

8.7.3. Ingeniería de análisis, cálculo y modelización

En esta partida se destinan un total de 12,799.60 € para los salarios de los ingenieros que serán los encargados de analizar los resultados obtenidos en la fase de estudio y también los de los ingenieros que calculen y validen estructuralmente el proyecto.

8.8. Presupuesto final global

A partir de los totales de cada una de las partidas descritas con anterioridad, podemos afirmar que el presupuesto final global del proyecto es como sigue:

Descripción	Precio
Acondicionamiento del terreno	1,482,290.00 €
Cimentaciones	3,554,000.18 €
Estructuras	1,281,611.58 €
Controles de calidad	39,892.22 €
Seguridad y salud	11,034.00 €
Asfaltado e iluminado de la vía	177,378.60 €
Ingeniería	19,877.60 €
Total global del proyecto	6,566,084.18 €

Finalmente, el proyecto queda valorado en 6,566,084.18 €, seis millones quinientos sesenta y seis mil ochenta y cuatro euros con dieciocho céntimos.

8.5. Seguridad y salud

El plan de seguridad y salud cuenta con una asignación presupuestaria que asciende hasta los 11,034.00 €, con el objetivo de cumplir con la normativa vigente al respecto.

8.6. Asfaltado e iluminado del tablero

Para ser apto para la circulación, el tablero y sus accesos deberán estar debidamente asfaltados e iluminados para permitir la circulación de vehículos durante las noches. El montante destinado a la realización de la calzada en el tablero y sus accesos y su posterior iluminación es de 177,378.60 €.

8.6.1. Asfaltado del tablero y accesos

Se ha decidido asfaltar una calzada de 200 metros de longitud y 15 metros de ancho, de los cuales, 90 metros discurrirán sobre el tablero. El valor de esta partida es de 139,500.00 €.

8.6.2. Iluminado de la vía

Será realizado mediante farolas en columna de 6 metros de altura, con lámparas de descarga de sodio a alta presión, de 150 vatios cada una. El precio estimado para su realización es de 37,878.60 €.

8.7. Ingeniería

El apartado de ingeniería se ha subdividido en tres partidas principales, el estudio de ingeniería preliminar, la creación de las herramientas de optimizado, el análisis de resultados y finalmente la ingeniería de cálculo. El monto total de este apartado es de 19,877.60 €.

8.7.1. Ingeniería preliminar

Este apartado corresponde al estudio inicial del problema propuesto y el acercamiento inicial a las soluciones que posteriormente serían estudiadas en el apartado de optimización. Corresponde vagamente al PFC1. El valor de este apartado es de 1,921.40 €.

8.7.2. Desarrollo del "Optimizador de puentes"

En este apartado se computa el salario recibido por un programador, por un testador profesional de programas y finalmente por un ingeniero que valide los resultados obtenidos mediante el programa. Esta fase está valorada en un total de 5,156.60 €.

8.3.1. Hormigón armado

En este apartado constan los siguientes conceptos:

Descripción	Material	Unidad	Precio	Unidades	Precio
Tablero	HA/35/P/20/IIb	m ³	431.89 €/un.	1130.00 Un.	488,035.70 €
Torres	HA/50/P/20/IIb	m ³	530.90 €/un.	350.00 Un.	185,815.00 €
Forjado de losa maciza	HA/35/P/20/IIb	m ²	106.97 €/un.	1100.00 Un.	117,667.00 €

Por lo que el total de la partida relativa al hormigón armado ascenderá hasta un total de 791,517.70 €.

8.3.2. Acero

En este apartado constan los siguientes conceptos:

Descripción	Material	Unidad	Precio	Unidades	Precio
Tirantes diám. 150 mm	Y-1860-S7	m	470.91 €/un.	580.00 Un.	273,127.80 €
Tirantes postens. 32 mm	Y-1860-S7	m	66.94 €/un.	2600.00 Un.	174,044.00 €
Anclajes a las torres	S355-J0	Un.	911.48 €/un.	24.00 Un.	21,875.52 €
Anclajes al tablero	S355-J0	Un.	876.94 €/un.	24.00 Un.	21,046.56 €

Por lo que el total de la partida relativa al hormigón armado ascenderá hasta un total de 490,093.88 €.

8.4. Controles de calidad y ensayos

Para la correcta realización del proyecto se requiere de un alto grado de control de calidad en los materiales recibidos, por lo que resulta necesario destinar una partida a cumplir este objetivo. El montante de esta partida presupuestaria es de 39,892.22 €.

8.4.1. Estructuras de hormigón

Debido a la extensión del desglose de esta partida, sólo se mencionará el montante global dedicado a ella, ascendiendo a un total de 14,782.20 €.

8.4.2. Estructuras de acero

Debido a la extensión del desglose de esta partida, sólo se mencionará el montante global dedicado a ella, ascendiendo a un total de 7,774.40 €.

8.4.3. Estudios geotécnicos

Debido a la extensión del desglose de esta partida, sólo se mencionará el montante global dedicado a ella, ascendiendo a un total de 17,335.62 €.

8.2.1. Pilotes

El precio calculado para esta partida es el conjunto del precio para la realización del pilotaje y su posterior descabezado, en caso de ser necesario.

Descripción	Material	Unidad	Precio	Unidades	Precio
Realización de los pilotes "In situ"	-	m	481.49 €/un.	3000.00 Un.	1,444,470.00 €
Descabezado de pilotes	-	m	61.09 €/un.	210.00 Un.	12,828.90 €

El monto total asciende a 1,427,298.90 €.

8.2.2. Regularización

Esta partida incluye únicamente el costo del vertido del hormigón de limpieza, cuya realización tiene un importe de 22,156.80 €.

8.2.3. Contenciones

Este apartado tiene en consideración los siguientes aspectos:

Descripción	Material	Unidad	Precio	Unidades	Precio
Maquinaria apantalladora	-	Un.	5,653.72 €/un.	4.00 Un.	22,614.88 €
Muro pantalla de prof. menor a 15 m	-	m ²	173.19 €/un.	360.00 Un.	62,384.40 €
Anclaje provisional al terreno	-	Un.	471.51 €/un.	180.00 Un.	84,871.80 €
Arriostramiento provisional	-	m	232.25 €/un.	120.00 Un.	27,870.00 €
Descabezado de muros pantalla	-	m	53.21 €/Un.	180.00 Un.	9,577.80 €
Doble murete guía para muro pant.	-	m	257.22 €/Un.	180.00 Un.	46,299.60 €

El total para esta partida asciende a 253,582.48 €.

8.2.4. Encepados

Se consideran que para la realización del encepado son necesarios:

Descripción	Material	Unidad	Precio	Unidades	Precio
Encofrado recuperable	-	m ²	22.66 €/un.	200.00 Un.	4,532.00 €
Encepado de grupo de pilotes	-	m ³	259.49 €/un.	7000.00 Un.	1,816,430.00 €

El coste total de este apartado 1,820,962.00 €.

8.3. Estructuras

El presupuesto calculado para la construcción del tablero, las torres de tirantes y los propios tirantes se detalla a continuación, su importe total asciende a 1,281,611.58 €.

CAPÍTULO 8:

PRESUPUESTO

En el presente capítulo se realizará un resumen del presupuesto para este proyecto. Para examinar las partidas en profundidad puede utilizarse el volumen de presupuesto completo adjunto a esta memoria.

8.1. Acondicionamiento del terreno

El coste total de acondicionamiento del terreno se eleva a 1,482,290.00 €. Distribuidos en los cuatro puntos subsiguientes.

8.1.1. Movimientos de tierras

Compuesto por: operaciones de desbrozado, terraplenado, excavación de pozos de cimentación y transporte a vertedero autorizado de los residuos generados. El monto total asciende a 1,482,290.00 €.

Descripción	Material	Unidad	Precio	Unidades	Precio
Desbroce y limpieza de 50 cm. prof.	-	m ²	3.44 €/un.	3600.00 Un.	12,384.00 €
Terraplenado hasta 10600 m3	-	m ³	10.02 €/un.	10600.00 Un.	106,212.00 €
Excavación pozo para cimentaciones	-	m ³	103.69 €/un.	12600.00 Un.	1,306,494.00 €
Transporte de residuos a vertedero	-	m ³	5.72 €/un.	10000.00 Un.	57,200.00 €

8.2. Cimentaciones

El coste final para la realización de las cimentaciones incluirá la realización del pilotaje, la regularización previa del terreno, la construcción de los muros de contención necesarios y la realización de los encepados según el proyecto, su coste será de 3,554,000.18 €.

7.4. Estructuras

7.4.1. Acero

- DB SE-A Seguridad estructural: Acero
Código Técnico de la Edificación (CTE). Parte II. Documento Básico SE-A.
Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, del Ministerio de Vivienda.
B.O.E.: 28 de marzo de 2006
Modificado por el Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre, del Ministerio de Vivienda.
B.O.E.: 23 de octubre de 2007
Corrección de errores.
B.O.E.: 25 de enero de 2008

7.4.2. Hormigón armado

- Fabricación y empleo de elementos resistentes para pisos y cubiertas
Real Decreto 1630/1980, de 18 de julio, de la Presidencia del Gobierno. B.O.E.: 8 de agosto de 1980
Modificado por:
Modificación de fichas técnicas a que se refiere el Real Decreto anterior sobre autorización de uso para la fabricación y empleo de elementos resistentes de pisos y cubiertas
Orden de 29 de noviembre de 1989, del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. B.O.E.: 16 de diciembre de 1989
Modificado por:
Actualización del contenido de las fichas técnicas y del sistema de autocontrol de la calidad de la producción, referidas en el Anexo I de la Orden de 29 de noviembre de 1989
Resolución de 6 de noviembre, del Ministerio de Fomento. B.O.E.: 2 de diciembre de 2002
- Actualización de las fichas de autorización de uso de sistemas de forjados
Resolución de 30 de enero de 1997, del Ministerio de Fomento.
B.O.E.: 6 de marzo de 1997

Modificada por:

Modificación del Real Decreto 1177/1992, de 2 de octubre, por el que se reestructura la Comisión Permanente del Hormigón y el Real Decreto, 2661/1998, de 11 de diciembre, por el que se aprueba la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)

Real Decreto 996/1999, de 11 de julio, del Ministerio de Fomento. B.O.E.: 24 de junio de 1999

Actualizada la Comisión Permanente del Hormigón por:

Actualización de la composición de la Comisión Permanente del Hormigón:

Orden de 18 de abril de 2005, del Ministerio de Fomento. B.O.E.: 4 de mayo de 2005

7.3. Cimentaciones

- DB SE Seguridad estructural

Código Técnico de la Edificación (CTE). Parte II. Documento Básico SE.

Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, del Ministerio de Vivienda. B.O.E.: 28 de marzo de 2006

Modificado por el Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre, del Ministerio de Vivienda. B.O.E.: 23 de octubre de 2007

Corrección de errores.

B.O.E.: 25 de enero de 2008

- DB SE-C Seguridad estructural: Cimientos

Código Técnico de la Edificación (CTE). Parte II. Documento Básico SE-C.

Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, del Ministerio de Vivienda. B.O.E.: 28 de marzo de 2006

Modificado por el Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre, del Ministerio de Vivienda. B.O.E.: 23 de octubre de 2007

- Norma de Construcción Sismorresistente: parte general y edificación (NCSE-02)

Real Decreto 997/2002, de 27 de septiembre, del Ministerio de Fomento. B.O.E.: 11 de octubre de 2002

Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre, del Ministerio de Vivienda. B.O.E.: 23 de octubre de 2007

Corrección de errores:

Corrección de errores y erratas del Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Ministerio de Vivienda. B.O.E.: 25 de enero de 2008

- Código Técnico de la Edificación (CTE). Parte I

Disposiciones generales, condiciones técnicas y administrativas, exigencias básicas, contenido del proyecto, documentación del seguimiento de la obra y terminología.

Modificado por:

Modificación del Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación

Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre, del Ministerio de Vivienda. B.O.E.: 23 de octubre de 2007

Corrección de errores:

Corrección de errores y erratas del Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Ministerio de Vivienda. B.O.E.: 25 de enero de 2008

- Ley reguladora de la subcontratación en el sector de la construcción
Ley 32/2006, de 18 de octubre, de la Jefatura del Estado. B.O.E.: 19 de octubre de 2006

7.2. Recepción de materiales

- Instrucción para la recepción de cementos (RC-03)

Real Decreto 1797/2003, de 26 de Diciembre, del Ministerio de la Presidencia. B.O.E.: 16 de enero de 2004

Corrección de errores:

Corrección de errores del Real Decreto 1797/2003, de 26 de diciembre. B.O.E.: 13 de marzo de 2004

- Instrucción de Hormigón Estructural EHE

Real Decreto 2661/1998, de 11 de diciembre, del Ministerio de Fomento. B.O.E.: 13 de enero de 1999.

CAPÍTULO 7:

NORMATIVA

El presente proyecto se somete a las siguientes normas reguladoras y reglamentos.

7.1. Normativa de carácter general

- Ley de Ordenación de la Edificación
Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de la Jefatura del Estado. B.O.E.: 6 de noviembre de 1999
Modificada por:
Modificación de la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación
Artículo 82 de la Ley 24/2001, de 27 de diciembre, de Medidas Fiscales, Administrativas y del Orden Social, de la Jefatura del Estado. B.O.E.: 31 de diciembre de 2001
Modificada por:
Modificación de la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación
Artículo 105 de la Ley 53/2002, de 30 de diciembre, de Medidas Fiscales, Administrativas y del Orden Social, de la Jefatura del Estado. B.O.E.: 31 de diciembre de 2002
- Código Técnico de la Edificación (CTE)
Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, del Ministerio de Vivienda. B.O.E.: 28 de marzo de 2006
Modificado por:

siendo desplazado horizontalmente sustentándose únicamente sobre la parte preexistente del mismo tablero, en voladizo.

Una vez alcanzado el punto de anclaje de los tirantes T1A y T1B, y habiendo situado su anclaje en el tablero, cuando se considere que el fraguado del hormigón con el anclaje ha sido suficiente, puede colocarse la primera pareja de tirantes y realizar un tesado a un valor de tensión suficiente para evitar la flexión del voladizo de tablero ya realizado, no será necesario llegar al valor final de tesado.

Se procederá entonces a seguir avanzando el encofrado del tablero, hasta llegar a los anclajes de los tirantes T2A y T2B, donde tras verificar la seguridad del anclaje, se situarán los mencionados tirantes, que volverán a tesar lo suficiente para evitar flexión en el siguiente tramo del tablero.

Esta última operación se repetirá hasta llegar a la pareja de tirantes T4A y T4B. Éstos tirantes sólo recibirán un tesado suficiente que garantice la no flexión de los propios tirantes.

Para sustentar el tablero en este punto de unión con la pareja de tirantes T4A y T4B, se construirá una estructura de acero provisional que recibirá el peso de este segmento del tablero. La construcción del tablero seguirá adelante ahora, añadiendo tirantes hasta la pareja T6A y T6B.

6.5. Tesado final de los tirantes

Una vez el tablero esté completo y todos los tirantes colocados con mayor o menor tensión, se procederá al tesado final de todos los tirantes hasta los valores definidos en el proyecto, de forma que cuando el puente tenga la contraflecha calculada en el proyecto, él solo se liberará de las estructuras de apoyo auxiliares y se elevará lo suficiente como para que su zona central se eleve entre 9 y 10 cm.

6.5.1. Orden de tesado

El orden de tesado es fundamental para evitar tensiones inapropiadas en el tablero así como en las torres. El tesado deberá ser simétrico en ambos lados del puente en cuanto al número y la letra del tirante.

Inicialmente, se procederá a realizar el tesado de la pareja T1A y T1B hasta su valor de tensión nominal marcado. Se procederá luego al tesado de los tirantes T2A, T2B, T3A y T3B hasta sus valores de diseño fijados.

Seguidamente, se procederá al tesado de la pareja T5A y T5B, tras éstos, se pasará a tesar la pareja de tirantes centrales T6A y T6B.

Ahora se habrá liberado una gran carga de la estructura auxiliar que está soportando el punto de anclaje de la pareja T4A y T4B, por lo que al tesar finalmente estos tirantes, el tablero se elevará unos centímetros sobre la estructura, y tras verificar que la flecha generada en el tablero en sus distintos puntos de anclaje con los tirantes es la correcta, podrá desmontarse la estructura auxiliar definitivamente.

6.2. Cimentaciones

6.2.1. Pilotaje

En esta fase deberán realizarse las perforaciones para la posterior ejecución de los pilotes bajo el futuro encepado. Serán realizadas las perforaciones según el proyecto.

En este apartado deberá prestarse ya una muy cuidadosa realización y el control de ejecución deberá ser intenso en cuanto a la calidad de los materiales y a la realización de los armados que vayan a formar parte de los pilotes.

Deberán respetarse también los tiempos de fraguado del hormigón de los pilotes antes de continuar con la construcción del encepado.

6.2.2. Encepado

Mientras se da un cierto margen de tiempo para que el hormigón de los pilotes fragüe, pueden irse realizando las labores de montaje de las armaduras del encepado, que debidamente inspeccionadas pasarán a integrar la losa que unirá toda la matriz de pilotes anteriormente construidos.

También deberá realizarse ahora la armadura que sobresalga del encepado para formar parte integrante de las torres.

Dada lo masivo del encepado, deberá respetarse un tiempo de fraguado suficiente antes de proceder a la continuación de la elaboración de las torres.

6.3. Torres

Una vez el encepado tenga una resistencia aceptable para proseguir con la construcción, deberán iniciarse las labores de encofrado de la base de las torres, para luego ir ascendiendo éste mientras se sitúa el correspondiente forjado como corresponde.

Dado que las torres tienen la capacidad de resistir su propio peso, no será necesaria ninguna estructura auxiliar de apoyo para ellas.

Inicialmente las torres tendrán unos desplazamientos previstos de menos de 7 mm hacia su lado teórico de caída, esto deberá verificarse antes de seguir con la construcción. El posterior tesado de los tirantes eliminará parte de esta desviación.

6.4. Tablero

El tablero se construirá simultáneamente desde las dos orillas, de ser esto posible. En primer lugar se realizará el encofrado correspondiente, que irá

CAPÍTULO 6:

CONSTRUCCIÓN

En este capítulo se describirá detalladamente el proceso constructivo para la realización del proyecto de puente atirantado, mostrando los pasos intermedios en el desarrollo de la construcción y los elementos auxiliares de apoyo que sean necesarios para los estados intermedios de la propia construcción.

Los pasos aquí descritos se aplican para ambas mitades del puente, habida cuenta de su simetría, aunque se omiten repeticiones por motivos obvios.

6.1. Preparado del terreno

6.1.1. Desbrozado inicial

En primer lugar, será necesario desbrozar y eliminar la primera capa de tierras que puedan contener elementos extraños o plantas que interfieran en los procesos constructivos que más tarde deban llevarse a cabo.

Se delimitará un área suficiente grande a desbrozar, de forma que puedan realizarse las cimentaciones tal y como están descritas en el proyecto sin interferencia alguna.

6.1.2. Terraplenados

Para asegurar que el terreno mantenga un nivel uniforme, será necesario realizar un terraplenado suficiente, de forma que se parta de una superficie plana para excavar en ella las cavidades dónde deberán construirse los encepados que servirán de apoyo a las torres y el tablero.

5.3.3. Resistencia en los tirantes

Dado que los tirantes son elementos estructurales cuya principal función es absorber esfuerzos de tipo axil, resulta trivial calcular que la sección de éstos tirantes resulte adecuada, siempre que se obvien los efectos de la tendencia del tirante a seguir una trayectoria en forma de catenaria.

Debido a la propia naturaleza de los anclajes entre los tirantes y el tablero y entre éstos y las torres, puede aceptarse que únicamente les serán transmitidos esfuerzos de tracción y que por lo tanto, los efectos de las posibles flexiones que puedan tener lugar son despreciables frente a los valores de tensión axil que se presentan.

Por tanto, comparando los valores de tensión axil alcanzada y los valores asumibles por el material de los tirantes, podremos comprobar el factor de seguridad alcanzado.

El cálculo resultará trivial, en primer lugar hallamos el área efectiva que soportará la tensión axil:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - (D - 2 \cdot e)^2) \Rightarrow A = \frac{\pi}{4} \cdot (150^2 - (150 - 2 \cdot 12)^2)$$
$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (150^2 - 126^2) = A = \frac{\pi}{4} \cdot 6624 \approx 5202.48 \text{mm}^2$$

Ahora, conocido el hecho de que los tirantes más solicitados son la pareja T6A y T6B, ya que sus valores de tesado alcanzan los 7500 kN, mediante la aplicación de la fórmula de la tensión axil, encontraremos el nivel de sollicitación del tirante:

$$\tau_{Axil} = \frac{F_{Axil}}{A} \Rightarrow \tau_{Axil} = \frac{7.5 \cdot 10^6 \text{ N}}{5202.48 \text{mm}^2} \approx 1441.62 \text{MPa}$$

A la luz de los resultados obtenidos, comparando el valor obtenido de 1442 MPa con el valor de tensión admisible por el material de los tirantes que según el proveedor es de 1650 MPa, podemos afirmar que los mencionados tirantes soportarán la tensión generada por el tesado.

Los desplazamientos encontrados son siempre menores a 3.50 mm, lo que supone, sobre una luz de 12 metros, un valor aceptable.

5.3.2. Resistencia en las torres

Para calcular las tensiones generadas en la torre, se han establecido cargas sobre las caras que recibirán los empujes de los tirantes, sobre cada cara se ha dispuesto la fuerza que generará cada tirante una vez sea tesado a su correspondiente valor, definido en la tabla que se incluía dentro del apartado 5.2.

Los resultados que muestra el programa FEM son los siguientes:

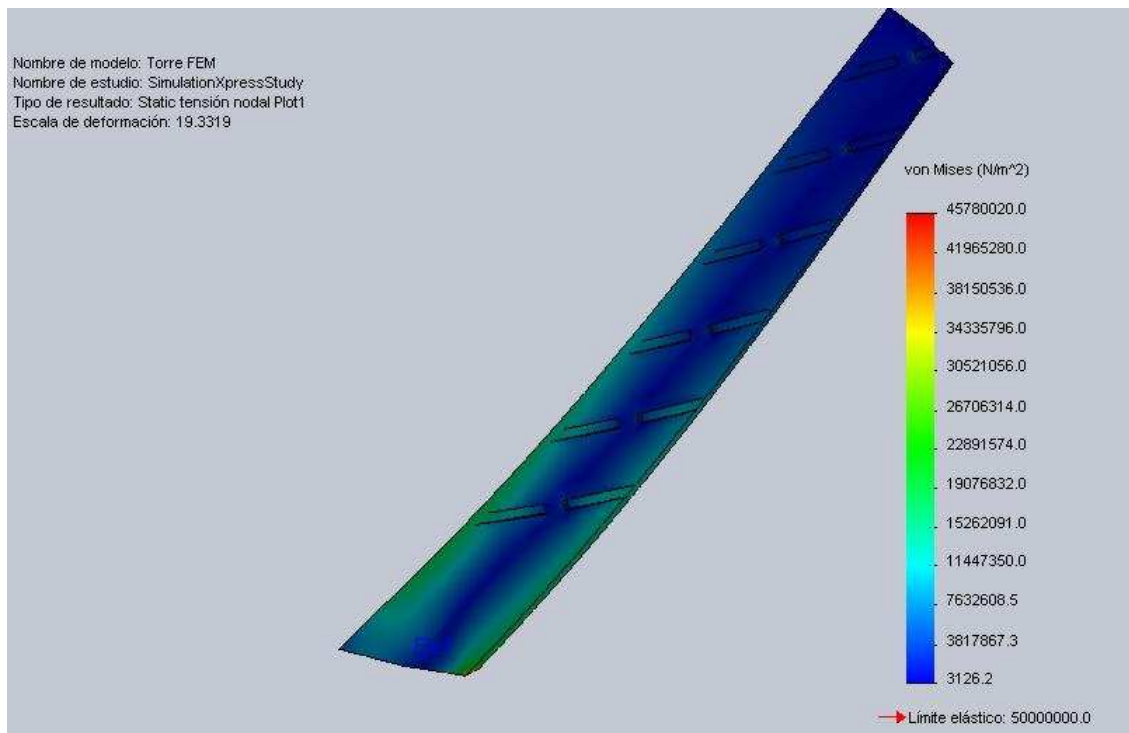


Fig. 12: Distribución de tensiones en una de las torres bajo las cargas de tesado de todos sus tirantes.

Como podemos observar, el punto cuya tensión es máxima alcanza un valor de 45.78 MPa, lo cual aunque aceptable para el material, resulta un valor demasiado elevado.

Por ello deberán situarse armaduras más densas en la zona de unión entre la torre y la cimentación, ya que este es el lugar dónde se presenta este concentrador de tensiones.

Según el programa FEM el valor mínimo del factor de seguridad es de 1.09, por lo que las armaduras de tracción, que son las más solicitadas, deberán ser reforzadas.

Ahora, se necesita definir el valor de las cargas consideradas anteriormente, estos valores están tabulados a continuación:

Tipo de carga	Valor	Unidades
Peso propio	Valor calculado por el programa FEM	-
Carga de uso	490.50	kN
Compresión	3.78	MPa
Cortante	9711.90	kN
Tirantes T1A y T1B	7000	kN

Según el programa FEM, las tensiones generadas en el tablero siguen esta distribución:

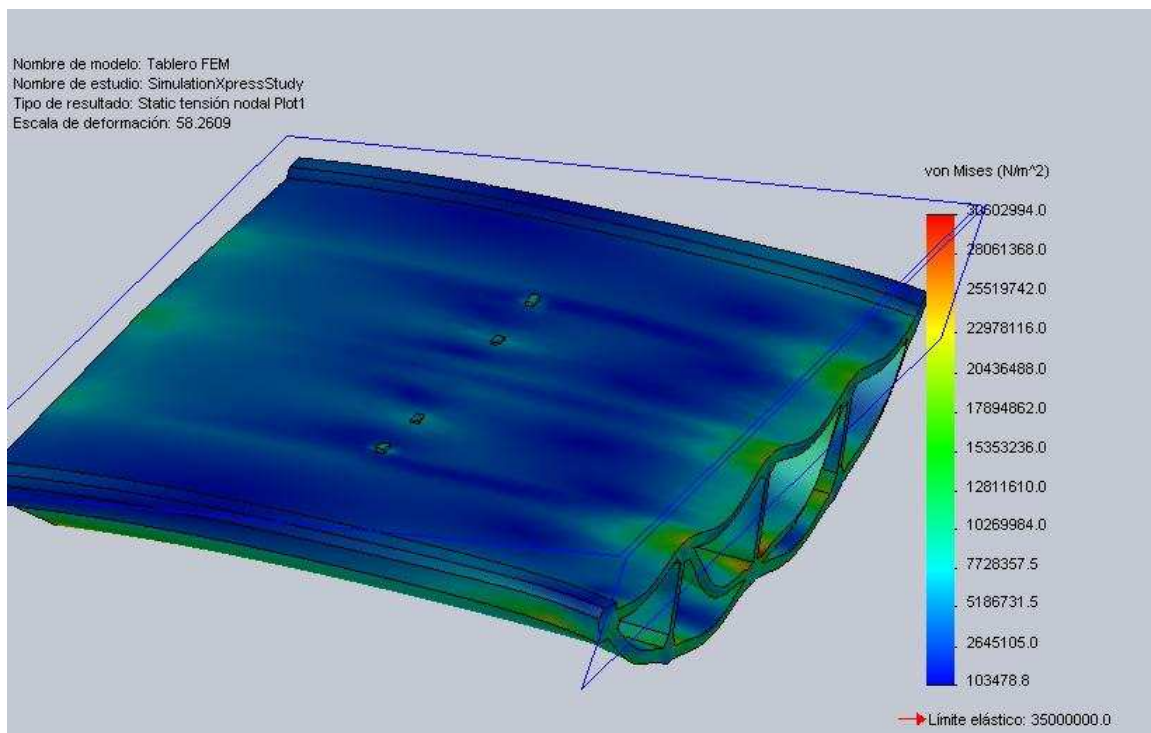


Fig. 11: Distribución de tensiones en un modelo tridimensional del segmento más solicitado del tablero.

Como puede observarse, en el punto más solicitado, se alcanza un valor de tensión de 30.60 MPa, lo que es aceptable para el material.

El análisis de factor de seguridad nos da un valor de 1.14, que sin duda se verá aumentado por el uso de forjados más densos en las zonas que presenten algún tipo de concentración de tensiones.

5.3. Cálculo de resistencia de secciones y materiales

Dada la dificultad para realizar el cálculo de las secciones implicadas debido a su propia geometría de naturaleza compleja y a la presencia de puntos concentradores de tensiones, se utilizarán principalmente programas de cálculo mediante el método de los elementos finitos (FEM).

Además, como medida adicional de seguridad, se procederá al cálculo del tablero y la torre en su conjunto, además de por tramos.

5.3.1. Resistencia en el tablero

La sección del tablero más crítica es aquella que esta en contacto directo con la cimentación y recibe la tensión compresiva de todos los tirantes de un semitablero, además de la carga del peso del propio tablero y la carga de uso.

Las cargas que han sido establecidas son en cada tramo calculado son:

- Carga de uso, correspondiente a 12500 Kg. repartidos en cuatro superficies de 40 cm. de ancho y 15 cm. de largo, correspondientes al tren de rodadura de un camión de gran tonelaje en cada carril
- Carga de compresión por el efecto de los tirantes restantes.
- Carga oblicua de la pareja de tirantes que actúan localmente.
- Carga cortante debido al peso del resto del tablero.

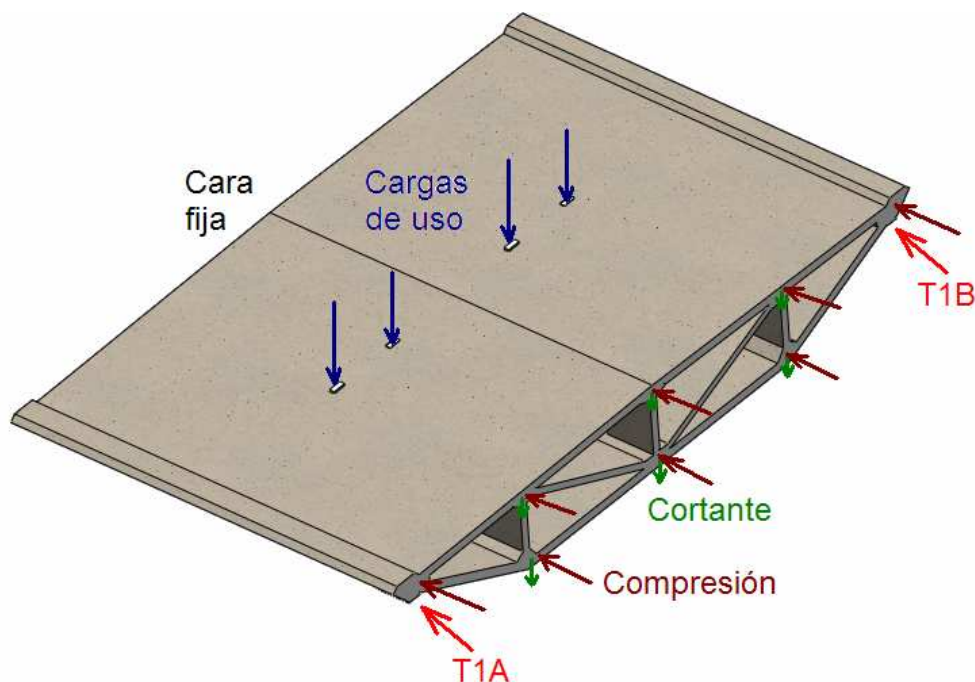


Fig. 10: Modelo tridimensional mostrando los ejes de actuación de cada una de las fuerzas aplicadas sobre él.

Además, para realizar las simulaciones de los segmentos de tablero, se deberá considerar el efecto de compresión que provocan el resto de tirantes.

El tesado de las parejas de tirantes será simétrico para cada semitablero, y los valores de tensión de tesado serán éstos:

Pareja de tirantes	Tensión de tesado unitaria [kN]
T1A y T1B	3500
T2A y T2B	4000
T3A y T3B	4500
T4A y T4B	5000
T5A y T5B	6125
T6A y T6B	7500

Para cada segmento de tablero, conocido el ángulo entre los tirantes y el tablero, su componente horizontal provocará una compresión aplicable sobre toda la sección del tablero igual al valor de tesado multiplicado por el coseno del ángulo que éstos forman con el tablero.

Así pues, deberá situarse una presión uniforme y una carga puntual con los valores de la tabla siguiente para cada segmento de semitablero:

Segmento del tablero	Carga puntual del tirante [kN]	Área de la sección [m ²]	Compresión en el tablero [MPa]
De Base a T1	3500	12.5	3.78
De T1 a T2	4000	12.5	3.70
De T2 a T3	4500	12.5	2.98
De T3 a T4	5000	11.8	2.31
De T4 a T5	6125	11.8	1.28
De T5 a T6	7500	11.8	0.00

A continuación se muestran los pesos totales, pesos por eje, longitudes y distancia entre ejes de los diferentes e hipotéticos vehículos utilizados:

Tipo de vehículo	Peso máximo total (Kg.)	Peso máximo por sistema de ejes (Kg.)	Distancia entre sistemas de ejes (m)	Longitud física del vehículo (m)
Común	3500	<2200	>2 y <4	5
Camión	42000	<25000	>13 y <15	17

Así pues, se utilizarán las posibilidades más desfavorables para el puente, en una longitud de 90 metros, cabrán un total de 18 vehículos comunes en un carril, y un total de 6 camiones. En cada eje se establecerá la carga máxima que admite la ley, con la separación menor que ésta permita. Por tanto, las cargas a establecer serán como sigue:

Tipo de vehículo	Peso máximo por sistema de ejes (Kg.)	Distancia entre sistemas de ejes (m)	Longitud física del vehículo (m)
Común	2200	2 (ejes simples)	5
Camión	25000	13 (ejes dobles)	15

Ahora bien, como la ley obliga a guardar una separación mínima de 120 cm. entre los ejes individuales que formen un sistema de ejes, se puede considerar que el ancho de la sección resistente de hormigón que verá aplicada sobre sí la carga del eje se corresponderá con éstos 120 cm.

Entonces, una sección de tablero de 120 cm. de anchura, debería soportar dos cargas de 6250 Kg. centradas ambas respecto al centro de uno de los dos carriles (ambas forman una carga de 12500 Kg. por eje), con una separación de 2 metros entre sí; en el otro carril, serán situadas dos cargas idénticas.

5.2. Cargas debidas a los tirantes

Como se mencionó anteriormente, los tirantes provocarán un esfuerzo sobre el tablero mediante una tensión de tesado de un determinado valor, que estará tabulado en este mismo apartado, este esfuerzo deberá aplicarse localmente para observar el efecto de los posibles concentradores de tensiones que puedan aparecer.

CAPÍTULO 5: CÁLCULOS Y VERIFICACIONES

En este capítulo se definirán y establecerán las cargas aplicables sobre el tablero, las torres y los tirantes del puente, y posteriormente se procederá a verificar que todos los elementos estructurales soporten las mentadas cargas.

5.1. Cargas de uso aplicables

Para poder definir las cargas que actúan en el caso que nos ocupa, debemos preguntarnos qué nivel de tráfico ha de absorber el puente, pues a partir de este dato, se podrá inferir el nivel de carga que habrá de soportar cada sección del tablero, y por tanto, las tensiones a la que se verán sometidos los tirantes y las torres.

Para calcular el nivel de carga que se solicitará al puente, estableceremos que uno de los carriles esté totalmente colapsado de vehículos de gran porte, tales como camiones con el peso máximo admisible por eje según la ley vigente; el otro carril se considerará totalmente colapsado por vehículos comunes, equivalentes a turismos y furgonetas.

	Tablero	Torres
Designación E.H.E.	HA-35-P-20-IIb	HA-50-P-20-IIb
RC (28 días MPa)	35	50
Consistencia	Plástica	Plástica
T _{máx} árido	20	20
Tipo de ambiente	IIb	IIb
Agua/cemento	Menor a 55%	Menor a 55%
Mín. cont. cemento	300 Kg./m ³	Entre 300 y 400 Kg./m ³
Tipo de cemento	BL-I 52.5	BL-I 52.5
Recubrimiento	Mayor a 30 mm	Mayor a 30 mm
Control de ejecución	Intenso	Intenso
Control de materiales	Estadístico	Estadístico

4.4.2. Acero en armaduras, tirantes y anclajes

Se deben definir ahora qué tipos de aceros serán empleados en los distintos armados y en los tirantes, en la mayoría de casos, servirán los aceros S 355 para los perfiles laminados, B-500-S para las armaduras pasivas y Y-1860-S7 para armaduras activas y para los tirantes.

	Perfiles laminados y anclajes	Armaduras pasivas	Armaduras activas y tirantes	Pernos
Calidad del acero	S 355 J0	B-500-S	Y-1860-S7	B-500-S
F _U (MPa)	510	550	1860	550
F _Y (MPa)	355	500	1650	350
F _U /F _Y	Mayor a 1.20	Mayor a 1.05	Mayor a 1.05	Mayor a 1.20
Alarg. en rotura	15%	12%	Relajación < 2%	15%
Contr. ejecución	Intenso	Intenso	Intenso	Intenso
Contr. materiales	Normal	Normal	Normal	Normal

4.3.2. Anclajes al tablero

Los anclajes al tablero serán los encargados de repartir por una superficie suficiente de hormigón los esfuerzos que se generen localmente en el punto de anclaje de cada tirante. Su geometría básica es como sigue:

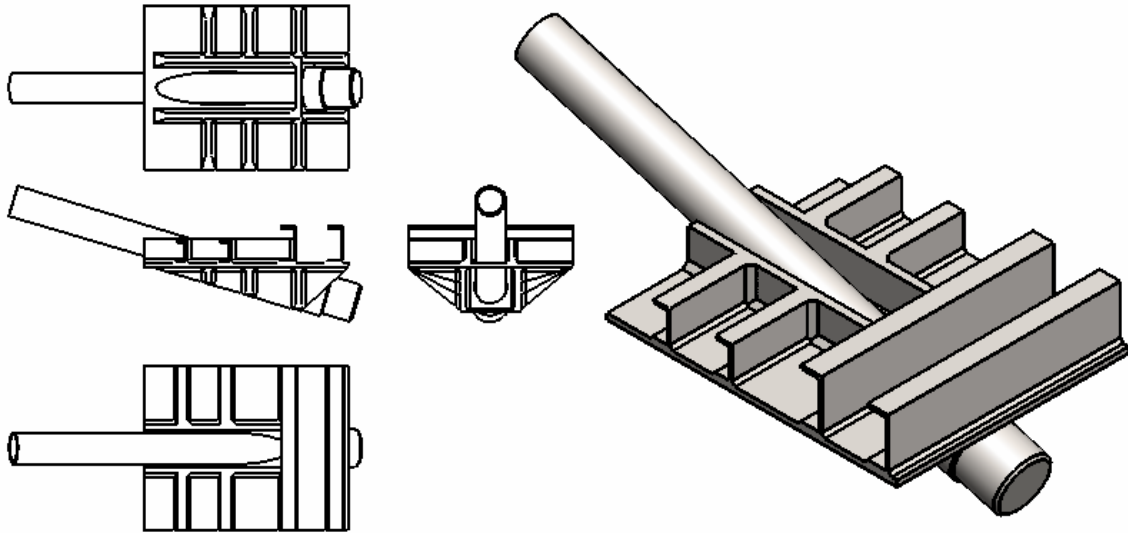


Fig. 9: Distintas vistas y modelo 3D de un anclaje del tablero. Obsérvese la gran superficie que presenta para repartir tensiones y los perfiles superiores que reparten la compresión al tablero.

4.4. Materiales

Mediante el cálculo más exhaustivo realizado a partir de la optimización, se ha comprobado que las tensiones implicadas en cada uno de los elementos estructurales eran menores a las previstas. Aunque los hormigones seleccionados originalmente cumplían con los requisitos en cuanto a resistencia, lo hacían manteniendo un margen manifiestamente superior a lo deseable, lo que impedía el aprovechamiento óptimo de la capacidad resistente del material.

Por ello, se han cambiado algunos de los materiales con los que se realizará la construcción, de forma que ésta finalmente resulte más barata pero siga cumpliendo con las especificaciones de diseño originales.

Los materiales que han sido cambiados son los hormigones, que pasan de ser HAR-70-P-20-IIb a ser HA-50-P-20-IIb en ambas torres, mientras que en el tablero pasaremos de utilizar el hormigón HA-50-P-20-IIb a utilizar HA-35-P-20-IIb.

4.4.1. Hormigón en tablero y torres

Para la construcción de las torres se utilizará un hormigón HA-50-P-20-IIb, y para la construcción del tablero, un hormigón HA-35-P-20-IIb. No obstante, se debe definir cómo se ha de realizar la mezcla dependiendo del elemento estructural al que vaya destinado:

4.2.3. Secciones resistentes en los tirantes

En los tirantes, la sección resistente será una corona circular de 150 mm de diámetro y 12 mm de espesor. El área efectiva de la mencionada sección es de 5202 mm², lo cual permite que, con un límite de rotura de 1650 MPa, cada tirante pueda asumir un esfuerzo máximo de 8583 kN.

Para la pareja de tirantes más solicitada, se requería una tensión combinada de 15000 kN, por lo que cada tirante debe soportar la mitad, resulta trivial confirmar que la sección utilizada será suficiente.

4.3. Anclajes de los tirantes

En primer lugar, este apartado definirá una nomenclatura y unas variables geométricas básicas para poder hacer referencia a cada uno de los tirantes.

Los tirantes se numerarán por parejas de izquierda a derecha, los del lado izquierdo de la calzada tendrán una "A" tras el numeral, y los del lado derecho una "B".

4.3.1. Anclajes a las torres

Los anclajes a las torres estarán compuestos por una estructura base de acero que recibirá los esfuerzos directamente de cada tirante y los trasladará a la propia torre uniformemente, de forma que el hormigón pueda absorber los esfuerzos generados.

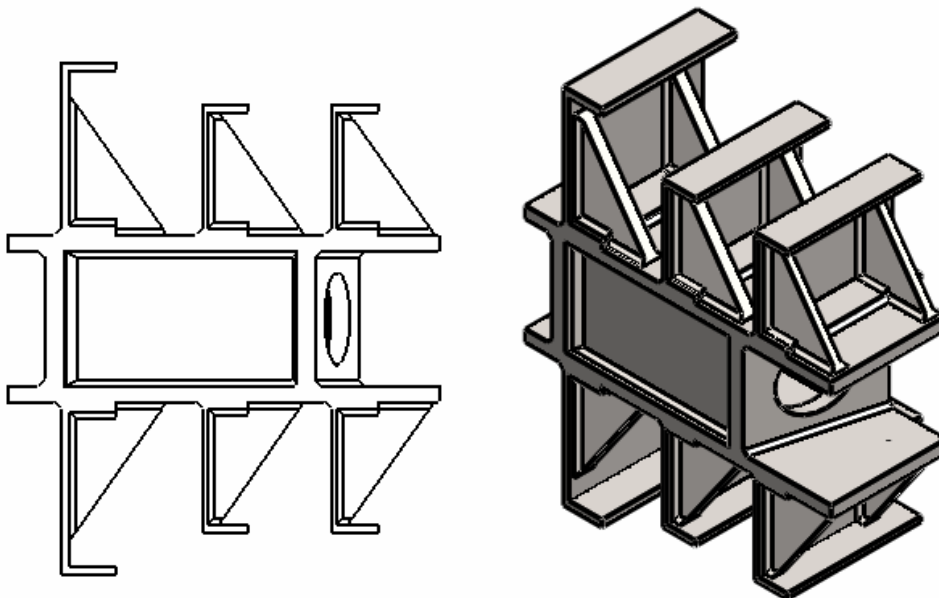


Fig. 8: Vista lateral y modelo tridimensional de un anclaje como los que irán embebidos en la estructura de la torre de tirantes.

4.2.1. Sección resistente en el tablero

La sección resistente en el tablero seguirá una forma básica de celosía de

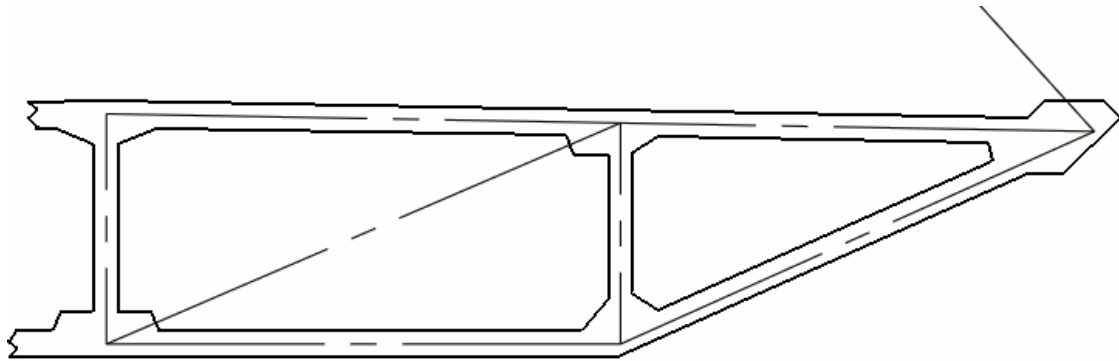


Fig. 6: Sección transversal del tablero en su unión con la cimentación.

hormigón armado como se muestra a continuación:

Aunque el área de la sección resistente se reduce conforme nos acercamos a la mitad del puente, su reducción respeta la forma básica de la celosía, tan sólo reduce su espesor desde los iniciales 26 centímetros hasta unos 22 centímetros en su parte final.

Su sección mínima será de 11.8 m².

4.2.2. Secciones resistentes en las torres

La sección resistente de las torres sí presenta grandes variaciones en cuanto al área de la sección resistente.

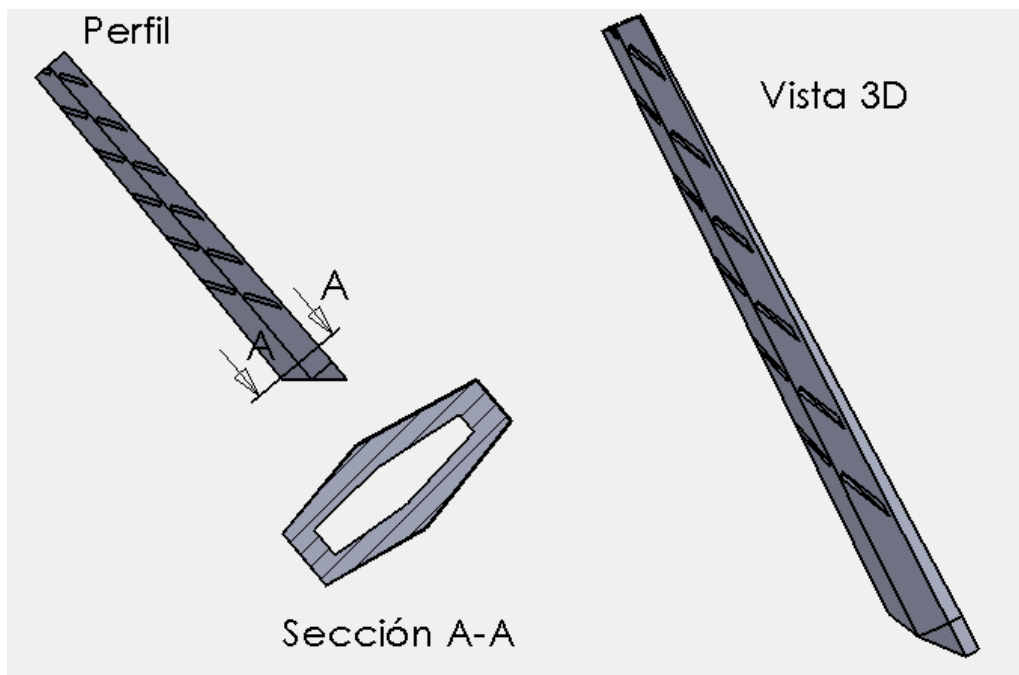


Fig. 7: Diferentes vistas de la torre de tirantes, debido a la dificultad de su geometría, se muestra también un modelo 3D.

CAPÍTULO 4:

SOLUCIÓN ADOPTADA

4.1. Geometría elegida

A la luz de los resultados de Metal 3D que afirman que la geometría adoptada es válida a efectos de resistencia, se procede a la caracterización en detalle del proyecto de puente atirantado que posteriormente pasará a la fase de construcción.

La geometría elegida no presenta cambios sustanciales con respecto a la que se simuló en el "Optimizador de puentes", con una separación entre tirantes de 6 metros y una inclinación de las torres de 50°, excepto por la ausencia del primer tirante.

4.2. Secciones resistentes

Ahora se describirán las secciones utilizadas en los subsiguientes elementos estructurales. No se incluirán aquí más que algunos croquis ilustrativos de las dimensiones y formas generales de dichas secciones, pues en los anexos pueden verse los planos detallados.

puentes" daba en su lugar unos resultados de 21 MN y 14 MN respectivamente.

Se ha observado que los valores de tensión en las barras de las torres y del tablero tienen unos valores de tensión asimilables a los indicados por el programa, teniendo éstos cierta tendencia a ser ligeramente inferiores.

Cabe indicar que si bien Metal 3D nos da valores de tensión de Von Mises para el punto más crítico de las torres de 1.82 MPa, mientras que el "Optimizador de puentes" da un valor de 1.61 MPa.

En ambos programas, las barras soportaban todo el conjunto de los esfuerzos implicados y por tanto la geometría es estructuralmente válida en ambos casos.

3.8.5. Conclusiones tras la comparación

Debido a la presencia de errores de cálculo en el "Optimizador de puentes", se ha considerado su período de ensayo como insuficiente. Simplemente podrían subsanarse sus errores con un período más largo de pruebas exhaustivas.

Dado que los resultados son aproximadamente proporcionales entre sí, cabe suponer que el programa comete algún error de proporcionalidad. Esto, como se suponía de antemano, resta credibilidad al programa como único elemento de cálculo para este proyecto, además de hacer ostensible la necesidad de comprobaciones más exhaustivas con un software comercial que esté totalmente probado.

De los resultados de la comparación puede afirmarse que si bien el "Optimizador de puentes" es una útil herramienta de comparación de distintas y numerosas opciones estructurales, su exactitud radica precisamente en la comparación, ya que los posibles errores de proporcionalidad que muestre para un caso concreto, serán mostrados para cualquier otro caso, por lo que sigue siendo un modo perfectamente válido de comparar distintas opciones.

libera parte de la tensión al segundo, reduce éste valor hasta que ambos tirantes resultan infrautilizados. Puesto que el tablero por si mismo es capaz de absorber los esfuerzos que sobre él se producen en este segundo nodo, parece que la solución obvia radique en la eliminación del primer tirante y aplicar un mayor tesado al segundo, de forma que tanto el segundo tirante como el tablero estén más solicitados y por tanto se aprovechen mejor las posibilidades resistentes de los materiales implicados.

Para lograr una flecha positiva de unos 10 cm. en el centro del tablero se hace necesario el tesado de todos los tirantes, con tensiones crecientes conforme aumenta la luz.

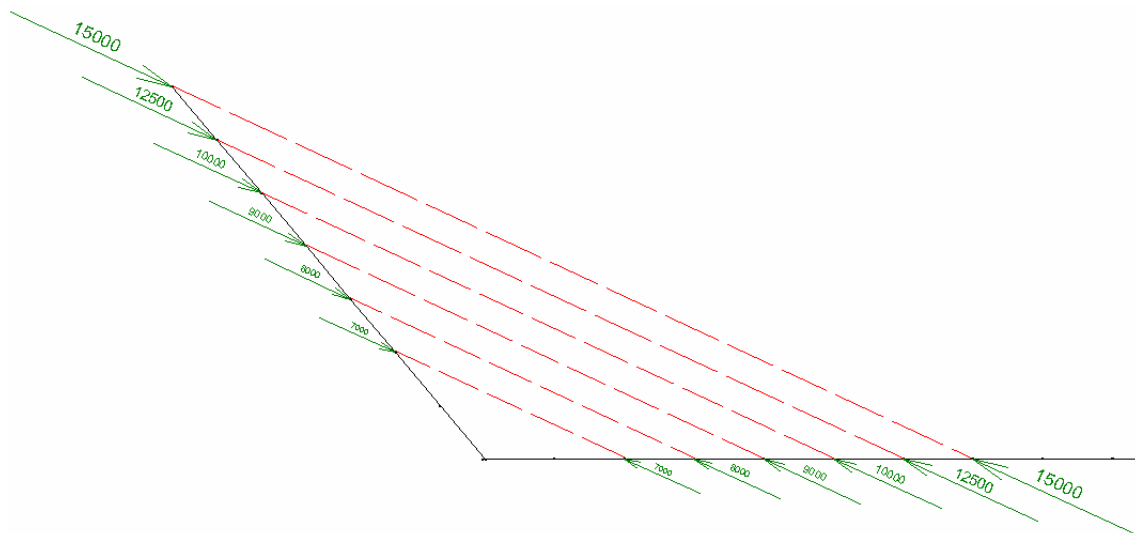


Fig. 5: Diagrama dónde puede observarse la sustitución de los tirantes como barras por sus fuerzas de tesado equivalentes sobre el tablero y las torres.

Se ha podido comprobar como las parejas de tirantes tienen tensiones con valores que oscilan desde los 7000 kN hasta los 15000 kN. Por tanto, los tirantes más solicitados tendrán unos esfuerzos axiales de 7500 kN cada uno, ahora, conociendo que su sección es una corona circular de 120 mm de diámetro exterior con un espesor de 10 mm, el cálculo de su tensión resulta trivial, obteniendo que el valor de la tensión es de 2170 MPa.

Este valor de tensión no resulta admisible, por lo que la sección de los tirantes cambiará a una sección de corona circular con un diámetro externo de 150 mm y un espesor de 12 mm, tal configuración permite alcanzar un valor de tensión de 1442 MPa, que si resulta inferior al máximo de 1650 MPa que se define para este material.

3.8.4. Comparación de resultados

Los resultados obtenidos para los tirantes no son representativos, puesto que realmente se han modelado de forma distinta a como lo han sido en el "Optimizador de puentes", por tanto, esta comparación será desestimada.

En cuanto a las reacciones, Metal 3D nos da unos valores de 24 MN para la reacción en vertical y de 15 MN·m de momento. El "Optimizador de

3.8.1. Consideraciones previas

Se creará un modelo de cada una de las geometrías que hemos considerado óptimas, y evaluaremos los resultados obtenidos.

Para la modelización de los tirantes y su tesado, no se dibujarán éstos como barras, si no que serán sustituidos por fuerzas con el mismo sentido que tendría el esfuerzo axial de estos mismos tirantes.

Esta sustitución permitirá observar los valores de tesado necesarios en cada tirante para asegurar la correcta contraflecha final del tablero, pero a la vez impedirá ver cual sería la tensión de los tirantes en el caso de no estar tesados.

Tanto el tablero como las torres se considerarán vigas rígidas, a efectos de simplificar el diseño, puesto que la validación final de sus secciones resistentes se realizará por medio de programas de análisis por el método de los elementos finitos.

3.8.2. Modelo considerado

El modelo considerado es como se muestra a continuación:

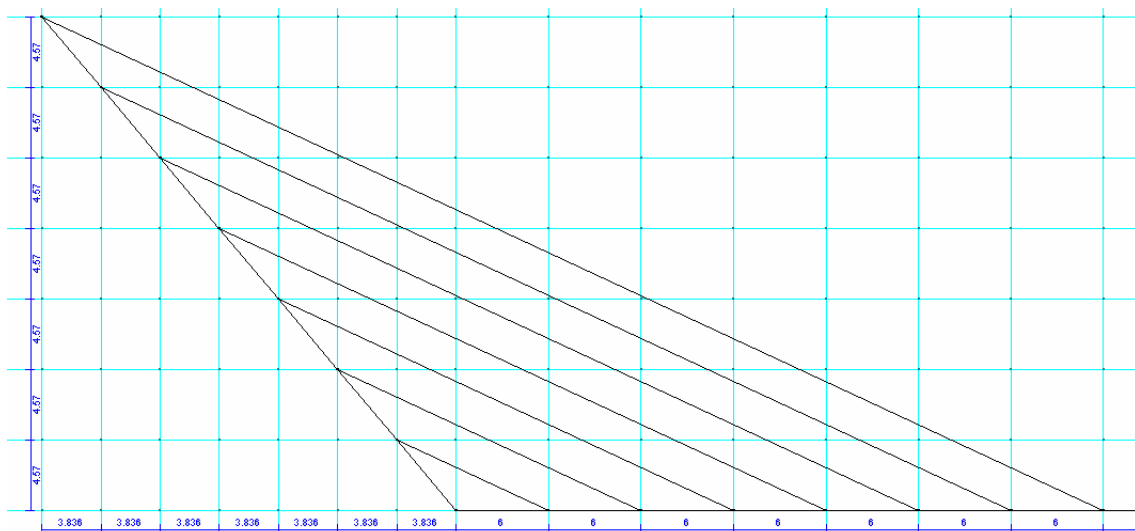


Fig. 4: Diagrama básico del puente, en Metal 3D, dónde puede verse el modelo realizado.

Cada tirante será sustituido por una fuerza en la misma dirección que tuviera este. Tal fuerza será variada para crear una contraflecha adecuada en el tablero.

Además del peso propio del tablero y de las torres, se deberán agregar cargas por valor de 25000 Kg. cada una, localizadas cada 10 metros sobre el tablero.

3.8.3. Resultados obtenidos

Mediante los resultados preliminares proporcionados por Metal 3D, se ha podido comprobar que el primer tirante no es necesario, puesto que aunque

3.6.8. Aprovechamiento óptimo de los materiales

Como se observa en las gráficas del apartado 3.5.5, el parámetro de separación entre tirantes no afecta de forma sustancial a las necesidades totales de hormigón, esto es debido a que realmente, es el ángulo el que más variabilidad aporta al volumen de hormigón necesario, haciendo aumentar o reducir la longitud total de las torres.

También ha de comentarse que la separación entre tirantes sí afecta de un modo sustancial a la cantidad de acero necesaria, puesto que la variación de este parámetro afecta directamente al número total de tirantes que serán necesarios y por tanto hará variar el volumen total de acero necesario.

Debido a los puntos anteriormente comentados, parece que la solución óptima pase por distancias entre tirantes lo mayores posibles y ángulos entre 50° y 60°, ya que la reducción de material en ángulos mayores no representa un ahorro significativo.

3.7. Geometría óptima

A partir de lo comentado en el apartado 3.6, se han definido como óptimas las geometrías generadas por una separación entre tirantes de entre 6 metros y 7.5 metros, con ángulos desde los 45° hasta los 60°.

Finalmente se opta por una separación entre tirantes de 6 metros, con una inclinación de las torres de 50°.

3.7.1. Justificación

Aunque las distancias entre tirantes mayores a 9 metros supongan ahorros significativos en materiales, han sido desestimadas debido a que transmiten a la cimentación cargas sustancialmente superiores que otras configuraciones.

Aunque en cuanto a aprovechamiento del esfuerzo en los materiales, la distancia entre tirantes de 5 metros sería óptima de no ser por los elevados esfuerzos horizontales y momentos transmitidos al terreno, que redundarían en una cimentación más cara y compleja.

3.8. Validación de la geometría óptima

Para verificar que realmente las geometrías calculadas son válidas estructuralmente hablando, disipando las posibles dudas existentes sobre la exactitud de los datos obtenidos con el "Optimizador de puentes" se ha procedido a su cálculo y verificación en el programa Metal 3D de CYPE Ingenieros S.A.

3.6.4. Esfuerzos en las cimentaciones óptimos

Generalmente, se prefiere que la mayor parte de la carga transmitida por el puente hacia el terreno por medio de su cimentación sea en la componente vertical, y que las cargas horizontales y los momentos sean los menores posibles.

A partir de los resultados obtenidos, parece que lo mejor en este aspecto sea elegir una separación entre tirantes entre 5, 6 ó 7.5 metros, y que el ángulo de las torres sea el valor más alto posible, tal como puede observarse viendo las gráficas del apartado 3.5.1.

En adelante, se prestarán especial atención a las separaciones entre tirantes que antes han sido mencionadas pues parece que de cara a la cimentación del puente ofrecen mayores ventajas.

3.6.5. Esfuerzos en el tablero óptimos

Este apartado no presenta una especial criticidad puesto que, como se ha comentado antes, la sección del tablero viene impuesta por las características demandadas al proyecto. Este apartado de optimización sólo será considerado en caso de empate técnico entre otras opciones que tengan un mayor peso en la elección final.

A partir de las gráficas del apartado 3.5.2, podemos observar cómo las separaciones menores son las que ofrecen un mayor aprovechamiento de la resistencia del material, se descarta una separación de 2.5 metros entre tirantes, debido al alto nivel de estrés que aparece debido a que siendo tensiones de Von Mises, es posible que éstas sean de tracción, ante lo cual el hormigón no presenta buenas cualidades, por ello, no debe llevarse al límite admisible la tensión generada.

3.6.6. Esfuerzos en las torres óptimos

Observando las gráficas del apartado 3.5.3, cabe deducir que las configuraciones geométricas que transmiten un menor esfuerzo a las torres son aquellas cuya separación entre tirantes es mayor a 5 metros.

En cuanto al ángulo óptimo, puede verse que el ángulo adquirido por la torre no repercute en grandes cambios en cuanto a esfuerzos producidos en las torres se refiere.

3.6.7. Esfuerzos en los tirantes óptimos

Según se observa en las gráficas del apartado 3.5.4, las distancias entre tirantes menores a 5 metros hacen impracticable asumir ángulos menores a unos 35°.

Con separaciones mayores se impone la reducción del ángulo de las torres como una forma de aprovechar mejor la sección de los tirantes, aunque también se plantea la reducción de su área efectiva.

3.6. Conclusiones

3.6.1. Consideraciones previas

De antemano cabe comentar que la continuidad que muestran las gráficas generadas a partir de los datos expuestos por el programa muestran que existe una correlación matemática real entre la geometría física del proyecto y las fuerzas que soportará la estructura una vez terminada.

Se considerarán las reacciones en los apoyos como indicadores preferentes en cuanto a la optimización del puente, puesto que en el preproyecto se pudo comprobar que un alto porcentaje del presupuesto total del proyecto corresponde a las cimentaciones.

3.6.2. Intervalos de confianza

Para poder asumir que los resultados ofrecidos son suficientemente válidos en comparación con otras geometrías simuladas, se han de establecer una serie de intervalos de variación dónde los resultados obtenidos pueden ser predichos aproximadamente a partir de un resultado anterior, lo que debe indicar una cierta tendencia en las gráficas obtenidas.

El conjunto de graficas anteriormente presentado muestra una continuidad que permite aventurar que no hay comportamientos que no puedan ser explicados matemáticamente, aunque también pueda observarse que su comportamiento no sea trivial en absoluto.

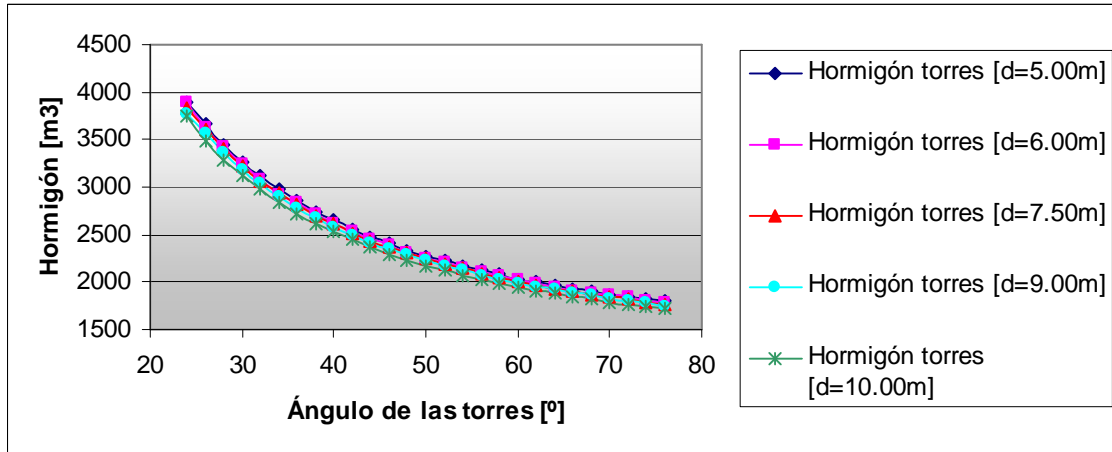
Vistas las continuidades y tendencias semejantes entre sí, se considera fiable el estudio realizado, siempre que tales resultados no sean los únicos tenidos en cuenta para la construcción final del proyecto y siempre que las geometrías finales del proyecto vayan a estar dentro del rango de las variables geométricas implicadas.

3.6.3. Sobre el aprovechamiento de las secciones

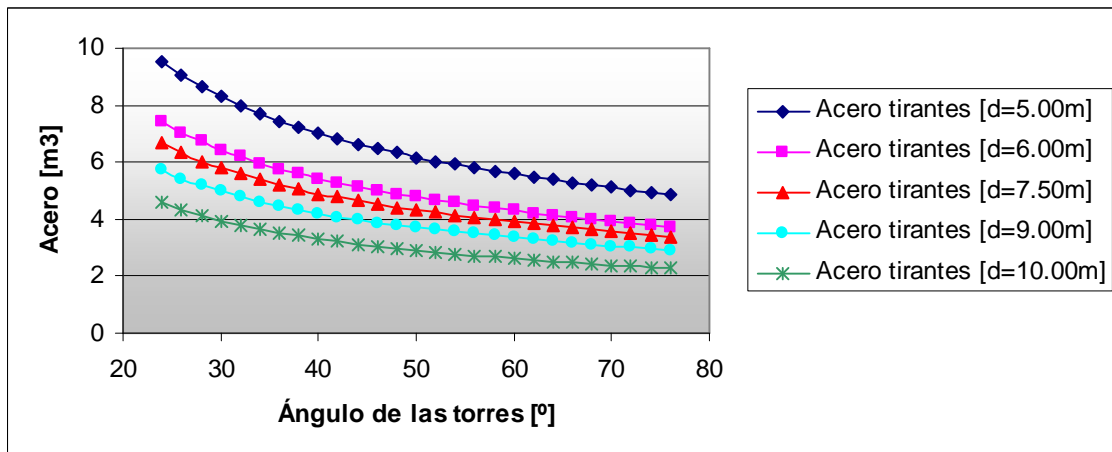
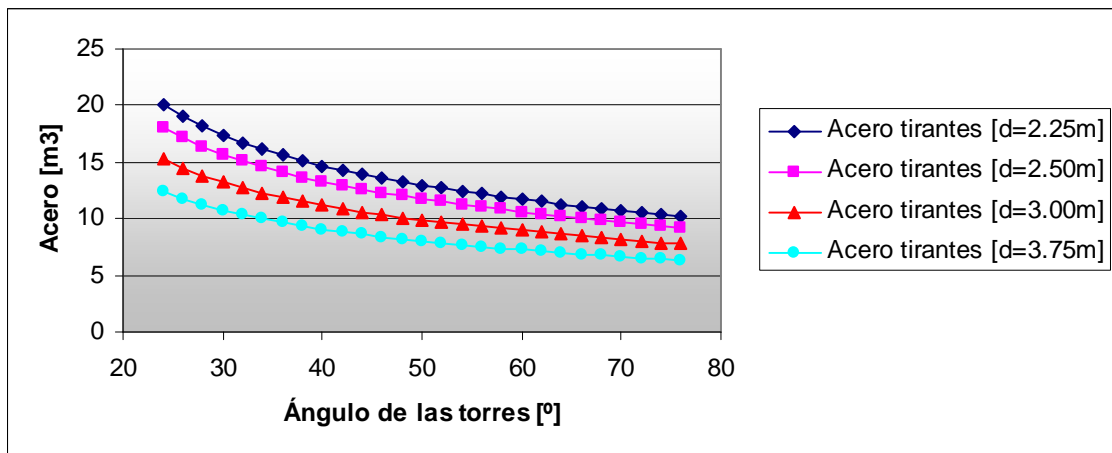
El hecho de no alcanzarse los valores máximos de resistencia de los materiales en sus respectivas secciones no implica directamente la existencia de un desaprovechamiento de material.

Hay secciones cuyo tamaño viene indirectamente impuesto por la función práctica que han de realizar, tal es el caso del tablero, cuya función como calzada obliga a establecer suficiente ancho para ella, que a su vez requiere ser compensada con un cierto espesor de su celosía interna, para aumentar su rigidez, lo que conlleva un aumento de la sección.

En algunos casos puede estudiarse a posteriori reducir en mayor o menor medida las secciones resistentes, y ahorrar materiales con ello, o bien utilizar materiales con resistencias ligeramente menores a los considerados inicialmente y mantener, por el contrario, el tamaño de las secciones calculadas, ahorrando en este supuesto, en el precio del material.

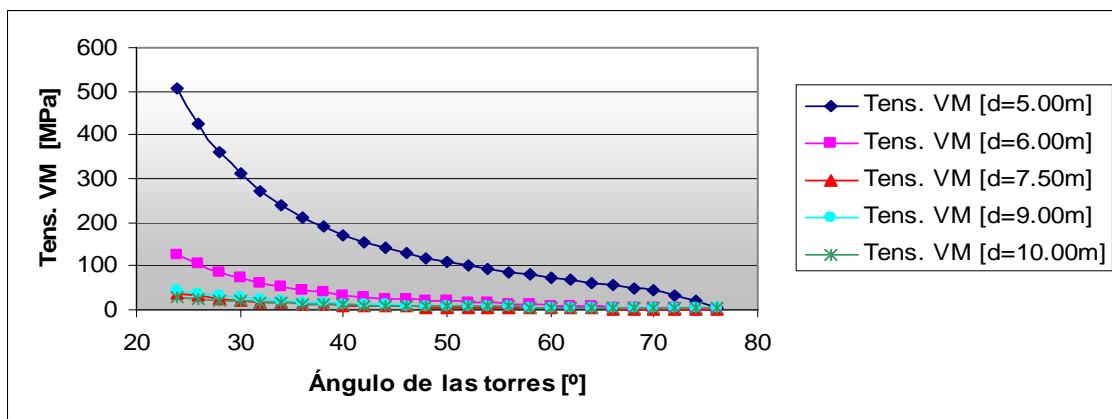
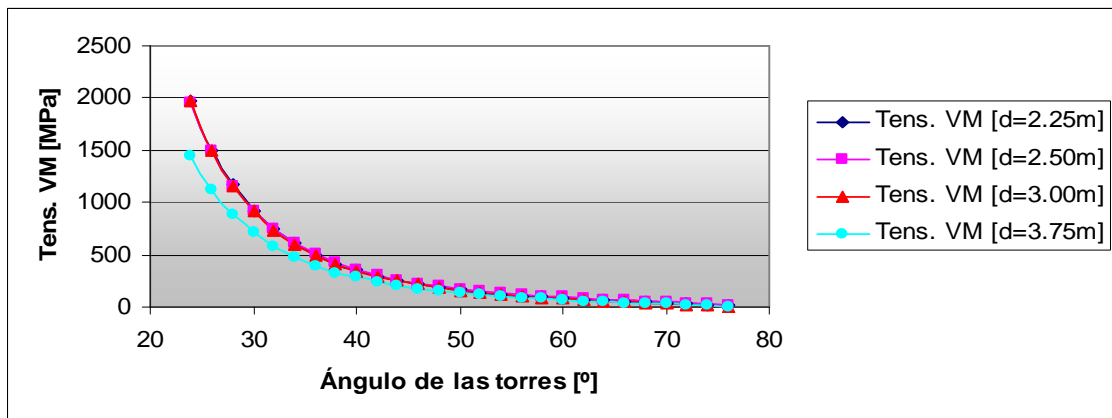


La cantidad de acero necesaria para los tirantes sigue la siguiente relación:



3.5.4. Esfuerzos en las secciones de los tirantes

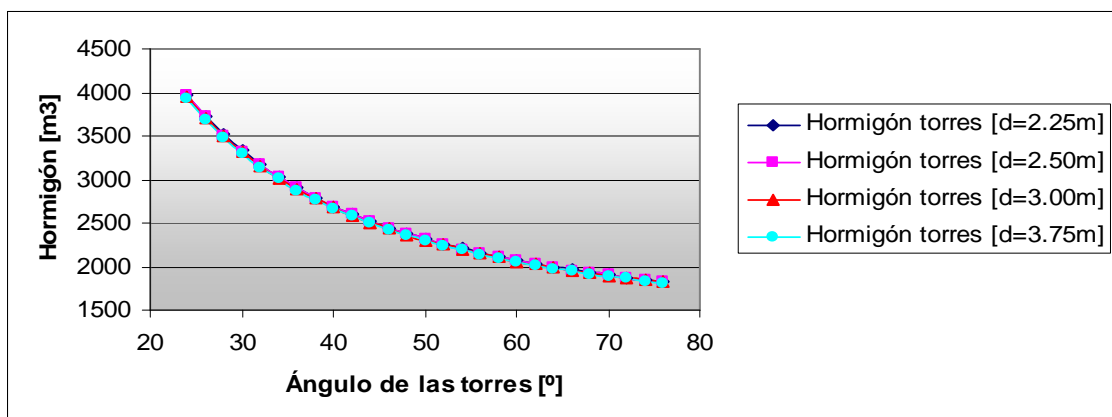
La tensión de Von Mises para cada la sección más solicitada de todos los tirantes:

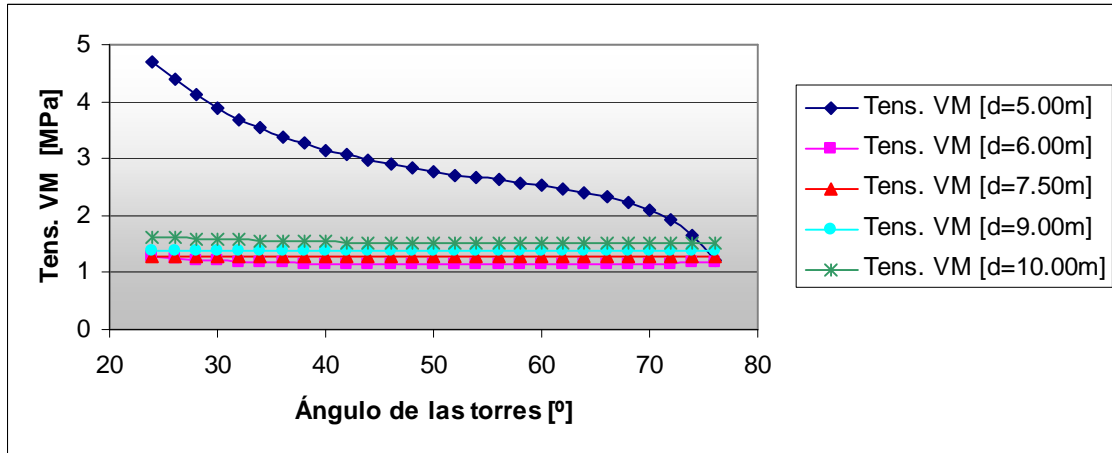


3.5.5. Variación de la cantidad de materiales

Dado que el tablero es un elemento invariable del proyecto debido a las especificaciones iniciales, sus dimensiones y su volumen serán constantes para todas las geometrías consideradas; por ello no se graficará ninguna variación de materiales necesarios para el tablero, puesto que el valor es constante.

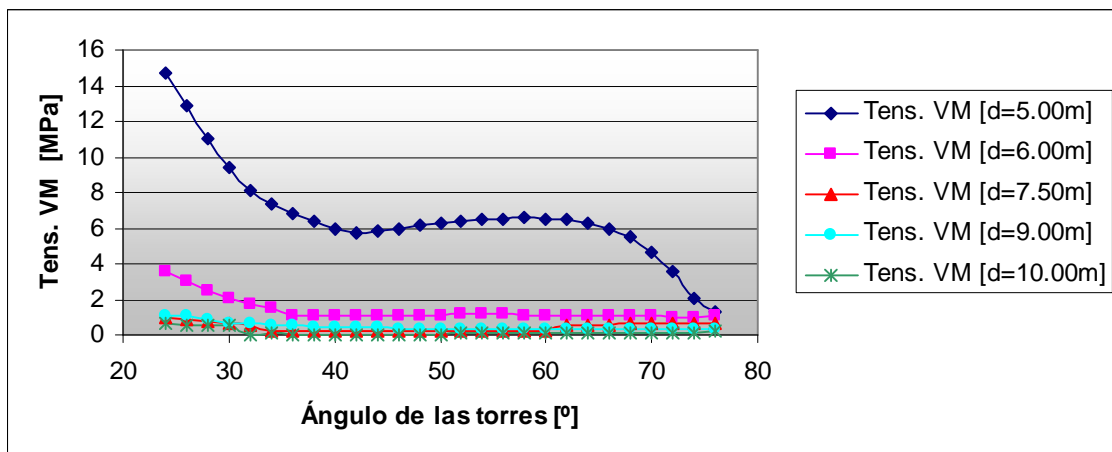
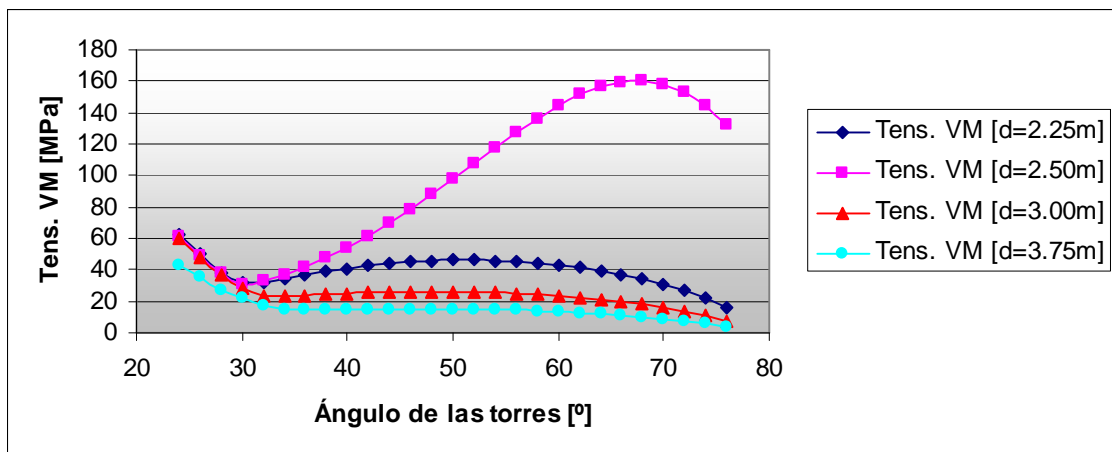
Ahora se muestra la cantidad necesaria de hormigón para la realización de las torres:



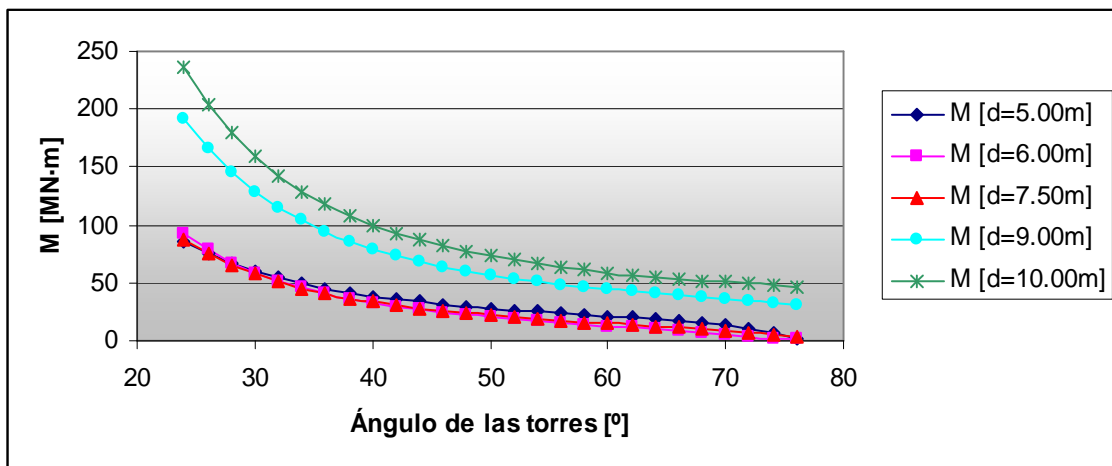
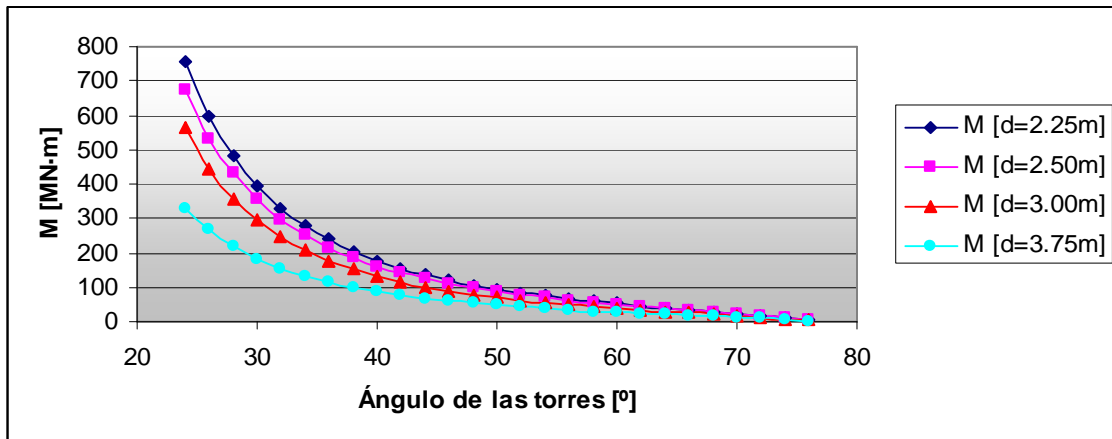


3.5.3. Esfuerzos en las secciones de las torres

Se han graficado la tensión de Von Mises obtenida para la sección de la torre más solicitada en su punto más solicitada, resultando:

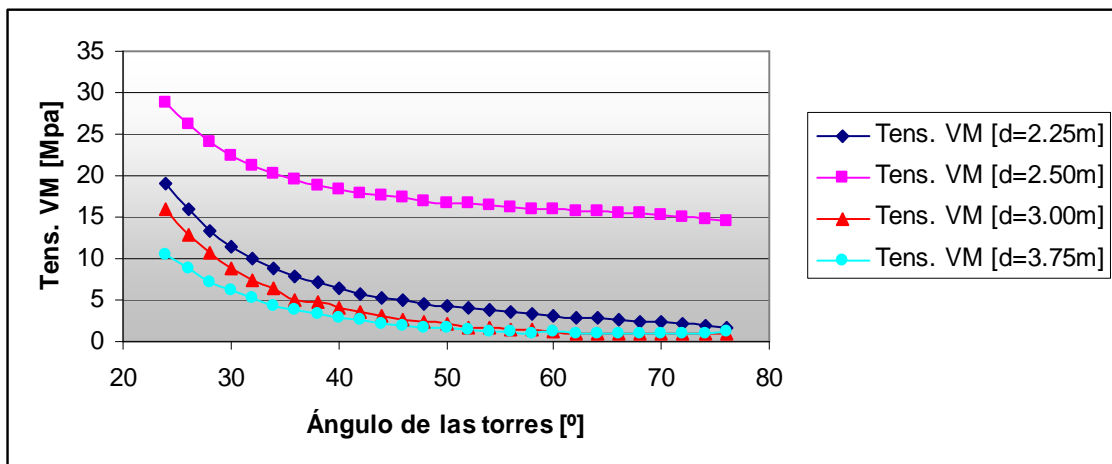


A continuación los momentos en los apoyos:

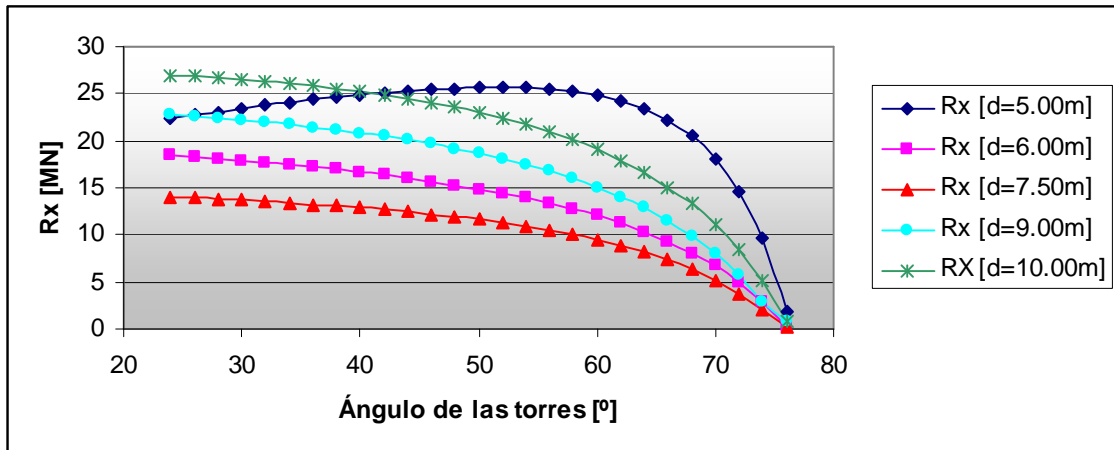


3.5.2. Esfuerzos en la sección del tablero

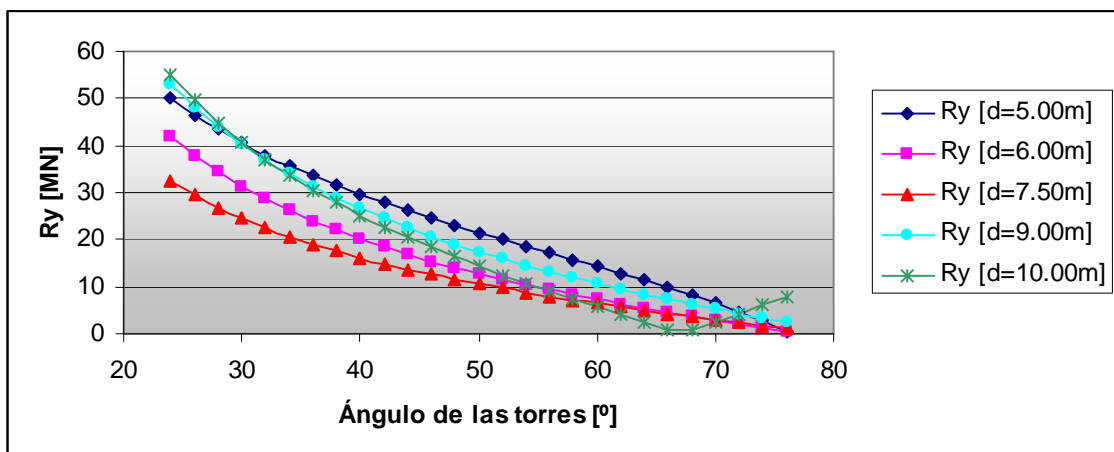
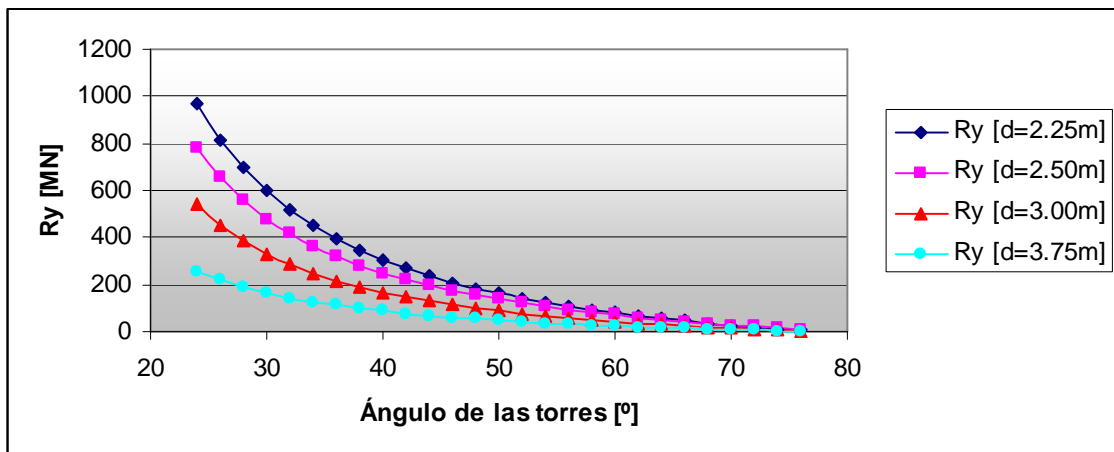
Las tensiones de las secciones de hormigón siguen la siguiente relación:



Gráfica obtenida para separaciones entre tirantes de entre 5 metros y 10 metros:



En las siguientes gráficas, se muestra la variación de la reacción vertical en el apoyo más solicitado:



3.4. Condiciones de contorno

A continuación se presentaran las variables de contorno que acotaran las sucesivas simulaciones, con el fin de limitar el número de casos a estudiar hasta un límite aceptable aunque representativo

Se ha establecido que el análisis se realice con luces de 90 metros y con una altura máxima de las torres de 32 metros, siendo ambos valores constantes para todas las geometrías.

Se establecerá un rango de variación entre 2.25 metros y 9 metros al parámetro "distancia entre tirantes", con pasos de 0.25 metros; algunos valores pueden resultar en la generación de una geometría inválida.

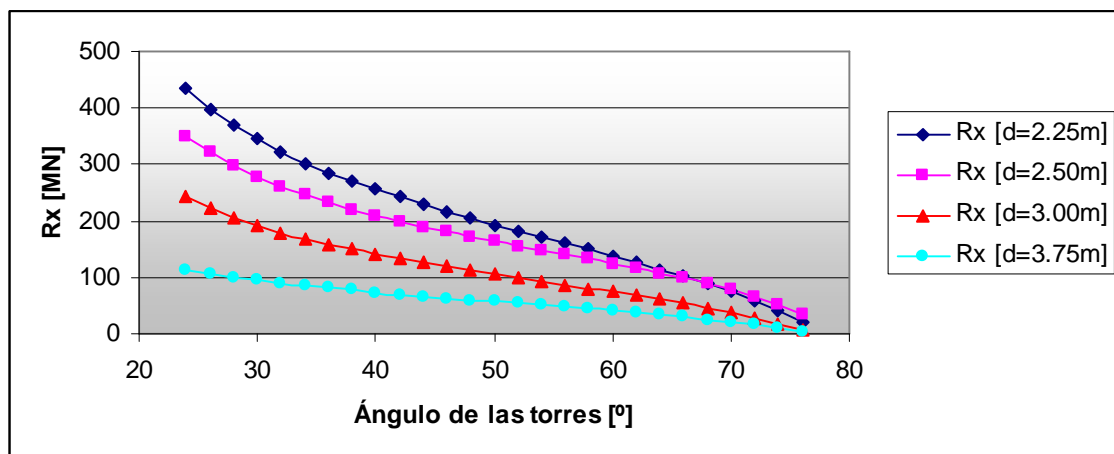
Se establecerá también un rango de variación entre 24 y 76 grados para el valor de inclinación de la torre, realizado pasos de 2 grados, este rango no implica ningún tipo de geometría inválida.

3.5. Resultados del análisis

En este apartado se mostrará gráficamente la variación de sucesivos valores de interés al variar alguno de los parámetros que definen la geometría del puente.

3.5.1. Variación de las reacciones en los apoyos

A continuación se muestran las gráficas obtenidas para las reacciones más desfavorables en los apoyos, dividiendo los datos entre 2 gráficas, una con distancias entre tirantes desde 2.25 metros hasta 3.75 metros y otra para distancias entre los 5 metros y los 10 metros.



3.3.1. Optimizador de puentes

Dada la tipología de análisis que pretendía realizarse, se hacía necesaria la creación de una herramienta que permitiera realizar cálculos de estructuras mediante el método matricial de la rigidez de una forma rápida y ágil.

También se hacía necesario que el programa fuera capaz de realizar variaciones geométricas sobre unos parámetros base dados, de forma que el proceso de creación y cálculo de cada caso fuera automático y los resultados obtenidos se presentasen de forma coherente y ordenada de cara a un posterior proceso de análisis y redacción de conclusiones a partir de todos ellos.

Se omitirán aquí los detalles técnicos que permiten al programa realizar su función, pero se comentarán las funciones que incluye y que hacen posible su funcionamiento:

- Funciones de definición geométrica de nodos, que calculan las posiciones X e Y de una serie de nodos, siguiendo las medidas base facilitadas.
- Funciones gráficas que trasladan a la pantalla los puntos calculados con anterioridad.
- Funciones de creación de los listados de barras en memoria, con sus propiedades geométricas, físicas y sus matrices de rigidez locales.
- Funciones de cálculo matricial y vectorial, incluyendo: suma, resta y multiplicación, además de cálculo de inversas de matrices, además de funciones de cambio de coordenadas de locales a globales.
- Funciones de montaje de la matriz global de rigidez y de los vectores de desplazamientos y fuerzas.
- Funciones de extracción de datos e introducción en la memoria RAM.
- Funciones de volcado de memoria RAM en archivos Excel en el disco duro.

3.3.2. Metal 3D de CYPE Ingenieros

El objetivo de utilizar este producto comercial para validar el diseño adoptado se fundamenta en que por falta de tiempo no se ha podido evaluar totalmente el correcto desempeño del "Optimizador de puentes" con un adecuado programa de pruebas.

Por tanto, el uso de este software viene impuesto por la necesidad de evaluar el diseño de forma que pueda asegurarse su validez. Este es un punto de obligado cumplimiento para garantizar la seguridad del proyecto en sí.

A partir de los datos encontrados se generarán unos archivos de datos con los resultados para cada geometría simulada, que serán posteriormente analizados.

Todo el algoritmo está mostrado en el anterior diagrama de flujo de la figura 3.

3.2. Alcance del estudio

Aunque los resultados aportados por la aplicación pueden darnos información útil con respecto a los esfuerzos en las barras, se plantean varios problemas que impiden asumir que tales esfuerzos sean totalmente fieles a la realidad.

Estos problemas radican en que los desplazamientos prescritos para los tirantes, sobretodo los de gran longitud, siguen en realidad una trayectoria en forma de catenaria, por tanto, asumir que son totalmente asimilables a barras rígidas perfectamente rectas conlleva un error apreciable. Además, resulta muy difícil tratar el hecho de que los tirantes tengan una tensión inicial.

No se han solucionado los problemas derivados de la no-linealidad que implican los grandes desplazamientos en los tirantes. Esto es debido, principalmente, a una mayor necesidad de tiempo, pero nada impide que en un futuro la aplicación implemente el cálculo de tirantes no lineales.

Por tanto, más que analizarse los esfuerzos en cada sección, en la fase de estudio previo nos centraremos en el apartado de reacciones transmitidas a la cimentación y cantidad de materiales necesarios, aunque también prestaremos atención en menor medida a los valores de tensión alcanzados en cada una de las barras.

De los datos extraídos, se definirá un conjunto de soluciones válidas para ser validadas en un programa de cálculo de estructuras comercial.

3.3. Medios utilizados

Para la realización del análisis anteriormente mencionado se hacía necesario contar con una herramienta que permitiera alcanzar los objetivos propuestos y un programa comercial que validase la opción finalmente escogida.

La inexistencia de una herramienta cuyo objetivo sea el cálculo y optimización de puentes hizo que se planteara el estudio, desarrollo y programación de una aplicación bautizada como "Optimizador de puentes", que será junto con Metal 3D de CYPE Ingenieros, la herramienta que permitirá la realización del estudio.

metros de tablero, considerando así que ese será la longitud máxima de un vehículo de gran tonelaje.

Estas fuerzas sobre las barras se convertirán a un vector de fuerzas en cada nodo que será posteriormente multiplicado por la inversa de la matriz de rigidez, lo que nos dará los desplazamientos y giros de cada nudo.

Considerando los apoyos como nodos con movimientos restringidos en todos sus grados de libertad, el vector de desplazamientos será de nuevo multiplicado por la matriz global de rigidez para obtener el vector de fuerzas en cada nodo, que por tanto incluirá ahora las reacciones en los apoyos de los extremos.

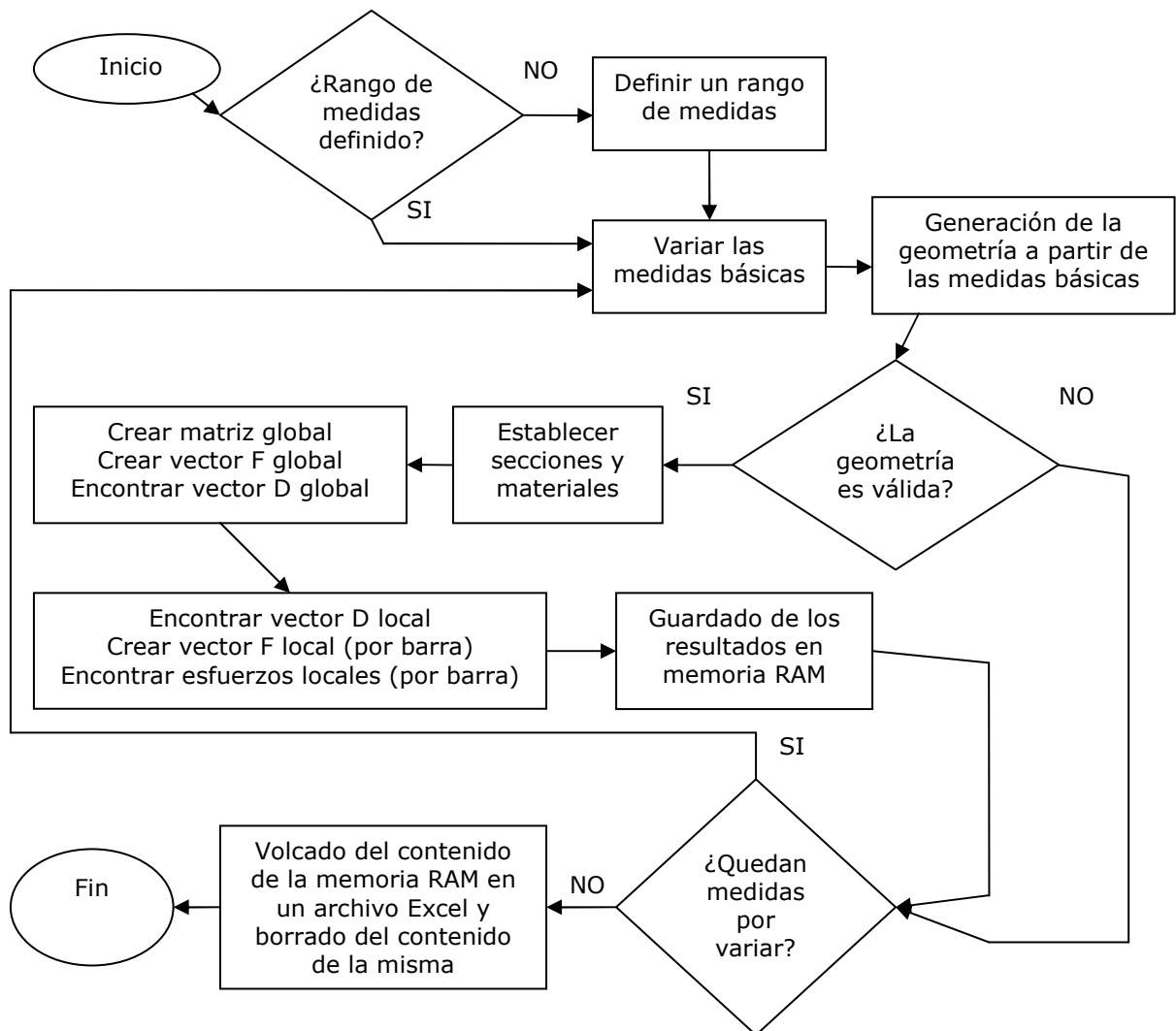


Fig. 3: Diagrama de flujo mostrando el proceso de trabajo básico del “Optimizador de puentes”.

Mediante los desplazamientos y las fuerzas aplicadas en cada nodo, podemos encontrar las fuerzas a que está sometida cada barra y calcular los esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores.

CAPÍTULO 3:

ESTUDIO PREVIO

Para asegurar que el puente cumpla con las premisas de diseño a un coste competitivo y que el aprovechamiento de los materiales y secciones sea óptimo se requiere de un estudio exhaustivo de las distintas opciones geométricas que permita acotar un reducido grupo de alternativas para que éstas sean finalmente analizadas una a una y sea seleccionada finalmente aquella que presente las mayores ventajas frente al resto.

3.1. Fundamento teórico

El concepto de análisis de optimización que va a realizarse tiene como origen el estudio del comportamiento de una estructura compuesta por nudos y barras cuando son variados los parámetros geométricos que la definen.

Aunque el estudio se realice sobre una estructura bidimensional, los resultados se pueden extrapolar a una geometría tridimensional que mantenga las mismas relaciones geométricas, aun así, nada impide que el programa pueda ser modificado en un futuro para considerar cualquier tipo de geometría en tres dimensiones.

Básicamente se puede afirmar que se realizarán una serie de modelos estructurales para ser analizados por el método matricial de la rigidez, del cual a continuación se expone una breve reseña del algoritmo que se aplica para obtener los resultados.

La geometría básica será generada en un modelo bidimensional, sobre la base del cual se crearán matrices de rigidez para cada barra, que luego serán montadas nudo a nudo en una matriz global de rigidez.

Se dispondrán cargas uniformemente repartidas por todas las barras, representando sus respectivos pesos propios y cargas puntuales cada 10

Una vía de 2 carriles exige un ancho mínimo del tablero de 15 metros, ya que cada sentido requiere 6.5 metros de anchura, debidos a los dos arcenes de 1.5 metros y al propio carril de 3.5 metros, además, debemos incluir el ancho de 2 metros de la mediana.

Consideradas las alternativas, y viendo que ambas valores de ancho resultan muy parejos, nos decantamos por una calzada de 2 carriles con uno para cada sentido, con arcenes de al menos 1.5 metros a cada lado.

Esta alternativa presenta una mayor seguridad intrínseca, se evitan posibles adelantamientos que puedan derivar en alcances laterales entre vehículos, además de proveer un arcén espacioso dónde un eventual vehículo averiado puede apartarse, evitando colapsar totalmente uno de los sentidos de la marcha.

Para que la vía pueda considerarse rápida, debe permitir la circulación de turismos hasta una velocidad de 100 km/h. Según el Reglamento de Circulación se requiere:

En carreteras convencionales señalizadas como vías para automóviles y en el resto de carreteras convencionales, siempre que estas últimas tengan un arcén pavimentado de 1.50 metros o más de anchura, o más de un carril para algunos de los sentidos de circulación, la velocidad máxima para turismos y motocicletas será 100 kilómetros por hora.

Así pues, las opciones barajadas para cumplir con la premisa de diseño que exige la existencia de una vía rápida son:

- Utilizar una calzada con 2 carriles, uno para cada sentido, pero manteniendo unos arcenes de al menos 1.50 metros a cada lado de cada carril. Puede observarse en la figura 1.
- Utilizar una calzada con al menos 3 carriles sobre el tablero, dos de ellos en el mismo sentido, y un arcén menor a 1.50 metros. Puede observarse en la figura 2.

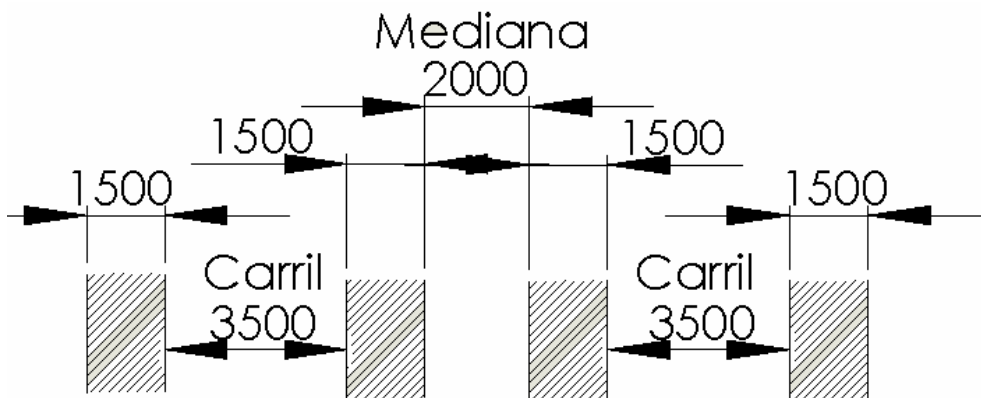


Fig. 1: Ejemplo de calzada con 2 carriles y arcenes de 1.50 metros.

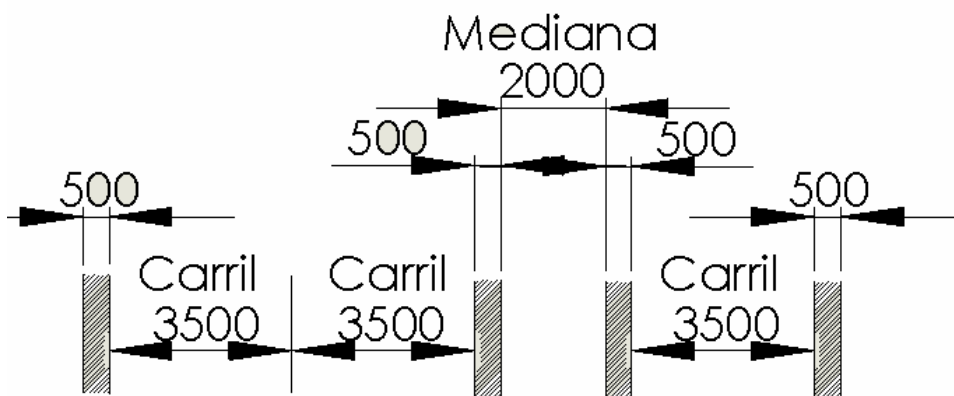


Fig. 2: Ejemplo de calzada con 3 carriles y arcenes menores a 1.50 metros.

Una vía de 3 carriles hace necesario un ancho mínimo del tablero de 14.5 metros, ya que aunque se definan unos arcenes de 0.5 metros de anchura, cada carril requerirá 3.5 metros de ancho, más 2 metros de anchura para la mediana, que es una medida de seguridad que debe tenerse en cuenta.

CAPÍTULO 2: ESPECIFICACIONES BÁSICAS

Inicialmente se solicita la construcción de un puente cuya tipología se deja a nuestra elección, cuyo único vano ha de tener una luz, libre de apoyos inferiores al propio tablero, de al menos 90 metros; además, se exige que la altura máxima desde la parte superior del tablero hasta la parte más alta de la estructura no sobrepase los 33 metros.

2.1. Medidas fijas y variables

Con los condicionantes anteriores, se define un puente de un único vano, siendo éste de 90 metros, tal como se especifica anteriormente.

El tablero de 90 metros estará sustentado por una serie de tirantes de acero que irán anclados entre éste y cada una de las torres que sustentarán cada semitablero. El número de estos tirantes será susceptible de ser optimizado.

El hecho de que se nos limite la altura máxima hace que podamos variar la inclinación de las torres de forma que el resultado final sea óptimo, por tanto, este será otro de los parámetros susceptibles de optimización.

2.2. Otras especificaciones

Para que el proyecto sea viable económicamente frente a otras infraestructuras alternativas, se requiere que sobre el tablero se pueda disponer de una vía rápida, con al menos un carril por cada sentido.

Con el fin de realizar una mejor aproximación al cálculo final, se ha desarrollado una aplicación informática cuya función es crear diferentes geometrías de puentes atirantados y calcular los esfuerzos en las barras, las reacciones en la cimentación y la cantidad de materiales necesarios.

En el apartado de diseño incluye un estudio de optimización realizado sobre distintas geometrías aplicables al proyecto, que serán estudiadas mediante la anteriormente mencionada aplicación; sobre éstos resultados preeliminares, se seleccionará un grupo de soluciones que presente las mejores características en cuanto a esfuerzos en los materiales y aprovechamiento de los mismos.

Una vez tomado un reducido grupo de posibles alternativas, serán estudiadas mediante un programa de cálculo de estructuras comercial, para verificar el diseño, y finalmente, las secciones resistentes serán verificadas mediante un programa comercial de cálculo según el método de los elementos finitos.

Una vez se haya verificado la validez de la geometría general del puente y de todas sus secciones resistentes, se procederá a la planificación y cálculo de la etapa constructiva del mismo.

Se realizará un análisis del posible impacto ambiental que pueda tener la realización del presente proyecto en su emplazamiento, y una valoración de la idoneidad de llevarlo a cabo, teniendo en cuenta la relación existente entre las ventajas aportadas por la construcción de una infraestructura como esta frente a otras posibles alternativas.

CAPÍTULO 1:

OBJETO Y ALCANCE

Aunque la finalidad final de este proyecto resulte en la realización del proyecto de un puente atirantado, durante su desarrollo se van a plantear cuestiones de índole mucho más variada, que harán que el ámbito de conocimiento de este proyecto no se reduzca únicamente al campo de la ingeniería civil, si no que tiene una íntima relación con el desarrollo de aplicaciones informáticas para la ingeniería y con las ciencias de la computación.

1.1. Objeto

Este proyecto ha de definir unívocamente el diseño, cálculo y construcción de un que cumpla con las siguientes especificaciones:

Ha de poseer una luz libre de todo apoyo inferior, de 90 metros de longitud; la máxima altura del conjunto será de 33 metros medidos desde la calzada sobre el tablero hasta el punto más elevado de la estructura.

Conocidas las anteriores imposiciones, ya en el anteproyecto se discutieron las distintas alternativas constructivas, resultando elegida la solución que consistía en la construcción de un puente atirantado sustentado por dos torres de tirantes gemelas.

1.2. Alcance

Este proyecto no se limitará únicamente a la elección de una geometría y a su posterior cálculo y construcción, si no que realizará un estudio previo al diseño para optimizar este último, siendo ésta la parte capital del proyecto.

AGRADECIMIENTOS

A quienes me dieron la posibilidad de ser.

A los que les hubiera gustado poder ver esto, y el hado pensó lo contrario.

A quienes me acompañaron durante mis largos años, como delfines tras mi estela, estén ahora cerca o no lo estén.

A los que me tendieron la mano y les tomé el brazo, para mucho más tarde devolverles parte de lo tomado.

A quienes robé su tiempo para ilustrarme y luego me jacté de superarles en la nota obtenida.

Y a todo lo vivido, a cada paso dado, por haberme traído hasta aquí.

ABSTRACT

Using an application specifically created to define a set of geometries of suspension bridges according to previously defined design parameters, I will make an accurate analysis to learn about constructive and economical advantages of each solution capable of being used.

When I get a reduced set of solutions that can be considered useful; I will make a more accurate analysis by the use of a commercial application in order to validate the final design and I will proceed to make a project aimed to build a suspension bridge that can be considered the most favorable in terms of material utilization.

RESUMEN

Mediante el uso de una aplicación informática especialmente creada para definir distintas geometrías de puentes atirantados de acorde a unos parámetros básicos de diseño ya definidos con anterioridad, se realizará un estudio pormenorizado de las diferentes ventajas constructivas y económicas de cada solución susceptible de ser utilizada.

Obtenido un pequeño conjunto de soluciones que puedan considerarse idóneas, se realizará un estudio aún más exhaustivo de ellas mediante un programa comercial que validará el diseño y se procederá a la redacción de un proyecto que tenga como fin la realización de un puente atirantado que pueda considerarse óptimo en cuanto a aprovechamiento de materiales se refiere.

RESUM

Mitjançant l'ús d'una aplicació informàtica especialment creada per a definir diferents geometries de ponts atirantats d'acord amb uns paràmetres bàsics de disseny ja definits amb anterioritat, es realitzarà un estudi acurat dels diferents avantatges constructius y econòmics de cada solució susceptible d'ésser utilitzada.

Una vegada obtingut un petit conjunt de solucions que puguin considerar-se idònies, es realitzarà un estudi encara més acurat mitjançant un programari comercial que en validarà el disseny y es procedirà a la redacció d'un projecte que tingui com a finalitat la realització d'un pont atirantat que pugui considerar-se óptim en quant a l'aprofitament dels materials.

8.7.3. Ingeniería de análisis, cálculo y modelización	48
8.8. Presupuesto final global	48

6.2.1. Pilotaje.....	38
6.2.2. Encepado.....	38
6.3. Torres	38
6.4. Tablero	38
6.5. Tesado final de los tirantes.....	39
6.5.1. Orden de tesado.....	39
CAPÍTULO 7: NORMATIVA.....	40
7.1. Normativa de carácter general.....	40
7.2. Recepción de materiales	41
7.3. Cimentaciones	42
7.4. Estructuras	43
7.4.1. Acero	43
7.4.2. Hormigón armado.....	43
CAPÍTULO 8: PRESUPUESTO	44
8.1. Acondicionamiento del terreno	44
8.1.1. Movimientos de tierras	44
8.2. Cimentaciones	44
8.2.1. Pilotes	45
8.2.2. Regularización.....	45
8.2.3. Contenciones	45
8.2.4. Encepados	45
8.3. Estructuras	45
8.3.1. Hormigón armado.....	46
8.3.2. Acero	46
8.4. Controles de calidad y ensayos	46
8.4.1. Estructuras de hormigón.....	46
8.4.2. Estructuras de acero	46
8.4.3. Estudios geotécnicos	46
8.5. Seguridad y salud	47
8.6. Asfaltado e iluminado del tablero.....	47
8.6.1. Asfaltado del tablero y accesos.....	47
8.6.2. Iluminado de la vía	47
8.7. Ingeniería	47
8.7.1. Ingeniería preeliminar	47
8.7.2. Desarrollo del "Optimizador de puentes"	47

3.6.6. Esfuerzos en las torres óptimos	20
3.6.7. Esfuerzos en los tirantes óptimos.....	20
3.6.8. Aprovechamiento óptimo de los materiales	21
3.7. Geometría óptima	21
3.7.1. Justificación	21
3.8. Validación de la geometría óptima	21
3.8.1. Consideraciones previas	22
3.8.2. Modelo considerado	22
3.8.3. Resultados obtenidos	22
3.8.4. Comparación de resultados	23
3.8.5. Conclusiones tras la comparación	24
CAPÍTULO 4: SOLUCIÓN ADOPTADA	25
4.1. Geometría elegida.....	25
4.2. Secciones resistentes.....	25
4.2.1. Sección resistente en el tablero	26
4.2.2. Secciones resistentes en las torres.....	26
4.2.3. Secciones resistentes en los tirantes	27
4.3. Anclajes de los tirantes.....	27
4.3.1. Anclajes a las torres.....	27
4.3.2. Anclajes al tablero	28
4.4. Materiales	28
4.4.1. Hormigón en tablero y torres	28
4.4.2. Acero en armaduras, tirantes y anclajes	29
CAPÍTULO 5: CÁLCULOS Y VERIFICACIONES	30
5.1. Cargas de uso aplicables.....	30
5.2. Cargas debidas a los tirantes	31
5.3. Cálculo de resistencia de secciones y materiales	33
5.3.1. Resistencia en el tablero	33
5.3.2. Resistencia en las torres	35
5.3.3. Resistencia en los tirantes	36
CAPÍTULO 6: CONSTRUCCIÓN.....	37
6.1. Preparado del terreno.....	37
6.1.1. Desbrozado inicial.....	37
6.1.2. Terraplenados	37
6.2. Cimentaciones	38

ÍNDICE MEMORIA

ÍNDICE MEMORIA	I
RESUMEN	1
RESUM	1
ABSTRACT	2
AGRADECIMIENTOS	3
CAPÍTULO 1: OBJETO Y ALCANCE	4
1.1. Objeto	4
1.2. Alcance	4
CAPÍTULO 2: ESPECIFICACIONES BÁSICAS	6
2.1. Medidas fijas y variables	6
2.2. Otras especificaciones	6
CAPÍTULO 3: ESTUDIO PREVIO	9
3.1. Fundamento teórico	9
3.2. Alcance del estudio	11
3.3. Medios utilizados	11
3.3.1. Optimizador de puentes.....	12
3.3.2. Metal 3D de CYPE Ingenieros	12
3.4. Condiciones de contorno	13
3.5. Resultados del análisis	13
3.5.1. Variación de las reacciones en los apoyos	13
3.5.2. Esfuerzos en la sección del tablero	15
3.5.3. Esfuerzos en las secciones de las torres.....	16
3.5.4. Esfuerzos en las secciones de los tirantes	17
3.5.5. Variación de la cantidad de materiales.....	17
3.6. Conclusiones	19
3.6.1. Consideraciones previas	19
3.6.2. Intervalos de confianza	19
3.6.3. Sobre el aprovechamiento de las secciones	19
3.6.4. Esfuerzos en las cimentaciones óptimos	20
3.6.5. Esfuerzos en el tablero óptimos	20