

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Civil

Diseño de una pasarela ciclo-peatonal sobre la  
autovía de circunvalación SE-30. Sevilla

Autor: Juan Mera Martínez  
Tutor: Manuel Morato Moreno

**Departamento de Ingeniería Gráfica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2016





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Civil

# **Diseño de una pasarela ciclo-peatonal sobre la autovía de circunvalación SE-30. Sevilla**

Autor:  
Juan Mera Martínez

Tutor:  
Dr. Manuel Morato Moreno  
Profesor Titular de Escuela Universitaria

Departamento de Ingeniería Gráfica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Diseño de una pasarela ciclo-peatonal sobre la autovía de circunvalación  
SE-30. Sevilla

Autor: Juan Mera Martínez  
Tutor: Manuel Morato Moreno

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal



*A mis padres y mi hermana*  
*A los profesores que me animaron*



# Agradecimientos

---

Gracias a mis padres por haberme dado la oportunidad de hacerlo, a mi hermana por apoyarme y darme ánimos cuando lo necesitaba, gracias a todos los que en algún momento tuvieron palabras de aliento y por supuesto muchas gracias a mi tutor Manolo porque ni siquiera Él sabe lo que me ha ayudado para sacar adelante este Trabajo de Fin de Grado.

También me gustaría agradecerse a todas esas personas que a medida que avanzaba me ponían trabas y decía que no hiciera esto o aquello porque no iba a ser capaz, gracias a ello me superaba y eso ahora forma parte de mí y de lo que soy.

Gracias.



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>7</b>
<b>Índice</b>	<b>9</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>11</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>13</b>
<b>1 Introducción y objeto del proyecto</b>	<b>15</b>
<b>2 Antecedentes urbanísticos</b>	<b>23</b>
2.1 <i>Antecedentes urbanísticos</i>	23
2.2 Antecedentes de modelización para el cálculo	24
<b>3 Datos de partida</b>	<b>27</b>
3.1 Ubicación de la obra	27
3.2 Situación actual	28
3.3 Situación final prevista	29
3.4 Cartografía	30
3.5 Geomorfología	30
3.6 Geología	30
3.7 Geotécnia	31
3.8 Climatología	32
3.9 Trazado geométrico	32
<b>4 Posibles soluciones</b>	<b>33</b>
4.1 Análisis de alternativas	33
4.1.1 Solución curva con tubo estructural como principal soporte	33
4.1.2 Solución recta con el tubo estructural como principal soporte	34
4.1.3 Solución recta con viga mixta empotrada en dos pilas-pórtico triangulares de hormigón	34
4.2 Solución adoptada	35
4.3 Justificación del trazado de la pasarela	36
4.4 Consideraciones estructurales derivadas del trazado: la viga curva	37
<b>5 Descripción de la pasarela</b>	<b>39</b>
5.1 Descripción detallada por partes	39
5.1.1 Estructura	39
5.1.2 Sección tipo	41
5.1.3 Materiales empleados	42
5.1.3.1 Acero	42
5.1.3.2 Hormigón	42

5.1.3.3	Pernos conectadores	43
5.1.4	Drenaje	43
5.1.5	Señalización, balzamiento y defensas	44
5.1.5.1	Altura	44
5.1.5.2	Características constructivas	44
<b>6</b>	<b>Proceso de ejecución previsto y transporte</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>Modelización y análisis de elementos finitos</b>	<b>47</b>
7.1	Software empleado	47
7.2	Modelado de la geometría	47
7.3	Elementos a emplear	49
7.3.1	Elementos a emplear	49
7.3.2	Secciones de los elementos	50
7.4	Mallado	54
7.4.1	Mallado de áreas	54
7.4.2	Mallado del tubo	55
7.4.3	Mallado de los voladizos	56
7.4.4	Mallado de estribos	57
<b>8</b>	<b>Cargas consideradas</b>	<b>59</b>
8.1	Peso Propio	59
8.2	Cargas muertas	59
8.3	Sobrecarga de uso	60
8.4	Viento	61
8.5	Efectos aeroelásticos	63
8.6	Sismo	64
8.6.1	Datos sísmicos	65
8.6.2	Aceleración sísmica básica	66
8.6.3	Espectro de cálculo	66
8.7	Nieve	68
8.8	Temperatura	68
8.8.1	Componentes de la temperatura sobre la estructura	68
8.8.2	Modelización de la carga térmica en ANSYS	72
<b>9</b>	<b>Combinaciones de carga</b>	<b>73</b>
9.1	Combinaciones para comprobación de ELU	74
9.2	Combinaciones para comprobación de ELS	77
<b>10</b>	<b>Comprobaciones</b>	<b>81</b>
10.1	Estado Límite de Deformación	82
10.2	Estado Límite de Utilización. Resistencia de cálculo	84
10.3	Criterio de rotura	85
10.4	Verificaciones	85
<b>11</b>	<b>Resultados del análisis con elementos finitos</b>	<b>87</b>
11.1	Conclusión	90
<b>Fuentes</b>		<b>91</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Características del entorno para el viento	61
Tabla 2. Características de la pasarela (1)	62
Tabla 3. Características de la pasarela (2)	62
Tabla 4. Tabla de la IAP-11 de temperatura mínima del aire en °C	70
Tabla 5. Valores de la variación de la temperatura en función del tipo de tablero de la IAP-11	71
Tabla 6. Valores del coeficiente de dilatación térmica de la IAP-11	71
Tabla 7. Factores de Simultaneidad de IAP-11	73
Tabla 8. Coeficientes de mayoración de acciones para ELU de IAP-11	74
Tabla 9. Coeficientes de mayoración de acciones para ELS de IAP-11	77
Tabla 10. Resistencia de los aceros según Código Técnico de la Edificación, seguridad estructural de aceros: CTE. SE-A	84





# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pasarela sobre la Ronda de Circunvalación SE-30. Ubicación de la actuación	16
Figura 2. Planta de la actuación en el primer proyecto de la Junta de Andalucía (04/2010)	17
Figura 3. Planta de la actuación en el segundo proyecto de la Junta de Andalucía (02/2016)	18
Figura 4. Imagen infográfica de la pasarela en el primer proyecto promovido por la Junta de Andalucía (04/2010)	18
Figura 5. Imagen infográfica de la pasarela en el segundo proyecto promovido por la Junta de Andalucía (02/2016). Tramo correspondiente al vano principal sobre la autovía SE-30.	19
Figura 6. Imagen infográfica de la pasarela en el segundo proyecto promovido por la Junta de Andalucía (02/2016). Tramo correspondiente a las rampas de acceso en alineación curva.	19
Figura 7. Imagen infográfica de la pasarela en el segundo proyecto promovido por la Junta de Andalucía (02/2016). Tramo correspondiente a las rampas de acceso en alineación curva.	19
Figura 8. Pasarela a la altura del centro tecnológico Palmas Altas. Luis Vidal, arquitecto. 2012	20
Figura 9. Pasarela a la altura del cruce de la SE-30 con carretera de Utrera	20
Figura 10. Pasarela a la altura del cruce con la calle Carlos Serra y Pickman	20
Figura 11. Trazado alternativo (amarillo) al propuesto en el proyecto de la J.A. (verde)	21
Figura 12. Alzado de la pasarela proyectada	22
Figura 13. Modelo de representación de conectores como muelles	25
Figura 14. Unión hormigón-acero mediante adhesivo	25
Figura 15. Ubicación en Ortofoto del municipio de Sevilla y su área metropolitana, en la que se ha encuadrado la zona donde se ubica la pasarela proyectada.	27
Figura 16. Ampliación de la zona de actuación	28
Figura 17. Ampliación de la zona de actuación con carril bici existente	29
Figura 18. Ampliación de la zona de actuación en la situación final	29
Figura 19. Pasarela sobre la Ronda SE-30 en Tablada. Ubicación de la actuación	33
Figura 20. Posible solución de la pasarela con trazado recto.	34
Figura 21. Modelo de la pasarela del proyecto “Pasarela sobre la ronda de circunvalación se-30 en tablada (Sevilla)”	35
Figura 22. Vista en planta del trazado en caso de hacer la pasarela recta.	35
Figura 23. Imagen en perspectiva de la pasarela	36
Figura 24. Esquema estructural simplificado	41
Figura 25. Características pernos según el RPM-RPX/95	43
Figura 26. Vista de la barandilla	44
Figura 27. Modelo de <i>Keypoints</i> y líneas básico	49
Figura 28. Extracto de código (tubo principal)	51
Figura 29. Sección del tubo principal	51
Figura 30. Extracto de código (ménsulas)	52
Figura 31. Sección de IPE	52
Figura 32. Extracto de código (estribos)	53
Figura 33. Extracto código tablero	53

Figura 34. Sección del tablero	54
Figura 35. Mallado del tablero	55
Figura 36. Mallado del tubo (1)	55
Figura 37. Mallado del tubo (2)	56
Figura 38. Mallado de ménsulas	56
Figura 39. Mallado de estribos (1)	57
Figura 40. Mallado de estribos (2)	57
Figura 41. Estructura mallada (1)	58
Figura 42. Estructura mallada (2)	58
Figura 43. Mapa de isotacas para la obtención de la velocidad básica fundamental del viento $v_{b,0}$ de la IAP-11	61
Figura 44. Diagrama de fletores para efectos aerolásticos para el peso propio	64
Figura 45. Diagrama de fletores para efectos aerolásticos para viento transversal	64
Figura 46. Espectro elástico de respuesta de la norma NC SP-07	67
Figura 47. Sobrecarga de nieve sobre un terreno horizontal en las capitales de provincia y ciudades autónomas de la IAP-11	68
Figura 48. Isotermas de la temperatura máxima anual del aire en °C de la IAP-11	69
Figura 49. Zonas climáticas de invierno de la IAP-11	69
Figura 50. Apoyo en los estribos	82
Figura 51. Desplazamientos bajo la acción del Peso Propio, Cargas Muertas y Sobrecarga de Uso	83
Figura 52. Desplazamientos (vista en planta) bajo la acción del PP, Cargas Muertas y Sobr. Uso	83
Figura 53. Mapa de tensiones de Von Mises (en KN/m <sup>2</sup> ) para combinación 22.	88
Figura 54. Detalle de los valores de Von Mises (en KN/m <sup>2</sup> ) sobre el tablero para combinación 22	89

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL PROYECTO

---

El presente Trabajo de Fin de Grado que se expone a continuación es una propuesta estructural donde también se intenta dar importancia a la parte estética para que la estructura se funda con el entorno sin que haya demasiada extravagancia para que no resalte demasiado. Podría decirse que se busca hacer ver que la estética en la ingeniería civil es posible al mismo tiempo que se cumple con los parámetros estructurales.

Más concretamente, el trabajo trata sobre el diseño y cálculo de una pasarela peatonal que tiene una forma curvada y con el detalle de que la gran parte de la responsabilidad estructural la tiene un perfil tubular que recorre al completo la pasarela y sobre el que se apoyará un tablero para la correcta utilización de los usuarios.

Para el diseño que se verá a lo largo del trabajo me he inspirado en el puente llamado Zubi Zuri, que es una pasarela peatonal con una estética indiscutible que llama la atención por su aspecto y curvatura. Obviamente sólo han sido unas pequeñas pinceladas de esta idea, que fue del arquitecto español Santiago Calatrava y se encuentra en Bilbao, las usadas para la pasarela objeto del proyecto, aunque podemos decir que tienen rasgos parecidos.

También he tomado la idea del proyecto “PASARELA SOBRE LA RONDA DE CIRCUNVALACIÓN SE-30 EN TABLADA (SEVILLA)” para aplicar alternativas a este proyecto en ejecución al ver que podría haberse realizado de forma más simple, ya que al fin y al cabo no estamos hablando de un puente para vehículos con gran capacidad como el reciente puente de La Pepa en Cádiz, ni el conocido puente del Centenario en Sevilla o incluso el puente del Alamillo situado al norte de Sevilla para cruzar el río.

En el ámbito de la ingeniería civil, y más concretamente dentro de la especialidad de Construcciones Civiles, se propuso este trabajo con el objetivo de culminar unos estudios de una clara orientación práctica. Por ello, siguiendo la tradición de los antiguos Proyectos Fin de Carrera, el desarrollo del proyecto para una pasarela, haciendo hincapié en las facetas de diseño y cálculo, se concibe como una oportunidad de integrar en un único trabajo gran parte de las materias aprendidas durante los estudios del grado. Todo ello sin olvidar que en los actuales planes de estudio la dedicación estipulada para estos trabajos es de tan solo 12 créditos.

La temática del presente Trabajo Fin de Grado se planteó como una propuesta alternativa desde el ámbito académico a un proyecto real. Las obras de rehabilitación del puente metálico de San Juan de Aznalfarache y los viaductos de acceso al mismo desde Sevilla y San Juan de Aznalfarache, concluidas en el año 2009, permitirían contar con un carril BUS, aceras peatonales y un carril-bici de 2.5 m, posibilitando la conexión peatonal y de bicicletas entre el Aljarafe y Sevilla. Sin embargo

actualmente ello no es posible, pues para completar el itinerario ciclo-peatonal, es necesario salvar un obstáculo nada desdeñable: el cruce con la autovía de circunvalación SE-30. La Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía comenzó en el año 2010 el procedimiento administrativo para la redacción del proyecto y posterior adjudicación de las obras para conectar el final del citado viaducto (lado Sevilla) con el carril-bici existente en la Avenida Juan Pablo II, siendo necesaria la ejecución de una pasarela peatonal sobre la ronda de circunvalación SE-30. Así, se atribuye el expediente de consultoría y asistencia a la empresa pública Gestión de Infraestructuras de Andalucía S.A., GIASA, en el año 2010, para lo que ésta contrata los servicios de la empresa consultora Alonso Cobo Estudio de Ingeniería, S.L. para la redacción del Proyecto de Construcción de “Pasarela sobre la Ronda de circunvalación SE-30 en Tablada (Sevilla)”.



Figura 1. Pasarela sobre la Ronda de Circunvalación SE-30. Ubicación de la actuación

Las obras comenzaron durante el verano de 2014 y habiéndose ejecutado la totalidad de las cimentaciones y los alzados de estribos y pilas circulares, se paralizaron por diversos motivos, de índole técnico y presupuestario. Los cambios a los que se sometió el proyecto original, adjudicado en marzo de 2014, obligaron a la Consejería de Fomento y Vivienda a resolver el contrato inicial el 15 de diciembre de 2015, ya que era imposible ejecutar el proyecto en las condiciones en que fue redactado inicialmente. Desde entonces la consejería ha trabajado en la redacción de un nuevo proyecto para terminar la pasarela aprovechando parcialmente la infraestructura ya ejecutada, bajo la denominación de “Nueva pasarela ciclopeatonal sobre la autovía SE-30. P.K. 13+750 (Sevilla)”. Finalmente, ya con el presente trabajo fin de grado en fase de finalización, el 28 de julio de 2016 la Consejería de Fomento y Vivienda ha sacado a licitación de nuevo las obras con un presupuesto de 1,56 millones de euros y un plazo de ejecución de seis meses. Fuentes de la propia consejería informan que las obras se reanudarán antes de final de año mientras que su conclusión se prevé para antes del verano de 2017.



El proyecto aprobado y cuyas obras están iniciadas contempla una estructura para salvar la ronda SE-30 de un solo vano, sin apoyos sobre la autovía, pues esta fue una de las condiciones de partida que establecía el encargo de la Junta de Andalucía. La pasarela realiza mediante viga mixta de acero-hormigón empotrada en dos pilas-pórtico triangulares de hormigón con una longitud total de 42.46 m. Esta viga se encuentra sustentada por 6 péndolas metálicas, ancladas a 2 mástiles inclinados y a la propia viga mixta. La anchura del tablero es de 5 m, quedando la anchura de la calzada en 4,30 m.

El trazado de la pasarela se realiza con una alineación principal recta perpendicular a la autovía (ver figura 2), por lo que resulta necesario disponer una serie de alineaciones curvas que acuerden al comienzo y al final de la pasarela su conexión con el resto de la infraestructura.



Figura 2. Planta de la actuación en el primer proyecto de la Junta de Andalucía (04/2010)

El nuevo proyecto en base al cual la Consejería de Fomento y Vivienda acaba de licitar de nuevo la obra, plantea prácticamente las mismas alineaciones, cosa lógica si se ha querido aprovechar lo ya ejecutado de la infraestructura: los estribos de comienzo y fin de las rampas de acceso, los pilares circulares intermedios para sustentar los tramos curvos y la cimentación de las pilonas para los mástiles (Figura 3).

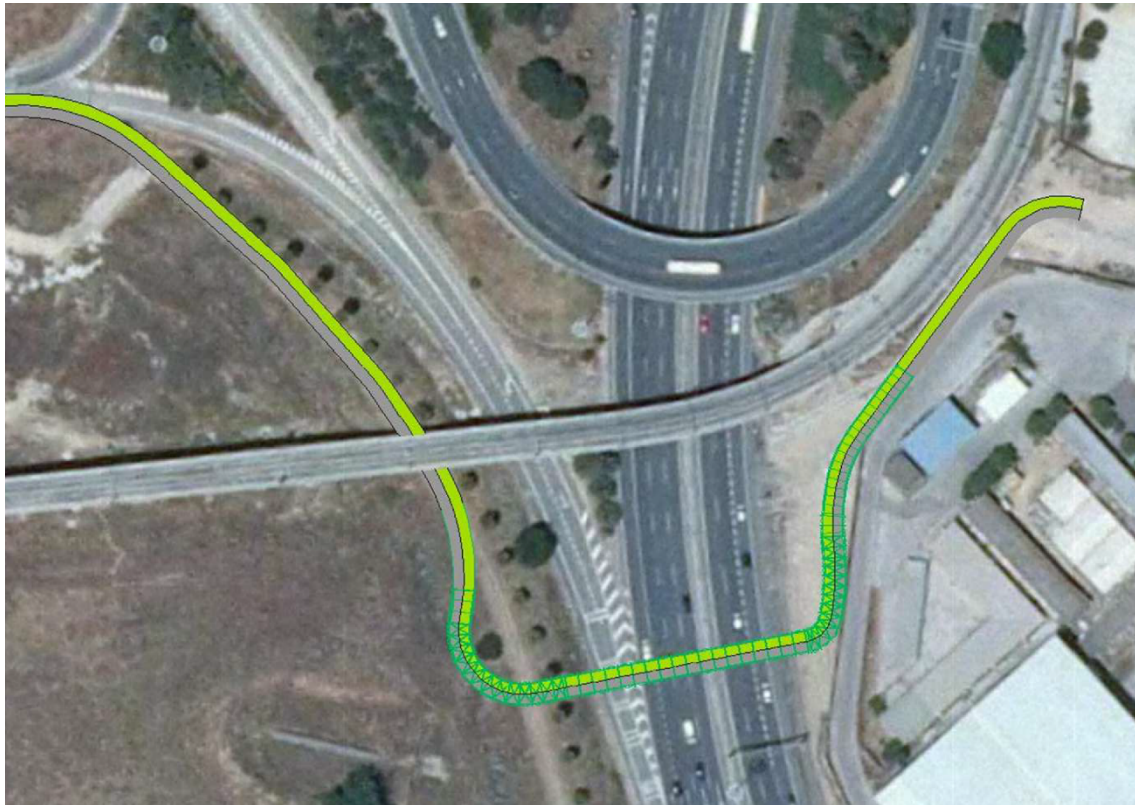


Figura 3. Planta de la actuación en el segundo proyecto de la Junta de Andalucía (02/2016)

En cuanto a la tipología de la pasarela, la solución propuesta en ambos proyectos es bastante distinta. En el primer proyecto se plantea un tablero mixto suspendido mediante cables de dos pilonas inclinadas situadas en las márgenes de la autovía (Figura 4). En el proyecto recientemente licitado, tanto la plataforma para salvar la autovía, como las rampas de acceso, se proyectan mediante pasarela metálica hiperestática de sección variable con perfiles tubulares (Figura 5).

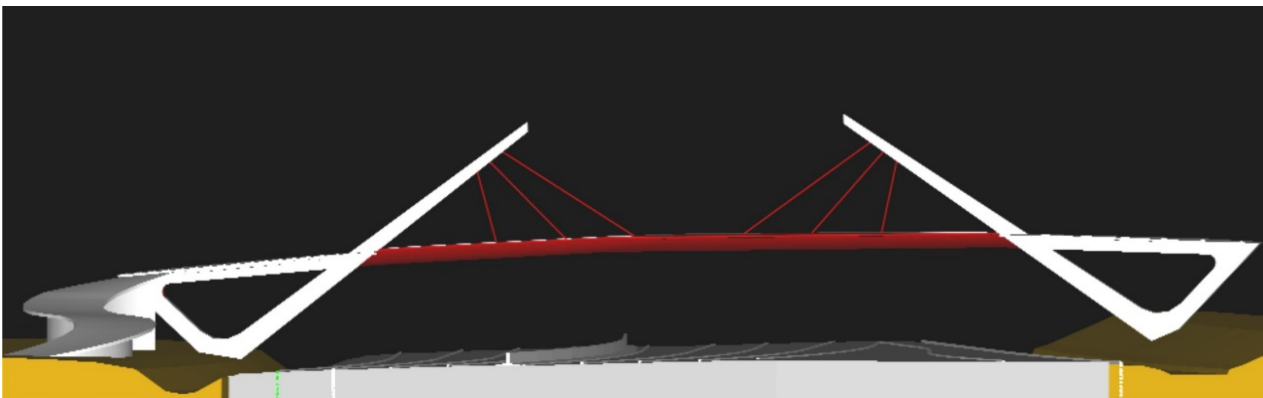


Figura 4. Imagen infográfica de la pasarela en el primer proyecto promovido por la Junta de Andalucía (04/2010)

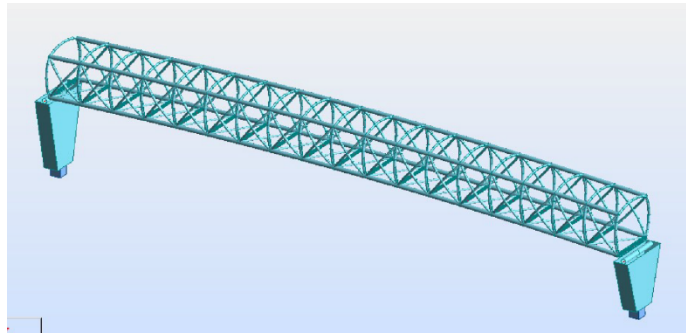


Figura 5. Imagen infográfica de la pasarela en el segundo proyecto promovido por la Junta de Andalucía (02/2016). Tramo correspondiente al vano principal sobre la autovía SE-30.

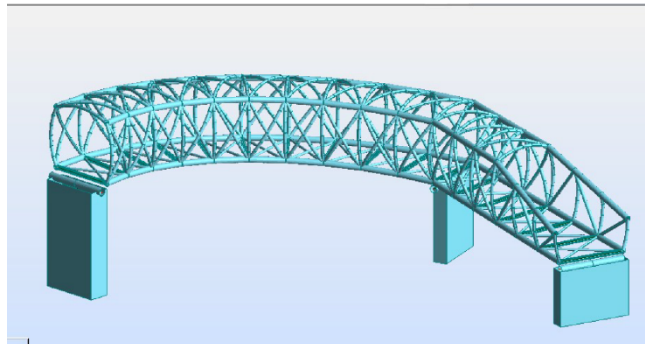


Figura 6. Imagen infográfica de la pasarela en el segundo proyecto promovido por la Junta de Andalucía (02/2016). Tramo correspondiente a las rampas de acceso en alineación curva.

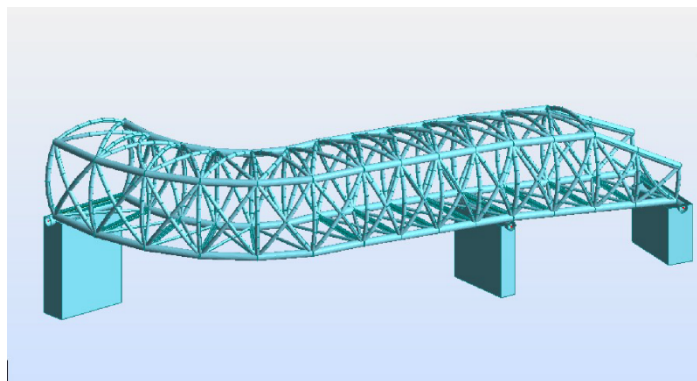


Figura 7. Imagen infográfica de la pasarela en el segundo proyecto promovido por la Junta de Andalucía (02/2016). Tramo correspondiente a las rampas de acceso en alineación curva.

Existen algunos antecedentes de pasarelas peatonales para salvar la autovía SE-30, con diferentes propuestas estructurales, técnicas y estéticas (Figuras 8, 9 y 10).





Figura 8. Pasarela a la altura del centro tecnológico Palmas Altas. Luis Vidal, arquitecto. 2012



Figura 9. Pasarela a la altura del cruce de la SE-30 con carretera de Utrera



Figura 10. Pasarela a la altura del cruce con la calle Carlos Serra y Pickman



Nuestra propuesta debía plantearse desde una alternativa al primer proyecto promovido por la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía (y al segundo licitado recientemente, cuando este trabajo se encuentra en fase de finalización) en una doble vertiente.

En primer lugar, proponiendo un nuevo trazado de la pasarela dado que la solución convencional de alinear el vano principal –pasarela propiamente dicha- con la dirección perpendicular a la autovía SE-30, obliga a realizar una serie de alineaciones de pequeña curvatura para acordar la conexión de la plataforma principal con las rampas de acceso a la misma. Esta secuencia de cambios de dirección en tramos de corto desarrollo no resulta muy funcional para la circulación de bicicletas. Nuestra alternativa plantea una única alineación de gran curvatura que enlace el carril que viene del Puente de Hierro con el futuro carril a ejecutar en la Avenida García Morato. Esta solución, más funcional, está inspirada en el paso elevado cercano al emplazamiento de la pasarela proyectada, junto al paso del metro sobre la SE-30, que conecta el tráfico procedente del Puente Juan Carlos I con la Avenida Juan Pablo II y la propia SE-30, dirección Huelva (Figura 11). Por otro lado, esta decisión conlleva que la directriz de nuestra pasarela será una curva alabeada o de doble curvatura (en planta, como consecuencia de su trazado y en sección debido a la pendiente de la rasante).



Figura 11. Trazado alternativo (amarillo) al propuesto en el proyecto de la J.A. (verde)

En segundo lugar, nuestra propuesta también debía plantear una alternativa tipológica y, sobre todo, estética. En el primer proyecto promovido por la Junta de Andalucía vimos que la pasarela era del tipo puente atirantado suspendido de dos mástiles simétricos en las márgenes de la autovía. La imagen (Figura 4) supone un importante impacto visual en el entorno. La solución que parece que finalmente se va a construir (Figura 5, 6 y 7), con una propuesta tipológica distinta mediante

la utilización de grandes vigas celosías, también conlleva un fuerte impacto visual en una zona de por sí saturada de infraestructuras (viaducto del metro, paso elevado del mismo y del ramal procedente del puente Juan Carlos I). Por todo ello, nos propusimos desde el principio proyectar una pasarela cuyo volumen supusiese el menor impacto visual posible, con un perfil rebajado, minimizando los elementos que pudieran sobresalir de la estructura. Para ello se pensó en una tipología de puente sobre arco tubular de acero, sustentado en pilares inclinados que siguiesen la curvatura del arco central. Dado que la pasarela ha de servir para peatones y ciclistas, el ancho del tablero debía tener al menos 5 metros, para poder disponer de un carril bici de 2,5 m y el carril peatonal de otros 2,5 m. Este ancho inusual para las pasarelas sustentadas en una sola viga de sección tubular, hacía necesario disponer de vigas transversales con un canto considerable para transmitir las cargas del tablero a la viga principal. Para que no resultase un tablero excesivamente voluminoso en comparación con dicha viga, se decidió proyectar el mismo dándole un diseño aerodinámico utilizando vigas ménsulas transversales de sección triangular. Sobre estas ménsulas construidas a partir de un perfil IPE cortado triangularmente en la dirección longitudinal, se apoyarán las prelosas de hormigón armado sobre las que se ejecutará finalmente una losa *in situ* del mismo material.

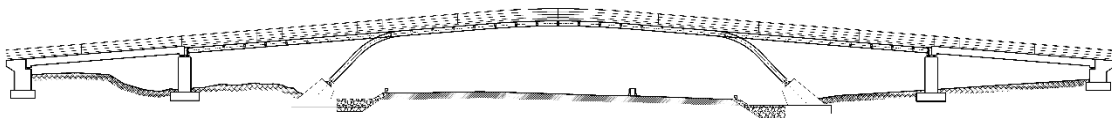


Figura 12. Alzado de la pasarela proyectada

La unión del vano central de acero-hormigón con los caminos de tierra sobre taludes –rampas de acceso- se realiza con tableros de hormigón armado sobre vigas del mismo material, apoyados en las pilas intermedias y en los estribos extremos. Estos tramos extremos tienen ambos una longitud de 20 metros.

## 2 ANTECEDENTES URBANÍSTICOS

---

### 2.1 Antecedentes urbanísticos

La pasarela objeto de estudio será algo inédito en lo que a movilidad sostenible en Sevilla se refiere, ya que hará que la ciudad esté mejor conectada por una vía de transporte limpia y eficaz con su área metropolitana.

Esta pasarela se encontrará en la zona de Tablada como continuación al Puente de Hierro de San Juan de Aznalfarache como veremos con mayor detalle en la ubicación de la obra. La distancia entre dicho Puente y la red ciclista de Sevilla en Tablada es de 450 metros, aunque pueda parecer una distancia pequeña, lo cierto es que en su paso encontramos el obstáculo de la SE-30, la cual tiene características similares a las de una autovía y no puede ser ocupada por peatones o ciclistas, por lo que vemos la necesidad de un paso para éstos por la zona que les proporcione seguridad y continuidad al que ya existe en el antes citado Puente de Hierro. Por tanto la pasarela prolongará la vía ciclista y peatonal existente y la unirá con la vía ciclista de la ciudad sevillana.

Toda esta necesidad de unión entre Sevilla capital y la zona del Aljarafe viene de los últimos 20 años, anterior a la construcción de la ronda de circunvalación y por supuesto de la Expo del año 1992. En esta época pasada, los viajes entre ambos destinos se realizaban por carretera convencional y a través de los puentes Juan Carlos I, Puente de Hierro y Patrocinio donde bicicletas y tráfico motorizado compartían las mismas carreteras convencionales antes nombradas.

En los últimos años una serie de sucesos han afectado de forma directa a la necesidad de remodelación de las carreteras de esta zona, mejorando las conexiones; tales como el cambio del cauce del río Guadalquivir que baña la zona, el constante crecimiento del tráfico rodado y el aumento de la velocidad permitida en la circulación del mismo, lo que llevó a que se fuera disgregando el tráfico motorizado del no motorizado. Todos éstos y más motivos han llevado a la recuperación del Puente de Hierro y del Puente de Camas para uso del transporte público y ciclista. Pero lo que supuso el acontecimiento más importante en cuanto a la conexión del transporte público entre Sevilla y el Aljarafe sur fue la inauguración de la línea 1 del metro en abril de 2009, ya que este método de transporte incorporó una nueva estructura para salvar el río. Esta estructura es un viaducto-puente de 1170 metros de longitud que va desde San Juan Bajo, punto en el que hay un intercambiador, hasta Blas infante, donde se encuentra la primera estación de la ciudad.

Gracias a este nuevo método de transporte se consiguió una significativa disminución de accesos a la capital del tráfico motorizado, y por supuesto, ayudó mucho a la mejora de la distribución del tráfico entre Sevilla, el Aljarafe Sur y Montequinto (Dos Hermanas), para que nos hagamos una

idea, este sistema de transportes del que estamos hablando, conlleva una carga de cerca de 12.000 usuarios al día (unos 23.000 viajes entre ida y vuelta).

A todo lo anterior debemos sumar la contribución del Puente de Hierro, que antes dijimos que contribuye tanto a la movilidad del transporte público como a la de peatones y ciclistas, el cual se reabrió en octubre del 2009, a causa de una remodelación que se le llevó a cabo aprovechando toda la construcción de la línea 1 de metro también mencionada. Dota de una mejora al transporte metropolitano evitando la congestión de autobuses urbanos por otras zonas que han quedado reservadas para vehículos privados, así como una alternativa bastante directa para los no motorizados. Pero como ya sabemos, la función de éste paso no es completa, de ahí la necesidad de la pasarela propuesta para salvar la SE-30 y así dar facilidad para completar todas las alternativas de comunicación viaria en esta zona tan concurrida.

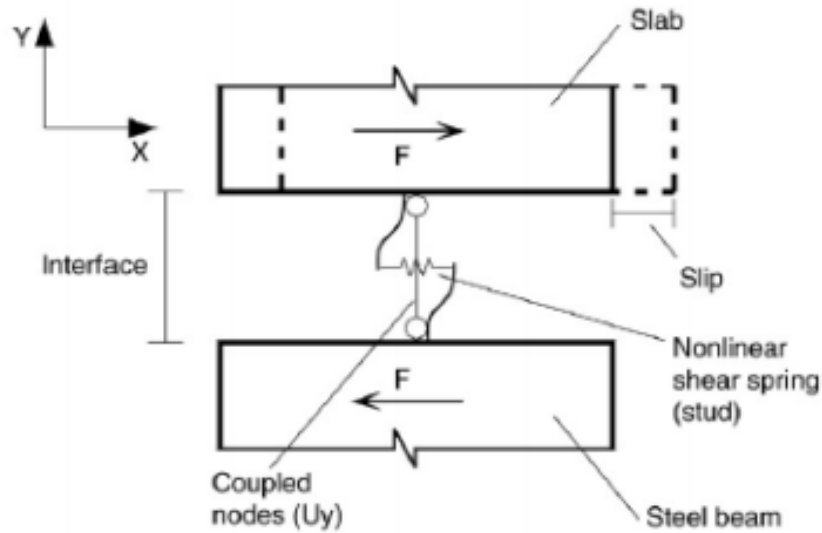
Sería necesario introducir algunos datos de interés que surgen de unos estudios realizados por la Universidad de Sevilla en el año 2011 sobre el “*uso de la bicicleta en la ciudad de Sevilla y su área metropolitana*”<sup>1</sup>, el cual estima que pasan por el Puente de Hierro unas 434 bicicletas y alrededor de 147 peatones en un día laborable. Concluyeron también que con la apertura de la pasarela esta cifra aumentará de forma exponencial.

## 2.2 Antecedentes de modelización para el cálculo

Se han encontrado diferentes artículos que desarrollan el cálculo numérico por elementos finitos de vigas compuestas, la mayoría de ellos realizan sus investigaciones para vigas de hormigón armado y acero. En estos artículos también se investiga el modo de fallo y el deslizamiento entre el acero y el hormigón, dando especial importancia en algunos de ellos a los conectores verticales. Así, por ejemplo, en un artículo titulado “*Finite element modelling of composite beams with full and partial shear connection*” (F.D. Queiroz, P.C.G.S. Vellasco, D.A. Nethercot, en *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 63, Issue 4, April 2007, Pages 505–521), realizan el estudio de los conectores en una viga compuesta de acero y hormigón. En este estudio también utilizan ANSYS como software para el cálculo numérico. En su aproximación del modelo, representan los conectores (es decir los tornillos de unión), como muelles (*springs*). El motivo por el cual se realiza esta simplificación es por el tiempo, ya que modelar y simular cada uno de los conectores haría que el programa ralentice excesivamente los tiempos de cálculo.

---

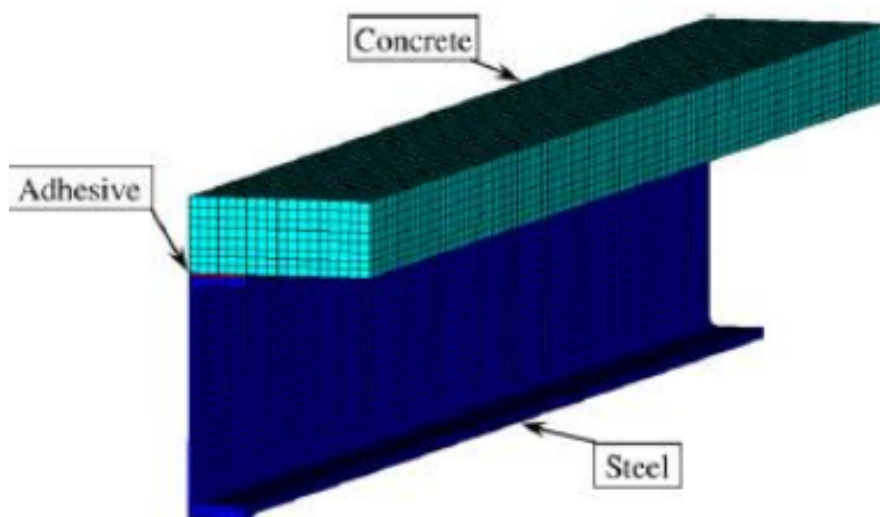
<sup>1</sup> Datos tomados de <http://bicicletas.us.es/?p=3727>



### Simulación de los conectores transversales

Figura 13. Modelo de representación de conectores como muelles

Otro artículo interesante es “*Parametric study of bonded steel concrete composite beams by using finite element analysis*” (Yangjun Luo, Alex Li, Zhan Kang, en *Engineering Structures*, Volume 34, January 2012, Pages 40–51) en el que se estudia básicamente lo mismo pero la unión entre el hormigón y la viga de acero se realiza con una de material adhesivo:



### Representación de la viga compuesta en ANSYS

Figura 14. Unión hormigón-acero mediante adhesivo

Como se puede apreciar en la figura anterior, se ha simplificado la viga a un cuarto. El motivo es el mismo por el que en el artículo anterior se representaban los conectores como muelles; el tiempo de simulación. En el artículo explica que se han llevado a cabo ensayos experimentales para estudiar el modo de fallo de “*debonding*” es decir el momento en el que se separan los materiales de la viga compuesta y para determinar la fuerza (“*bonding*”) que tiene el adhesivo para mantenerlos unidos. Después han realizado una simulación por elementos finitos en ANSYS para predecir el comportamiento de vigas compuestas entre hormigón y acero y con ello han obtenido la resistencia que les da el epoxi y el modo de fallo del hormigón.



## 3 DATOS DE PARTIDA

---

### 3.1 Ubicación de la obra

La obra se localiza en el municipio de Sevilla, en la zona de Tablada justo en la ronda de circunvalación de la SE-30.

Para poder ver su ubicación hemos usado mosaicos de ortofotos del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) lo más recientes posible, más concretamente la hoja 984 del mismo que corresponde con el término municipal de Sevilla, obtenido del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica y que hemos referenciado en coordenadas ETRS89 / UTM huso 30 para que sea una representación real y no la obtengamos distorsionada.



Figura 15. Ubicación en Ortofoto del municipio de Sevilla y su área metropolitana, en la que se ha encuadrado la zona donde se ubica la pasarela proyectada.



Ampliando la zona encuadrada en la imagen anterior, se señalan los elementos a conectar por la infraestructura objeto del presente proyecto.

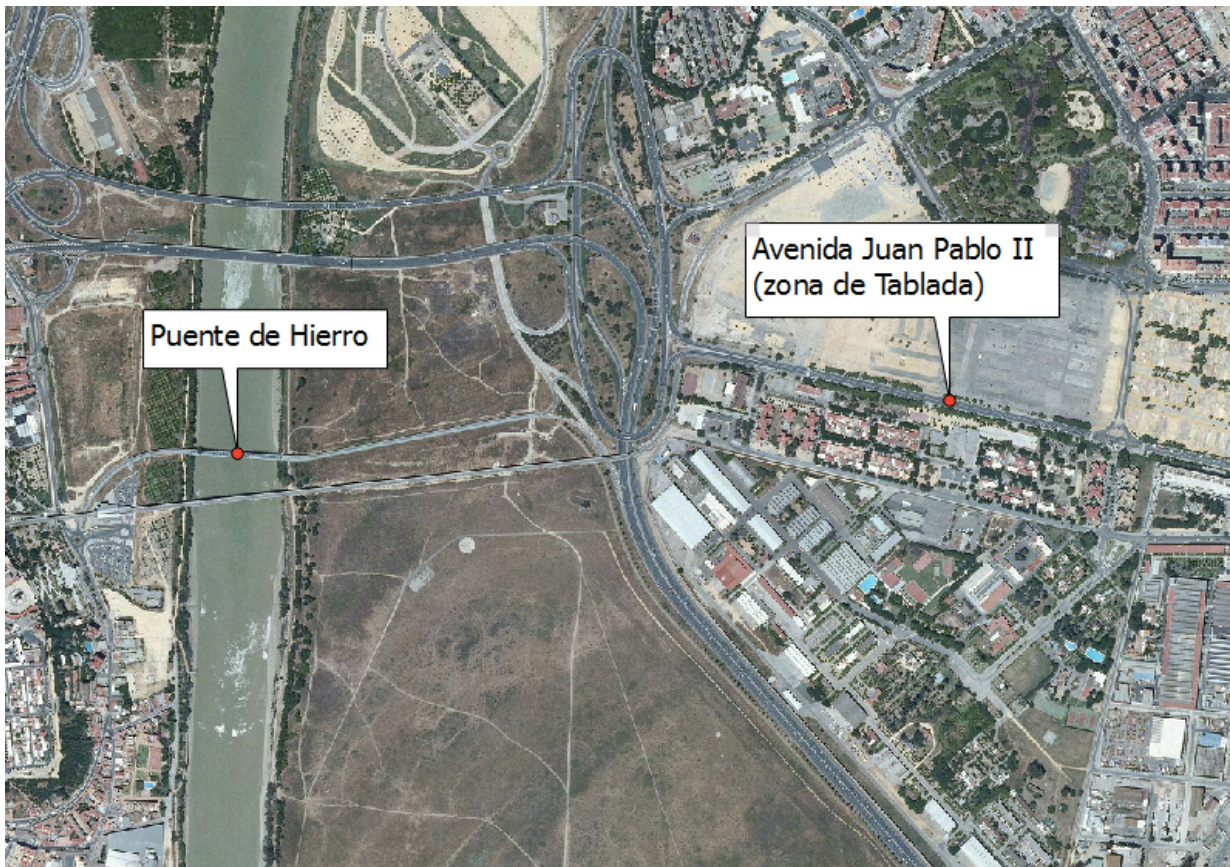


Figura 16. Ampliación de la zona de actuación

Se contempla como el Puente de Hierro viene desde San Juan y tiene continuación hasta cruzar la SE-30 para incorporarse a la circulación de Sevilla en la zona de Tablada.

### 3.2 Situación actual

Aunque en la imagen anterior puede contemplarse la situación que tenemos actualmente en la zona afectada por este proyecto, hemos querido insertar las redes de carriles bici existentes en la zona para ver la gran necesidad real de lo que estamos proponiendo.





Figura 17. Ampliación de la zona de actuación con carril bici existente

Las líneas azules discontinuas representan el carril bici existente que como podemos ver viene llegando del Puente de Hierro hasta que se encuentra con el problema de tener que cruzar la SE-30 para seguir ya hasta unirse con el de Sevilla. Puede verse de forma más clara en el plano 3.

### 3.3 Situación final prevista

Tras las obras que se lleven a cabo en la zona y una vez concluido el objeto del proyecto podremos ver cómo el problema antes descrito se habrá resuelto gracias a la pasarela que conseguirá cruzar la SE-30 de forma rápida, eficaz y segura (ver plano 5). La pasarela se adaptará con el entorno y las construcciones existentes de la mejor manera posible y de forma que se creen las menores molestias tanto al tráfico como a los vecinos que puedan vivir cerca de la zona de estudio.

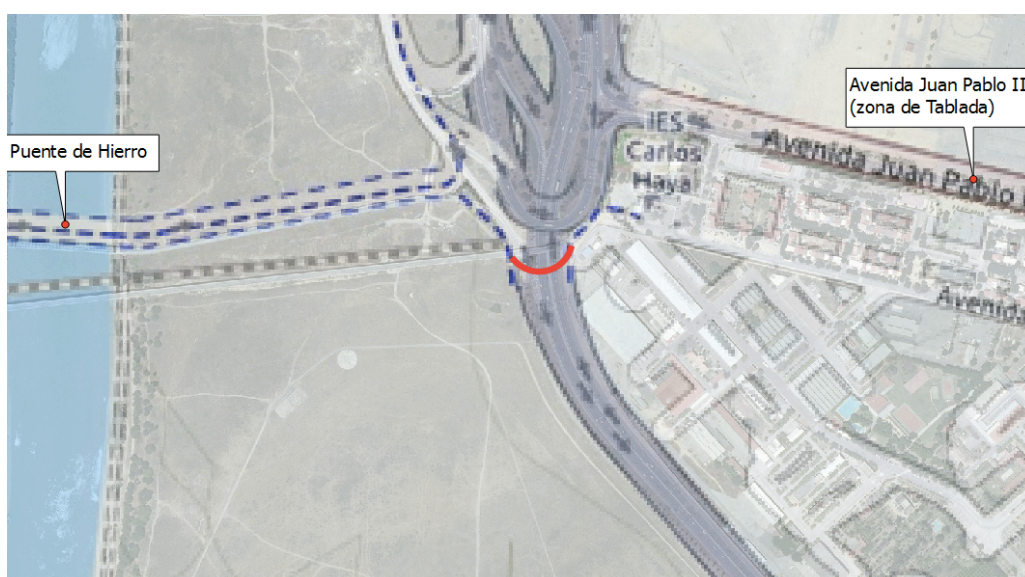


Figura 18. Ampliación de la zona de actuación en la situación final

Damos continuidad de una manera lo más natural posible al paso de ciclistas y peatones. Las imágenes se han superpuesto a las ortofotos del municipio de Sevilla gracias a la georreferenciación para poder ver el recorrido tanto del carril bici existente como el que se ha proyectado. Estas imágenes se han obtenido de la web “bicicletas.us.es” la cual ya ha sido utilizada para la obtención de otros datos.

### 3.4 Cartografía

Como hemos visto en la situación anterior, nos encontramos dentro del término municipal de Sevilla, el cual se encuadra dentro de la hoja 984 del Mapa Topográfico Nacional. Esta hoja es la correspondiente a todo el municipio sevillano y está a escala 1:50.000.

Se ha obtenido del centro de descargas del Centro Nacional de Información Geográfica y era la versión más actualizada. También hemos usado para el plano 1 de situación una cartografía de la zona obtenida de la Gerencia Municipal de Urbanismo del Ayuntamiento de Sevilla.

### 3.5 Geomorfología

Nos encontramos en la terraza del Guadalquivir, más concretamente a la cota 10 – 15 m, sobre la que se ha encajado el cauce divagante del río. Se han tomado datos de sondeos realizados para proyectos anteriores en la zona y hemos visto que atraviesan entre 15–20 metros de suelos aluviales de terraza, el nivel freático se encuentra a 9 metros de profundidad medidos desde la superficie actual del terreno.

### 3.6 Geología

Nos encontramos en la cuenca terciaria del Guadalquivir, donde los depósitos aluviales cuaternarios forman una amplia terraza. Podemos ver los siguientes conjuntos litológicos:

- Rellenos antrópicos:

Compuestos por arenas y limos marrones, pero que contienen gravas y limos marrones. Han aparecido unos 3.30 metros en el sondeo S – 2 y 0.40 metros en el sondeo S – 1.

- Depósitos aluviales finos:

El contenido son arenas limosas marrones y grises, pasadas limo – arenosas y con indicios de arcilla. Ha sido caracterizado como suelo no agresivo gracias a ensayos realizados.

Se han obtenido espesores de 16.90 metros en el sondeo S – 1 y 17 metros en el S – 2.

- Depósitos aluviales gruesos:

Muestran cantos silíceos heterométricos y subredondeados de unos 3 – 4 centímetros. Se tratan de gravas con algo de arenas a arenosas. Sabemos que su compacidad es muy alta.

De los sondeos realizados se obtuvieron espesores de 5.30 metros en S – 1 y de 8.10 metros en el S – 2.

- Sustrato mioceno. Margas azules

Este sustrato es el más característico de la zona del valle del Guadalquivir. Representa el sustrato terciario en la zona de estudio. Tiene un color gris – verdoso y a veces gris – azulado (de ahí su nombre). Como se indica en el título es una formación miocena y se consideran materiales impermeables y no agresivos. Se localizan a unos 25.5 metros de profundidad de la superficie.

### 3.7 Geotécnia

Los resultados de los sondeos que se realizaron, nos descubrieron lo siguientes datos vistos desde techo a muro por:

- Rellenos antrópicos:

Compuestos por arenas y limos marrones, con gravas y restos cerámicos. En uno de los sondeos (S-2) se llevó a cabo un ensayo de penetración dinámica estándar, con el resultado: NSPT (2,60 – 3,20) = 23.

- Depósitos aluviales finos:

Arenas limosas y grises, con indicios de arcilla y pasadas limo-arenosas. De los ensayos realizados se obtuvo que se trataba de limos arenosos, los cuales tenían tramos de arenas con indicios de limo no plásticos.

El valor medio de los ensayos de penetración dinámica estándar se sitúa en NSPT. 7 – 8, que indica una consistencia blanda – media con  $Cu=0,50 \text{ kg/cm}^2$ .

Se realizaron ensayos de presión de hinchamiento sobre las muestras S – 1 (8 – 8,60 m.) y S – 2 (6 – 6,60 m.), dando como resultado un valor de  $1T/m^2$  en las dos.

- Depósitos aluviales gruesos:

Encontramos cantos silíceos heterométricos y subredondeados de unos 3 – 4 centímetros. Gracias a los resultados obtenidos podemos ver que se trataría de gravas con algo de arena a arenosas, y desde indicios a algo – bastante limo no plástico. Su compacidad es muy alta: NSPT (medio)  $\approx 57$ .

- Sustrato mioceno. Margas azules:

Siguiendo un análisis geotécnico, estas “margas” deben ser calificadas como arcillas duras, algo margosas, fisuradas que presentan resistencias a compresión simple medias, gracias a la información que nos ofrecen los ensayos efectuados, de  $6 \text{ kg/cm}^2$ .

Por los sondeos efectuados, estos materiales están a una profundidad de 25.50 m, cantidad que ha sido verificada ya que ha sido la misma en ambos. Se consideran materiales impermeables. Una vez finalizados los ensayos y gracias a los resultados obtenidos podemos afirmar que se tratarían de arcillas con indicios de arena, de plasticidad media, y consistencia muy dura ( $qu$  (medio).  $8,40 \text{ kg/cm}^2$ ), NSPT (medio)  $\approx 31$ .

### 3.8 Climatología

Estamos ubicados al Sur – Oeste del municipio de Sevilla, en la frontera que colinda con el municipio de San Juan de Aznalfarache, en la ribera del río Guadalquivir. Los datos meteorológicos corresponden a la estación 5790 – Sevilla (Tablada). Conociendo el dato anterior podemos consultar otros muchos que nos facilitará la Agencia Estatal de Meteorología, concretamente los datos climáticos obtenidos son consecutivos desde el año 1922 a 2009.

Nos encontramos ante un tipo de clima continental – cálido. En éste tipo de clima sabemos que los inviernos son ligeramente fríos llegando a alcanzar mínimas de hasta  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Las temperaturas diurnas son generalmente moderadas y del entorno de entre  $15\text{ y }25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Por el contrario los veranos son muy calurosos, incluso pueden prolongarse más meses de lo normal, hablamos de mayo a octubre, con temperaturas máximas que pueden llegar a alcanzar los  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante el día y durante la noche no bajar de los  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Como hemos dicho, los veranos pueden prolongarse más meses de la cuenta, por lo que las transiciones invierno – verano y verano – invierno son igualmente cortas. El verano no suele dejar precipitaciones, que se suelen producir entre los meses de octubre a abril. Las máximas precipitaciones en la zona alcanzan el valor de 145 mm en 24 horas, considerando un periodo de retorno de 500 años.

### 3.9 Trazado geométrico

Ya sabemos que queremos salvar el obstáculo de la SE-30, para lo que necesitamos cumplir una serie de requisitos:

- La Ronda de circunvalación SE-30 no tiene una mediana que separe los carriles de ambos sentidos, por lo que no podremos apoyar la pasarela colocando una pila en mitad del trayecto. Debemos salvar una luz mínima de 50 m. En nuestro caso particular, el vano sobre la SE-30 tendrá una luz de 58 m para cumplir esta condición.
- La longitud del itinerario peatonal completo, contando con las vías de acceso que van desde el puente de Hierro hasta la pasarela y desde la misma hasta la unión con el carril bici de Sevilla, debe tener una longitud aproximada de unos 400 m, en nuestro proyecto tendremos unos 442.89 m.
- De la longitud anterior, la estructura que estamos diseñando y comprobando, lo que se ha introducido en el programa de cálculo y es objeto de representación en los planos y demás, es de unos 158.4 m. La longitud establecida debe estar sobre unos 160 m.
- Debemos también cumplir con los requisitos que se establecen para el uso de la pasarela por bicicletas y por personas de movilidad reducida. Se dispondrán 2 carriles de 2 m cada uno y el ancho total será de 5 para poder ser usada por peatones y ciclistas y así quedando un pequeño ancho libre. Las rampas de acceso tendrán una pendiente inferior o igual al 8%.

## 4 POSIBLES SOLUCIONES

**E**n este apartado vamos a exponer las diferentes alternativas que se pueden formular para dar respuesta al proyecto objeto del trabajo y la que finalmente hemos adoptado, razonando los motivos que nos han llevado a dicha elección. Para cumplir con los objetivos del proyecto, se analizaron tres alternativas teniendo en cuenta dos variables conceptuales para el trazado de la pasarela: recto o curvo. El objeto de este proyecto es el del diseño y comprobación estructural de una de las tres alternativas conceptuales propuestas: la pasarela de trazado curvo. Realizaremos a continuación una exposición de estas tres alternativas propuestas y de sus posibles pros y contras.

### 4.1 Análisis de alternativas

#### 4.1.1 Solución curva con tubo estructural como principal soporte

Esta opción presenta como inconveniente su complejidad geométrica, la mayor de las que se han considerado, pero también es la más sencilla estéticamente. Se trata de una pasarela de trazado curvo doble (en planta y perfil), sustentada por un arco de sección tubular con dos pilas de apoyo intermedias, a cada lado de la autovía y por tanto sin apoyos sobre la misma. Para sustentar el tablero de hormigón, de 5 metros de ancho, se disponen empotradas al tubo central unas vigas transversales, de perfil triangular, realizadas con perfiles IPE. Estas vigas en voladizo -vigas ménsula- por su forma hace que la sección mixta acero-hormigón de la pasarela presente una forma aerodinámica, aprovechando mejor el material (voladizo triangular) confiriéndole ligereza visual.

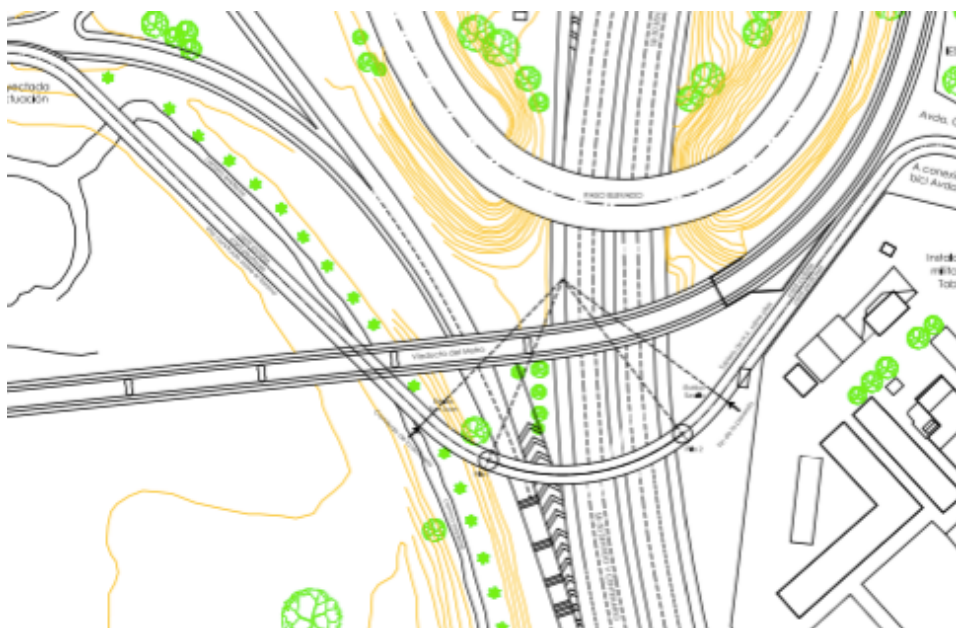


Figura 19. Pasarela sobre la Ronda SE-30 en Tablada. Ubicación de la actuación



#### 4.1.2 Solución recta con el tubo estructural como principal soporte

La sección transversal de esta opción es exactamente igual que la anterior, la diferencia radica en que en este caso la estructura será recta, para lo cual deberán adaptarse los caminos de acceso a ella para poder formar una línea recta antes de llegar, lo que conllevará más movimiento de tierras y más formación de firmes:



Figura 20. Posible solución de la pasarela con trazado recto.

Aclarar que aunque la estructura en este caso sea recta, seguimos teniendo el arco que lo forma el tubo, ya que es una forma de soportar mejor las solicitaciones a la que estará expuesta la estructura durante su vida útil.

#### 4.1.3 Solución recta con viga mixta empotrada en dos pilas-pórtico triangulares de hormigón

En este caso objeto del proyecto aprobado inicialmente por la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía, la viga se encuentra sustentada por 6 péndolas metálicas ancladas a 2 mástiles inclinados y a la propia viga, es un modelo a escala que puede llegar a asemejarse un poco al Puente del Alamillo en Sevilla. La sección transversal en este caso está formada por un solo segmento circular sobre el que irá el hormigón macizo. Esta solución presenta el problema que hablábamos antes de que necesita más movimiento de tierras por ser recta y adaptar los caminos de acceso. A parte, en este caso, el tema de la sustentación de la viga por péndolas es algo que encarece la pasarela y parece demasiado enrevesado para una estructura que será utilizada por peatones y ciclistas y no necesita tanta extravagancia. Esta opción viene de un proyecto real que

hemos encontrado para inspirarnos y del que mostramos una imagen para que se vea mejor la idea que puede ser un poco difícil de explicar sólo con palabras. La imagen la hemos obtenido del proyecto “PASARELA SOBRE LA RONDA DE CIRCUNVALACIÓN SE-30 EN TABLADA (SEVILLA)”

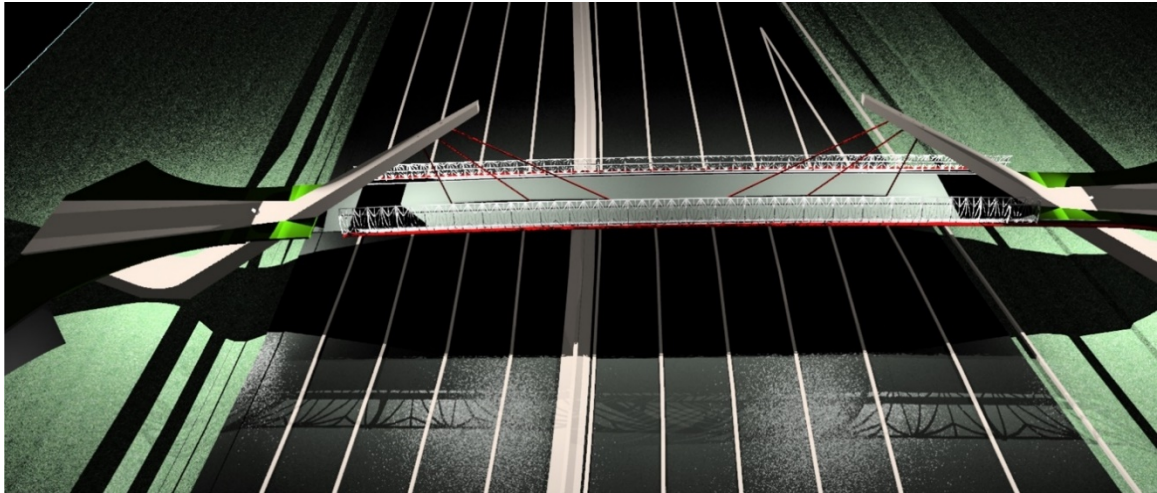


Figura 21. Modelo de la pasarela del proyecto “Pasarela sobre la ronda de circunvalación se-30 en tablada (Sevilla)”

#### 4.2 Solución adoptada

Finalmente se ha optado por la opción número 1, cuyo alzado puede verse en el plano 6 y algunas vistas gracias a un modelo digital en el plano 9, que era la que mejor se adaptaba al medio en el que se encontraba y la que más facilidades daba a los usuarios debido a que su trazado geométrico curvo sigue la forma natural del movimiento que describe, es decir, las soluciones rectas tenían la necesidad de dibujar una curva hacia fuera y después otra curva hacia adentro para poder llegar a trazar la línea recta:



Figura 22. Vista en planta del trazado en caso de hacer la pasarela recta.

Como dijimos, esto es menos confortable para los usuarios y necesita un mayor volumen de movimiento de tierras y trabajos previos para conseguirlo, que suele ser una de las partidas que más encarece los proyectos, por tanto hemos optado por alejarnos de esta solución.

Es cierto que la solución adoptada, que veremos con más detalle a lo largo del presente trabajo, puede complicar el cálculo por sus peculiaridades como es la curva que describe, así como complicará el trabajo ya que plasmar esta idea es más complicado y tendremos que recurrir al diseño en AutoCAD para después utilizar los puntos e introducirlos en el programa de cálculo en lugar de hacerlo directamente sobre la interfaz de éste o porque al ser curva no puede coincidir con un sistema de coordenadas global y será necesaria la creación de diferentes sistemas locales, influyendo esto luego en el trabajo con las cargas aplicadas a la pasarela y las direcciones a tomar sobre ella. Pero aún así merece la pena y creemos que es la mejor solución estética y la más confortable, como ya hemos dicho, para los ciclistas sobre todo. Ya se mostró una imagen de cómo es el trazado que sigue la pasarela en el apartado de posibles soluciones.

### 4.3 Justificación del trazado de la pasarela

El trazado tanto en planta como en alzado de la pasarela en cuestión aparece determinado por condicionantes normativos, conceptuales y estéticos que pasamos a explicar a continuación. El principal obstáculo a salvar, la SE-30, no dispone de mediana, con lo que el vano sobre la misma debe salvar una luz mínima de 50 metros, evitando el apoyo sobre la autovía. De las distintas alternativas, el trazado curvo nos pareció el más funcional, máxime teniendo en cuenta el doble uso de la pasarela: peatonal y ciclista. Por otro lado, la infraestructura proyectada debía ser accesible y por tanto cumplir con la normativa vigente en cuanto a la accesibilidad en las infraestructuras (Decreto 293/2009, de 7 de julio, por el que se aprueba el Reglamento que regula las normas para la accesibilidad en las infraestructuras, el urbanismo, la edificación y el transporte en Andalucía). El artículo 19 de esta normativa establece las normas a cumplir en puentes y pasarelas, siendo éstas las siguientes:

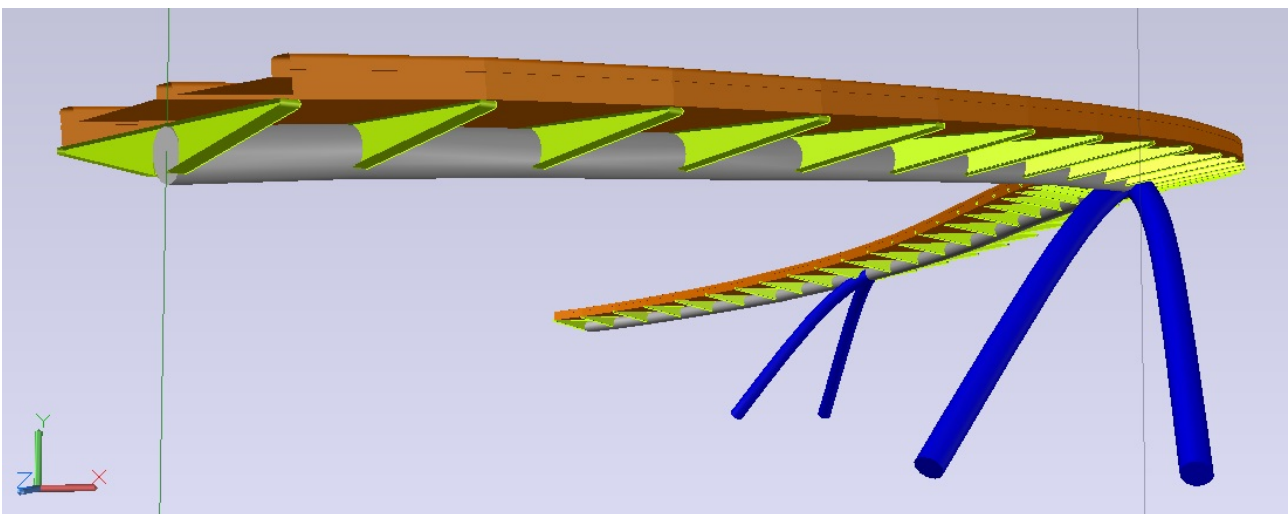


Figura 23. Imagen en perspectiva de la pasarela



- La anchura mínima de paso libre de obstáculos en tramos horizontales deberá ser de 1.6 m, debiendo estar separada, en caso de itinerarios mixtos, de la zona de circulación de vehículos mediante bandas de señalización visual y táctil, bolardos u otros elementos. En nuestro caso, al ser una pasarela destinada eminentemente al tráfico de bicicletas y ocasionalmente al tránsito de peatones, se ha decidido no realizar esta división, creando 2 carriles de 2,50 m de ancho.
- La pendiente longitudinal máxima del itinerario peatonal no superará el 8% y la pendiente transversal máxima será del 2%. En nuestro caso cumplimos con la pendiente longitudinal máxima. En cuanto a la pendiente transversal máxima se le ha dado una pendiente del 2.56% (en 1.95 m hay una diferencia de cota de 5 cm) que es similar al máximo exigido, con objeto de garantizar la evacuación de agua en la pasarela.
- La pasarela propiamente dicha se ha diseñado con una rasante de pendiente constante igual al 8%. Se ha comprobado que con dicha rasante se cumplen los gálibos mínimos a salvar en autovías por los pasos elevados: 5,50 m en todos los puntos de la plataforma. Esta pendiente constante hace que la geometría del arco alabeado sea continua, sin quiebros, componiendo a una estructura armónica y estilizada.

#### **4.4 Consideraciones estructurales derivadas del trazado: la viga curva**

De acuerdo a la planta prevista en proyecto, de trazado curvo, y la sección, de pendiente constante, se obtiene un arco alabeado o de doble curvatura que puede verse en plano 9. Por ello, podemos obtener una serie de conclusiones que tienen especial relevancia desde el punto de vista estructural. Por ser curva, la aparición de una curvatura en la viga induce la aparición de un acoplamiento entre el momento flector y el torsor, provocando la aparición de un momento torsor. Aparte del acoplamiento flector-torsor, debido a la curvatura, las sobrecargas también poseen una excentricidad que también induce la de momentos torsores.



## 5 DESCRIPCIÓN DE LA PASARELA

---

Se ha diseñado la pasarela con una sección mixta compuesta por una viga principal de acero laminado de sección tubular, que soportará el tablero de hormigón armado, unido a la viga de acero mediante una serie de vigas ménsula transversales de acero laminado (IPE). Al combinar dos o más materiales en un elemento estructural, si se hace de forma correcta, se pueden aprovechar las ventajas de estos materiales y suplir sus desventajas. El principal objetivo al hacer vigas con distintos elementos es que ésta se comporte como una viga de un solo miembro, sin embargo, un gran obstáculo para cumplir dicha propiedad es que los esfuerzos horizontales afectan principalmente las uniones entre cada uno de los elementos. Al diseñar una viga compuesta, se debe establecer el tipo de unión que se emplea, según sea el material y los distintos requerimientos.

Para estudiar el comportamiento de la estructura mixta se propone desarrollar modelos tridimensionales, basados en el método de los de elementos finitos. En la actualidad, dentro del campo estructural, el MEF (método de elementos finitos) cada vez es más común en la ingeniería de construcción para elementos tipo losa o pantalla. En el presente proyecto, con la ayuda de un software de simulación de elementos finitos (ANSYS), se ha diseñado una viga compuesta de acero y hormigón armado (prelosa colaborante + losa in situ). Aparte de los fundamentos teóricos necesarios para el cálculo de la viga compuesta, se ha realizado una labor de investigación en cuanto al programa de elementos finitos con tal de hacer que la simulación se aproxime lo máximo posible a los resultados reales.

Como se ha dicho, el software elegido para llevar a cabo el trabajo ha sido ANSYS, en su variante “Mechanical APDL 16.1”. Lo que nos permite modelar la estructura, introducir las características de los materiales, aplicar las cargas correspondientes y obtener los esfuerzos sobre los distintos elementos para poder conseguir finalmente los resultados más realistas posibles.

### 5.1 Descripción detallada por partes

#### 5.1.1 Estructura

Siguiendo algunos datos del proyecto “PASARELA SOBRE LA RONDA DE CIRCUNVALACIÓN SE-30 EN TABLADA (SEVILLA)” vamos a dividir el nuestro en 5 tramos para facilitar el estudio de la estructura, de la que ya hemos dicho algunos datos y que describiremos más detalladamente en este apartado.

La pasarela tiene una longitud de 89.25 m entre las pilas, y una luz de 55 m que va de pila inclinada a pila inclinada. Como hemos dicho la dividiremos en 5 tramos:

- Tramo 1: considera la rampa de acceso del lado de San Juan que está formada por una losa de hormigón. Tendrá una longitud total de 20 m y es la que va desde el estribo 1 a la pila 1 como se puede observar en el plano P.05. El estribo y la pila 1 se encuentran cimentados mediante cimentación profunda formada por 4 pilotes prefabricados de hormigón armado tipo T-400, de 20x20 cm y 24 m de longitud.
- Tramo 2: principio de la estructura mixta formada por el tablero de hormigón y el tubo de acero apoyada sobre la pila 1 que es el principio de la estructura que estudiamos por el lado de San Juan. Tiene una longitud de 20 m que comprende la zona entre la pila 1 y la pila inclinada 1. La pila inclinada 1 está cimentada mediante pilotes inclinados para soportar de manera óptima las fuerzas que el arco de la estructura transmite, ya que éstas tendrán cierto ángulo con respecto a la vertical por la peculiar forma que tiene.
- Tramo 3: es la zona de la luz de la estructura, la cual tiene 55 m de longitud y pasa sobre los carriles de la SE-30, de ahí su mayor luz para que no haya ningún apoyo que dificultara el paso de vehículos. Por el mismo motivo, este tramo tiene una altura mínima de 5.51 m por el lado de San Juan, 6.32 por el lado de Sevilla y un máximo de 8.23 m en la zona central, todo lo cual para respetar los gálibos mínimos de altura que se exigen para la SE-30.
- Tramo 4: podemos decir lo mismo que del tramo 2 pero en este caso es de apoyada sobre la pila 2 y la pila inclinada 2 tienen las mismas características que la pila 1 y la pila inclinada 1 respectivamente.
- Tramo 5: asumimos que es el simétrico del tramo 1, por lo que podemos decir que tiene las mismas características que el mismo y de igual forma el estribo 2 con el estribo 1.

La sección tipo de la estructura de estudio, que se definirá con más detalle en el próximo apartado, es continua disponiendo de juntas únicamente en las pilas 1 y 2 que es donde se unen con los tableros de hormigón que forman las rampas de acceso (tramos 1 y 5).

En las pilas, donde se produce la unión de las rampas de acceso con la estructura de estudio, la pasarela está apoyada mediante unos tacos de neopreno que permiten todos los movimientos rotacionales así como el movimiento horizontal para así absorber las acciones de la temperatura sin se que produzcan tensiones indeseables que puedan provocar el fallo de la estructura. De esta forma el esquema estructural simplificado de la pasarela quedará como se ve en la siguiente imagen:

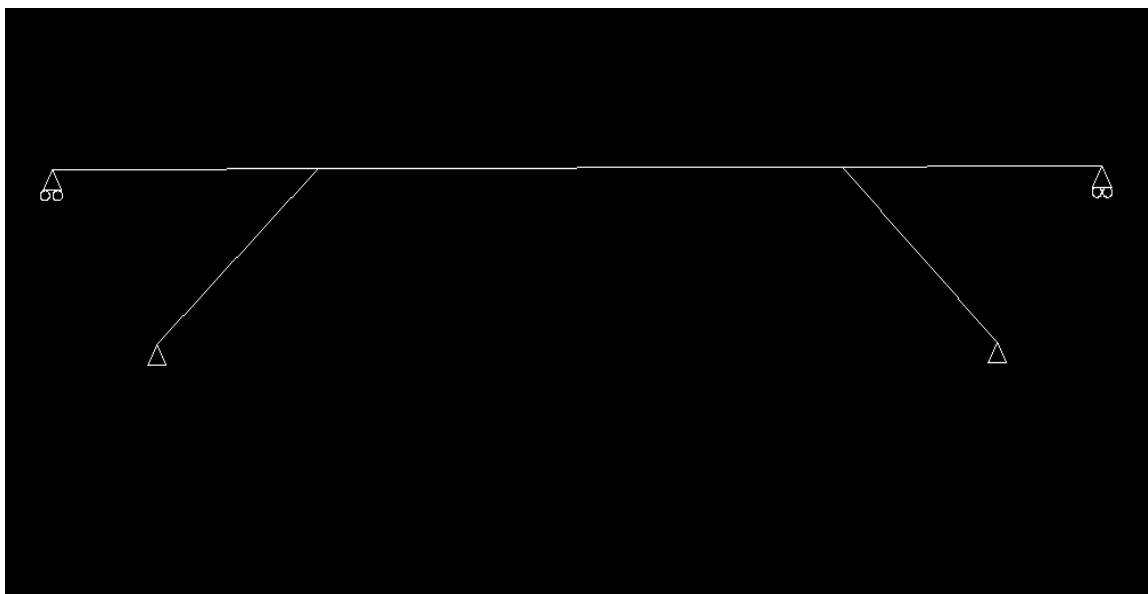


Figura 24. Esquema estructural simplificado

### 5.1.2 Sección tipo

La pasarela objeto de estudio consta de una sección transversal formada por diferentes partes:

- El tablero estará formado por placas de hormigón armado preparadas en fábrica de 0.20 m de espesor y de dimensiones 2.5x2.5 m que se ajustan sobre las costillas de IPE y el tubo que forma la directriz de la pasarela.
- El tubo principal que tiene un diámetro exterior de 0.711 m y un espesor de 0.016 m. De él salen los perfiles IPE en forma de voladizo y los estribos. Es el principal sustento de las cargas. Las características geométricas se han obtenido del prontuario UAHE-2001.
- IPE-500: Están a modo de voladizo soldados al tubo de la directriz y son los encargados de transmitir las cargas del tablero que estén fuera de la vertical del tubo principal. Estarán fijados al tablero mediante pernos conectores que aseguren el correcto comportamiento en conjunto de los dos materiales. Sus características geométricas se han obtenido del catálogo de perfiles ArcelorMittal, aunque debemos añadir que para dotar a la sección transversal de un diseño más aerodinámico, estas vigas ménsulas se fabrican con forma triangular, cortando el perfil en dos mitades dividiendo su alma y completando la parte del borde con una platabanda de las mismas dimensiones que un ala del perfil IPE-500 (ver plano 8).

Estamos ante una estructura mixta, ya que es la mejor forma de aprovechar bien los materiales. Se pueden diferenciar tres zonas en todo el trayecto, en cuanto a sección tipo se refiere, incluyendo vías de acceso y estructura propiamente dicha:

1) Caminos para conexión de la estructura con el carril bici existente. Tienen una anchura de 5 m que se reparten en 2.5 m para cada carril. En estos tramos la sección se encuentra formada por un terraplén que consta de una capa de suelo seleccionado de 0.50 m, una capa de zahorra artificial de 0.30 m de espesor y por último la capa de rodadura que se está formada por hormigón bituminoso en caliente del tipo AC16 surf D de 5 cm de espesor. Los taludes que forman el terraplén tienen una pendiente 3:2.

2) Rampas de acceso. El ancho del camino sigue siendo de 5 m, como será en todo el largo de la obra ya que es la normalizada, pero en este caso vemos reducido el ancho útil, ya que debemos añadirle las barandillas para seguridad de los usuarios. Estamos hablando de un ancho de 4.30 m que se reparte en 2.15 en cada carril. El material usado para las rampas son losas de hormigón armado sobre la que se añadirá una pequeña capa de pavimento.

3) Tramo de la estructura sobre la autovía. La sección tipo de este tramo está formada por tres partes que hemos descrito al principio del apartado, aunque debemos añadir que su ancho efectivo se verá reducido como ocurre en las rampas de acceso a causa del espacio ocupado por barandillas y objetos de contención.

### 5.1.3 Materiales empleados

#### 5.1.3.1 Acero

El material usado para la parte metálica de la estructura ha sido el acero S-355 con límite elástico 355 MPa. Es acero laminado en caliente, que se usa para el tubo estructural y para los IPE que actuarán a modo de voladizo.

El acero tiene una densidad de 78.50 kN/m<sup>3</sup>, el módulo de Poisson es 0.3 y el módulo de deformación es de 210 GPa.

Los datos expuestos sobre el acero utilizado en el proyecto son los que hemos tenido en cuenta a la hora de realizar el modelo con el programa de cálculo que se verá más adelante.

#### 5.1.3.2 Hormigón

El hormigón que se va a usar para el tablero de la estructura será el H-30. Este hormigón tendrá un módulo de deformación de 28.5768 x 10<sup>6</sup> kN/m<sup>2</sup>, que ha sido calculado con la fórmula de la Instrucción Española del Hormigón Estructural (EHE) que es la siguiente:

$$E_h = 8500 * \sqrt[3]{f_{ck} + 8}$$

Donde  $f_{ck}$  en este caso que estamos usando un hormigón H-30 es 30 MPa y obtenemos un valor de 28.5768x10<sup>3</sup> MPa, que tras hacer la conversión de unidades nos da el valor anterior.

Usamos todos los datos en las mismas unidades (kN y m) para así introducir correctamente los valores en el programa de cálculo y no obtener incoherencias que nos llevarían a resultados erróneos de los esfuerzos sobre la estructura.

### 5.1.3.3 Pernos conectadores

Los pernos necesitan una explicación fuera de las generalidades de los materiales antes citados debido a la falta de una norma específica europea que regule su uso y sus características.

Encontramos algunas pinceladas en normas americanas pero siempre debemos usar normas nacionales europeas, o en todo caso internacionales, donde se especifiquen unas características mínimas exigibles, cuando sea posible, según nos dice el Manual de aplicación de las Recomendaciones RPM-RPX/95.

El mismo documento nos ofrece una serie de características que vamos a usar en este caso para modelar correctamente los elementos conectores. A continuación se muestra una captura obtenida directamente de este manual:

Límite elástico mínimo [N/mm <sup>2</sup> ]	Tensión mínima de rotura [N/mm <sup>2</sup> ]	Alargamiento mínimo en rotura [%] <sup>(1)</sup>
350	450	15

<sup>(1)</sup> Medido en probeta normalizada de longitud  $L_0 = 5,65 \sqrt{A_0}$

Figura 25. Características pernos según el RPM-RPX/95

Las características geométricas de los pernos se obtendrán a partir de las especificaciones del Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón y lo veremos más adelante.

### 5.1.4 Drenaje

Nos centramos en el estudio del drenaje del tablero de la estructura que es la parte que estamos proyectando. El drenaje se realizará de manera libre, para lo cual se dotará al tablero de una diferencia de nivel, más elevado en la zona central y más bajo en la zona de los bordes, a modo de caída de dos aguas, con un bombeo del 2.5%, para facilitar la salida del agua y evitar acumulaciones en el paso de los usuarios que puedan causar caídas y resbalones.

La diferencia de nivel que decimos se conseguirá gracias a la capa de pavimento que se añadirá sobre las losas de hormigón, simplemente controlando el espesor de las capas y poniéndolo mayor o menor según convenga.

No vemos necesario la colocación de sumideros ni nada por el estilo al tratarse de una pasarela pequeña con un ancho poco significativo y que se caracteriza por su simplicidad y que está libre de obstáculos que puedan retener grandes acumulaciones de agua.

### 5.1.5 Señalización, balzamiento y defensas

Para disponer la señalización, balzamiento y defensas necesarias en la pasarela se seguirá la normativa española a tal efecto. Una vez finalizados los trabajos se repondrá la señalización que se haya visto afectada en la zona de la SE-30, así como eliminando la señalización provisional que se hubiera colocado en la fase de construcción por motivo de las obras. En las pilas se pondrán barreras de seguridad rígidas para intentar proteger de posibles choques. También se dispondrán captafaros a doble cara cada 3 metros. Aceptaremos las características que impone el CTE-DB-SUA para la colocación de barandillas como medidas de seguridad orientativas de las que colocaremos en la pasarela objeto de estudio:

#### 5.1.5.1 Altura

Las barreras de protección deben tener como mínimo una altura de 0.90 m. En nuestro caso las barandillas tendrán una altura de 1.25 m, por tanto se cumple el criterio.

#### 5.1.5.2 Características constructivas

- Se diseñará de forma que no pueda ser escalada por niños, para esto se dispondrá de forma que no tenga ningún punto de apoyo entre los 0.3 y 0.5 m medidos sobre la superficie del tablero y en la zona comprendida entre las alturas de 0.5 y 0.8 m sobre el nivel del tablero no podrá haber superficies horizontales con más de 0.15 m de fondo.
- No podrá tener aberturas lo suficientemente grandes como para que pase una esfera de 0.15 m de diámetro.
- Debe cumplir el criterio de resistencia de forma que soporte la sobrecarga de uso que establece la IAP-11, que es una fuerza horizontal de 1.5 kN/m aplicada en el borde de la barandilla.

Como puede verse en el plano P.08 se ha diseñado acorde con lo dispuesto en la normativa sobre accesibilidad y evitación de barreras arquitectónicas, para lo cual se han dispuesto dos pasamanos a diferente altura uno para los viandantes y otro para los pasajeros en silla de ruedas.

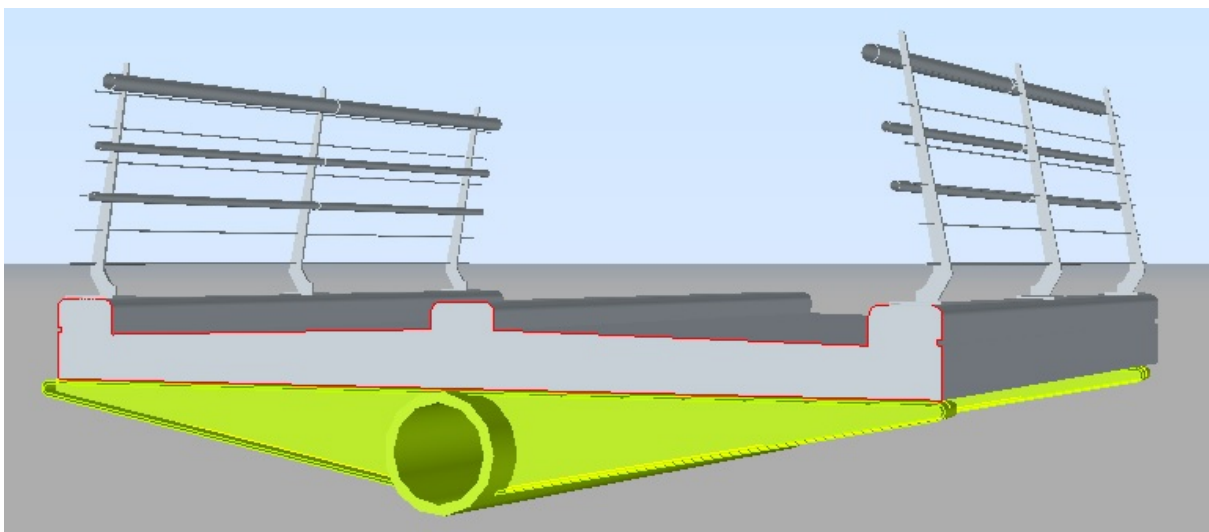


Figura 26. Vista de la barandilla



## 6 PROCESO DE EJECUCIÓN PREVISTO Y TRANSPORTE

---

**E**n este apartado vamos a enumerar el proceso que se seguirá para la construcción de la pasarela objeto de estudio.

En primer lugar se construirá la cimentación, se realizará el pilotaje correspondiente de las pilas y los estribos sobre los que se apoyará la estructura con las dimensiones y de la forma que se explicó en anteriores apartados. Luego se construirán las pilas y los estribos, todo esto mientras se preparan los caminos de acceso a la pasarela y se va realizando el movimiento de tierras necesario.

Una vez realizado todo el proceso y estén los caminos y los estribos y pilas preparados se procede de la siguiente forma:

1. Para la construcción del tubo es necesario su replanteo en taller debido a la dificultad de su trazado, posteriormente se irán ensamblando trozos previamente curvados que tengan como longitud máxima la de un camión estándar para este tipo de transporte. Nos referimos a camiones de unos 19 m. de largo, incluido el remolque de 6 ejes, y 4 m. de ancho. Este ancho nos limita a la hora de poder soldar las costillas de los IPE al tubo, por lo que esta operación se realizará en un taller dispuesto a pié de obra. Sabiendo las dimensiones estándar de los camiones sabemos que deberemos transportar el tubo en 7 partes de 13,3 m. cada uno aproximadamente.
2. Ejecución de las rampas de acceso y su unión con las pilas, así como las terminaciones y asfaltado de los caminos de conexión con el carril bici existente en el Puente de Hierro de San Juan de Aznalfarache y con la Avenida García Morato en Tablada (Sevilla). Simultáneamente, se transportará el tubo metálico por tramos y los perfiles para soldarlos in situ por la dificultad que conllevaría transportarlo al completo como ya hemos dicho.
3. Se sueldan las piezas de tramos del tubo para formar la viga tubular completa in situ, para ello será necesario disponer de una estructura de apeo de montaje mediante andamiada que conllevará ineludiblemente el corte provisional de la autovía de circunvalación SE-30. Los trabajos se planificarán para que el tiempo de corte sea mínimo y se dispondrán al efecto desvíos alternativos. En el sentido Huelva desde el puente del V Centenario, a la bajada del mismo, se llevará a efecto un desvío hacia el puerto de Sevilla, para continuar por la Avenida de Juan Pablo II, hasta incorporarse de nuevo a la autovía sentido Huelva-Aljarafe, a unos 300 metros del emplazamiento de la pasarela. Este

mismo desvío también sirve para el tráfico que desde el puente del V Centenario se dirija hacia La Cartuja-Patrocino por la carretera del muro de defensa (paralela al río). En el sentido Madrid-Cádiz, se utilizará el desvío anteriormente descrito por Avenida de Juan Pablo II y puerto, comenzando el itinerario a la altura del Instituto de Bachillerato Carlos Haya, en las inmediaciones de Tablada, y terminando con la incorporación al puente del V Centenario en la rotonda del puerto.

4. Colocación de la viga metálica mediante grúas sobre los apoyos provisionales previstos junto a las pilas. Dichos apoyos provisionales se colocarán según planos, de manera que no interfieran en el tráfico de la SE-30. Será necesario el corte total del tráfico durante una jornada nocturna para dicha maniobra.
5. Colocación de la prelosa prefabricada y de las armaduras suplementarias para el posterior vertido del hormigón sobre las pilas y la parte de prelosa que está sobre ellas para que el tablero actúe como uno solo con la posterior retirada de los apoyos provisionales una vez finalizada la conexión.
6. Hormigonado del tramo central de la losa superior de la viga metálica.
7. Colocación de barandillas y demás elementos de contención y hormigonado de los tramos laterales de la losa.
8. Ejecución de pavimentos y acabados.

# 7 MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

---

## 7.1 Software empleado

El software empleado de cálculo es el ANSYS 16.1 como se ha dicho anteriormente. La elección de este código comercial de elementos finitos de propósito general obedece a una serie de criterios los cuales pasamos a enumerar. Para realizar representaciones 3D del modelo estructural hemos empleado complementariamente el software AutoCAD, también se ha usado para la obtención de puntos del modelo y así facilitar la creación de la geometría en ANSYS. Para un predimensionamiento, tanteo de las secciones y comprobación se ha utilizado el software Cype 3D 2016.

ANSYS es un software de elementos finitos ampliamente difundido y usado, tanto en la industria como en entornos educativos y universitarios. Tal es el caso de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, donde nos imparten una serie de prácticas en varias asignaturas donde también tenemos que realizar algunos trabajos para poder superar dichas asignaturas.

## 7.2 Modelado de la geometría

Como se ha mencionado antes, para facilitar el proceso de la creación de la geometría se ha usado AutoCAD para obtener los puntos respecto a un sistema de referencia global que después se introduce en la interfaz de ANSYS mediante código para a partir de ellos crear líneas hasta formar la estructura con la que trabajamos.

El diseño de una geometría compleja lleva aparejado un modelado de la misma de forma también compleja. No obstante, mediante la metodología seguida, se puede realizar un modelado eficaz de la misma sin complicaciones excesivas. El proceso seguido para la asimilación de la geometría a la hora de obtención de las coordenadas de los puntos parte de la idea de la definición del Triedro de Frenet (Rodríguez Danta & Bellver Cebrenos, 2010). Explicamos el procedimiento a continuación:

a) Obtención de las coordenadas

La obtención de los puntos del trazado de la pasarela mediante el programa AutoCAD se puede realizar de una manera rápida mediante la rutina “.lisp PO2TXT”. Para su uso, basta con marcar en AutoCAD con la orden “PUNTO” los puntos que queramos trasladar del modelo ya diseñado y creado para después ejecutar la orden PO2TXT. De esta manera obtenemos un fichero .txt en el que nos aparecen las coordenadas. Las mismas pueden ser fácilmente tratadas en EXCEL para trasladarlas a un sistema local si las coordenadas del plano están en UTM, por ejemplo. Esto nos da facilidad para trabajar y manipular los puntos de forma sencilla.

b) Creación del sistema de coordenadas locales

Se crea un sistema de coordenadas locales en cada punto de definición del trazado de la pasarela. Estos sistemas de referencia locales estarán orientados hacia el siguiente punto del trazado de la pasarela y serán coplanarios con la sección transversal de la misma por el punto del trazado. Para ello suele ser necesario crear puntos auxiliares a uno de los extremos de la estructura para así orientar el último de los sistemas (para esto usamos el mismo procedimiento que en el a)

c) Introducción de los puntos del diseño en ANSYS

Se prepara el .txt de forma que contenga el código correcto que acepta el programa y se introduce en la línea de comandos.

d) Creación de líneas

Se crean las líneas de forma que vayan uniendo los puntos (llamados *keypoints*) de manera correcta para formar la geometría. Para la creación de estas líneas y aprovechando la numeración correlativa y ordenada de los puntos se pueden crear mediante bucles \*DO para ahorrar trabajo en cuanto a la creación de código y facilitar el procesador del programa.

Para la creación de las líneas en los estribos, debido a su singular forma curvada, se ha decidido crear las líneas rectas que unieran sus puntos para después y con la opción “LFILLT”, crear unas líneas auxiliares que unieran las ya creadas mediante curvas que se adaptaran correctamente al trazado deseado.

e) Creación de áreas

La creación de áreas se realiza de forma que queden encerradas en las líneas de la superficie de la estructura para que se ajusten, es decir, se usa la opción de crear áreas a partir de líneas en lugar de crearlas a partir de los puntos que puede llevar a que no tenga las dimensiones deseadas. Éstas son la base del tablero de la pasarela a las que se le asociará un elemento placa con las dimensiones correspondientes.

f) Consolidación de la estructura mixta

Hemos definido la geometría de la sección transversal de la pasarela de forma que se ajuste lo máximo posible a la realidad. Una de las características interesantes que debemos mencionar es

que hay una primera línea superior de puntos que serían la base del tablero, y más abajo vemos una línea de puntos que será la que haga de centro del tubo estructural. Hacemos esto para aprovechar la inercia del tubo, y que se haga notar el diámetro del mismo a la hora de soportar las cargas, pero para ello debe comportarse por igual tanto la base del tablero como la línea que representa el centro del tubo y así ser una estructura mixta, para lo cual hemos usado la opción “CERIG” que crea un conjunto rígido de forma que los puntos a los que se apliquen tendrán los mismos grados de libertad.

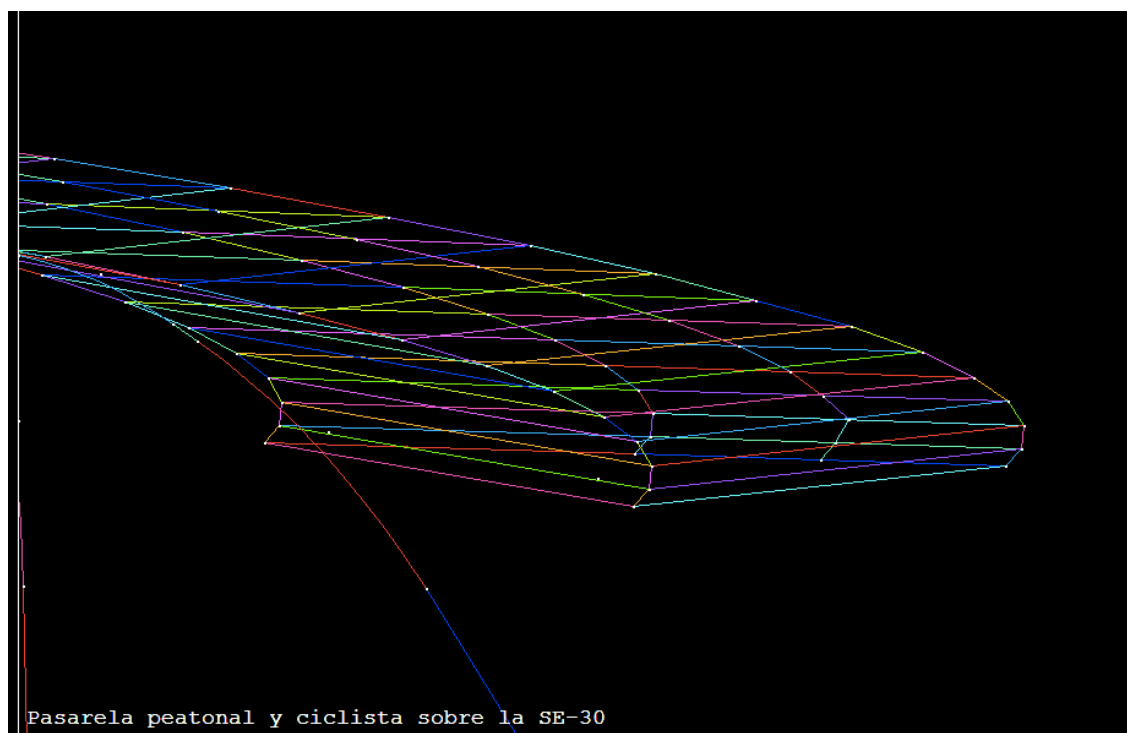


Figura 27. Modelo de *Keypoints* y líneas básico

## 7.3 Elementos a emplear

### 7.3.1 Elementos a emplear

En este epígrafe realizamos una discusión acerca de los tipos de elementos, sus capacidades y restricciones y el grado de representatividad buscado y alcanzado en la modelización de los distintos elementos que componen la pasarela.

#### 7.3.1.1 Elementos tipo placa

Dentro del software de elementos finitos a emplear para el cálculo estático, dinámico y de pandeo de nuestra pasarela, ANSYS, existen numerosos elementos empleados para representar el

comportamiento estructural de una placa. De acuerdo a la geometría prevista para nuestra pasarela, deberemos seleccionar aquellos elementos que cumplan una serie de requisitos que exponemos sucintamente a continuación:

- Deben ser elementos que a priori consideren la deformación por cortante, ya que nuestro canto es de una magnitud considerable y puede ser necesario tener en cuenta este efecto a la hora de resistir los esfuerzos y en el caso de una losa de hormigón introducir el armado correspondiente.
- Deben ser elementos cuyo comportamiento sea positivo a la hora de modelar placas con curvatura inicial elevada debido a los condicionantes del diseño estructural, así como condicionantes estéticos.

La losa de hormigón se ha modelado mediante el elemento SHELL181, el cual se le ha asociado a cada una de las áreas que definen la losa geoméricamente en el modelo. A este elemento se le han aplicado unas características adicionales mediante la opción KEYOPT, como por ejemplo KEYOPT (1) que se utiliza para aplicarle temperatura al elemento o el (9) que se usa para leer el espesor en la rutina inicial.

### **7.3.1.2 Elementos tipo viga**

En este caso para modelar las vigas que tendrá la pasarela hemos usado el BEAM188 que es un elemento tipo viga basado en la Teoría de Timoshenko que tiene en cuenta la deformación por cortante. En este sentido, la modelización mediante el elemento BEAM188 puede resultar muy aproximada, ya que modela el elemento como una “viga” de las dimensiones que posee en la realidad, lo cual es suficientemente aproximado y computacionalmente no costoso. Asimismo, el modelado supone, por simplicidad, la viga de sección constante.

Es usado tanto para el tubo estructural, como para los estribos y los IPE que hacen de voladizos. Las características de los diferentes tipos de secciones se verán más adelante.

## **7.3.2 Secciones de los elementos**

Pasamos a definir las diferentes secciones que se van a utilizar para formar la estructura.

### **7.3.2.1 Tubo portante**

Las características de las secciones se han introducido al programa mediante los comandos SECTYPE, SECOFFSET y SECDATA, gracias a estas opciones hemos ajustado cada una para conseguir los acoplamientos y los contactos óptimos.

En el caso particular del tubo portante, en el comando SECTYPE se ha usado la opción BEAM → CTUBE para que actuara como un tubo de diámetro y espesor a definir.

El SECOFFSET se es el comando encargado de ajustar la sección a la geometría a la que se le vaya a asociar. En este caso, como queremos asociar la línea que queda debajo del tablero como el centro del tubo, hemos tenido que usar la opción USER dentro del SECOFFSET para poder definirlo de manera que ponemos las coordenadas “y” y “z” respecto a esa línea para ajustarla.

Por último usamos el SECDATA para introducir tanto el radio exterior como el espesor de la sección que como ya sabemos es de 0.5335 y 0.030 m respectivamente.

Mostramos un *pantallazo* del código introducido en el programa para entender mejor la operación realizada.

```
!! 1- TUBO DIRECTRIZ (1067*30)

SECTYPE,1,BEAM,CTUBE,,0
SECOFFSET,USER,0,0.165
SECDATA,0.5335,0.5335
```

Figura 28. Extracto de código (tubo principal)

Ahora vemos una captura realizada directamente del programa ANSYS donde se muestra que, efectivamente, se ha introducido la sección buscada.

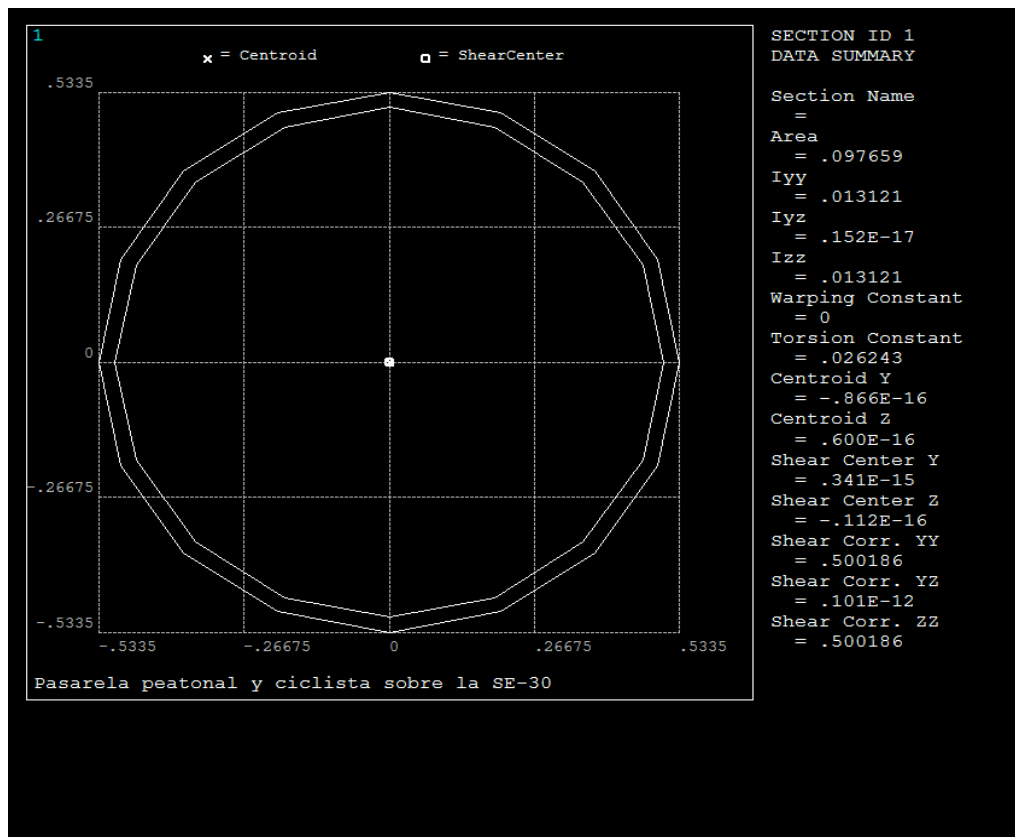


Figura 29. Sección del tubo principal



### 7.3.2.2 Voladizos

Como hemos nombrado en varias ocasiones para los voladizos que estarán soldados al tubo serán vigas del tipo IPE, más concretamente IPE 500 de la que hemos introducido sus características geométricas tomadas de catálogos de fabricantes.

Se ha introducido mediante el mismo procedimiento que hemos visto en el epígrafe anterior, utilizando los comandos pero en este caso de distinta forma. Ahora estamos hablando de perfiles en I por lo que introducimos la opción SECTYPE → I.

En este caso vamos a orientar los perfiles mediante los sistemas de coordenadas locales creados que van en función de la curvatura de la pasarela. Al haber perfiles a ambos lados de los sistemas locales de los que hablamos, es necesario orientar cada grupo de una forma distinta ya que unos tendrán unas coordenadas positivas y los otros las tendrán negativa en función del lado en el que se encuentren. Podemos ver este proceso escrito en el código:

```
SECTYPE,2,BEAM,I,,0
SECOFFSET,USER,0,-0.5
SECDATA,0.2,0.2,0.5,0.016,0.016,0.0102

SECTYPE,3,BEAM,I,,0
SECOFFSET,USER,0,0.5
SECDATA,0.2,0.2,0.5,0.016,0.016,0.0102
```

Figura 30. Extracto de código (ménsulas)

La sección de ambas es la misma, sólo cambia la orientación por lo que no se puede diferenciar y por tanto vemos la sección transversal que es común:

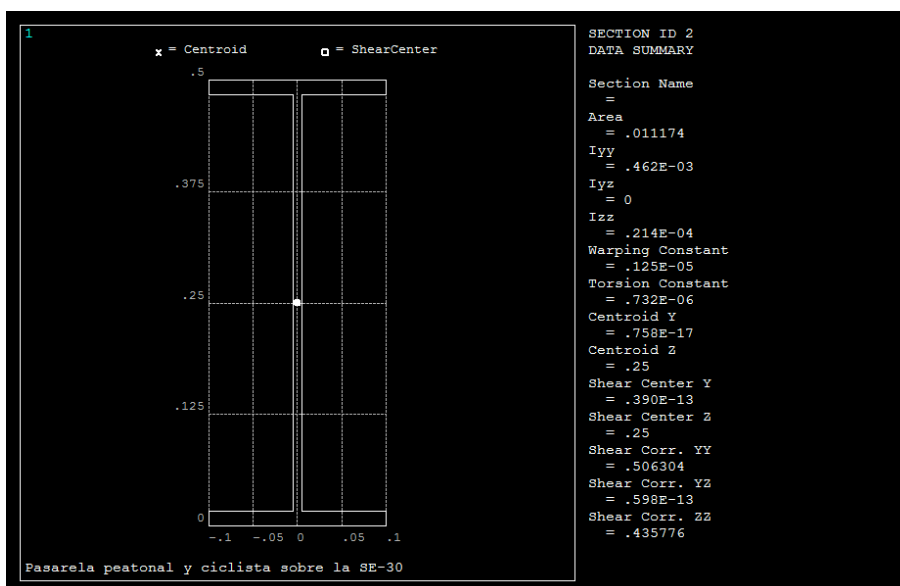


Figura 31. Sección de IPE

### 7.3.2.3 Tubo estribos

Es exactamente el mismo procedimiento que el del tubo portante pero en este caso se asocia la sección a las líneas que en el modelo geométrico son los estribos:

```
!! 4- TUBO ESTRIBOS: (1067*30)
SECTYPE,4,BEAM,CTUBE,,0
SECOFFSET,CENT
SECDATA,0.5035,0.5335
```

Figura 32. Extracto de código (estribos)

### 7.3.2.4 Losa hormigón

En cuanto a la losa de hormigón, aunque el procedimiento es el mismo, los pasos que damos tienen algunos cambios respecto a lo visto en las secciones anteriores. En este caso introducimos por comandos la opción SECTYPE → SHELL por ser una sección en forma de placa. Ahora la línea de código que contiene el SECOFFSET no la define el usuario como pasaba en las anteriores secciones (USER) sino que directamente le decimos donde queremos que nos coloque el elemento respecto a la entidad geométrica que se le vaya a asociar. Como sabemos que el elemento placa se asociará a las áreas creadas en la superficie de la pasarela, queremos que la losa de hormigón se cree sobre estas áreas, así que debemos decirle al programa que lo ejecute de la siguiente forma:

```
!! 5- LOSA
SECTYPE,5,SHELL
SECOFFSET, TOP
SECDATA,0.2,2,0,3
```

Figura 33. Extracto código tablero

Gracias a la función TOP del SECOFFSET conseguimos el efecto que deseamos, y con el comando SECDATA le damos las propiedades geométricas a la sección, como son espesor de la misma, el material que es el hormigón y se define con el número 2 y otros datos que vienen por defecto respectivamente.



Figura 34. Sección del tablero

## 7.4 Mallado

Para el mallado del modelo de la pasarela se ha procedido a hacerlo por secciones, es decir, se ha ido mallando de arriba abajo por separado para otorgarle a cada elemento y a cada parte de la estructura un mallado acorde con sus necesidades. Por ejemplo el mallado de la losa de hormigón será algo uniforme y no necesitará una gran densidad mientras que la malla que tendrá la zona próxima a la unión de los estribos con el tubo portante será mucho más fina.

### 7.4.1 Mallado de áreas

Para el mallado de áreas, en primer lugar se han seleccionado las áreas para agregarle atributos necesarios mediante la opción AATT. Se les ha atribuido un material, una sección, etc. Para después seleccionar el tamaño que queremos de elementos mediante AESIZE y después mallarlas con AMESH. En este caso hemos elegido mallar con elementos de 0.2 m ya que en el tablero no es necesario afinar tanto.

Debemos tener cuidado a la hora de mallar las áreas porque la malla debe ser continua, es decir, al tener unas áreas junto a otras que cada una se malla de forma individual, hay que prestar especial cuidado a que estén malladas igual para asegurar la continuidad de la que hablamos.

La losa de hormigón después de ser mallada queda de la siguiente forma:

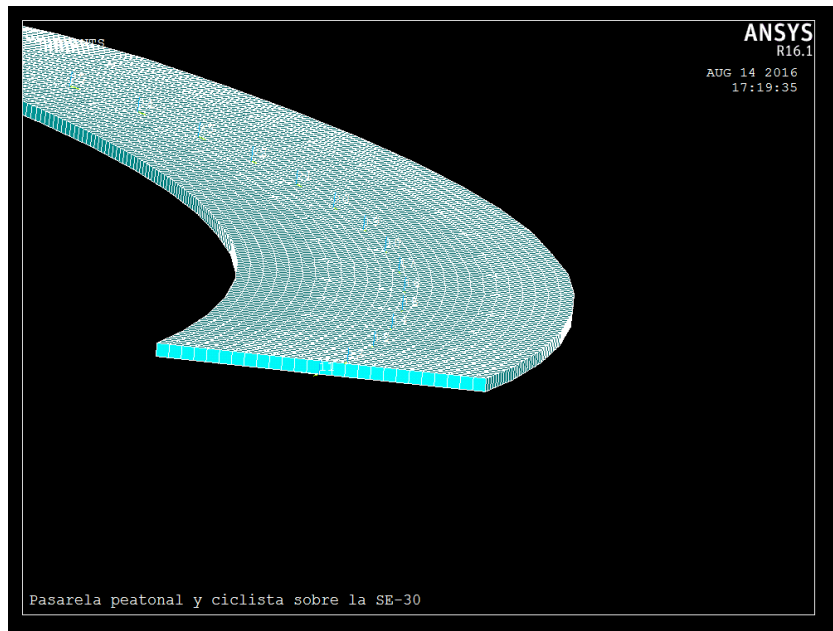


Figura 35. Mallado del tablero

#### 7.4.2 Mallado del tubo

El mallado del tubo se lleva a cabo con el mismo procedimiento que antes. En primer lugar se seleccionan las líneas a las que se les va a atribuir las propiedades del tubo y luego, en este caso, se usa la opción LATT para añadir atributos y la opción LESIZE para el tamaño de los elementos quedando así:

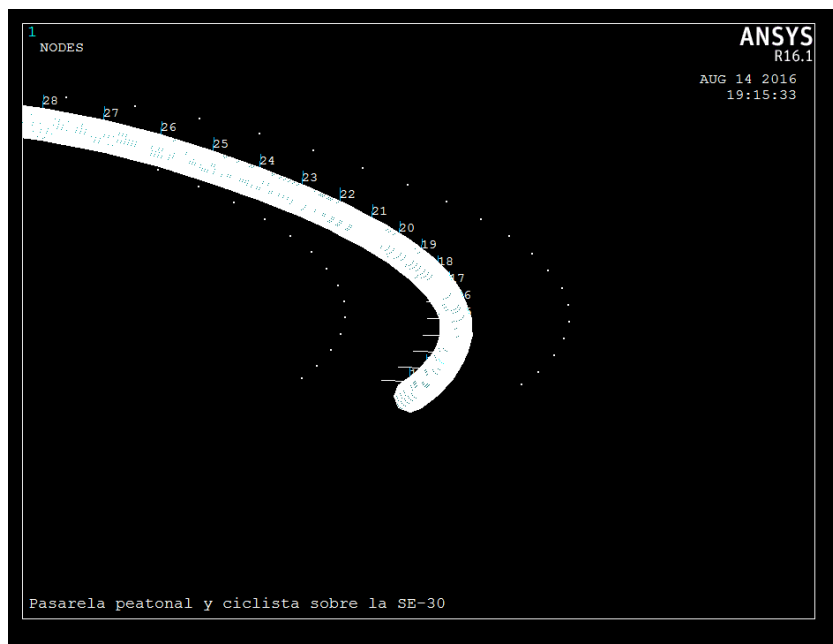


Figura 36. Mallado del tubo (1)

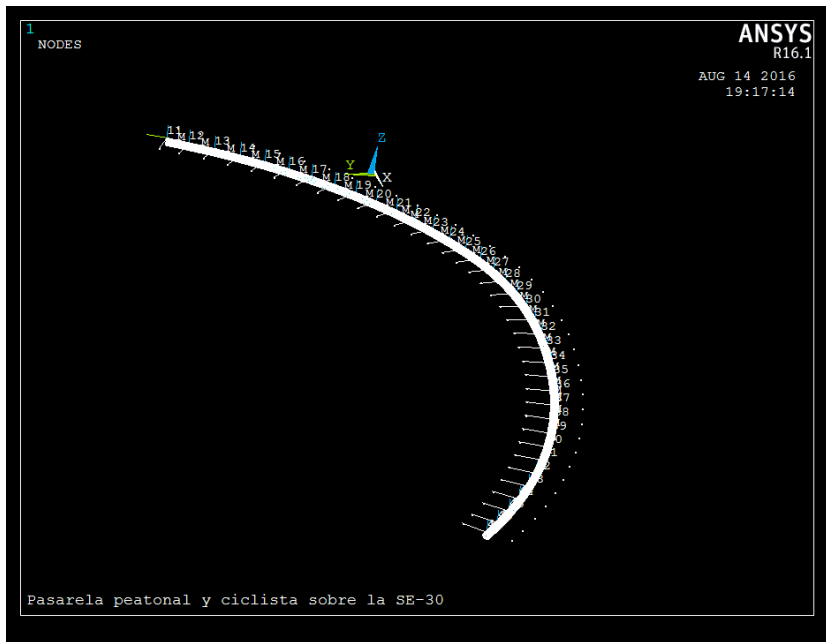


Figura 37. Mallado del tubo (2)

### 7.4.3 Mallado de los voladizos

Igual que en el mallado del tubo, se seleccionan las líneas que vayan a contener los voladizos, se le agregan atributos y se le añade el tamaño de los elementos y demás para obtener lo que mostramos en la captura que se a continuación:

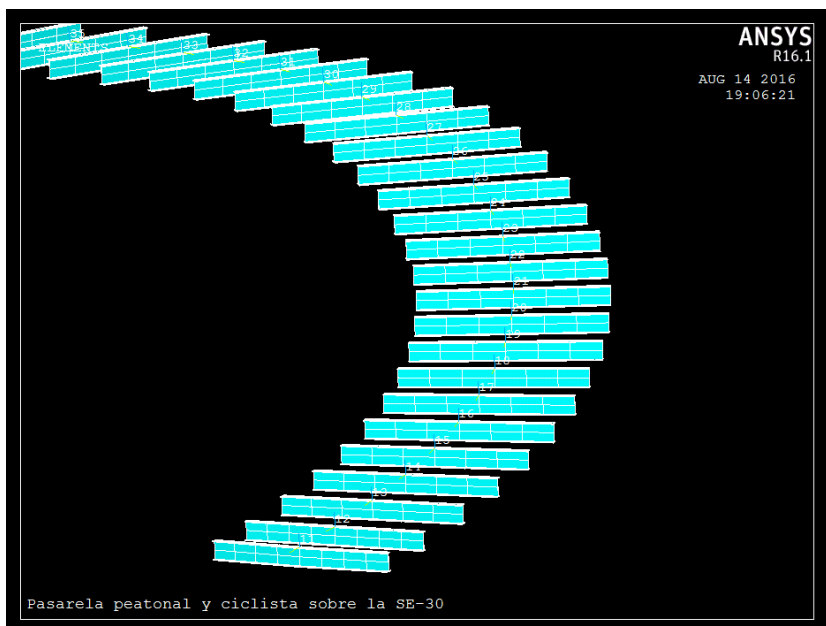


Figura 38. Mallado de ménsulas

#### 7.4.4 Mallado de estribos

Mismo procedimiento que los anteriores y podemos ver los resultados en las imágenes siguientes:

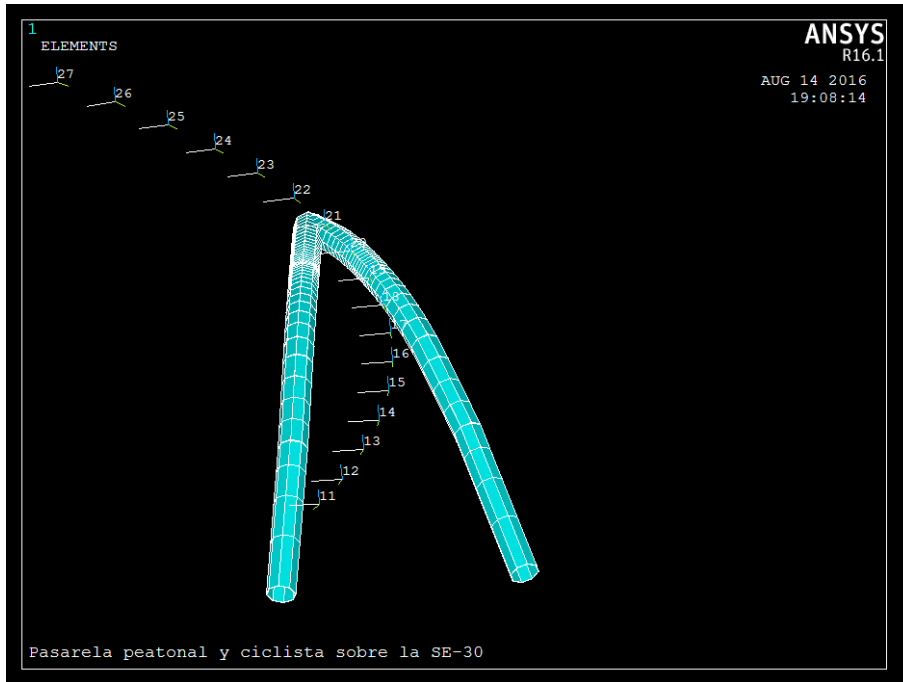


Figura 39. Mallado de estribos (1)

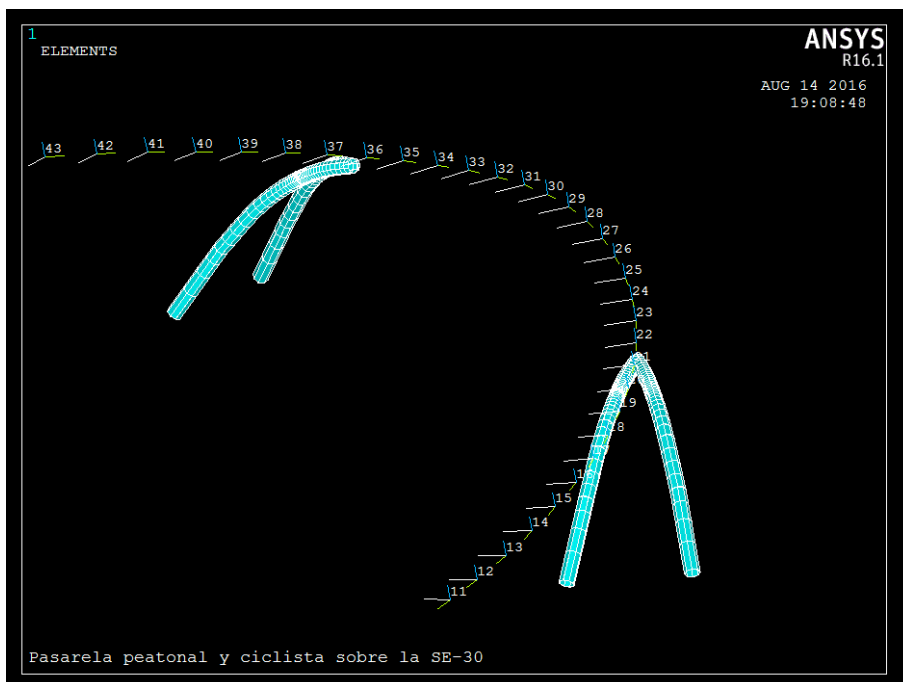


Figura 40. Mallado de estribos (2)

Para finalizar con el apartado del mallado vamos a visualizar cómo queda la estructura completa después de unir todas las partes anteriormente mostradas. Es una representación muy real del aspecto que tendrá la pasarela:

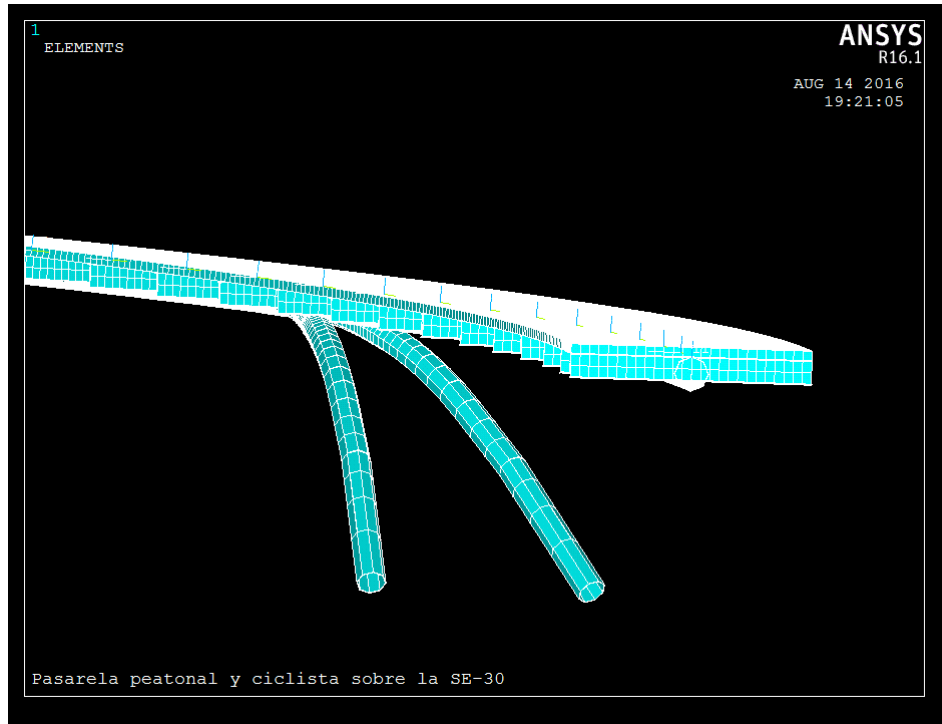


Figura 41. Estructura mallada (1)

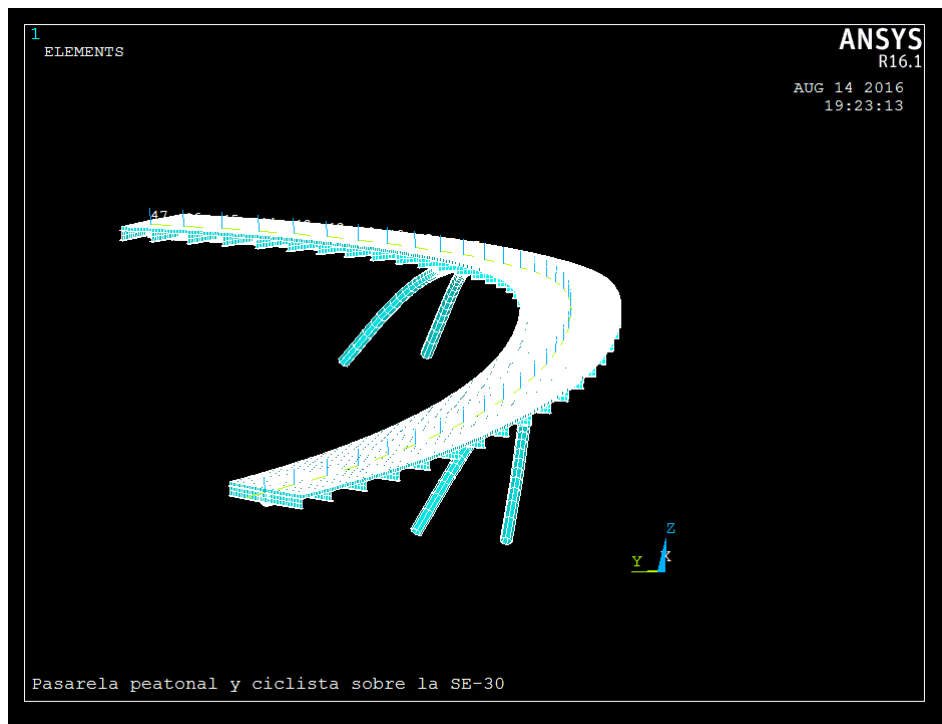


Figura 42. Estructura mallada (2)



## 8 CARGAS CONSIDERADAS

---

**E**l correcto modelado de las cargas es importante para que la estructura se comporte de la manera más parecida a la realidad. Por eso debemos hacer lo posible para que las cargas estén bien introducidas en el programa de cálculo y así cuando hagamos los análisis podamos ver, de manera muy parecida, cómo se comportará la estructura ante las diferentes solicitaciones.

### 8.1 Peso Propio

Para introducir las cargas de peso propio en el programa basta con aplicarle el valor de la gravedad en la dirección negativa del eje z mediante la opción “ACEL” ya que todas las secciones que hemos introducido y mallado antes estaban asociadas a unos materiales, a los cuales les introdujimos el peso específico por lo que directamente se aplica el peso propio de éstos dependiendo de su volumen.

### 8.2 Cargas muertas

Las cargas muertas o permanentes son aquellas que actuarán durante toda la vida útil de la pasarela. Aquí consideramos las cargas que no se han tenido en cuenta antes con el peso propio debido a que no estaban introducidas en el programa:

#### a) Pavimento

El pavimento no estaba incluido en el espesor del tablero porque es añadido después de la fase de montaje de la pasarela. Hablamos de una capa de pavimento de 5 cm. de espesor de los cuales son 3 cm de hormigón de regulación y 2 cm de mezcla bituminosa, ambos con un peso específico de  $23 \text{ kN/m}^3$ .

A la hora de introducirlo en el programa debemos atenernos a lo que nos dice la IAP-11. Y es que debemos tener en cuenta espesores mayores a los de proyecto para la posibilidad de extender nuevas capas en vista a la explotación y la rehabilitación de la pasarela. Los espesores a tener en cuenta serán un 50% mayor a los reales, por tanto tendremos una capa de 7,5 cm que al

multiplicarlos por el ancho de la pasarela (5 m) y por el peso específico queda una carga lineal de 8,625 kN/m.

#### b) Barandillas

Las barandillas se colocarán después de que se haya constituido la totalidad del tablero con pavimento incluido. Habrá una a cada lado por lo que el momento que crea su peso debido a la excentricidad de su posición respecto al centro de gravedad del tablero se anula la una con la otra, por lo tanto solo tendremos en cuenta el peso en dirección vertical.

Las barandillas elegidas tienen una carga lineal de 0,0065 kN/m que al ser una a cada lado habrá que multiplicarla por dos y queda una carga de 0,013 para añadir en la dirección vertical.

### 8.3 Sobrecarga de uso

#### a) Carga vertical

Se considera una carga uniformemente distribuida  $q_{fk}$  de valor 5 kN/m<sup>2</sup> (IAP-11). Se aplica una carga uniforme sobre la estructura tubular de valor:  $q = 5 \text{ kN/m}^2 \times 5,00 \text{ m} = 25 \text{ kN/m} = 2,5 \text{ T/m}$ . Aunque finalmente se decide introducir el valor de 5 kN/m<sup>2</sup> sobre las áreas que se asocian al elemento SHELL para acercarnos lo más posible a la realidad.

#### b) Carga horizontal

Se considera una fuerza horizontal  $Q_{fk}$  de valor igual al 10% del total de la carga vertical uniformemente distribuida, actuando en el eje del tablero al nivel de la superficie del pavimento (IAP-11). Se aplica una fuerza horizontal uniforme de valor:  $Q = 0,10 \times 25 \text{ kN/m} = 2,5 \text{ kN/m}$ . Ocurre lo mismo que la sobrecarga de uso vertical, hemos tomado el valor de la carga por unidad de superficie.

#### c) Empujes sobre barandillas

También tenemos que tener en cuenta según la IAP-11 la sobrecarga de uso de las barandillas, que se trata de unas fuerzas horizontales perpendiculares al elemento superior de la barandilla que serán como mínimo de 1,5 kN/m.

Estas fuerzas, por la dificultad de añadirlas al programa a la altura indicada, las vamos a tomar como momentos que será el 1,5 kN/m de la carga por la altura de la barandilla mas el espesor del tablero para simular que está actuando en la parte de abajo del mismo:

$$1,5 \text{ kN/m} \times 2,5 \text{ m} \times (1,25 + 0,25) \text{ m} = 5,625 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

El último término es 1,25 la altura de la barandilla y el 0,25 el espesor del tablero mas el pavimento.

## 8.4 Viento

Se ha realizado el cálculo de la acción del viento siguiendo los procedimientos y tomando los datos de la IAP-11. Hemos considerado que estamos ante una situación persistente.



Figura 43. Mapa de isotacas para la obtención de la velocidad básica fundamental del viento  $v_{b,0}$  de la IAP-11

Características del entorno. Entorno Tipo 3			
Velocidad de Referencia	$V_{ref}$	28.0	m/s
Factor de Topografía	$C_t$	1.00	
Factor de Riesgo	$C_r$	1.04	
	$K_z$	0.22	
Altura (m)	$Z_o$	0.25	m
Altura de Aplicación (m) <sup>(*)</sup>		8.00	m
Zmin (m)		8.00	
Factor de Altura	$C_z$	0.722	
Factor de Ráfaga	$C_g$	1.770	
Velocidad de Cálculo	$V_c$	37.2	

Tabla 1. Características del entorno para el viento

(\*): Se ha utilizado como altura de aplicación el mayor de los valores  $Z$  y  $Z_{\min}$ .  
 Viento longitudinal sin sobrecarga (25% del viento transversal) = 0.23 Tm/m  
 Viento longitudinal con sobrecarga (25% del viento transversal) = 0.12 Tm/m  
 Viento vertical = 0.22 Tm/m  
 Momento = 0.28 Tm\*m/m

Características de la Pasarela	
Ancho del Tablero	5.00 m
Canto Sección (0,71+0,25)	0,96 m
Canto de las vigas	0
Número de vigas	0
Separación entre vigas	0
Coefficiente de Ocultamiento	0.00
$V'$	0.521
Altura de la sobrecarga	1.27 m
Altura de la barandilla	1.52 m

Tabla 2. Características de la pasarela (1)

	Acciones sobre la pasarela vacía	Acciones sobre la pasarela cargada	
Altura Equivalente	3.94	3.94	
Coef. de Arrastre $C_D$	2.12	2.12	
Área ( $m^2$ )	3.94	3.94	
Acción (T/ml)	0.74	0.37	Se le ha aplicado una reducción del 50%
Carga torsora ( $T*m/m$ )	1.36	0.68	

Tabla 3. Características de la pasarela (2)

Con los datos obtenidos de la instrucción de puentes que estamos usando para el cálculo del viento, podemos calcular las acciones que el viento provocará sobre la pasarela. Son básicamente empujes que actúan en diferentes direcciones que nos dicta la propia norma y sobre los diferentes elementos de la pasarela.

Según la IAP-11 se considerará la actuación del viento en dos direcciones que son: perpendicular al eje del tablero (en nuestro caso lo llamaremos viento transversal horizontal y será en la dirección del eje  $y$ ) que irá acompañada de una componente asociada a la dirección del eje  $z$  (en nuestro caso viento transversal vertical), y por otro lado la dirección paralela al eje del tablero (lo llamaremos viento longitudinal y será según la dirección del eje  $x$ ).

Calculamos los empujes en las tres direcciones que hemos definido antes, que al fin y al cabo son las tres direcciones del espacio en el que estamos trabajando (x, y, z), con las fórmulas que nos dice la norma y obtenemos lo siguiente:

- Longitudinal:  $P_{w,x} : 0,181 \text{ kN/m}^2$
- Transversal horizontal:  $P_{w,y} : 0,9356 \text{ kN/m}^2$
- Transversal vertical:  $P_{w,z} : 0,48531 \text{ kN/m}^2$

Para cada parte de la pasarela multiplicaremos por las dimensiones correspondientes y así obtendremos fuerzas por unidad de longitud para poder introducir las cargas distribuidas en el programa mediante el código.

Dentro del empuje del viento sobre los tableros y para terminar con la carga de viento, debemos tener en cuenta el momento de vuelco sobre el mismo. Éste es provocado por la acción combinada de los empujes transversales horizontales y verticales que como hemos dicho antes pueden actuar de forma conjunta. Para tenerlo en cuenta hay que considerar unas directrices que nos proporciona la norma:

- El empuje transversal está aplicado al 60% de la altura del primer frente máximo adoptado en el cálculo del área expuesta a la componente horizontal del viento transversal en tableros de alma llena. Es decir, en nuestro caso a  $0,6 \cdot 0,25 \text{ m} = 0,15 \text{ m}$  de la base del tablero.
- En cuanto al empuje transversal estará aplicado a un cuarto de la anchura del tablero desde el borde de barlovento. En nuestro caso a  $0,25 \cdot 5 \text{ m} = 1,25 \text{ m}$  del borde del tablero.

## 8.5 Efectos aeroelásticos

Según establece la Instrucción para las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carreteras, IAP-11, no será necesario comprobar los efectos aeroelásticos en los puentes y pasarelas que cumplan simultáneamente las tres condiciones siguientes:

1. Luz inferior a 200 m en puentes y a 100 metros en pasarelas  $\rightarrow L = 89,22 \text{ m} < 100 \text{ m}$ . ✓
2. Luz efectiva (máxima distancia entre puntos de momento flector nulo bajo la acción del peso propio) menor que 30 veces el canto.

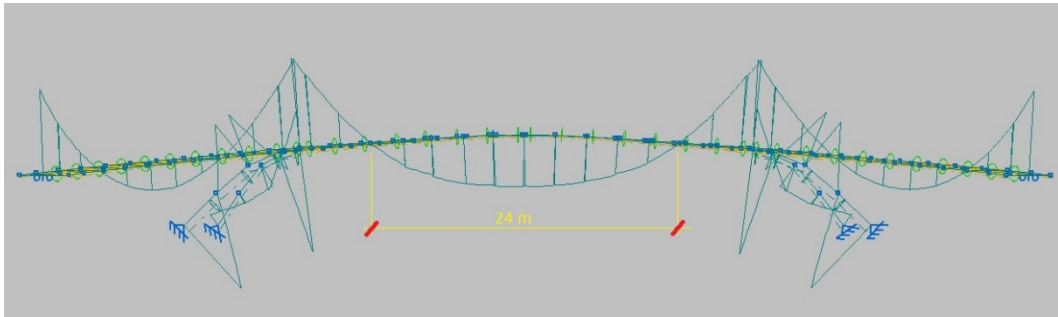


Figura 44. Diagrama de flectores para efectos aerolásticos para el peso propio

Distancia horizontal entre puntos de momento flector nulo bajo el peso propio: 24 m.

$$24 \text{ m} < 30 \times (0,71+0,25) \text{ m} \rightarrow 24 \text{ m} < 28,8 \text{ m. } \checkmark$$

3. Anchura del tablero superior a 1/10 de la distancia entre puntos de momento transversal nulo bajo la acción del viento transversal.

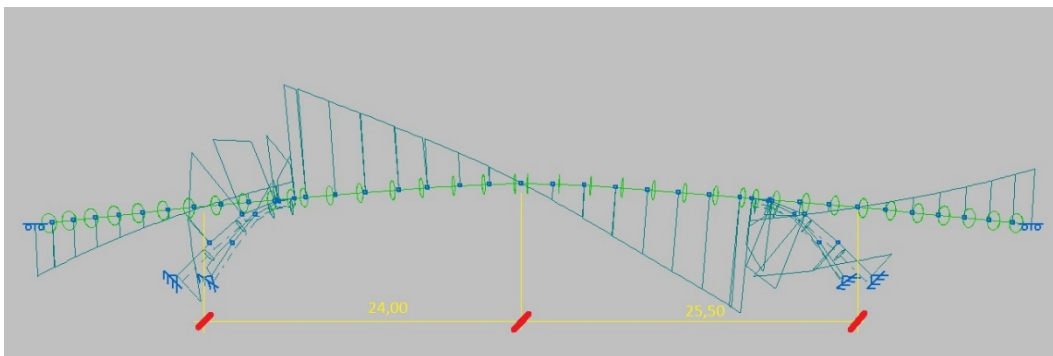


Figura 45. Diagrama de flectores para efectos aerolásticos para viento transversal

Distancia horizontal entre puntos de momento flector nulo bajo el viento transversal: 25,5 m.

$$5,00 \text{ m} > 0,1 \times 25,5 \text{ m} \rightarrow 5,00 \text{ m} > 2,55 \text{ m } \checkmark$$

Por simplicidad de cálculos y facilidad en cuanto al modelo, estas comprobaciones se han hecho con el programa Cype 3D aprovechando el modelo realizado para el predimensionamiento.

## 8.6 Sismo

La Norma de Construcción Sismorresistente: Puentes de 18 de Mayo de 2007, en adelante NC SP-07, clasifica los puentes en:

- De importancia normal:

Aquellas cuya destrucción por el terremoto pueda ocasionar víctimas, interrumpir un servicio para la colectividad, o producir importantes pérdidas económicas, sin que en ningún caso se trate de un servicio imprescindible ni pueda dar lugar a efectos catastróficos.

- De importancia especial:

Aquellas cuya destrucción por el terremoto, pueda interrumpir un servicio imprescindible o dar lugar a catastróficos. En este grupo se incluyen las construcciones que así se consideren en el planeamiento urbanístico y documentos públicos análogos así como en reglamentaciones más específicas. La aplicación de la Norma es obligatoria en las construcciones anteriores con las siguientes excepciones:

- En las situaciones en que la aceleración sísmica horizontal de cálculo  $a_c$  sea inferior a 0.04 g.
- En las situaciones en que la aceleración sísmica horizontal del emplazamiento  $a_b$  sea inferior a 0.04 g.

## 8.6.1 Datos sísmicos

### 8.6.1.1 Bases de cálculo: según la Norma de Construcción Sismorresistente

Según la clasificación de las estructuras que hace la norma, la que estamos tratando es considerada como de especial importancia. Esto hace que si la aceleración sísmica de cálculo es superior a 0.06g, la aplicación de la citada normativa será obligatoria.

### 8.6.1.2 Aceleración sísmica de cálculo

La aceleración sísmica de cálculo  $a_c$ , se define como el producto:

$$a_c = S * \rho * a_b$$

donde:

$a_b$ : es la aceleración sísmica básica.

$\rho$  : es un coeficiente adimensional de riesgo obtenido como producto de dos factores:

$$\rho = \gamma_I * \gamma_{II}$$

$\gamma_I$ : Factor de importancia, función de la importancia del puente.

$\gamma_{II}$ : Factor modificador para considerar un periodo de retorno diferente de 500 años



$$\gamma_{II} = (t/500)^{0.4}$$

S: es un coeficiente adimensional.

- Para  $\rho a_b \leq 0.1g \rightarrow S=C/1.25$
- Para  $0.1g < \rho a_b \leq 0.4g \rightarrow S=C/1.25+3.33*(\rho a_b/g-0.1)(1-C/1.25)$
- Para  $0.4g \leq \rho a_b \rightarrow S=1.0$

Donde C (coeficiente del terreno).

En el caso que nos ocupa  $\rho = 1.3$  y  $C= 1.5$  (20m de terreno tipo III y 10 m de terreno tipo II).

### 8.6.2 Aceleración sísmica básica

La peligrosidad sísmica del territorio nacional se define por medio de un mapa de peligrosidad sísmica. Dicho mapa suministra para cada punto del territorio y expresada en relación al valor de la gravedad, la aceleración sísmica básica, un valor de la aceleración horizontal de la superficie del terreno, correspondiente a un período de retorno de 500 años.

Para el caso de Sevilla, la norma indica una aceleración básica de 0.07g. Con lo que nos queda una aceleración de cálculo igual a 0.109g, o lo que es lo mismo, 1.0713 m/s<sup>2</sup>.  
Lo que nos indica que la normativa es de obligado cumplimiento.

### 8.6.3 Espectro de cálculo

Esta norma establece un espectro elástico de respuesta, para movimientos horizontales, correspondiente a un oscilador lineal simple con un amortiguamiento de referencia del 4% respecto al crítico, que consta de cuatro tramos definidos por las siguientes ordenadas espectrales:

- Tramo de períodos bajos ( $0 \leq T \leq T_A$ )  $\rightarrow S_a(T) = (1 + (2.5 \nu - 1) T / T_A) a_c$
- Tramo de períodos moderados ( $T_A \leq T \leq T_B$ )  $\rightarrow S_a(T) = 2.5 \nu a_c$
- Tramo de períodos intermedios ( $T_B \leq T \leq T_C$ )  $\rightarrow S_a(T) = (2.5 \nu T_B / T) a_c$
- Tramo de períodos altos ( $T_C \leq T$ )  $\rightarrow S_a(T) = (2.5 \nu T_B T_C / (T^2)) a_c$

Siendo:

$$\begin{aligned} T_A &= K C / 10 \\ T_B &= K C / 2.5 \\ T_C &= K (2 + C) \end{aligned}$$

Donde:

- $a_c$  : aceleración sísmica de cálculo.
- $\nu$  : factor corrector dependiente del amortiguamiento equivalente de la estructura, que se obtiene mediante  $\nu = (5/\zeta) * 0.4$  válida para  $\zeta > 1\%$
- T: Período considerado en segundos
- C: Coeficiente de suelo, dependiente de las características del terreno existente en los primeros 30 m bajo la estructura En este caso estamos ante 20 m de un terreno tipo 3 (granular de compacidad media o cohesivo de consistencia firme) y 10 m de terreno tipo 2 (granular denso o cohesivo duro) y por tanto  $C=1.5$ .
- K: coeficiente de contribución, que tiene en cuenta la influencia de la peligrosidad sísmica de cada punto de los distintos tipos de terremotos considerados en el cálculo de la misma. Por encontrarnos en Sevilla  $K=1.1$ . Igualmente consideramos un amortiguamiento del 5%.

Resumiendo, nos queda el siguiente espectro elástico de respuesta:

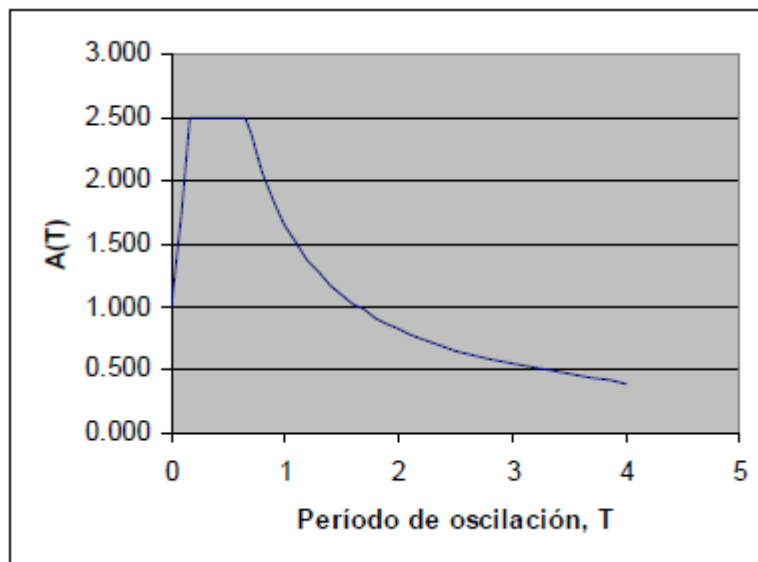


Figura 46. Espectro elástico de respuesta de la norma NC SP-07

Dado que la pasarela se ha predimensionado y verificado con Cype 3D, que aplica la acción del sismo de forma automática (tanto las acciones como las combinaciones de acuerdo con la normativa de aplicación), no vamos a simular la acción del sismo en el programa de elementos finitos (ANSYS). A parte, no vamos a considerar el cálculo de la cimentación en el programa tampoco, por tanto, no podríamos comprobar la resistencia de la misma frente a este efecto.

## 8.7 Nieve

El efecto de la nieve podríamos haberlo considerado despreciable por la ubicación en la que nos encontramos y teniendo en cuenta que no suele nevar pero aún así hemos querido añadirlo para seguir la normativa lo más correctamente posible, de todas formas es un proceso sencillo que no conlleva demasiado esfuerzo.

Debemos obtener el coeficiente  $s_k$  a través de una tabla de la IAP-11 donde vienen estos coeficientes asociados a provincias:

CAPITAL	ALTITUD [m]	$s_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Sevilla	10	0,2

Figura 47. Sobrecarga de nieve sobre un terreno horizontal en las capitales de provincia y ciudades autónomas de la IAP-11

Luego, para ver la sobrecarga sobre el tablero de la pasarela sólo debemos realizar la siguiente operación,  $q_k = 0,8 * s_k$ , y en nuestro caso obtenemos el valor de  $0.16 \text{ kN/m}^2$  que al multiplicar por los 5 m de ancho que tiene el tablero obtenemos una carga lineal de  $0,8 \text{ kN/m}$  que aplicaremos en el programa de cálculo.

## 8.8 Temperatura

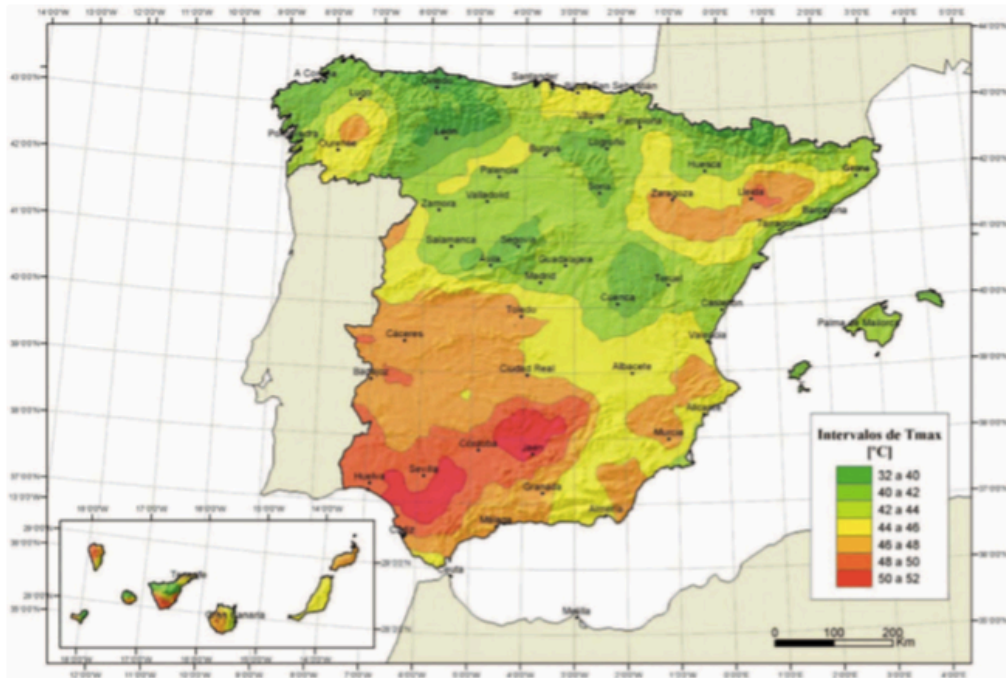
A efectos de aplicación de la Instrucción, la pasarela proyectada tiene un tablero Tipo 3: tablero de hormigón armado o pretensado, sean losas, vigas o cajones. Los valores representativos de la acción térmica se evaluarán considerando la componente uniforme de temperatura y las componentes de la diferencia de temperatura vertical y horizontal, aunque por motivos de la geometría, tales como que el tablero es de un espesor muy pequeño y que el mismo da sombra a su vez al tubo estructural y a los perfiles IPE que hacen de voladizos, consideraremos despreciable el efecto de la diferencia de temperatura y nos centraremos en la componente uniforme de temperatura.

### 8.8.1 Componentes de la temperatura sobre la estructura

#### 8.8.1.1 Temperatura máxima y mínima del aire

Vamos a considerar el mapa de isotermas, ver figura 47, y el de zonas climáticas de invierno, ver figura 48. Más concretamente para la zona de Sevilla. Éste último es para acciones con un periodo de retorno de 50 años, mientras que la norma exige para este tipo de puentes un periodo de cálculo

de 100 años, así que deberemos usar las fórmulas necesarias que vienen especificadas en la IAP-11 para poder obtener los valores que necesitamos.



**FIGURA 4.3-a ISOTERMAS DE LA TEMPERATURA MÁXIMA ANUAL DEL AIRE,  $T_{max}$  [°C]**  
(Coincide con el mapa correspondiente del Código Técnico de la Edificación)

Figura 48. Isothermas de la temperatura máxima anual del aire en °C de la IAP-11



**FIGURA 4.3-b ZONAS CLIMÁTICAS DE INVIERNO**  
(Coincide con el mapa correspondiente del Código Técnico de la Edificación)

Figura 49. Zonas climáticas de invierno de la IAP-11

**TABLA 4.3-a TEMPERATURA MÍNIMA ANUAL DEL AIRE,  $T_{min}$  [ °C]**  
(Coincide con la tabla correspondiente del Código Técnico de la Edificación)

ALTITUD [m]	ZONA DE CLIMA INVERNAL (SEGÚN FIGURA 4.3-b)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	-7	-11	-11	-6	-5	-6	6
200	-10	-13	-12	-8	-8	-8	5
400	-12	-15	-14	-10	-11	-9	3
600	-15	-16	-15	-12	-14	-11	2
800	-18	-18	-17	-14	-17	-13	0
1000	-20	-20	-19	-16	-20	-14	-2
1200	-23	-21	-20	-18	-23	-16	-3
1400	-26	-23	-22	-20	-26	-17	-5
1600	-28	-25	-23	-22	-29	-19	-7
1800	-31	-26	-25	-24	-32	-21	-8
2000	-33	-28	-27	-26	-35	-22	-10

Tabla 4. Tabla de la IAP-11 de temperatura mínima del aire en °C

De las imágenes obtenidas de la IAP-11 podemos obtener algunas conclusiones útiles que son necesarias para obtener datos de la temperatura uniforme.

- Intervalo de temperaturas máximas (°C): 48-50
- Temperatura mínima: -6° (zona 6, nivel del mar 7 m)

Extrapolamos para un periodo de cálculo de 100 años, como prescribe la norma, el periodo de retorno de 50 años, mediante adaptación probabilística descrita en la Instrucción:

- Temperatura máxima = 45,74°
- Temperatura mínima = -4,57°

#### 8.8.1.2 Componente uniforme de la temperatura

Calcularemos el valor de la componente uniforme de la temperatura,  $T_e$ , teniendo en cuenta que ésta tendrá un valor máximo y un valor mínimo, a saber:

$$T_{e, min} = T_{min} + \Delta T_{e, min} = -4.57 + 8 = +3.43^{\circ}C$$

$$T_{e, max} = T_{max} + \Delta T_{e, max} = 45,74 + 2 = +47.74^{\circ}C$$

Los valores máximo y mínimo son los calculados anteriormente y los incrementos son aportados por la norma, siendo su valor para el caso de tableros de hormigón (Tabla 4.3-b) igual a +8° y +2° para el incremento mínimo y máximo respectivamente.

**TABLA 4.3-b VALORES DE  $\Delta T_{e,min}$  Y  $\Delta T_{e,max}$  PARA EL CÁLCULO DE LA COMPONENTE UNIFORME DE TEMPERATURA**

TIPO DE TABLERO	$\Delta T_{e,min}$ [°C]	$\Delta T_{e,max}$ [°C]
Tipo 1: Tablero de acero	-3	+16
Tipo 2: Tablero mixto	+4	+4
Tipo 3: Tablero de hormigón	+8	+2

Tabla 5. Valores de la variación de la temperatura en función del tipo de tablero de la IAP-11

Para la determinación de los efectos debidos a la componente uniforme de temperatura, se emplearán los valores del coeficiente de dilatación térmica lineal indicados en la norma (Tabla 4.3-c). Dado que nuestra estructura es mixta, con arco y vigas de acero y tablero de hormigón, la norma indica que se tome el mismo coeficiente de dilatación lineal para el acero y para el hormigón:  $\alpha_T = 10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

**TABLA 4.3-c VALORES DEL COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA LINEAL  $\alpha_T$  ( $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )**

MATERIAL	$\alpha_T$ ( $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
Acero inoxidable	16
Acero estructural, hierro dulce o fundición <sup>(1)</sup>	12
Hormigón <sup>(2)</sup>	10

<sup>(1)</sup> En estructuras mixtas, el coeficiente de dilatación lineal del acero estructural puede tomarse igual al del hormigón:  $\alpha_T = 10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

<sup>(2)</sup> En el caso de hormigón con áridos ligeros:  $\alpha_T = 7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Tabla 6. Valores del coeficiente de dilatación térmica de la IAP-11

### 8.8.1.3 Rango de la componente uniforme de la temperatura

La variación de la componente uniforme de temperatura ocasionará, en una estructura sin coacción al movimiento, un cambio en la longitud del elemento. Teniendo en cuenta lo indicado en el apartado anterior, el rango de variación de la componente uniforme de temperatura en el tablero será:

$$\Delta T_n = T_{e,max} - T_{e,min} = 47.74 - 3.43 = 44.31^\circ\text{C}$$

Estos rangos hay que compararlos con aquellos a los que estará sometido el tablero una vez se ejecute; es decir, cual es la diferencia de temperatura que ejerce carga térmica sobre el tablero una

vez este está coaccionado. Por lo tanto hay que tener en cuenta la temperatura a la que se ejecuta e inmoviliza la losa. Tal y como propone la norma en ausencia de información, tomaremos esta temperatura de ejecución como:

$$T_o = 15^{\circ}C$$

Distinguiremos entre los máximos rangos de dilatación y de contracción.

$$\Delta TN, \text{ contracción} = T_o - T_{e, \text{ min}} = 15^{\circ}C - 3.43^{\circ}C = 11.57^{\circ}C$$

$$\Delta TN, \text{ expansión} = T_{e, \text{ max}} - T_o = 47.74^{\circ}C - 15^{\circ}C = 32.74^{\circ}C$$

Hemos simplificado el cálculo de la temperatura de forma que supondremos despreciable la variación lineal de temperatura, como hemos dicho anteriormente, ya que al tener un cilindro como principal elemento resistente, y el tablero sobre él le proporcionará sombra durante casi todas las horas de sol, el efecto calentamiento-enfriamiento sobre las caras opuestas va a ser mínimo y habrá un reparto uniforme de la temperatura. Por eso es que nos hemos quedado sólo con este cálculo a la hora de introducir la carga de temperatura en el software ANSYS. Además hay que tener en cuenta que al estar el movimiento horizontal no impedido en los apoyos extremos, las tensiones que se puedan generar como consecuencia de la variación de la temperatura van a estar minimizadas puesto que la estructura puede moverse libremente en el plano  $z=0$ .

Dado que el acero presenta un alto grado de ductilidad y el hormigón no, será necesario disponer untabas de dilatación de hormigonado a lo largo del tablero.

### 8.8.2 Modelización de la carga térmica en ANSYS

Se ha realizado de forma muy simplificada. A la hora de modelizar la carga térmica en ANSYS definiremos como temperatura de referencia (TREF) aquella que hemos considerado  $T_o$  ( $15^{\circ}$ ) y aplicaremos a la pasarela una temperatura de ese valor, para después introducirle la temperatura uniforme media a la que estará sometida en las horas de sol:

- En primer lugar hay que definir las unidades en las que se van a introducir las temperaturas (Temperature Units): TOFFST, 273 (273 para que considere grados Celsius).
- Habrá que introducir los coeficientes de dilatación térmica lineal de los materiales, tomando para el acero y para el hormigón:  $\alpha T = 10 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}C^{-1}$ .
- Indicar la Temperatura de referencia: TREF,15.
- Introducción de la temperatura uniforme (componente uniforme): TUNIF,44.31.

De esta forma tendremos la pasarela cargada con la temperatura para realizar las combinaciones de carga.



## 9 COMBINACIONES DE CARGA

El principal valor representativo de las acciones es su valor característico, pero para las acciones variables se deben considerar otros.

En el caso de las cargas variables, cuando actúan varias a la vez debemos tener en cuenta que hay una principal y otras secundarias. Las acciones variables secundarias que actúan simultáneamente con la principal deben llevar un coeficiente de simultaneidad multiplicado para considerar la pequeña posibilidad de que actúen juntos los valores más desfavorables de varias acciones independientes. El valor de combinación tiene la forma:  $\psi_0 * Q_k$ . Donde  $\psi_0$  es el coeficiente de simultaneidad.

Para las combinaciones de acciones tomaremos los conceptos y valores de los coeficientes preconizados por la IAP y que pasamos a mostrar de acuerdo a la misma.

ACCIÓN		$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$	
Sobrecarga de uso	gr 1, Cargas verticales	Vehículos pesados	0,75	0,75	0
		Sobrecarga uniforme	0,4	0,4	0 / 0,2 <sup>(1)</sup>
		Carga en aceras	0,4	0,4	0
	gr 2, Fuerzas horizontales	0	0	0	
	gr 3, Peatones	0	0	0	
	gr 4, Aglomeraciones	0	0	0	
	Sobrecarga de uso en pasarelas	0,4	0,4	0	
Viento	$F_{we}$	En situación persistente	0,6	0,2	0
		En construcción	0,8	0	0
		En pasarelas	0,3	0,2	0
Acción térmica	$T_k$	0,6	0,6	0,5	
Nieve	$Q_{sN,k}$	0,8	0	0	
Acción del agua	$W_k$	Empuje hidrostático	1,0	1,0	1,0
		Empuje hidrodinámico	1,0	1,0	1,0
Sobrecargas de construcción	$Q_c$	1,0	0	1,0	

(1) El factor de simultaneidad  $\psi_2$  correspondiente a la sobrecarga uniforme se tomará igual a 0, salvo en el caso de la combinación de acciones en situación sísmica (apartado 6.3.1.3), para la cual se tomará igual a 0,2.

Tabla 7. Factores de Simultaneidad de IAP-11

## 9.1 Combinaciones para comprobación de ELU

Consideramos para las combinaciones de acciones que estamos ante una situación persistente o transitoria, por lo que la forma que tendrá la combinación de carga es la siguiente:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

De acuerdo a la formulación para situaciones persistentes o transitorias, y de acuerdo a las cargas consideradas para nuestra estructura, las siguientes combinaciones con los coeficientes obtenidos de la tabla 8 serían aquellas a tener en cuenta.

**TABLA 6.2-b COEFICIENTES PARCIALES PARA LAS ACCIONES  $\gamma_F$   
(PARA LAS COMPROBACIONES RESISTENTES)**

ACCIÓN		EFECTO	
		FAVORABLE	DESFAVORABLE
Permanente de valor constante (G)	Peso propio	1,0	1,35
	Carga muerta	1,0	1,35
Permanente de valor no constante (G <sup>f</sup> )	Pretensado P <sub>1</sub>	1,0	1,0 / 1,2 <sup>(1)</sup> / 1,3 <sup>(2)</sup>
	Pretensado P <sub>2</sub>	1,0	1,35
	Otras presolicitaciones	1,0	1,0
	Reológicas	1,0	1,35
	Empuje del terreno	1,0	1,5
	Asientos	0	1,2 / 1,35 <sup>(3)</sup>
	Rozamiento de apoyos deslizantes	1,0	1,35
Variable (Q)	Sobrecarga de uso	0	1,35
	Sobrecarga de uso en terraplenes	0	1,5
	Acciones climáticas	0	1,5
	Empuje hidrostático	0	1,5
	Empuje hidrodinámico	0	1,5
	Sobrecargas de construcción	0	1,35

Tabla 8. Coeficientes de mayoración de acciones para ELU de IAP-11

*Combinación 11:*

$$1,35*G + 1,35*Q(\text{Su}) + 1,5*0,8*Q(\text{Nieve}) + 1,5*0,3*Q(\text{V.T.H}) + 1,5*0,3*Q(\text{V.T.V}) + 1,5*0,6*Q(\text{T})$$

*Combinación 12:*

$$1,35*G + 1,5*Q(\text{V.T.H}) + 1,35*0,4*Q(\text{Su}) + 1,5*0,8*Q(\text{Nieve}) + 1,5*0,3*Q(\text{V.T.V}) + 1,5*0,6*Q(\text{T})$$

*Combinación 13*

$$1,35*G + 1,5*Q(\text{T}) + 1,35*0,4*Q(\text{Su}) + 1,5*0,8*Q(\text{Nieve}) + 1,5*0,3*Q(\text{V.T.V}) + 1,5*0,3*Q(\text{V.T.H})$$

*Combinación 14:*

$$1,35*G + 1,35*Q(\text{SU}) + 1,5*0,8*Q(\text{Nieve}) + 1,5*0,3*Q(\text{VUELCO}) + 1,5*0,6*Q(\text{T})$$

*Combinación 15:*

$$1,35*G + 1,5*Q(\text{VUELCO}) + 1,5*0,4*Q(\text{SU}) + 1,5*0,8*Q(\text{Nieve}) + 1,5*0,6*Q(\text{T})$$

*Combinación 16:*

$$1,35*G + 1,5*Q(\text{T}) + 1,5*0,4*Q(\text{SU}) + 1,5*0,8*Q(\text{Nieve}) + 1,5*0,3*Q(\text{VUELCO})$$

*Combinación 17:*

$$1,35*G + 1,35*Q(\text{SU}) + 1,5*0,8*Q(\text{Nieve}) + 1,5*0,3*Q(\text{V.L}) + 1,5*0,6*Q(\text{T})$$

*Combinación 18:*

$$1,35*G + 1,5*Q(\text{V.L}) + 1,5*0,4*Q(\text{SU}) + 1,5*0,8*Q(\text{Nieve}) + 1,5*0,6 *Q(\text{T})$$

*Combinación 19:*

$$1,35*G + 1,5*Q(\text{T}) + 1,5*0,4*Q(\text{SU}) + 1,5*0,8*Q(\text{Nieve}) + 1,5*0,3*Q(\text{V.L})$$

*Combinación 20:*

$$1,35*G + 1,5*Q(\text{V.T.H}) + 1,35*0,4*Q(\text{Su}) + 1,5*0,8*Q(\text{Nieve}) + 1,5*0,3*Q(\text{V.T.V}) + 1,5*0,6*Q(\text{T})$$

*Combinación 21:*

$$1,35*G + 1,5*Q(V.T.V) + 1,35*0,4*Q(Su) + 1,5*0,8*Q(Nieve) + 1,5*0,3*Q(V.T.H) + 1,5*0,6*Q(T)$$

*Combinación 22:*

$$1,35*G + 1,35*Q(Su) + 1,5*0,6*Q(T)$$

*Combinación 23:*

$$1,35*G + 1,35*Q(Su) + 1,5*0,8*Q(Nieve)$$

*Combinación 24:*

$$1,35*G + 1,35*Q(SU) + 1,5*0,8*Q(Nieve) + 1,5*0,3*Q(V.T.H) + 1,5*0,6*Q(T)$$

*Combinación 25:*

$$1,35*G + 1,5*Q(V.T.H) + 1,5*0,4*Q(SU) + 1,5*0,8*Q(Nieve) + 1,5*0,6*Q(T)$$

*Combinación 26:*

$$1,35*G + 1,5*Q(T) + 1,5*0,4*Q(SU) + 1,5*0,8*Q(Nieve) + 1,5*0,3*Q(V.T.H)$$

*Combinación 27:*

$$1,35*G + 1,35*Q(SU) + 1,5*0,8*Q(Nieve) + 1,5*0,3*Q(V.T.V) + 1,5*0,6*Q(T)$$

*Combinación 28:*

$$1,35*G + 1,5*Q(V.T.V) + 1,5*0,4*Q(SU) + 1,5*0,8*Q(Nieve) + 1,5*0,6*Q(T)$$

*Combinación 29:*

$$1,35*G + 1,5*Q(T) + 1,5*0,4*Q(SU) + 1,5*0,8*Q(Nieve) + 1,5*0,3*Q(V.T.V)$$

*Combinación 30:*

$$1,35*G + 1,5*Q(T) + 1,35*0,4*Q(Su)$$

*Combinación 31:*

$$1,35*G + 1,35*Q(Su) + 1,5*0,3*Q(VUELCO)$$

Combinación 32:

$$1,35*G + 1,5*Q(\text{VUELCO}) + 1,35*0,4*Q(\text{Su})$$

## 9.2 Combinaciones para comprobación de ELS

Las combinaciones y los factores de simultaneidad serán los mismos que para ELU en la tabla 7 pero cambiarán los coeficientes parciales para las acciones a utilizar. Usaremos los que vienen en la siguiente tabla de la Instrucción de Puentes que se ve en la tabla 9. Las hipótesis también serán las mismas, estamos en una situación persistente o transitoria.

TABLA 6.2-c COEFICIENTES PARCIALES PARA LAS ACCIONES  $\gamma_f$  (ELS)

ACCIÓN	EFECTO		
	FAVORABLE	DESFAVORABLE	
Permanente de valor constante ( $G$ )	Peso propio	1,0	1,0
	Carga muerta	1,0	1,0
Permanente de valor no constante ( $G^*$ )	Pretensado $P_1$	0,9 <sup>(1)</sup>	1,1 <sup>(1)</sup>
	Pretensado $P_2$	1,0	1,0
	Otras presolicitaciones	1,0	1,0
	Reológicas	1,0	1,0
	Empuje del terreno	1,0	1,0
	Asientos	0	1,0
	Rozamiento de apoyos deslizantes	1,0	1,0
Variable ( $Q$ )	Sobrecarga de uso	0	1,0
	Sobrecarga de uso en terraplenes	0	1,0
	Acciones climáticas	0	1,0
	Empuje hidrostático	0	1,0
	Empuje hidrodinámico	0	1,0
	Sobrecargas de construcción	0	1,0

Tabla 9. Coeficientes de mayoración de acciones para ELS de IAP-11

Continuamos con la misma numeración que estábamos usando en las combinaciones de ELU.

*Combinación 33:*

$$1*G + 1*Q(\text{Su}) + 0,8*Q(\text{Nieve}) + 0,3*Q(\text{V.T.H}) + 0,3*Q(\text{V.T.V}) + 0,6*Q(\text{T})$$

*Combinación 34:*

$$1*G + 1*Q(\text{V.T.H}) + 0,4*Q(\text{Su}) + 0,8*Q(\text{Nieve}) + 0,3*Q(\text{V.T.V}) + 0,6*Q(\text{T})$$

*Combinación 35:*

$$1*G + 1*Q(\text{T}) + 0,4*Q(\text{Su}) + 0,8*Q(\text{Nieve}) + 0,3*Q(\text{V.T.V}) + 0,3*Q(\text{V.T.H})$$

*Combinación 36:*

$$1*G + 1*Q(\text{SU}) + 0,8*Q(\text{Nieve}) + 0,3*Q(\text{VUELCO}) + 0,6*Q(\text{T})$$

*Combinación 37:*

$$1*G + 1*Q(\text{VUELCO}) + 0,4*Q(\text{SU}) + 0,8*Q(\text{Nieve}) + 0,6*Q(\text{T})$$

*Combinación 38:*

$$1*G + 1*Q(\text{T}) + 0,4*Q(\text{SU}) + 0,8*Q(\text{Nieve}) + 0,3*Q(\text{VUELCO})$$

*Combinación 39:*

$$1*G + 1*Q(\text{SU}) + 0,8*Q(\text{Nieve}) + 0,3*Q(\text{V.L}) + 0,6*Q(\text{T})$$

*Combinación 40:*

$$1*G + 1*Q(\text{V.L}) + 0,4*Q(\text{SU}) + 0,8*Q(\text{Nieve}) + 0,6*Q(\text{T})$$

*Combinación 41:*

$$1*G + 1*Q(\text{T}) + 0,4*Q(\text{SU}) + 0,8*Q(\text{Nieve}) + 0,3*Q(\text{V.L})$$

*Combinación 42:*

$$1*G + 1*Q(\text{V.T.H}) + 0,4*Q(\text{Su}) + 0,8*Q(\text{Nieve}) + 0,3*Q(\text{V.T.V}) + 0,6*Q(\text{T})$$

*Combinación 43:*

$$1*G + 1*Q(\text{V.T.V}) + 0,4*Q(\text{Su}) + 0,8*Q(\text{Nieve}) + 0,3*Q(\text{V.T.H}) + 0,6*Q(\text{T})$$

*Combinación 44:*

$$1 *G + 1*Q(\text{Su}) + 0,6*Q(\text{T})$$

*Combinación 45:*

$$1*G + 1*Q(\text{Su}) + 0,8*Q(\text{Nieve})$$

*Combinación 46:*

$$1*G + 1*Q(\text{SU}) + 0,8*Q(\text{Nieve}) + 0,3*Q(\text{V.T.H}) + 0,6*Q(\text{T})$$

*Combinación 47:*

$$1*G + 1*Q(\text{V.T.H}) + 0,4*Q(\text{SU}) + 0,8*Q(\text{Nieve}) + 0,6 *Q(\text{T})$$

*Combinación 48:*

$$1*G + 1*Q(\text{T}) + 0,4 *Q(\text{SU}) + 0,8*Q(\text{Nieve}) + 0,3 *Q(\text{V.T.H})$$

*Combinación 49:*

$$1*G + 1*Q(\text{SU}) + 0,8*Q(\text{Nieve}) + 0,3*Q(\text{V.T.V}) + 0,6*Q(\text{T})$$

*Combinación 50:*

$$1*G + 1*Q(\text{V.T.V}) + 0,4*Q(\text{SU}) + 0,8*Q(\text{Nieve}) + 0,6*Q(\text{T})$$

*Combinación 51:*

$$1*G + 1 *Q(\text{T}) + 0,4*Q(\text{SU}) + 0,8*Q(\text{Nieve}) + 0,3*Q(\text{V.T.V})$$

*Combinación 52:*

$$1*G + 1*Q(\text{T}) + 0,4*Q(\text{Su})$$

*Combinación 53:*

$$1*G + 1*Q(\text{Su})+ 0,3*Q(\text{VUELCO})$$

*Combinación 54:*

$$1*G + 1*Q(\text{VUELCO}) + 0,4*Q(\text{Su})$$





## 10 COMPROBACIONES

---

**E**n este apartado vamos a efectuar una serie de comprobaciones de la estructura proyectada y analizada con el programa de elementos finitos, aplicando lo dispuesto en el Apartado 7: “*Criterios para la comprobación de los estados límites de servicio*”, de la IAP-2011. En una primera fase la pasarela se predimensionó con el software Cype 3D, como ya se ha mencionado. Posteriormente se ha realizado el modelizado y análisis de la misma con el programa ANSYS. Con Cype 3D se presentaron varios inconvenientes como la imposibilidad de simular la losa de hormigón del tablero como consecuencia de que las áreas obtenidas en la discretización de la misma no eran planas. Por tanto, hubo que prescindir del tablero y aplicar las acciones del mismo sobre el tubo portante mediante cargas. Esta simplificación desperdiciaba la sección resistente del tablero, sin embargo, con ANSYS se ha podido modelizar la sección mixta acero-hormigón, siendo por tanto el análisis realizado con dicho software más aproximado a la situación real.

Partiendo de las secciones predimensionadas con Cype 3D, se ha realizado su modelización y posterior análisis con el paquete ANSYS, aumentando las secciones y/o los espesores de las barras de acero (tubo estructural conformado en frío) según los resultados obtenidos para los estados límites.

Asimismo, también se han realizado análisis para diferentes formas de unión de la estructura con la cimentación. En los estribos se decidió desde el principio realizar un apoyo simple mediante bloques de neopreno, de forma que sólo se coartase el movimiento vertical, permitiéndose tanto los giros como el movimiento en la dirección de la directriz del arco de acero. De esta forma se garantiza que ante los cambios dimensionales debidos a los efectos de la dilatación-contracción a causa de los cambios de temperatura, la estructura pueda alargarse o contraerse sin que ello suponga un aumento de tensiones como ocurriría de tener coaccionados sus extremos. Para garantizar el monolitismo entre arco y tablero y la transmisión de esfuerzos a los estribos en estos puntos extremos de la pasarela, se han dispuesto sendas vigas traviesas de sección doble T y forma trapezoidal. El tubo irá soldado al alma y rigidizado mediante cartelas (véase plano 8). Las pilas inclinadas que apuntalan el arco, reduciendo su luz, a modo de pórticos triangulares de descarga se diseñaron en un principio empotrados a la cimentación. La idea era la de evitar que se transmitiesen momentos a dichos elementos. Sin embargo, tras realizar distintas pruebas de

cálculo, se decidió finalmente que dichas uniones fuesen articuladas para evitar la transmisión de momentos excesivos a la cimentación.

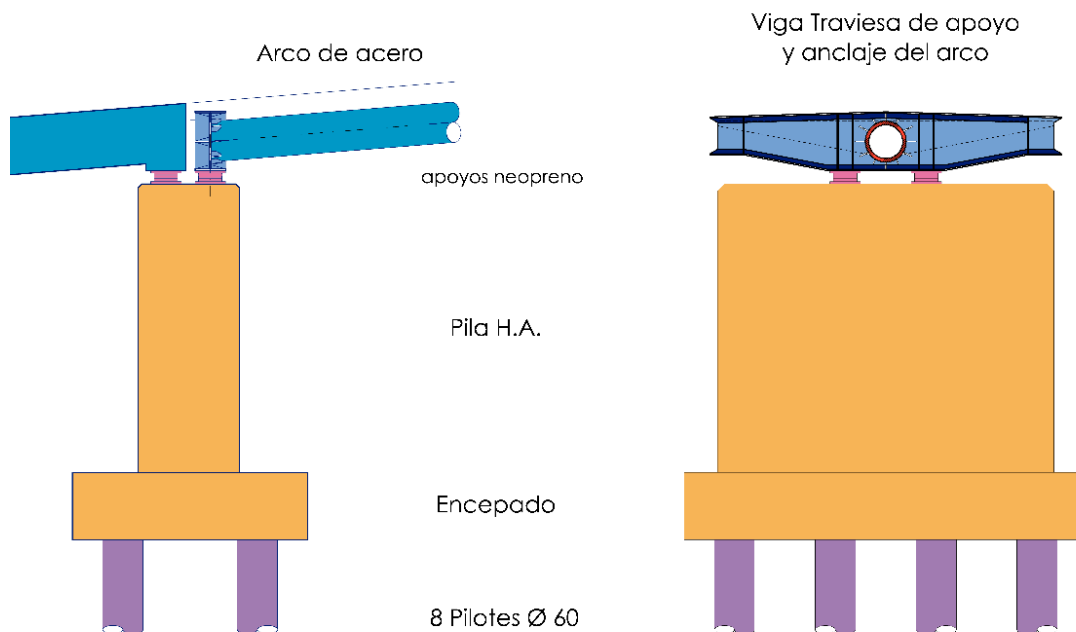


Figura 50. Apoyo en los estribos

### 10.1 Estado Límite de Deformación

El Estado Límite de Deformación tiene por finalidad controlar que las flechas producidas en la estructura no provoquen en el peatón inquietud o afecten negativamente a su apariencia. Un exceso de flexibilidad puede, también, provocar daños en los acabados o elementos no estructurales del puente. La norma referente (IAP, Apartado 7.1.1) marca como límite una flecha máxima admisible de  $L/1200$  para la parte de las sobrecargas de la combinación frecuente ( $\psi = 6,0$ ). Como puede comprobarse en las figuras 50 y 51, el valor de la máxima deformación vertical obtenida para la estructura bajo la acción del peso propio y la sobrecarga es de  $0,043802 \text{ m} < L/1200$ . Donde  $L$  es la luz o distancia en proyección horizontal entre los puntos de unión de los pilares inclinados a la cimentación (medido en desarrollo horizontal del arco).

$$L = 55 \text{ m} \quad L/1200 = 0,0458 \text{ m} > 0,0438 \text{ m}$$

$$\text{Aprovechamiento: } (0,0438/0,0458) * 100 = 95,6 \%$$

Por lo que la sección elegida,  $\varnothing 1067 \text{ mm}$ , presenta un alto grado de aprovechamiento.

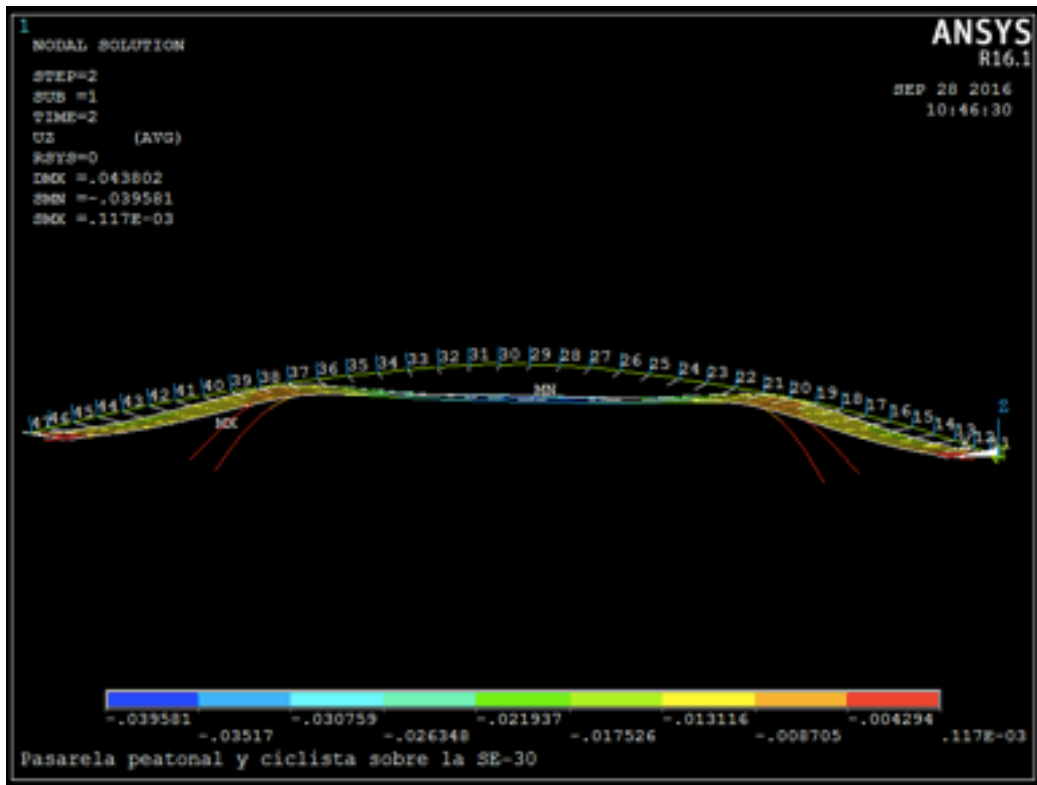


Figura 51. Desplazamientos bajo la acción del Peso Propio, Cargas Muertas y Sobrecarga de Uso

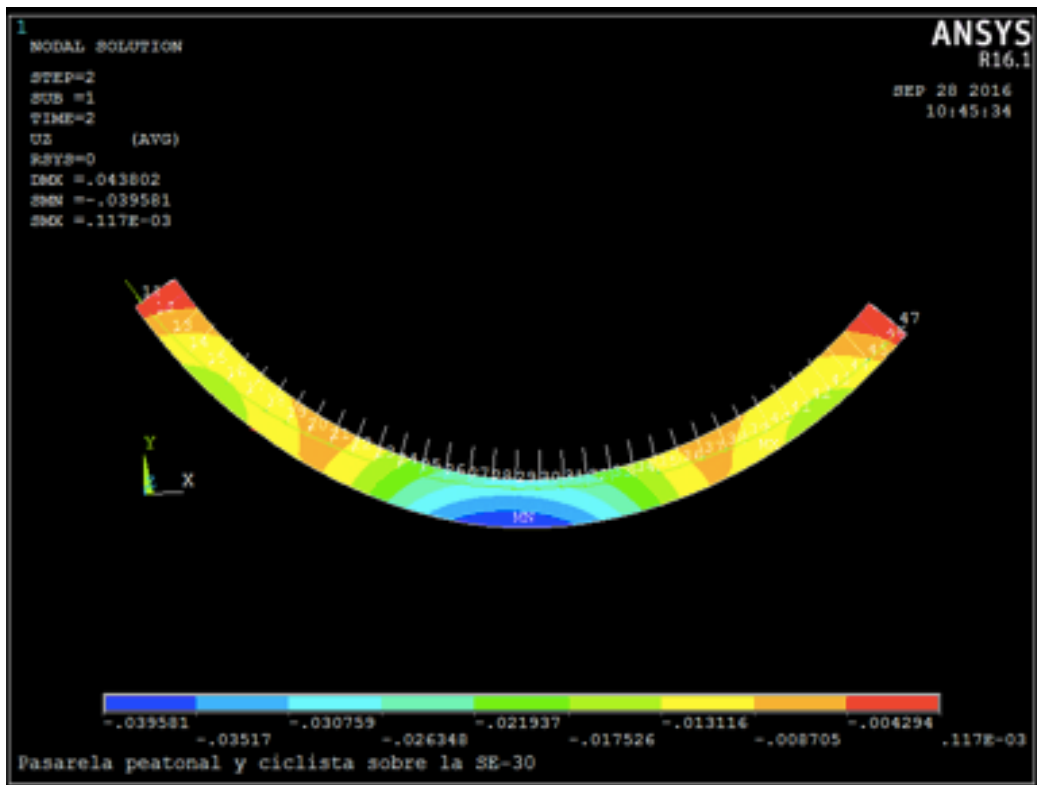


Figura 52. Desplazamientos (vista en planta) bajo la acción del PP, Cargas Muertas y Sobr. Uso

## 10.2 Estado Límite de Utilización. Resistencia de cálculo

La resistencia de cálculo según el Código Técnico de Edificación, seguridad estructural de aceros CTE-SE-A, viene establecida para cada tipo de acero en la Tabla adjunta. La estructura portante principal –arco y pilas inclinadas- está realizada con tubo de acero estructural conformado en frío, del tipo S355J2 (calidad UNE-S 355 J2H), cuyo límite elástico es de 355 MPa. Las ménsulas se han diseñado con perfiles IPE de acero laminado, cuyo límite elástico es de 255 Mpa.

DESIGNACIÓN	Espesor nominal t (mm)				Temperatura del ensayo Charpy °C
	Tensión de límite elástico $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )			Tensión de rotura $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	
	t ≤ 16	16 < t ≤ 40	40 < t ≤ 63	3 ≤ t ≤ 100	
<b>S235JR</b>					20
<b>S235J0</b>	235	225	215	360	0
<b>S235J2</b>					-20
<b>S275JR</b>					20
<b>S275J0</b>	275	265	255	410	0
<b>S275J2</b>					-20
<b>S355JR</b>					20
<b>S355J0</b>	355	345	335	470	0
<b>S355J2</b>					-20
<b>S355K2</b>					-20 <sup>(1)</sup>
<b>S450J0</b>	450	430	410	550	0

<sup>(1)</sup> Se le exige una energía mínima de 40J.

Tabla 10. Resistencia de los aceros según Código Técnico de la Edificación, seguridad estructural de aceros: CTE. SE-A

Estas resistencias hay que minimizarlas según el coeficiente  $\gamma_{M2} = 1,25$  (coeficiente parcial de seguridad relativo a la resistencia última del material o sección, y a la resistencia de los medios de unión, según el Código Técnico de la Edificación), un acero de 355 MPa de resistencia no puede alcanzar un valor máximo de 284 MPa (arco y pilas) y un acero de 255 MPa de resistencia no puede superar los 204 MPa (vigas ménsula IPE). Estas serán las resistencias consideradas en el cálculo. Obtendremos las tensiones de los diferentes elementos para las hipótesis más desfavorables y las compararemos con las de cálculo.

### 10.3 Criterio de rotura

Además de determinar la limitación en la deformación sufrida por la estructura cuando esté sometida a la acción de las cargas exteriores, es necesario determinar si la estructura o alguno de los componentes que la forman, rompen bajo el estado de cargas a los que se encuentra sometida la pasarela. De esta manera, y como se verificará en el apartado siguiente, el criterio de rotura seleccionado para una pasarela mixta de hormigón y acero es el *criterio de plasticidad de Von Mises*. Este criterio de plastificación determina la máxima tensión  $\sigma$ , que implicaría la plastificación del material. De esta manera, para los materiales seleccionados, bajo ningún estado de carga, durante el cálculo, se puede rebasar este valor de tensión, ya que de lo contrario implicaría que uno de los dos materiales ha plastificado, poniendo en riesgo a la estructura. Los valores de referencia serán, como se ha expuesto anteriormente, 284 MPa y 204 MPa para los dos tipos de acero utilizados y 30 MPa para el hormigón del tablero (tanto las pre-losas como la losa).

### 10.4 Verificaciones

Estas verificaciones están basadas en el formato de los coeficientes parciales, métodos experimentales y aplicación directa de los métodos de análisis de fiabilidad. Se requieren dos tipos de verificaciones relativas a:

- La estabilidad y la resistencia (estados límite últimos). Es decir, la verificación de la capacidad portante, la estabilidad y la resistencia de los elementos implicados; es la que se consideran en los estados límites últimos (condiciones de seguridad).
- Estabilidad: del conjunto de la estructura o de una parte independiente:

$$R_{stb, d} \leq E_{dst, d}$$

Donde,

$E_{dst}$  valor de cálculo del efecto de las acciones desestabilizadoras.

$E_{stb}$  valor de cálculo del efecto de las acciones estabilizadoras.

- Resistencia: de la estructura, elemento estructural, sección, punto o de una unión entre elementos.

$$R_d \leq E_d$$

Donde,

Ed valor de cálculo del efecto de las acciones

Rd valor de cálculo de la resistencia correspondiente

- La aptitud para el servicio (estados límite de servicio). Es decir que hay un comportamiento adecuado, en relación con las deformaciones, las vibraciones o el deterioro, si se cumple, para las situaciones de dimensionado pertinentes, que el efecto de las acciones no alcanza el valor límite admisible establecido para el mismo de acuerdo (Condiciones de uso).

# 11 RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON ELEMENTOS FINITOS

---

**Y**a se vio en el apartado anterior, más concretamente en el 10.1: Estado Límite de Deformaciones, que la pasarela sometida a las acciones de peso propio, cargas muertas y sobrecarga de uso, no sobrepasa el límite de flecha vertical que establece la norma.

Gracias a nuestro predimensionamiento elegimos un tubo de 711 mm de diámetro para la directriz y uno de 610 mm de diámetro para la sección de los estribos, y tras hacer algunas comprobaciones como primera aproximación vimos que las deformaciones eran excesivas y que por ejemplo la flecha máxima era superior a la permitida por la IAP-11, por lo que no se cumpliría el estado límite de deformación, así que decidimos cambiarlo y trabajar con perfiles circulares de 1067 mm tanto en la directriz del tubo portante como en los estribos para que soportara mejor las cargas. Efectivamente ahora veremos que en este caso los resultados son más favorables.

Ahora queremos ver si cumple con los límites de la resistencia de los materiales en función de los máximos esfuerzos que encontramos en la pasarela actuando las diferentes combinaciones de carga, como se ha explicado en los subapartados del apartado anterior llamado “Comprobaciones”. En los anejos I y II podemos ver todos los resultados que hemos obtenido del programa pero aquí sólo nos centraremos en los máximos y, por tanto, más desfavorables para el comportamiento de la pasarela. Con objeto de ver las tensiones a las que están expuestos los materiales hemos obtenido una serie de mapas de mapas de *tensiones de Von Mises* que se pueden ver en el Anejo II en el apartado 1.5. Aquí mostraremos las tensiones mayores que vienen provocadas por la combinación de cargas más desfavorable que es la número 22.



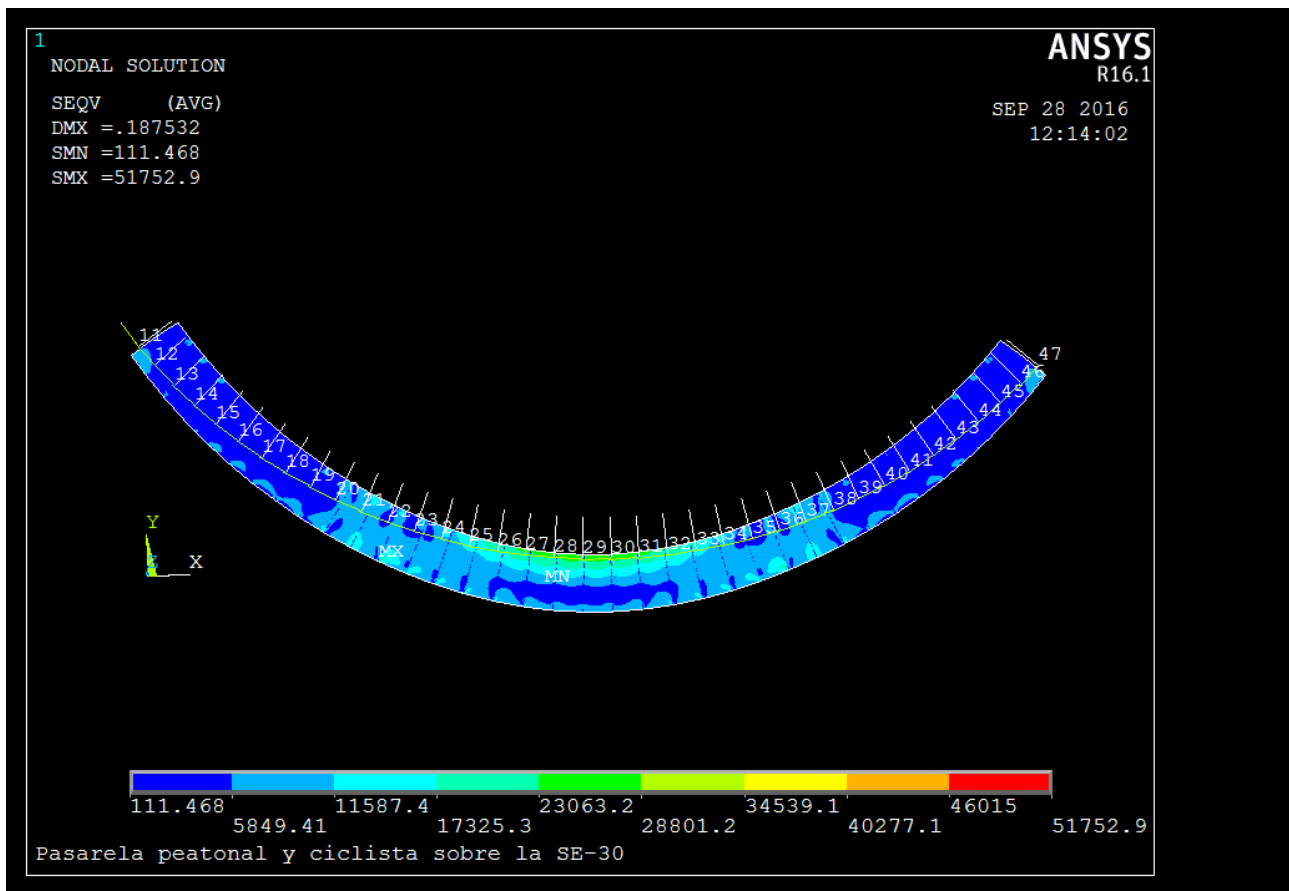


Figura 53. Mapa de tensiones de Von Mises (en  $\text{KN/m}^2$ ) para combinación 22.

La imagen muestra los valores máximo y mínimo de las tensiones sobre la pasarela. El valor máximo, que es el que nos interesa, es de 51,75 MPa aproximadamente. Este valor no nos preocupa a la hora de hacer la comprobación del acero, tanto el de los tubos como el de los IPE que tienen una resistencia de hasta 284 y 204 MPa respectivamente, por lo que para esta combinación de carga –de las más desfavorables- el acero sometido a las acciones queda lejos de su límite elástico y por tanto cumple con la comprobación a resistencia.

Por otro lado, sabemos que la máxima tensión admisible para el tablero de hormigón es 30 MPa, la cual se ve sobrepasada por el valor que hemos manejado antes, sin embargo, en la imagen se puede ver un color predominante azul y verde lo que indica que las tensiones del tablero rondarán los 20 MPa, valor que tampoco nos preocuparía, pero si nos acercamos y vemos algunos puntos localizados por debajo del tablero, cercanos a la unión del tubo portante con los tubos de las pilas, en detalle como en la siguiente imagen:

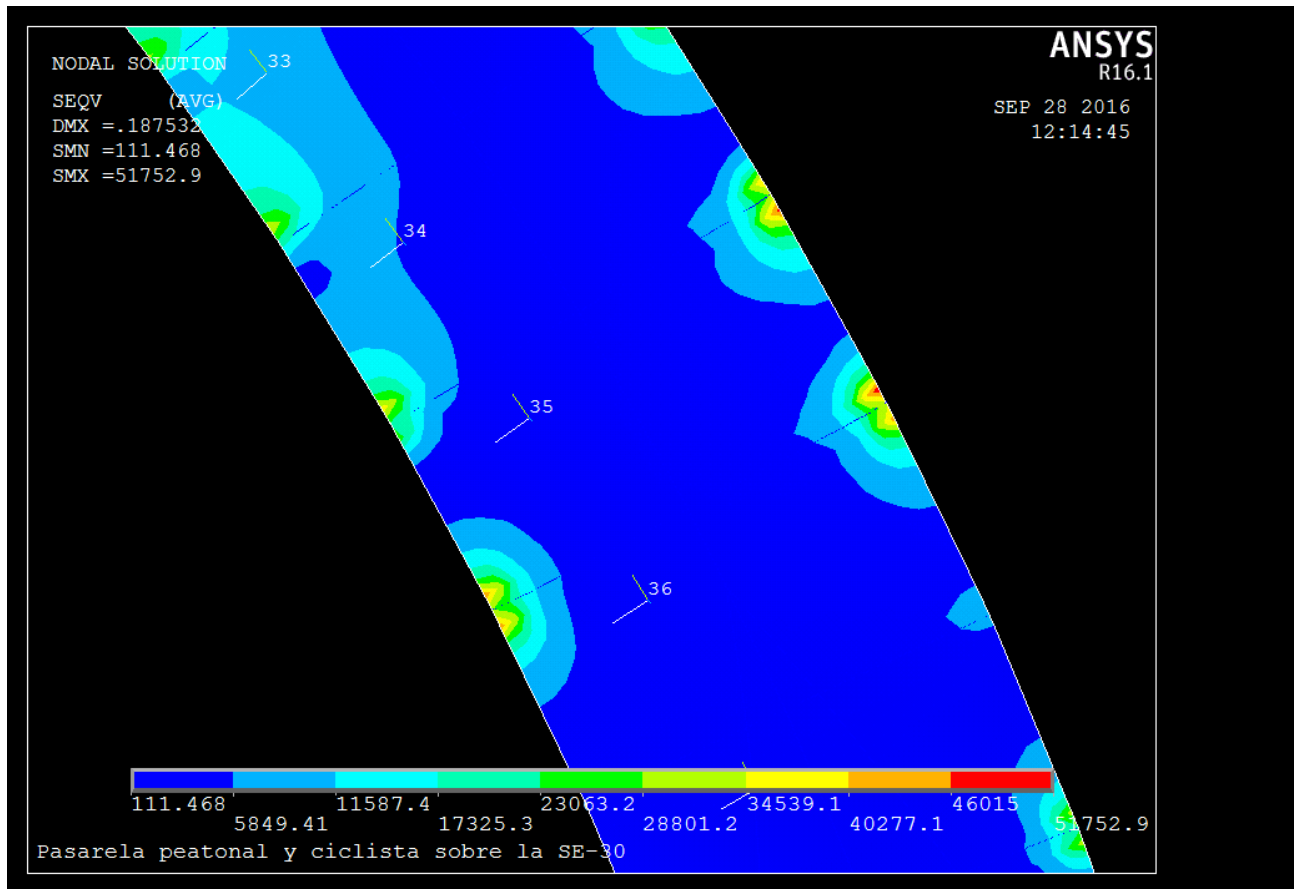


Figura 54. Detalle de los valores de Von Mises (en  $\text{KN/m}^2$ ) sobre el tablero para combinación 22

Efectivamente, de nuevo predomina el azul y el verde, aunque hay algunos puntos muy localizados donde hay valores en naranja y rojo que ya serían superiores a los 30 MPa y que harían que el hormigón se fisurase.

Para solucionar esto podemos optar por poner más armadura de refuerzo en las zonas del borde libre del tablero, también se podrían colocar unas pletinas metálicas que reforzaría de forma más localizada los puntos que fallan o incluso como opción más drástica se podría embeber los bordes del tablero en un perfil metálico en U evitando así este aumento de tensiones.

También hay que decir que el valor de resistencia de 30 MPa no es exacto, debido a que el tablero va armado y aumentaría de forma considerable su resistencia y quizás no habría que tomar ninguna medida ante esta situación porque podría soportar perfectamente por sí solo, pero desafortunadamente el armado del tablero conllevaría a una mayor extensión de este trabajo y hemos considerarlo dejarlo como un planteamiento ante la posibilidad de continuación futura del proyecto.

Lo mismo pasa con el cálculo de la cimentación, que hemos obtenido las reacciones de todos los apoyos y para las combinaciones más desfavorables como se ve en los anejos I y II para las

diferentes secciones de tubos (apartados 1.5 e 1.6 respectivamente), lo que nos permitiría calcularlas, pero también conllevaría una gran extensión y queda abierto a una posible ampliación.

## 11.1 Conclusión

Como conclusión podemos afirmar que nuestra propuesta para la pasarela cumple con los requerimientos sobre seguridad estructural, habiéndose comprobado con el software de elementos finitos ANSYS los requisitos de deformación y resistencia que establecen las normas de aplicación (Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera: IAP-2011; Código Técnico de la Edificación, Documento Básico Seguridad Estructural, Acero: CTE. SE-A; Instrucción de Hormigón Estructural: EHE).

Además, como se expuso al principio de este trabajo, el diseño de su trazado mejora desde el punto de vista funcional, estético y en lo que al impacto paisajístico se refiere, a otras soluciones alternativas en general y particularmente los dos proyectos promovidos por la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía.

## FUENTES

---

- Centro de descargas del Centro Nacional de Información Geográfica
- CTE DB-SE 2009
- CTE-SE-A
- CTE-DB-SUA
- Documento de la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía llamado "PASARELA para bicicletas y peatones sobre la SE-30 en Tablada ÁREA METROPOLITANA DE SEVILLA"
- F.D. Queiroz, P.C.G.S. Vellasco, D.A. Nethercot, artículo en *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 63, Issue 4, April 2007, Pages 505–521, “*Finite element modelling of composite beams with full and partial shear connection*”
- Gerencia Municipal de Urbanismo del Ayuntamiento de Sevilla (GEO-Sevilla)
- Google Earth
- Google Maps
- Guía de Cimentaciones en Obras de Carreteras
- <http://bicicletas.us.es/?p=3727>
- <http://www.arquitecturaviva.com/Info/News/Details/2391>
- [http://www.steelconstruction.info/Box\\_girder\\_bridges](http://www.steelconstruction.info/Box_girder_bridges)
- <http://www.viajarcomeryamar.com/viajar-a/europa/pais-vasco/zubi-zuri-santiago-calatrava-el-unico-puente-del-mundo-con-alfombra-y-pasarela.html>
- Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11)
- Instrucción de Hormigón Estructural: EHE
- Manual de aplicación de las Recomendaciones RPM - RPX/95
- Norma de construcción Sismoresistente: Parte general y Edificación (NCSE-02)
- Norma de Construcción Sismorresistente: Puentes de 18 de mayo de 2007 (NC SP-07)
- ORDEN FOM/3460/2003, DE 28 DE NOVIEMBRE, POR LA QUE SE APRUEBA LA NORMA 6.1 IC SECCIONES DE FIRME, DE LA INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS (BOE DE 12 DE DICIEMBRE DE 2003)
- Pilar Ariza Moreno y Andrés Sáez Pérez. Libro, "MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS. INTRODUCCIÓN A ANSYS"
- Prontuario de perfiles de ArcelorMittal
- Prontuario UAHE-2001
- PROYECTO DE ACONDICIONAMIENTO Y RECUPERACIÓN DE CAUCES Y MARGENES DE LOS RÍOS GÚÍ, MANZANO Y TORROX, T.M. DE TORROX (MÁLAGA)
- PROYECTO NUEVA PASARELA CICLOPEATONAL SOBRE LA AUTOVÍA SE-30 P.K. 13+750 (SEVILLA)
- PROYECTO PASARELA SOBRE LA RONDA DE CIRCUNVALACIÓN SE-30 EN TABLADA (SEVILLA)
- Real Decreto 173/2010, de 19 de febrero
- Yangjun Luo, Alex Li, Zhan Kang , artículo en *Engineering Structures*, Volume 34, January 2012, Pages 40–51, “*Parametric study of bonded steel concrete composite beams by using finite element analysis*”

