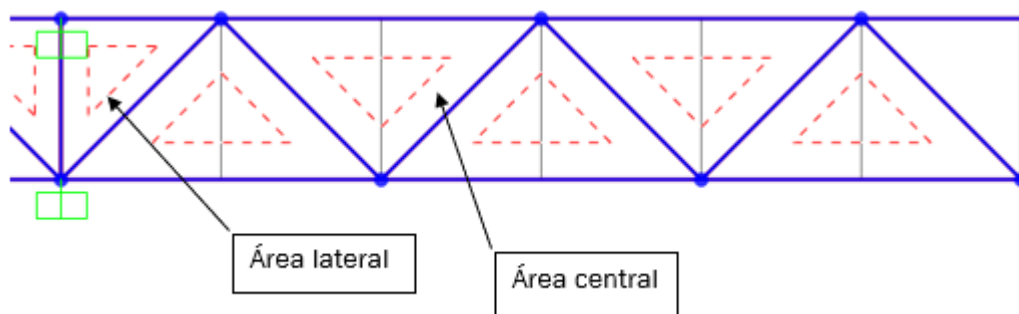


Ilustración 61- Indicación de los dos tipos áreas asignados

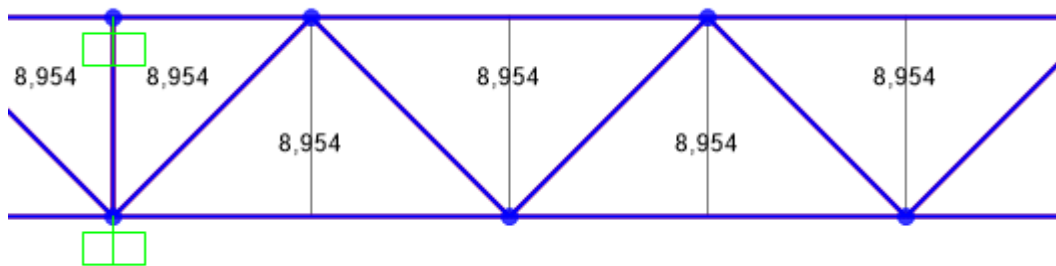


Ilustración 62- Masas asignadas a cada elemento área

Todo esto es lo que va a tenerse en cuenta para el cálculo modal de la estructura. Para que se tenga en consideración para la parte de cálculo estático se tiene que usar en valores de fuerza y no de masas. Para ello se verá a continuación como proceder para este último tipo de cálculo.

En vez de tomar ahora la contribución con el área de cada rejilla se distribuirá linealmente sobre el cordón inferior.

Se dispone de 27 rejillas más las mitades de los extremos que conforman una completa, por tanto, finalmente se tiene un total de 32.

$$m_{TOTAL_{rejilla}} = 13,99 * 32 = 447,68 \text{ kg}$$

Se multiplica por la gravedad para obtener newtons y se divide por el vano total para tener su carga distribuida contributaria.

$$q_{TOTAL_{rejillas}} = \frac{447,68 * 9,81}{40} = 109,79 \frac{N}{m}$$

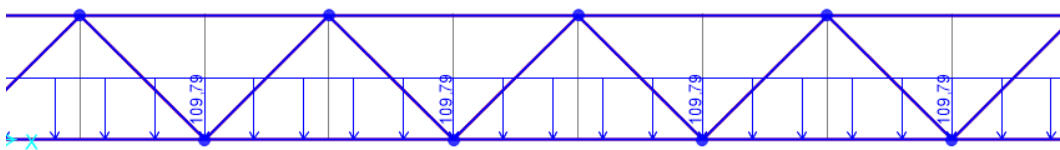


Ilustración 63- Carga distribuida debida a las rejillas

7.3.2-Aporte tablero de paso peatonal

El tablero de paso dispuesta tiene una sección tal que #8.2,38.40. Este último valor hace referencia a la suma de los 35 m de luz más los 2,5 m referidos al módulo del apoyo de cuatro brazos, es decir, 5 m; dando lugar a los 40 m.

Únicamente tendremos la mitad de su masa ya que hacemos la simplificación para una celosía Warren.

$$masa_{\text{tablero}} = \frac{5.978,56}{2} = 2.989,28 \text{ kg}$$

Luego, la asignación del aporte debido al tablero será una masa lineal. Por tanto, tendremos que repartir linealmente estos 2989,28 kg sobre los 40 metros a los que contribuye.

$$masa_{\text{lineal-tablero}} = \frac{2.989,28}{40} = 74,732 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

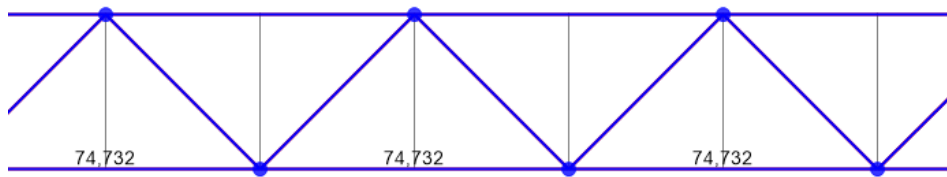


Ilustración 64- Masa lineal debida a la chapa de paso

De la misma forma la masa lineal previamente calculada solo afecta directamente al cálculo modal. Por tanto, para el cálculo estático se debe tener la carga distribuida en sus unidades correspondientes. Ésta se repartirá a lo largo del cordón inferior.

$$q_{\text{TOTAL_tablero}} = 74,732 * 9,81 = 733,12 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

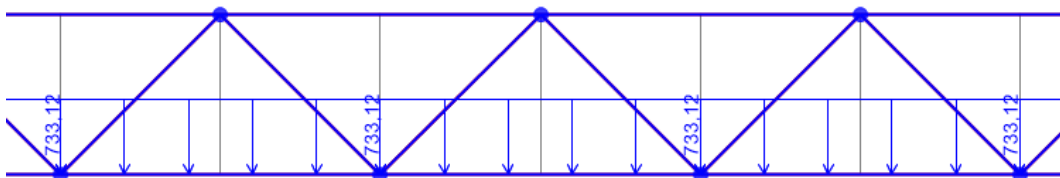


Ilustración 65- Carga distribuida debida al tablero

7.3.3-Aporte de los travesaños

Otro elemento más en la pasarela que se encarga de la unión de las dos celosías Warren. Además, sobre ellos se apoyará el mallazo y chapas para el tránsito.

Aparecen dos tipos de travesaños, los que se sitúan en los extremos y los intermedios. Estos elementos se simplificarán aplicando masas y cargas puntuales sobre cada uno de los nodos del cordón inferior, es decir, donde se unen las diagonales.

$$m_{travesaño_extremo} = 78,25 \text{ kg}$$

$$m_{travesaño_intermedio} = 28,25 \text{ kg}$$

Luego, cada uno de ellos contribuye con la mitad de su masa y peso, ya que se reparte equitativamente.

$$m_{NUDO_travesaño_extremo} = 39,125 \text{ kg}$$

$$m_{NUDO_travesaño_intermedio} = 19,125 \text{ kg}$$

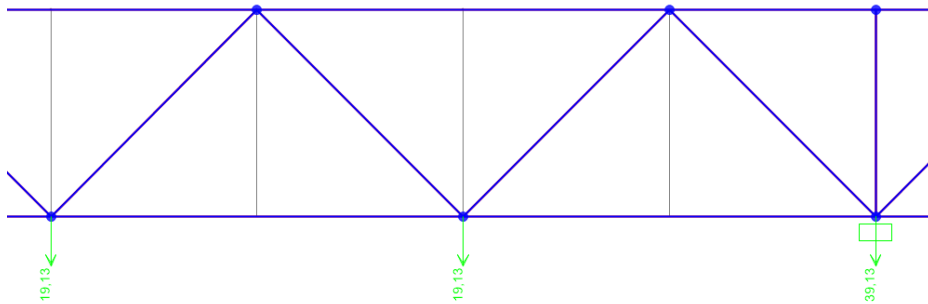


Ilustración 66- Masa de travesaños sobre los nodos

Ahora multiplicando por la gravedad se obtienen las cargas puntuales sobre los mismos.

$$P_{NUDO_travesaño_extremo} = 39,125 * 9,81 = 383,816 \text{ N}$$

$$P_{NUDO_travesaño_intermedio} = 19,125 * 9,81 = 188,566 \text{ N}$$

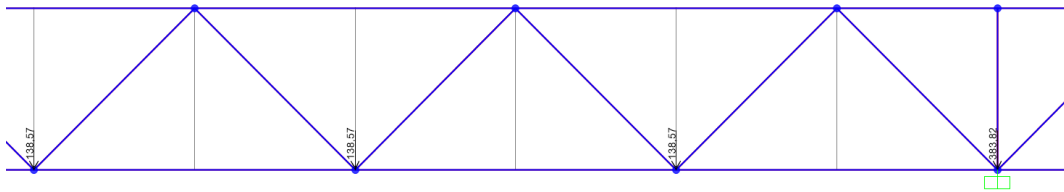


Ilustración 67- Cargas puntuales de los travesaños

7.3.4-Aporte de los cordones del tablero

Se dispone de tres cordones según la pasarela con una longitud total de los 35 metros de vano, pero se repartirá también por los módulos laterales correspondientes a los soportes de cuatro brazos. La masa total de éstos asciende hasta 1.237,47 kg. Para el caso modal se simplificará con una masa lineal, y para el estático con una carga distribuida. El aporte será la mitad para cada Warren.

$$m_{cordones} = \frac{1.237,47}{2} = 618,735 \text{ kg}$$

$$masa_{lineal} = \frac{618,735}{40} = 15,468 \frac{kg}{m}$$

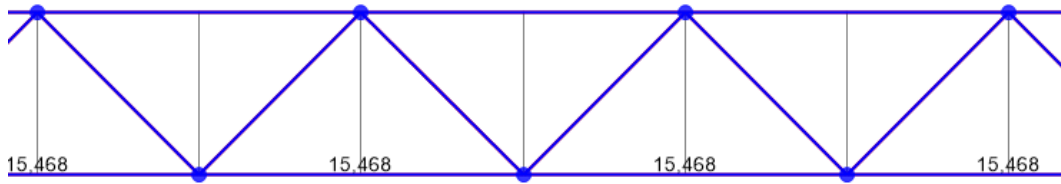


Ilustración 68- Masa lineal debida a los cordones

Por tanto, multiplicando por la gravedad se obtiene la carga distribuida a lo largo de dicho cordón.

$$q_{lineal} = 17,6781 * 9,81 = 173,422 \frac{N}{m}$$

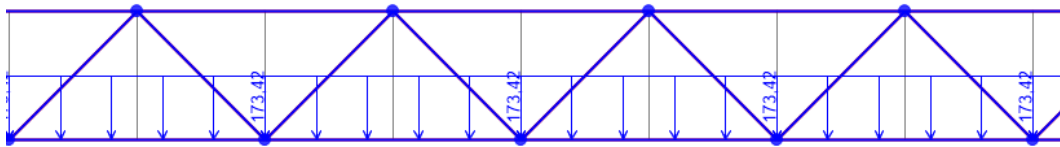


Ilustración 69- Carga distribuida debida a los cordones

7.4-Rigidización de los nudos

Cuando se modela con SAP2000 lo que se observa son las líneas medias, no la representación de la sección. El problema viene cuando el programa es ejecutado y se observa la deformada de la estructura. Aparece el primer problema ya que las uniones se comportan como uniones flexibles en vez de totalmente rígidas como debieran.

Lo primero es determinar qué cantidad de cada barra va a ser partícipe de la unión rígida. Para ello se han aproximado las diagonales hasta justo cuando dejan de tener contacto con el resto de la escuadra. Esto queda detallado perfectamente en la *Ilustración 71* e *Ilustración 72*. Para determinar el valor se tiene la escala para el detalle 1-4 y 2 del plano (*Ilustración 70*).

ESCALAS GRAFICAS.

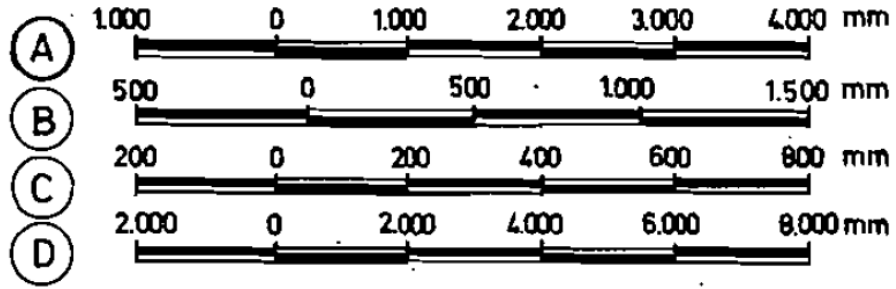


Ilustración 70- Escalas empleadas en los planos del proyecto

En el caso que atañe se hará uso de la "C" ya que se corresponde con el detalle de interés.

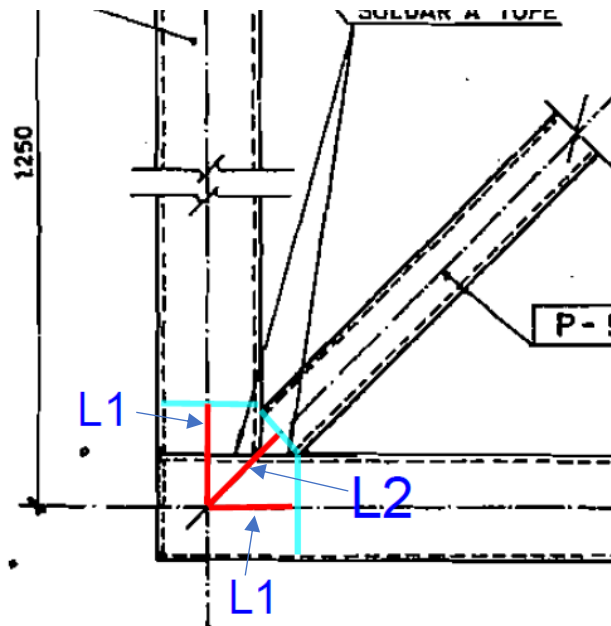


Ilustración 71- Contribución a unión rígida de nudo esquina

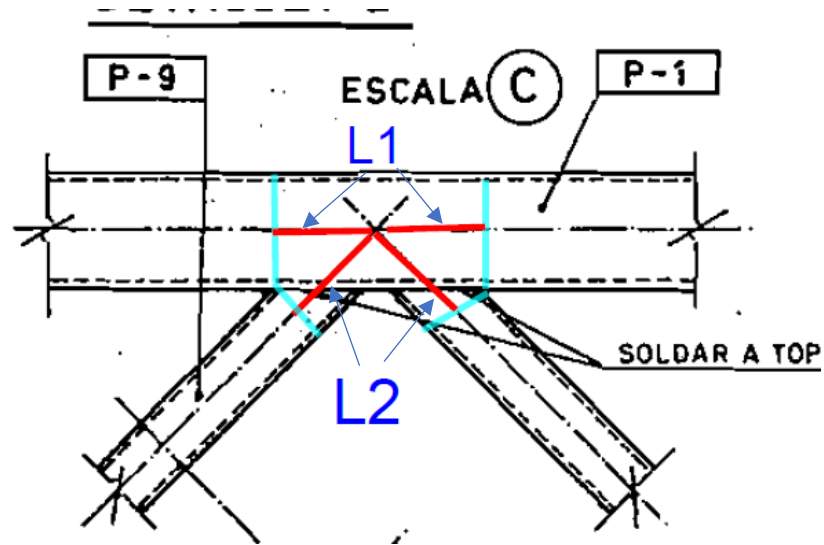


Ilustración 72- Contribución a unión rígida de nudo intermedio

En ambos nudos se tiene que se comparten las mismas medidas L_1 y L_2 . Colocando cada una de ellas sobre la escala que corresponde obtendremos el valor de la contribución.

$$L_1 = 134,939 \text{ mm} = 13,49 \text{ cm}$$

$$L_2 = 154,2168 \text{ mm} = 15,42 \text{ cm}$$

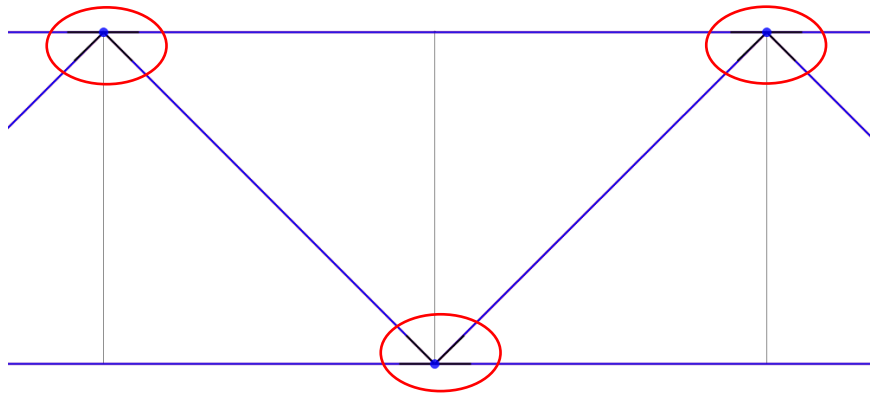


Ilustración 73- Rigidez total inducida a todos los nudos (color negro)

En toda estructura se cumple esto, solamente es una simplificación el representar bajo las líneas medias. Un nudo no es un punto, sino que es la participación de porciones de cada una de las barras que confluyen.

Para incorporar la tipología de nudo finito se procede a seleccionar las barras de interés y asignarles la porción rígida a los extremos de barra, con un factor de zona rígida de 1.

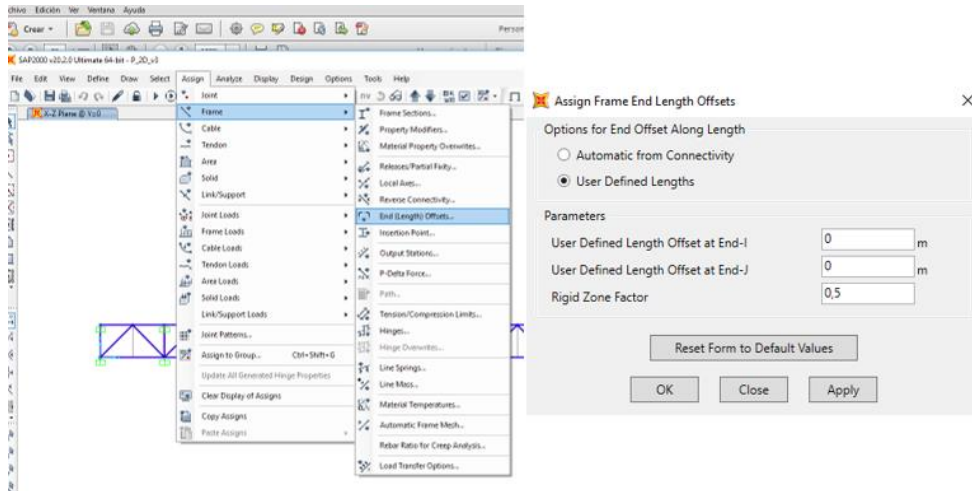


Ilustración 74-Rigidizar nudo

7.5-Patrones de carga

7.5.1-Grupo 4 personas puntuales en centro de vano

Para ejecutar este caso de carga se le pidió a un grupo de 4 personas que se pesaran justo antes de proceder a colocarse en el punto central de la pasarela. El peso promedio de cada uno era de aproximadamente 80 kg, luego en total sumaron 320kg. Por tanto, para simular dicho experimento se colocará una carga de 3200 Newtons (redondeando números) en dicho nudo.

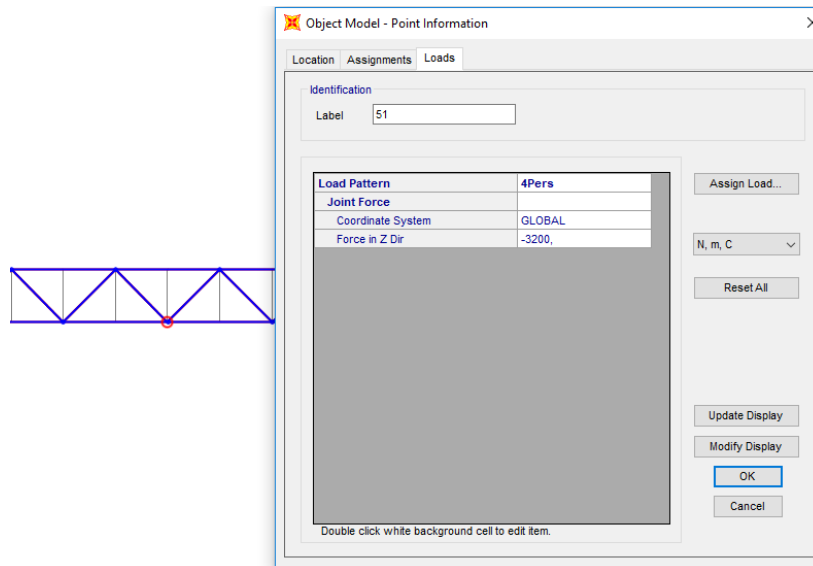


Ilustración 75- Carga aplicada en nudo central

7.6-Resultados modelo 2D

7.6.1-Diagramas de esfuerzos

Cuando se obtienen los esfuerzos de toda la pasarela hay que tener en cuenta que no sólo pueden aparecer en el plano XZ, sino que en la dirección Y también es posible que se visualicen.

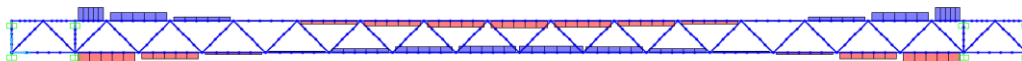


Ilustración 76- Diagrama de esfuerzos sobre el plano XZ

Se puede apreciar como los diagramas se dibujan sobre un tramo de cada barra no llegando hasta su nudo. Esto es debido a que se rigidizó todos y cada uno de los nudos teniendo en cuenta la parte de barra que colaboraba en esa zona totalmente rígida. Es decir, el nudo no se representa como se ha explicado siempre bajo apuntes teóricos con las líneas medias de la sección, sino que ahora se va a lo que en la realidad ocurre, que no confluyan en un punto las barras.

Además, se aprecian barras sin diagramas dibujados. Esto no quiere decir que no estén sometidas a ningún tipo de esfuerzo, sino que son muy pequeños frente a los que si se muestran.

Los diagramas mostrados hacen referencia solamente a esfuerzo axial (tracción en azul y compresión en rojo).

7.6.1.1-Cordón superior

7.6.1.1.1-Caso de 4 personas en centro de vano

El cordón superior más solicitado se encuentra entre los módulos 7 y 8. Cuando nos encontramos

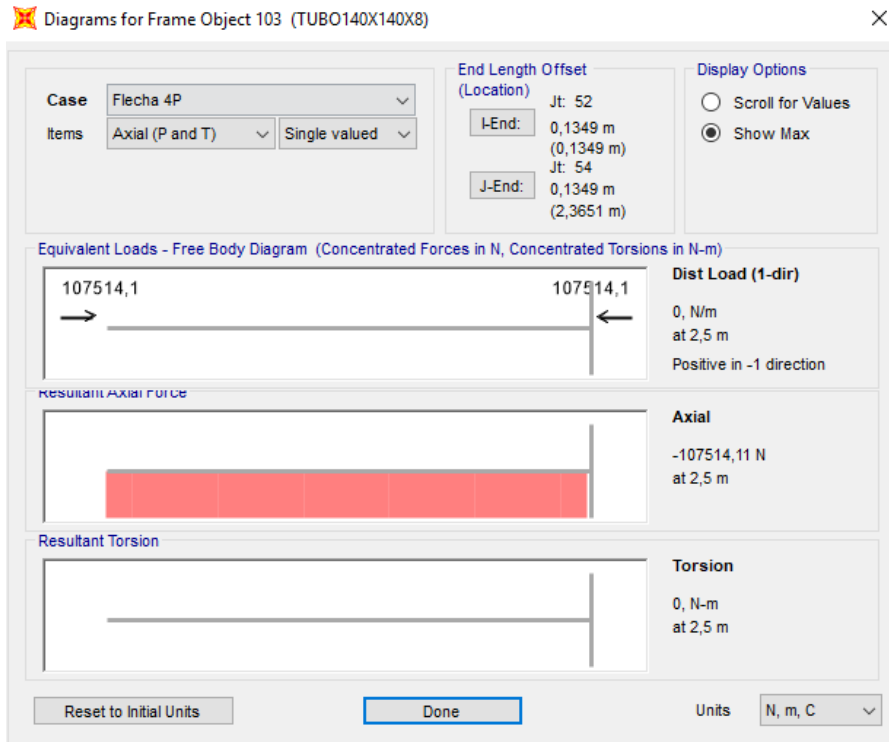


Ilustración 77- Diagrama axiales

Se alcanza un valor de axil de 107.514,11 N a compresión, y ausencia de torsión en ninguna sección de la barra.

Únicos diagramas de cortantes que aparecen son en la dirección 2 y sus respectivos diagramas de momentos. La ley de momentos alcanza un valor máximo valor igual a 700,2 Nm. Se alcanza un valor de flecha de 0,000189 m máximos.

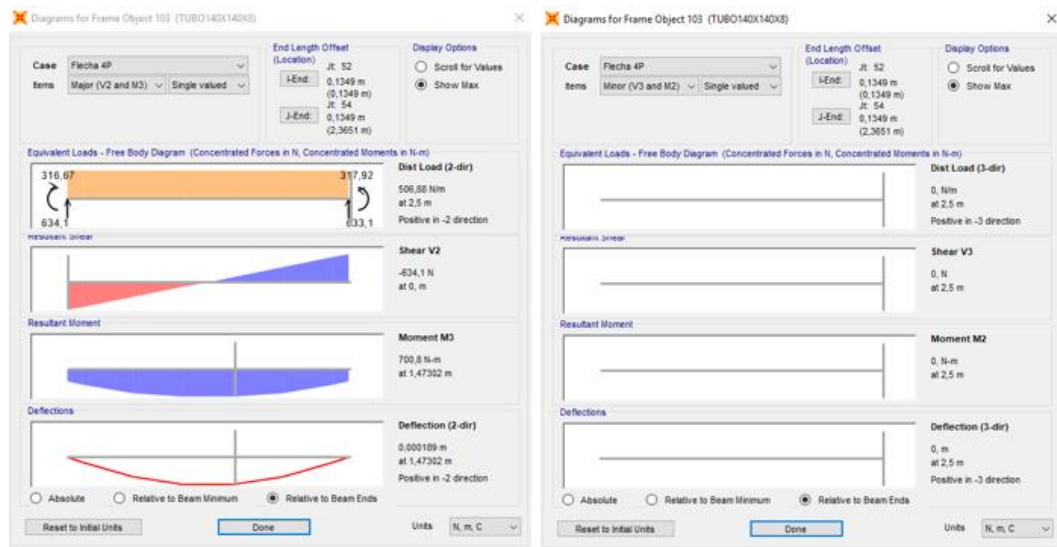


Ilustración 78-Diagramas de cortantes, flectores y desplazamientos en ambas direcciones

Como criterio de plastificación se toma como de referencia el de Von Mises. De la misma forma el criterio que seguiremos con el SAP2000 será el mismo.

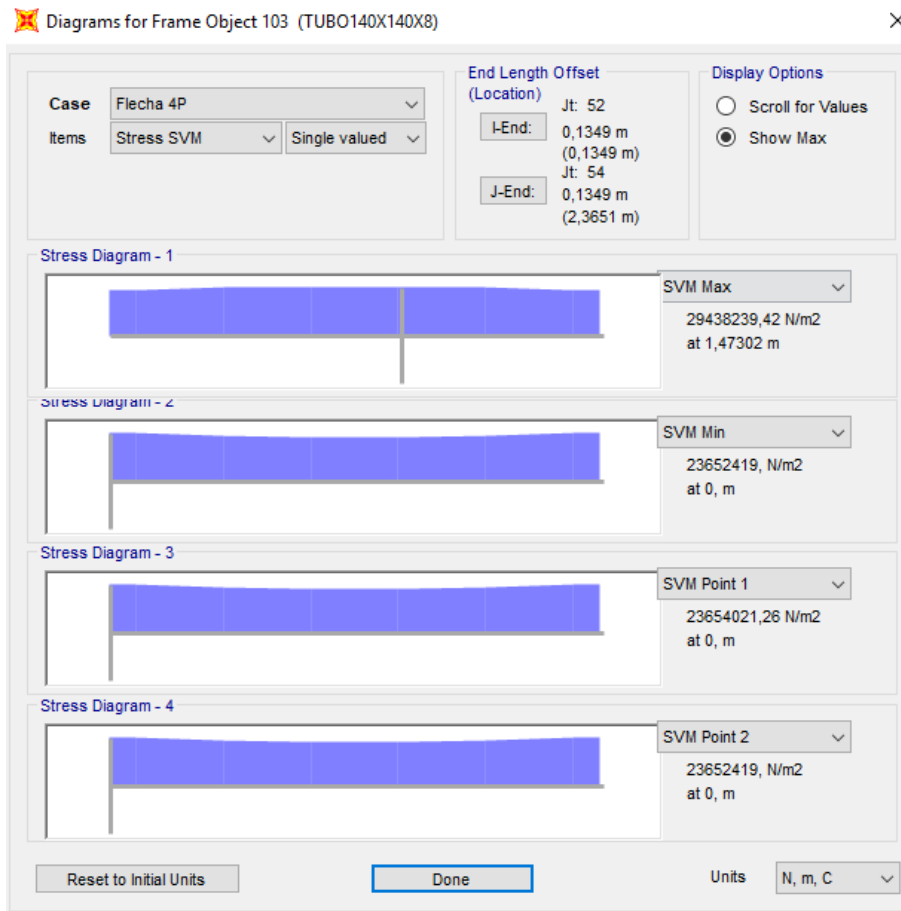


Ilustración 79- Diagrama tensiones a través de criterio de Von Mises

Se puede observar que en ninguno de los casos se llega a alcanzar valores que superen el límite elástico del acero. Concluimos con que no plastifica la estructura.

$$\sigma_{Max-VM} = 29,438 \text{ MPa} < 275 \text{ Mpa}$$

El factor elástico que nos proporciona el SAP2000 se puede obtener a partir de dicho valor de tensiones que se acaban de obtener. Éste se define como la relación entre el límite elástico y el valor de la tensión en el más punto más crítico.

$$\lambda = \frac{275.000.000}{29.438.239,42} = 9,3415$$

7.6.1.1.2-Caso de sobrecarga de uso

En esta situación se puede observar el incremento de sollicitación frente al caso anterior. Se observa que el axil máximo de compresión crece

considerablemente hasta los 296.536,58 N. De igual manera no aparece efecto alguno de torsión.

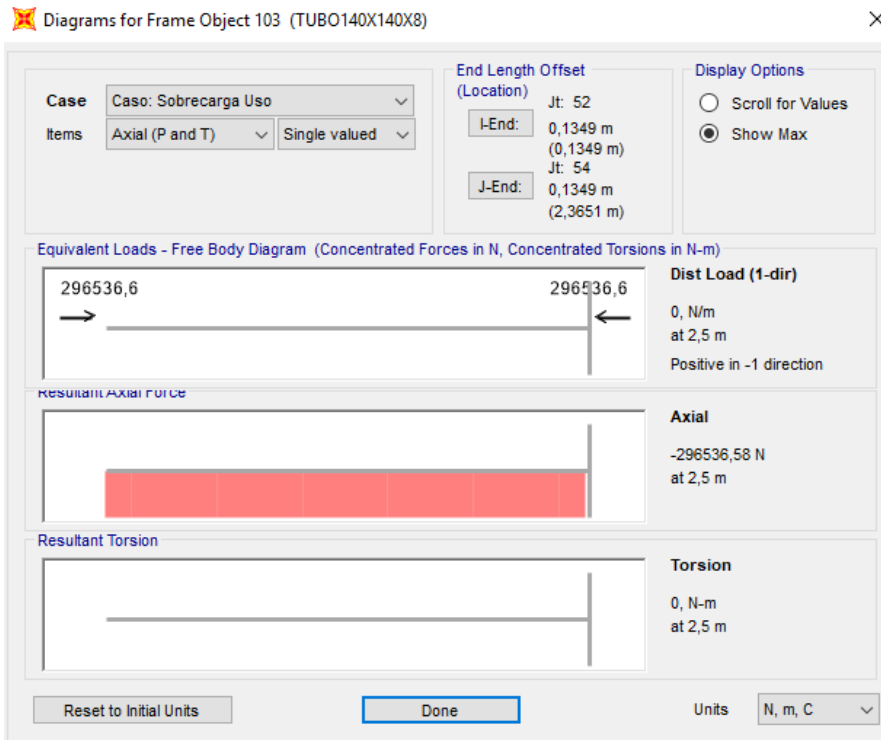


Ilustración 80- Diagrama de axiles y torsores

Ocurre lo mismo que en el caso anterior, sólo habrá diagramas de cortantes y flectores en la dirección 2. El momento máximo toma un valor de 1.749,95 Nm. La deflexión aquí es la máxima y es de 0,000492 m.

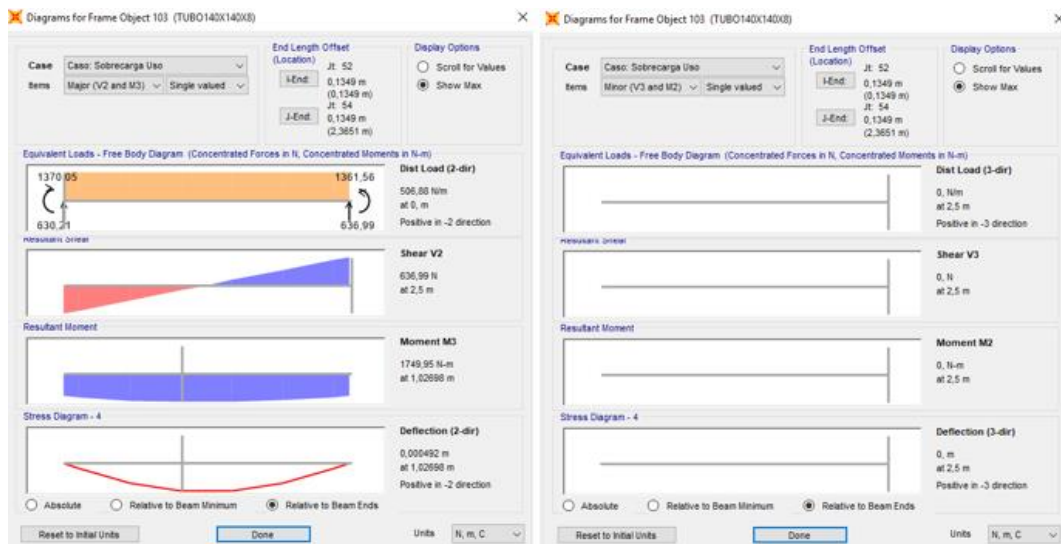


Ilustración 81- Diagramas de cortantes y flectores en ambas direcciones

En cuanto a plastificación hay que decir que en ninguna sección se producirá dicho fenómeno ya que no se alcanza en ningún momento el valor del límite elástico del acero.

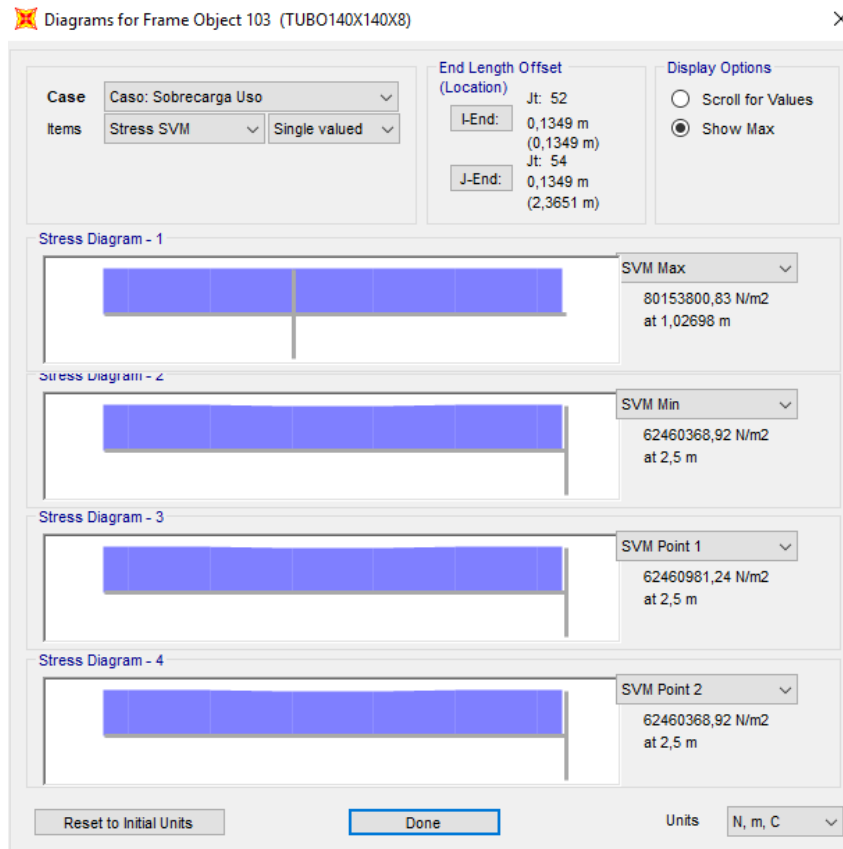


Ilustración 82- Diagrama tensiones a través de criterio de Von Mises

$$\sigma_{Max-VM} = 80,153 \text{ MPa} < 275 \text{ MPa}$$

Por tanto, el factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{80.153.800,63} = 3,4309$$

7.6.1.2-Cordón inferior

7.6.1.2.1-Caso de 4 personas en centro de vano

Se tendrán en cuenta los más solicitados. Éstos se encuentran en la zona central de la celosía, por tanto, se escoge el situado en el módulo 7.

Ahora en vez de estar en situación de compresión cambia al contrario, es decir, a tracción. Se alcanza un valor constante a lo largo de la barra. Su valor es de 103.275,73 N y sin efecto alguno de torsión.

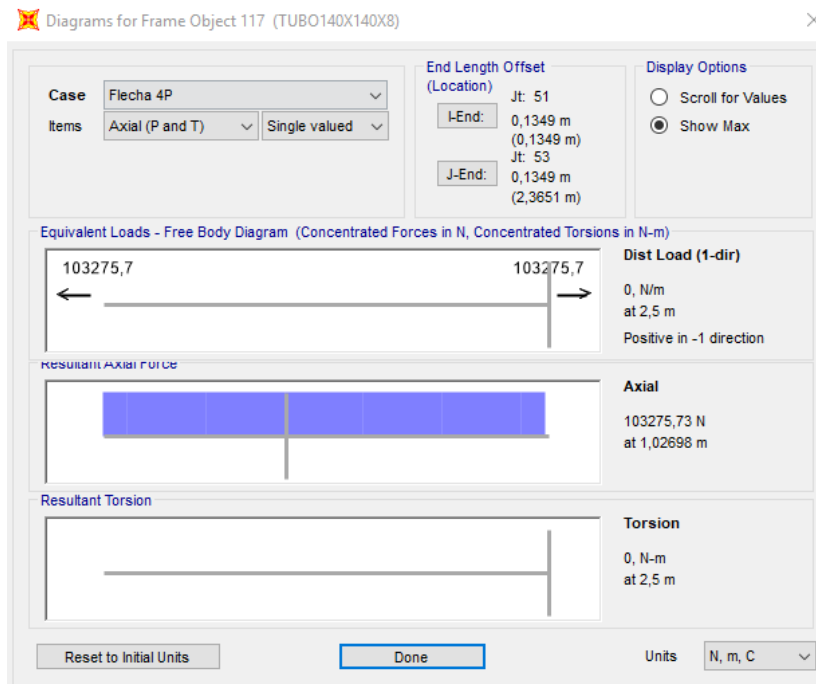


Ilustración 83- Diagrama de axiles y torsores

Los diagramas de cortantes y flectores sólo en la dirección 2. Se alcanza el momento máximo con un valor de 882,88 Nm. La deflexión aquí es la máxima y es de 0,000213 m.

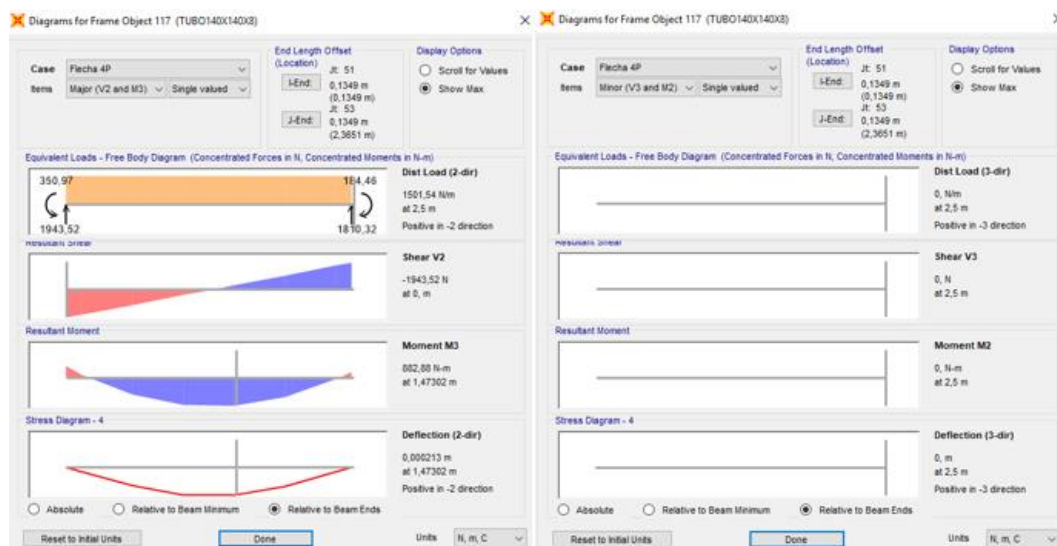


Ilustración 84- Diagramas de cortantes y flectores en ambas direcciones

La plastificación no está presente en ningún momento. El valor máximo que se obtiene a partir del criterio de Von Mises es en la sección central con un valor de 29.470.397,82 N/m².

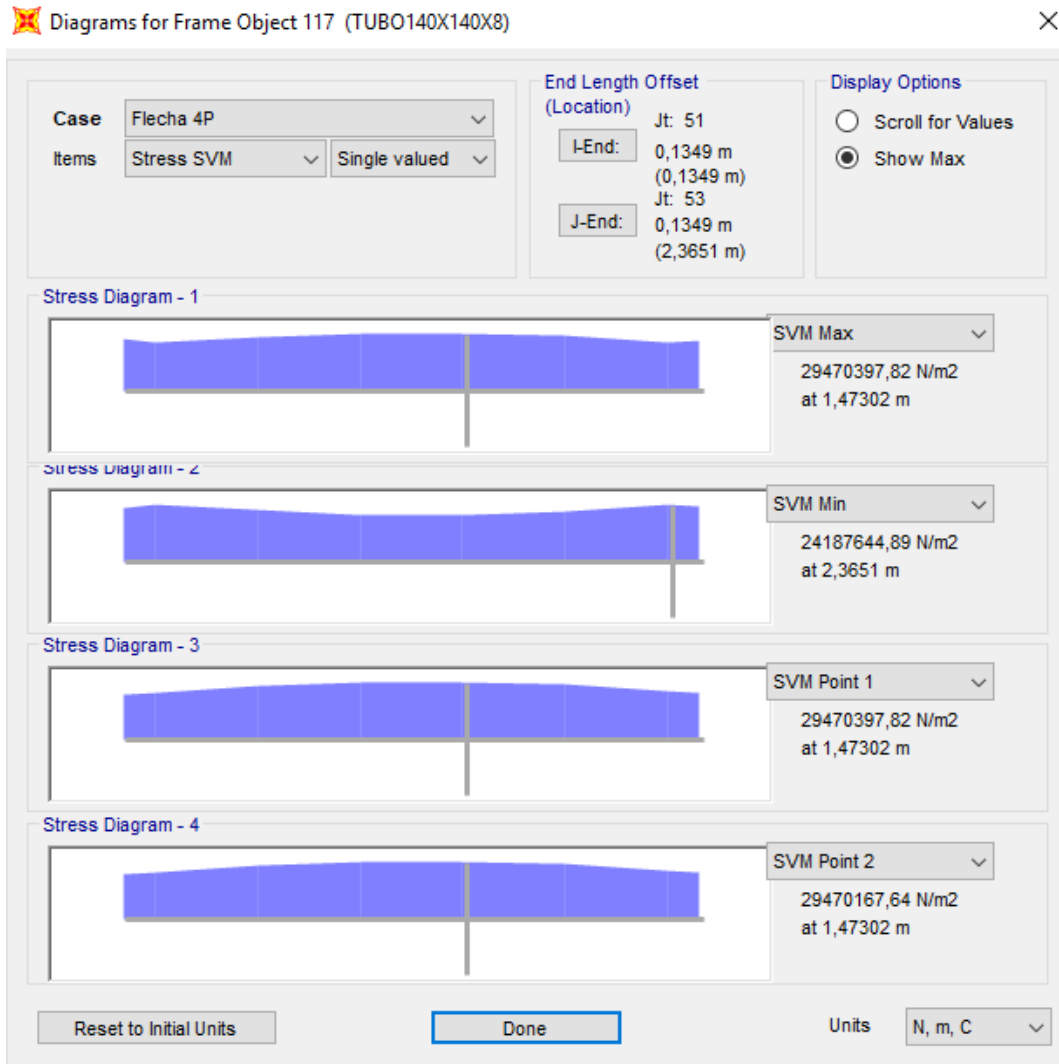


Ilustración 85- Diagrama tensiones a través de criterio de Von Mises

$$\sigma_{Max-VM} = 29,470 \text{ MPa} < 275 \text{ Mpa}$$

Por tanto, el factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{29.470.397,82} = 9,3313$$

7.6.1.2.2-Caso de sobrecarga de uso

En esta situación se puede observar el incremento de sollicitación frente al caso anterior. Se observa que el axil máximo de tracción crece considerablemente hasta los 288.277,16 N. De igual manera no aparece efecto alguno de torsión.

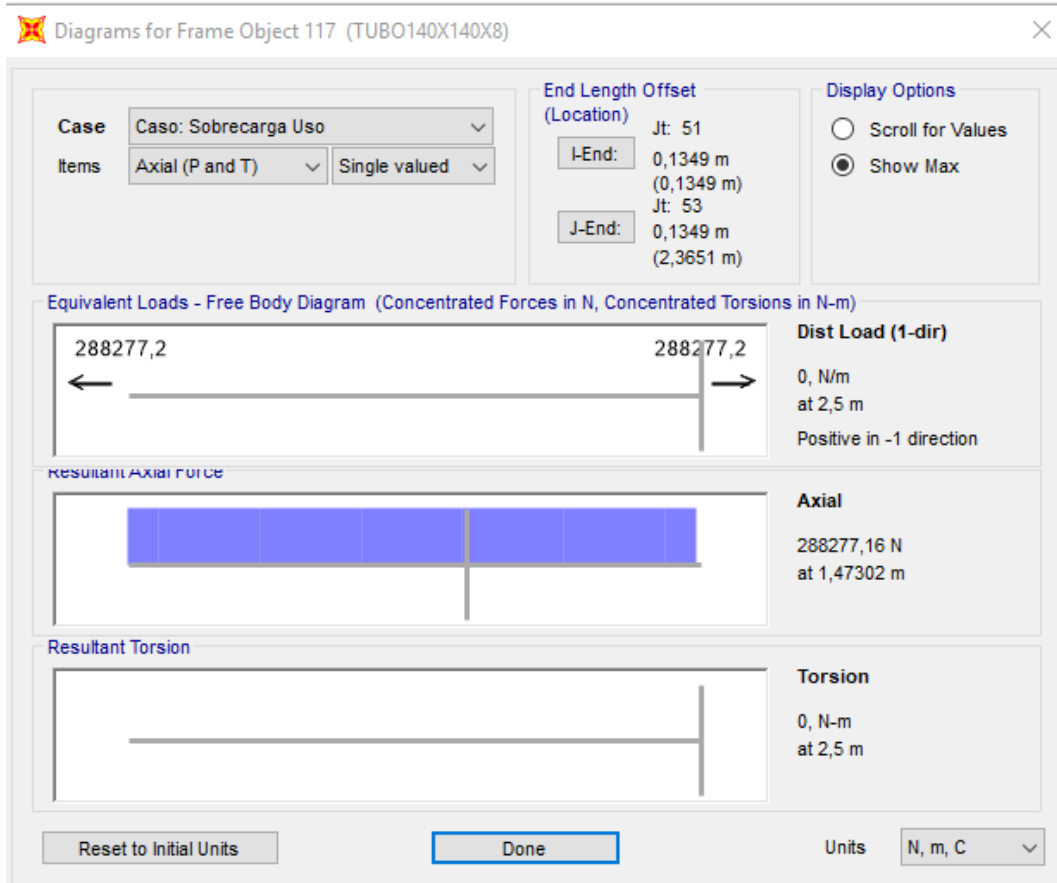


Ilustración 86- Diagrama de axiles y torsores

Ocurre lo mismo que en el caso anterior, sólo habrá diagramas de cortantes y flectores en la dirección 2. Se alcanza de nuevo el momento máximo con un valor de 2.848,01 Nm. La deflexión aquí es la máxima y es de 0,000649 m.

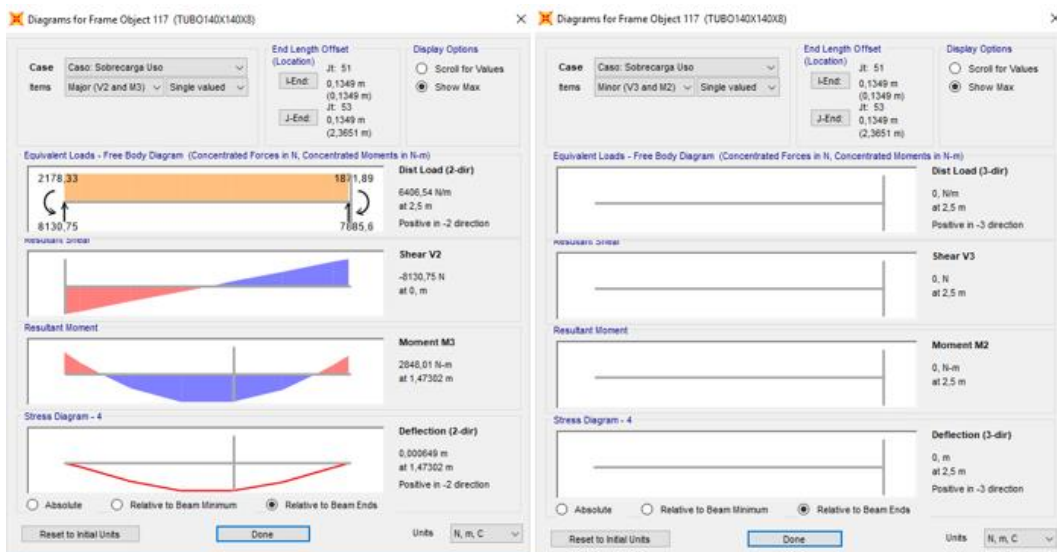


Ilustración 87- Diagramas de cortantes y flectores en ambas direcciones

La plastificación no está presente en ningún momento. El valor máximo que se obtiene a partir del criterio de Von Mises es en la sección central con un valor de 84.444.362,87 N/m².

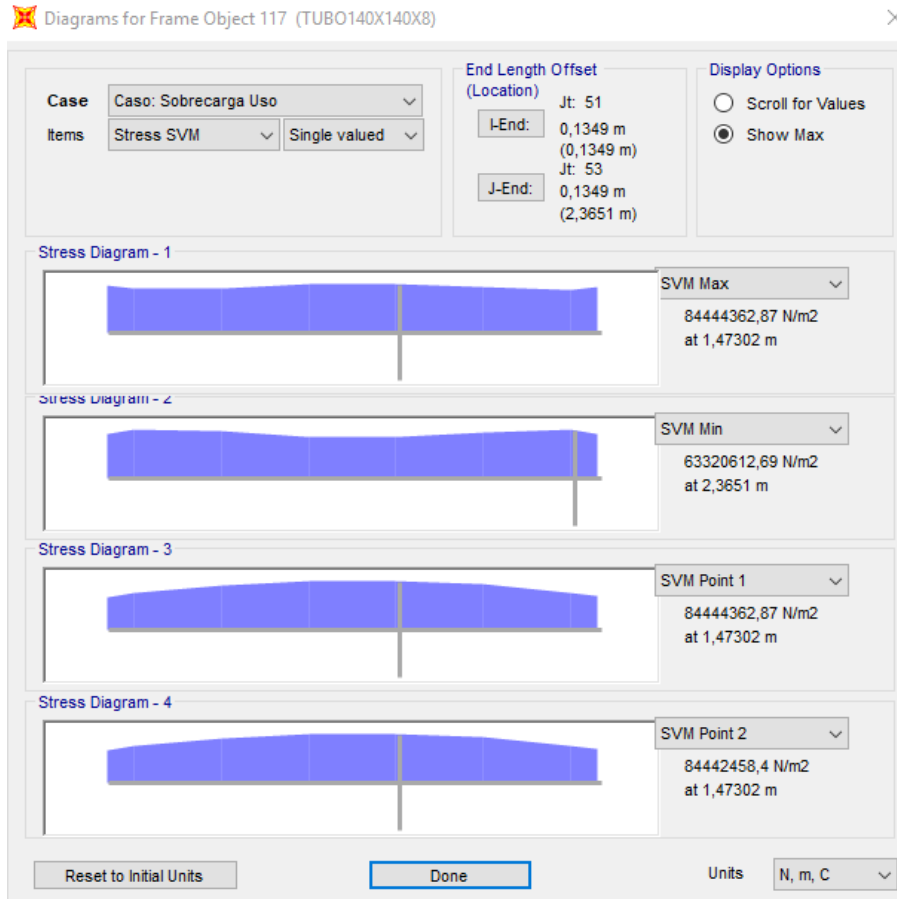


Ilustración 88- Diagrama tensiones a través de criterio de Von Mises

$$\sigma_{Max-VM} = 84,444 \text{ MPa} < 275 \text{ Mpa}$$

Por tanto, el factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{84.444.362,87} = 3,2565$$

7.6.1.3-Diagonal

Al haber estudiado la zona central de la pasarela para los dos cordones que aparecen en la celosía, el caso de las diagonales sigue la misma línea y se estudiará una del módulo central.

7.6.1.3.1-Caso de 4 personas en centro de vano

El diagrama de axiles que aparece es de tracción alcanzando su máximo en el extremo colindante con el cordón superior. Su valor es de 13.556,5 N. En cuanto a efecto de torsión no aparece.

En el caso de los cordones ocurría que los esfuerzos en el plano perpendicular al del papel eran nulos, en cambio, en el caso de las diagonales es al contrario. Sobre el eje 2 los efectos tanto de cortante como de flector tiene un valor tan pequeño que se van a considerar despreciables. En la dirección 3 el momento máximo se produce en el centro de la barra de valor negativo siendo su valor de 77,75 Nm, induciendo una deflexión de 7,18E-06 m.

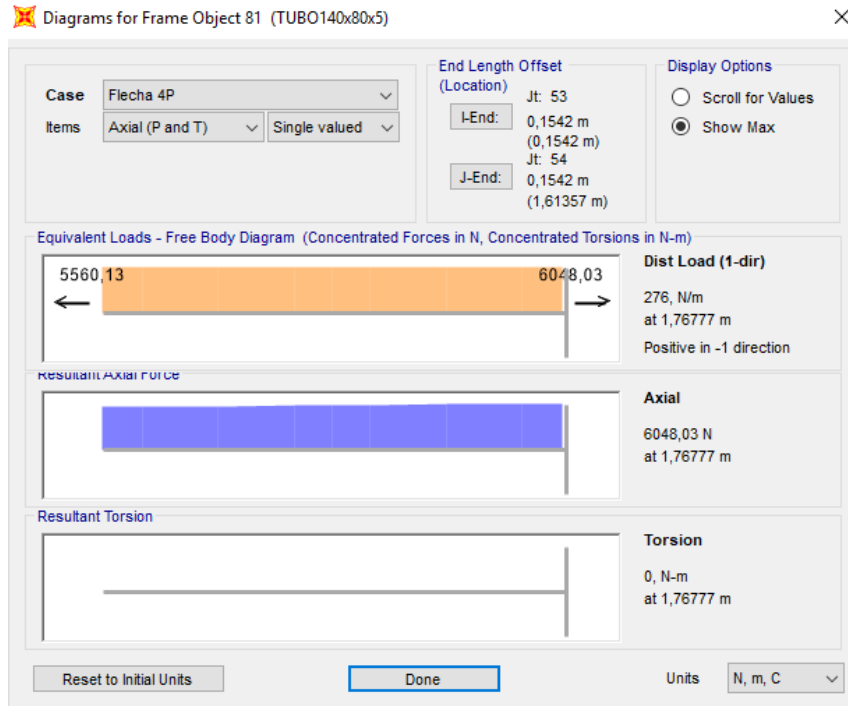


Ilustración 89- Diagrama de axiles y torsores

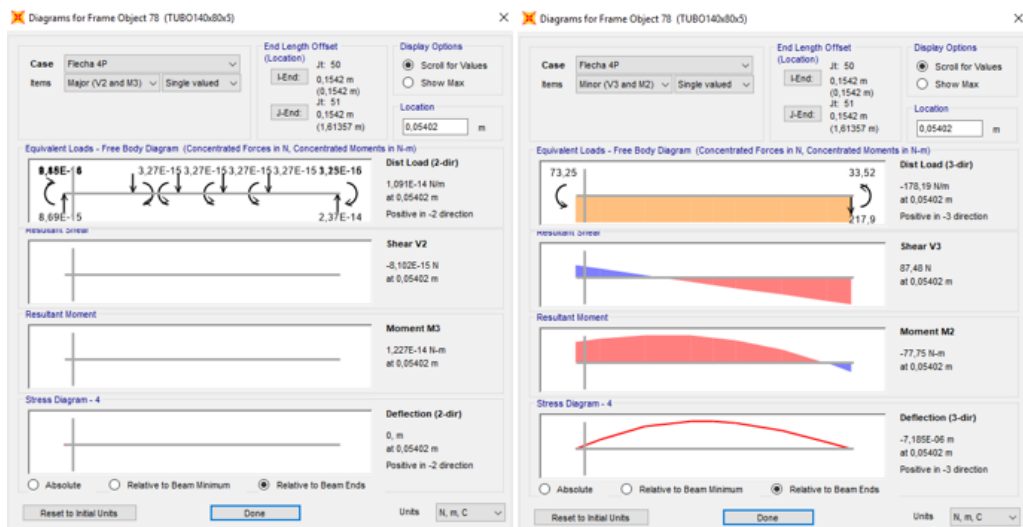


Ilustración 90- Diagramas de cortantes y flectores en ambas direcciones

La tensión normal máxima obtenida bajo el criterio de Von Mises se alcanza en la sección central de la barra. Su valor es bastante inferior al del módulo elástico del acero, luego no habrá plastificación. Su valor es de 7.834.124,14 N/m².

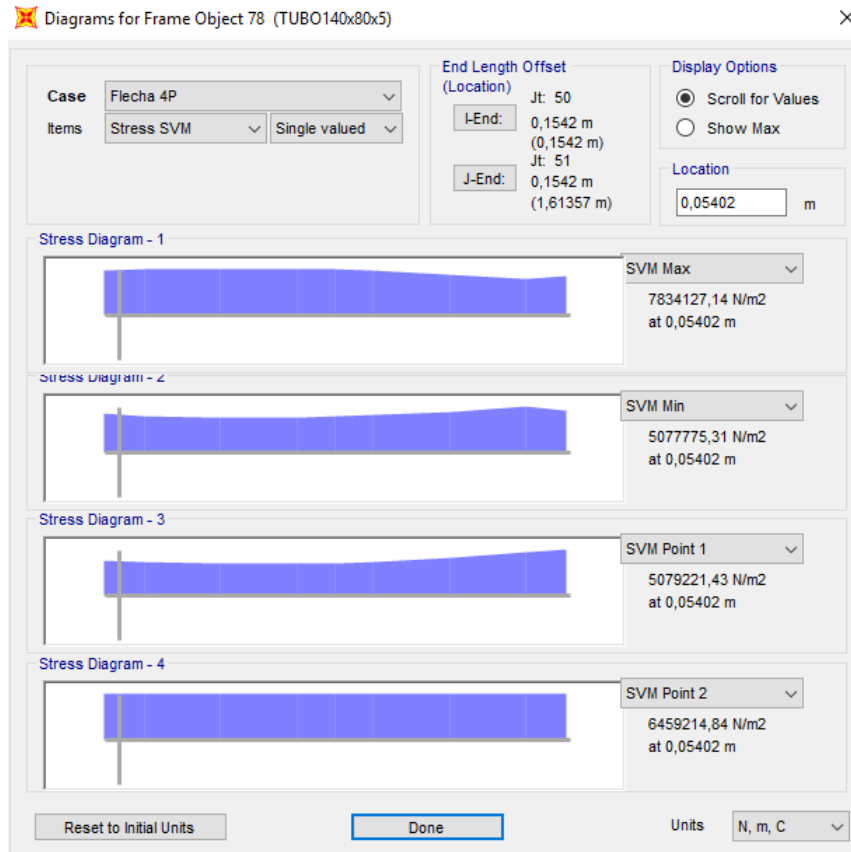


Ilustración 91- Diagrama tensiones a través de criterio de Von Mises

$$\sigma_{Max-VM} = 7,834 \text{ MPa} < 275 \text{ Mpa}$$

El factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{7.834.124,14} = 35,1028$$

7.6.1.3.2-Caso de sobrecarga de uso

De la misma forma con la aplicación de la sobrecarga de uso los valores de esfuerzos se amplificarán considerablemente.

El axil alcanza un valor de 37.016,19 N. Éste tiene lugar en el extremo del cordón superior. Los diagramas de cortantes y flectores se desprecian en la dirección 2, pero en la dirección 3 el momento máximo se alcanza pasando la sección media de la barra con un valor negativo de 267,77 Nm, y una deflexión de 0,00002 m. No se aprecia efecto alguno de torsión.

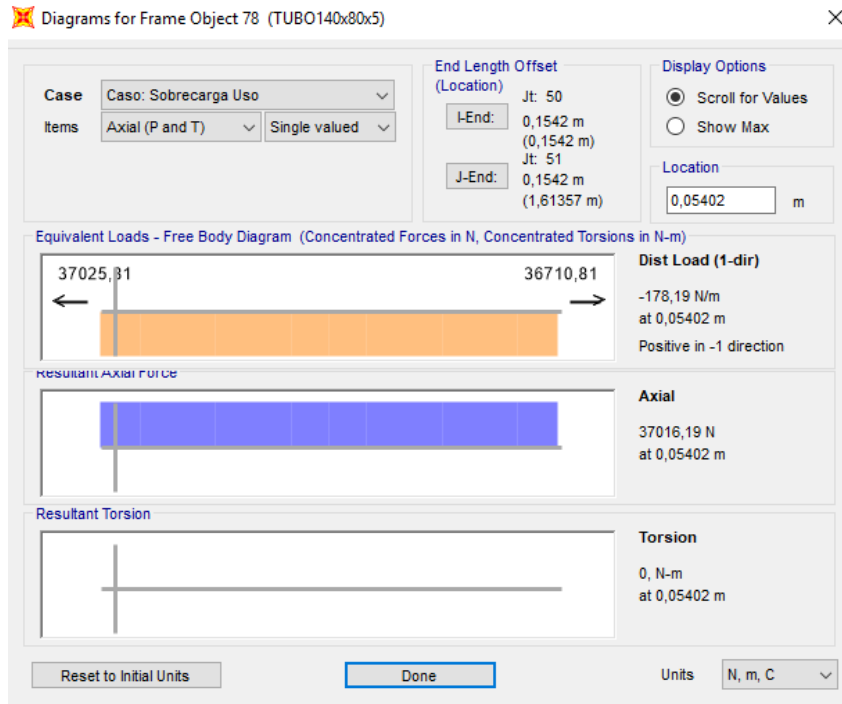


Ilustración 92- Diagrama de axiles y toorsores

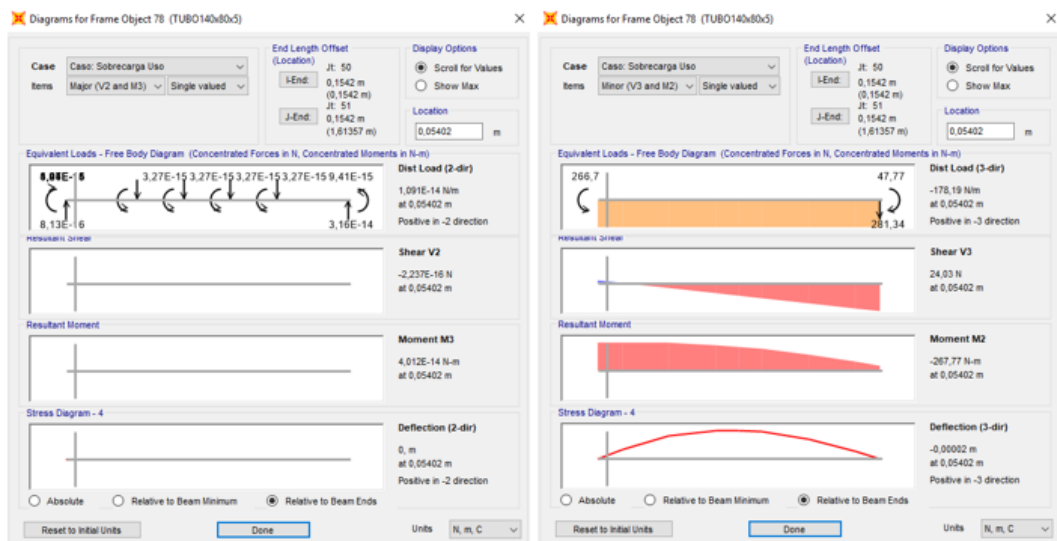


Ilustración 93- Diagramas de cortantes y flectores en ambas direcciones

La tensión normal máxima obtenida bajo el criterio de Von Mises se alcanza en una sección no coincidente con la central de la barra. Se encuentra algo más cercana al cordón superior. Su valor es bastante inferior al del módulo elástico del acero, luego no habrá plastificación. Su valor es de 22.371.411,5 N/m².

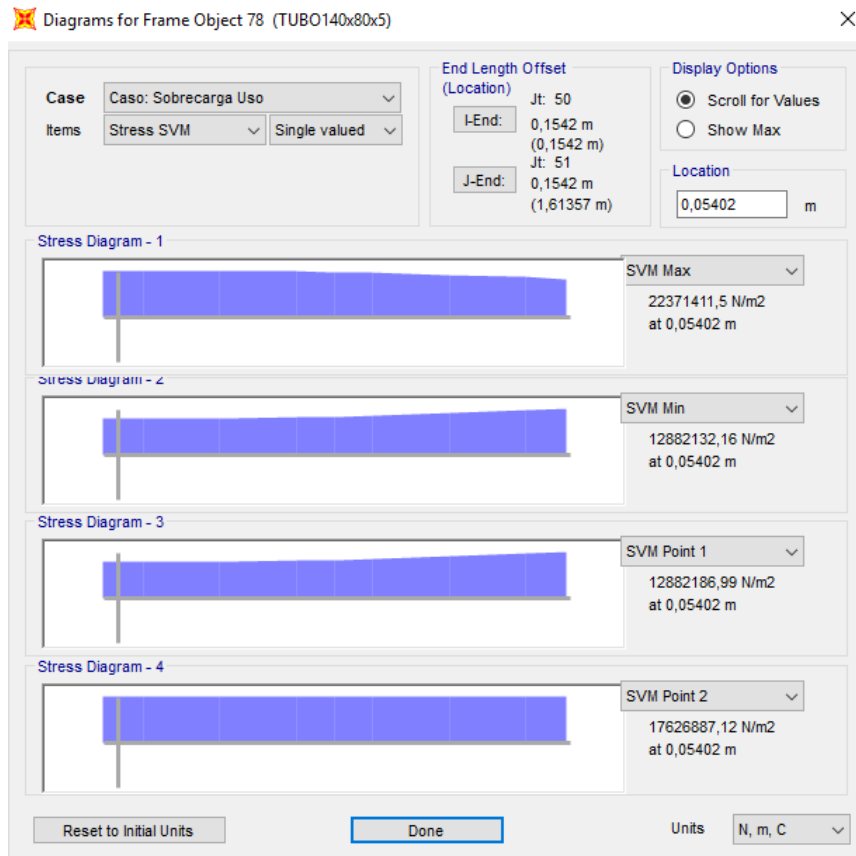


Ilustración 94- Diagrama tensiones a través de criterio de Von Mises

$$\sigma_{Max-VM} = 22,371 \text{ MPa} < 275 \text{ MPa}$$

El factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{22.371.411,5} = 12,2924$$

7.6.1.4-Montantes laterales

Se estudiará uno de los dos montantes laterales que aparecen ya que es indiferente una que otra ya que la estructura es simétrica. Se escoge la situada en el extremo izquierdo.

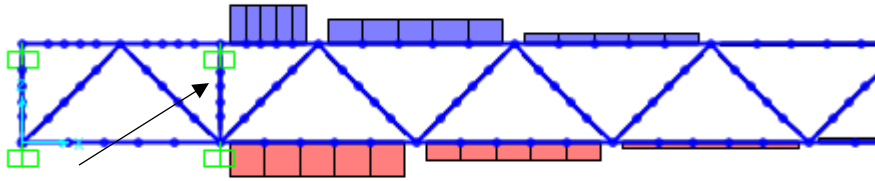


Ilustración 95- Montante a estudiar

7.6.1.4.1- Caso de 4 personas en centro de vano

El montante estudiado se encuentra sometido a esfuerzos de compresión y de tracción (la zona traccionada es próxima al cordón superior y la comprimida al inferior) alcanzando un valor de 316,8 N en ambos extremos del montante.

No aparecen ni diagrama de momentos ni de cortantes en ninguna de las direcciones, solamente se encuentran los esfuerzos axiales.

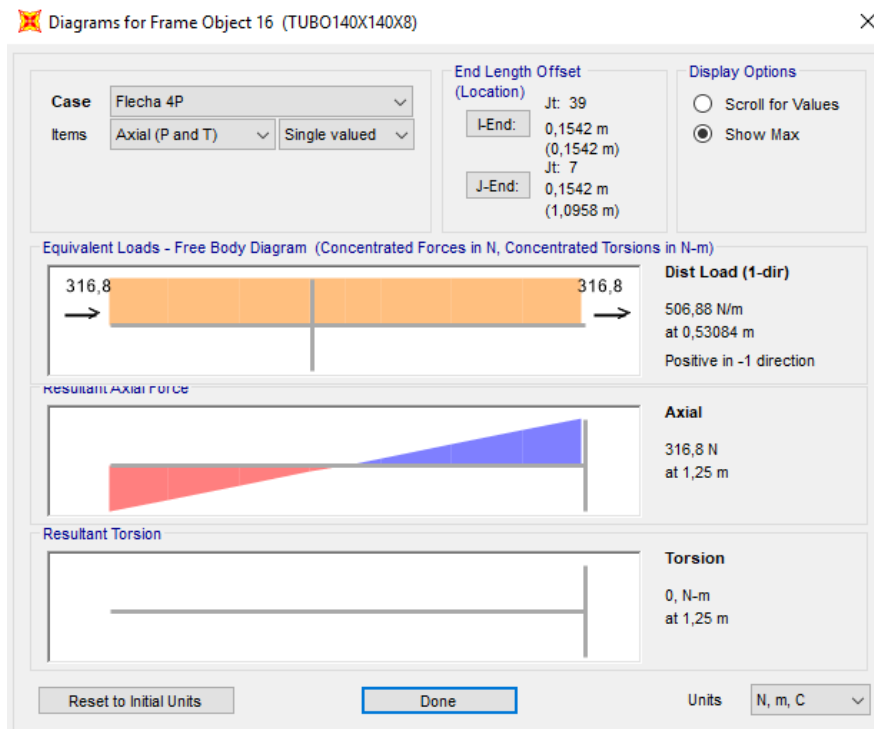


Ilustración 96- Diagrama de axiles y torsores

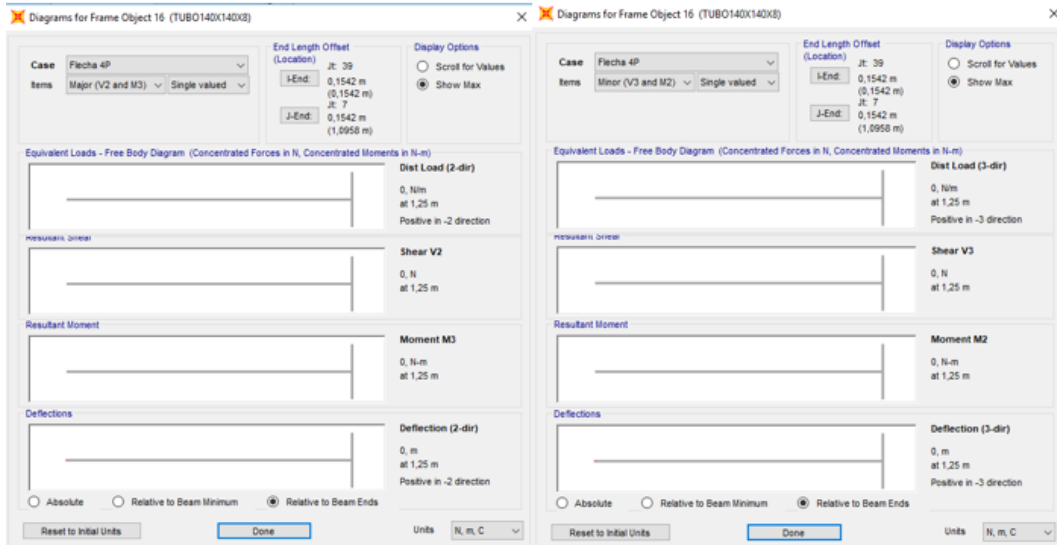


Ilustración 97- Diagramas de cortantes y flectores en ambas direcciones

La tensión normal máxima obtenida bajo el criterio de Von Mises se alcanza en los extremos del montante, en ambos. Su valor es bastante inferior al del módulo elástico del acero, luego no habrá plastificación. Su valor es de 75.000 N/m².

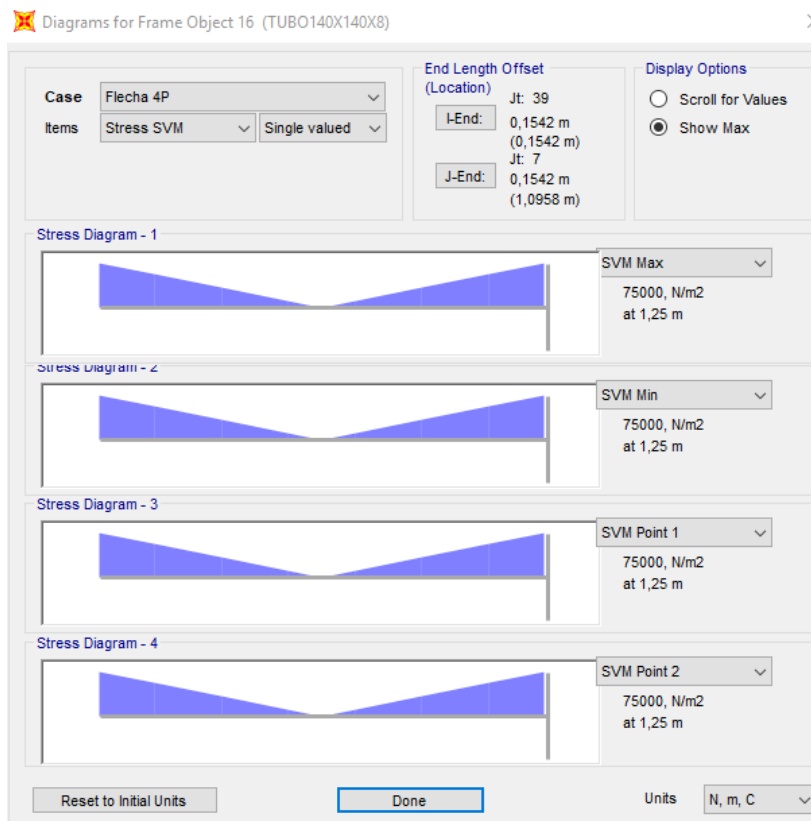


Ilustración 98- Diagrama tensiones a través de criterio de Von Mises

$$\sigma_{Max-VM} = 0,075 \text{ MPa} < 275 \text{ Mpa}$$

El factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{75.000} = 3666,6667$$

7.6.1.4.2- Caso de sobrecarga de uso

El axil no varía respecto al caso anterior, siendo este de 490,69 N en el extremo del cordón inferior. Y el valor del momento sigue siendo nulo también.

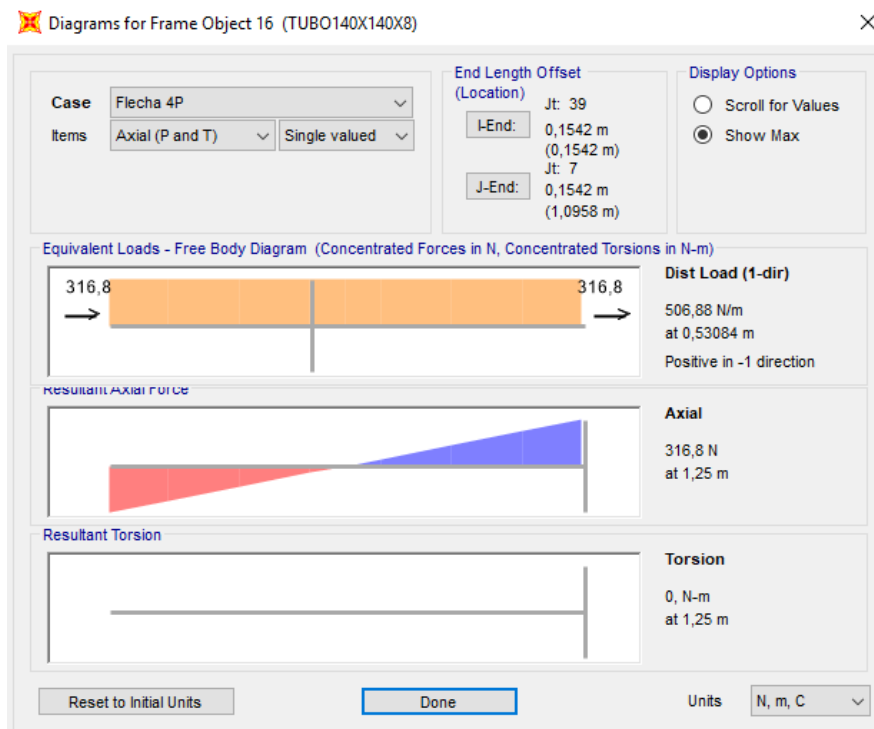


Ilustración 99- Diagramas de axiles y torsores

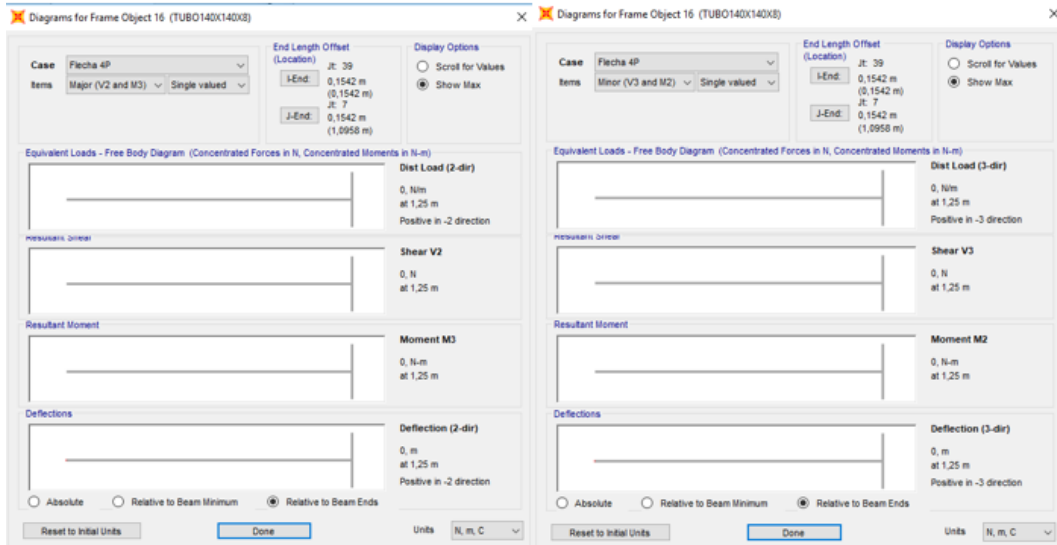


Ilustración 100- Diagramas de cortantes y flectores en ambas direcciones

La tensión normal máxima obtenida bajo el criterio de Von Mises se alcanza en ambos extremos del montante. Su valor es bastante inferior al del módulo elástico del acero, luego no habrá riesgo de plastificación. Éste es de 219.277,5 N/m².

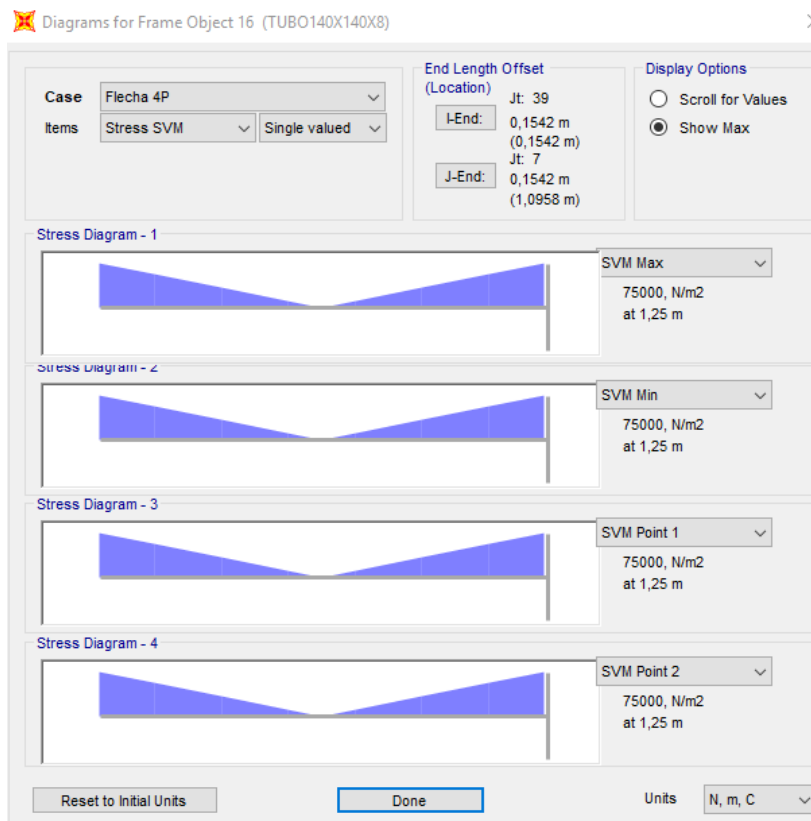


Ilustración 101- Diagrama tensiones a través de criterio de Von Mises

$$\sigma_{Max-VM} = 0,2192 \text{ MPa} < 275 \text{ MPa}$$

El factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{219.277,5} = 1.254,118$$

Por último, el diagrama de esfuerzos sobre el eje Y se muestra a continuación. Se representa en perspectiva porque de ser de otra forma no se apreciaría apenas a qué barras hace alusión a los esfuerzos según la dirección perpendicular.

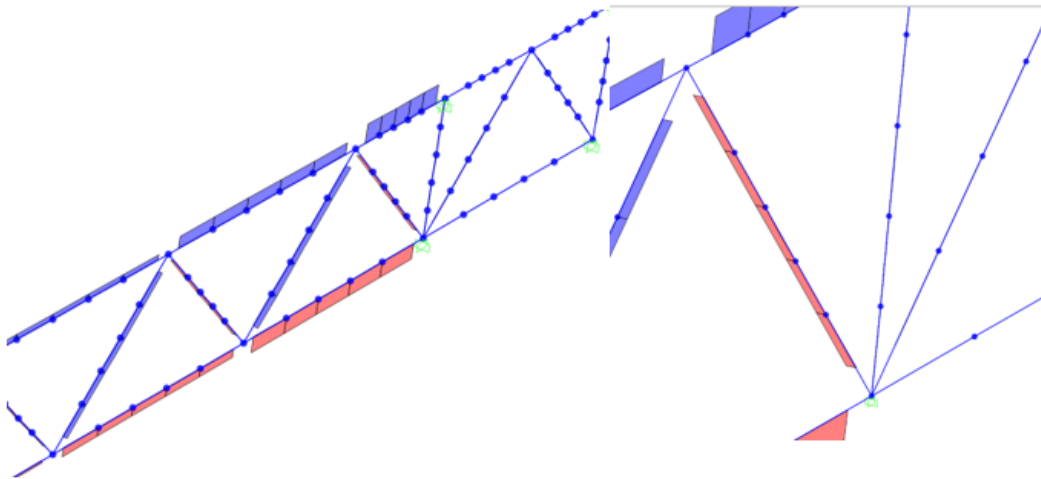


Ilustración 102- Diagrama esfuerzos en 3D

7.6.2- Pandeo local

Se hará un estudio de pandeo (*Buckling*) con las solicitaciones que generan las 4 personas en nudo central y para la sobrecarga de uso. El ensayo de pandeo solo podrá ser ejecutado con SAP2000. Luego el modelo generado debe ser suficientemente robusto para que estos resultados puedan tenerse en cuenta.

La solución será más exacta cuanto más fino sea el mallado de cada una de las barras. Esto quiere decir que se subdivide cada una de las barras en un mayor número de segmentos. Cuanto más fino sea el mallado que demos mejor y más real serán los resultados.

En la simulación se ha optado por hacer un mallado de 5 elementos por barra, de ahí que aparezcan puntos intermedios en cada barra.

Los resultados que se obtienen con la condición impuesta de nudos rígidos, que se hablará y explicará en apartados siguientes.

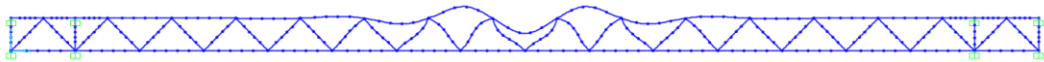


Ilustración 103- Primer modo de pandeo

El factor de carga al que se produce este primer modo es $\lambda=68,5492$. Tiene cierto sentido que lleguen a pandear las barras situadas en el cordón superior.

Según la instrucción IAP-11 [8], se determina que a efectos estáticos de la sobrecarga de uso debida al tránsito peatonal es uniformemente distribuida con un valor igual a 400 kg/m^2 . Por tanto, se establecerá una nueva simulación de pandeo teniendo el caso más desfavorable marcado por la normativa.

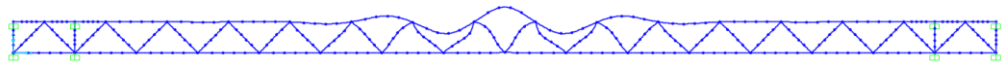


Ilustración 104- Primer modo de pandeo con la sobrecarga

El factor de carga que se necesita multiplicar a todas las cargas para que se produzca el pandeo es de $24,5239$.

Este resultado tiene sentido ya que al ser un valor de cargas inferior el de la primera simulación su factor de pandeo es superior que el segundo.

Para concluir con el factor de pandeo, cuanto más fino sea el mallado de cada barra la solución que se obtenga será más exacta y estará más acorde con la realidad. A continuación, se mostrarán distintos casos en los que cambiando el número de elementos de cada barra se obtendrán distintas soluciones.

-1 elemento:



Ilustración 105- Pandeo con 4 personas (factor pandeo=87,7507)



Ilustración 106- Pandeo con sobrecarga de uso (factor pandeo=27,43622)

-3 elementos:

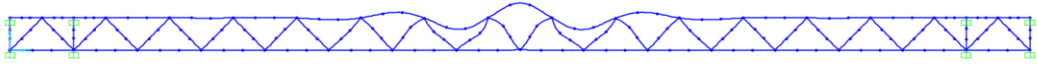


Ilustración 107- Pandeo con 4 personas (factor pandeo=68,7771)

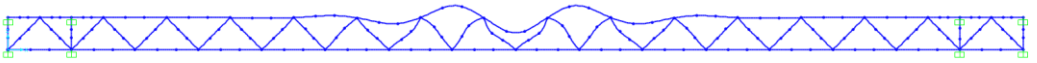


Ilustración 108- Pandeo con sobrecarga de uso (factor pandeo=24,6059)

-10 elementos:



Ilustración 109- Pandeo con 4 personas (factor pandeo=68,4771)



Ilustración 110- Pandeo con sobrecarga de uso (factor pandeo=24,4980)

-15 elementos:



Ilustración 111- Pandeo con 4 personas (factor pandeo=68,4664)



Ilustración 112- Pandeo con sobrecarga de uso (factor pandeo=24,4938)

A medida que se hace un mallado más fino la solución tiende a un valor cada vez más certero. Si se siguiera aumentando el mallado los cambios en la solución del factor de pandeo serían cada vez menores. Por lo que no tendría sentido seguir. Este procedimiento se denomina “convergencia de malla”.

7.6.3-Pandeo por vuelco o pandeo lateral

El pandeo por vuelco es aquel que se produce cuando se sale del plano que contiene a la estructura. Cuando se está estudiando para el caso con sobrecarga de uso la deformada se obtiene cuando el coeficiente de pandeo es de 2,32 pero, cuando se estudia la situación de las 4 personas en el centro del vano se obtiene la deformada cuando el coeficiente de pandeo es de 6,25. Por estos valores habría que multiplicar a la carga para que se produjera dicho pandeo lateral o vuelco.

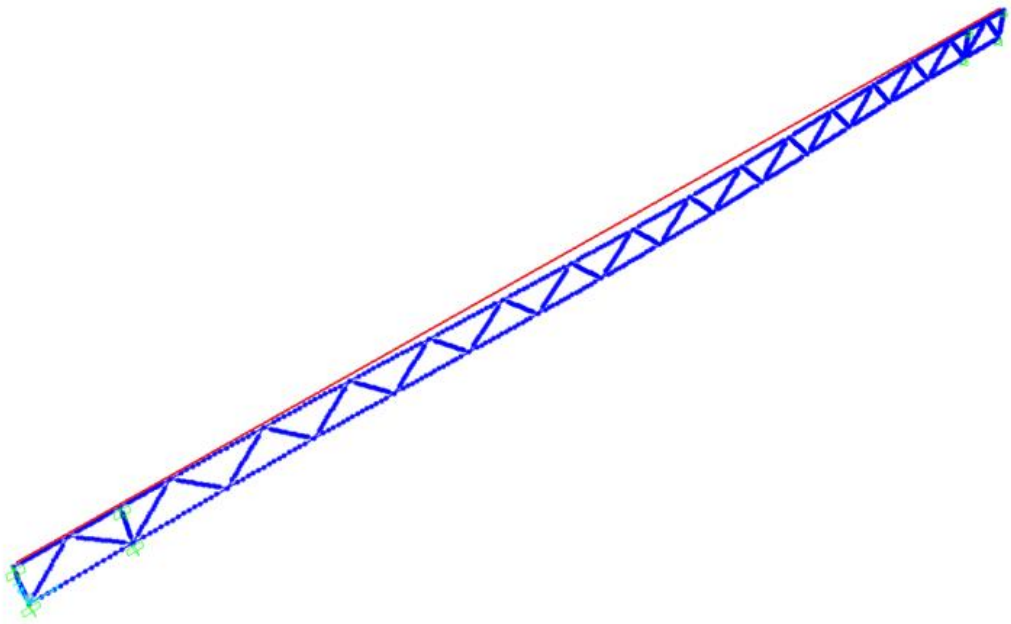


Ilustración 113-Vuelco en el caso de 4 personas ($\beta = 6,25$)

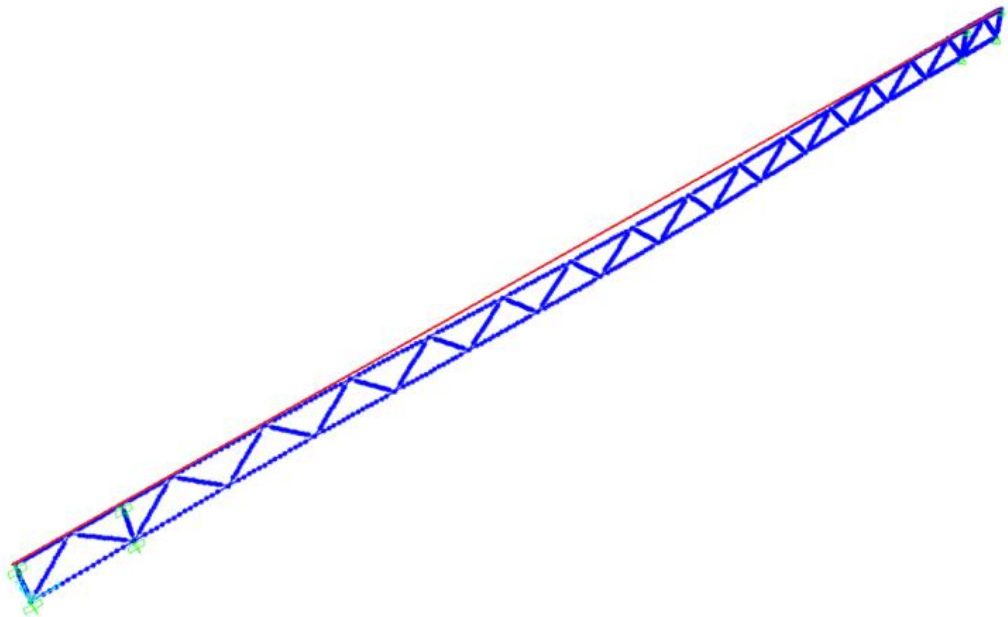


Ilustración 114-Vuelco en el caso de sobrecarga de uso ($\beta = 2,32$)

7.6.4-Flecha

En el caso en el que se encuentra el grupo de cuatro personas en el centro del vano el valor de la flecha máxima que se obtiene teniendo en cuenta el peso propio de la pasarela, situada en centro del vano es de un total de 0,0168 m, es decir, un valor de 16,8 mm.

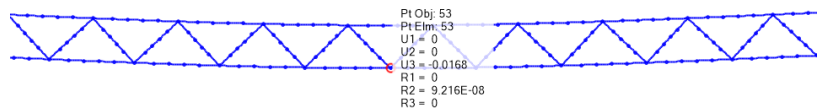


Ilustración 115-Flecha caso de 4 personas en el centro del vano

Si únicamente se analiza el estudio estático para el caso de la carga sobre el centro del vano se podrá comparar con aquella que se obtuvo durante la experimentación. Ésta fue de 1,2 mm frente a los aproximadamente 2 milímetros medidos con el telémetro laser. En ésta no se tiene en cuenta el efecto del peso propio.

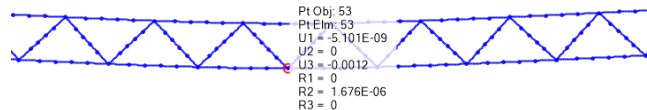


Ilustración 116-Flecha 4 personas sin tener en cuenta el peso propio de la pasarela

En cambio, para el caso de la sobrecarga de uso se obtiene una flecha con un valor de 0,0479 metros, es decir, una flecha de 47,9 mm.

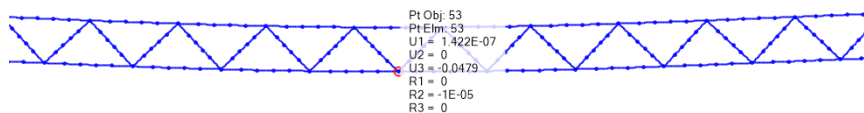


Ilustración 117-Flecha caso de la sobrecarga de uso

7.6.5-Deformada en el primer y segundo modo armónico

Las formas de la deformada que se obtienen en el primer y segundo modo armónico son como en la teoría se explicó en el apartado anterior 6.2-*Análisis modal*. Inicialmente el valor de la frecuencia para el primer y segundo modo es de 3,998 Hz y 10,04 Hz. Como la frecuencia es función de la rigidez dividida por la masa, se puede modificar el parámetro de la masa para así ajustar, en la medida de lo posible, estos valores con los obtenidos experimentalmente. Tras ensayo y error se llegó a obtener unos valores de 4,608 Hz para el primer modo y de 11,569 Hz para el segundo, muy cercanos a los medidos experimentalmente.

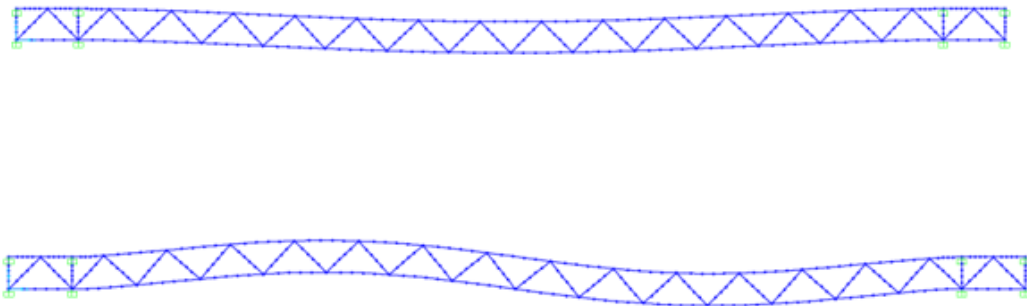


Ilustración 118- Primer y segundo modo armónicos de flexión en el plano

7.7-Modelado 3D de la pasarela

Previo a comenzar a explicar el modelizado de la estructura en 3D hay que hacer referencia a los tipos de perfiles que se van a emplear durante su ejecución. Cada uno de ellos tendrá una función definida dentro de la pasarela.

Tabla 8- Secciones de la pasarela

Montantes	□140.140.8
Cordón superior e inferior de la Warren	□140.80.5
Diagonales	□140.80.5
Cordones tablero	□80.60.6
Travesaños tablero de los módulos laterales	□140.140.8
Travesaños tablero de los módulos interiores	□90.50.6

7.7.1-Configuración inicial

Para modelar la pasarela en 3D hay que tener en cuenta, ahora, la sección Y. Esto es así ya que se trabajará en todos los planos que tengan vigas. Sobre el eje X se ampliará en 4 la malla y en el Z en una más. Sobre el Y se tendrán 5.

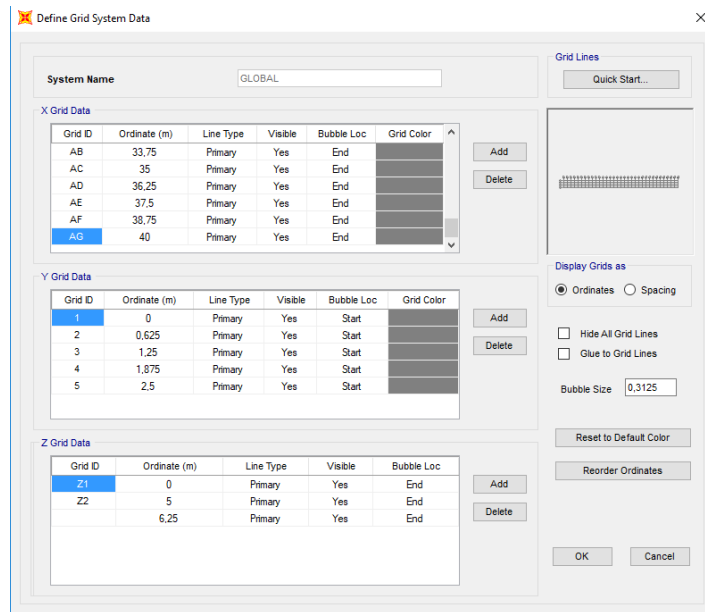


Ilustración 119- Configuración de la malla de trabajo

7.7.2-Soporte de cruce de cuatro brazos

Aparecen dos tipos de soporte, uno para la zona de cruce y otro en la zona de rampas de acceso. Sólo se modelizarán los respectivos a la zona de cruce ya que todo lo relevante a las rampas quedará perfectamente simplificado.

El soporte consta de cuatro brazos que parten desde el módulo anterior al que comienza el vano de la pasarela. Todos ellos son iguales y de sección variable. Se unen todos ellos en su base interseccionando todas sus líneas medias en el mismo punto.

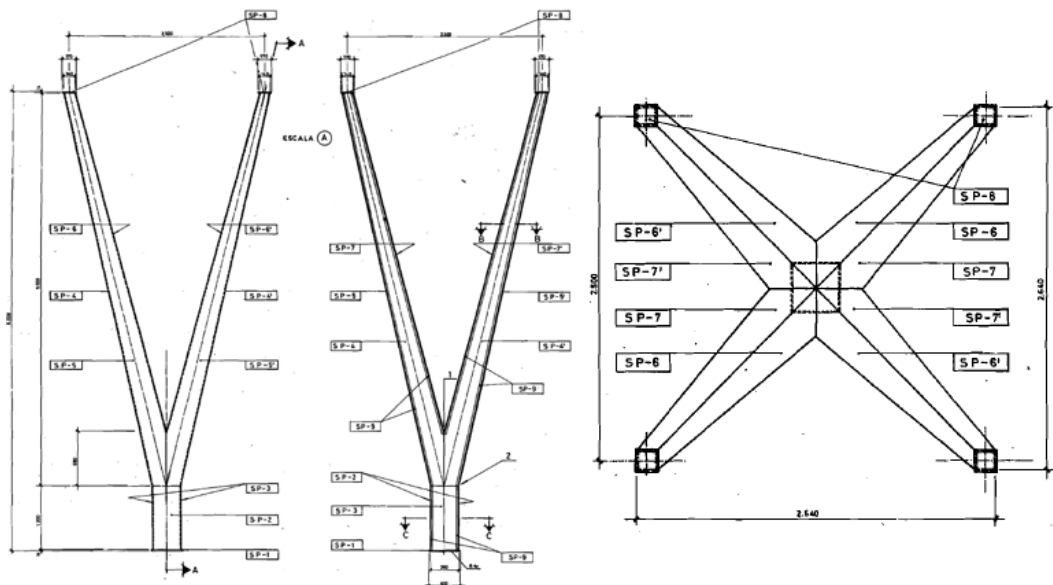


Ilustración 120- Vista alzado y su corte (izq.) y vista en planta

El espesor, según los planos, también es de espesor variable, siendo de 10 milímetros en la cota superior. La sección "A", la más pequeña, es la que se une a la zona de tránsito, de sección cuadrada. Para determinar el valor de la sección "B", es decir, la inferior sin tener en cuenta la forma en la que interseccionan se hará con el uso de la escala proporcionada. La sección inferior se hará prolongando la arista que intersecciona con el resto de las vigas. Como se puede observar coincide con el cambio de dirección. Ésta ya es el tramo de viga que se cimentará al suelo. El espesor en esta zona pasa a ser de 20 milímetros.

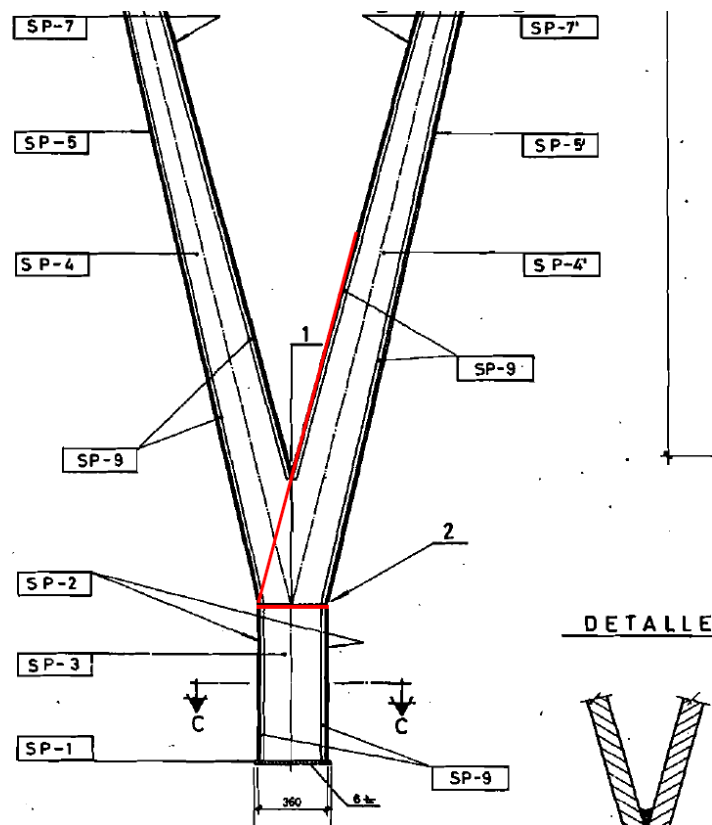


Ilustración 121- Prolongación de arista viga tubular

La *Tabla 4* refleja las dimensiones que adoptan los extremos de la viga. Es una aproximación adoptada para el modelado de estos soportes no un valor exacto.

Tabla 9- Perfiles brazo tubular

Sección A	□140.10
Sección B	□400.20

Una vez que se definen estos dos tipos de secciones se tiene que generar un perfil nuevo en el cual se dirá cuál de ellas es la inicial y cual la final. Además de la totalidad de la viga que tendrá esta transición, que en el caso en el que se está será el máximo.

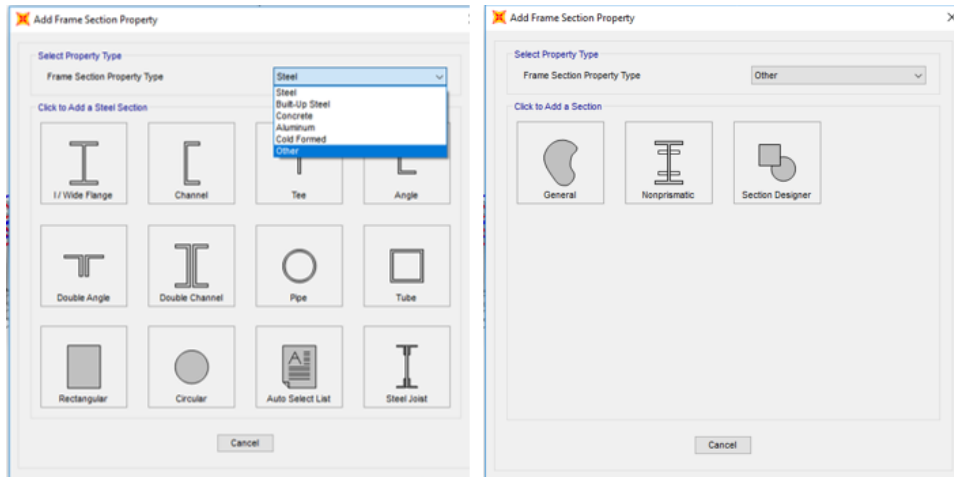


Ilustración 122- Generación de perfil variable

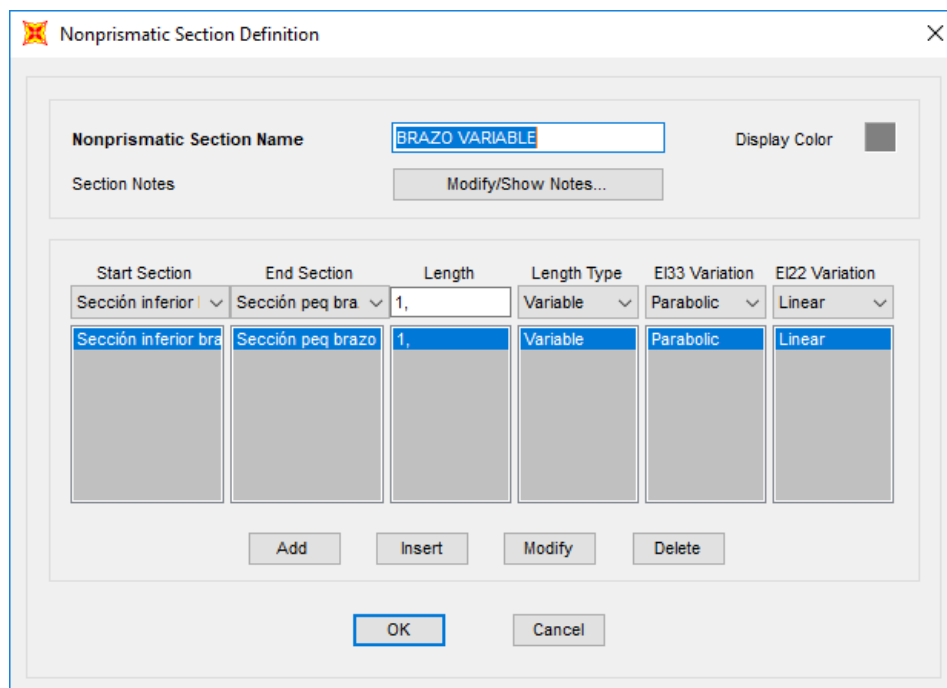


Ilustración 123- Configuración de intervalos de variación

Se comprueba con la opción *Extrude* y en visualización 3D que la viga ha quedado perfectamente configurada y dispuesta. Para acabar se coloca el empotramiento en su base.

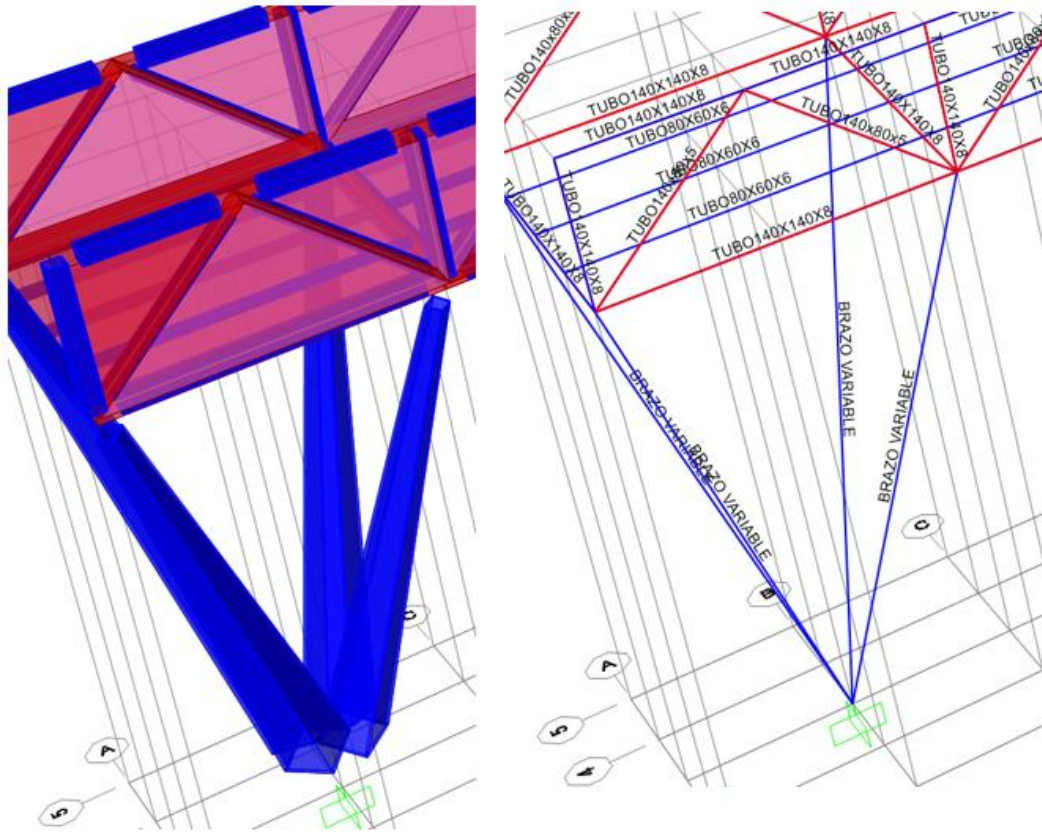


Ilustración 124- Vigas sección variable. Extrude a la izquierda.

7.7.3-Cordones de tablero

Aspecto que en el modelado 2D solamente se tuvo en cuenta haciendo una simplificación con una carga distribuida sobre el cordón inferior de la celosía Warren.

Ahora se define el perfil y se dibujan sobre el plano XY.



Ilustración 125- Cordones del tablero en 2D

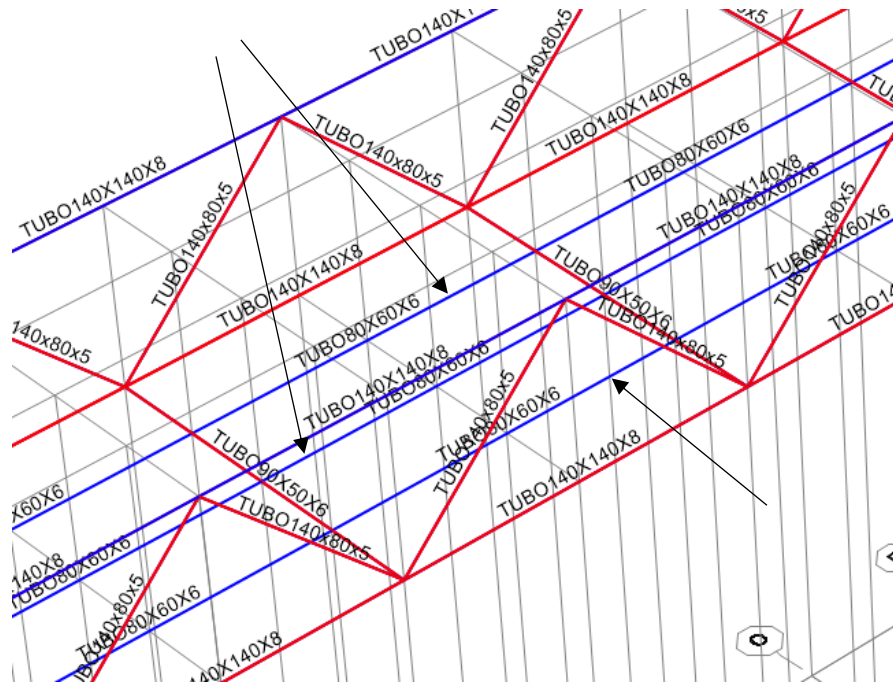


Ilustración 126- Cordones del tablero en 3D

7.7.4-Travesaños

Se emplean dos tipos de perfiles para el montaje de los travesaños que unirán las dos celosías laterales y sobre donde se montará posteriormente el tablero para el paso de viandantes.

En los módulos laterales se dispondrán travesaños con un perfil tipo $\square 140.140.8$. Los módulos laterales hacen alusión a aquellos en donde se unen los brazos del soporte. El resto de los travesaños, todos los dispuestos por el vano de la pasarela, son de dimensión inferior, siendo así de $\square 90.50.6$.

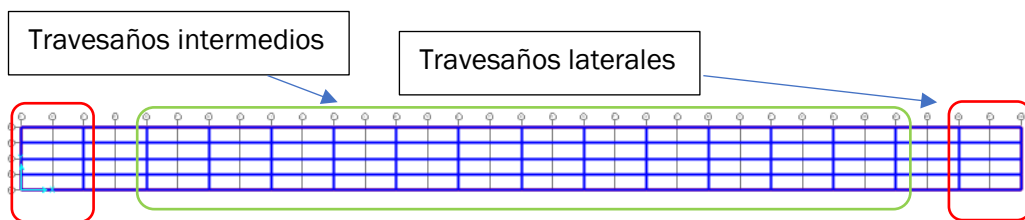


Ilustración 127- Travesaños de la pasarela (verticales según vista de plano XY)

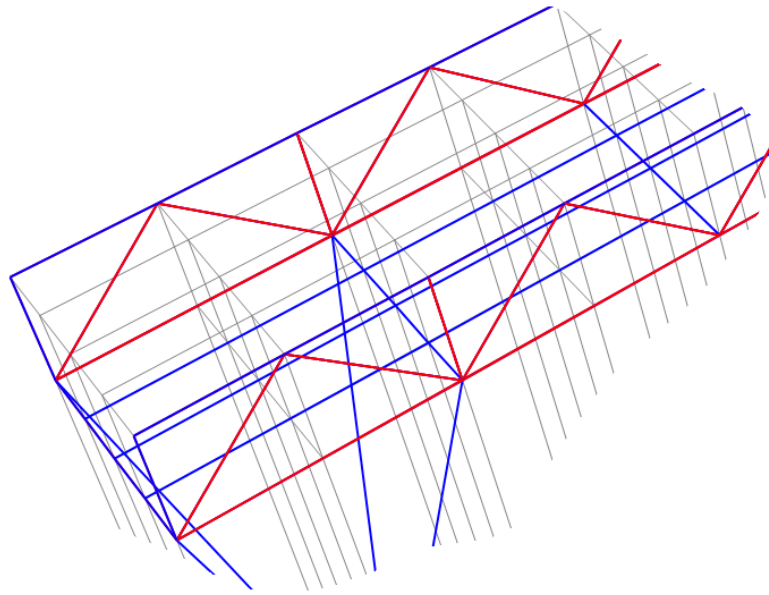


Ilustración 128- Vista travesaños en 3D

7.7.5-Tablero

Para simular el elemento del tablero se ha aplicado masa superficial sobre un elemento área previamente definido. Cada uno de los módulos lleva un área definida con su correspondiente masa superficial con la que contribuye en éste.

La masa total del tablero se corresponde con 5.978,56 kg, repartida a lo largo de 40 metros de longitud y 2,5 metros de ancho.

$$masa\ superficial_{tablero} = \frac{masa\ total\ tablero}{longitud \times ancho} = \frac{5.978,56\ kg}{40\ m \times 2,5\ m} = 59,78\ \frac{kg}{m^2}$$

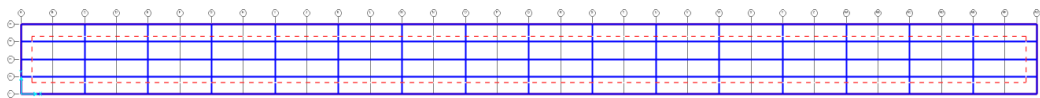


Ilustración 129- Módulos representativos del tablero

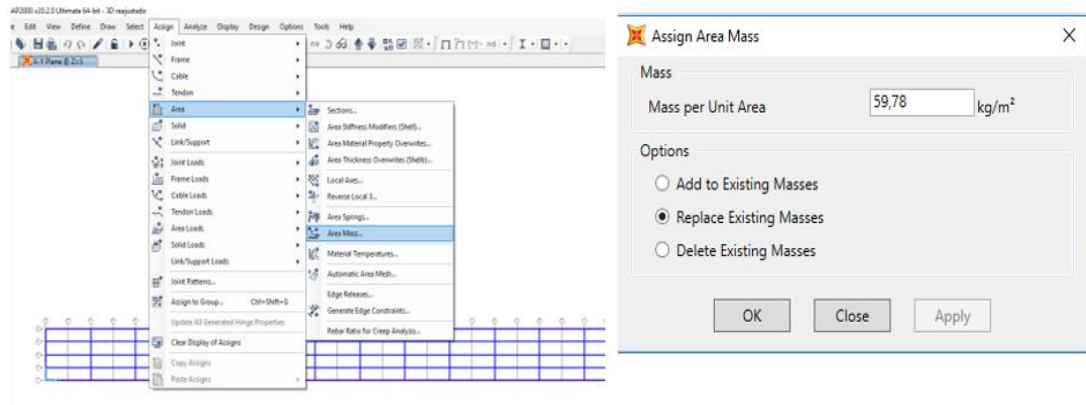


Ilustración 130- Introducción de masa superficial

7.7.6-Rejillas triangulares

Se tratarán de la misma forma que en el caso de dos dimensiones.

Como para el estudio estático el incorporar masas a modo de simplificar las rejillas no tiene ninguna alteración en la estructura se tiene que simplificar a una carga distribuida a lo largo de cada una de las celosías Warren. Las masas se distribuyen sobre un elemento área previamente definido.

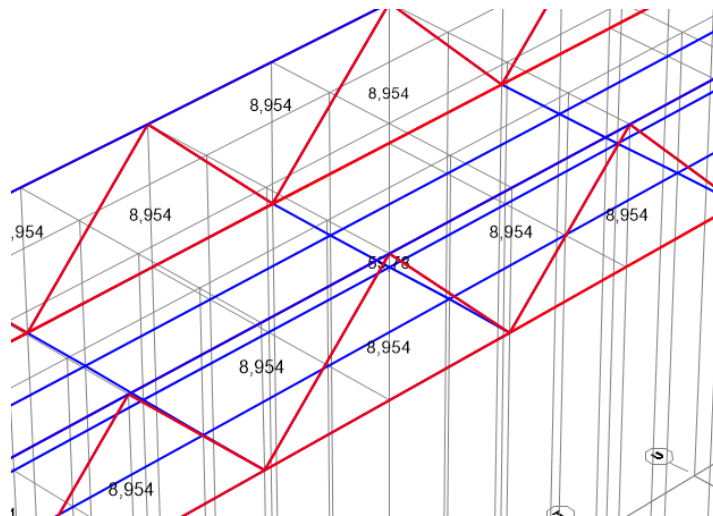


Ilustración 131- Masa distribuida por cada área triangular

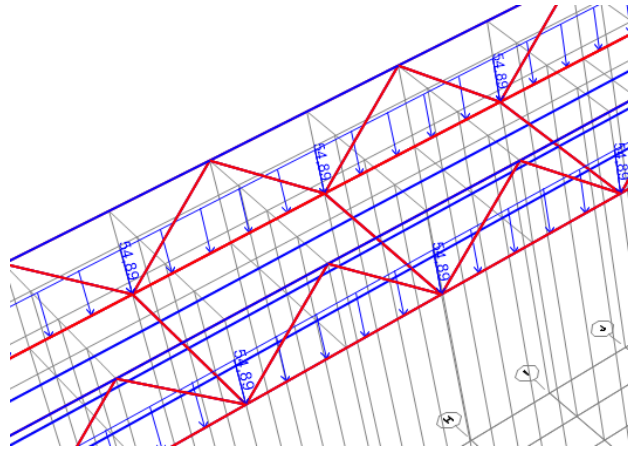


Ilustración 132- Carga distribuida debida a las rejillas para el estudio estático

7.7.7-Rigidización de nudos

Al igual que en el modelado de la celosía Warren en dos dimensiones, se adoptarán los mismos valores para diagonales y resto de uniones. En cambio, en los soportes de cuatro brazos se adoptará criterio propio del doble de la consideración de distancia completamente rígida ya que al consolidar cuatro vigas será una unión con rigidez superior.

Para el nudo en el que se empotran los cuatro brazos se ha supuesto que la longitud que contribuye a la rigidez del nudo a esa viga es de 0,6 m y en su extremo el doble que, en las diagonales, es decir, un total de 0,2698 m.

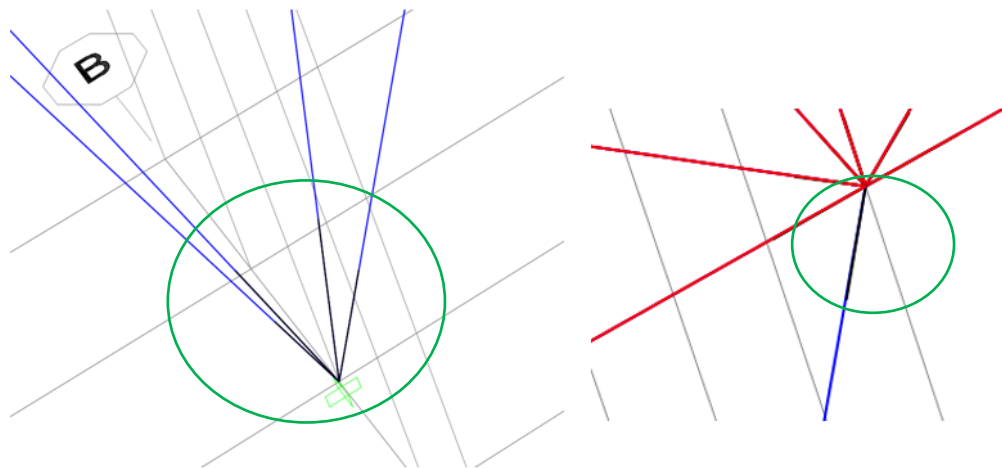


Ilustración 133- Nudos rigidizados de los soportes

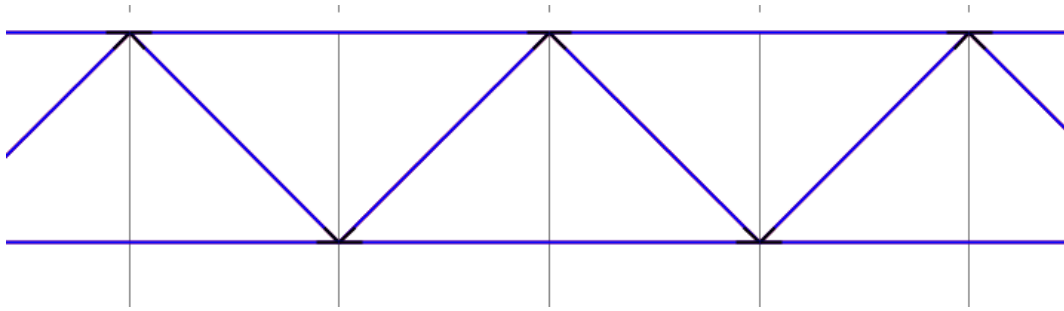


Ilustración 134-Celosías Warren con nudos rigidizados

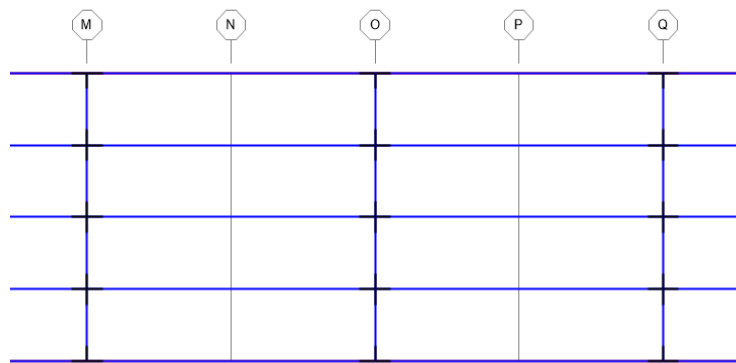


Ilustración 135- Nudos rigidizados de travesaños con cordones de tablero

7.7.8-Patrones de cargas

El caso que será objeto de estudio será, al igual que en el modelado en dos dimensiones, la situación en la que se encontraban un total de cuatro personas en el centro del vano.

Estableciendo un valor promedio de masa se estima que cada uno de los individuos pesaban aproximadamente 80 kilogramos. Esto hace que se tenga una carga total de 3.200 N. Esta carga se va a dividir en dos cargas puntuales de igual valor (1.600 N) sobre el nudo del plano de las Warren.

Hay que tener en cuenta el resto de los elementos que fueron sustituidos por masas equivalentes que se contemplan en el análisis modal pero que en análisis estático no. Éstas son las debidas tanto a las rejillas como al tablero.

Los elementos rejillas serán sustituidos por dos cargas distribuidas a ambos lados de la pasarela sobre el cordón inferior de la celosía. Hay que tener en cuenta los catorce módulos del vano junto a los otros dos módulos referentes a la zona de soporte de los cuatro brazos.

$$q_{rejillas} = \frac{n^{\circ} \text{módulos} * \text{masa}_{rejilla} * \text{gravedad}}{\text{longitud}_{\text{vano+extremo soporte}}} = \frac{32 * 13,99 * 9,81}{40}$$

$$= 109,79 \frac{N}{m}$$

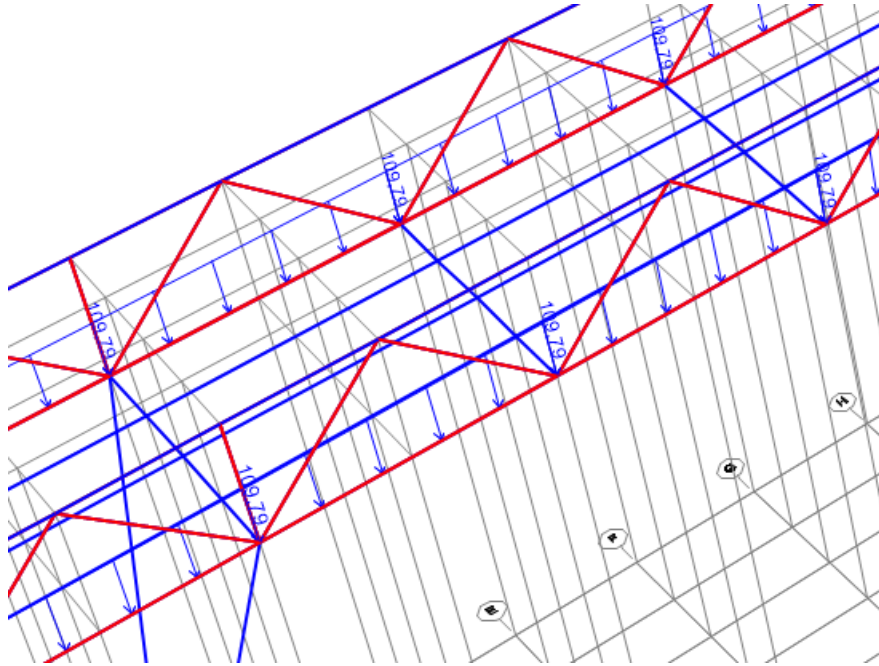


Ilustración 136- Carga debida a las rejillas

Por último, el tablero ejerce una carga superficial. Se convertirá a una carga de índole lineal y para simplificar aún más se trasladará a los laterales de la pasarela de valor igual a la mitad.

La masa total del tablero es de 5.978,56 kg y éste se distribuye a lo largo de 40 m.

$$q_{superficial \text{ por módulo}} = \frac{5.978,56 * 9,81}{40 * 2,5} = 586,4967 \frac{N}{m^2}$$

$$q_{lineal} = 586,4967 * 2,5 = 1.466,2418 \frac{N}{m}$$

Finalmente, la carga que recibe cada celosía será la mitad de la carga lineal.

$$q_{lin-celosía} = \frac{1.466,2418}{2} = 733,12 \frac{N}{m}$$

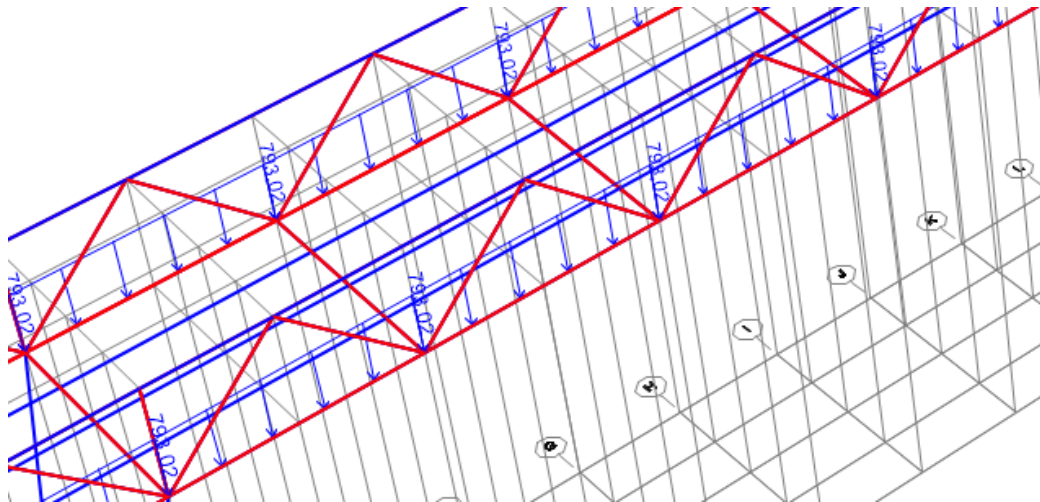


Ilustración 137- Carga debida al tablero

Además, aparecerá el caso de las cuatro personas en la sección media de la pasarela. Conforman un grupo de cuatro personas con una masa media de 80 kg cada una de ellas, por tanto, hay un total de 320 kg. Esto hace un total de aproximadamente 3.200 N. Quedará repartida a lo largo de todo el ancho, dando así una carga de 1.280 N/m.

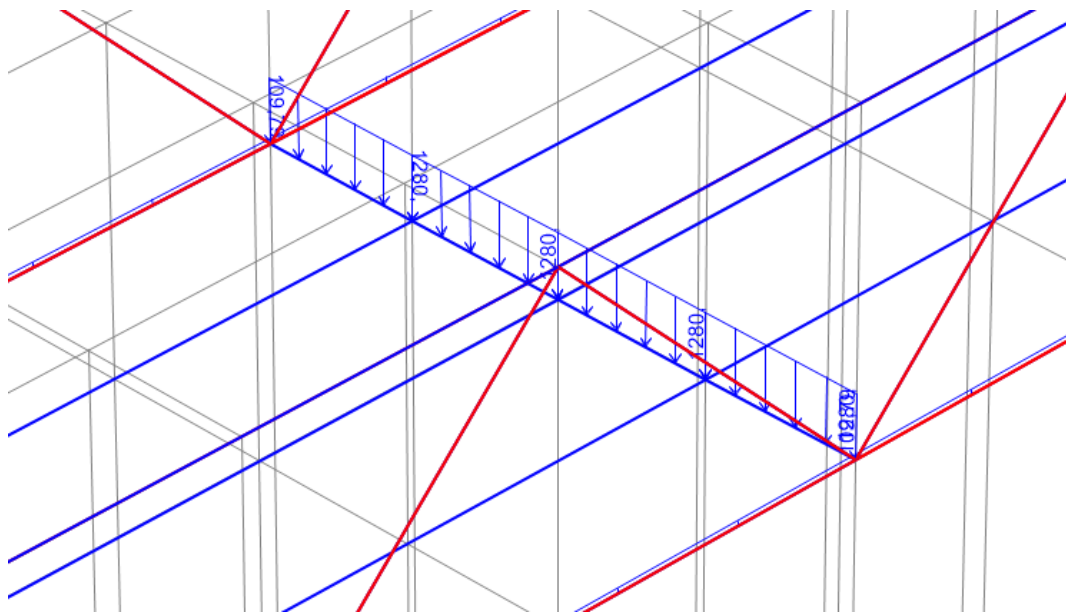


Ilustración 138-Carga distribuida representativa del grupo de personas

7.8-Resultados modelo 3D

7.8.1-Diagramas de esfuerzos

Para concluir con este apartado del modelado de la estructura completa se tiene que mencionar y hablar de su comportamiento resistente. Respecto al modelado en dos dimensiones en éste es posible que pueda aparecer algún fenómeno torsional en alguna barra.

Aparecen los soportes de cuatro brazos. Éstos tendrán la función de sustentar a la estructura y, por tanto, seguramente sea el elemento más crítico de la pasarela.

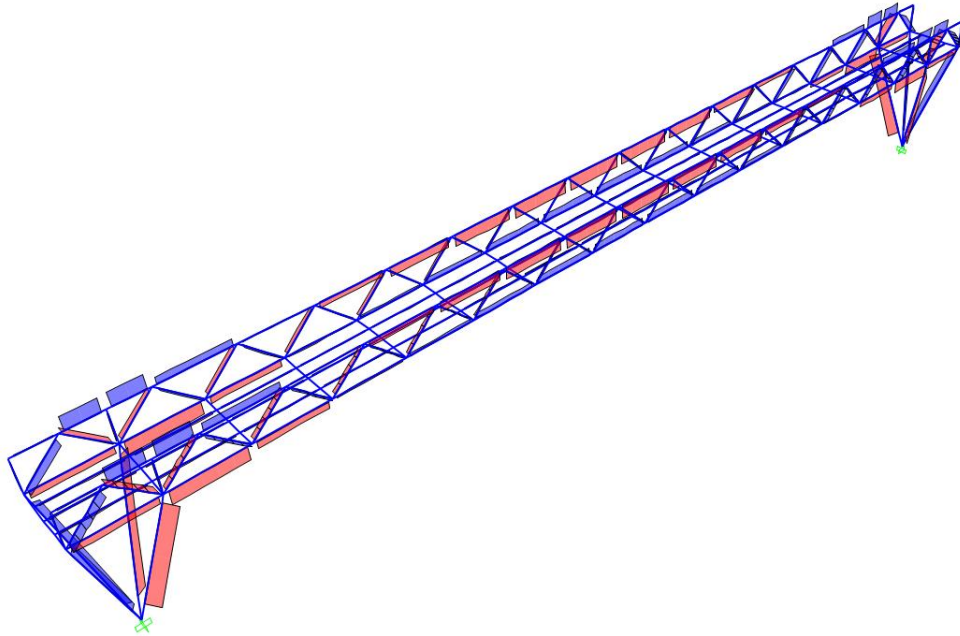


Ilustración 139- Diagramas de esfuerzos pasarela completa

7.8.1.1-Brazo soporte interior

7.8.1.1.1- Caso de 4 personas en centro de vano

Se aprecia a simple vista que zonas serán las más desfavorables y, como se comentó previamente, son los soportes de cuatro brazos. Los brazos interiores se encuentran sometidos a compresión (zona roja) y los exteriores a tracción (zona azul).

El axil al que está sometido la barra es de compresión y con un valor de 105.007,88 N mostrado en la *Ilustración 139*.

Aparece, además, efectos de torsión constantes por toda la barra ya no tan despreciables como ocurría anteriormente para el modelado en 2D.

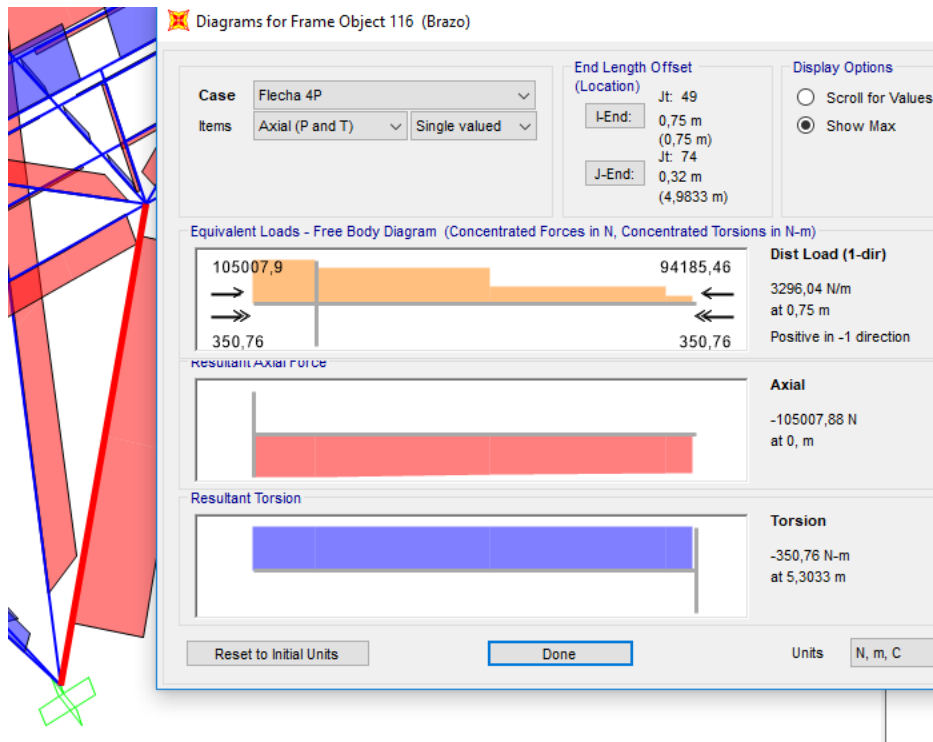


Ilustración 140- Diagrama axiles y torsores sobre brazo interior

Respecto a los cortantes hay que decir que su valor máximo se producen el extremo que se une a la pasarela donde deja de estar rigidizada, para la dirección 2 y en el otro extremo para la dirección 3 de la sección. En cuanto a los momentos ocurre lo mismo.

El desplazamiento máximo se produce en la sección media. Con los esfuerzos V2 y M3 genera una deflexión de 0,000387 m, y respecto V3 y M2, la deflexión es de 0,000601 m.

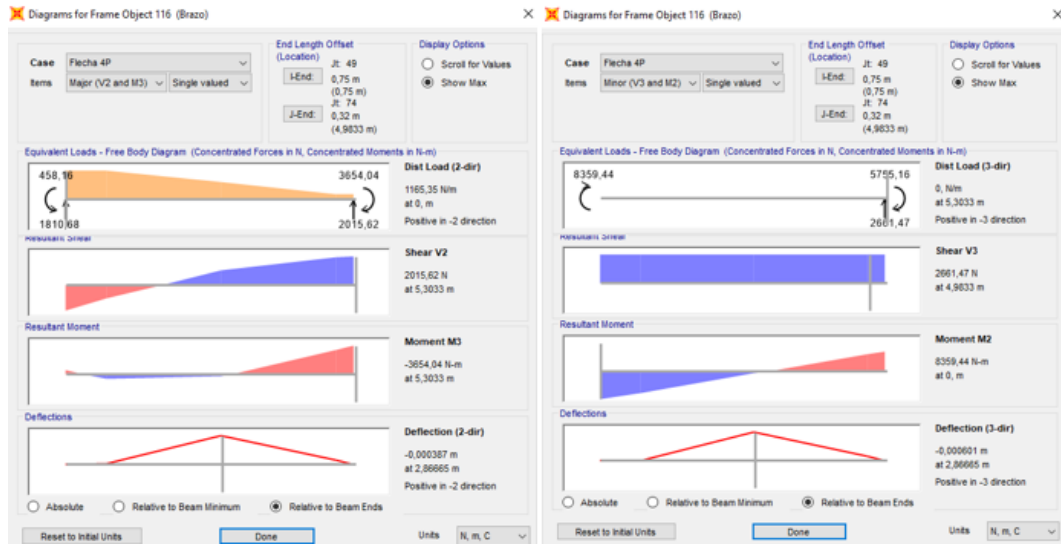


Ilustración 141- Diagrama de cortantes y flectores es ambas direcciones

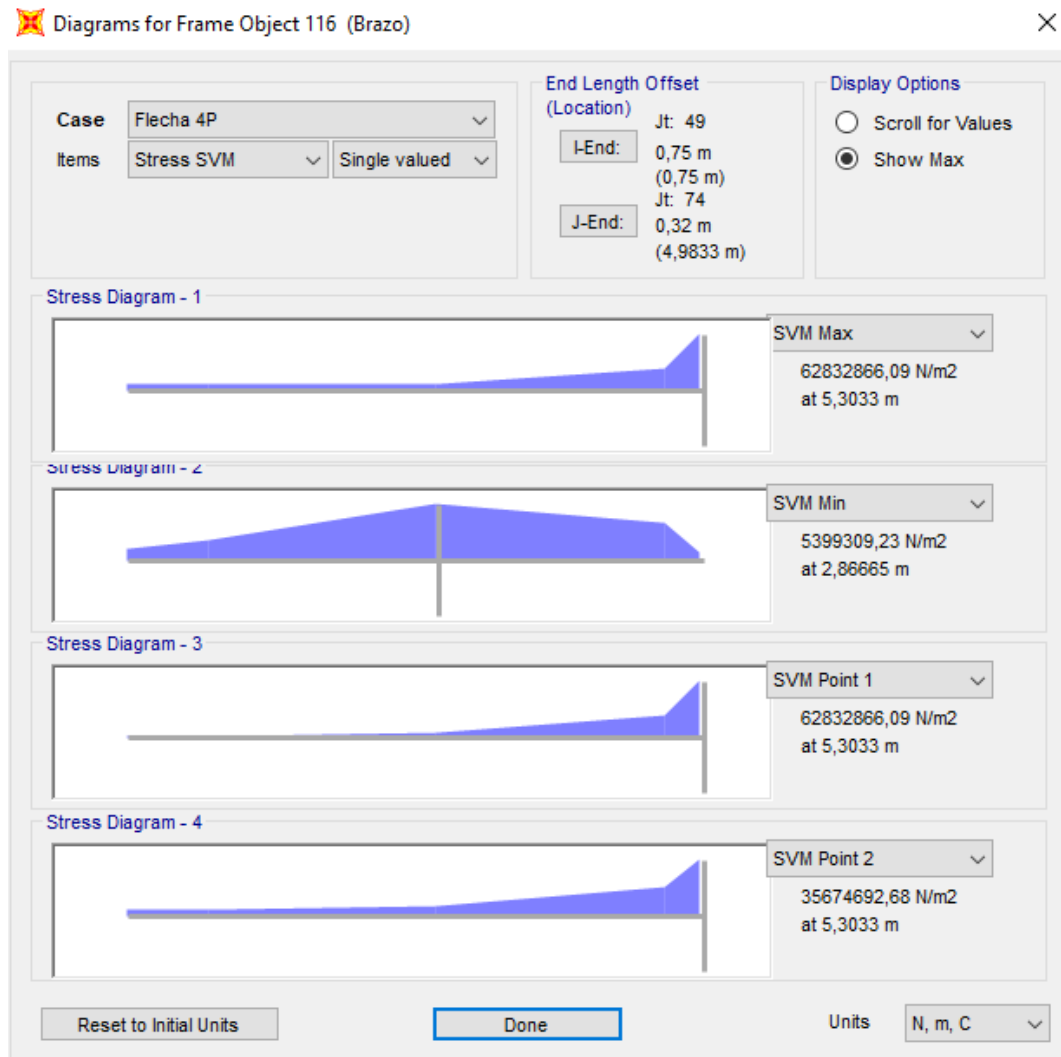


Ilustración 142- Diagrama de tensiones normales

El valor máximo de tensión normal se produce al comienzo de la unión rígida del nodo "j", es decir, el de la sección menor. Alcanza un valor total de 62.832.866,09 N/m². Luego no hay problema de plastificación ya que no se alcanza el límite elástico del acero.

$$\sigma_{Max-VM} = 62,832 \text{ MPa} < 275 \text{ Mpa}$$

Por tanto, el factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{62.832.866,09} = 4,3766$$

7.8.1.1.2- Caso de sobrecarga de uso

El esfuerzo axial de compresión se incrementa hasta los 149.395,89 Newtons con una ley de torsores constante de 396,05 Nm. El cortante sobre la dirección 2 llega hasta 3.039,08 N en la unión con la pasarela y un flector de 13.811,3 Nm; alcanzando una deflexión de 0,000408 m. En cambio, sobre la dirección 3 los valores son algo menores siendo el cortante en la unión del brazo con la pasarela de 3.777,72 N de tracción, con un momento flector máximo en el brazo de 13.042,57Nm. La deflexión en esta dirección es de 0,000658 m.

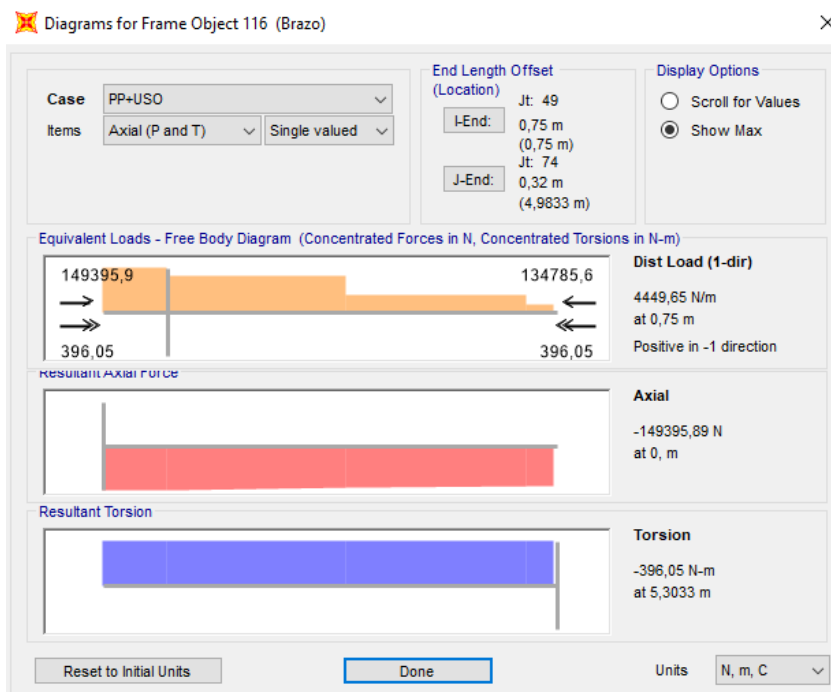


Ilustración 143-Diagrama axiales y torsores sobre brazo interior

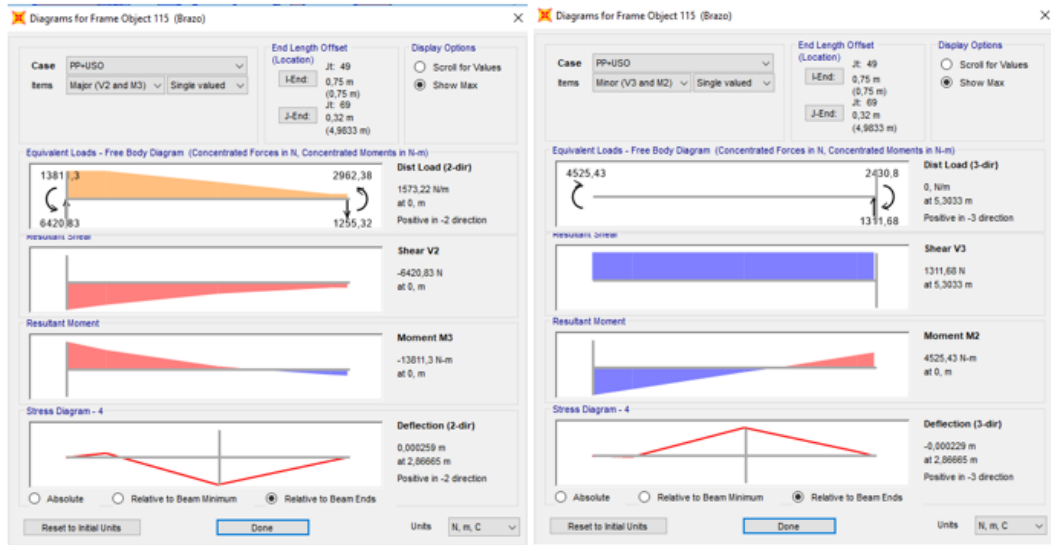


Ilustración 144-Diagrama de cortantes y flectores es ambas direcciones

La sección que alcanza la mayor tensión es la que se sitúa justo en la pasarela. Ésta alcanza un valor de $80.622.374,45 \text{ N/m}^2$. En ningún momento aparecerá fallo por plastificación.

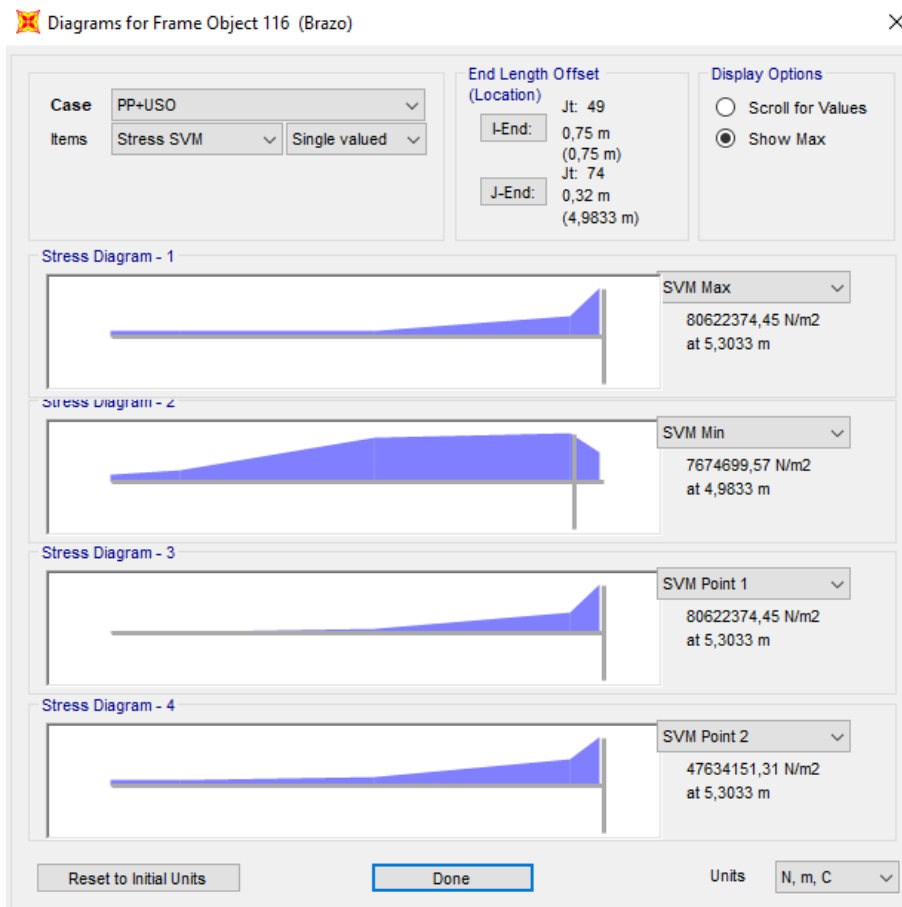


Ilustración 145-Diagrama de tensiones normales

$$\sigma_{Max-VM} = 80,622 \text{ MPa} < 275 \text{ Mpa}$$

Por tanto, el factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{80.622.374,45} = 3,4109$$

7.8.1.2-Brazo soporte exterior

7.8.1.2.1- Caso de 4 personas en el centro de vano

Luego, el brazo que se encuentra más a la izquierda se encuentra sometido a tracción, a diferencia de los que están en la parte interna. El valor máximo de éste es de 37.117,34 N. También aparecen torsores constantes a lo largo de todo el brazo con un valor de 262,42 Nm.

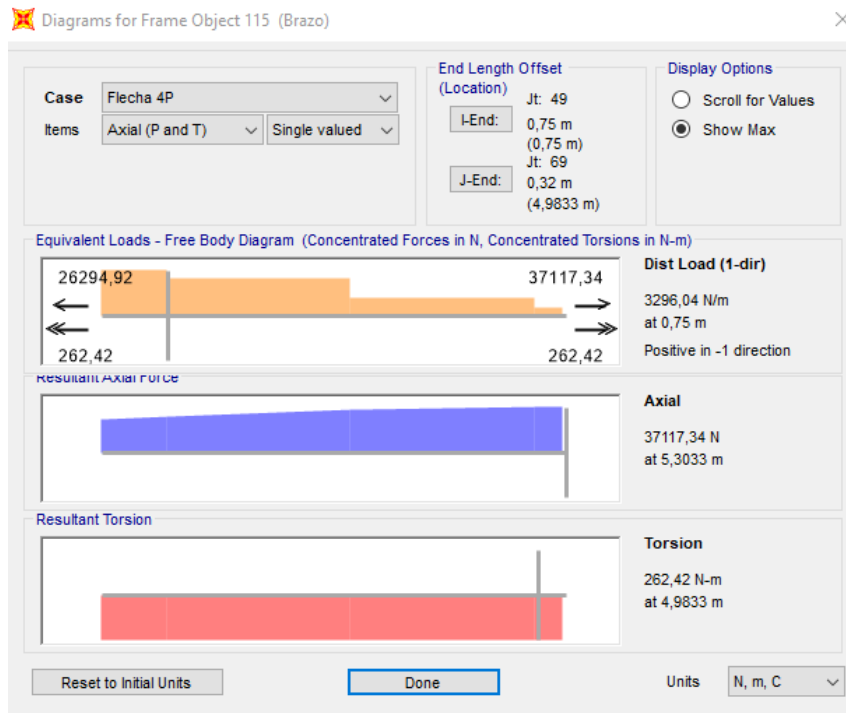


Ilustración 146-Diagrama axiles y torsores sobre brazo interior

Respecto a los cortantes hay que decir que su valor máximo se producen el extremo que conecta al terreno, para la dirección 2 y en el otro extremo para la dirección 3 de la sección. En cuanto a los momentos ocurre lo mismo.

El desplazamiento máximo se produce en la sección media. Con los esfuerzos V2 y M3 genera una deflexión de 0,000013 m, y respecto V3 y M2, la deflexión es de 0,000026 m.

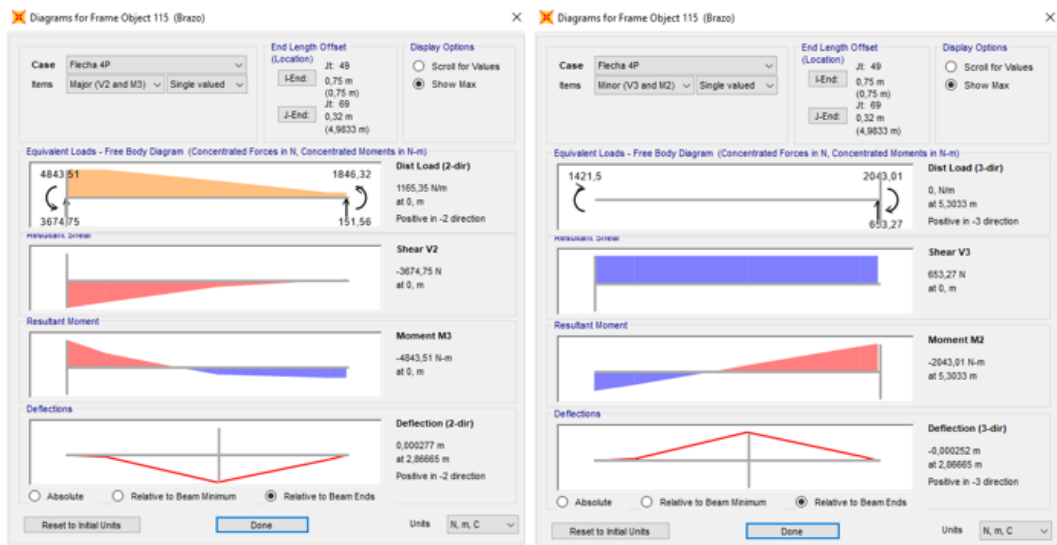


Ilustración 147-Diagrama de cortantes y flectores es ambas direcciones

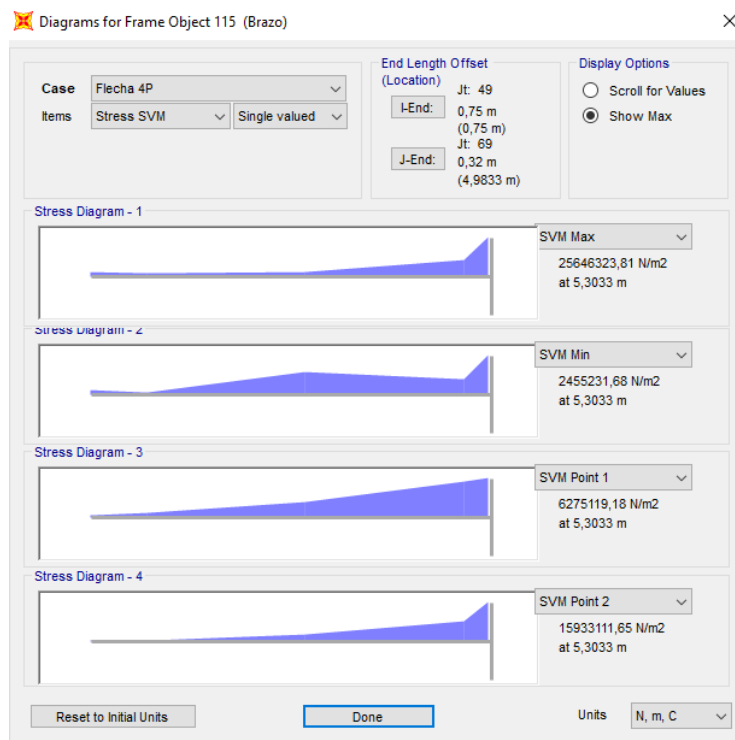


Ilustración 148-Diagrama de tensiones normales

El valor máximo de tensión normal se produce al comienzo de la unión rígida del nodo “j”, es decir, el de la sección menor. Alcanza un valor total de 25.646.323,81 N/m². Luego no hay problema de plastificación ya que no se alcanza el límite elástico del acero.

$$\sigma_{Max-VM} = 25,646 \text{ MPa} < 275 \text{ Mpa}$$

Por tanto, el factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{25.646.323,81} = 10,7227$$

7.8.1.2.2- Caso de sobrecarga de uso

Se aprecia que el esfuerzo axial de compresión se incrementa hasta alcanzar un valor de 154.200,59 N con una ley de torsores constante de 150,25 Nm. El cortante sobre la dirección 2 llega hasta 6.420,83 N en la unión con el terreno con un momento flector de 13.811,3 Nm; alcanzando una deflexión de 0,000259 m. En cambio, sobre la dirección 3 los valores son algo menores siendo el cortante en la unión del brazo con la pasarela de 1.311,68 N y un momento flector máximo en el brazo de 4.525,43 Nm. La deflexión en esta dirección es de 0,000229 m.

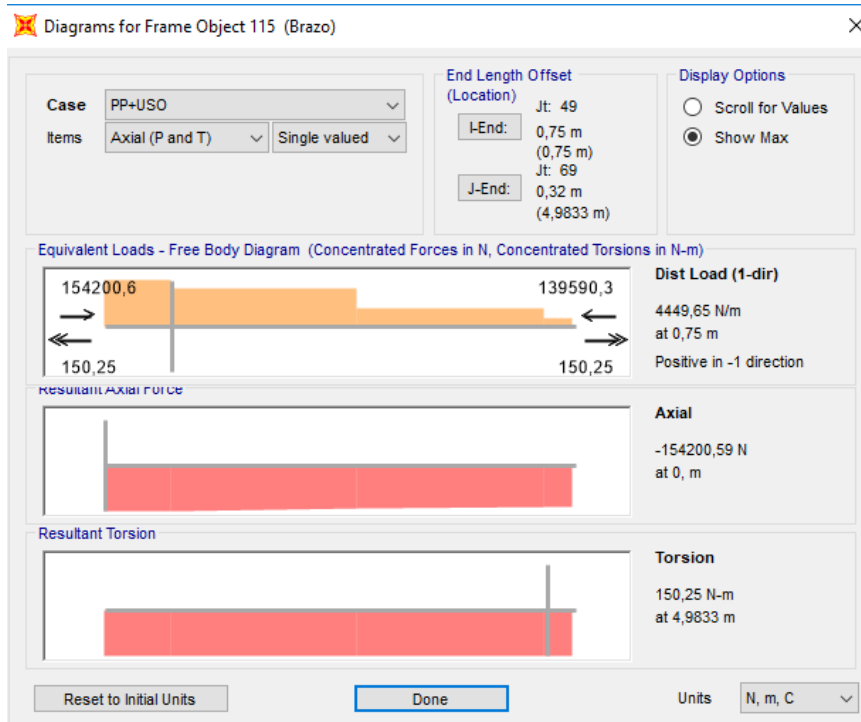


Ilustración 149-Diagrama axiles y torsores sobre brazo interior

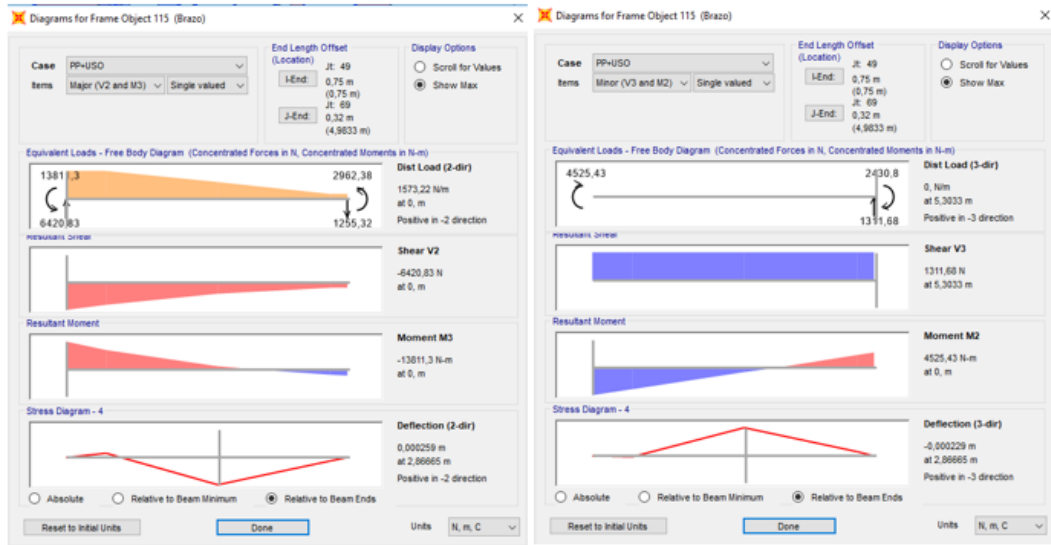


Ilustración 150-Diagrama de cortantes y flectores es ambas direcciones

La sección que alcanza la mayor tensión es la que se sitúa colindante a la pasarela. Ésta alcanza un valor de 52.471.075,7 N/m². En ningún momento se superará el límite elástico, luego no aparecerá fallo por plastificación.

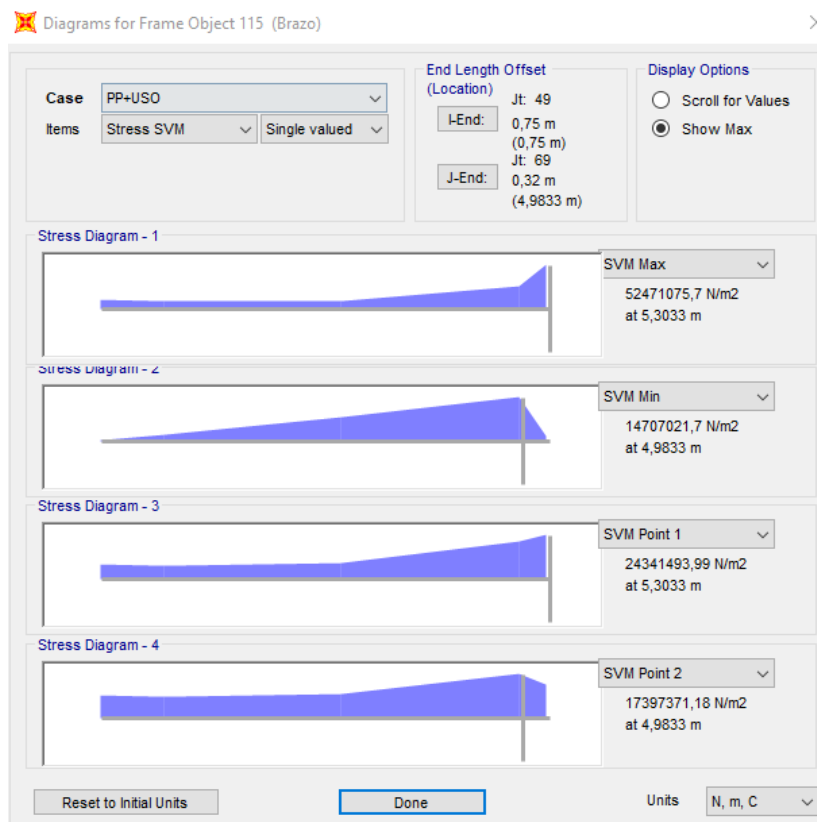


Ilustración 151-Diagrama de tensiones normales

$$\sigma_{Max-VM} = 52,471 \text{ MPa} < 275 \text{ Mpa}$$

Por tanto, el factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{52.471.075,7} = 5,2409$$

7.8.1.3-Diagonal

7.8.1.3.1- Caso de 4 personas en el centro de vano

Respecto a las diagonales se encuentran sometidas a axil de compresión. La torsión en éstas no tendrá cabida.

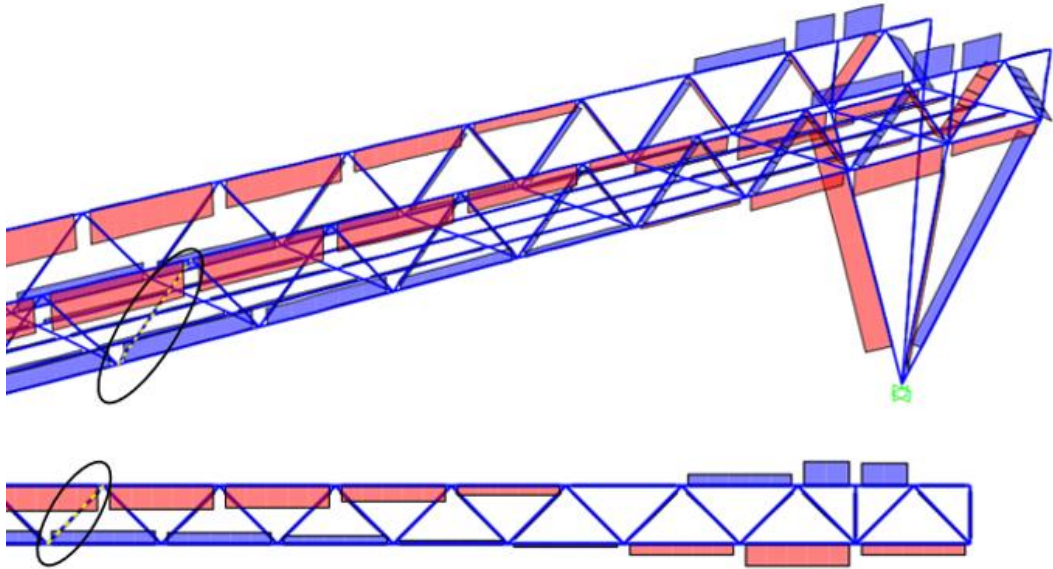


Ilustración 152- Ubicación de la diagonal de estudio

El axil al que está sometido la barra es de tracción y con un valor de 2.801,47 N en el extremo del cordón superior. También aparece una ley de torsores per es tan pequeña que se puede considerar como despreciable.

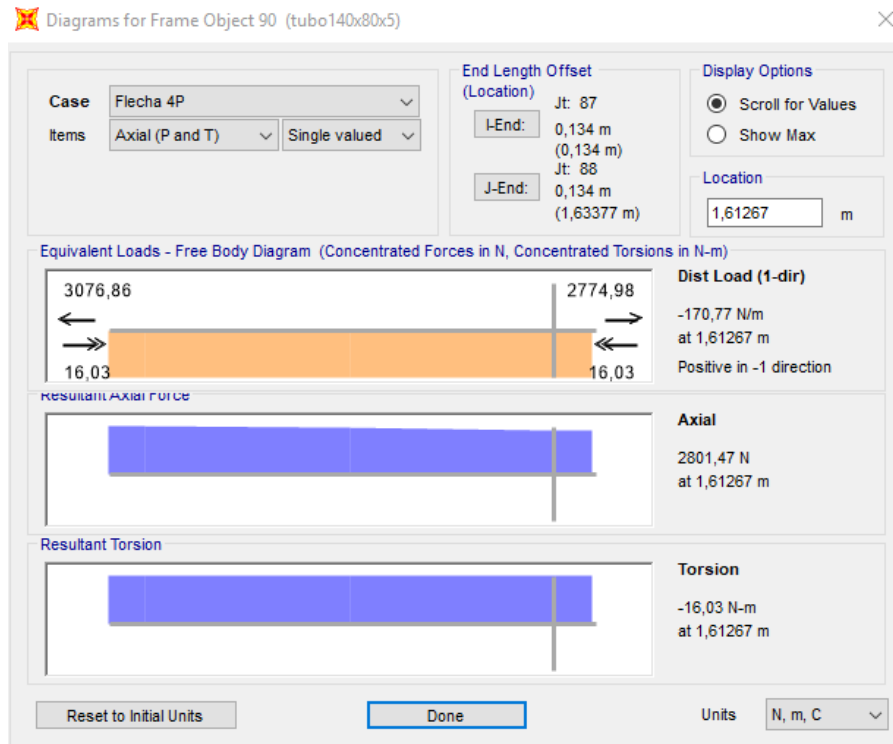


Ilustración 153- Diagrama de axiles y torsores

El valor tanto del cortante es de 121,06 N en el extremo colindante al cordón superior con un valor máximo de 205,25 Nm en el extremo contrario. La deflexión máxima es de 0,000033 m. Respecto a la dirección 3 aparece un cortante de 219,79 N con un valor máximo de momento flector de 90,37 Nm en el extremo opuesto. Su deflexión es de 0,000055 m.

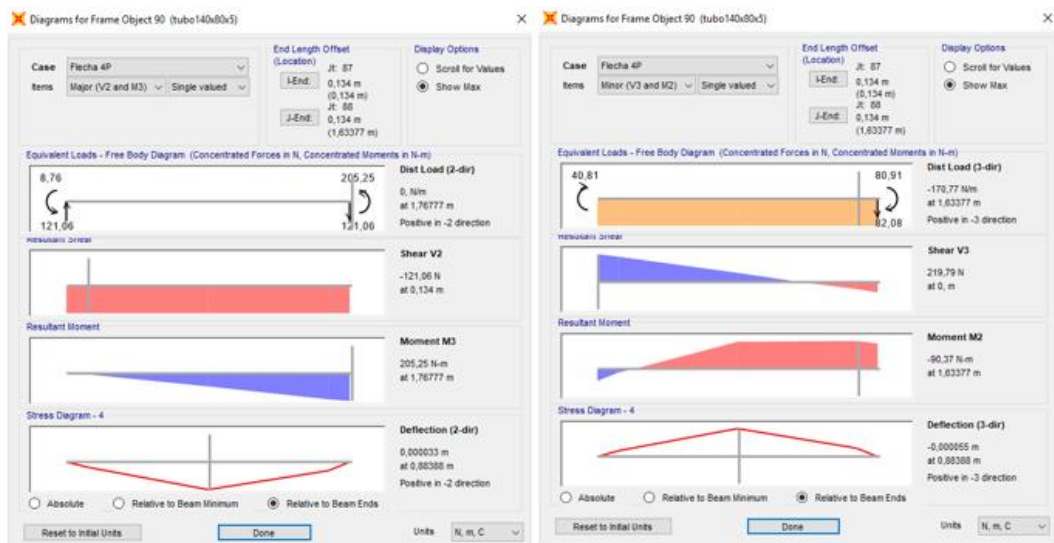


Ilustración 154- Diagrama de cortantes y flectores en ambas direcciones

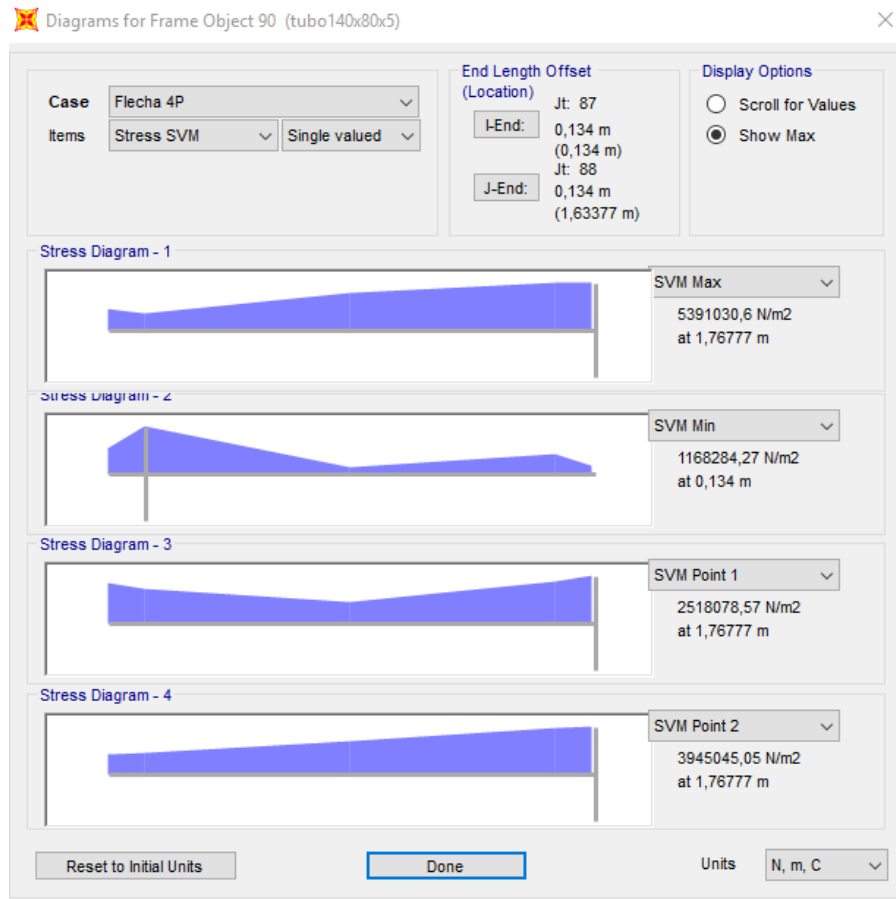


Ilustración 155-Diagrama de tensiones normales

En ningún punto de la barra que se está estudiando se alcanza la plastificación. El valor de tensión máxima alcanzada a través del criterio de Von Mises es igual a 5.391.030,6 N/m².

$$\sigma_{Max-VM} = 5,391 \text{ MPa} < 275 \text{ Mpa}$$

Por tanto, el factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{5.391.030,6} = 51,0106$$

7.8.1.3.2- Caso de sobrecarga de uso

El axil al que está sometido la barra es de tracción y apenas se incrementa respecto al caso anterior. Éste es ahora de 2.803,86 N en el extremo del cordón superior. También aparece una ley de torsores per es tan pequeña que se puede considerar como despreciable.

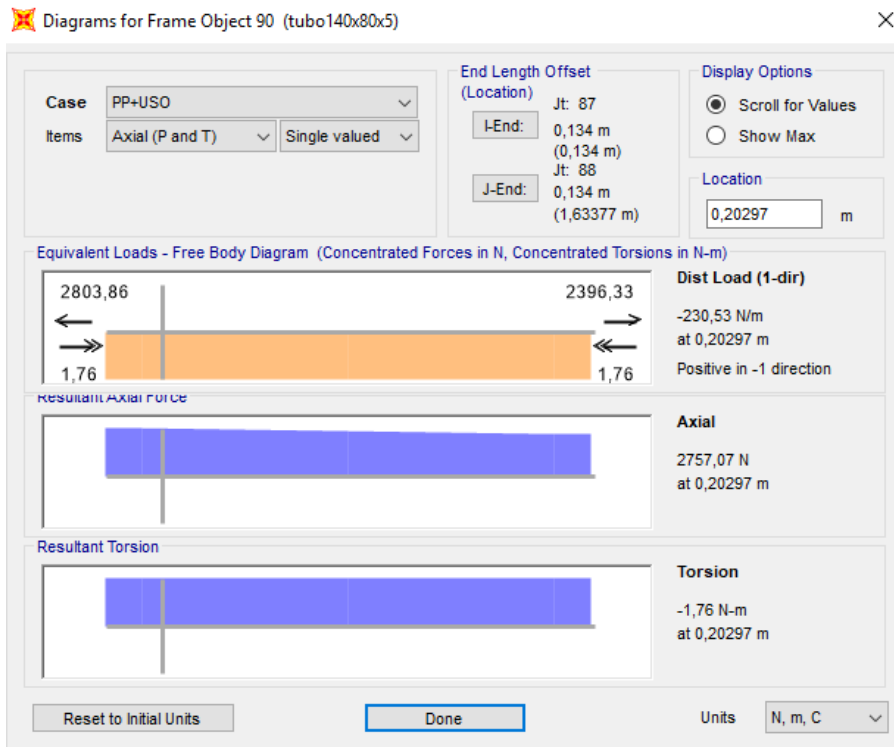


Ilustración 156- Diagrama de axiles y torsores

El valor tanto del cortante es de 23,83 N en el extremo colindante al cordón superior con un valor máximo de 33,39 Nm en el extremo contrario. La deflexión máxima es de 4,090E-06 m. Respecto a la dirección 3 aparece un cortante de 234,38 N con un valor máximo de momento flector de 107,08 Nm en el extremo opuesto. Su deflexión es de 0,000067 m.

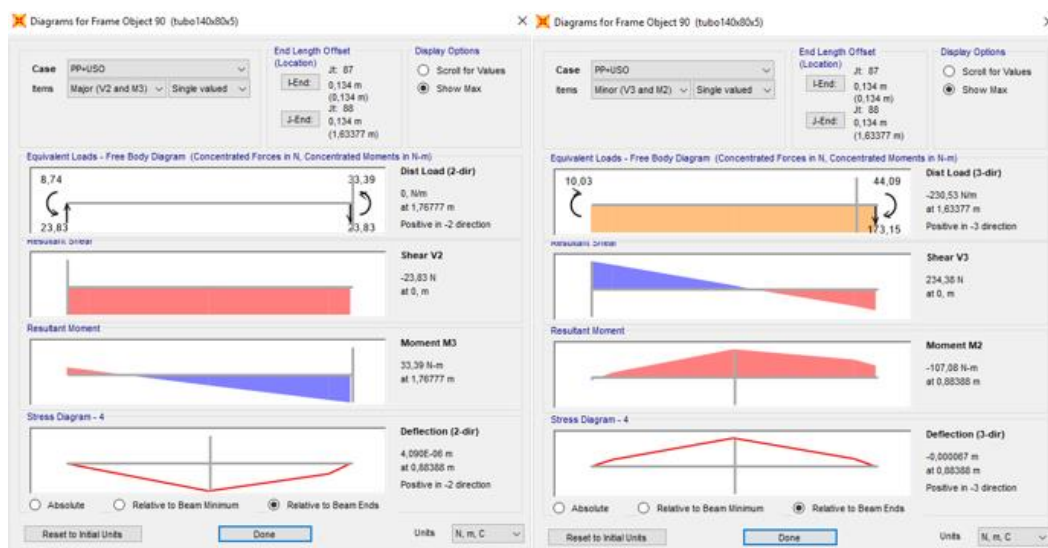


Ilustración 157- Diagrama de cortantes y flectores en ambas direcciones

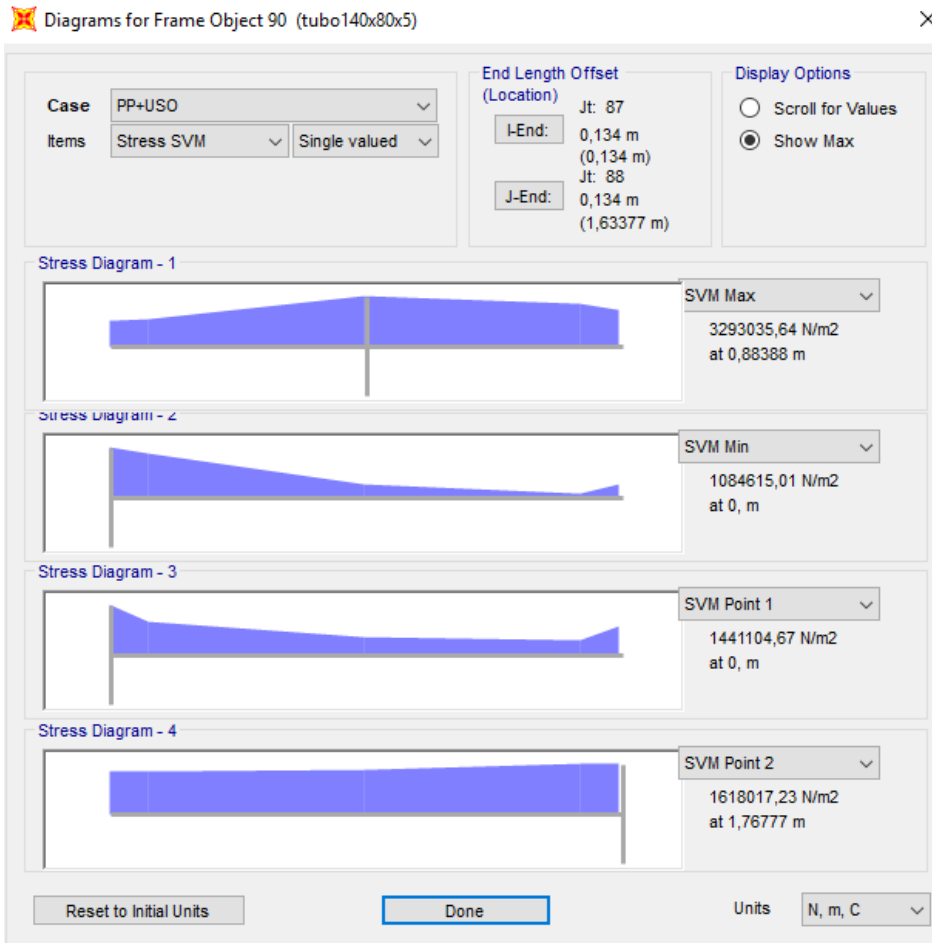


Ilustración 158-Diagrama de tensiones normales

En ningún punto de la barra que se está estudiando se alcanza la plastificación. El valor de tensión máxima alcanzada a través del criterio de Von Mises es igual a 3.293.035,64 N/m².

$$\sigma_{Max-VM} = 3,293 \text{ MPa} < 275 \text{ Mpa}$$

Por tanto, el factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{3.293.035,64} = 83,5095$$

7.8.1.4-Cordones del tablero

7.8.1.4.1- Caso de 4 personas en el centro de vano

Luego, los cordones que se sitúan donde el tablero se observa que los más solicitados son los más próximos a las Warren.

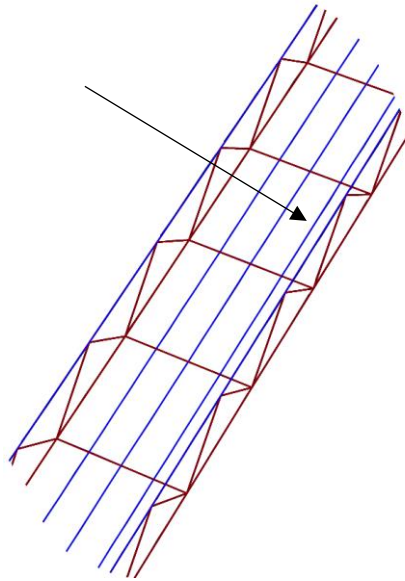


Ilustración 159- Ubicación del cordón estudiado

Trabajarán a esfuerzo de tracción como es de esperar ya que al transitar no da lugar a que se dé un estado de compresión, con un valor de 8.947,82 N. Los efectos de torsionales son muy pequeños casi despreciables.

Los cortantes debidos a la dirección 2 son dominantes respectos a los de la 3. Éstos alcanzan un valor de 246,24 N con un valor de momento máximo de 100,08 Nm. La deflexión según la dirección 2 es de 0,000205 m.

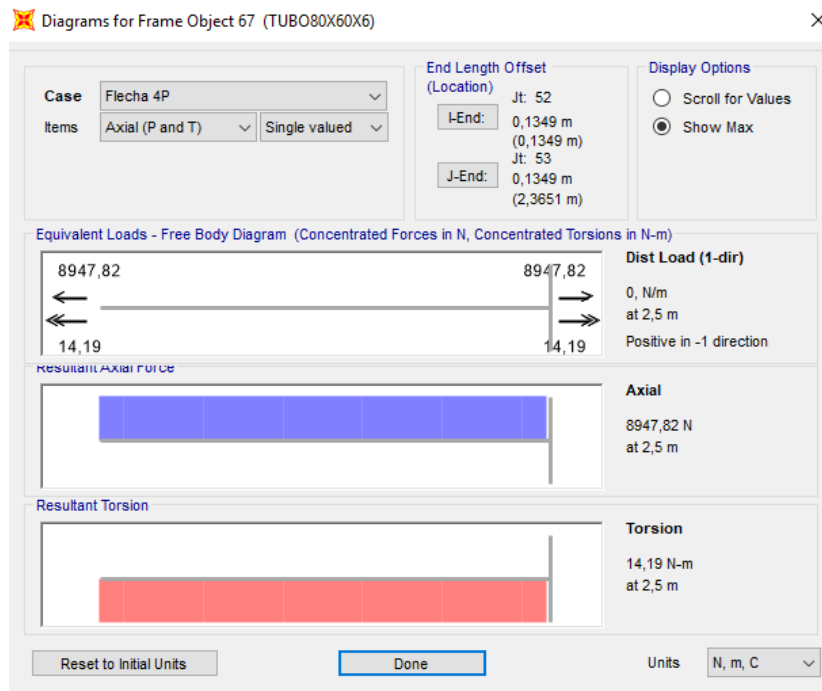


Ilustración 160- Diagrama axiles y torsores

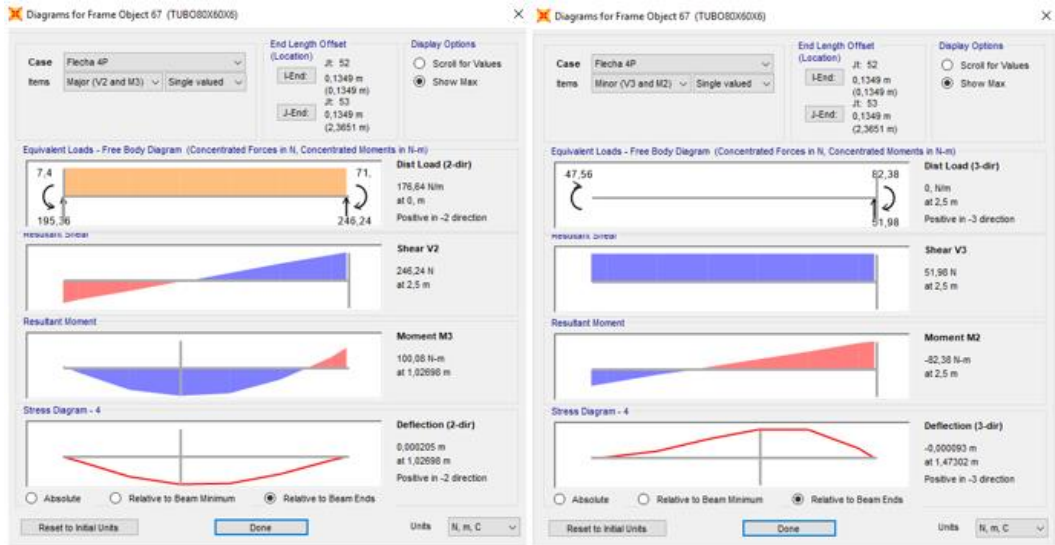


Ilustración 161- Diagrama de cortantes y flectores en ambas direcciones

En ningún momento se supera el valor del límite elástico, luego el cordón estará en todo momento en zona elástica. Se ha seguido en todo momento el criterio de Von Mises. Alcanza un valor de 11.050.872,86 N/m².

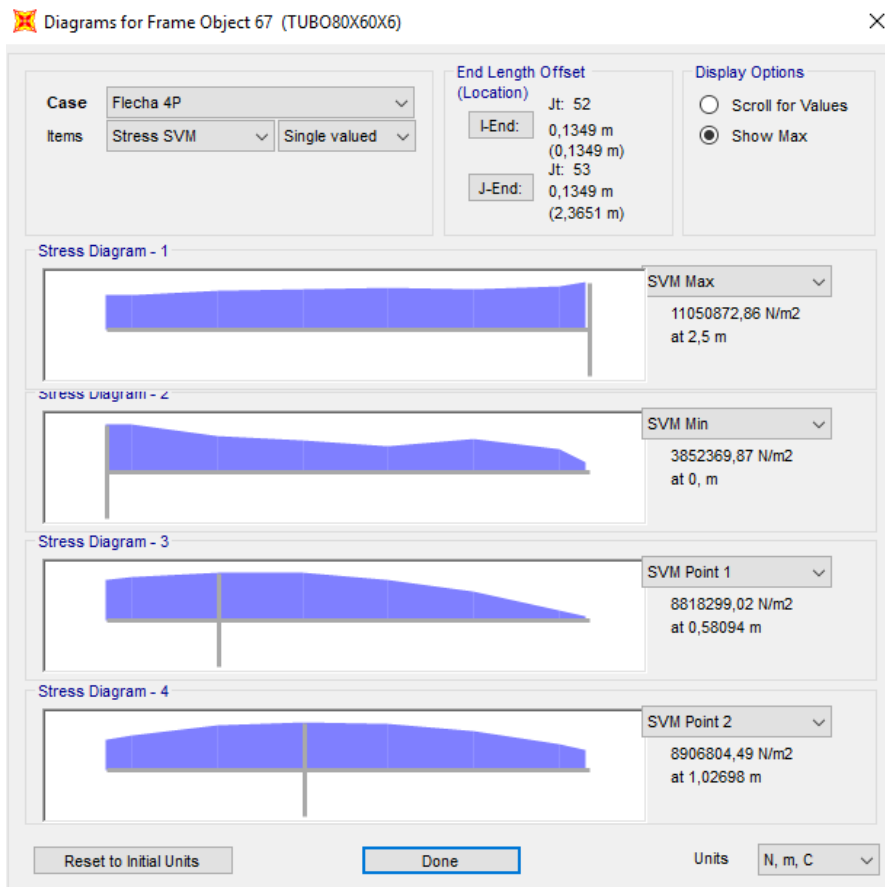


Ilustración 162- Diagrama de tensiones normales

Por tanto,

$$\sigma_{Max-VM} = 11,050 \text{ MPa} < 275 \text{ MPa}$$

Por tanto, el factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{11.050.872,86} = 24,8849$$

7.8.1.4.2- Caso de sobrecarga de uso

El esfuerzo de tracción se incrementa hasta adoptar un valor de 15.434,43 N. Los efectos de torsionales son muy pequeños casi despreciables.

Los cortantes debidos a la dirección 2 son dominantes respecto a los de la 3. Éstos alcanzan un valor de 299,51 N con un valor de momento máximo de 110,27 Nm. La deflexión según la dirección 2 es de 0,000223 m.

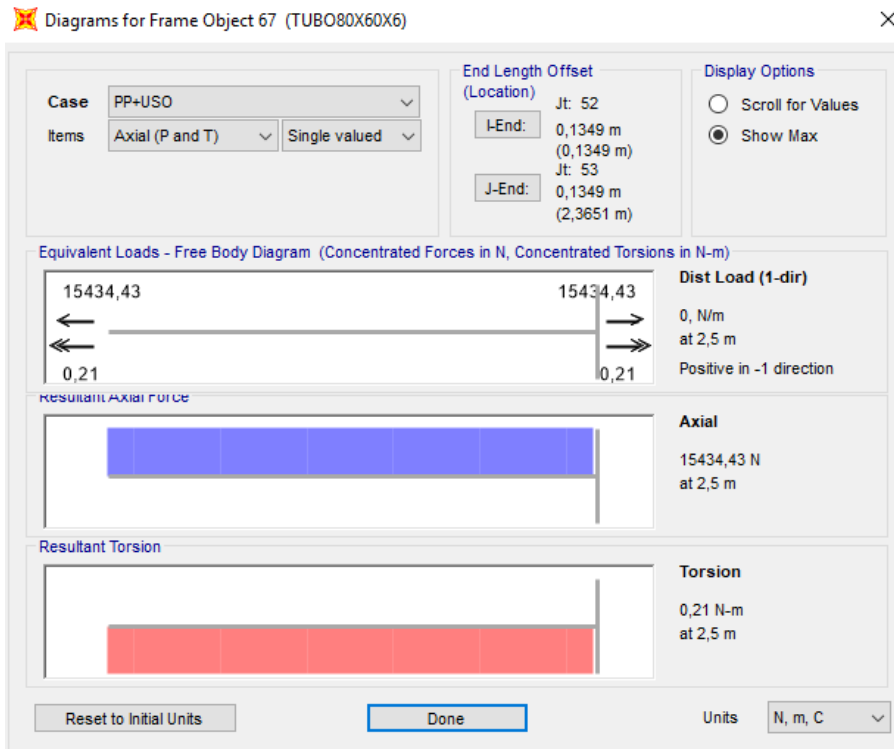


Ilustración 163- Diagrama axiles y torsores

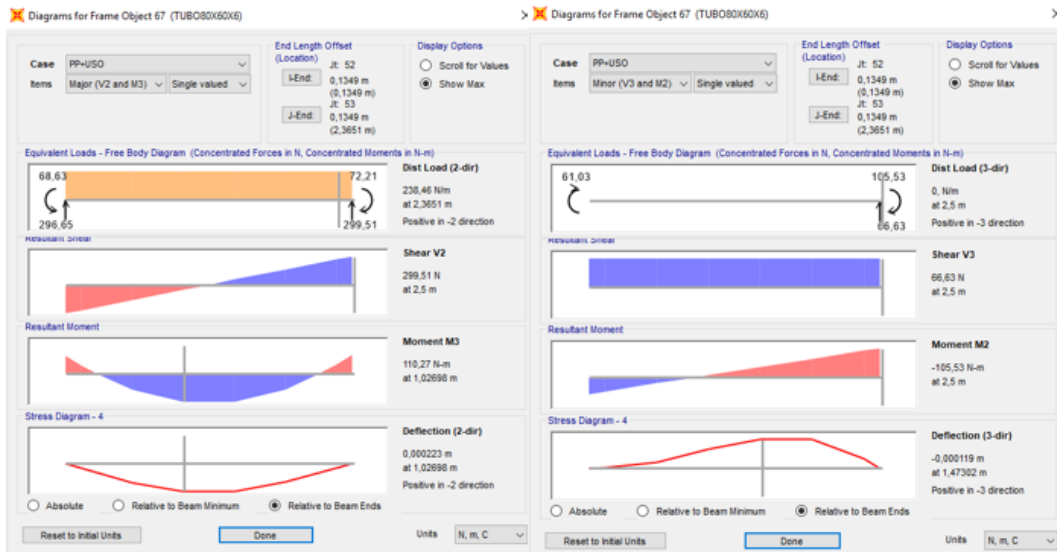


Ilustración 164- Diagrama de cortantes y flectores en ambas direcciones

En ningún momento se supera el valor del límite elástico, luego el cordón estará en todo momento en zona elástica. Se ha seguido en todo momento el criterio de Von Mises. Alcanza un valor de $16.160.005,71 \text{ N/m}^2$.

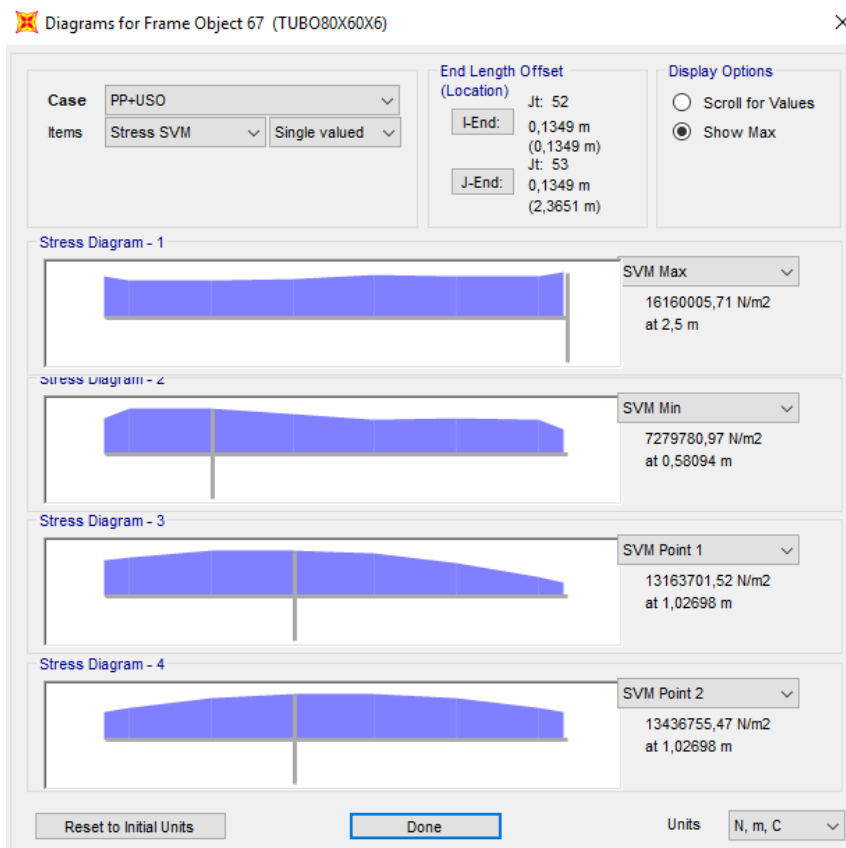


Ilustración 165- Diagrama de tensiones normales

Por tanto,

$$\sigma_{Max-VM} = 16,160 \text{ MPa} < 275 \text{ Mpa}$$

Por tanto, el factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{16.160.005,71} = 17,0173$$

7.8.1.5-Travesaños interiores

7.8.1.5.1- Caso de 4 personas en el centro de vano

Los travesaños son los últimos a ser estudiados. Se analizará aquel que se encuentra en la sección media que, además, es donde se encuentra situada las cargas que simulan la acción de las cuatro personas.

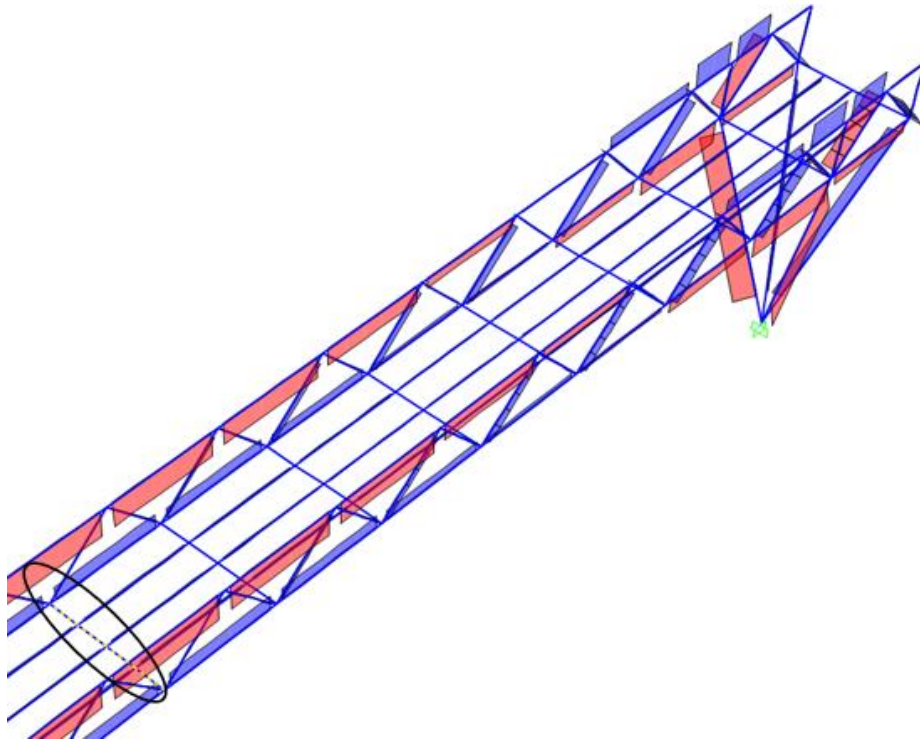


Ilustración 166- Travesaño a estudiar

Se observa que el esfuerzo axial es de tracción con un valor de 454,83 N con una intervención torsional prácticamente nula. Presenta diagrama de momentos y cortantes en ambas direcciones. La dirección 2 es la que domina con un valor de cortante de 1.090,95 N y un momento flector máximo de 1.080,65 Nm. La deflexión que se origina es de 0,000071 m.

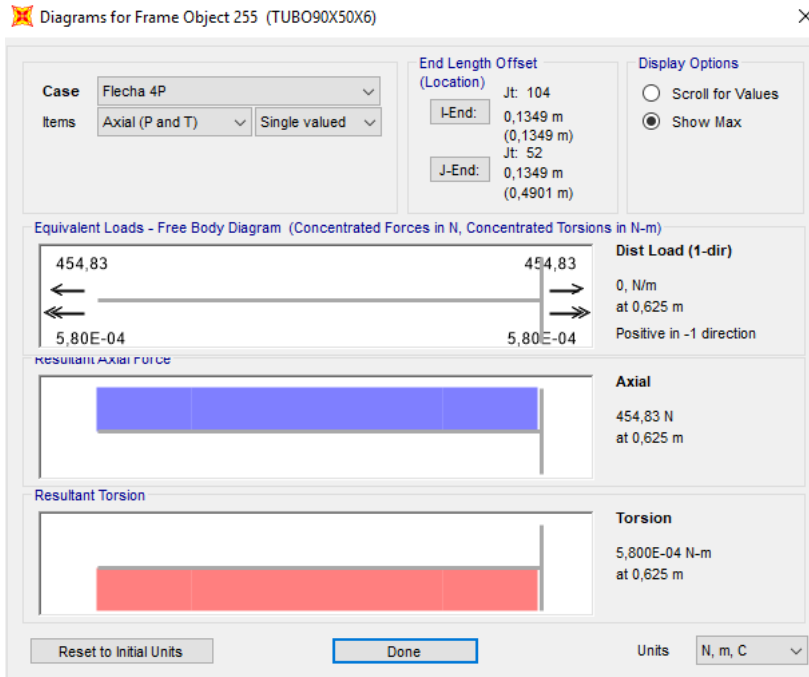


Ilustración 167- Diagrama de axiles y torsores

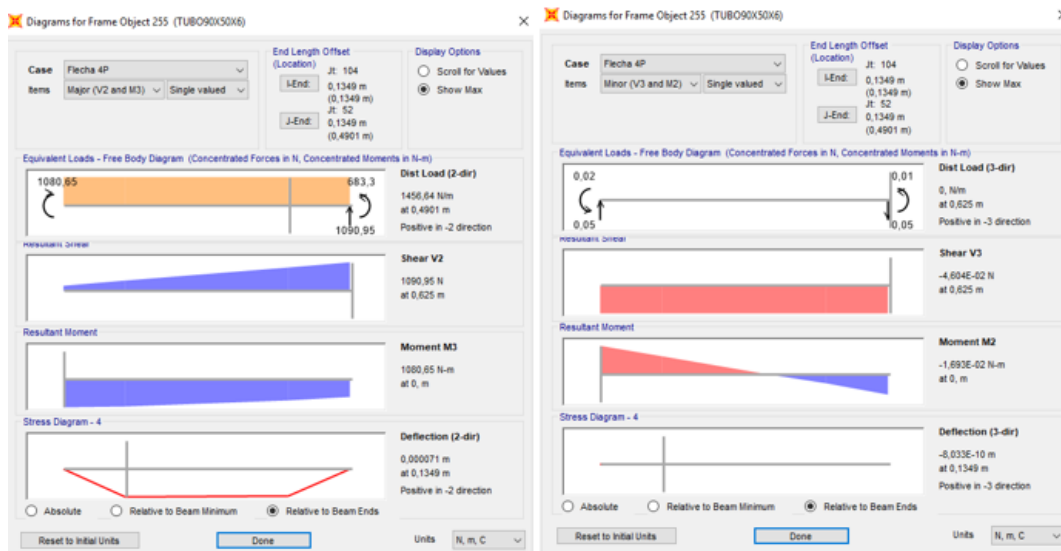


Ilustración 168- Diagrama de cortantes y flectores en ambas direcciones

El valor de la tensión máxima alcanzada es considerablemente inferior al límite elástico por lo que no se alcanza plastificación en dicho travesaño. El valor máximo alcanzado es de 31.982.466,81 N/m².

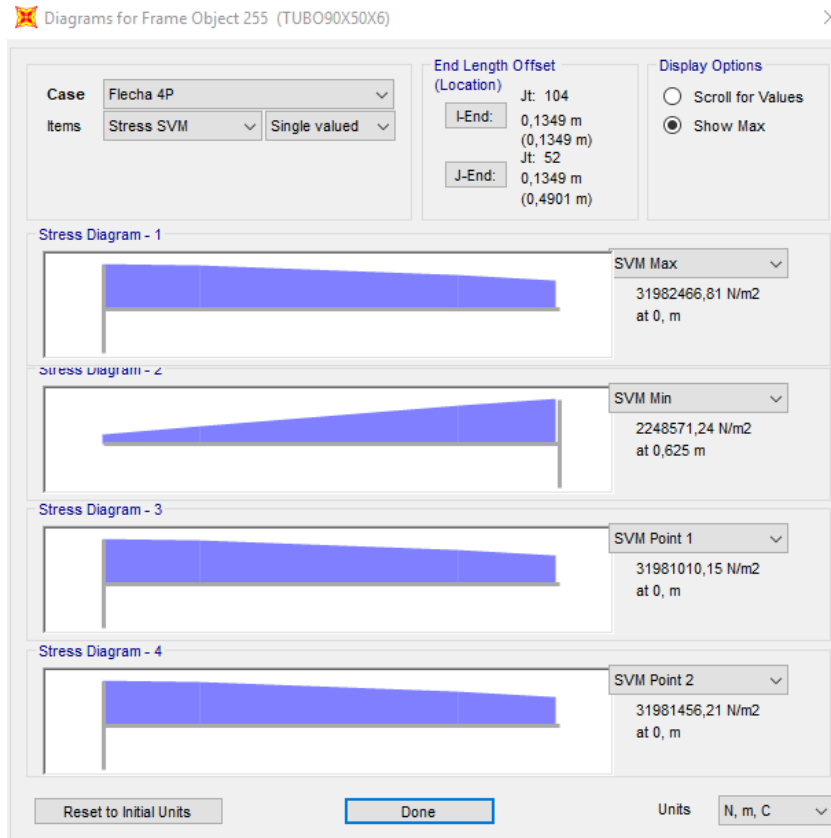


Ilustración 169- Diagrama de tensiones normales

Por tanto,

$$\sigma_{Max-VM} = 31,982 \text{ MPa} < 275 \text{ Mpa}$$

Por tanto, el factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{31.982.466,81} = 8,5984$$

7.8.1.5.2- Caso de sobrecarga de uso

El esfuerzo axial disminuye a 374,52 N con una intervención torsional prácticamente nula. Presenta diagrama de momentos y cortantes en ambas direcciones. La dirección 2 es la que domina con un valor de cortante de 446,41 N y un momento flector máximo de 867,16 Nm. La deflexión que se origina es de 0,000057 m.

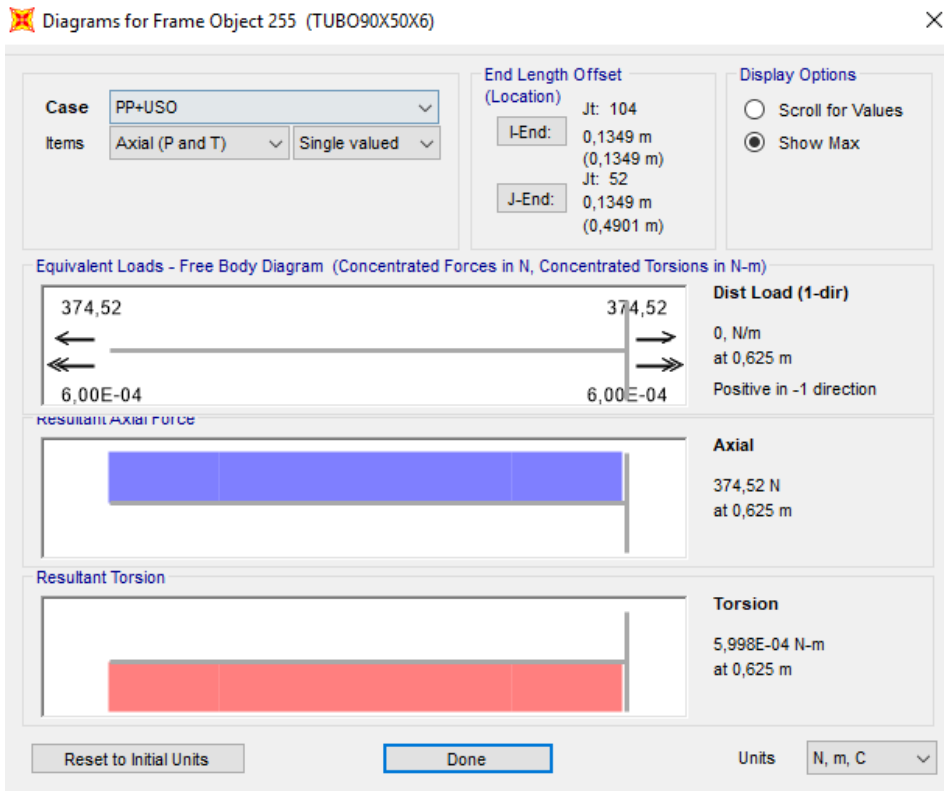


Ilustración 170- Diagrama de axiles y torsores

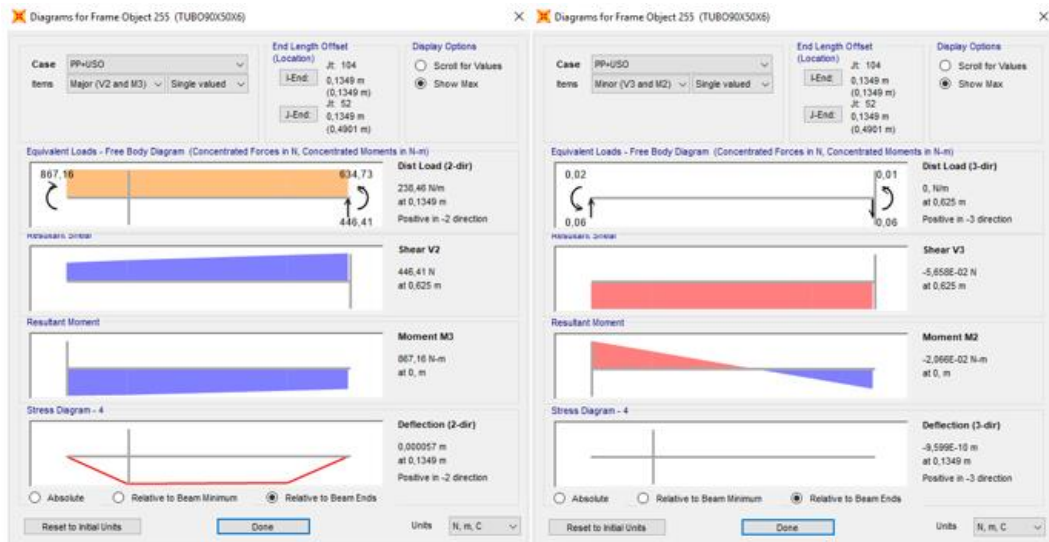


Ilustración 171- Diagrama de cortantes y flectores en ambas direcciones

El valor de la tensión máxima alcanzada es considerablemente inferior al límite elástico por lo que no se alcanza plastificación en dicho travesaño. El valor máximo alcanzado es de 25.671.518,36 N/m².

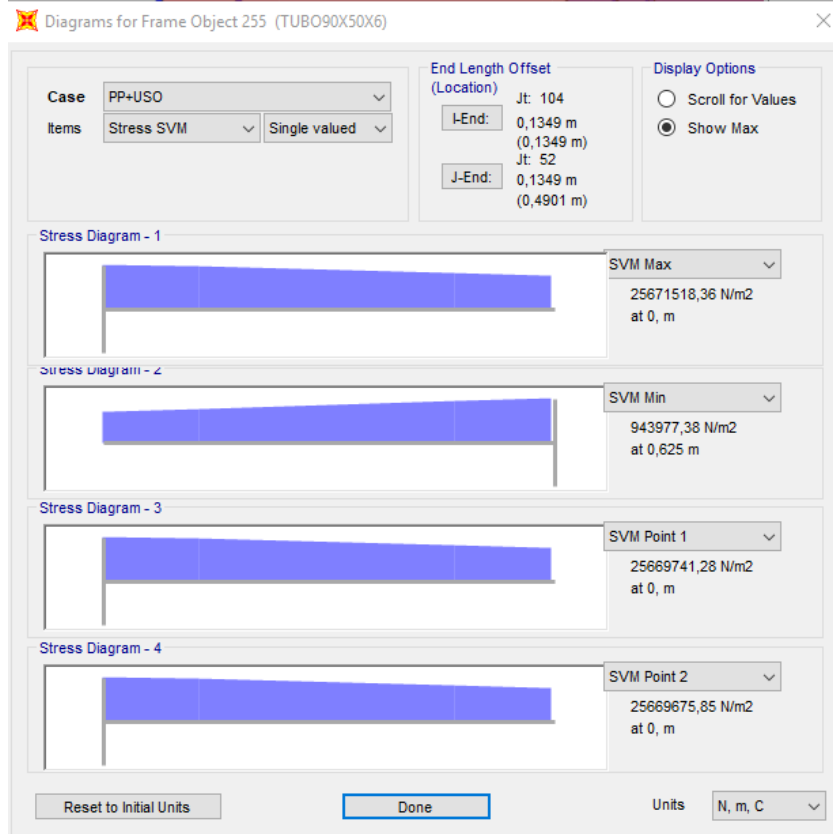


Ilustración 172- Diagrama de tensiones normales

Por tanto,

$$\sigma_{Max-VM} = 25,671 \text{ MPa} < 275 \text{ Mpa}$$

Por tanto, el factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{25.671.518,36} = 10,7122$$

7.8.1.6-Travesaños extremo

7.8.1.6.1- Caso de 4 personas en el centro de vano

Por último, se estudiará el travesaño dispuesto en los extremos.

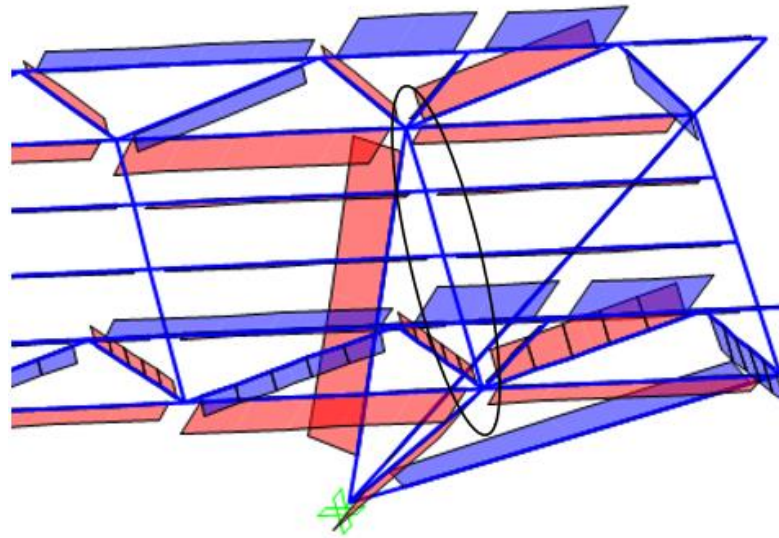


Ilustración 173-Travesaño a estudiar

Se observa que se encuentra sometido a tracción con un valor de 20.269,35 N con una ley de torsores muy pequeña. Ahora la dirección predominante es la 3 alcanzando un valor de cortante superior, aunque el momento que aparece sea inferior que el de la otra dirección. El cortante de la dirección 3 es de 1.071,35 N frente a los 648,85 N de la dirección 2. En cambio, el momento en ésta es de 738,48 Nm respecto los 455,58 Nm de la dirección 3, a demás de que sus signos son contrarios. La deflexión en 3 es de 1,453E-06 m y en la dirección 2 es de 5,708E-06 m.

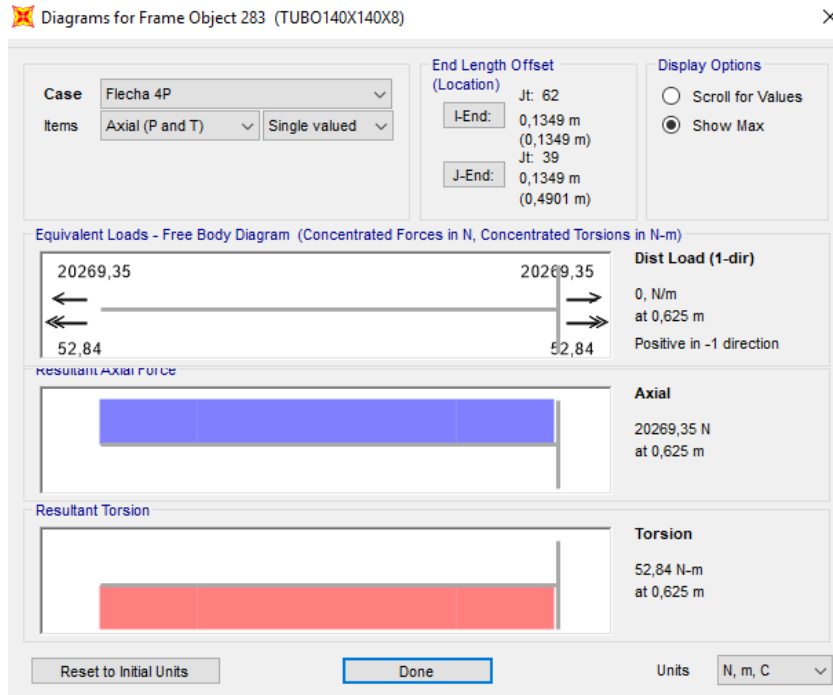


Ilustración 174-Diagrama de axiles y torsores

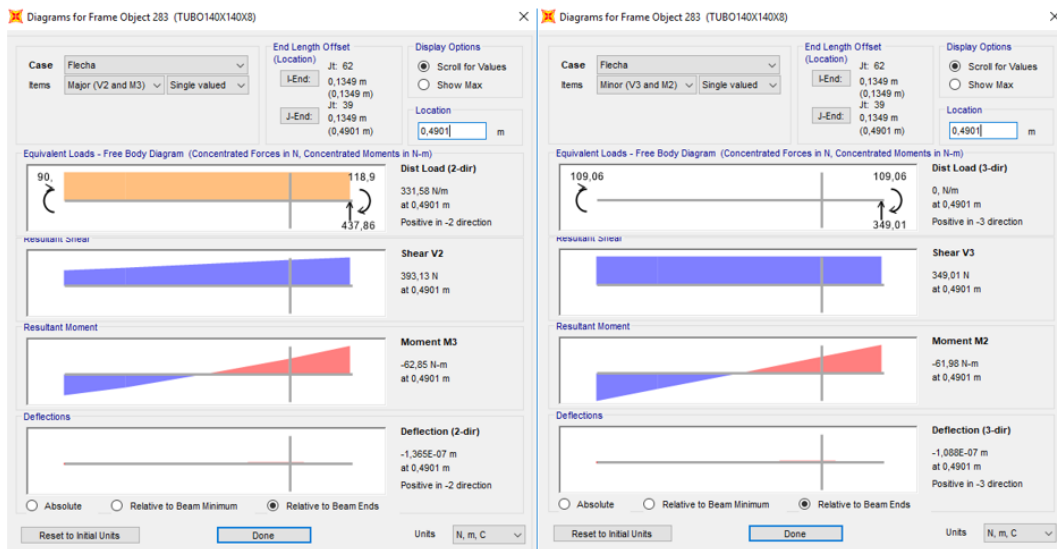


Ilustración 175-Diagrama de cortantes y flectores en ambas direcciones

El valor de la tensión máxima alcanzada es considerablemente inferior al límite elástico por lo que no se alcanza plastificación en dicho travesaño. El valor máximo alcanzado es de $10.221.633,72 \text{ N/m}^2$.

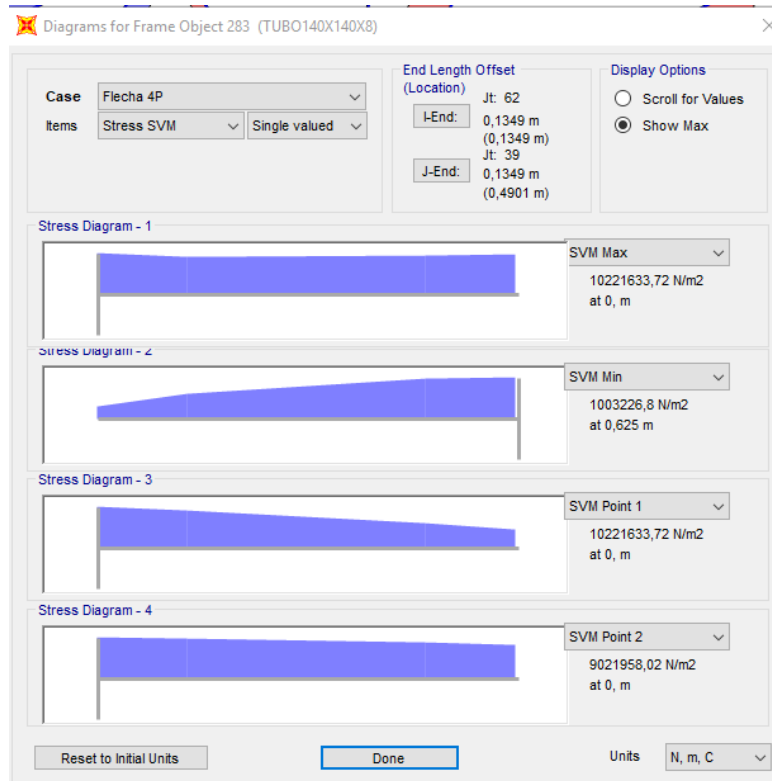


Ilustración 176-Diagrama de tensiones normales

Por tanto,

$$\sigma_{Max-VM} = 10,221 \text{ MPa} < 275 \text{ Mpa}$$

Por tanto, el factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{10.221.633,72} = 29,9037$$

7.8.1.6.2- Caso de sobrecarga de uso

El esfuerzo de tracción aumenta hasta un valor de 30.071,65 N con una ley de torsores muy pequeña, también. Ahora la dirección predominante es la 3 alcanzando un valor de cortante superior El cortante es de 2.551,87 N frente a los 882,08 N de la dirección 2. El momento en la dirección 3 es de 1.103,74 Nm respecto los 948,55 Nm La deflexión es de 3,634E-06 m y en la dirección 2 es de 7,242E-06 m.

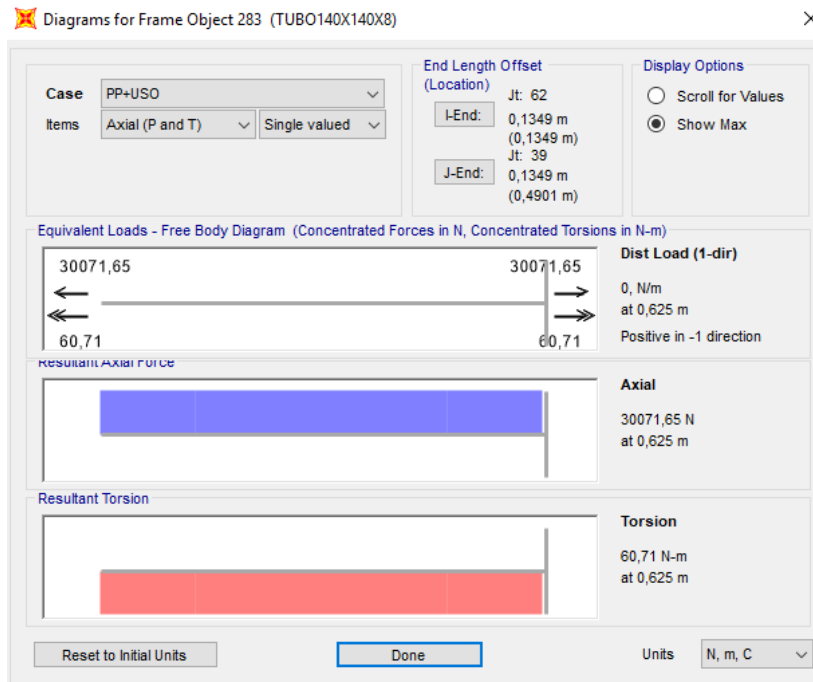


Ilustración 177-Diagrama de axiles y torsores

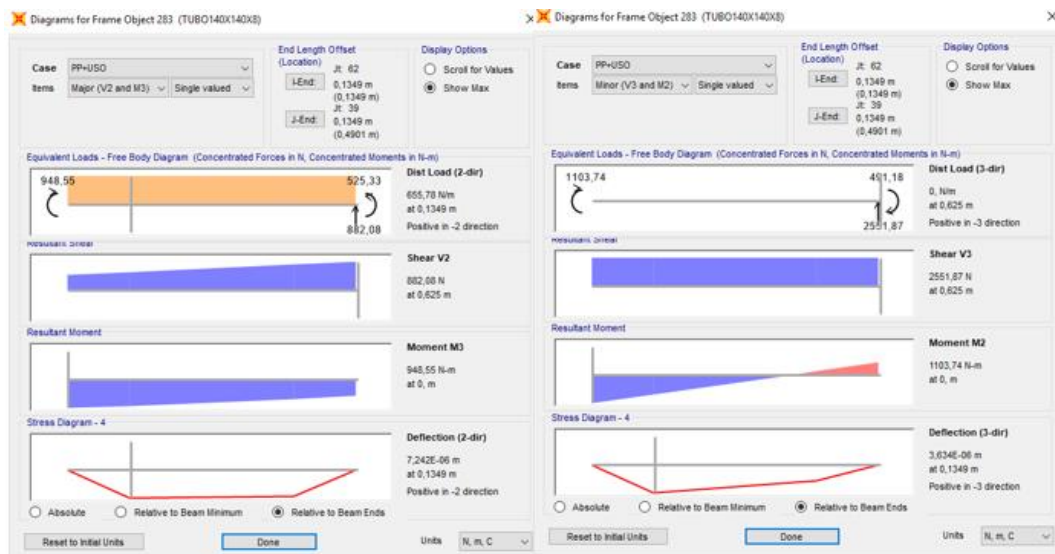


Ilustración 178-Diagrama de cortantes y flectores en ambas direcciones

El valor de la tensión máxima alcanzada es considerablemente inferior al límite elástico por lo que no se alcanza plastificación en dicho travesaño. El valor máximo alcanzado es de 18.811.963,69 N/m².

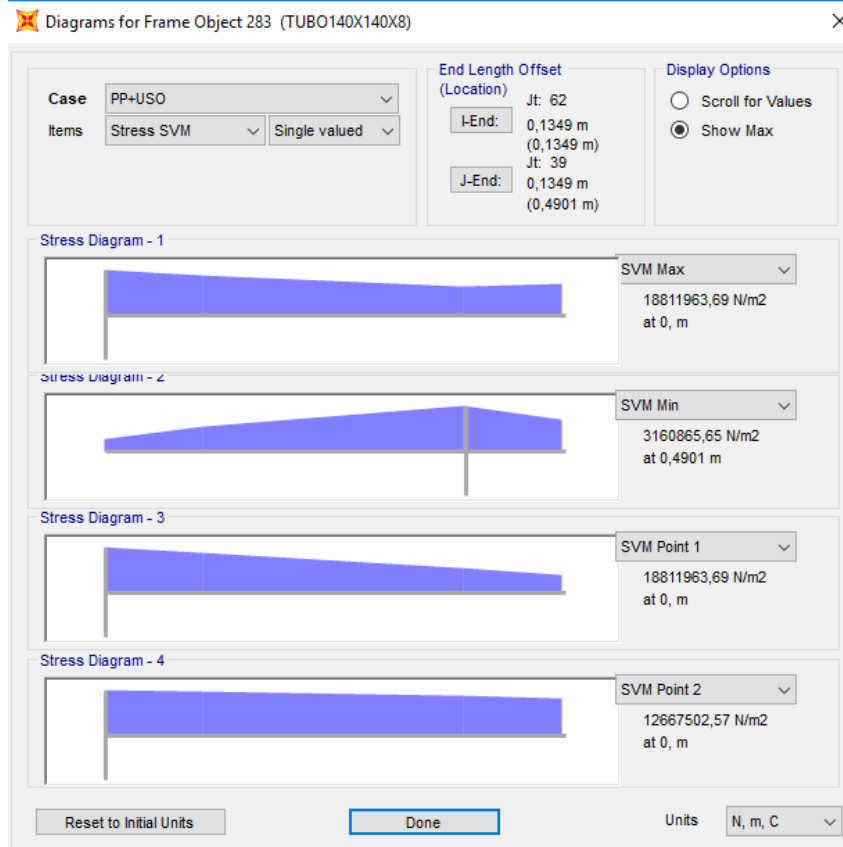


Ilustración 179-Diagrama de tensiones normales

Por tanto,

$$\sigma_{Max-VM} = 18,811 \text{ MPa} < 275 \text{ Mpa}$$

Por tanto, el factor elástico que se obtiene es el siguiente,

$$\lambda = \frac{275.000.000}{18.811.963,69} = 14,6183$$

7.9.2-Flecha

Cuando tenemos en cuenta la sobrecarga de uso y al peso propio de la estructura con sus coeficientes de ponderación (1,35 para el peso propio y 1,5 para la sobrecarga de uso) se observa que se llegan a alcanzar 0,00117 m, es decir, 11,7 mm.

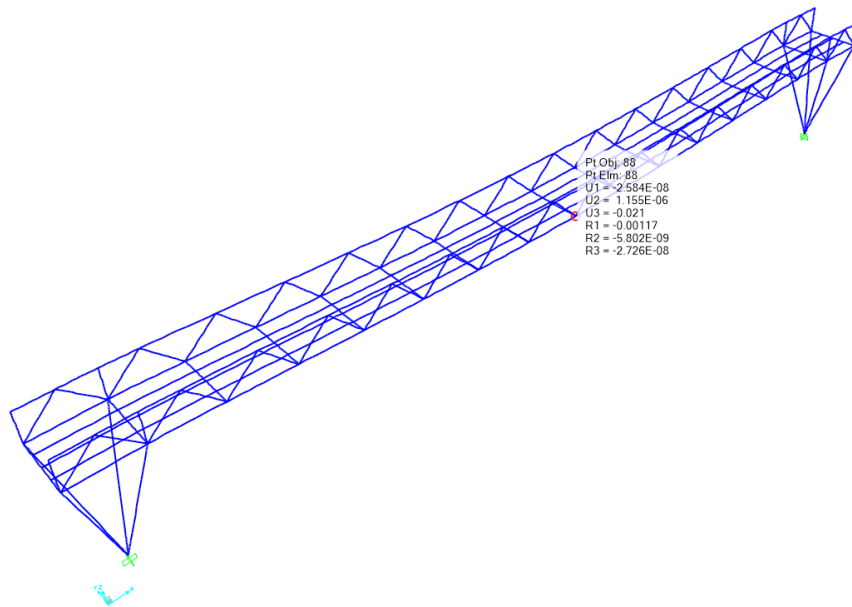


Ilustración 180-Deformada con peso propio y la sobrecarga

Pero el que realmente es de interés y que luego se podrá comparar es el referido al grupo de 4 personas en el centro del vano. Se aislará únicamente en cuenta el peso de grupo en la simulación sin tener en cuenta el peso propio de la estructura. Se observa que la flecha obtenida es de 0,0008 m de flecha, es decir, casi un mm.

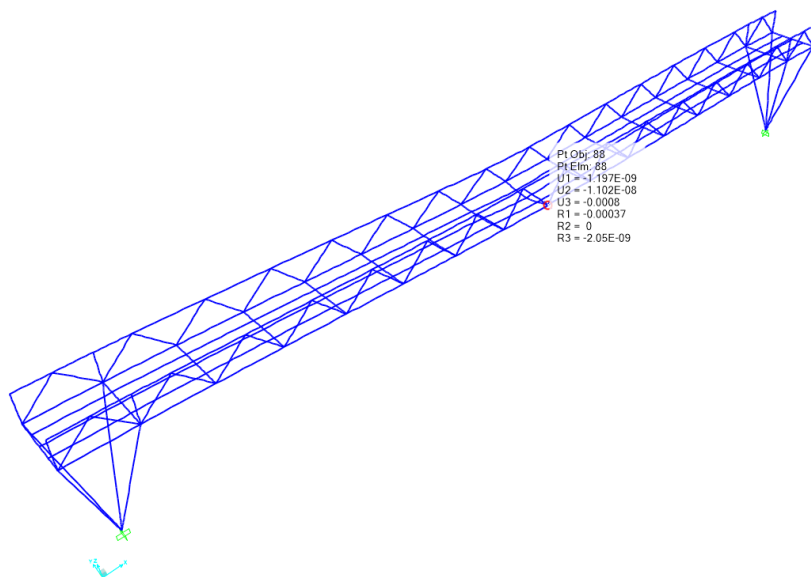


Ilustración 181-Deformada con la fuerza F

7.9.3- Pandeo local

La simulación de pandeo (*Buckling*) se realizará en este caso para la sobrecarga de uso a diferencia del modelado en 2D. En este apartado se estudia más específicamente el pandeo local en las barandillas de la pasarela (las celosías Warren).

El primer modo de pandeo local aparece sobre la barandilla delantera con un coeficiente de 71,15. La barandilla contraria patea para un coeficiente multiplicador de carga de 73,09.

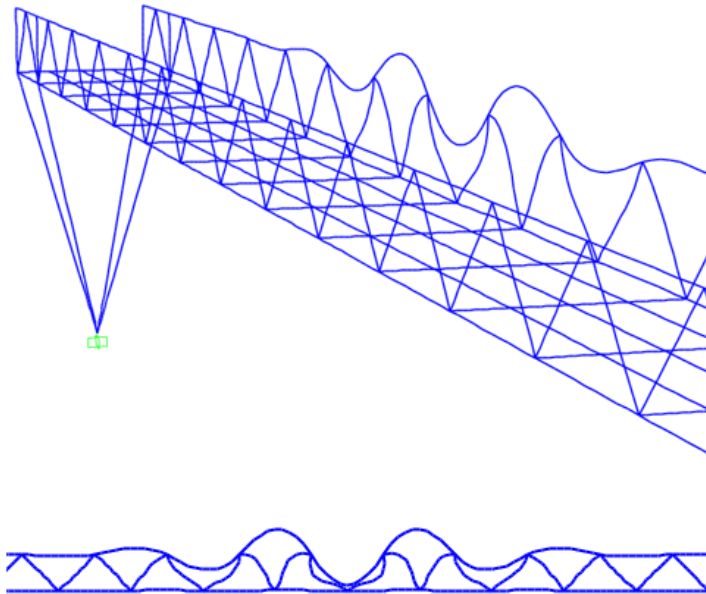


Ilustración 182-Pandeo barandilla delantera ($\beta=71,15$)

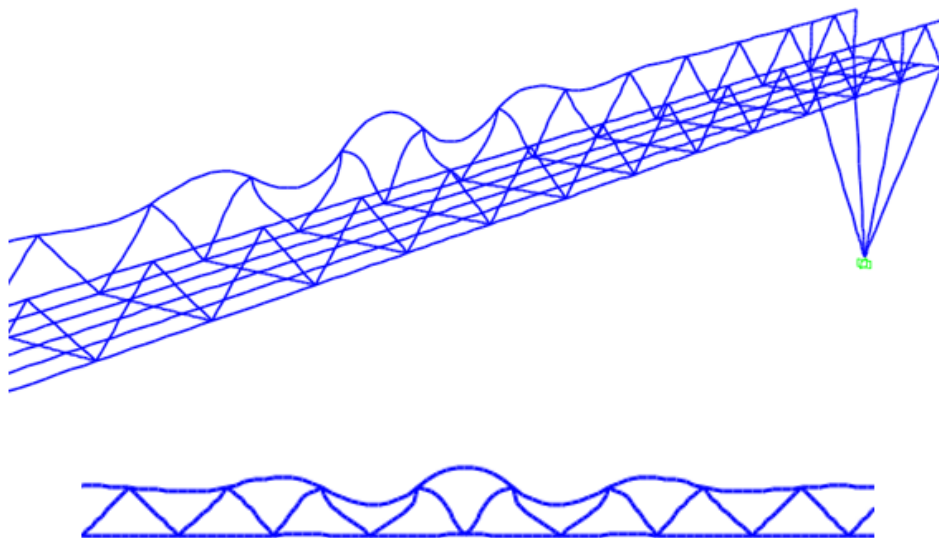


Ilustración 183-Pandeo barandilla trasera ($\beta=73,09$)

7.9.4- Pandeo por vuelco o pandeo lateral

La pasarela comienza a volcar o a pandear lateralmente cuando el coeficiente de pandeo es igual a 20,59. Coincide con el primer modo de pandeo global.

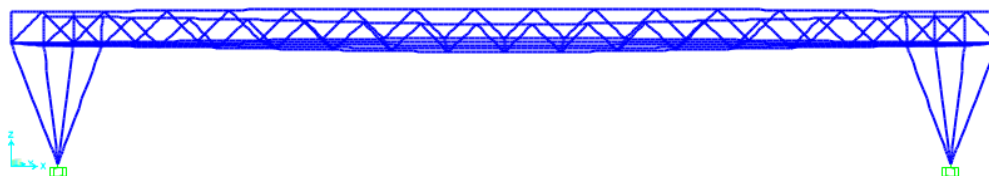


Ilustración 184-Primer modo de vuelco ($\beta=20,59$)

7.9.5- Deformada en el primer y segundo modo

De la misma forma que para el caso del modelado de la pasarela en 2D se partirá de que la frecuencia es una función de la rigidez entre la masa, luego, para poder ajustar el valor de frecuencia para cada modo se tiene que este último. Como se parte de un valor superior a las que se obtuvieron experimental (para ambos modos) se tiene que incrementar éste para así reducirse la frecuencia en cada modo. Inicialmente se parte de 5,19 Hz para el primer modo y 14,78 Hz para el segundo. Tras un proceso de ensayo y error se alcanzan unos valores muy próximos y totalmente aceptables. Éstos son de 4,356 Hz y 12,477 Hz.

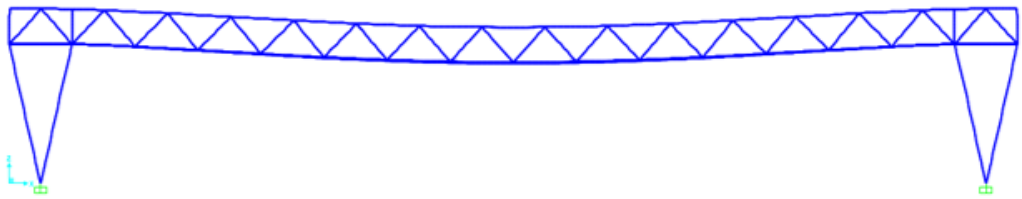
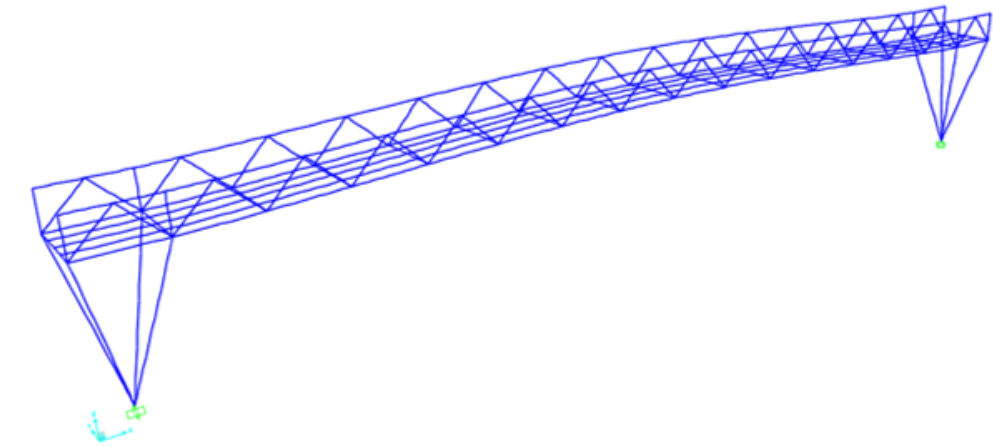


Ilustración 185-Primer modo armónico de flexión sobre el plano ($f=4,356$ Hz)

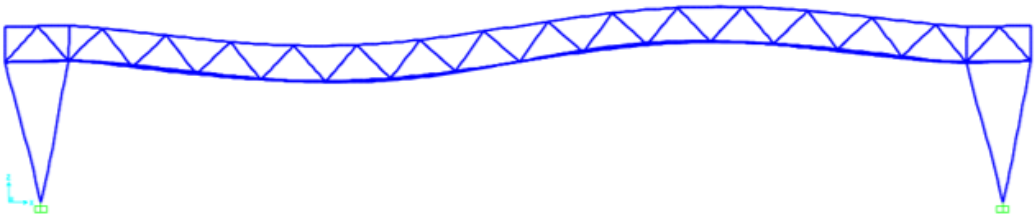
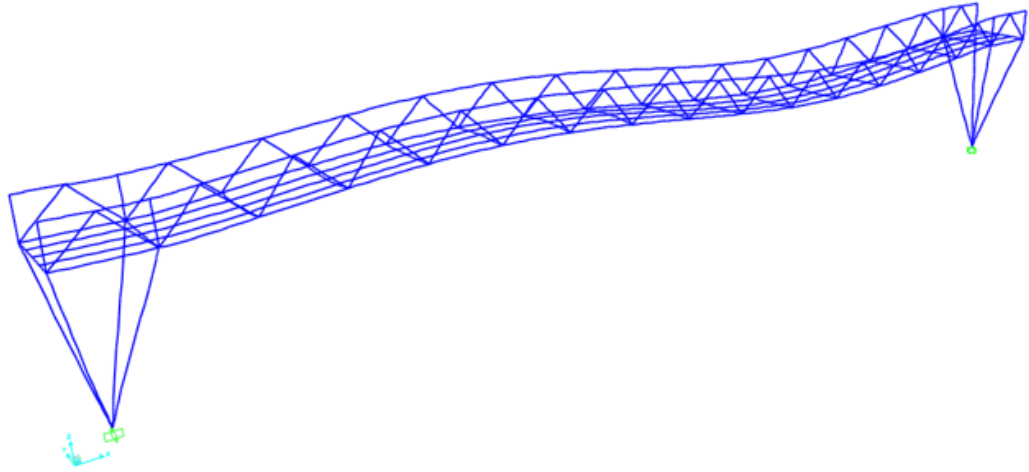


Ilustración 186-Segundo modo armónico de flexión sobre el plano ($f=12,477$ Hz)

8. Comparativa de resultados obtenidos

Con este apartado se concluye este Trabajo Fin de Grado donde se van a exponer de una forma muy visual los resultados de frecuencia y flecha obtenidos tanto en la parte de campaña experimental como en todos los modelos realizados con SAP2000.

Tabla 10-Comparativa entre flechas y frecuencias

	Modo 1	Modo 2	Flecha (4 personas)
	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	δ (mm)
Campaña Experimental	4,470	12,451	2,0 (aprox.)
SAP2000: Modelo 2D	4,608	11,569	1,2
SAP2000: Modelo 3D	4,356	12,477	0,8
Formulación matemática (biempotrada)	5,0586	13,9444	0,516

La medición experimental se realizó con el telémetro *BOSCH PLR 15* donde la unidad de medida que usa son los metros y con una precisión de mm, por tanto, es posible que el valor estuviera oscilando entre 1 y 2 mm presentando finalmente por pantalla una diferencia de valor de 2 mm. Se midió con las 4 personas sobre el centro de la pasarela, a ese valor se le resta la altura a la que se dispone el telémetro y se obtiene la flecha de forma experimental.

Respecto a las frecuencias decir que los valores que se obtuvieron son bastante buenos, siendo así que el modelo 2D se encuentra dentro del intervalo de frecuencias experimentales con bastante proximidad a éstos (el menos preciso es la del segundo modo), y con el modelo 3D ocurre lo contrario. Ahora los valores se encuentran por fuera del intervalo, pero con más precisión que en el otro modelo.

Con el caso de obtención a través de la formulación matemática proporcionada por el prontuario de vigas cabe decir que se ha adoptado que la pasarela era prácticamente empotrada, aunque no es en su totalidad, luego los valores de flechas y frecuencias obtenidos se encuentran en un intervalo intermedio.

9. Conclusiones y línea de futuro

Aparecen una serie de aspectos que requieren ser mencionarlos y que serán expuestos a continuación. Son los que se han ido tratando a lo largo de este documento; caso estático y el caso modal. Comparando sus resultados tanto en modelo 2D como 3D con lo experimental.

Respecto a la flecha se puede decir que ambos modelos se han reproducido con cierto éxito ya que en el modelo 2D se alcanza una flecha de 1,2 mm frente a los 0,8 mm del 3D. Aunque comparado con el ensayo experimental se desvían un pequeño porcentaje ya que en éste es de aproximadamente 2 mm. Todos ellos referidos a la situación del grupo de 4 personas sobre la zona central del vano de la pasarela sin tener en cuenta la acción del peso propio de la pasarela. Esto se comentó en el apartado 8. *Comparativa de resultados obtenidos* que puede ser debido a la precisión del propio telémetro, luego si se tuviera uno con una mayor precisión se podría haber obtenido el valor exacto. Con el que se disponía se hablaría de que se encontraba entre 1 y 2 mm, pero el resultado fue de 2.

También decir que los resultados obtenidos de las frecuencias son considerablemente ajustados a lo que la realidad nos proporcionó, cosa que al principio de este trabajo sus valores eran muy poco acertados. Posteriormente, tras saber con certeza que parámetros eran los adecuados para ajustar todo de manera eficiente fue un camino de aprendizaje de mucho provecho y satisfactorio.

Al principio de este trabajo se concretizaron una serie de objetivos a cumplir. No solo se aprendió el manejo con el programa SAP2000, sino que, además, se utilizó otro programa como es SolidWorks. Se realizaron con éxito los ensayos experimentales sobre la pasarela registrando información relevante de toda ella. Como se ha podido comprobar en los resultados comparativos el objetivo de obtener resultados coherentes entre modelo y realidad también se ha completado satisfactoriamente. Y, por último, se ha reproducido fielmente tanto el modelo tridimensional como el plano simplificado.

Actualmente se están llevando muchas labores de mantenimiento de este tipo de pasarela, ya que aún quedan muchas del mismo modelo que la estudiada en servicio. Esto quiere decir que la labor que se ha llevado a cabo podría ser perfectamente un trabajo real en la vida de un ingeniero. Con esto se quiere decir que en cuanto a formación como a formación ha sido excepcional.

El punto de partida de este Trabajo Fin de Grado fue la documentación que se encuentra reflejada en el ANEXO 1, obtenida del BOE [10], y de la cual se ha tomado como fiable la geometría de los elementos constructivos, pero cabe la posibilidad que durante la ejecución de obra se haya hecho algún ajuste. Con esto se hace referencia a los espesores ya que de forma externa se hizo una serie de mediciones mostradas bajo la *Tabla 1*. Luego, esto deja abierta la posibilidad de hacer un estudio más profundo en cuanto a consideraciones estructurales se refiere o método constructivo o de cálculo empleado por aquel entonces para poder llegar, así, a una solución exacta entre modelo y experimentación sin tener que alterar ninguna propiedad de material.

Independientemente de los cuidados que se lleven a la hora de modelar y las capacidades de los programas de elementos finitos, es sumamente difícil conseguir resultados tan ajustados a los que se obtienen en la realidad, siendo habitual tener que conformarse con el nivel de precisión mostrado en este trabajo.

Bibliografía

- [1] Código Técnico de la Edificación (CTE) “Documento Básico SE Seguridad Estructural”. 2009.
- [2] CypeCAD (versión 2019.h). << <http://www.cype.es/> >> [Última actualización 23/05/2019].
- [3] Diamonds << <http://www.buildsoft.eu/en/product/diamonds> >>.
- [4] ANSYS (2019 R2). << <https://www.ansys.com/> >>.
- [5] SAP2000 (versión 20.2.0). << <https://www.csiespana.com/software-versions/2/sap2000#submenu-top> >> [Última actualización 28/12/2018].
- [6] SolidWorks (2018 versión SP0). << <https://www.solidworks.com/es> >>.
- [7] “Colección de Pasarelas Metálicas. Tipo PM-1”. Obras de paso de carreteras de 1979. MOPU. Dirección General de Carreteras.
- [8] IAP 11 – Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera. 2012.
- [9] Instrucción de Acero Estructural (EAE). 2011.
- [10] Boletín Oficial del Estado (BOE).
- [11] COOK, R.D; MALKUS, D.S. y PLESHA, M.E. “*Concepts and Applications of Finite Elements Analysis*”. John Wiley and Sons. 1989.
- [12] SAMARTÍN QUIROGA, AVELINO y GONZÁLEZ DE CANGAS, JOSE RAMÓN “*Cálculo Matricial de Estructuras*”. Colección Escuelas del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 2001.
- [13] ARGÜELLES ÁLVAREZ, RAMÓN “*La Estructura Metálica Hoy*”. 2ª edición. Librería Técnica Bellisco. 1975.
- [14] TIMOSHENKO, S.P. y YOUNG, D.H. “*Teoría de las Estructuras*”. 2ª edición. URMO, S.A. de Ediciones. 1976.
- [15] COMPUTERS & STRUCTURES, INC. “*SAP2000 Integrated Solution of Estructural Analysis and Design version 20. CSI Analysis Reference Manual*”.
- [16] Centro Nacional de Información Geográfica << <http://fototeca.cnig.es/> >>.
- [17] GRUPO CYOPSA << <https://www.cyopsa.es/Carreteras.html#> >>.
- [18] SABAMEHR, ARDALAN Ph. D. “*Experimental Modal Analysis VS. Operational Modal Analysis*”. 27 de Julio de 2018. << <https://www.sensequake.com/blog-ema-vs-oma> >>.

[19] DEL CARMEN MARTÍNEZ, PABLO *“Análisis experimental de la respuesta de una pasarela a escala (sin y con TMD) ante cargas que simulan el tránsito peatonal”*. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Valladolid. 2018.

[20] MERA MARTÍNEZ, JUAN *“Diseño de una pasarela ciclo-peatonal sobre la autovía de circunvalación SE-30”*. Trabajo Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla. 2016.

ANEXOS

ANEXO 1: Colección de pasarelas metálicas tipo PM-1

En este apartado se explicarán todos los aspectos de materiales, planos de todos los elementos que conforman la pasarela y las mediciones. Todos los elementos de los planos quedan perfectamente definidos con sus cuadros de rotulación, detalles y cortes.

1. Memoria
2. Planos
3. Mediciones

MOPU

DIRECCION GENERAL DE CARRETERAS

JEFATURA	
*	9 SEP 1981
ENTRADA	976

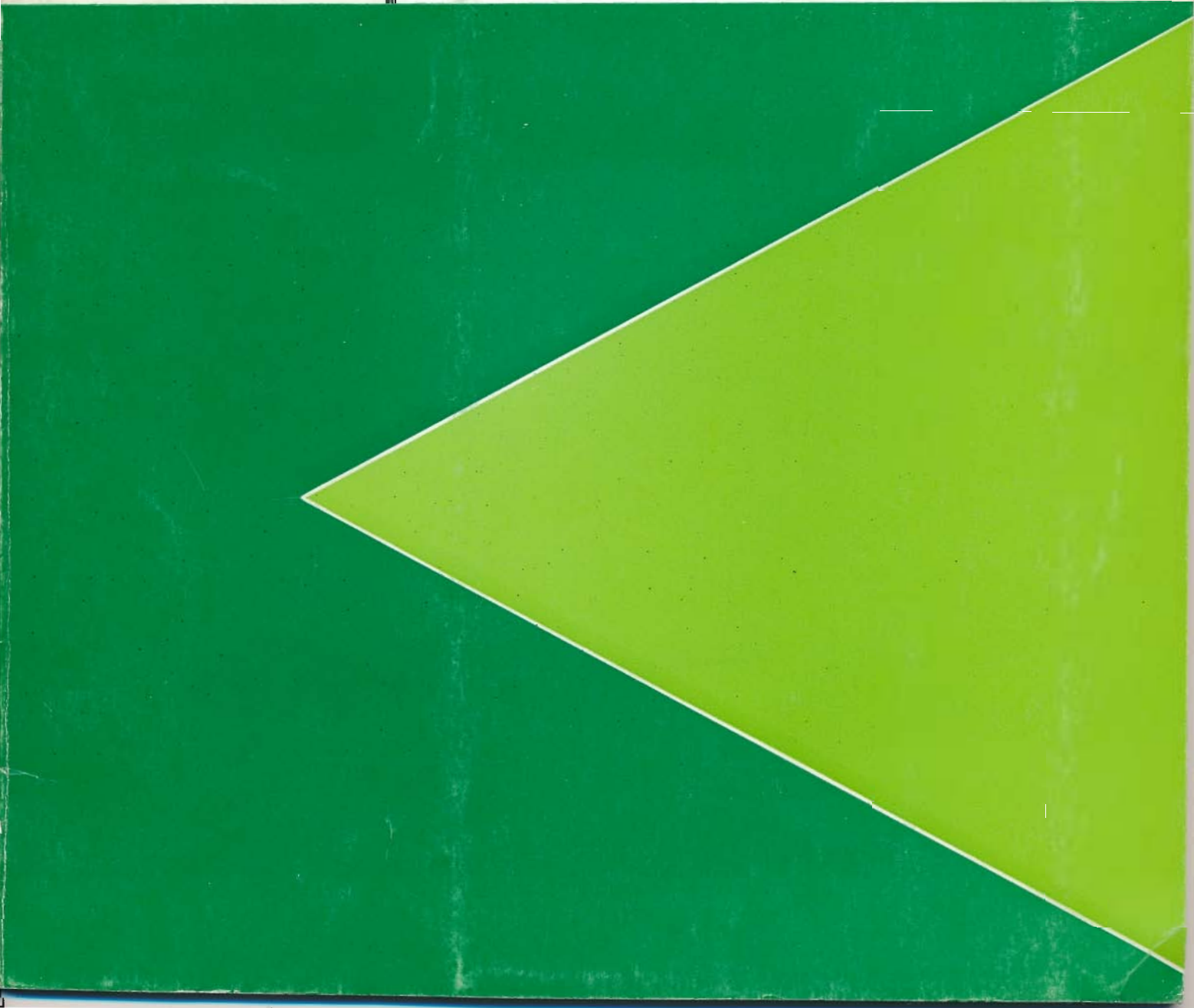
COLECCION DE
PASARELAS METALICAS

TIPO PM 1

ANULADO

Obras de paso de carreteras

1979



MOPU DIRECCION GENERAL DE CARRETERAS

**COLECCION DE
PASARELAS METALICAS**

TIPO PM 1

Obras de paso de carreteras

1979

J. Daus

Se agradece el envío de observaciones y sugerencias sobre esta Publicación a:

DIRECCION GENERAL DE CARRETERAS
SECCION DE PUENTES Y ESTRUCTURAS

Depósito Legal: M-14057-1981
I.S.B.N.: 84-7433-137-4

MOPU SECRETARIA GENERAL TECNICA
Servicio de Publicaciones
Publicación realizada en los Talleres del Servicio

ORDEN de 22 de septiembre de 1980 por la que se aprueban los documentos "Obras de paso de carreteras. Colección de pasarelas metálicas. Tipo PM 1" y "Obras de paso de carreteras. Colección de pasarelas metálicas desmontables. Tipo PMD 1".

Ilustrísimo señor:

Desde la entrada en vigor de la Ley 51/1974, de 19 de diciembre, de Carreteras, de acuerdo con el artículo 5, número 6 de la misma, este Ministerio viene revisando y actualizando la normativa técnica vigente en la materia.

Comprobada desde hace varios años la eficacia y utilidad del empleo de colecciones oficiales de modelos de los elementos que más se repiten en las carreteras, como son las obras de fábrica y puentes de luces moderadas que, además de ahorrar la repetición de cálculos y dibujos, permitan determinar con facilidad y suficiente aproximación la solución más idónea en cada caso.

En la actualidad están vigentes varias colecciones de losas de hormigón armado, de losas pretensadas, de tramos con vigas de hormigón pretensado y de estribos y pilas para ellas, así como una colección de pasarelas de hormigón.

En muchas ocasiones la solución de pasarelas metálicas es lo más conveniente por su sencillo y rápido montaje. Asimismo en otras es preciso disponer de pasarelas provisionales que puedan montarse y desmontarse según las necesidades, teniéndolas acopiadas en parque, lo que permite resolver situaciones de emergencia. Por todo ello, se ha considerado oportuno preparar una colección de pasarelas para peatones metálicas fijas y otra de desmontables, ambas de acuerdo con las técnicas y normativas actuales, tanto por lo que se refiere a cargas como a materiales.

Las colecciones objeto de la presente Orden han sido informadas favorablemente por la Comisión Permanente de Normas de la Dirección General de Carreteras.

Por lo expuesto, este Ministerio, en virtud de las facultades que le concede el artículo 5, número 6, de la Ley 51/1974, de 19 de diciembre, de Carreteras, y a propuesta de la Dirección General de Carreteras, ha dispuesto:

1º.- Aprobar los documentos "Obras de paso de carreteras. Colección de pasarelas metálicas. Tipo PM 1" y "Obras de paso de carreteras. Colección de pasarelas metálicas desmontables. Tipo PMD 1".

2º.- El uso de dichas colecciones no es obligatorio, debiendo considerarse en cada caso si las soluciones que en ellas figuran son las más adecuadas al mismo.

3º.- Justificado el uso, en su caso, el proyectista queda eximido de incluir en el proyecto los cálculos justificativos y mediciones detalladas de la pasarela de que se trate.

4º.- Las estructuras en estas colecciones no necesitan comprobación específica en zonas sísmicas, a menos que el proyectista estime que una posible destrucción de la obra pudiese ocasionar daños distintos a los incluidos en el grupo primero de la Norma Sismorresistente P.D.S. 1.

5º.- Queda autorizado el empleo de las colecciones objeto de la presente Orden a partir de su publicación en el "Boletín Oficial del Estado".

Lo que se comunica a V.I. para su conocimiento y efectos.

Madrid, 22 de septiembre de 1980.

SANCHO ROF

Ilmo. Sr. Director General de Carreteras.

INDICE

	Pág.
1. MEMORIA	
1.1 Generalidades	9
1.2 Definición de la estructura	9
1.3 Instrucciones aplicadas	9
1.4 Control de calidad	10
1.5 Características de los materiales	10
1.6 Terreno de cimentación	11
1.7 Coeficientes de seguridad	11
1.8 Cargas y sobrecargas	11
1.9 Cálculo	12
1.10 Planos	12
1.11 Mediciones	12
2. PLANOS	
2.1 Pasarelas. Alzado y Planta	15
2.2 Vigas de tramo de cruce	17
2.3 Soporte de tramo de cruce	19
2.4 Vigas de rampa. Alzados y Planta	21
2.5 Vigas de rampa. Detalles	23
2.6 Soporte de rampa	25
2.7 Cimentaciones	27
3. MEDICIONES	31

1. Memoria

1. MEMORIA

1.1 Generalidades.

La presente colección define cinco pasarelas de paso de peatones capaces de salvar anchos de vía de hasta 15, 20, 25, 30 y 35 metros.

Cada pasarela está constituida por dos rampas de acceso con una pendiente del 10%, una meseta horizontal y un tramo de paso.

El ancho total máximo entre bordes exteriores de estructura varia de 2,60 m a 2,64 m y el ancho interior útil para peatones de 2,36 m a 2,40 m según la luz del tramo de paso.

El pavimento está constituido por una capa de mortero epoxi de 2 mm de espesor.

Las superficies metálicas están protegidas mediante una capa de imprimación y una de acabado.

Se ha considerado un gálibo máximo de 5 m en el punto de mayor cota de la calzada.

1.2 Definición de la estructura.

Las luces del pórtico que constituye la pasarela son de 17,50, 22,50, 27,50, 32,50 y 37,50 m. La luz de las rampas es de 25 m.

El tablero está formado por un emparrillado de largueros y viguetas sobre el que se coloca la chapa de piso. Los largueros son tubos de 80 mm x 60 mm x 6 mm y las viguetas son tubos de 90 mm x 50 mm x 6 mm. La chapa de piso tiene un espesor de 8 mm.

Las vigas principales son celosías formadas por tubos, en cuyas cabezas la sección del tubo es constante en toda su longitud, mientras que en las diagonales la sección del tubo es variable según su posición. La distancia entre ejes de ambas cabezas es igual a 1,25 m en toda su longitud.

Los soportes están constituidos por cuatro brazos concurrentes de sección cuadrada y dimensiones variables.

1.3 Instrucciones aplicadas.

Las normas que se han aplicado son las vigentes en el momento de la redacción de la colección:

Las acciones se han considerado de acuerdo con la "Instrucción relativa a las acciones a considerar en el Proyecto de Puentes de Carretera" de 28 de febrero de 1972 (B.O.E. de 18 de abril de 1972).

Para el cálculo de la estructura metálica se ha seguido la "Instrucción e.m. 62 para estructuras de acero" (4ª edición) y la Norma Básica MV-103/1972, "Cálculo de las estructuras de acero laminado en edificación" (B.O.E. de 27 de junio de 1973).

Para el cálculo del hormigón armado se ha seguido la "Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado EH-73" de 19 de octubre de 1973 (B.O.E. de 7 a 13 de diciembre de 1973).

Según la Norma Sismorresistente P.D.S.-1 (B.O.E. de 21 de noviembre de 1974), las estructuras definidas en esta colección pueden considerarse incluidas en el Grupo 1º y por tanto sin necesidad de comprobación al sismo. El autor del Proyecto deberá valorar este

supuesto para aquellos casos en que una posible destrucción de la obra pudiese ocasionar otros daños distintos a los incluidos en el citado Grupo 1º de dicha Norma.

1.4 Control de calidad.

El control de calidad de los elementos metálicos se atenderá a lo especificado en la Norma MV-104/1966, "Ejecución de las estructuras de acero laminado en edificación" (B.O.E. de 25 de agosto de 1967).

El control de calidad previsto para los elementos de hormigón se atenderá a lo especificado en la Instrucción EH-73, habiéndose elegido tanto para los materiales como para la ejecución los siguientes niveles:

- a) Materiales
 - Acero. Control a nivel normal.
 - Hormigón. Control a nivel normal.
- b) Ejecución
 - Control a nivel intenso.

1.5 Características de los materiales.

El acero estructural adoptado es el A-42b según la Norma MV-102 "Acero laminado para estructuras de edificación" (B.O.E. de 14 de diciembre de 1976).

Los electrodos serán de alguno de los grupos E.34.1, E.34.2, E.34.3 ó E.34.4 y el revestimiento será de alguno de los tipos A, B, R ó RR, según la Norma UNE-14.003.

Para el acero en armaduras se han considerado en el cálculo las siguientes características:

- Límite elástico característico $f_{yk} = 4.200 \text{ kp/cm}^2$
- Módulo de elasticidad $E_2 = 2.100.000 \text{ kp/cm}^2$
- Tipo: Barras corrugadas.

Los hormigones adoptados en los cálculos tienen las siguientes características:

- a) Hormigón de base de zapatas
 - Resistencia característica $f_{ck} = 100 \text{ kp/cm}^2$
- b) Hormigón de zapatas y arranque de rampas
 - Resistencia característica $f_{ck} = 175 \text{ kp/cm}^2$

Las pinturas adoptadas son de minio de plomo a base de resina epoxi para la capa de imprimación y a base de resina epoxi para la de acabado según el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3/75 (Orden Ministerial de 6 de febrero de 1976 y Orden Ministerial de 2 de julio de 1976, B.O.E. de 26 de noviembre de 1977).

El mortero epoxi adoptado tiene la siguiente composición en peso:

- Resina epoxi 15 %
- Arena 85 %
- Pigmentos colorantes.

La resina epoxi tiene las siguientes características:

- Módulo de elasticidad no mayor de 300.000 kp/cm^2
- Resistencia a la compresión $1.100 \text{ a } 1.200 \text{ kp/cm}^2$
- Resistencia a tracción $300 \text{ a } 900 \text{ kp/cm}^2$
- Resistencia a flexión $500 \text{ a } 1.300 \text{ kp/cm}^2$

La arena tiene un diámetro comprendido entre 1 mm y 0,2 mm.

El pigmento colorante es dióxido de titanio al que se le pueden añadir otros pigmentos adecuados.

1.6 Terreno de cimentación.

Se ha supuesto un terreno de cimentación con las siguientes características:

- Densidad $\gamma = 1.000 \text{ kp/m}^3$
- Angulo de rozamiento interno $\varrho = 35^\circ$
- Coeficiente de rozamiento tierras-hormigón $\mu = 0,4$
- Presión admisible $\sigma = 2,6 \text{ kp/cm}^2$

1.7 Coeficientes de seguridad.

De acuerdo con la Norma MV-103 se adoptan para los elementos metálicos, los siguientes coeficientes de seguridad:

- Coeficiente de minoración de σ_u 1,00
- Coeficiente de mayoración de cargas permanentes 1,33
- Coeficiente de mayoración de sobrecargas de uso 1,50 ó 1,33
- Coeficiente de mayoración de acciones de viento 1,33 ó 1,50
- Coeficiente de mayoración de acciones de temperatura 1,33

De acuerdo con el control de calidad fijado en 1.4 se adoptan para los elementos de hormigón los siguientes coeficientes de seguridad:

- Coeficiente de minoración de f_{ck} $\gamma_c = 1,50$
- Coeficiente de minoración de f_{yk} $\gamma_s = 1,15$
- Coeficiente de mayoración de acciones $\gamma_f = 1,50$

1.8 Cargas y sobrecargas.

Se han considerado para el cálculo las siguientes:

- Cargas permanentes:
 - Peso propio
 - Barandillas 100 kp/m

– Sobrecargas:

De uso 400 kp/m²

De viento 200 kp/m²

Se ha considerado además una variación de temperatura de $\pm 35^{\circ}\text{C}$.

1.9 Cálculo.

Se han tenido en cuenta para las hipótesis de carga las siguientes acciones:

1. Carga permanente
2. Sobrecarga
3. Viento
4. Temperatura

Para el cálculo de los esfuerzos se ha considerado la estructura del tramo de cruce como un pórtico constituido por barras trianguladas con nudos rígidos. Los esfuerzos se han obtenido en ordenador mediante el programa denominado STRESS.

A partir de los esfuerzos calculados se han efectuado las comprobaciones siguientes:

- Agotamiento de las secciones, teniendo en cuenta las anchuras eficaces.
- Abollamiento de la chapa del tablero, dimensionando los elementos de rigidización.
- Pandeo del cordón comprimido, dimensionando los pórticos de rigidez.
- Pandeo de los soportes y barras comprimidas.
- Cimentaciones.

Se ha efectuado también comprobación de la deformación y se han estudiado los efectos de la vibración de las pasarelas.

1.10 Planos.

En los planos se describen los diferentes tipos de pasarelas estudiadas indicando todos los detalles precisos para su definición.

1.11 Mediciones.

Se incluyen mediciones de cada una de las pasarelas estudiadas que permitirán conocer el presupuesto de éstas al aplicarles los precios vigentes en el momento de su utilización.

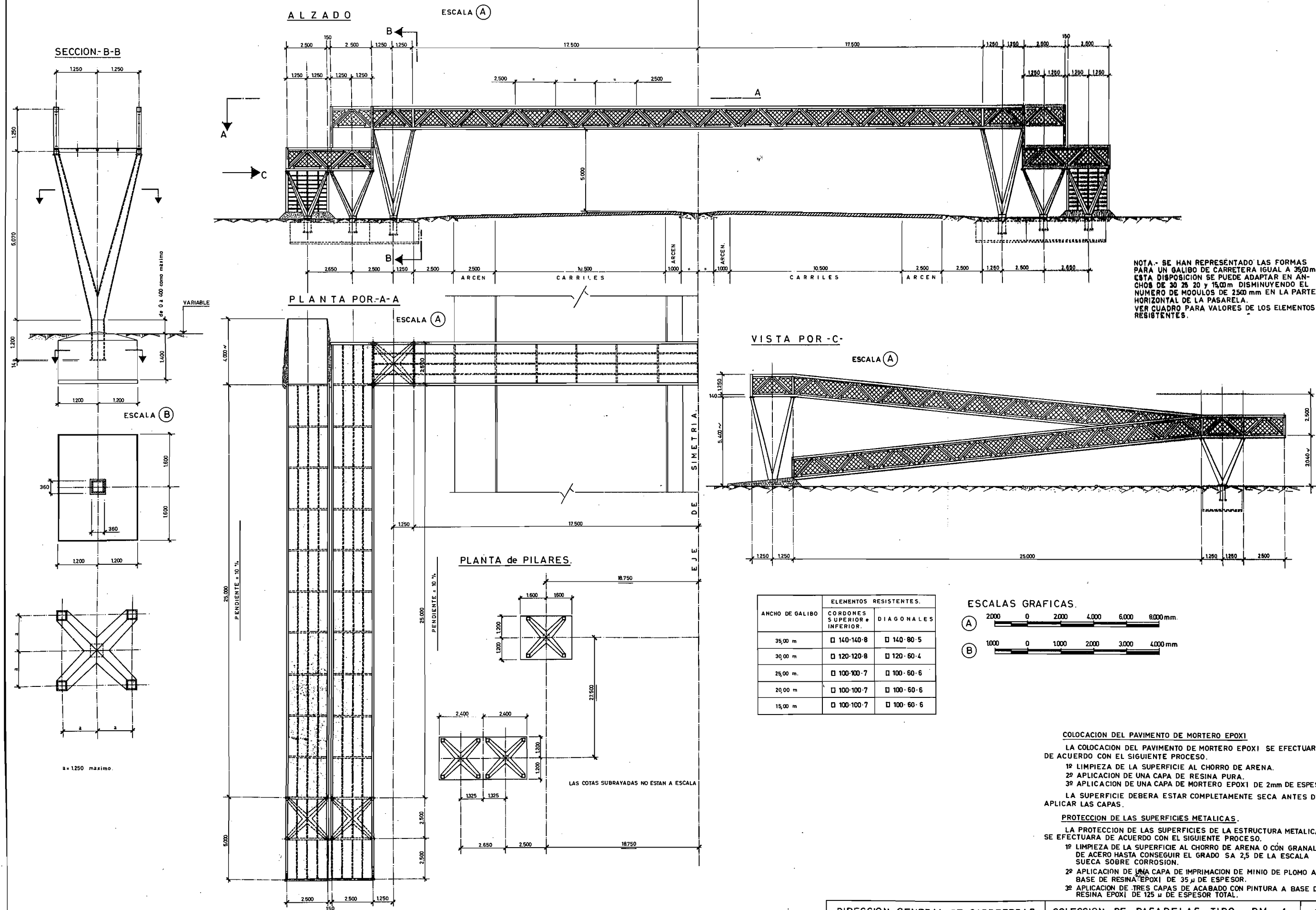
Para la medición de excavaciones se ha supuesto un terreno horizontal y un talud de excavación de 15° .

Para la medición del hormigón se ha supuesto que los soportes están enterrados a una profundidad mínima.

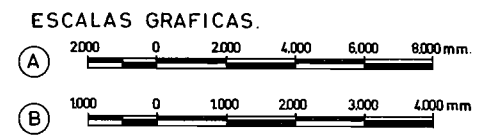
También se ha supuesto que el hormigón de base de zapatas de tipo H-100, tiene un espesor de 0,10 m.

2. Planos

2.1 PASARELAS. ALZADO Y PLANTA



ANCHO DE GALIBO	ELEMENTOS RESISTENTES.	
	CORDONES SUPERIOR e INFERIOR.	DIAGONALES
35,00 m	□ 140-140-8	□ 140-80-5
30,00 m	□ 120-120-8	□ 120-60-4
25,00 m.	□ 100-100-7	□ 100-60-6
20,00 m	□ 100-100-7	□ 100-60-6
15,00 m	□ 100-100-7	□ 100-60-6



COLOCACION DEL PAVIMENTO DE MORTERO EPOXI

LA COLOCACION DEL PAVIMENTO DE MORTERO EPOXI SE EFECTUARA DE ACUERDO CON EL SIGUIENTE PROCESO.

- 1º LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE AL CHORRO DE ARENA.
- 2º APLICACION DE UNA CAPA DE RESINA PURA.
- 3º APLICACION DE UNA CAPA DE MORTERO EPOXI DE 2mm DE ESPESOR.

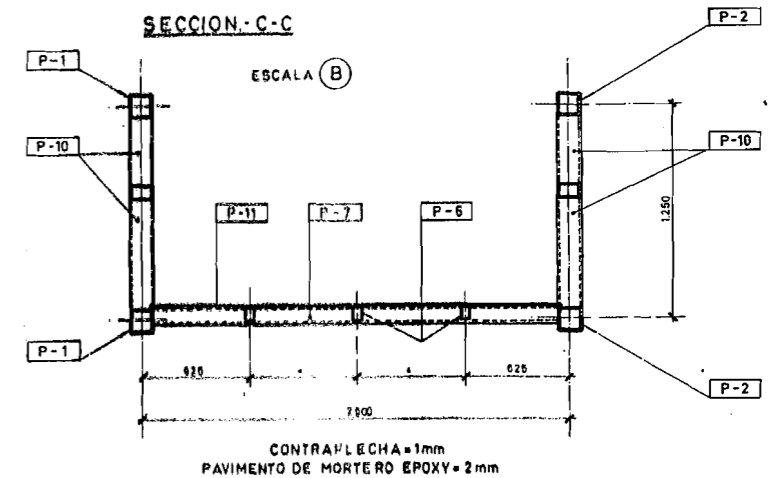
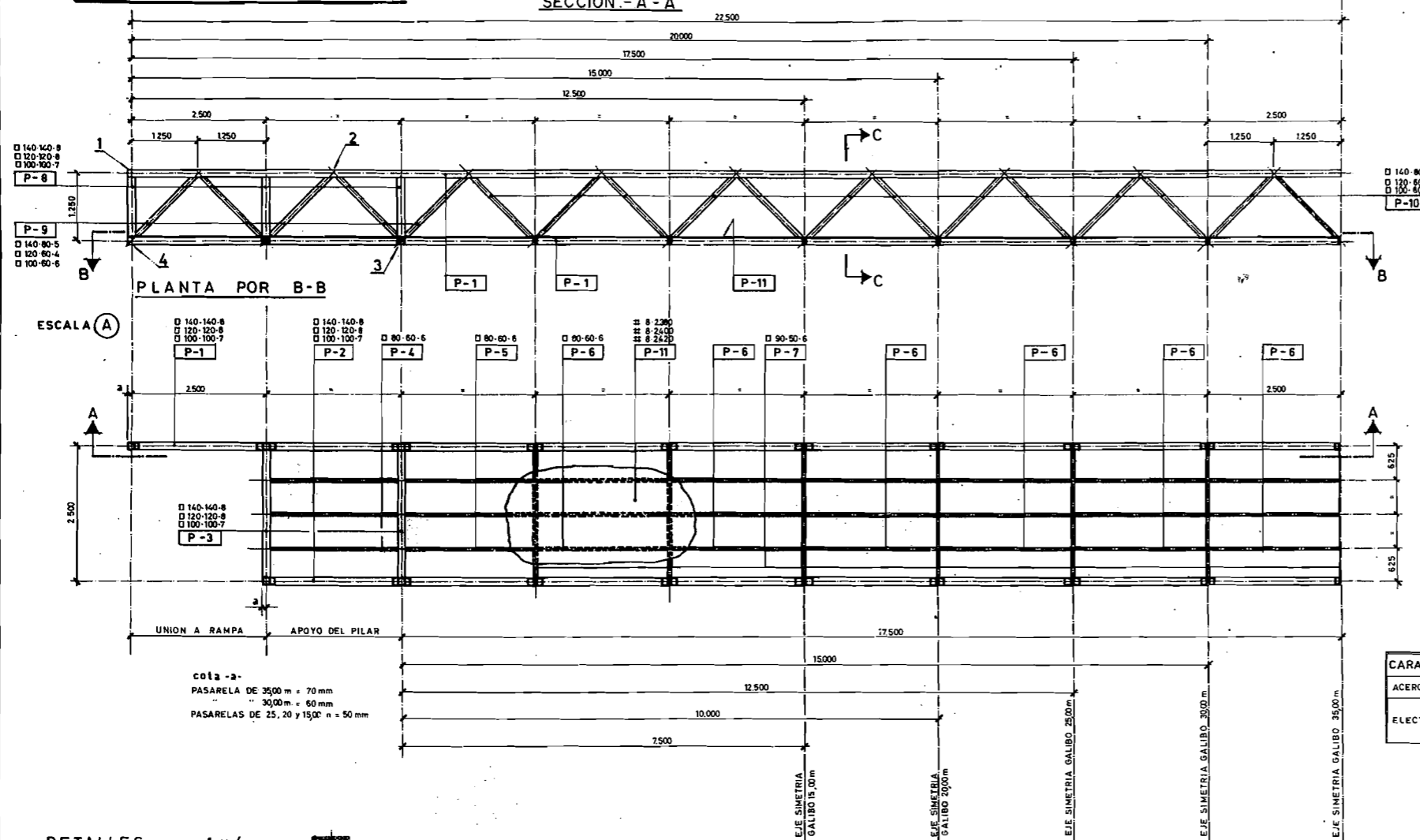
LA SUPERFICIE DEBERA ESTAR COMPLETAMENTE SECA ANTES DE APLICAR LAS CAPAS.

PROTECCION DE LAS SUPERFICIES METALICAS.

LA PROTECCION DE LAS SUPERFICIES DE LA ESTRUCTURA METALICA SE EFECTUARA DE ACUERDO CON EL SIGUIENTE PROCESO.

- 1º LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE AL CHORRO DE ARENA O CON GRANALLA DE ACERO HASTA CONSEGUIR EL GRADO SA 2,5 DE LA ESCALA SUECA SOBRE CORROSION.
- 2º APLICACION DE UNA CAPA DE IMPRIMACION DE MINIO DE PLOMO A BASE DE RESINA EPOXI DE 35 µ DE ESPESOR.
- 3º APLICACION DE TRES CAPAS DE ACABADO CON PINTURA A BASE DE RESINA EPOXI DE 125 µ DE ESPESOR TOTAL.

2.2 VIGAS DE TRAMO DE CRUCE



cola - a -
PASARELA DE 3500 m x 70 mm
3000 m x 60 mm
PASARELAS DE 25, 20 y 1500 n = 50 mm

CARACTERISTICAS MATERIALES.	
ACERO ESTRUCTURAL	A-42b
ELECTRODOS	GRUPO E34.1.2.3.6.4.
	TIPO A, B, R o RR

ELEMENTOS RESISTENTES

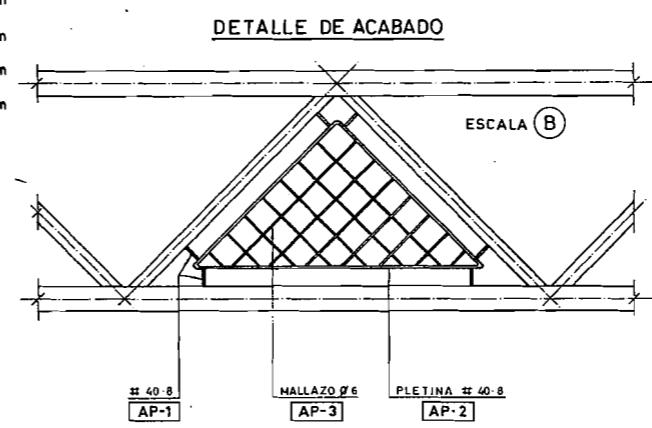
PESO TOTAL DE LA PASARELA 7006,44 Kg			
P-11	8 2.420-20.000	1	3039,52 Kg
P-10	20 100-60-6-1.686	20	23,60
P-9	16 100-60-6-1.656	16	23,08
P-8	10 100-100-7-1.150	10	23,50
P-7	5 90-50-6-2.400	5	26,93
P-6	12 80-60-6-2.450	12	29,54
P-5	6 80-60-6-2.425	6	29,23
P-4	8 80-60-6-2.400	8	28,93
P-3	4 100-100-7-2.400	4	49,05
P-2	2 100-100-7-20.100	2	410,87
P-1	2 100-100-7-25.100	2	513,07

PESO TOTAL DE LA PASARELA 8598,09 Kg			
P-11	8 2.420-25.000	1	3799,40 Kg
P-10	28 100-60-6-1.686	28	23,50
P-9	16 100-60-6-1.656	16	23,08
P-8	10 100-100-7-1.150	10	23,50
P-7	7 90-50-6-2.400	7	26,93
P-6	18 80-60-6-2.450	18	29,54
P-5	6 80-60-6-2.425	6	29,23
P-4	6 80-60-6-2.400	6	28,93
P-3	4 100-100-7-2.400	4	49,05
P-2	2 100-100-7-25.100	2	513,07
P-1	2 100-100-7-30.100	2	615,28

PESO TOTAL DE LA PASARELA 10.189,90 Kg			
P-11	8 2.420-30.000	1	4559,28 Kg
P-10	36 100-60-6-1.686	36	23,50
P-9	16 100-60-6-1.656	16	23,08
P-8	10 100-100-7-1.150	10	23,50
P-7	9 90-50-6-2.400	9	28,93
P-6	24 80-60-6-2.450	24	29,54
P-5	6 80-60-6-2.425	6	29,23
P-4	6 80-60-6-2.400	6	28,93
P-3	4 100-100-7-2.400	4	49,05
P-2	2 100-100-7-30.100	2	615,28
P-1	2 100-100-7-35.100	2	717,49

PESO TOTAL DE LA PASARELA 12.712,73 Kg			
P-11	8 2.420-35.000	1	5275,20 Kg
P-10	44 120-60-4-1.658	44	17,90
P-9	16 120-60-4-1.628	16	17,58
P-8	10 120-120-9-1.120	10	31,79
P-7	11 90-50-6-2.380	11	28,69
P-6	30 80-60-6-2.450	30	29,54
P-5	5 80-60-6-2.415	5	29,11
P-4	6 80-60-6-2.380	6	28,69
P-3	4 120-120-9-2.380	4	66,95
P-2	2 120-120-9-35.120	2	988,08
P-1	2 120-120-9-40.120	2	1.128,75

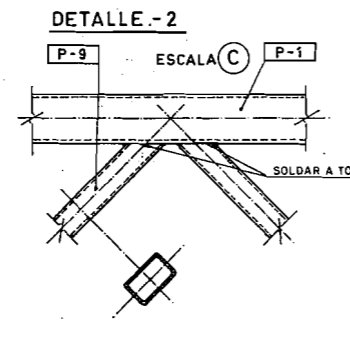
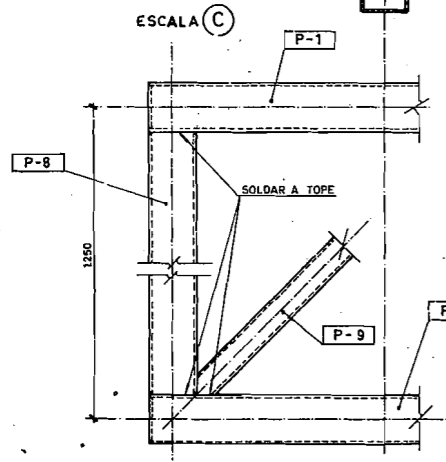
PESO TOTAL DE LA PASARELA 15.932,29 Kg			
P-11	8 2.380-40.000	1	5978,56 Kg
P-10	52 140-80-5-1.650	52	27,20
P-9	16 140-80-5-1.610	16	26,54
P-8	10 140-140-8-1.110	10	35,80
P-7	13 90-50-6-2.350	13	28,45
P-6	36 80-60-6-2.450	36	29,54
P-5	6 80-60-6-2.405	6	28,99
P-4	8 80-60-6-2.360	8	28,45
P-3	4 140-140-8-2.360	4	78,25
P-2	2 140-140-8-40.140	2	1.330,97
P-1	2 140-140-8-45.140	2	1.498,77



TIPO DE PASARELA	AP 1	AP 2	AP 3	PESO TOTAL
3500 m.	6 8 40-8-100 150 Kg	8 40-8-4.258 10,69 Kg	8 8-8.120 180 Kg	13,99 Kg
3000 m.	6 8 40-8-110 1,65 "	"	"	14,14 "
25,20 y 1500 m	6 8 40-8-115 1,73 "	"	"	14,22 "

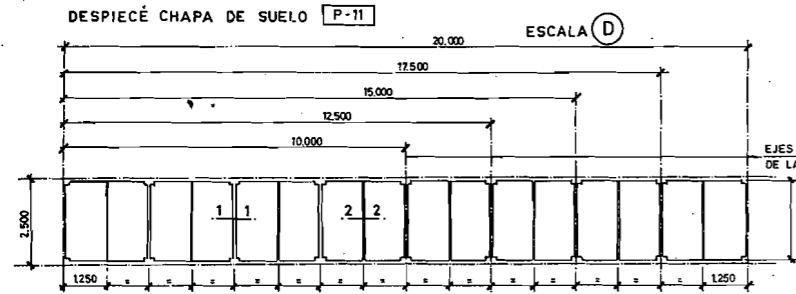
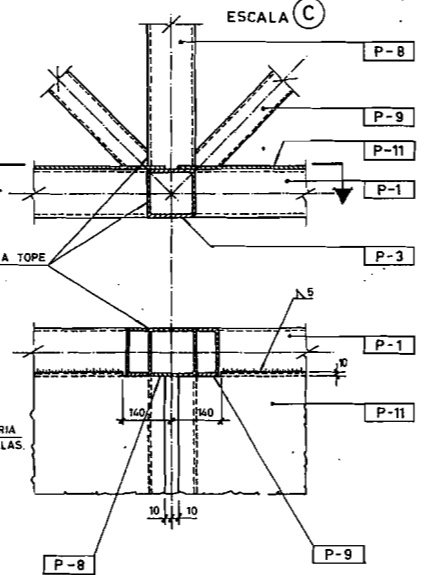
NOTA.- TODOS LOS CORDONES DE SOLDADURA EN ANGULO SERAN DE 4mm EXCEPTO LOS INDICADOS.

DETALLES: 1 y 4

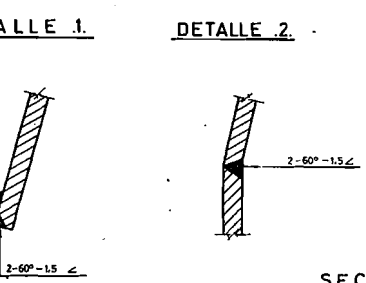
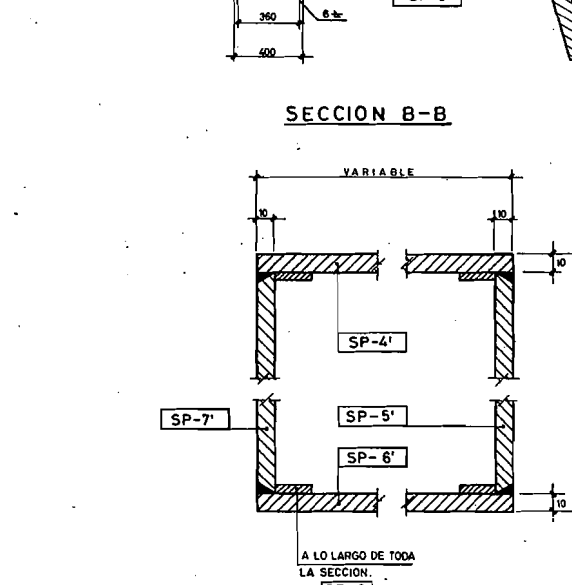
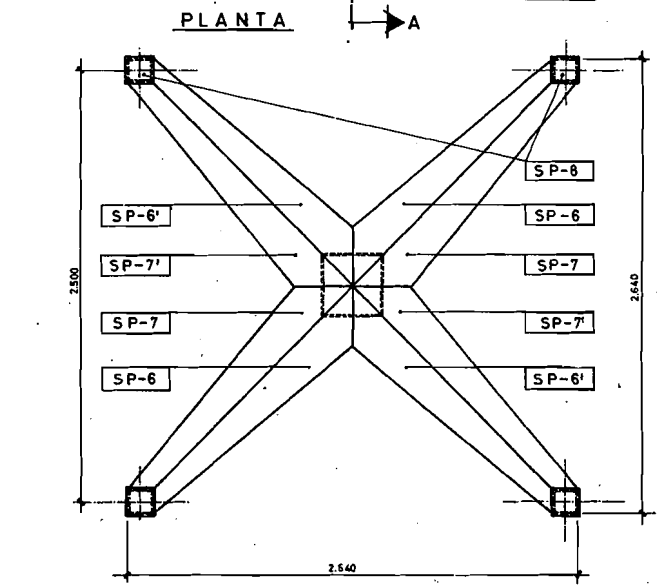
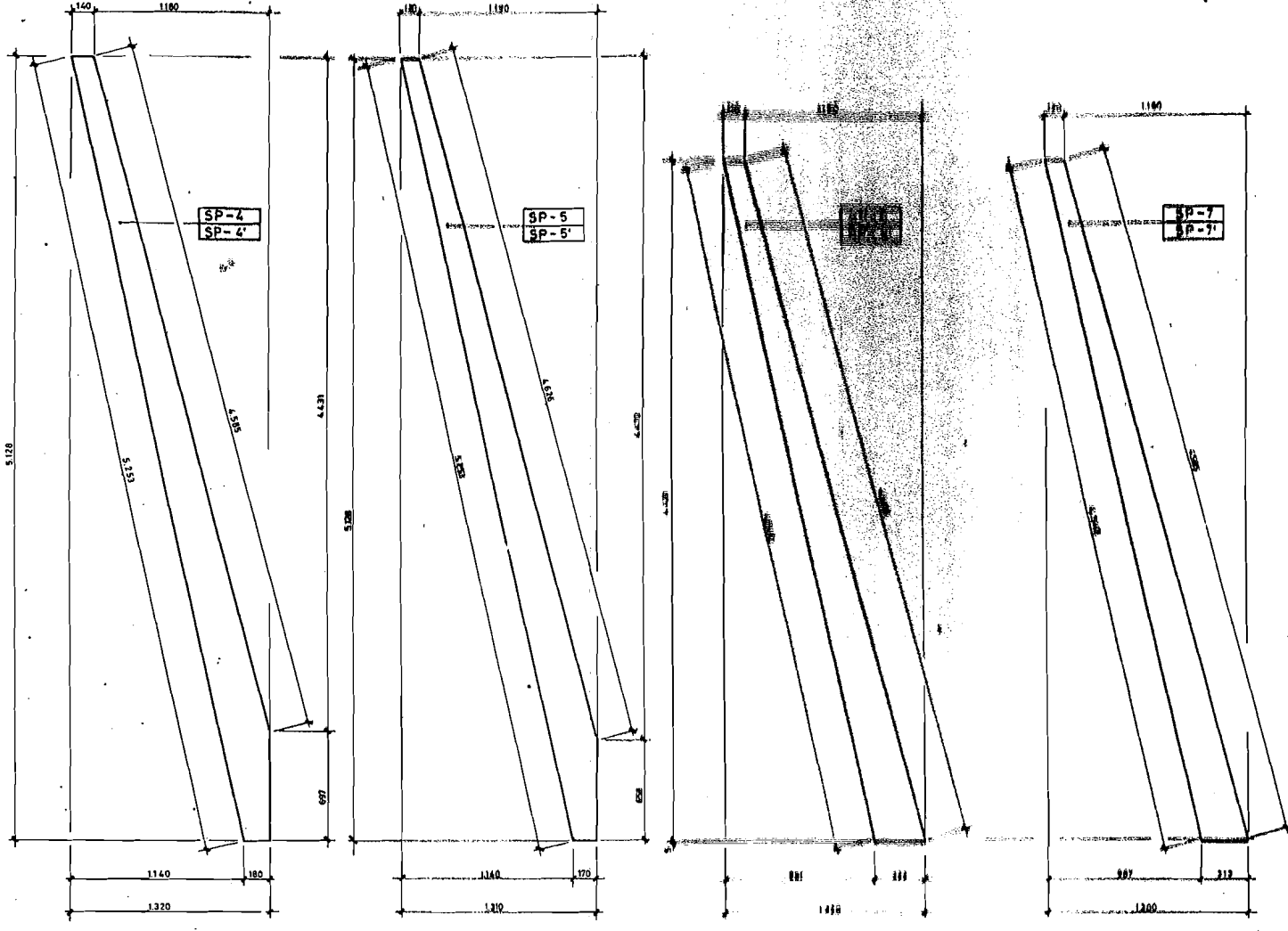
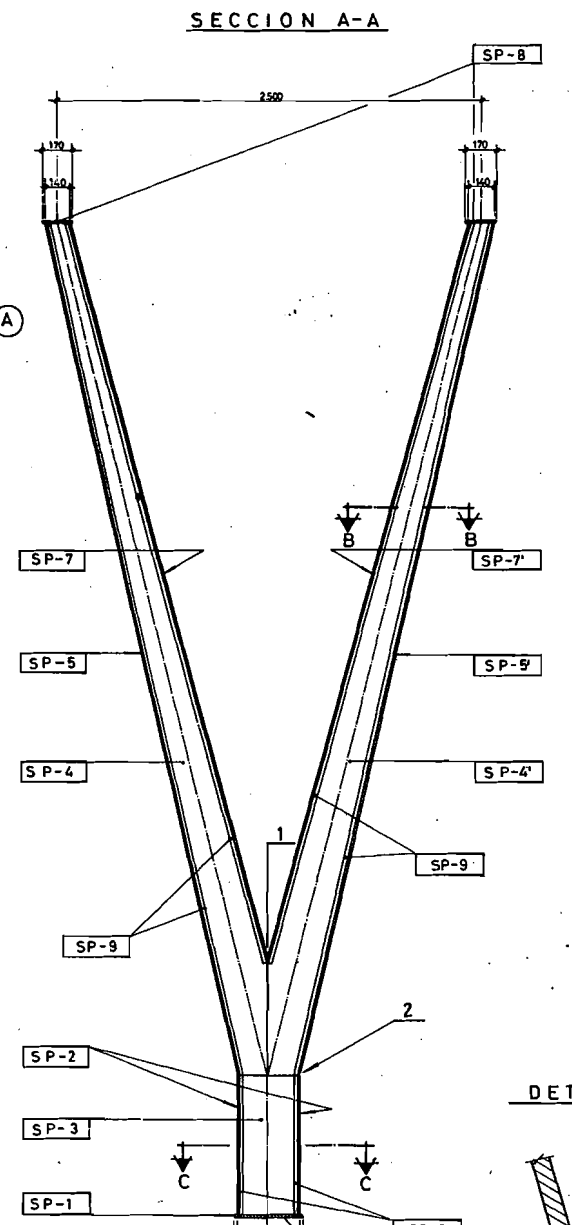
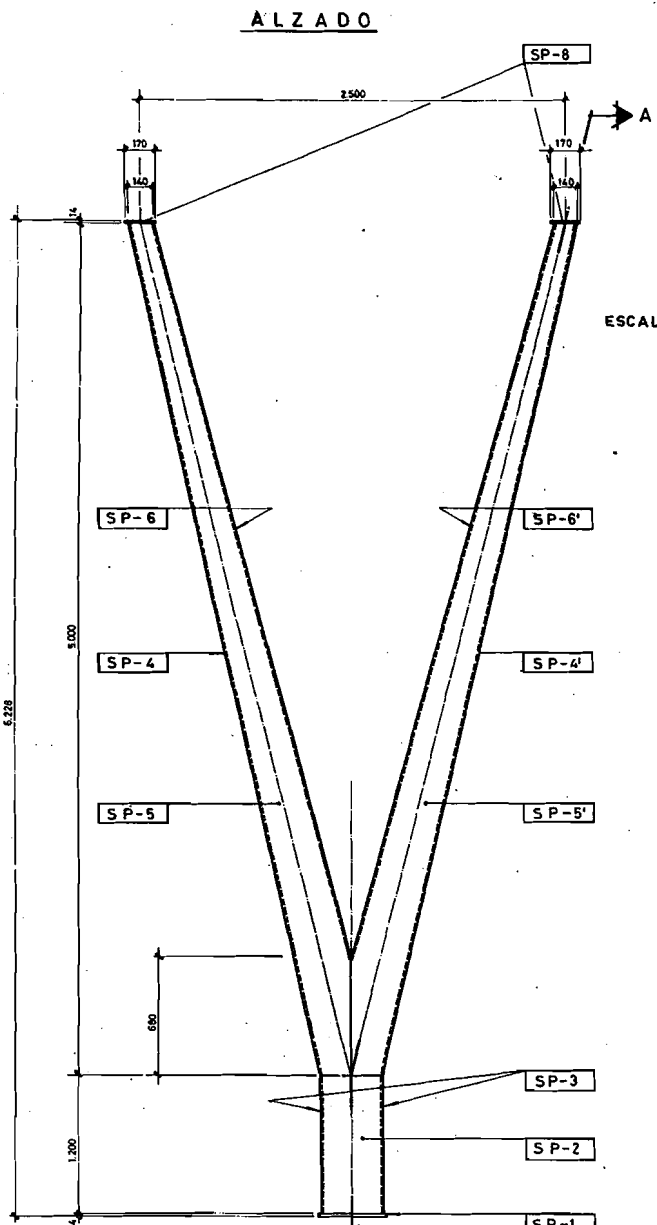


ESCALAS GRAFICAS.	
(A)	0 1000 2000 3000 4000 mm
(B)	0 500 1000 1500 mm
(C)	0 200 400 600 800 mm
(D)	0 2000 4000 6000 8000 mm

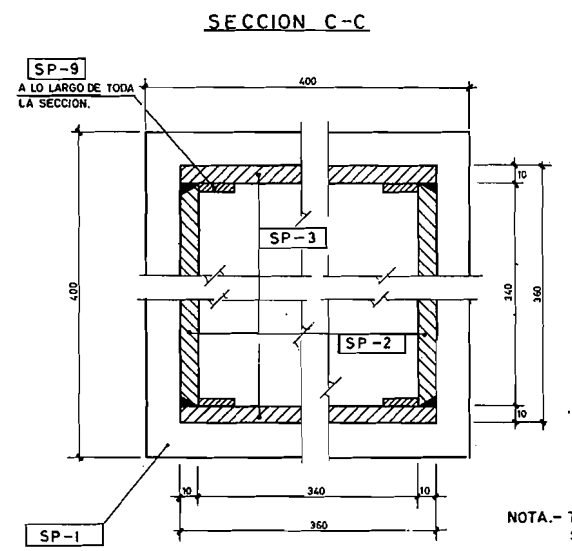
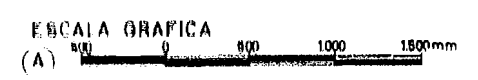
DETALLE-3



2.3 SOPORTE DE TRAMO DE CRUCE



CARACTERISTICAS MATERIALES	
ACERO ESTRUCTURAL	A-42b
ELECTRODOS	GRUPO E30,1,2,3,4
	TIPO A,B,N,H



* FICHA TECNICA SE DISPONDRÁ A LO LARGO DE TODO EL PILAR.
 (VER SECCION B-B) LA LONGITUD INDICADA EN EL CUADRO SE REFIERE A LOS mm. TOTALES DE CHAPA.

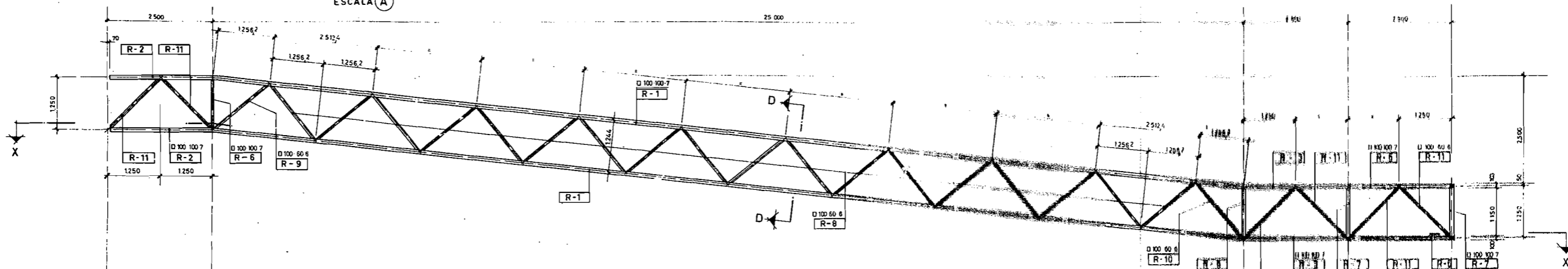
PESO TOTAL		1598,412 Kg			
SP-9	# 5 20 80000	1	62,800Kg	62,800Kg	VER NOTA *
SP-8	# 14 170. 170	4	3,176 -	12,704 -	
SP-7'	# 10	2	75,306 -	150,612 -	
SP-7	# 10	2	75,306 -	150,612 -	
SP-6'	# 10	2	82,263 -	164,526 -	
SP-6	# 10	2	82,263 -	164,526 -	VER DESPIECE
SP-5'	# 10	2	89,103 -	178,206 -	
SP-5	# 10	2	89,103 -	178,206 -	
SP-4'	# 10	2	96,689 -	193,378 -	
SP-4	# 10	2	96,689 -	193,378 -	
SP-3	# 10,360.1200	2	33,912 -	67,824 -	
SP-2	# 10,340.1200	2	32,028 -	64,056 -	
SP-1	# 14. 400. 400	1	17,584 -	17,584 -	
MARCA	TIPO MATERIAL	Nº DE PIEZAS	PESO PIEZA	PESO TOTAL	OBSERVACIONES

NOTA.- TODOS LOS CORDONES DE SOLDADURA EN ANGULO SERAN DE 4mm EXCEPTO LOS INDICADOS.

2.4 VIGAS DE RAMPA. ALZADOS Y PLANTA

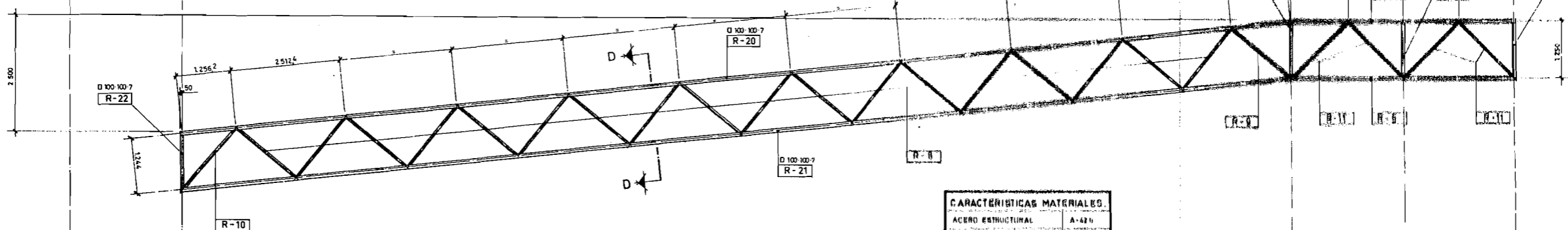
ALZADO SECCION A-A

ESCALA (A)



ALZADO VISTA B.B

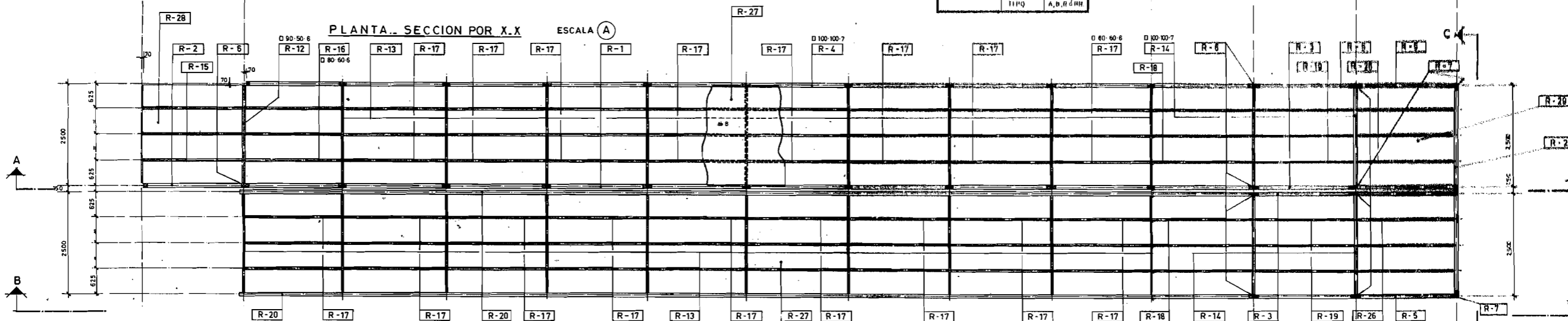
ESCALA (A)



CARACTERISTICAS MATERIALES	
ACERO ESTRUCTURAL	A-42 K
ELECTRODOS	GRUPO E 461, 2 344
TIPO	A, B, D, DHR

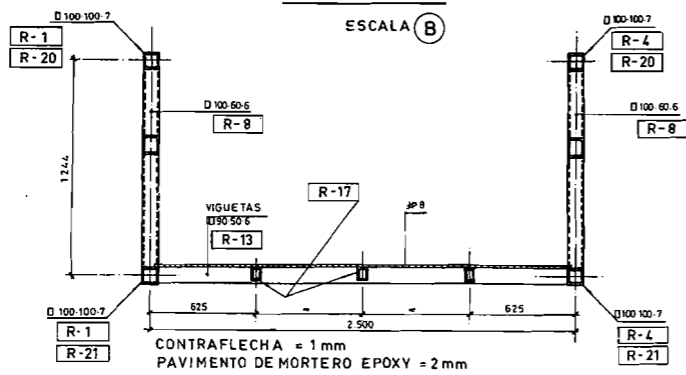
PLANTA SECCION POR X.X

ESCALA (A)



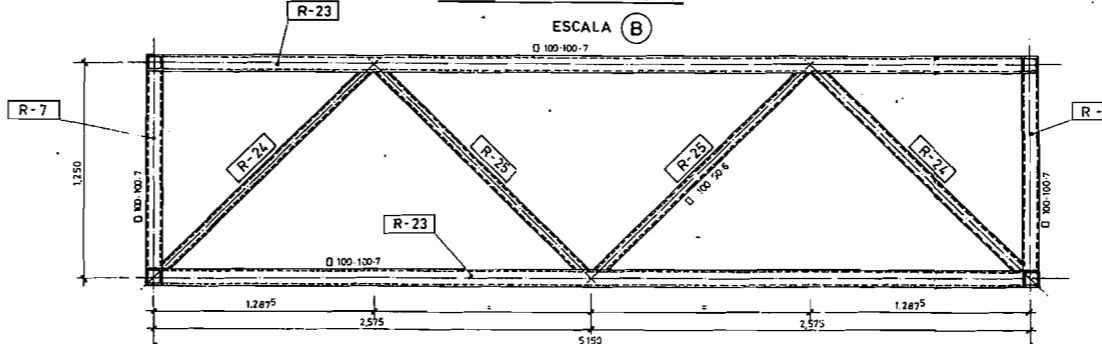
SECCION D-D

ESCALA (B)

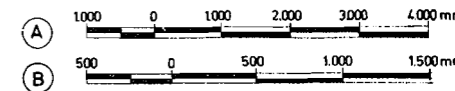


ALZADO VISTA C-C

ESCALA (B)

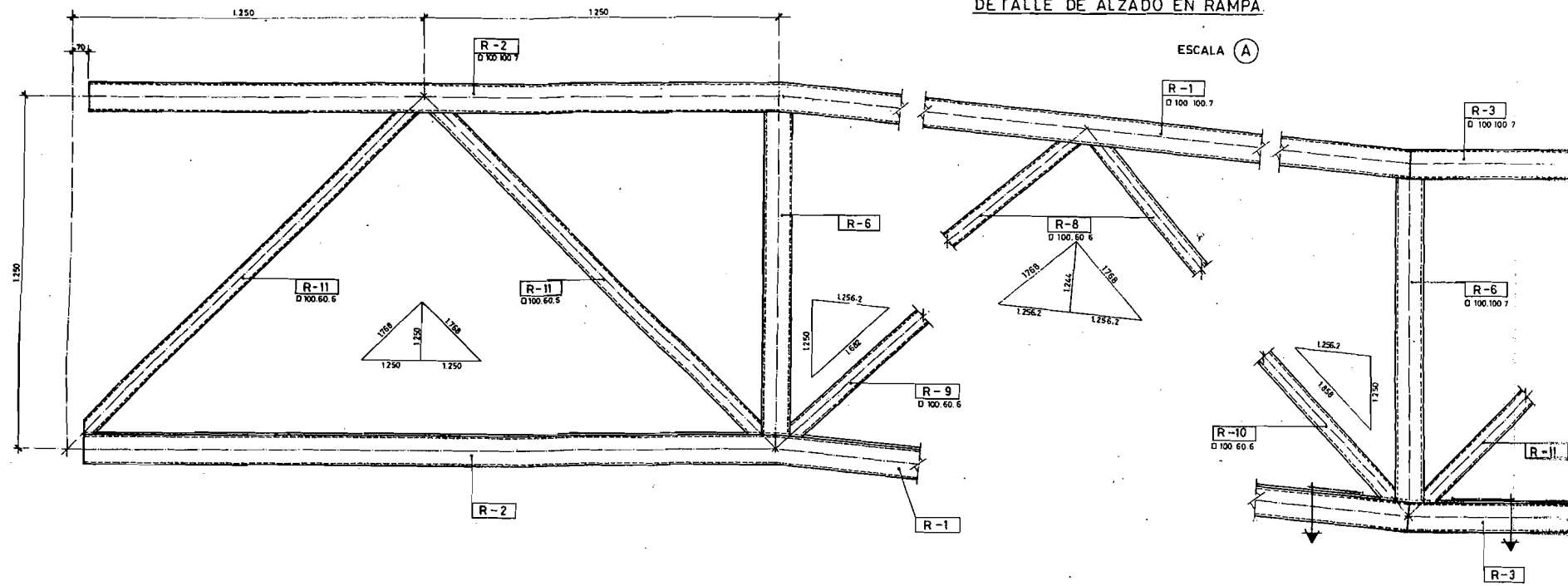


ESCALAS GRAFICAS



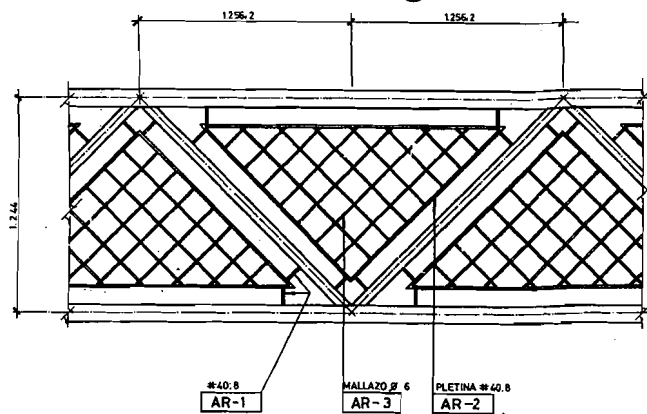
2.5 VIGAS DE RAMPA. DETALLES

DETALLE DE ALZADO EN RAMPA



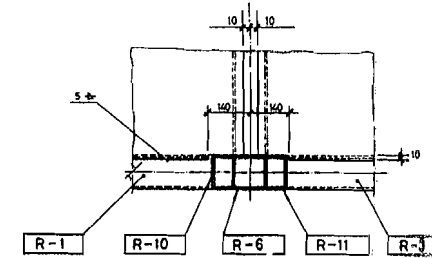
DETALLE DE ACABADO

ESCALA B



AR-1		AR-2		AR-3		PESO TOTAL
MATERIAL	PESO	MATERIAL	PESO	MATERIAL	PESO	
BAR#08.120	1.80 Kg	BAR#08.4258	10.69 Kg	BAR#6.8120	1.80 Kg	14,29

MULTIPlicAR POR EL NUMERO DE MODULOS IGUALES PARA CADA RAMPA

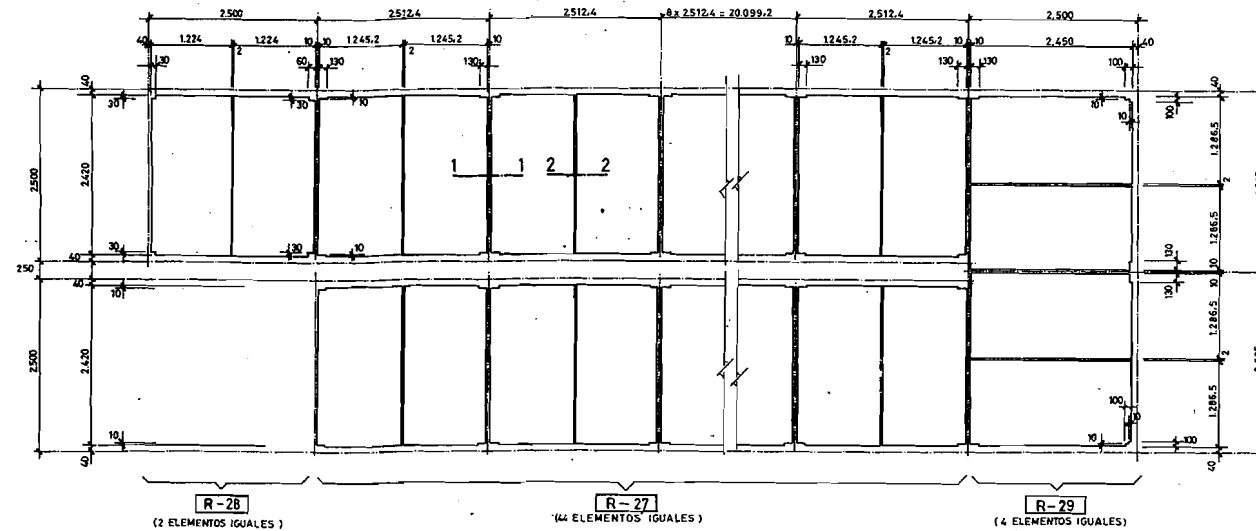


CARACTERISTICAS MATERIALES	
ACERO ESTRUCTURAL	A-42 b
ELECTRODOS	GRUPO E34.1,2,3&4
	TIPO A,B,R ORR

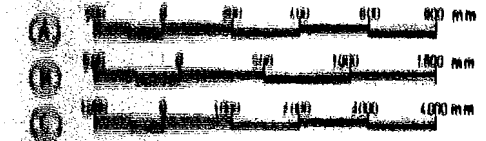
LAS SECCIONES 1-1 Y 2-2 SON IGUALES A LAS INDICADAS EN EL DESPIECE DE LA PASARELA

DESPIECE CHAPA DE SUELO

ESCALA C



ESCALAS GRAFICAS

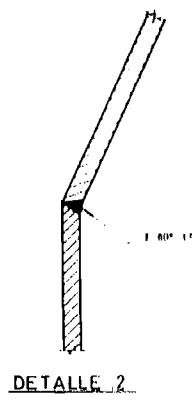
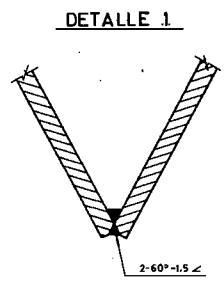
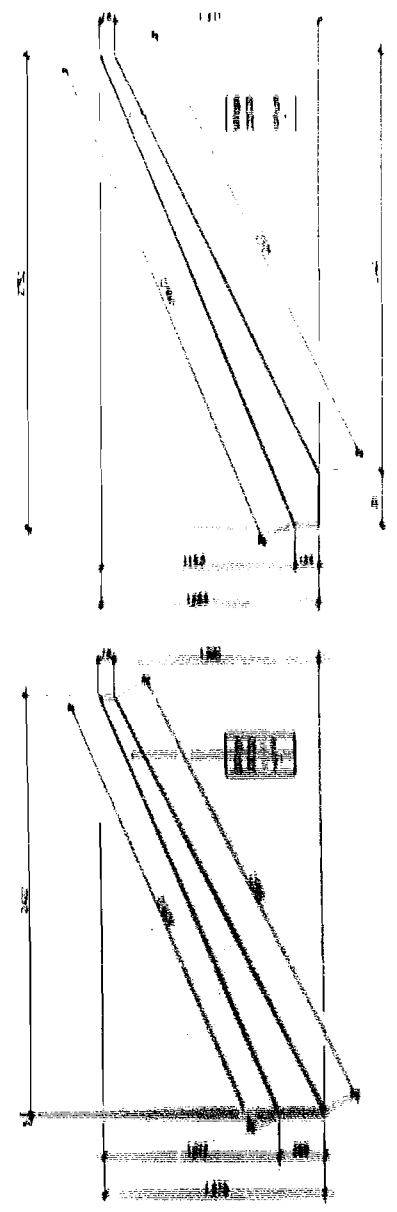
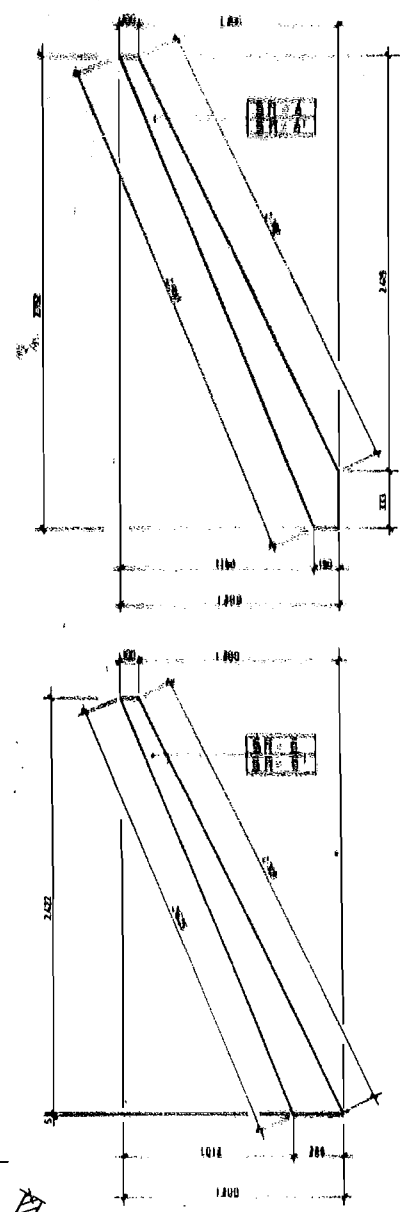
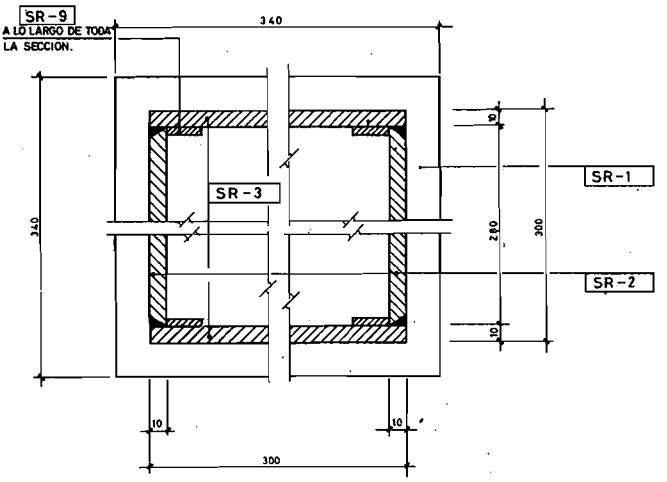
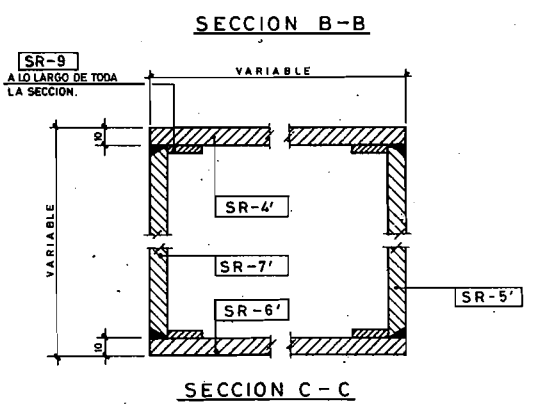
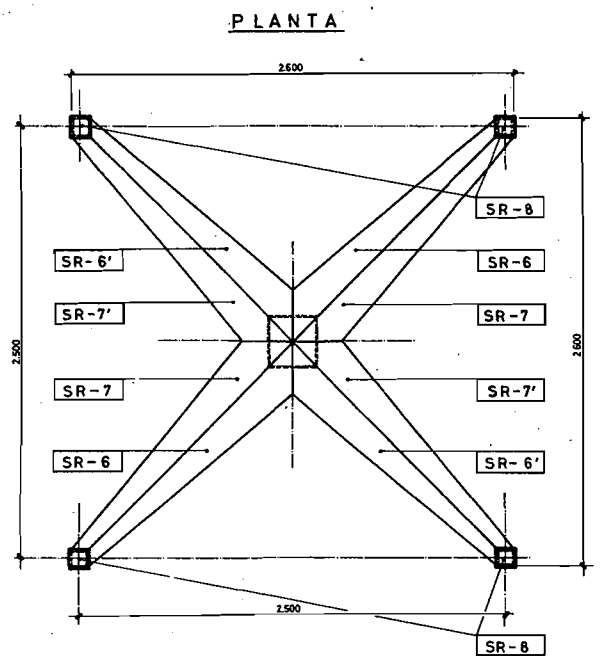
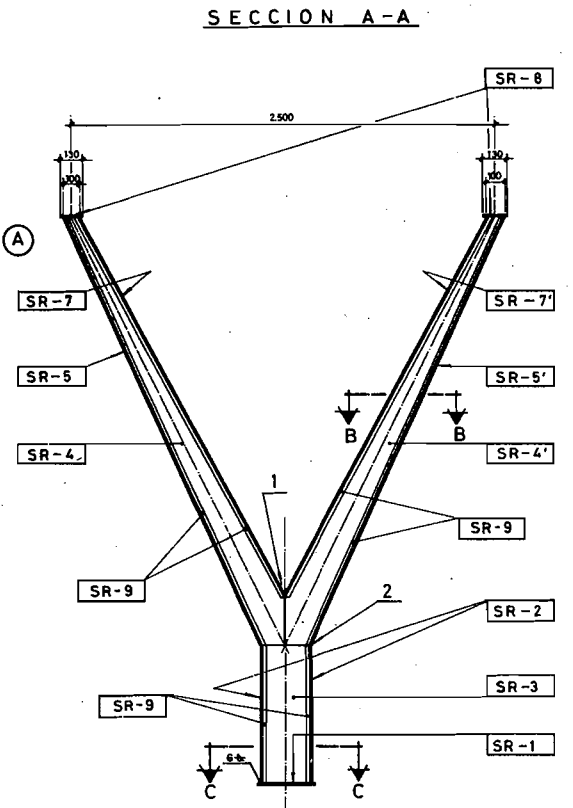
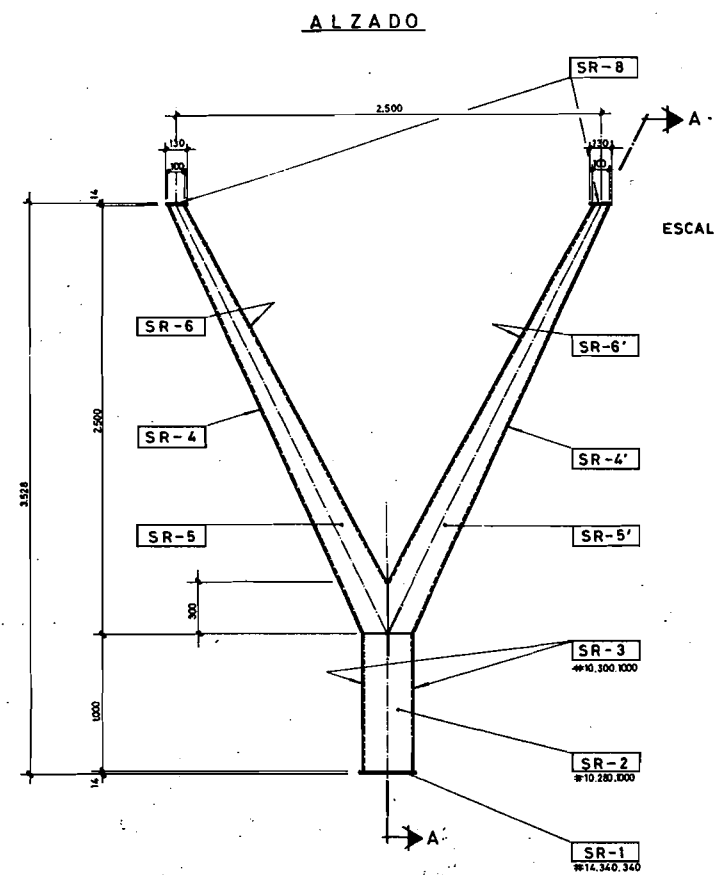
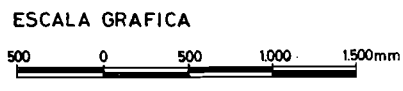


ELEMENTOS RESISTENTES DE LA RAMPA

PESO TOTAL		10 410,42 Kg		VER DESPIECE
MATERIAL	QUANTIDAD	PESO UNITARIO	PESO TOTAL	
BAR#08.120	1	1.80	1.80	
BAR#08.4258	10	10.69	106.90	
BAR#6.8120	1	1.80	1.80	
...
TOTAL			10 410,42	

NOTA.- TODOS LOS CORDONES DE SOLDADURA EN ANCHURA SERAN DE 4mm EXCEPTO LOS INDICADOS

2.6 SOPORTE DE RAMPA



CARACTERÍSTICAS MATERIALES			
APORTE ESTRUCTURAL			A-42B
ELECCIÓN	GRUPO		SEALDESA
	TIPO		A,B,R,RAR

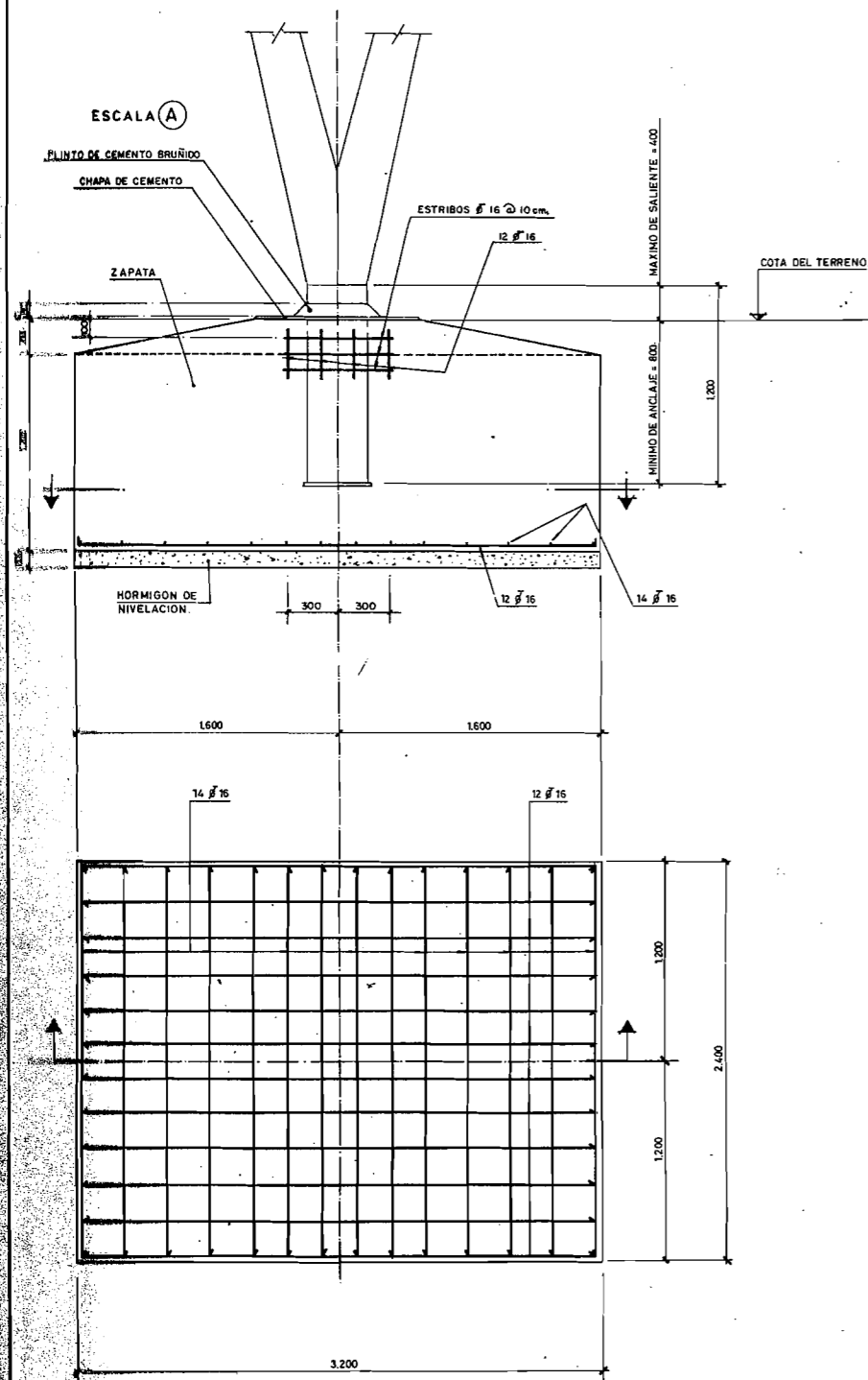
SE DEBE USAR UN DIAGONAL A LO LARGO DE TODO EL PILAR
 CON UN ESPESOR DE LA TUBERÍA INDICADA EN EL CUADRO DE
 DETALLE A LOS TOTALES DE PLANTA

PESO TOTAL		788,498 Kg		
SR-1	46,318 Kg	46,318 Kg		VER NOTA *
SR-2	1,897	7,428		
SR-3	12,704	89,404		
SR-4	32,707	89,404		
SR-5	36,880	73,770		
SR-6	38,444	73,770		
SR-7	38,444	78,444		
SR-8	38,444	78,444		
SR-9	42,888	89,478		
SR-10	42,888	89,478		
SR-11	7,360	47,100		
SR-12	7,360	47,100		
SR-13	12,704	12,704		
MADERA	TIPO MATERIAL	DESENG	PESO	PESO
			PREZA	TOTAL
				OBSERVACIONES

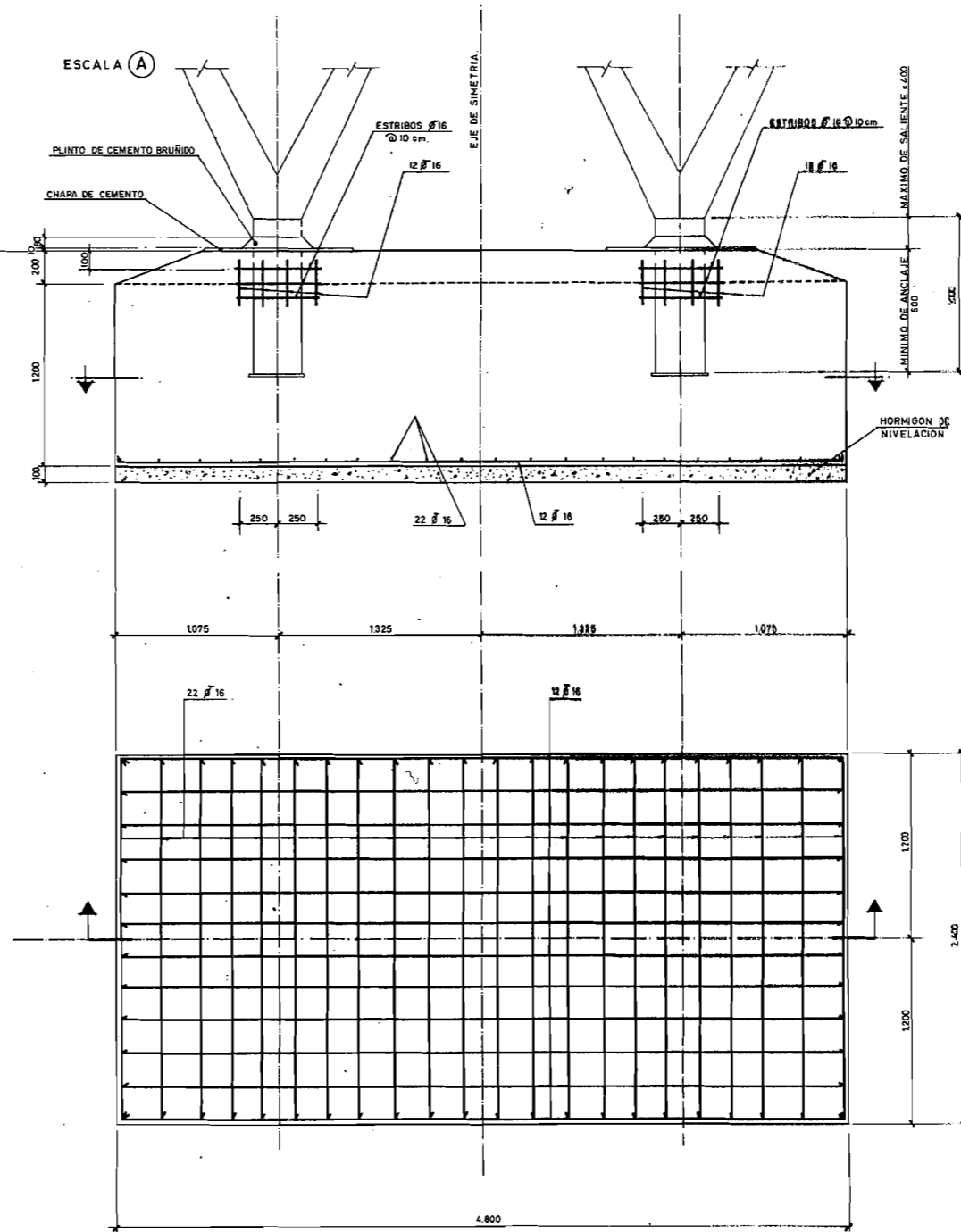
NOTA - TODOS LOS CORDONES DE UN MADERA EN ÁNGULO
 SERAN DE 4mm EXCEPTO LOS INDICADOS

2.7 CIMENTACIONES

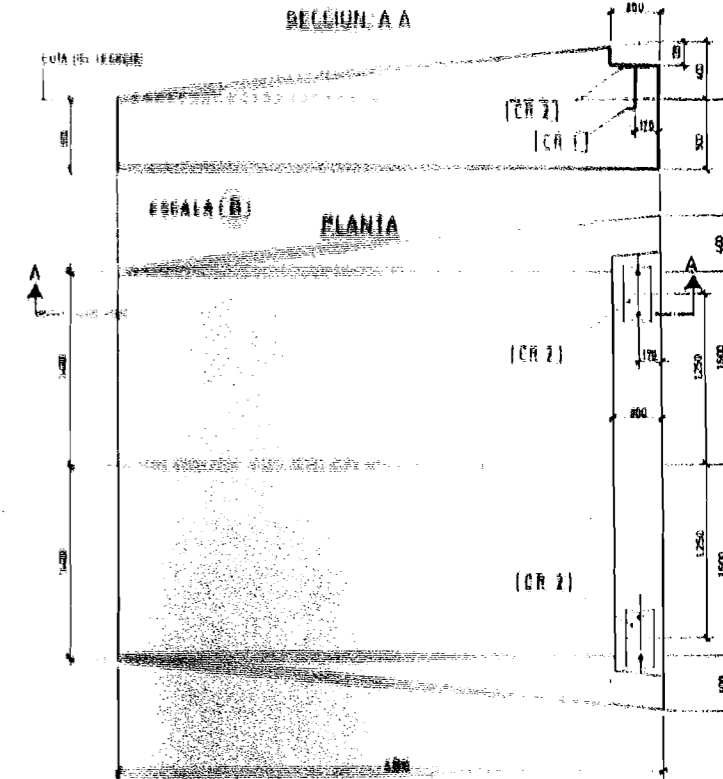
SOPORTES DE PASARELA



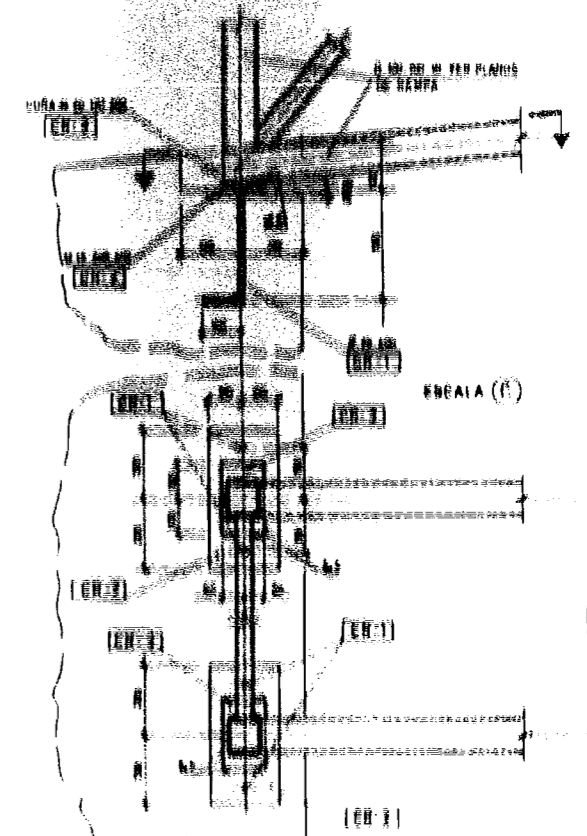
SOPORTES DE RAMPAS



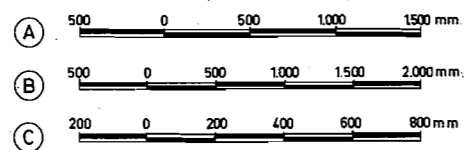
ZAPATA ARRANQUE DE RAMPA



DETALLE DE ARRANQUE DE RAMPA



ESCALAS GRAFICAS



NOTA.-

- SE RELLENARA INTERIORMENTE EL SOPORTE CON HORMIGON DE TIPO H-175, HASTA UNA ALTURA DE 0,30m, POR ENCIMA DEL NIVEL SUPERIOR DE LA ZAPATA.

CARACTERISTICAS DE MATERIALES	
ACERO ARMAOURAS	AE-42N 6 F
HORMIGON NIVELACION	H-100
ZAPATAS ARRANQUES	H-175

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR	REMARKS
1	ACERO ARMAOURAS	10,000	Kg	10,000	MECANIZADA
2	HORMIGON NIVELACION	10,000	M ³	10,000	
3	ZAPATAS ARRANQUES	10,000	M ³	10,000	
TOTAL				20,000	

3. Mediciones

3 - MEDICIONES

UNIDADES	PASARELAS				
	15m	20m	25m	30m	35m
KG DE ACERO ESTRUCTURAL	52516,074	54221,484	55927,054	58558,844	61881,324
KG DE ACERO EN ARMADURAS	640,840	640,840	640,840	640,840	640,840
M ² DE PAVIMENTO	405,780	394,580	383,180	371,080	358,980
M ² DE PINTURA	1143,360	1088,050	1038,820	1005,060	971,300
M ³ DE EXCAVACION	85,920	85,920	85,920	85,920	85,920
M ³ DE HORMIGON DE BASE DE ZAPATAS	3,840	3,840	3,840	3,840	3,840
M ³ DE HORMIGON EN ZAPATAS Y ARRANQUES DE RAMPA	67,320	67,320	67,320	67,320	67,320

ANEXO 2: Cuaderno de campo

Ensayos realizados en la pasarela peatonal sobre la ronda interior Va20 de Valladolid (28/02/2019)

Set-up

Se tienen dos configuraciones diferentes. La configuración 1 (en rojo) monitoriza la mitad más alejada del ordenador; la configuración 2 (en azul) monitoriza la mitad más próxima al ordenador. Los acelerómetros del centro de la pasarela (en morado) son comunes a las dos configuraciones. El ensayo 1 tiene un acelerómetro menos.

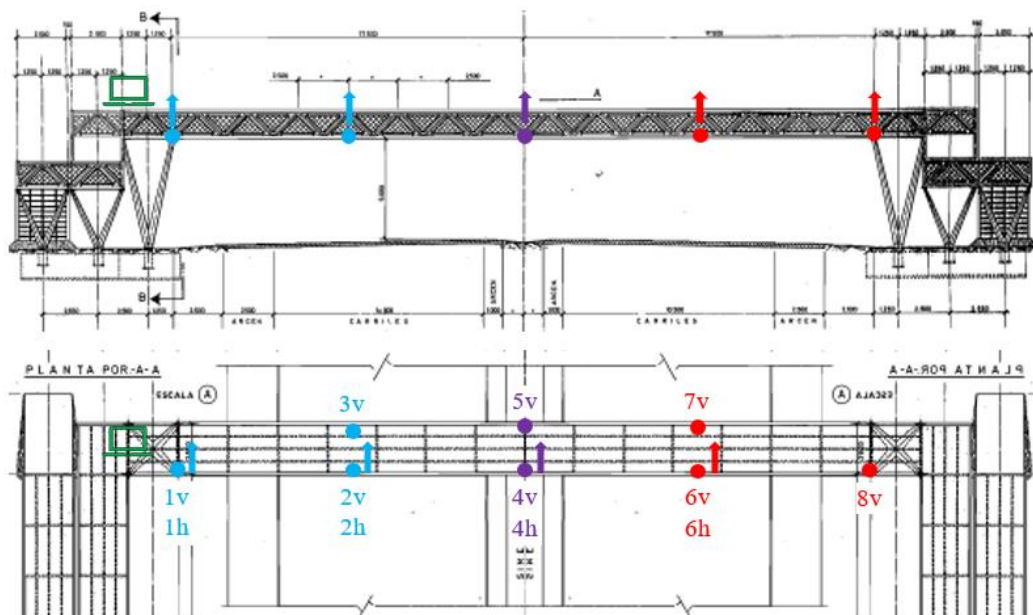


Ilustración 187- Vista en alzado y planta de la pasarela con la disposición de los acelerómetros con su dirección de medición

Sensores y canales

Tabla 11- Acelerómetros con sus canales correspondientes

Punto	Canal SIRIUS	Acelerómetro	Modelo	Ensayo
1	AI 9	1h	15010	2
1	AI 1	1v	16049	2
2	AI 3	2h	16048	2
2	AI 4	2v	15006	2
3	AI 2	3v	16047	2
4	AI 8	4v	15009	1 y 2

4	AI 7	4h	15008	1 y 2
5	AI 6	5v	16045	1 y 2
6	AI 4	6v	15006	1
6	AI 3	6h	16048	1
7	AI 2	7v	16047	1
8	AI 1	8v	16049	1

TFP – Conectada al canal AI 11 y ubicada en todo momento en el punto 2, excitación vertical.

Ensayos realizados

Todos los ficheros comienzan por PasarelaRondaXXXX.dxd, donde XXXX es el identificador del ensayo, ver a continuación.

Tabla 12- Ficheros de cada ensayo

Identificador	Descripción
OMA	Registro para OMA, a 2048 S/s, en la configuración 1.
OMA2	Registro para OMA, a 2048 S/s, en la configuración 2.
EMASim1	EMA con la TFP, a 500 S/s, en la configuración 1. Tres medias
EMASim12	EMA con la TFP, a 500 S/s, en la configuración 1. Seis medias
EMASim13	Abortado por transeúnte. Hay un decay curioso.
EMA2	EMA con la TFP, a 500 S/s, en la configuración 2. Ocho medias
EMA22	EMA con la TFP, a 500 S/s, en la configuración 1. Siete medias
Transi1	Antolín camina por el centro sin metrónomo, luego corre.
Transi2	Carlo camina por el centro sin metrónomo, luego corre.
Transi3	Pablo camina por el centro sin metrónomo, luego corre.
Transi4	Moisés camina por el centro sin metrónomo, luego corre.
Transi5	Todo el grupo (5 personas) camina por el centro agrupado sin metrónomo.
Transi6	Antolín camina por el centro a 2.25 Hz.

Transi7	Antolín camina por el lateral (1-2-4-6-8) a 2.25 Hz. Luego camina “pato” por el medio a 2.25 Hz.
Transi8	Pablo camina normal por el lateral a 2.25 Hz.
Transi9	Carlo camina normal por el lateral a 2.25 Hz.
Transi10	Moisés camina normal por el lateral a 2.25 Hz.
Transi11	Antolín corre despacio a 2.25 Hz por el medio. Luego repite, pero por el lateral.
Transi12	Antolín corre rápido a 4.5 Hz por el medio.
Transi13	Moisés corre rápido a 4.5 Hz por el medio.
Transi14	Carlo corre rápido a 4.5 Hz por el medio.
Transi15	Pablo corre rápido a 4.5 Hz por el medio.

Nota 1: todos los canales están filtrados a 100 Hz, Butterworth de 4° orden.

Nota 2: todos los tránsitos están registrados a 29948 S/s. Todos incluyen ida y vuelta y están realizados en la configuración 2.

ANEXO 3: Método alternativo

Hay muchas técnicas para obtener la señal de comportamiento en el espectro de la frecuencia para conocer los diversos modos armónicos a estudiar.

En el caso que refiere a este Trabajo de Fin de Grado se usará una aplicación android para en el móvil para hacer una estimación de lo obtenido durante la campaña experimental. La precisión del móvil será considerablemente menor, pero para dar una rápida aproximación será válido. Hay que tener presente que a lo largo del eje Z el valor de la aceleración tendrá adherido la implicación de la gravedad.

La aplicación instalada en el móvil es *Accelerometer Meter* y todos los datos obtenidos serán procesados a través del programa *Sigview*. Más adelante se explicará cómo proceder con él.

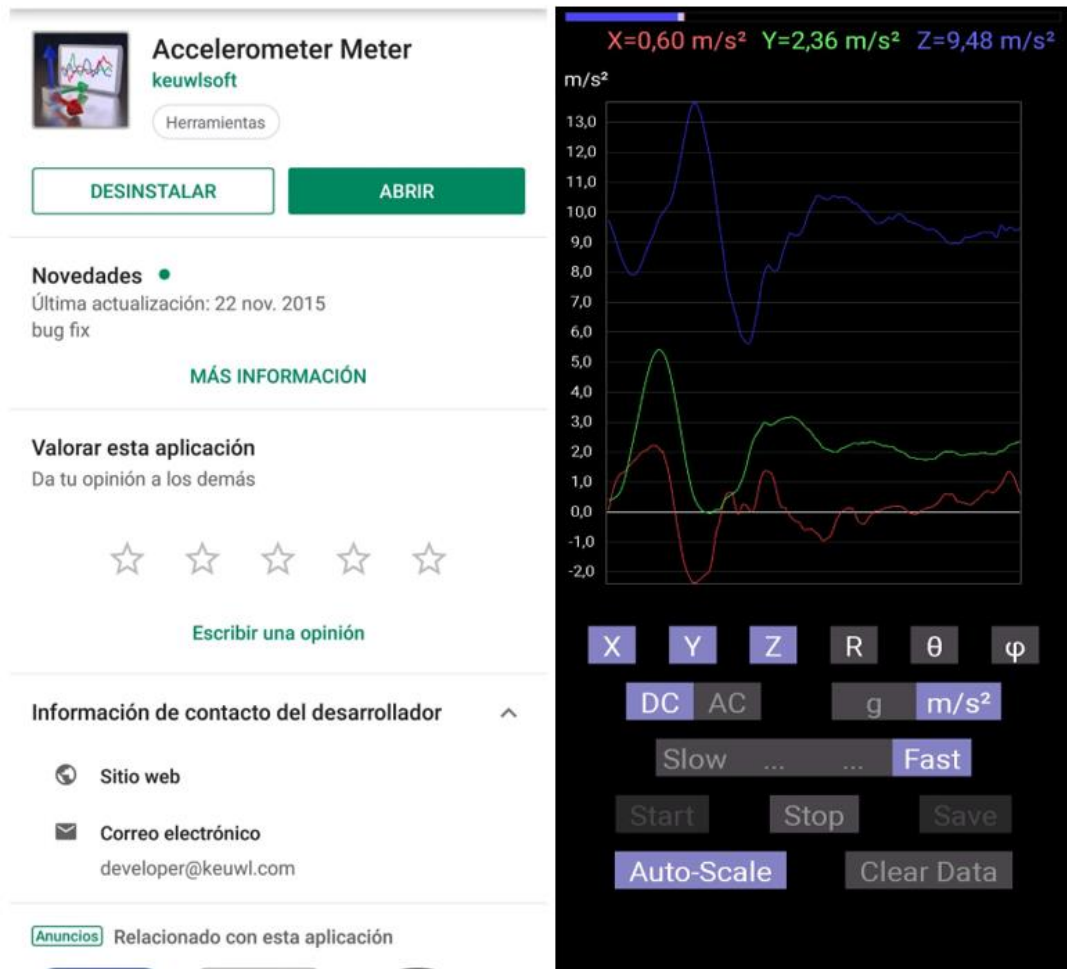


Ilustración 188- Aplicación android

Se ejecutan dos tipos de ensayos, el primero es dejando el dispositivo móvil en el centro de la pasarela durante un minuto aproximadamente sin excitación debida al tránsito de viandantes. Mientras, el segundo ensayo realizado es haciendo un tránsito de ida y vuelta a lo largo del vano y finalizando en el centro de la pasarela de nuevo. También con una duración de un minuto aproximadamente.

Únicamente se van a tener en cuenta los registros en las direcciones X, Y y Z; aunque se pueden seleccionar mediciones radiales y angulares, pero no son de interés.

Todos los registros temporales se graban en un documento .txt donde por columnas se identifican de forma ordenada cada valor de aceleración. Como generalmente el primer registro que comienza a grabar la aplicación no comienza en cero se tiene que transportar a un programa tipo Excel con el que hacer que la inicialización de las medidas sea en 0 segundos.

Pasarela2Andando_data_250hz: Bloc de notas

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
x	y	z	t	
0,198898		0,143204	9,720566	0
0,196503		0,138412	9,718185	0,0039063
0,194107		0,143204	9,720566	0,0078125
0,182129		0,140808	9,720566	0,0117188
0,18692	0,138412		9,718185	0,0161133
0,196503		0,124039	9,71579	0,0200196
0,196503		0,136017	9,713394	0,0239258
0,196503		0,131226	9,71579	0,0278321
0,189316		0,133621	9,710999	0,0319825
0,189316		0,133621	9,708603	0,0358887
0,194107		0,140808	9,713394	0,039795
0,194107		0,136017	9,713394	0,0437012
0,18692	0,133621		9,706207	0,0480957
0,194107		0,133621	9,708603	0,052002
0,198898		0,136017	9,69902	0,0559082
0,194107		0,140808	9,69902	0,0598145
0,189316		0,138412	9,69902	0,0639649
0,18692	0,138412		9,706207	0,0678711
0,18692	0,136017		9,713394	0,0717774
0,182129		0,133621	9,703812	0,0756836
0,194107		0,136017	9,703812	0,0800782
0,18692	0,136017		9,69902	0,0839844
0,184525		0,140808	9,696625	0,0878907
0,18692	0,133621		9,696625	0,0917969
0,189316		0,133621	9,694229	0,0959473
0,191711		0,136017	9,696625	0,0998536
0,189316		0,133621	9,701416	0,1037598
0,184525		0,131226	9,691849	0,1076661
0,189316		0,131226	9,684662	0,1120606
0,182129		0,136017	9,687057	0,1159668
0,191711		0,140808	9,687057	0,1198731
0,191711		0,138412	9,682266	0,1237793
0,191711		0,136017	9,682266	0,1279297
0,194107		0,12883	9,677475	0,131836
0,196503		0,145599	9,672684	0,1357422
0,191711		0,145599	9,687057	0,1396485
0,194107		0,145599	9,691849	0,144043
0,196503		0,14798	9,694229	0,1479493
0,189316		0,145599	9,684662	0,1518555

Ilustración 189- Datos en documento .txt

También se debe calcular a que valor de frecuencia se está haciendo la toma de datos, luego en el documento Excel se estima la variación temporal que hay entre medidas para que posteriormente se haga la inversa de esos valores y se

obtenga el valor de la frecuencia. Finalmente se hace el valor promedio. Esto es necesario ya que al abrir el Sigview pide dicho valor.

Se hace un cálculo de la frecuencia entre 26 valores obteniéndose una frecuencia promedio de aproximadamente 250 Hz.

	A	B	C	D	E	F		F	G	H	I	J
1	x	y	z	t	Variacion temporal	Frecuencia		Frecuencia				
2	0,198898	0,143204	9,720566	0	0							
3	0,196503	0,138412	9,718185	0,0039063	0							
4	0,194107	0,143204	9,720566	0,0078125	0,0039062	=1/E4		256,003277		=PROMEDIO(F4:F29)		
5	0,182129	0,140808	9,720566	0,0117188	0,0039063	255,996723		255,996723		PROMEDIO(número1; [número2]; ...)		
6	0,18692	0,138412	9,718185	0,0161133	0,0043945	227,557174		227,557174				
7	0,196503	0,124039	9,71579	0,0200196	0,0039063	255,996723		255,996723				
8	0,196503	0,136017	9,713394	0,0239258	0,0039062	256,003277		256,003277				
9	0,196503	0,131226	9,71579	0,0278321	0,0039063	255,996723		255,996723				
10	0,189316	0,133621	9,710999	0,0319825	0,0041504	240,940632		240,940632				
11	0,189316	0,133621	9,708603	0,0358887	0,0039062	256,003277		256,003277				
12	0,194107	0,140808	9,713394	0,039795	0,0039063	255,996723		255,996723				
13	0,194107	0,136017	9,713394	0,0437012	0,0039062	256,003277		256,003277				
14	0,18692	0,133621	9,706207	0,0480957	0,0043945	227,557174		227,557174				
15	0,194107	0,133621	9,708603	0,052002	0,0039063	255,996723		255,996723				
16	0,198898	0,136017	9,69902	0,0559082	0,0039062	256,003277		256,003277				
17	0,194107	0,140808	9,69902	0,0598145	0,0039063	255,996723		255,996723				
18	0,189316	0,138412	9,69902	0,0639649	0,0041504	240,940632		240,940632				
19	0,18692	0,138412	9,706207	0,0678711	0,0039062	256,003277		256,003277				
20	0,18692	0,136017	9,713394	0,0717774	0,0039063	255,996723		255,996723				
21	0,182129	0,133621	9,703812	0,0756836	0,0039062	256,003277		256,003277				
22	0,194107	0,136017	9,703812	0,0800782	0,0043946	227,551996		227,551996				
23	0,18692	0,136017	9,69902	0,0839844	0,0039062	256,003277		256,003277				
24	0,184525	0,140808	9,696625	0,0878907	0,0039063	255,996723		255,996723				
25	0,18692	0,133621	9,696625	0,0917969	0,0039062	256,003277		256,003277				
26	0,189316	0,133621	9,694229	0,0959473	0,0041504	240,940632		240,940632				
27	0,191711	0,136017	9,696625	0,0998536	0,0039063	255,996723		255,996723				
28	0,189316	0,133621	9,701416	0,1037598	0,0039062	256,003277		256,003277				
29	0,184525	0,131226	9,691849	0,1076661	0,0039063	255,996723		255,996723				
30	0,188216	0,131226	9,694687	0,1120606	0,0039063	255,996723		255,996723				

Ilustración 190- Obtención de la frecuencia media en Excel

Una vez que se tiene la frecuencia de recolección de datos se procede a ejecutar el Sigview. Aquí se abrirá el documento Excel que se ha estado modificando. Para ello se guardará en un documento .txt para hacer posible su lectura.

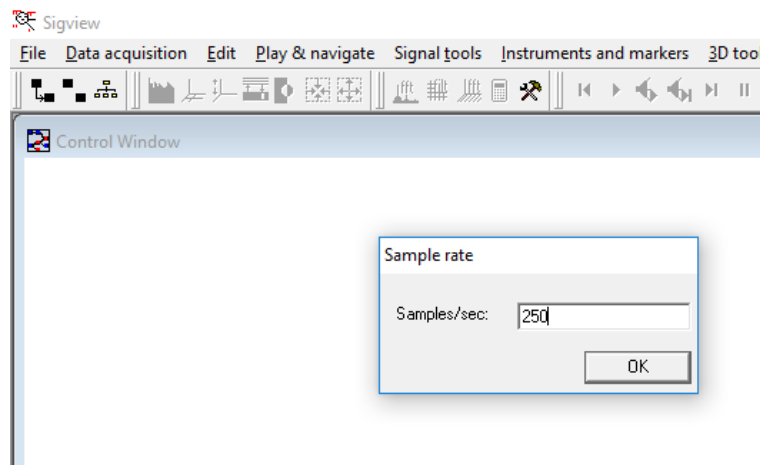


Ilustración 191- Valor entrada de frecuencia para que el programa reconozca

Aparecen un conjunto de ventanas entre las cuales se encuentra la tendencia temporal, que será lineal, junto a las señales de aceleración en los diferentes ejes coordenados. Luego para pasar al campo de la frecuencia es necesario

realizar la FFT (The *Fast Fourier Transform*). Se procesará, por ejemplo, el ensayo con tránsito.

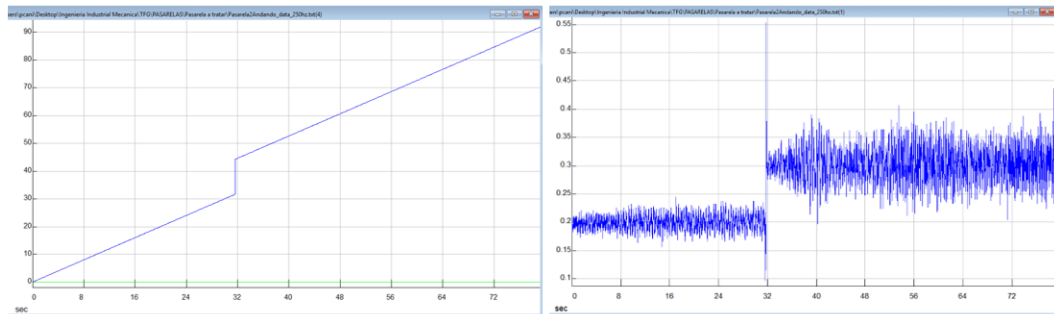


Ilustración 192- Evolución temporal y evolución en el eje X

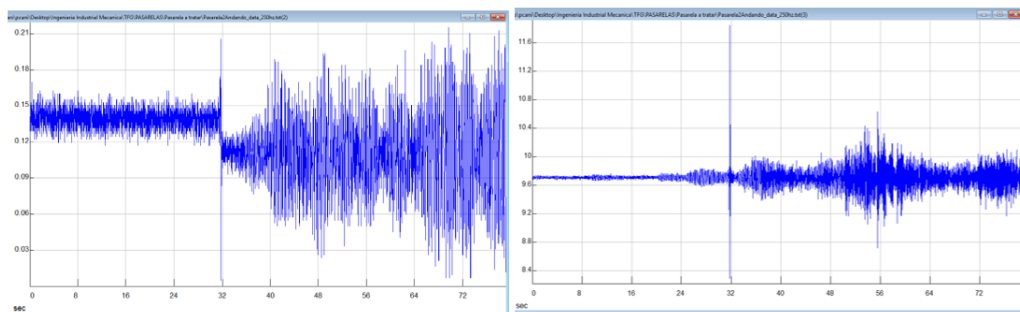


Ilustración 193- Evolución en eje Y y el Z

Se procesarán la referida al eje Z ya que el estudio es sobre los primeros modos de flexión sobre el mismo plano.

Antes de realizar la FFT se elimina toda la tendencia lineal adherida. Ahora ya está preparada para ser llevada al dominio de la frecuencia para poder así determinar a qué valores se producen los distintos modos.

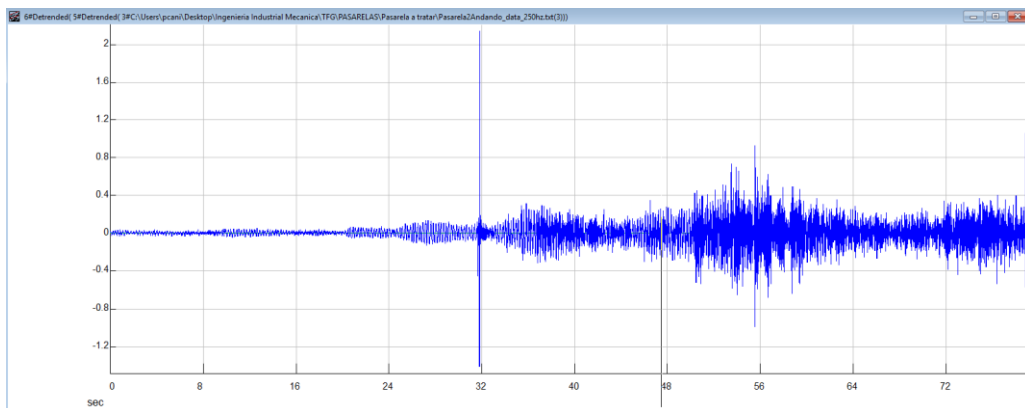


Ilustración 194- Señal en el eje Z sin la tendencia lineal

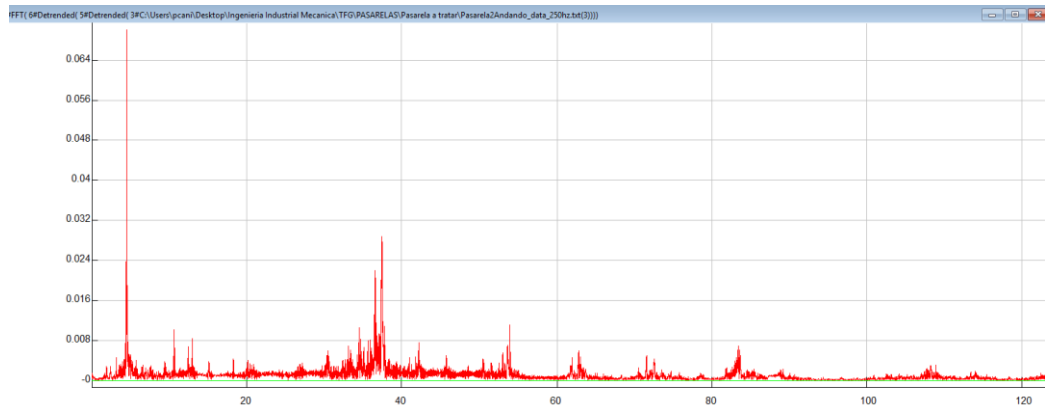


Ilustración 195- FFT ejecutada

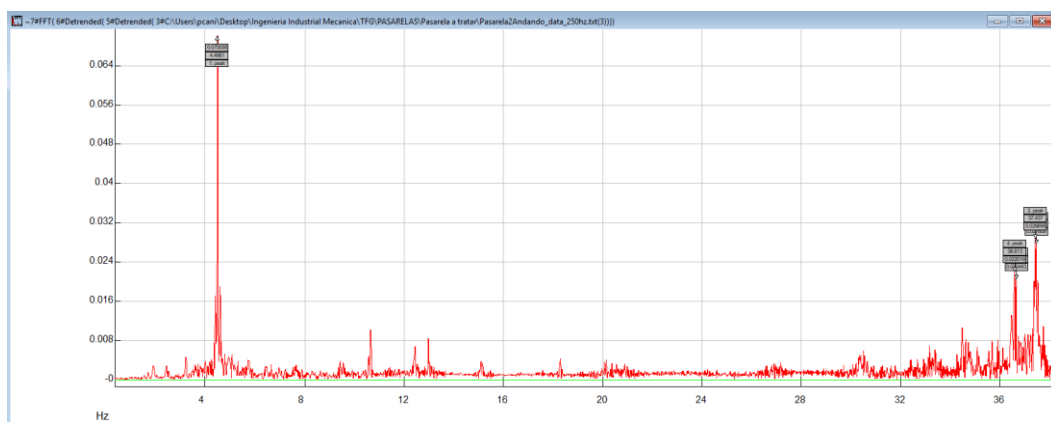


Ilustración 196- FFT con sus 5 picos más representativos

Los picos más relevantes se producen a 4,4861 Hz y 37,445 Hz, siendo estos los correspondientes al primer y segundo modo armónico.

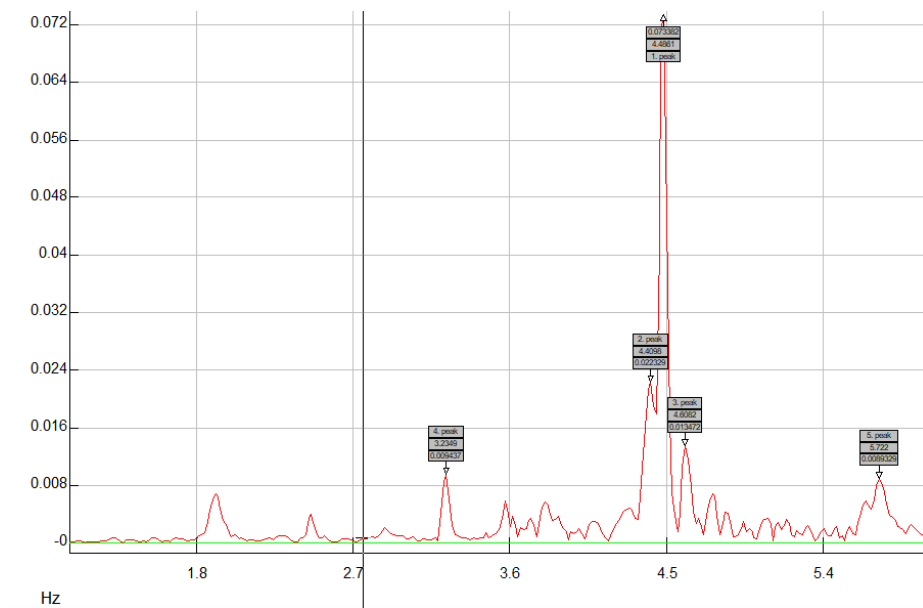


Ilustración 197- Dominancia del primer modo a 4,4861 Hz

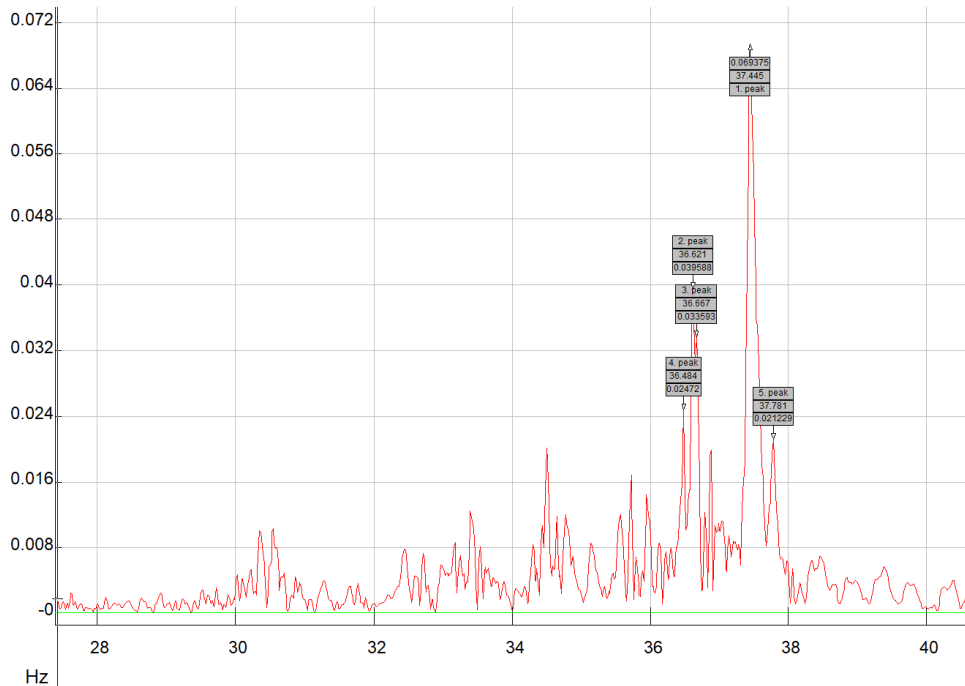


Ilustración 198- Dominancia del segundo modo a 37,445 Hz

Se puede concluir con que el primer modo armónico adopta un valor muy próximo al que se obtuvo experimentalmente con todo el equipo de medición en la campaña experimental. Éste fue de 4,470 Hz frente a los 4,4861 Hz obtenidos tras el procesamiento de la información obtenida con el *Accelerometer Meter*. En cambio, con el segundo modo no ocurre lo mismo ya que de los 12,455 Hz que se obtuvieron en la campaña experimental con esta aplicación móvil aparece a 37,445 Hz, un valor muy dispar.

ANEXO 4: Cómo modelar con SAP2000 la pasarela bajo estudio

SAP2000 es un programa para cálculo de estructuras fundamentado por los elementos finitos. Con él se puede modelizar y calcular estructuras de gran escala. Además, permite el dimensionado de los elementos de una manera efectiva que luego podrá ser o no viable. Su interfaz hace viable que sea capaz de resolver estructuras en tres dimensiones.

Es un programa con capacidad suficiente de simulación de cualquier tipo de carga ya sea sísmica, viento, nieve, impactos, entre muchas otras. Incluso poder hacer cualquier combinación entre ellas como sea conveniente con sus factores de amplificación o reducción.

Goza de una biblioteca integrada con la que se puede acceder a los perfiles regidos por diferentes normativas específicas de cada país o continente (europea, china, etc.). También atendiendo a este aspecto de la perfilería podemos tomar un tipo por defecto e introducir libremente cada una de las propiedades y dimensiones. Por último, otra opción es poder dibujar la sección.

No sólo se emplea para calcular estructuras tipo celosía, sino que se puede emplear para otros ámbitos ya sea para tuberías, puentes, presas, entre muchas otras. El comportamiento no lineal de algunos de los objetos que se modelen no es un inconveniente para SAP2000.

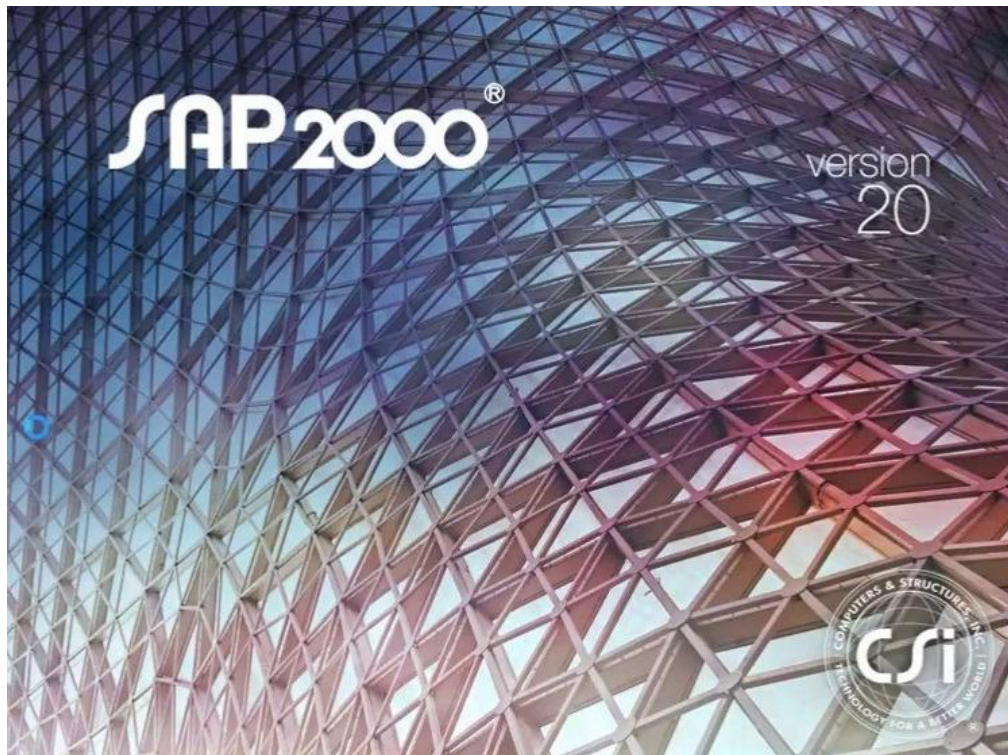


Ilustración 199-SAP2000 (pantalla de inicio del programa)

Ahora bien, antes de comenzar a modelar cualquier estructura primero hay que abrir un nuevo modelo, donde se abrirán un listado de opciones según se quiera modelar un tipo u otro, ya sea en dos dimensiones como en tres.

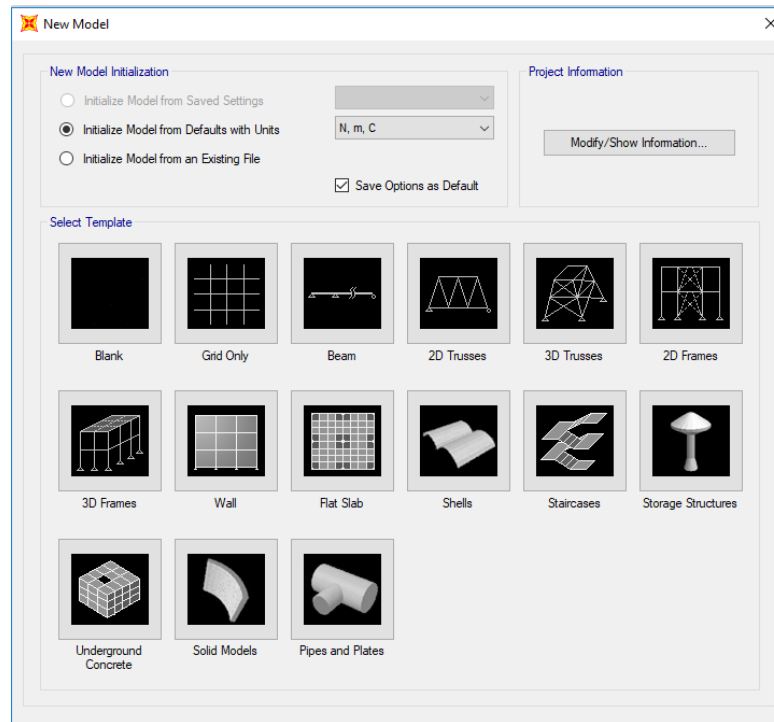


Ilustración 200-Opción de modelado para un nuevo modelo

Para el modelado de la pasarela aparecen dos vías. La primera vía (la que se va a ejecutar) es a partir del icono “Grid Only” plasmando unas líneas de malla y dibujando sobre ella la celosía en cuestión. La segunda es empleando la opción de “2D Trusses” en donde se podrá dibujar de una manera algo más rápida y funcional la celosía Warren.



Ilustración 201-Vía 1 y 2

Una vez se selecciona la opción de “Grid Only” se abre un menú donde se configurará la malla. Se va a trabajar sobre el plano X-Z siendo el Z en el que interviene la gravedad. Para el caso de la pasarela se tendrá un total de 2 líneas en el eje Z y 29 en el eje X. Sobre el eje Y sólo sería necesaria 1 única línea para definir dicho plano, pero se puede dejar lo que viene por defecto.

El siguiente bloque de parámetros a modificar en dicho menú es el del espaciamiento entre líneas que conforman la malla. Tanto en el eje Z como en el X se separarán 1,25 m.

Por último, el eje de coordenadas se define también en este menú, aunque posteriormente se puede acceder a ajustes y modificarse. El origen se encuentra en $O(x,y,z)=0(0,0,0)$.

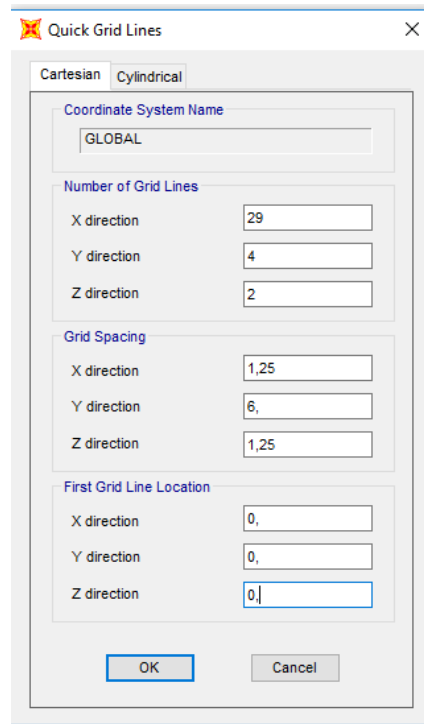


Ilustración 202-Configuración malla

Una vez se aceptada la configuración se desplegarán dos zonas, la de la izquierda es la de trabajo y la de la derecha es su visualización en 3D. Luego cerramos la de 3D ya que no interesa y estorba.

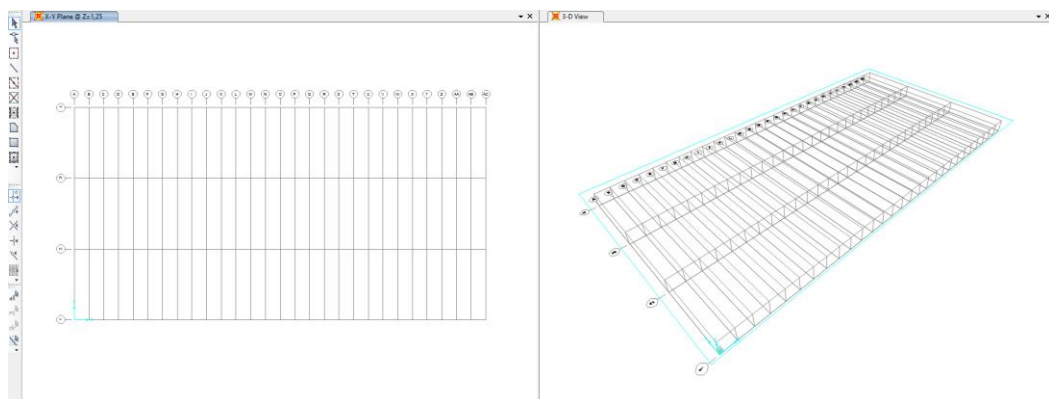


Ilustración 203-Zona trabajo y de visualización 3D

El plano que aparece por defecto no es el que interesa por lo que sobre dichas pantallas se cambia a x-z.

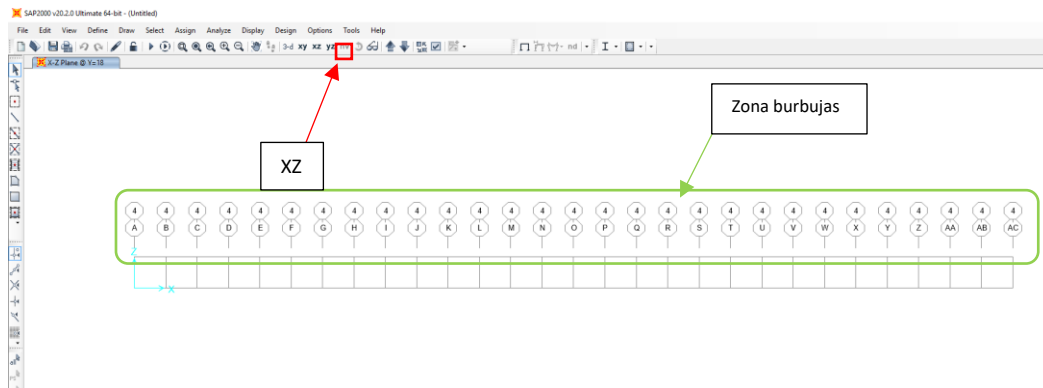


Ilustración 204-Plano de trabajo XZ

Para eliminar dichas burbujas y evitar que molesten durante se esté trabajando hay que clicar al botón derecho del ratón y en “Edit Grid Data” se reduce su tamaño considerablemente. No es que se eliminen, sino que se reduce su tamaño hasta que a simple vista no se aprecien.

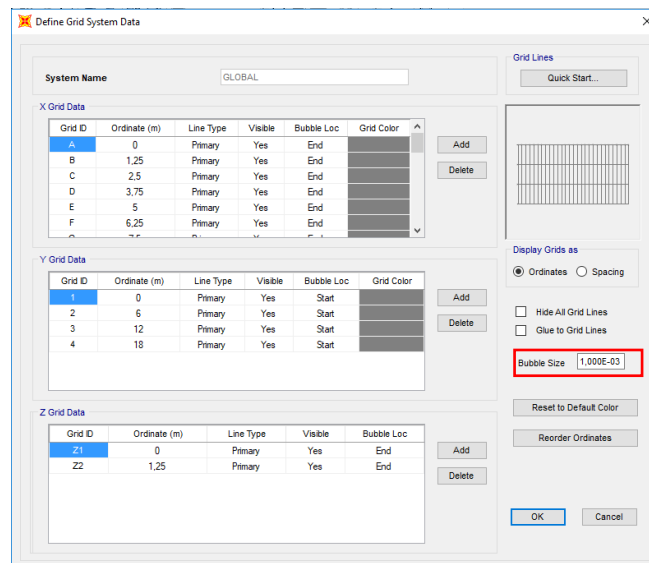


Ilustración 205-Modificación tamaño burbujas

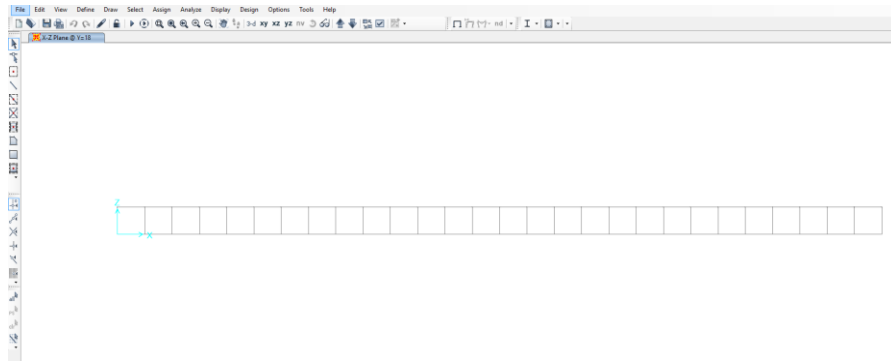


Ilustración 206-Pantalla de trabajo limpia

El siguiente paso es definir los materiales y las secciones que conformarán la estructura. Para ello hay que hacer alusión al comando “Define”.

Comenzando por el material cabe decir que se puede meter uno por defecto o introducirlo con sus propiedades.

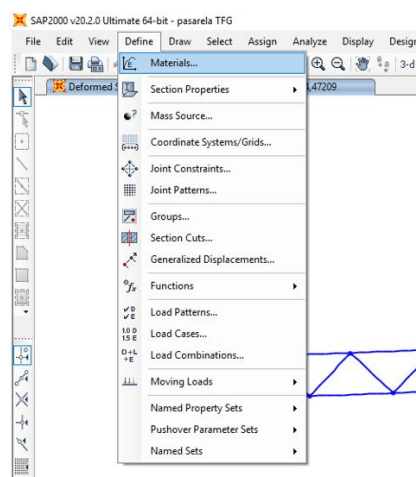


Ilustración 207-Introducción de materiales

Hay que seleccionar localización, tipo de material y sus características.

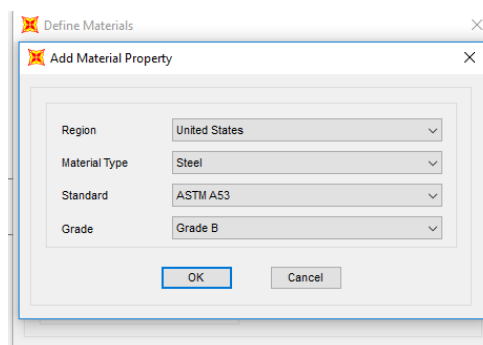


Ilustración 208-Características generales

Se puede renombrar dicho material para una sencilla visualización, así como sus propiedades.

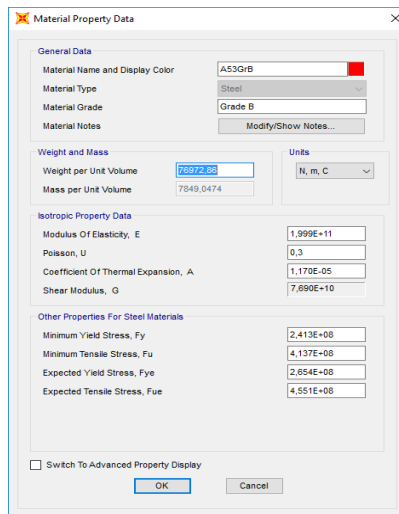


Ilustración 209-Propiedades modificables

Cuando se va a escoger el tipo de sección junto a sus dimensiones se puede hacer a partir de librerías, en este caso se usará la “Euro.pro”, donde se encuentran todas las normalizadas.

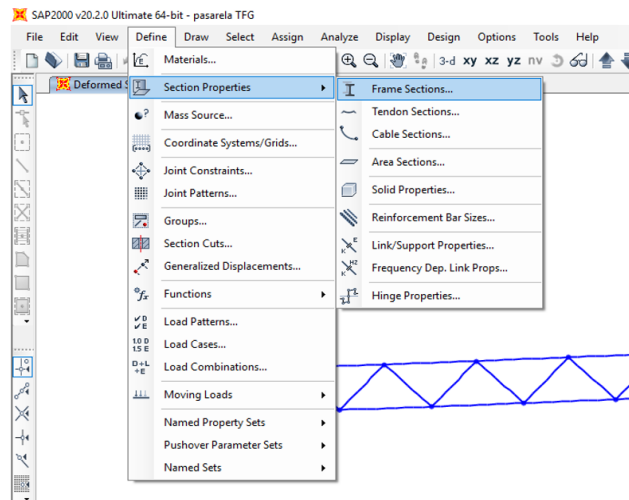


Ilustración 210-Agregar perfiles

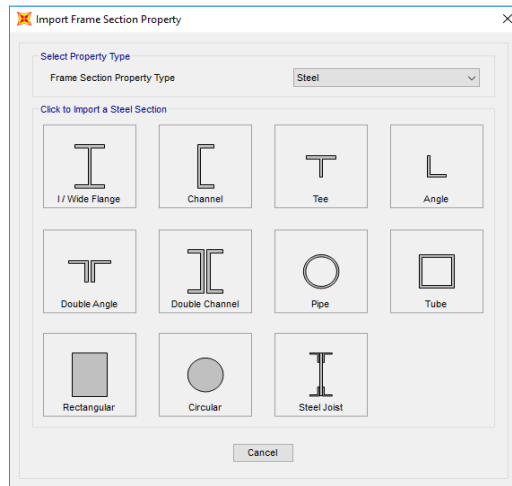


Ilustración 211-Tipologías secciones

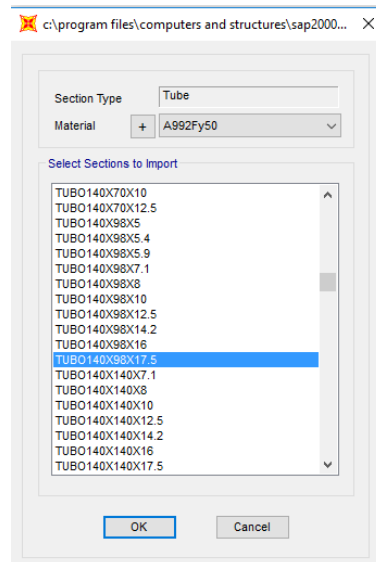


Ilustración 212-Perfiles librería "Euro.pro"

En el caso de usar un perfil que no se encuentra en la librería o ser un perfil no normalizado se tiene que definir manualmente como es el caso de la sección □140.80.5. Se procede de la misma forma, pero en vez de importarla se adiciona.

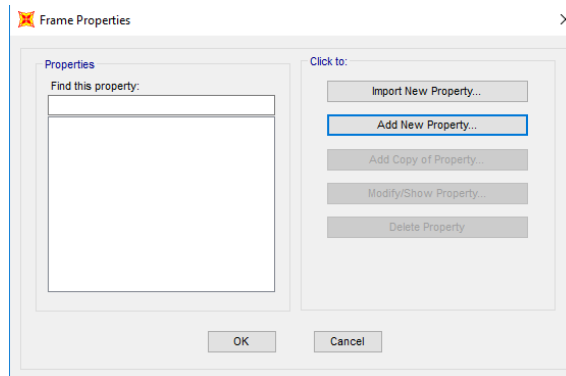


Ilustración 213-Añadir sección manualmente

Aparece menú como el anterior para seleccionar el tipo de perfil que interesa. Al seleccionar el tipo tubular, como es el caso, se despliegan todas las propiedades modificables.

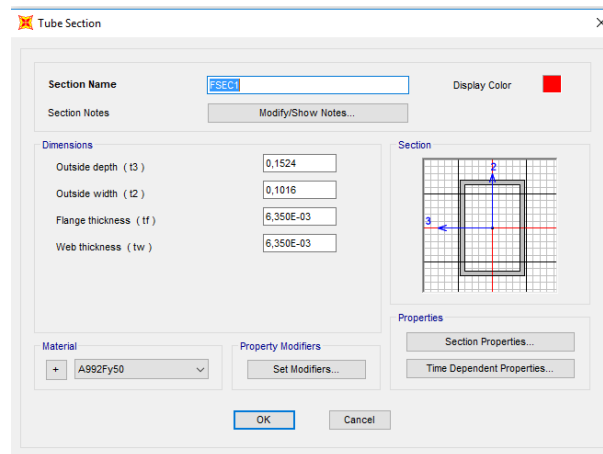


Ilustración 214-Propiedades modificables perfil

Una vez que se ha agregado tanto material como los perfiles a usar se comienza a dibujar sobre la malla. Para ello se emplean los comandos de dibujo situados en zona lateral izquierda.



Ilustración 215-Comandos de dibujo

Una vez que se dibuja hay que establecer las condiciones de contorno que precisen. Para ello en *Asign* → *Joint* → *Restraints* se aplican los de mayor interés.

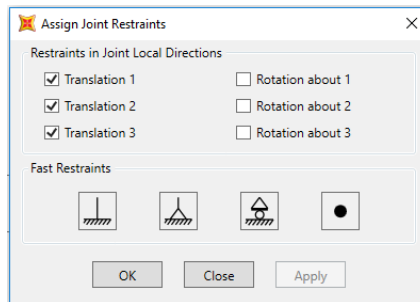


Ilustración 216-Condición de contorno a nivel de nudo

Se obtiene lo siguiente ya dibujado,

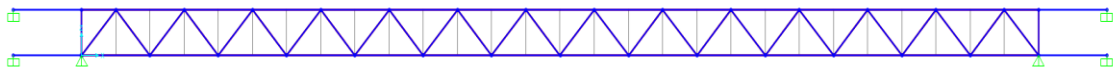


Ilustración 217-Pasarela dibujada

Antes de comenzar con el apartado de asignación de cargas queda saber cómo definir áreas. Para ello en los mismos comandos de dibujo se selecciona “Draw Poly Area” a partir de la selección de 2 puntos.

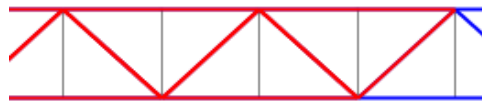


Ilustración 218-Definición elemento área

Para finalizar solo queda el apartado de asignación de cargas/masas al modelo. Se definirán masas tanto de tipo lineal como puntual y cargas puntuales.

Volviendo al menú “Assign”,

-Joint->Masses: Se asignan las masas de tipo puntual que podrán ser de traslación o de rotación.

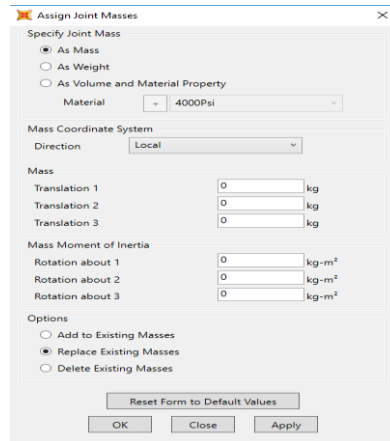


Ilustración 219-Asignación masa puntual

-Frame->Line mass: Una masa repartida por toda la barra.

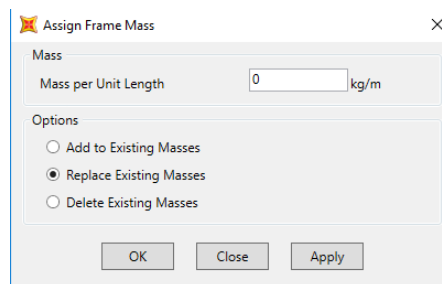


Ilustración 220-Asignación masa lineal

-Frame Loads->Gravity

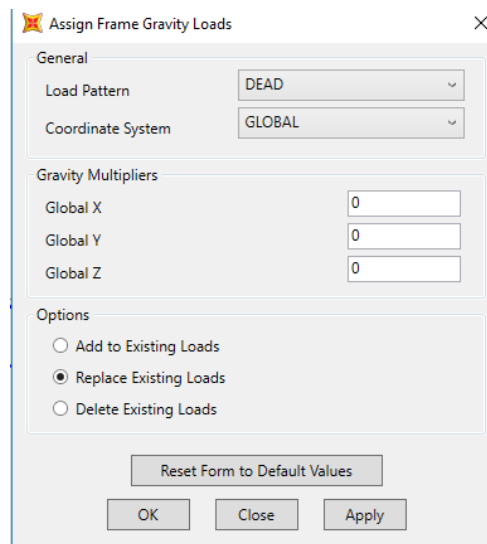


Ilustración 221-Cargas puntuales en barra

También se puede añadir cargas superficiales como puede ser el caso para definir la sobre carga de uso asumida. Para ello sobre un elemento área

seleccionado se hace la ruta “Assign -> Area Loads ->Uniform (Shell)”. Ya aquí se elige a qué patrón se le asigna la carga.

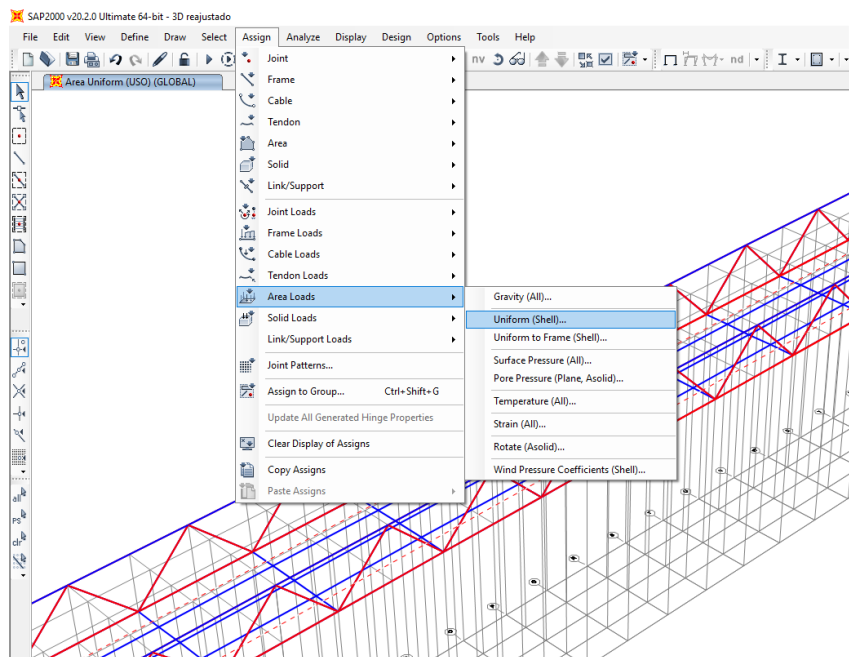


Ilustración 222-Ruta de asignación de carga superficial

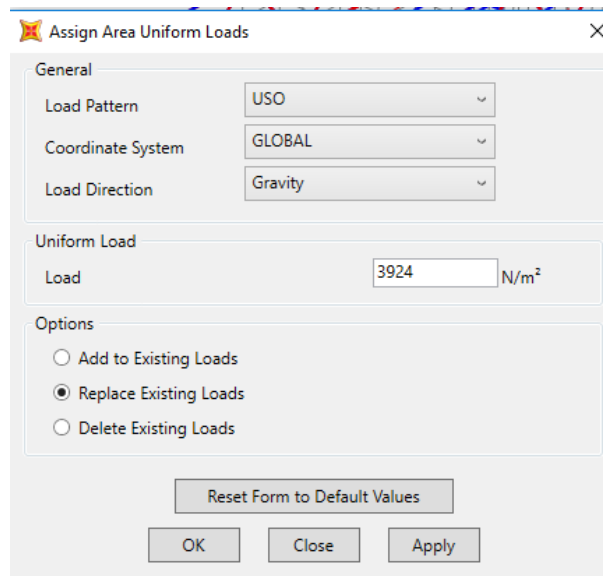


Ilustración 223-Menú para asignación del valor de la carga

Posteriormente se procede al paso de la generación de casos de carga. Aquí se procede a hacer las combinaciones pertinentes de todas las cargas que se tiene. Se puede aplicar los ponderadores que se quieran y además se podrá ejecutar distintos tipos de estudios como son los ensayos estáticos, pandeo, ensayos dinámicos, entre otros. La ruta que se sigue es “Define -> Load Cases”.

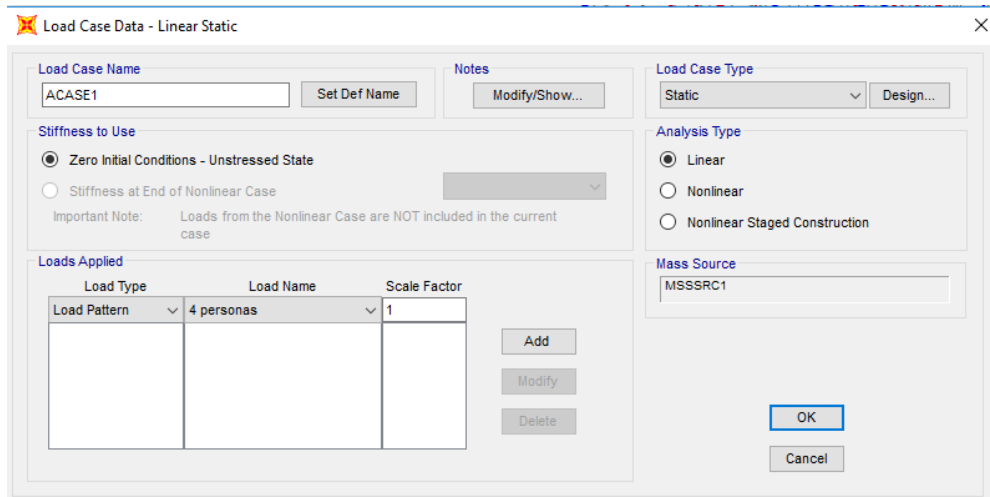


Ilustración 224-Menú de configuración de los casos de carga

La casilla de “Scale Factor” se corresponde con los ponderadores a los que se hizo referencia antes.

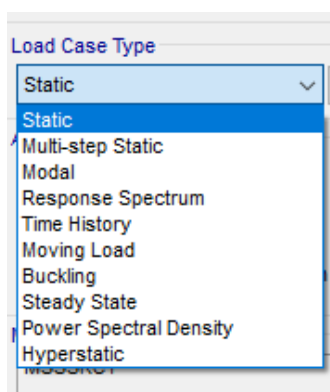


Ilustración 225-Tipos de estudios a realizar

Finalmente, se ejecuta el modelo y se observan los aspectos de flecha, esfuerzos, reacciones, modos de flexión, etc.

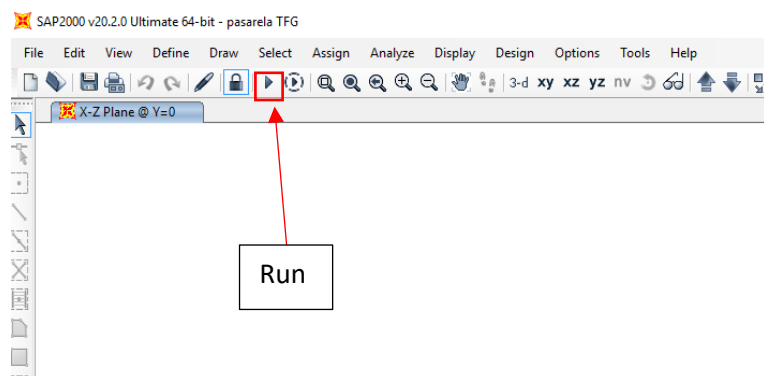


Ilustración 226-Correr modelo

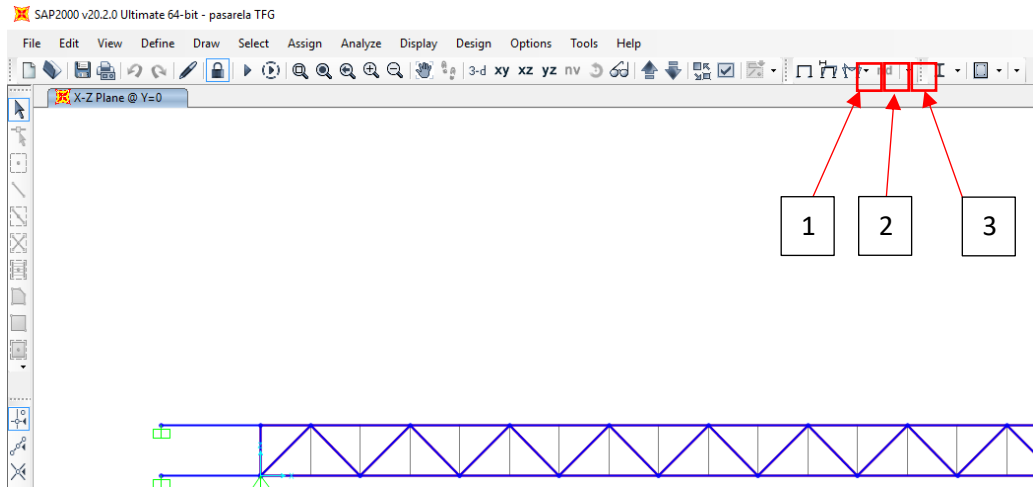


Ilustración 227- 1) Forma indeformada; 2) Deformada; 3) Esfuerzos/Reacciones

Las soluciones obtenidas pueden variar en función de cómo de discretizadas estén cada una de las vigas, luego se podrá variar como se quiera los tramos en los que se quiera estudiar para obtener un resultado lo más próximo a la realidad. Dentro del menú *Assign* en el apartado de *Frame* se selecciona al final del desplegado de opciones aquella que se llama *Automatic Frame Mesh*.

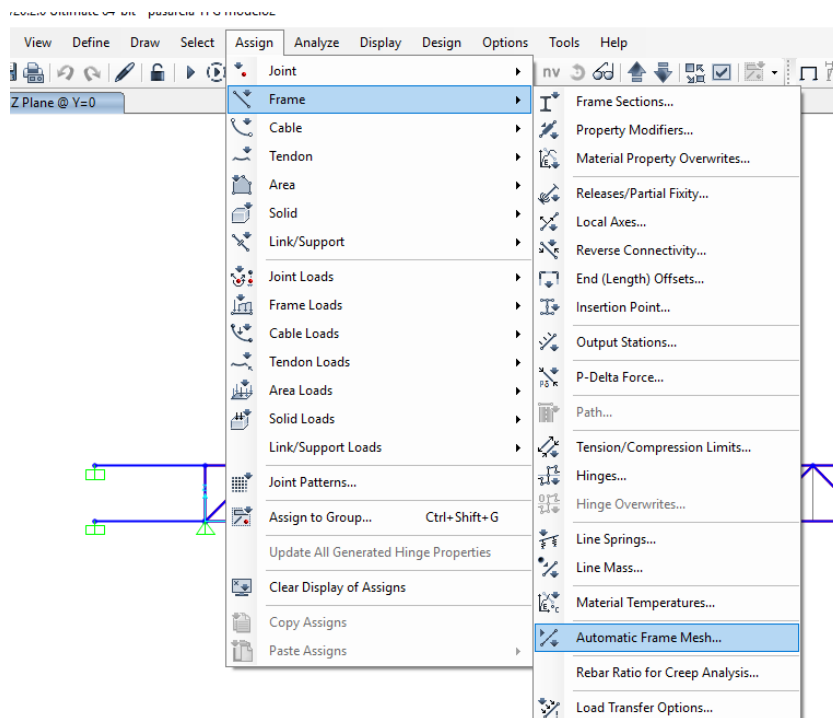


Ilustración 228-Opción para modificar el mallado

Luego en la ventana que aparece se marca la opción de introducción de número mínimo de segmentos.

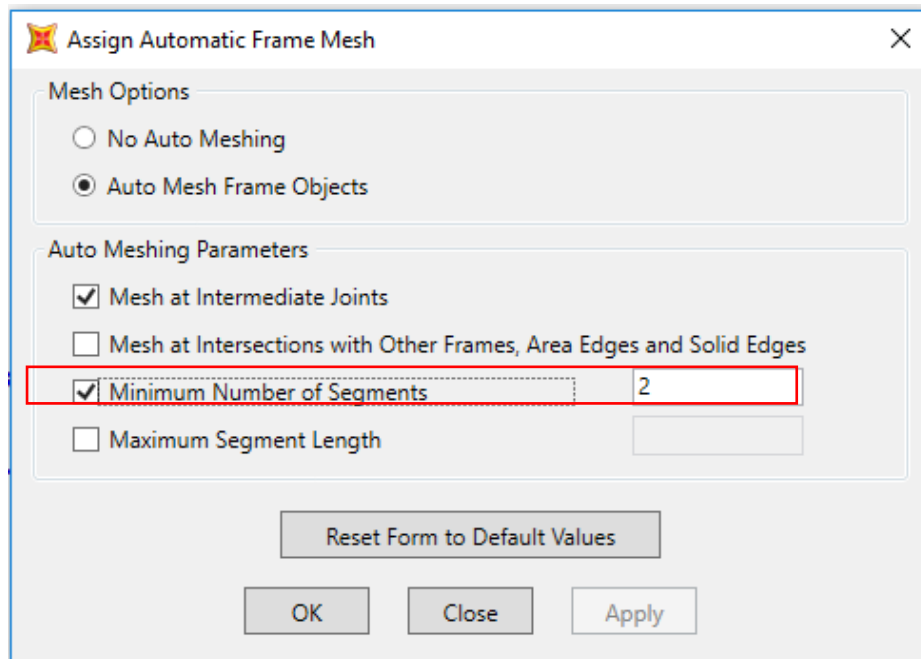


Ilustración 229-Introducción de elementos de mallado

Por último, para poder obtener la visualización de los esfuerzos hay que ejecutar primero el programa dando al icono de *Run*. Una vez cargado se accede a la opción 3 donde se despliega un menú con distintas opciones.

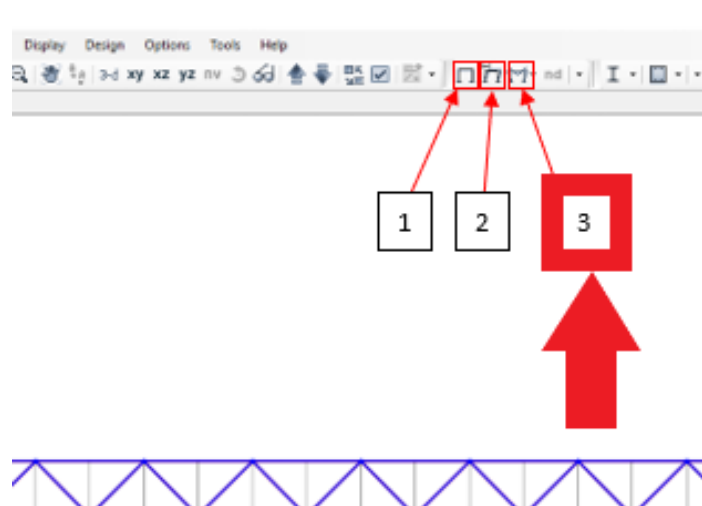


Ilustración 230-Opción para visualizar diagramas de esfuerzos

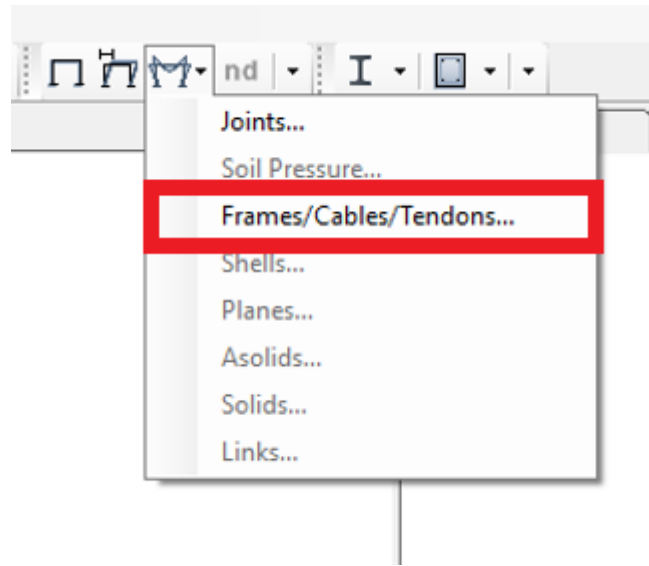


Ilustración 231-Menú desplegado y opción a marcar para los diagramas

Tras pulsar la opción *Frames/Cables/Tendons...* aparece una ventana para seleccionar el caso que nos interesa visualizar en diagramas, tipo de diagramas que se quiera visualizar, si axiles, cortantes en la dirección de interés y flectores en ambas direcciones.

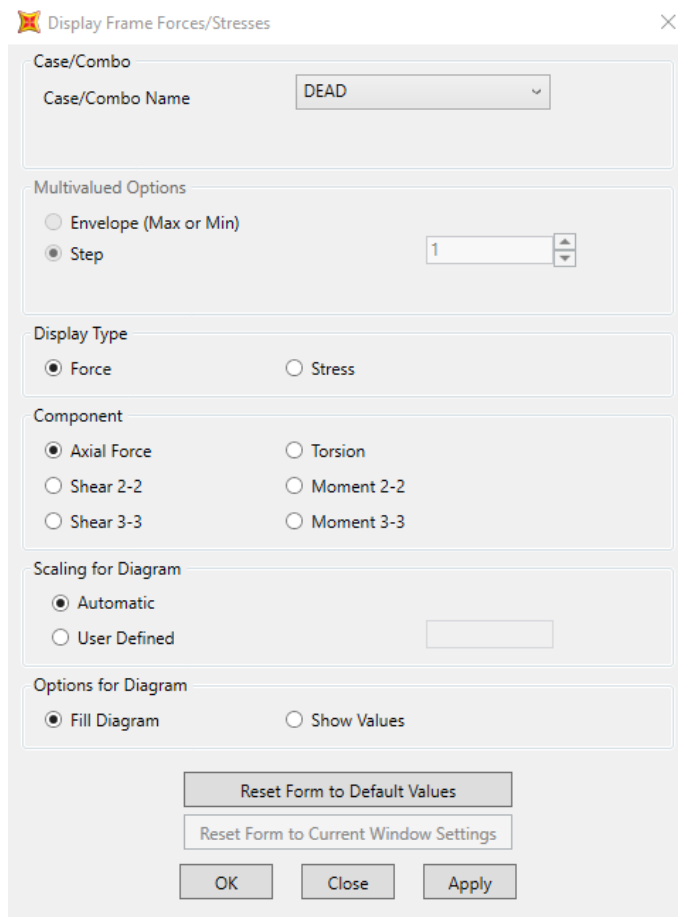


Ilustración 232-Ventana de opciones de visualización

Finalmente, para poder ver la información relevante de cada barra hay que clicar con el botón derecho sobre la barra que interese. Luego dentro de ella se pueden observar cada uno de los distintos diagramas donde tenemos las opciones de valores máximos o ir recorriendo la barra con el cursor, también los diagramas de tensiones según criterio de Von Mises, entre más opciones.

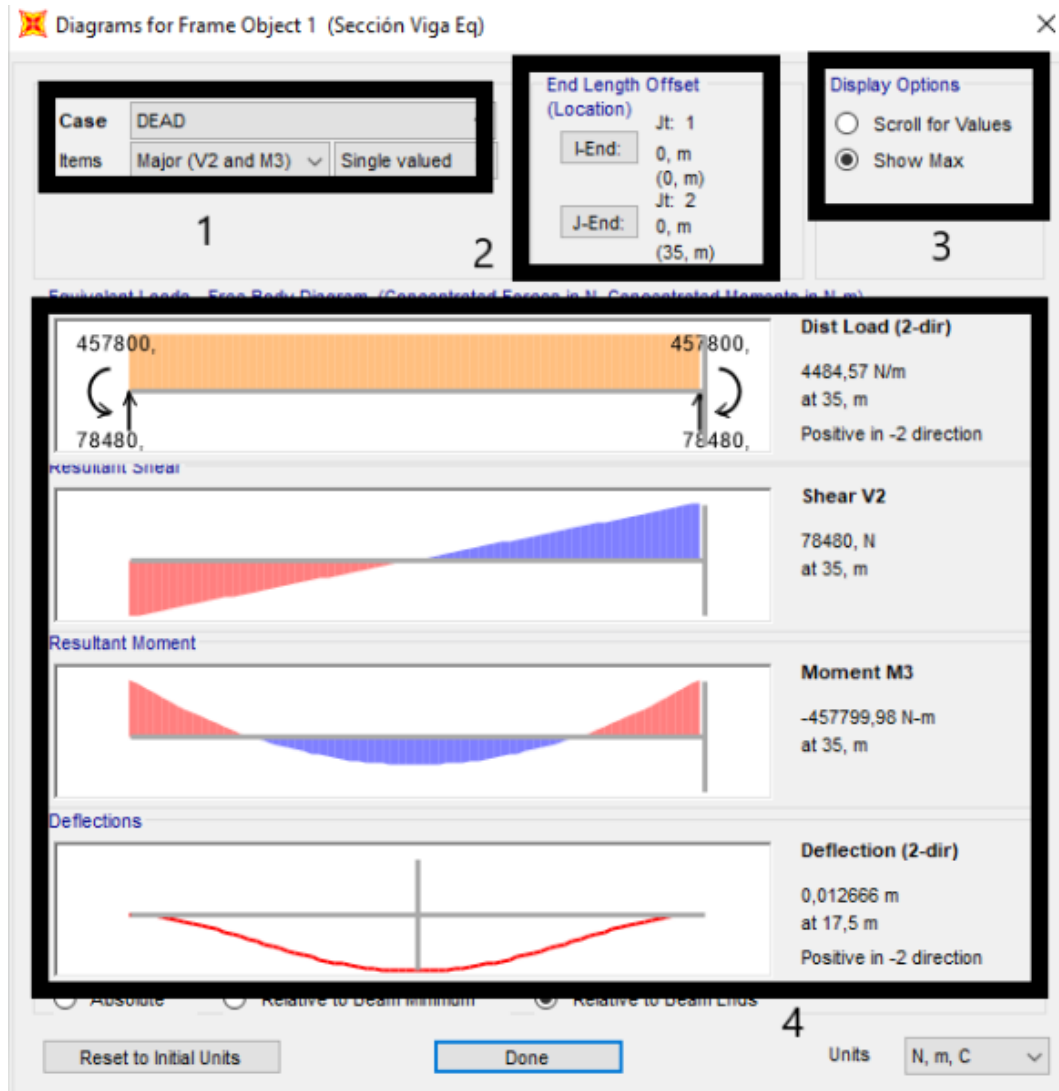


Ilustración 233-Visualización diagramas

Se tienen las siguientes secciones en la ventana de visualización,

- Zona 1: Lugar donde seleccionar tipo de caso que interesa y el diagrama que se requiera.
- Zona 2: Indica el comienzo y fin de la barra teniendo en cuenta el *offset* que se incorpore (la parte de la barra que intervenga aparte de nudo).
- Zona 3: Sección para escoger si visualizar los valores máximos del diagrama o si ir cursando con el ratón a pulso.
- Zona 4: Representación de los diagramas marcando en azul las zonas positivas y en rojo las negativas.

ANEXO 5: Otros programas de modelado. SolidWorks

Se puede hacer uso de otros programas de diseño asistido por ordenador que además de emplearse para el diseño de piezas industriales posee módulos específicos para el ámbito de las estructuras a partir del cálculo por elementos finitos (MEF). Esto consiste en primero dibujar la estructura en cuestión con las líneas medias y posteriormente asignar el perfil que se requiera en cada una de las barras. Para acabar de realizar la adhesión entre cada una de las barras se procederá a la unión a través de cordones de soldadura. Al ser una estructura metálica y al no especificar la anchura del cordón ejecutado se actuará empleado la normativa EAE.

1. Geometría y montaje

Lo primero de todo consiste en dibujar en un croquis 3D la forma de la estructura que se va a analizar. En este caso se dibujará el vano libre de 35 metros de luz.

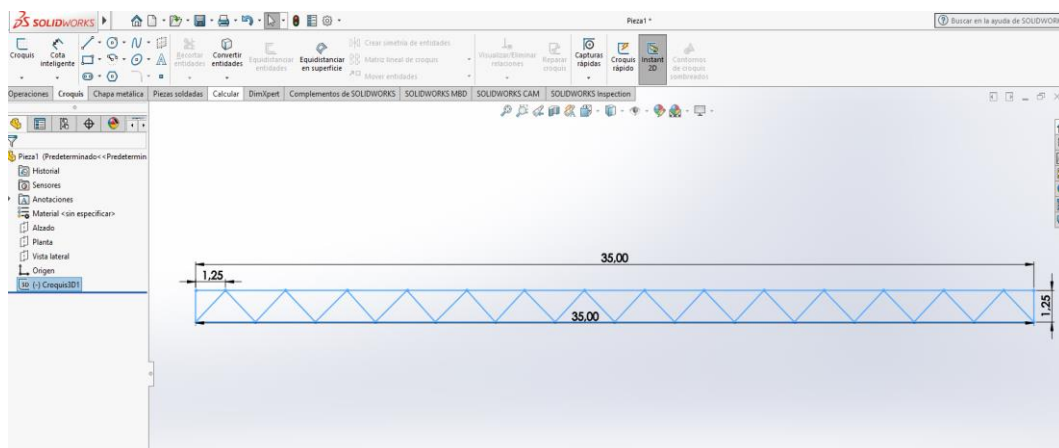


Ilustración 234-Estructura dibujada

A continuación, se le asigna a cada barra el perfil correspondiente. En este caso aparecerá un tipo para montantes y cordón superior e inferior, y otro para las diagonales.

Tabla 13- Dimensiones secciones que conforman la celosía Warren

Cordones	□140.140.8
Diagonales	□140.80.5

Para la asignación de estos perfiles hay que entrar en el módulo de “Piezas soldadas” y clicar en la opción “Miembro estructural”. Una vez ahí se selecciona el tipo de perfil, la norma a seguir y las dimensiones. En el caso de no aparecer las dimensiones buscadas, como es el caso, se modificará sobre el plano.

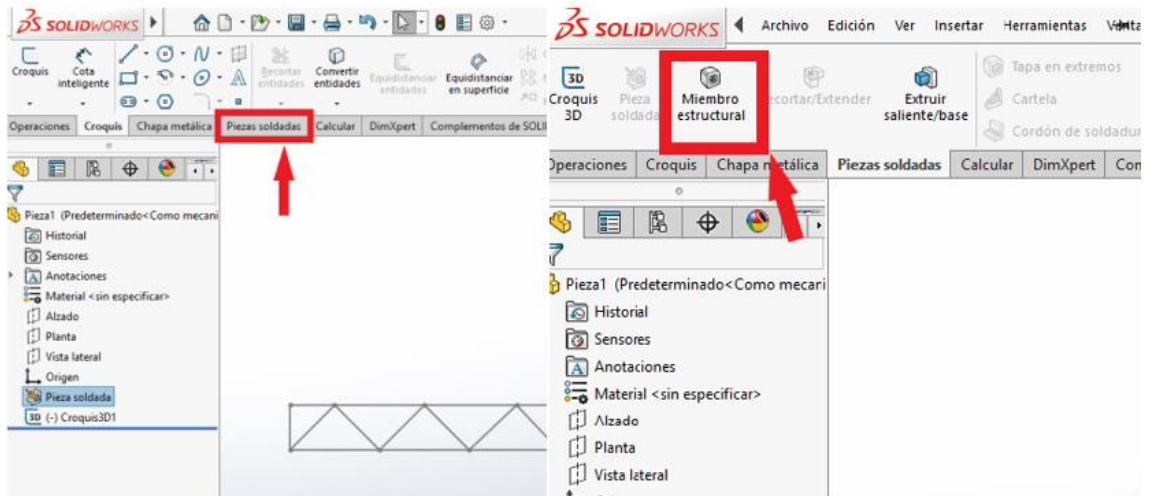


Ilustración 235-Opciones para asignar sección a las barras

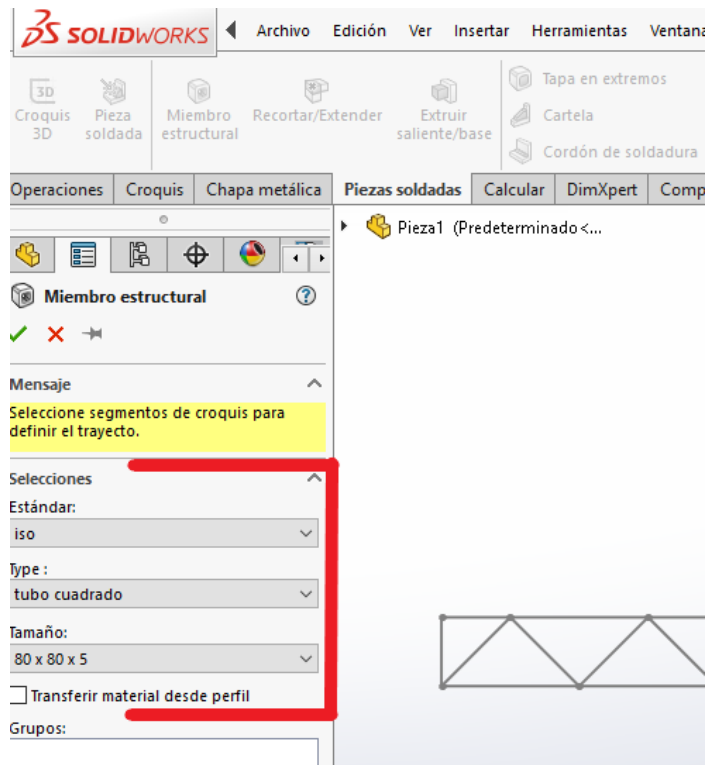


Ilustración 236-Opciones de perfiles

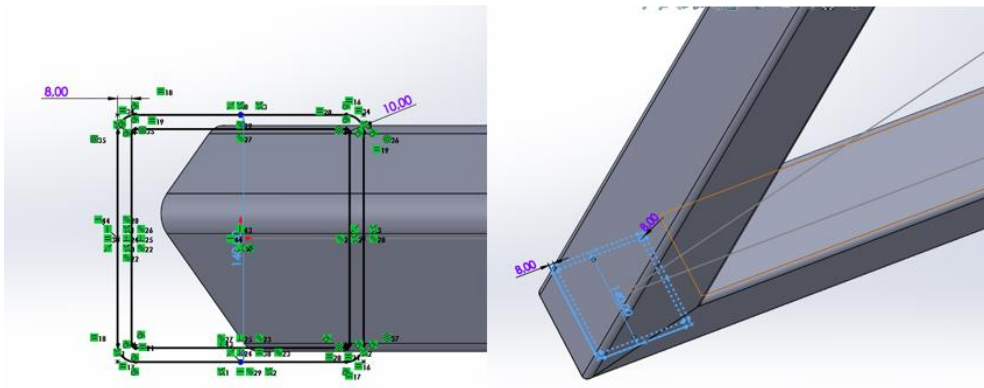


Ilustración 237-Asignación de perfil 140.140.8 a montantes y cordones

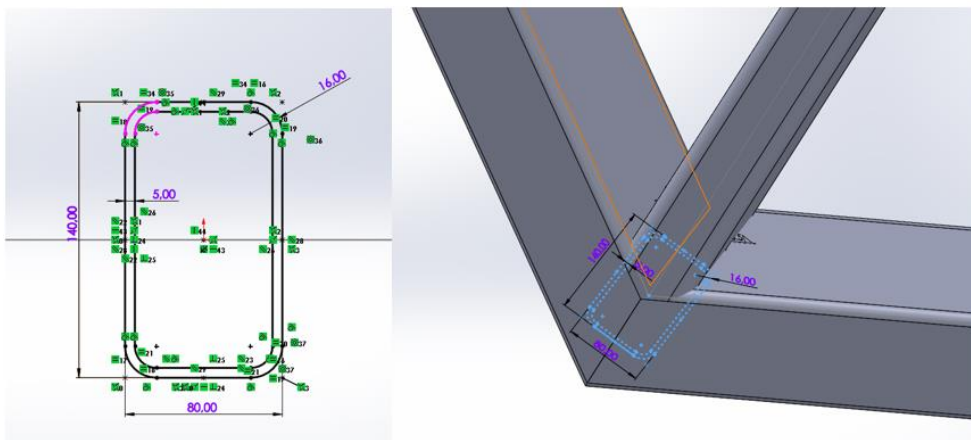


Ilustración 238-Asignación de perfil 140.80.5 a las diagonales

Por tanto, la estructura queda según se muestra en la siguiente ilustración.

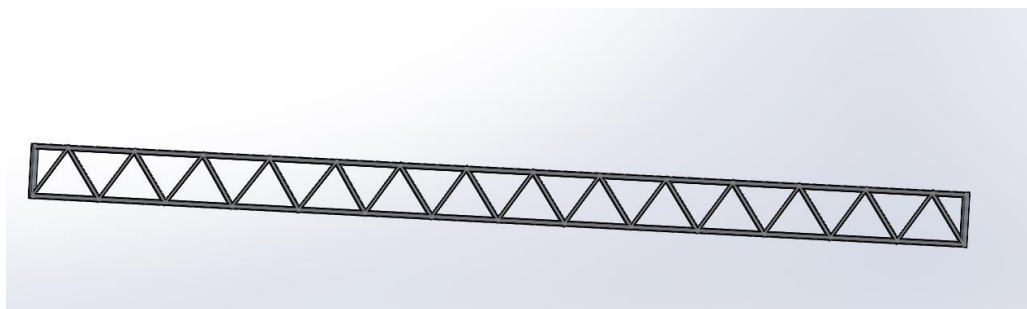


Ilustración 239-Celosía Warren montada

Para completar el capítulo de geometría y montaje hay que generar el cordón de soldadura entre las vigas. Para ello se busca la normativa referente a las uniones soldadas dentro de la “EAE-Instrucción del Acero Estructural”. Aquí se procede a través de los espesores de cada una de las secciones. Se tiene un espesor de 8 milímetros en montantes y cordones frente a los 5 milímetros de las diagonales.

TABLA 2 Valores límite de la garganta de una soldadura en ángulo en una unión de fuerza		
Espesor de la pieza (mm)	Garganta a	
	Valor máximo (mm)	Valor mínimo (mm)
4.0- 4.2	2.5	2.5
4.3- 4.9	3	2.5
5.0- 5.6	3.5	2.5
5.7- 6.3	4	2.5
6.4- 7.0	4.5	2.5
7.1- 7.7	5	3
7.8- 8.4	5.5	3
8.5- 9.1	6	3.5
9.2- 9.9	6.5	3.5
10.0-10.6	7	4
10.7-11.3	7.5	4
11.4-12.0	8	4
12.1-12.7	8.5	4.5
12.8-13.4	9	4.5
13.5-14.1	9.5	5
14.2-15.5	10	5
15.6-16.9	11	5.5
17.0-18.3	12	5.5
18.4-19.7	13	6
19.8-21.2	14	6
21.3-22.6	15	6.5
22.7-24.0	16	6.5
24.1-25.4	17	7
25.5-26.8	18	7
26.9-28.2	19	7.5
28.3-31.1	20	7.5
31.2-33.9	22	8
34.0-36.0	24	8

Ilustración 240-Tabla de valores límite de garganta de soldadura dependientes del espesor de los perfiles que se unen

En este caso la sección límite es la de la diagonal ya que su espesor es la inferior, por lo que se entra en la fila que recoge dicho espesor y se selecciona el valor máximo admisible para la garganta. En este caso el ancho de la garganta del cordón de soldadura será de 3,5 milímetros.

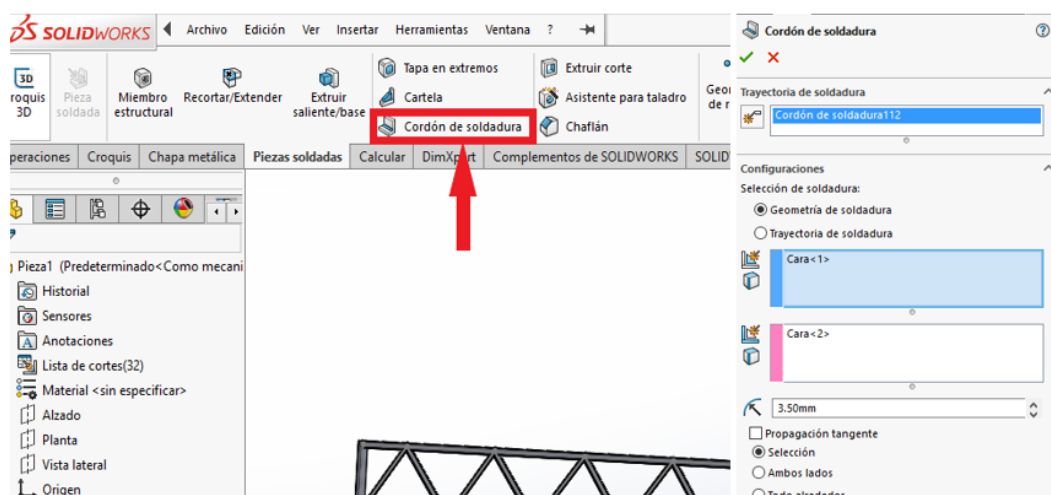


Ilustración 241-Introducir cordón de soldadura

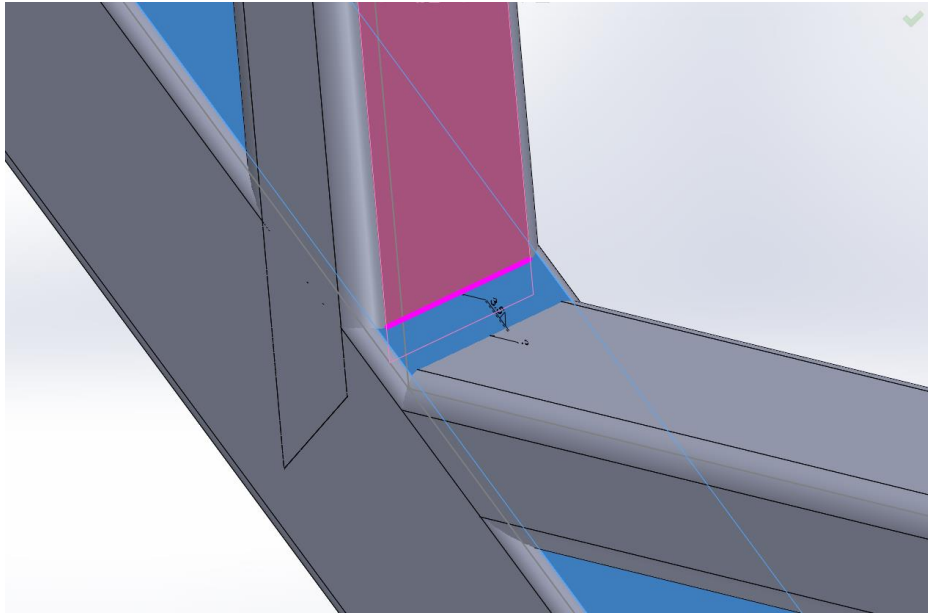


Ilustración 242-Paredes seleccionadas para ser soldadas

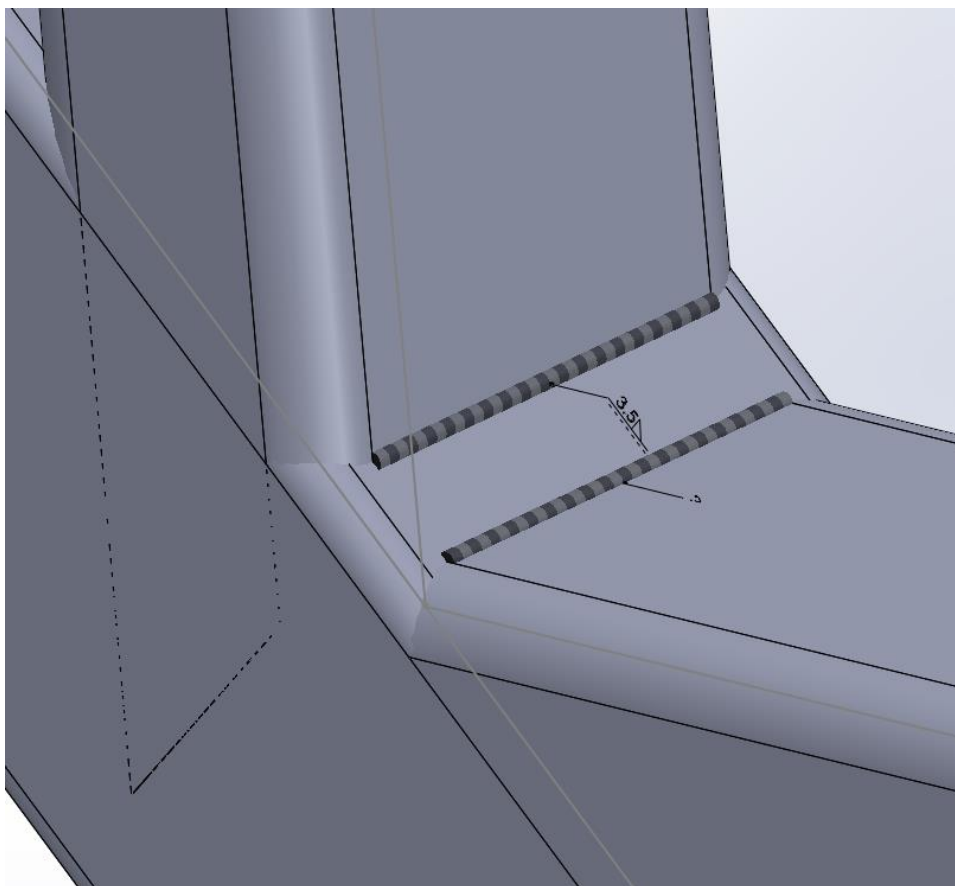


Ilustración 243-Visualización del cordón de soldadura ejecutado

2. Análisis estático

Para el análisis estático se accede al módulo “Complementos de SOLIDWORKS” y una vez aquí dentro se escoge la opción de la barra de

herramientas la opción de “SOLIDWORKS Simulation” y abrimos un nuevo análisis.

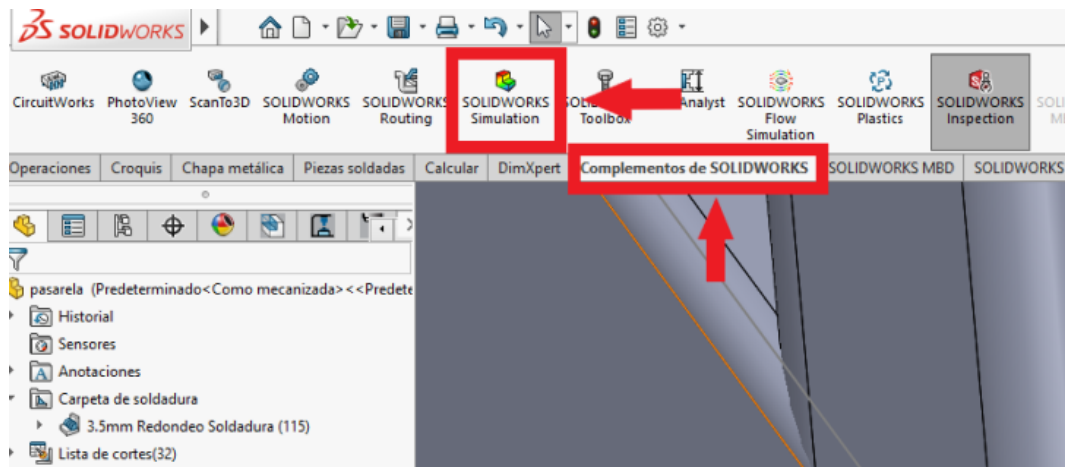


Ilustración 244-Módulo de simulaciones

Luego se pasa a la ventana de “Simulation” y en “Nuevo estudio” se despliega un menú en el que se escoge la opción de “Nuevo modelo”.

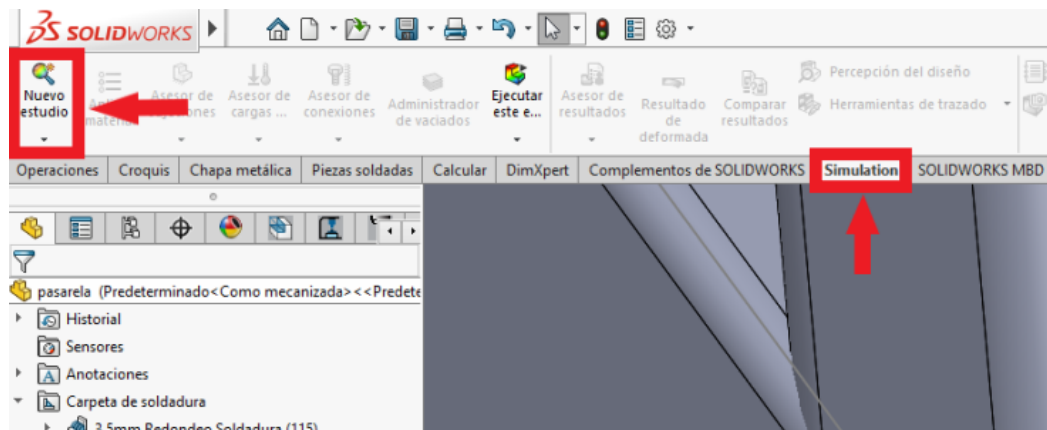


Ilustración 245-Comienzo para el nuevo modelo

El tipo de estudio que se va a realizar es de tipo estático por lo que se selecciona la opción de “Análisis estático” y se valida.

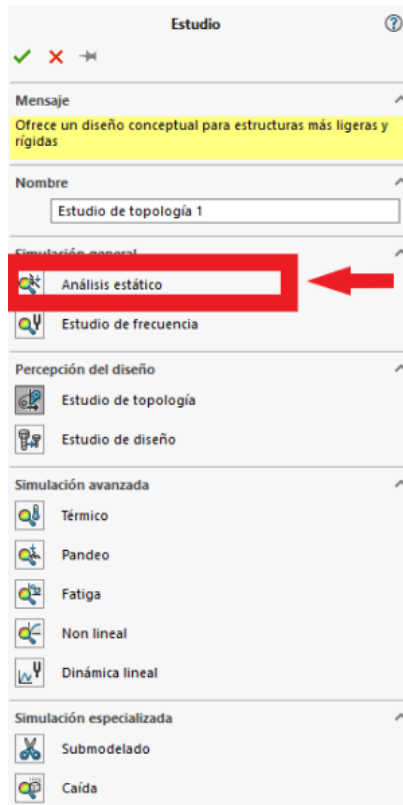


Ilustración 246-Análisis estático

Una vez se abre el menú del análisis estático hay que introducir material, cargas, sujeciones, entre otros parámetros.

Para comenzar se aplicará un material a las barras que posea el mismo módulo elástico y densidad que el acero S275 ya que la galería de materiales no viene con esa designación. El que más se asemeja es el denominado “Super aleación a base de hierro” con un límite elástico de 275 MPa y una densidad de 7.920 kg/m³.

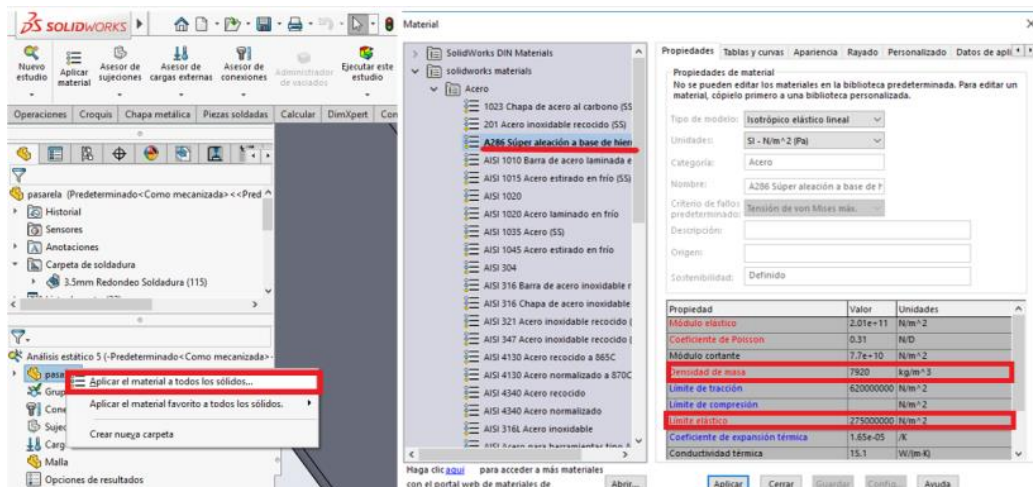


Ilustración 247-Asignación material

Lo siguiente es aplicar los apoyos o sujeciones que tendrá la celosía. En este caso será en los montantes extremos cuyos nudos se fijarán (quedarán empotrados). Esto es seleccionando “Geometría fija”.

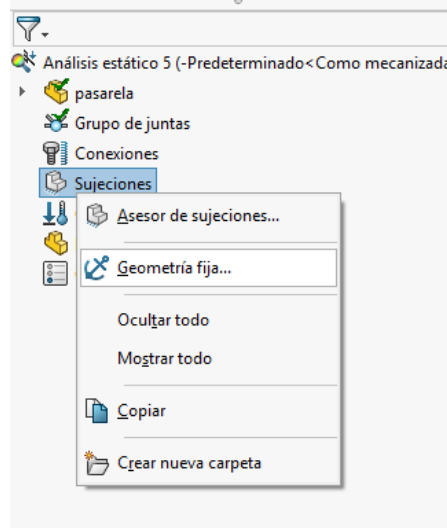


Ilustración 248-Geometría fija

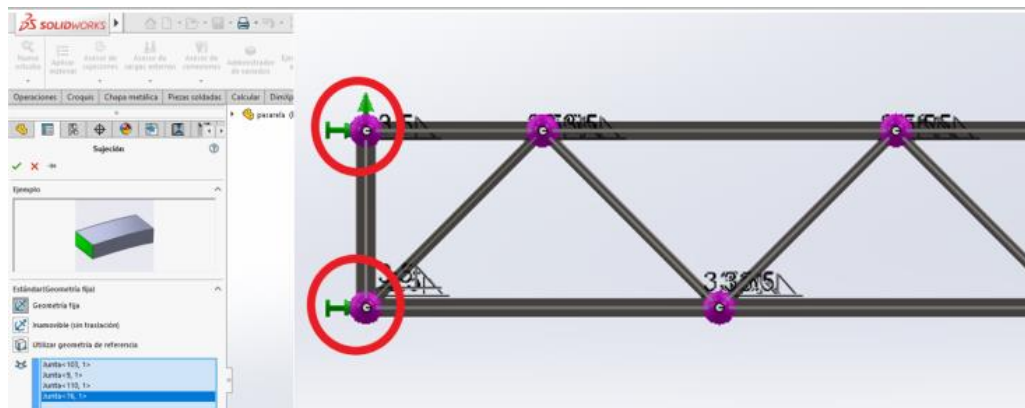


Ilustración 249-Nudos empotrados

Se realiza un mallado bastante fino. Para ello se clicca sobre la opción “Malla” y en ella a “Aplicar control de mallado”. Aquí se estiman unos 200 elementos por barra a estudiar para que la precisión de los resultados sea lo más certera posible.

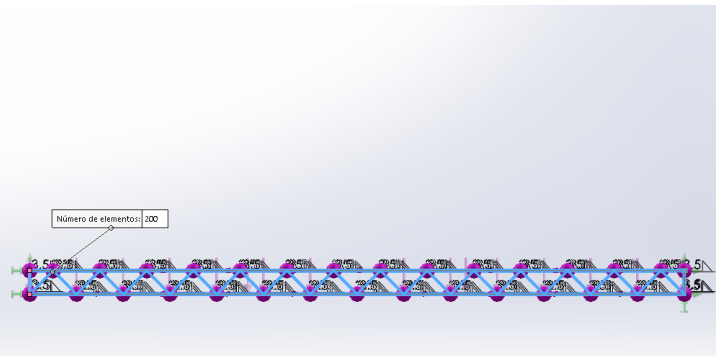
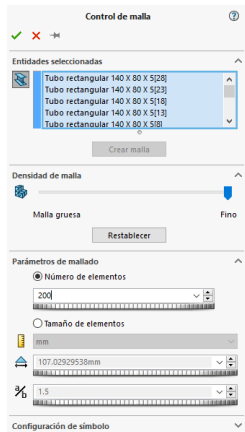


Ilustración 250-Mallado celosía

2.1- Caso 1: Sobrecarga de uso

Las cargas que se van a introducir son dos tipos, la primera será una carga lineal sobre el cordón inferior que va a recoger la contribución de la sobrecarga de uso, las rejillas, el tablero y los largueros. Esto hace una carga total de 6.026,067 N/m. Luego la segunda carga serán fuerzas aplicadas en los nudos debidas a los travesaños, que al haber dos tipos de travesaños se aplicarán dos tipos de fuerzas distintas. Para los intermedios será de 138,566 N y la de los extremos de 383,816 N. Además, el factor de la gravedad hay que incluirle, ya que no viene por defecto.

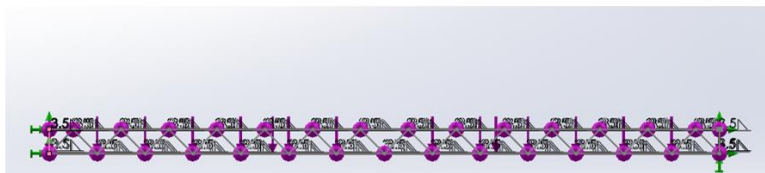
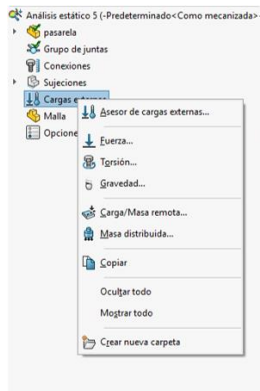


Ilustración 251-Cargas aplicadas

2.2- Caso 2: Grupo 4 personas en el centro del vano

Las cargas que se van a introducir ahora son las mismas que en el caso anterior, pero sin la participación de la sobrecarga. Esto hace una carga total de 1.121,067 N/m. Luego la segunda carga serán fuerzas aplicadas en los nudos debidas a los travesaños, que al haber dos tipos de travesaños se aplicarán dos tipos de fuerzas distintas. Para los intermedios será de 138,566 N y la de los extremos de 383,816 N. Por último, se añadirá la carga de 3.200 N correspondiente al peso de las 4 personas.

3. Resultados de flecha

3.1- Caso 1: Sobrecarga de uso

Tras hacer la simulación obtenemos unos resultados según una gama cromática que indica que a más desplazamiento el color que se ve es más cálido y al contrario con los fríos. Se observa que el desplazamiento que se obtiene es de 49,16 mm. Aquí se ha tenido en cuenta el peso propio.

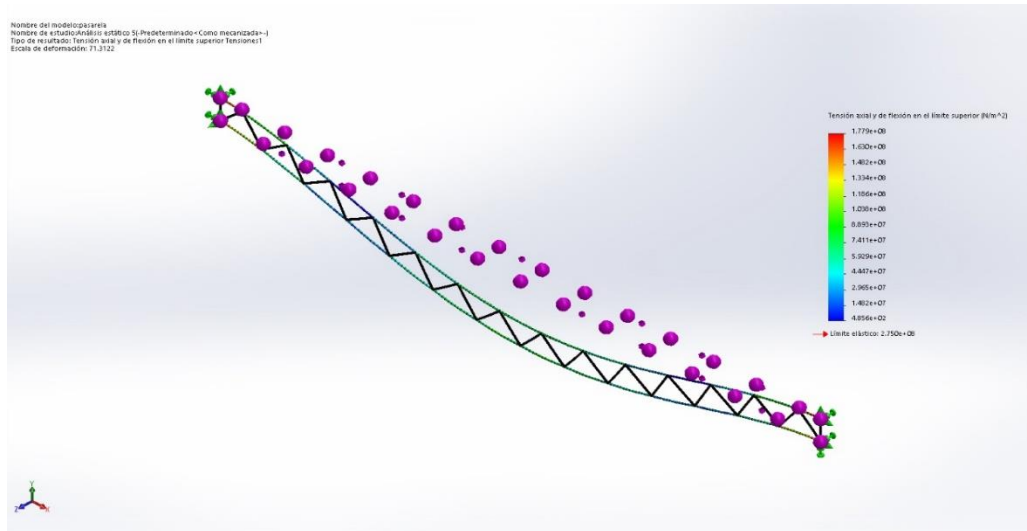


Ilustración 252-Deformada de la estructura con tabla de desplazamientos

3.2- Caso 2: Grupo 4 personas en el centro del vano

El desplazamiento que se obtiene tras la simulación es de 15,67 milímetros. Como bien se comentó, en el caso anterior, aquí también se ha tenido en cuenta el peso propio.

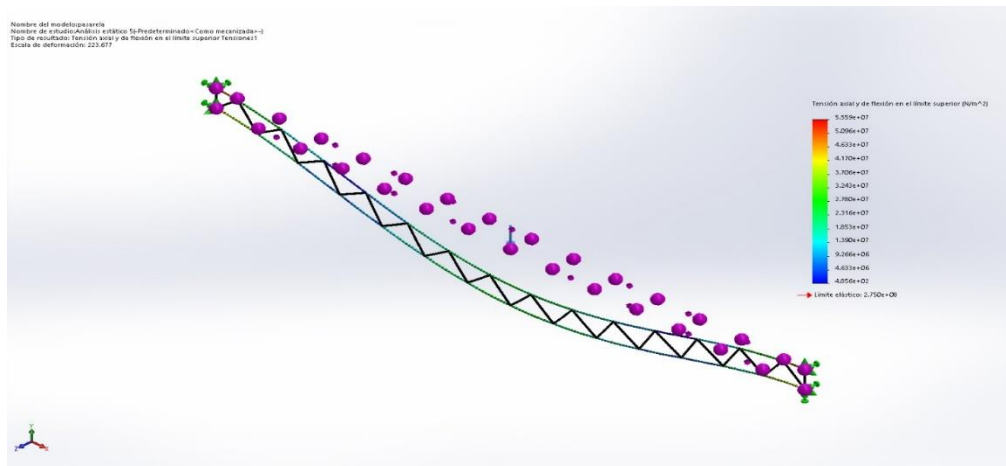


Ilustración 253-Deformada de la estructura con tabla de desplazamientos

4. Comparación de resultados con el modelado de SAP2000 en 2D

En este apartado se procede a comparar los resultados que se obtienen de flechas tras hacer dos casos de estudios estáticos. Se va a estudiar para la

situación de sobrecarga de uso y para la situación de un grupo de 4 personas en el centro del vano de la pasarela.

Tabla 14-Comparación de flechas para ambos casos entre SAP2000 y SolidWorks para el modelado 2D

	Flecha " δ " (mm)	
	Sobrecarga de uso	Grupo 4 personas
SAP2000	47,9	16,8
SolidWorks	49,16	15,67