

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería Civil

Rigidización longitudinal en puentes atirantados continuos

Autor: Rafael Soto Castillo

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Civil

Rigidización longitudinal en puentes atirantados continuos

Autor:
Rafael Soto Castillo

Tutor:
Antonio Martínez de la Concha
Profesor asociado

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Grado: Rigidización longitudinal en puentes atirantados continuos

Autor: Rafael Soto Castillo

Tutor: Antonio Martínez de la Concha

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A Juan José
A mi familia
A mis amigos
A mis profesores

Los puentes atirantados son hoy día una de las opciones más seleccionadas, cuando de cubrir largos vanos se trata. Dada la gran flexibilidad que posee la estructura bajo estas situaciones, son varias las referencias bibliográficas que aconsejan el empleo de sistemas de rigidización longitudinal cuando se cubren varios vanos, con el objetivo de reducir la flecha vertical en el centro del mismo, el cual es el parámetro de diseño más restrictivo para puentes, en lo que se refiere a deformaciones.

El objetivo que tiene este trabajo por lo tanto, es demostrar que la implementación de uno de estos sistemas rigidizadores, es en efecto, una opción válida de cara a reducir deformaciones, para ello, se ha utilizado el software MIDAS Civil en el que se han llevado a cabo numerosas modelizaciones.

De forma más concreta, se han extraído resultados en desplazamientos para distintas estructuras, con y sin rigidización:

- Estructuras atirantadas según 2 planos laterales verticales
 - Atirantamiento en abanico
 - Atirantamiento mixto
 - Atirantamiento en arpa
- Estructuras atirantadas según un único plano central
 - Atirantamiento en abanico
 - Atirantamiento mixto

Además, a las estructuras con rigidización se les ha ido aumentando el número de cables por vaina, con el objetivo de ver la capacidad máxima de reducción de flecha, y ver cómo esta se va comportando.

Se han estudiado estructuras atirantadas según 2 planos laterales verticales, y según un único plano. Las primeras han sido estudiadas para una tipología de atirantamiento mixta, en abanico y en arpa, y las segundas para un atirantamiento en abanico y mixto.

En las estructuras atirantadas según 2 planos se ha considerado la implementación de 2 sistemas de rigidización longitudinal distintos, y en las atirantadas según un solo plano central, solo se ha contemplado 1 sistema de rigidización.

ÍNDICE

Resumen	ix
Índice	xi
Índice de Figuras	xiii
Índice de tablas	xvi
1 Introducción	1
2 Objetivos y finalidad	5
3 Modelizaciones	9
3.1 <i>Modelización geométrica de estructuras</i>	9
3.1.1 Estructura y atirantamientos	9
3.1.2 Secciones de los elementos estructurales	17
3.1.3 Materiales empleados	23
3.1.4 Condiciones de contorno	24
3.1.5 Sistemas de rigidización longitudinal	28
3.2 <i>Modelización de cargas</i>	30
3.2.1 Sobrecarga de uso según la IAP-11	30
4 Resultados y comparativas	33
4.1 <i>Estructuras atirantadas según 2 planos laterales verticales</i>	34
4.1.1 Abanico	34
4.1.2 Arpa	38
4.1.3 Mixto	42
4.2 <i>Estructuras atirantadas según un solo plano central</i>	46
4.2.1 Abanico	46
4.2.2 Mixto	47
4.3 <i>Punto de partida estructuras sin rigidización</i>	48
4.4 <i>Comparativa de resultados en desplazamientos</i>	49
4.4.1 Comparación entre condiciones de contorno para un mismo sistema de rigidización	49
4.4.2 Comparación entre sistemas de rigidización longitudinal	51
4.5 <i>Comparativa de resultados en tensiones</i>	57
4.6 <i>Situaciones correspondientes a cada resultado</i>	59
5 Conclusiones	63
6 Futuras líneas de investigación	66
7 Referencias	67
8 Anexo	68
8.1 <i>Resultados tabulados estructuras atirantadas según 2 planos</i>	68
8.2 <i>Resultados tabulados estructuras atirantadas según un único plano central</i>	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig 1.1. Viaducto de Milleau, Francia, Valle del Tarn	1
Fig 1.2. Puente del Centenario, España, Sevilla.....	2
Fig 1.3 Puente de la Constitución de 1812, España, Bahía de Cádiz.....	2
Fig 1.4. Puente de Stonecutters, Hong Kong	3
Fig 1.5. Puente de Ting Kau, Hong Kong	3
Fig 2.1. Metodología recomendada de rigidización longitudinal 1.....	5
Fig 2.2. Metodología recomendada de rigidización longitudinal 2.....	6
Fig 2.3. Metodología recomendada de rigidización longitudinal 3.....	6
Fig 2.4. Esquema de todas las modelizaciones realizadas.....	7
Fig 2.5. No linealidad geométrica de los cables	8
Fig 3.1.1.1. Geometría estructural general.....	9
Fig 3.1.1.2. Geometría atirantamiento en abanico.....	10
Fig 3.1.1.3. Geometría atirantamiento en arpa.....	10
Fig 3.1.1.4. Geometría atirantamiento mixto.....	11
Fig 3.1.1.5. Geometría pilonos general según planos transversales de atirantamiento.....	11
Fig 3.1.1.6. Estructura atirantada según 2 planos laterales, tipología en arpa.....	12
Fig 3.1.1.7. Estructura atirantada según 2 planos laterales, tipología en abanico	13
Fig 3.1.1.8. Estructura atirantada según 2 planos laterales, tipología mixta	14
Fig 3.1.1.9. Estructura atirantada un único plano central, tipología en abanico	15
Fig 3.1.1.10. Estructura atirantada un único plano central, tipología mixta	16
Fig 3.1.2.1.1 Geometría tablero viga bijácena.....	17
Fig 3.1.2.1.2 Propiedades mecánicas tablero viga bijácena	18
Fig 3.1.2.1.3 Modelización geométrica tablero viga bijácena.....	18
Fig 3.1.2.1.4 Geometría y propiedades mecánicas vigas transversales en I	19
Fig 3.1.2.1.5 Geometría tablero viga ortótropa	19
Fig 3.1.2.1.6 Propiedades mecánicas tablero viga ortótropa.....	19
Fig 3.1.2.1.7 Modelización geométrica tablero viga ortótropa.....	20
Fig 3.1.2.3.1 Geometría y propiedades mecánicas sección pilonos	22
Fig 3.1.2.3.2 Geometría y propiedades mecánicas viga transversal pilonos.....	22
Fig 3.1.4.1.1 Elastic link tablero con estribos.....	24
Fig 3.1.4.1.2 Rigid link tablero.....	24
Fig 3.1.4.2.1 Rigid link tablero con vigas pilonos.....	26
Fig 3.1.4.3.1 Empotramientos apoyos con estribos.....	26
Fig 3.1.4.3.2 Empotramientos estructura con terreno	27

Fig 3.1.5.1.1 Geometría sistema de rigidización longitudinal 1 en estructuras atirantadas según 2 planos	28
Fig 3.1.5.1.2 Geometría sistema de rigidización longitudinal 1 en estructuras atirantadas según un solo plano central	28
Fig 3.1.5.2.1 Geometría sistema de rigidización longitudinal 2 en estructuras atirantadas según 2 planos	29
Fig 3.2.1.1 Plataforma y carriles virtuales tablero viga ortótropa	31
Fig 3.2.1.2 Plataforma y carriles virtuales tablero viga bijácena.....	32
Fig 4.1.1.1. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, abanico, apoyo simple	34
Fig 4.1.1.2. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, abanico, apoyo simple	34
Fig 4.1.1.3. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, abanico, apoyo deslizante	35
Fig 4.1.1.4. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, abanico, apoyo deslizante	35
Fig 4.1.1.5. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, abanico, sistema rigidización 1	36
Fig 4.1.1.6. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, abanico, sistema rigidización 1	36
Fig 4.1.1.7. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, abanico, sistema rigidización 2	37
Fig 4.1.1.8. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, abanico, sistema rigidización 2	37
Fig 4.1.2.1. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, arpa, apoyo simple	38
Fig 4.1.2.2. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, arpa, apoyo simple.....	38
Fig 4.1.2.3. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, arpa, apoyo deslizante	39
Fig 4.1.2.4. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, arpa, apoyo deslizante.....	39
Fig 4.1.2.5. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, arpa, sistema rigidización 1 ...	40
Fig 4.1.2.6. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, arpa, sistema rigidización 1	40
Fig 4.1.2.7. Flecha horizontal máxima en cabeza pilono, 2 planos laterales, arpa, sistema rigidización 2	41
Fig 4.1.2.8. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, arpa, sistema rigidización 2	41
Fig 4.1.3.1. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, mixto, apoyo simple.....	42
Fig 4.1.3.2. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, mixto, apoyo simple	42
Fig 4.1.3.3. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, mixto, apoyo deslizante.....	43
Fig 4.1.3.4. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, mixto, apoyo deslizante.....	43
Fig 4.1.3.5. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, mixto, sistema rigidización 1 .	44
Fig 4.1.3.6. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, mixto, sistema rigidización 1	44
Fig 4.1.3.7. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, mixto, sistema rigidización 2 .	45
Fig 4.1.3.8. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, mixto, sistema rigidización 2	45
Fig 4.2.1.1. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, un plano central, abanico, sistema rigidización 1	46
Fig 4.2.1.2. Flecha vertical máxima en centro de vano, un plano central, abanico, sistema rigidización 1	46
Fig 4.2.2.1. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, un plano central, mixto, sistema rigidización 1 ...	47
Fig 4.2.2.2. Flecha vertical máxima en centro de vano, un plano central, mixto, sistema rigidización 1	47
Fig 4.4.2.1 Resumen desplazamientos estructuras 2 planos atirantados.....	53

Fig 4.4.2.2 Resumen desplazamientos estructuras un plano atirantado	55
Fig 4.6.1 Flecha longitudinal 2 planos atirantados, abanico, deslizante	59
Fig 4.6.2 Flecha longitudinal 2 planos atirantados, mixto, deslizante	60
Fig 4.6.3 Flecha longitudinal 2 planos atirantados, arpa, deslizante	60
Fig 4.6.4 Situación máxima flecha horizontal cabeza pilono, 2 planos atirantados, arpa, sistema rigidización 2	61
Fig 4.6.5 Situación máxima compresión cable central, 2 planos atirantados, arpa, sistema rigidización 2	61
Fig 4.6.6 Situación máxima tracción cable lateral, 2 planos atirantados, arpa, sistema rigidización 2	61
Fig 5.1 Comparativa conclusiones en desplazamientos según planos transversales de atirantamiento	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.2.2.1 Número de cables por vaina y sección total de acero.....	21
Tabla 3.1.3.1 Materiales y comportamiento.....	23
Tabla 3.1.3.2 Material y elementos tipo empleados en modelizaciones para cada elemento estructural	23
Tabla 3.1.4.1.1. Rigideces elastic link apoyo simple 2 planos atirantados.....	25
Tabla 3.1.4.1.2 Rigideces elastic link apoyo deslizante 2 planos atirantados.....	25
Tabla 3.1.4.1.4. Rigideces elastic link apoyo deslizante un plano atirantado.....	25
Tabla 3.1.4.1.3. Rigideces elastic link apoyo simple un plano atirantados	25
Tabla 4.3.1 Desplazamientos máximos (cm) para las estructuras sin rigidizar bajo la sobrecarga de uso	48
Tabla 4.4.2.1 Capacidad máxima de reducción de flechas horizontales y valores mínimos obtenidos 2 planos atirantados.....	51
Tabla 4.4.2.2 Capacidad máxima de reducción de flechas verticales y valores mínimos obtenidos 2 planos atirantados.....	52
Tabla 4.4.2.3 Capacidad máxima de reducción de flechas horizontales y valores mínimos obtenidos un plano atirantado	54
Tabla 4.4.2.4 Capacidad máxima de reducción de flechas verticales y valores mínimos obtenidos un plano atirantado	55
Tabla 5.1 Situaciones que se pueden relacionar entre sí en función de la tipología atirantamiento, apoyos y sistema rigidización.....	64
Tabla 8.1.1 Resultados en desplazamientos y tensiones 2 planos atirantados en abanico	68
Tabla 8.1.2 Resultados en desplazamientos y tensiones 2 planos atirantados en arpa.....	69
Tabla 8.1.3 Resultados en desplazamientos y tensiones 2 planos atirantados mixto	70
Tabla 8.2.1 Resultados en desplazamientos y tensiones un plano atirantado abanico	71
Tabla 8.2.2 Resultados en desplazamientos y tensiones un plano atirantado mixto	72

1 INTRODUCCIÓN

La grandeza nace de pequeños comienzos, "Sic Parvis Magna"

Resultaría difícil imaginar Nueva York sin el puente de Brooklyn, San Francisco sin el Golden Gate, o la bahía de Cádiz sin el puente de la Constitución de 1812, sin necesidad de cruzar el Atlántico. Los puentes son estructuras que reflejan el punto cúlmen de la técnica, y es que sin importar lo reciente o tardía que sea su incorporación en la sociedad, son construcciones que siempre impresionan.

Desde pequeño siempre tuve una gran curiosidad por estas estructuras, cruzar un valle a una elevada altura o un río desde una orilla a otra pasando por un puente, eran sensaciones que no pasaron desapercibidas cuando las experimenté por primera vez, el hecho de pensar que el ser humano pudiera concebir algo tan grande, me resultaba increíble. Ha sido ya durante la carrera cuando tras ir conociendo los detalles técnicos de las estructuras, las hipótesis, teorías... me he dado cuenta de la responsabilidad que todos estos conocimientos conllevan, y es que "un gran poder conlleva una gran responsabilidad". Nunca pensé que la responsabilidad fuera a resultarme atractivo; sin embargo, cuando de esta, pueden resultar infraestructuras y construcciones que permitan una mejora en la sociedad, no solo me atrae, sino que me enorgullece el haberme formado (y continuar haciéndolo) para atenderla.

Dentro del amplio abanico de tipologías estructurales de puentes, podríamos afirmar con certeza que estos, se dividen en 4 grandes grupos: puentes en arco, viga, atirantados y colgantes, siendo estos dos últimos los indiscutibles ganadores para cubrir grandes vanos; sin embargo, esto no implica que no se contemplen en las menores distancias, y es que tenemos ejemplos de puentes atirantados que cubren desde los 270m hasta 1.6km.

En este trabajo, vamos a centrarnos en las estructuras atirantadas. Estas, son aquellas que, a través de cables pretensados que parten de una torre, son capaces de mantener estable un tablero. En los siguientes párrafos se va a hablar un poco sobre algunos ejemplos de puentes atirantados que me motivaron a enfocar este trabajo en torno a esta tipología estructural.

El **Viaducto de Millau** (*Fosters and Partners*, 2004) es posiblemente el puente atirantado más emblemático de toda Europa. Se trata de una estructura que presenta 7 pilonos que alcanzan una altura de 343m (más que la Torre Eiffel), y una longitud total de 2460m (342m de longitud de vanos intermedios). Se localiza en el sudeste francés, y es mundialmente conocido por la belleza que el paisaje en conjunto con la estructura, transmiten. Posee una envergadura colosal, que, de alguna forma, ha conseguido complementar la espectacularidad del valle del Tarn. Este puede ser el mejor ejemplo de cómo un puente (que es una de las obras de la ingeniería más técnicas), puede contribuir a la belleza de un sitio plenamente natural.



Fig 1.1. Viaducto de Millau, Francia, Valle del Tarn

El **Puente del Centenario** (*José Antonio Fernández Ordóñez y Julio Martínez Calzón*) es el ejemplo más cercano que tenemos, pues se localiza en nuestra ciudad, y aunque a veces pase desapercibido, tiene una función principal en los desplazamientos de Sevilla. Se trata de una estructura que posee un único vano de 265m de longitud, y dos laterales que se encuentran apoyados en unas pilas en forma de U inversa.



Fig 1.2. Puente del Centenario, España, Sevilla

El **Puente de la Constitución de 1812** (*Javier Manterola*) se localiza en la Bahía de Cádiz, y se trata del puente atirantado de mayor longitud de vano en toda España, llegando a los 540m. Desde que tengo memoria, Cádiz ha sido un sitio especial para mí, llevo pasando mis veranos en la costa desde que era pequeño, y me llena de orgullo que un puente que bate record a nivel español, se localice en este sitio tan significativo para mí. He tenido la ocasión de observar el puente desde lejos, y describe una singular silueta que cuanto menos, cautiva a quien lo aprecie.



Fig 1.3 Puente de la Constitución de 1812, España, Bahía de Cádiz

El **Puente de Stonecutters** (*Dissing + Weitling*) en Hong Kong conecta la isla de Stonecutters (oeste de Hong Kong) con la isla de Tsing Yi. Se trata de un puente atirantado de tipología mixta, con un único plano de atirantamiento central, que posee una longitud de vano de central de 1km, llegando a 1.6km en total. Además, fue uno de los puentes más altos del mundo en el momento de su inauguración (2009), alcanzando los pilonos una altura de 298m. Este, es solo un ejemplo del numeroso conjunto de puentes atirantados de gran envergadura que posee Asia, en este aspecto, son líderes.

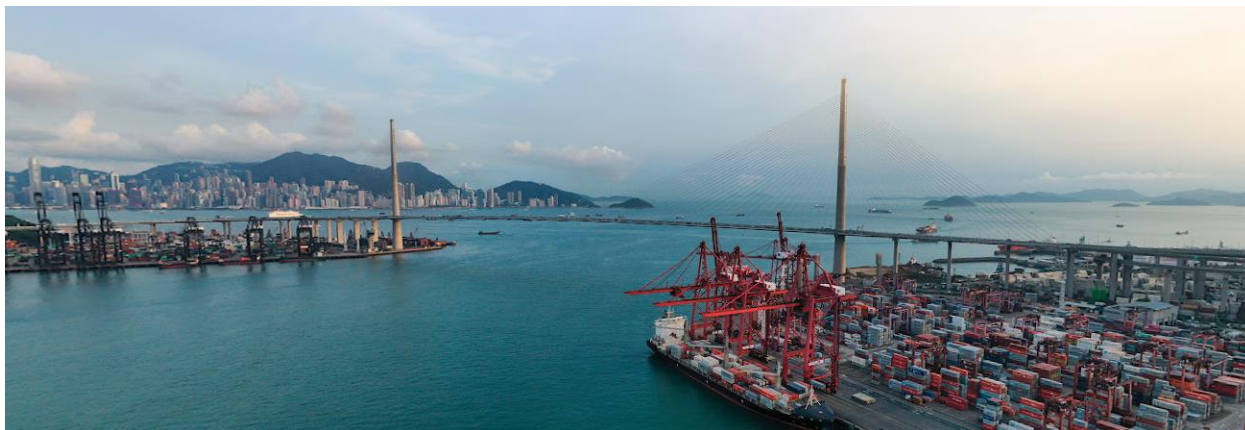


Fig 1.4. Puente de Stonecutters, Hong Kong

El **Puente Ting Kau** (*Ting Kau Contractors Joint Venture*) es otro puente atirantado que se encuentra en Hong Kong, próximo al ejemplo anterior. Posee dos vanos centrales de 448 y 475m de largo, y unos pilonos de 194m. En esta estructura, se aprecia una peculiaridad que es difícil de encontrar, y es que, desde la cabeza del pilono central, parten unos cables pretensados al pie de los pilonos extremos, esta es una metodología empleada para rigidizar la estructura a nivel longitudinal (Manterola, en uno de los capítulos del tomo II su obra *Puentes: apuntes para su diseño, cálculo y construcción*, especifica varias metodologías, esta es una de ellas). Las ventajas que esta rigidización presenta, son la reducción de flechas en cabeza de pilono cuando actúan distintas solicitaciones, como la acción del viento por ejemplo (ya que estos pilonos, se diseñaron con el objetivo de resistir vientos extremos y tifones), lo cual actúa de forma directa sobre la flecha vertical en el centro del vano, aspecto clave condicionante en el diseño de puentes.

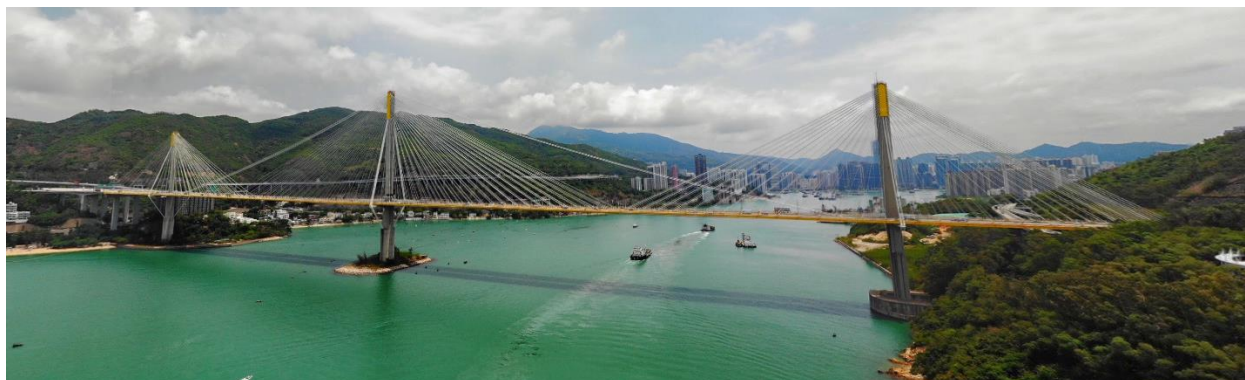


Fig 1.5. Puente de Ting Kau, Hong Kong

Son varios los recursos bibliográficos que he utilizado, en los que se muestran distintas metodologías de rigidización longitudinal, que, para puentes continuos de varios vanos, incluso se aconsejan; sin embargo, me ha costado encontrar ejemplos de estructuras reales que implementen alguna. Es por ello que despertó mi curiosidad el encontrar un puente (Puente de Ting Kau) que finalmente sí añadió a su diseño unos cables rigidizadores extra, y que además, son estos los que ayudan, a que la estructura como tal, soporte tifones y elevados vientos, problema de elevada importancia en los países asiáticos.

2 OBJETIVOS Y FINALIDAD

En el ámbito de la ingeniería civil, todas las estructuras son proyectadas para que perduren un mínimo número de años, sin que existan fallos (que pueden ser de distinto calibre) que comprometan el cumplimiento del objetivo para el que estas fueron diseñadas, hablamos de la vida útil de una estructura.

La vida útil se define como “*período de tiempo, a partir de la fecha en la que finaliza su ejecución, durante el que debe mantenerse el cumplimiento de las exigencias ... es un valor de proyecto para el que se pretende mantener el cumplimiento de las exigencias por encima de unos determinados umbrales*” [1], y es que, dentro de la vida útil, identificamos 2 fallos o situaciones que pueden comprometer la funcionalidad de la estructura:

- Situaciones que suponen el colapso estructural. Se dan unas sollicitaciones que llevan a los materiales al límite de tensiones que pueden soportar.
- Situaciones que, sin provocar el colapso, impiden que la estructura cumpla con el objetivo para la que se diseñó. Pueden ser causadas por fisuración extrema en el caso de estructuras de hormigón, flechas elevadas...

Pues bien, la forma que tenemos de verificar que no vayan a darse estas situaciones en la vida útil de la estructura, es mediante el cumplimiento de los Estados Límite. La verificación frente a las situaciones de colapso se realiza a través de los Estados Límites Último, y la correspondiente a la situación que no provoca el colapso, pero deja a la estructura fuera de servicio, se realiza a través de los Estados Límite de Servicio. El cumplimiento de estos nos garantiza bajo unos altos niveles de probabilidad, que la estructura va a cumplir su objetivo durante unos años de vida útil que vienen recogidos en la correspondiente normativa, en el caso de los puentes hablamos de más de 100 años.

Por lo general, al ser los puentes de grandes vanos estructuras muy flexibles, todas aquellas comprobaciones que estén relacionadas con la flecha vertical en el centro del vano suelen ser más restrictivas, que aquellas que sean tensionales. Es por esto, que vamos a centrarnos en criterios que giren en torno a las deformaciones.

Además de estas comprobaciones de Estados Límite, dependiendo de la estructura existen otras prescripciones más específicas recogidas por la normativa que se deben verificar. En el caso de los puentes de carreteras, en el capítulo 7 de la IAP-11 [2] encontramos una prescripción referente al cumplimiento del Estado Límite de Servicio en deformaciones, que nos establece una deformación mínima en el centro de vano, bajo la actuación de la sobrecarga de uso frecuente. Esta comprobación va a ser el foco del trabajo.

Conociendo el principal condicionante de diseño en estas estructuras, son varias las referencias bibliográficas [3] [4] que, para casos de puentes atirantados continuos con varios vanos, aconsejan ciertas metodologías de rigidización longitudinal. Algunas propuestas son las siguientes:

- Atirantar la cabeza de los pilonos entre sí con cables pretensados, y llevar estos al apoyo del tablero con los estribos.

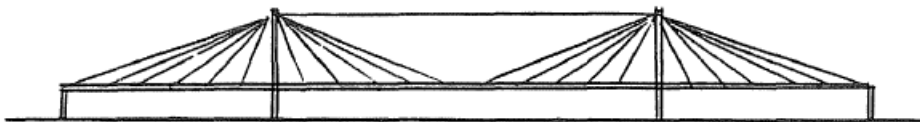


Fig 2.1. Metodología recomendada de rigidización longitudinal 1

- Atirantar la cabeza de los pilonos con el pie de los pilonos contiguos, hasta los estribos.

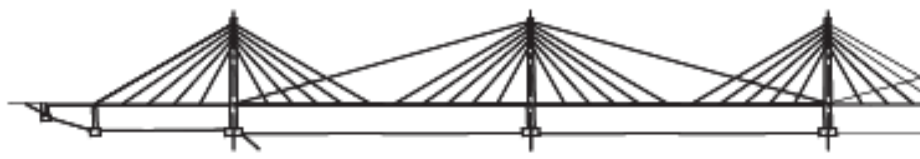


Fig 2.2. Metodología recomendada de rigidización longitudinal 2

- Dar formas especiales a los pilonos, por ejemplo, de diamante o en A. Este caso es útil en casos de puentes con un único plano de atirantamiento.



Fig 2.3. Metodología recomendada de rigidización longitudinal 3

El principal objetivo que tiene rigidizar longitudinalmente bajo uno de estos sistemas, es limitar los desplazamientos en cabeza de pilono, para que de forma indirecta, los cables que se unen al tablero posean menor movimiento, y este se traduzca en menores flechas verticales, el cual es nuestro objetivo de cara a cumplir cualquier criterio en deformaciones.

Tomando la prescripción de la IAP-11 correspondiente a la sobrecarga de uso frecuente [5], y basándonos en el principio de superposición, el objetivo que se plantea en este trabajo es demostrar de forma cuantitativa, que todas las metodologías anteriormente comentadas reducen las flechas verticales, únicamente para una sobrecarga de uso, la cual se ha identificado con la acción del tráfico. Para ello, he utilizado el software MIDAS Civil, donde he estudiado las siguientes geometrías estructurales:

- Para puentes con un atirantamiento según 2 planos laterales verticales, se ha analizado la implementación de 2 sistemas de rigidización longitudinal, por cada tipología de atirantamiento (en arpa, mixta y en abanico):
 - Sistema de rigidización longitudinal 1 (cabeza de pilonos conectados entre sí)
 - Sistema de rigidización longitudinal 2 (cabeza de pilono conectado con pie de pilonos contiguos)
- Para puentes con un solo plano de atirantamiento (central), se ha estudiado la incorporación de un solo sistema de rigidización longitudinal (correspondiente al sistema de rigidización 1 en los puentes con 2 planos atirantados), para las tipologías de atirantamiento mixta y en abanico.

Además, cada situación, se ha estudiado bajo dos condiciones de contorno distintas: apoyo simple, y apoyo deslizante. Ya por el 1983, D. Ramón Gilsanz [5] realizó un estudio comparativo entre puentes colgantes y atirantados donde uno de los parámetros influyentes, era la condición de contorno que los puentes presentasen con el estribo. Tras dedicarle una lectura comprensiva a dicho estudio, me resultó de interés introducir estas situaciones en mis modelizaciones, y realizar algún contraste de resultados en base al cual, poder identificar parte de las conclusiones que D. Ramón realizó.

En todas estas casuísticas, el objetivo ha sido comparar los desplazamientos que cada estructura posee sin un sistema de rigidización longitudinal para la sobrecarga de uso, con los que se dan cuando se implementa alguna de las metodologías de rigidización comentadas. Una vez añadida, lo que se ha estudiado, es cómo estos desplazamientos evolucionan conforme voy aumentando el número de cables de acero que compone cada vaina del correspondiente sistema de rigidización longitudinal. Más concretamente, los resultados en los que me he centrado han sido flechas longitudinales en cabeza de pilonos, flecha vertical en el centro del vano y tensiones en los cables de cada sistema de rigidización.

Todo lo redactado, nos deja con las siguientes modelizaciones de estudio (total de 26):

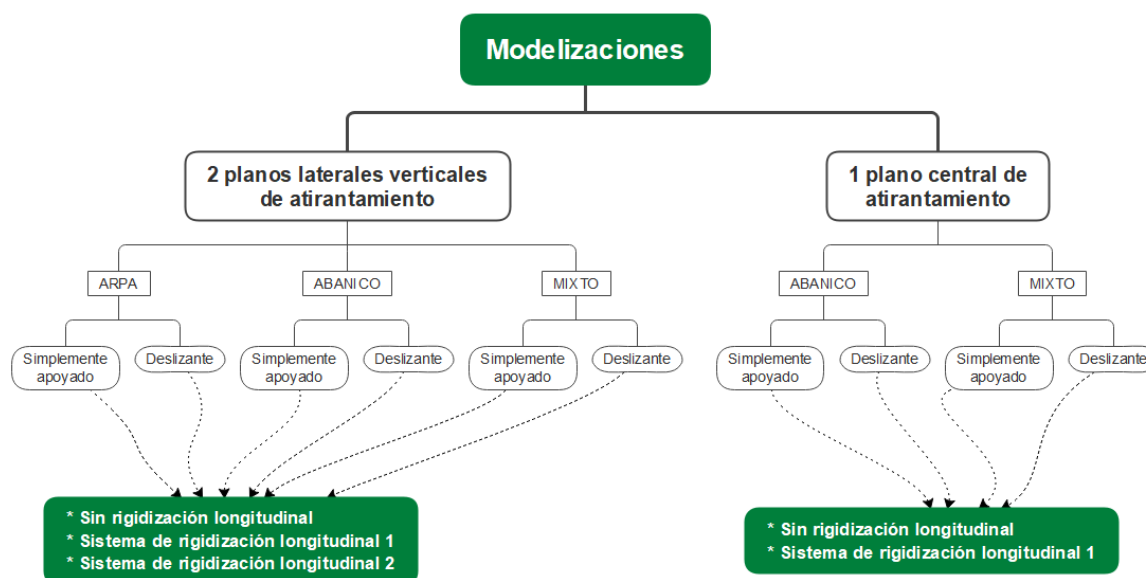


Fig 2.4. Esquema de todas las modelizaciones realizadas

No podría continuar sin hacer mención de la principal dificultad que poseen los puentes atirantados en su cálculo, y es que el elemento que los caracteriza (los cables pretensados), presenta dos no linealidades: una de ellas en la geometría que describen y otra en el comportamiento [6].

La no linealidad geométrica se puede apreciar a simple vista en cualquier puente. Los cables son elementos que no soportan la flexión, por lo que, por su propio peso, la forma natural que desarrollan (en la que se equilibran) es la de una catenaria, y dependiendo de la tensión que experimenten, la flecha de esta será mayor o menor. Se tratan de elementos en los que el equilibrio se considera en la situación deformada

Por otro lado, el comportamiento de un material viene caracterizado por el módulo de elasticidad E , que se define como σ/ε , pues bien, si se tiene en cuenta la no linealidad geométrica, tiene sentido pensar que el comportamiento tampoco va a serlo, pues un mismo aumento de tensiones, va a provocar una variación de deformaciones diferente dependiendo de la flecha que presente el cable en ese preciso instante. Esto es fácil de ver si planteamos un cable deformado sobre el que vamos aplicando una carga ΔT en sus extremos según la dirección de la cuerda:

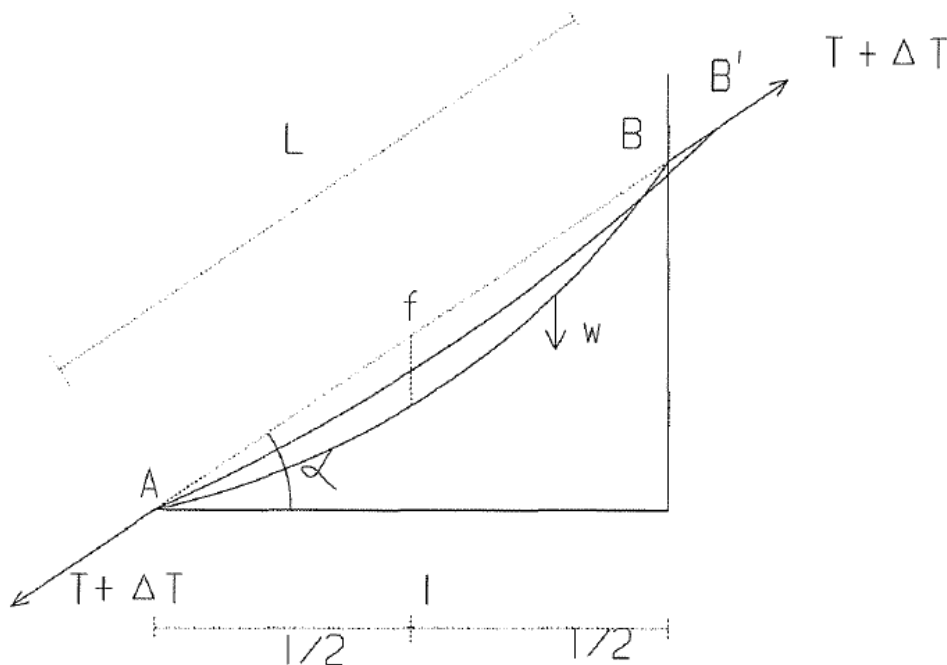


Fig 2.5. No linealidad geométrica de los cables

Es apreciable que la longitud del cable, va a depender de la pérdida de flecha existente, así como de la capacidad que el material tenga de alargarse.

Como nuestros estudios van a realizarse para la sobrecarga de uso de las estructuras (que se corresponden con una sobrecarga de tráfico recogida IAP-11 [2]), no vamos a considerar estas no linealidades de los cables, en su defecto, en los análisis se van a modelizar los cables como elementos barra que solo pueden trabajar a axil (elementos *truss* en MIDAS Civil).

El resultado que obtengamos bajo esta simplificación, no va a diferir mucho del que se obtendría en caso de sí considerarse la no linealidad de los cables, ya que la sobrecarga de uso, va a ser una excitación pequeña comparada con la de peso propio de toda la estructura, por lo que para lo que a efectos de este trabajo concierne, las sollicitaciones tampoco van a provocar que las no linealidades repercutan de forma significativa en los resultados.

3 MODELIZACIONES

Tras haber introducido la razón de ser de este trabajo y el objetivo del mismo, en este capítulo se va a entrar en el detalle de las modelizaciones llevadas a cabo en MIDAS Civil. He optado por dividir el mismo en dos partes, una primera donde se incide en la modelización geométrica de todas las estructuras; y una segunda donde se explican las situaciones de carga tenidas en cuenta para la extracción de resultados.

3.1 Modelización geométrica de estructuras

Antes de entrar en detalle, conviene recordar las distintas modelizaciones realizadas y particularizar ciertos aspectos de las mismas.

Podemos dividir las estructuras estudiadas en 2 grandes grupos según los planos transversales de atirantamiento: puentes atirantados bajo 2 planos laterales verticales, y puentes con un solo plano de atirantamiento (que es central).

Los puentes atirantados según 2 planos laterales verticales se han analizado para las tipologías de atirantamiento mixta, en abanico y en arpa, teniendo en cuenta que los puentes pueden estar simplemente apoyados, o deslizantes con respecto los estribos. En todas estas estructuras, se han planteado los sistemas de rigidización longitudinal 1 y 2, y se han extraído resultados para distinto número de cables.

Los puentes atirantados que solo presentan un plano (central) de atirantamiento, se han analizado para las tipologías mixta y en abanico, puesto que se ha empleado una geometría de pilono en diamante, que impide prolongar la colocación de cables hasta unas decenas de metros por encima del tablero. En estas estructuras, dada la particularidad geométrica de los pilonos, solo se ha estudiado la implementación del sistema de rigidización longitudinal 1, teniendo en cuenta distintos números de cables por vaina. Al igual que en las estructuras atirantadas según un par de planos, se han considerado dos condiciones de contorno distintas por cada casuística.

De cara a las modelizaciones realizadas en MIDAS Civil, como se ha introducido en el apartado anterior, para los cables de los sistemas de atirantamiento así como los sistemas de rigidización longitudinal se han utilizado elementos *truss*, los cuales solo trabajan a esfuerzos axiales, en el resto de elementos estructurales se han utilizado elementos tipo *beam* o viga, capaces de trabajar bajo esfuerzos según todos los grados de libertad.

3.1.1 Estructura y atirantamientos

A nivel longitudinal, todas las estructuras estudiadas en este trabajo parten de la misma base geométrica: puente atirantado de 3 vanos, dos laterales de 100 m de longitud y uno central de 220. Además, todos los pilonos tienen una altura de 90 m, y el tablero presenta una pendiente del 5%.

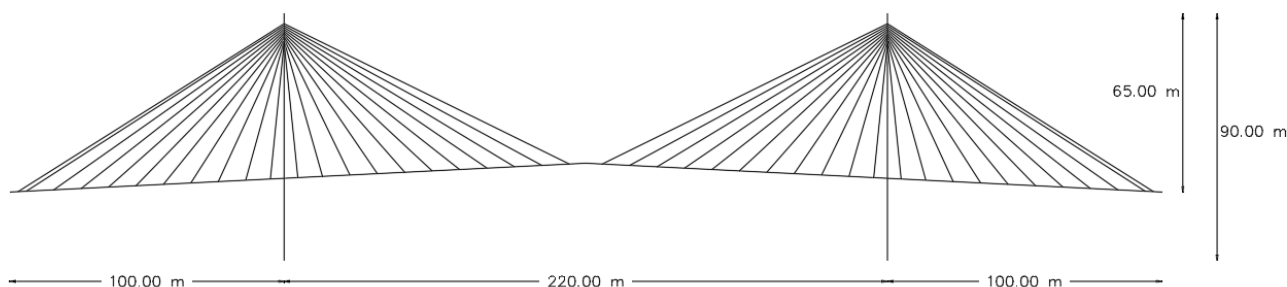


Fig 3.1.1.1. Geometría estructural general

Las diferencias geométricas aparecen cuando indagamos en el sistema de atirantamiento, pues además de distinguir entre planos transversales de atirantamiento, identificamos distintas tipologías a nivel longitudinal (atirantamiento en arpa, abanico y mixto).

A **nivel longitudinal**, los sistemas de atirantamiento vienen definidos por las siguientes geometrías:

➤ Atirantamiento en ABANICO

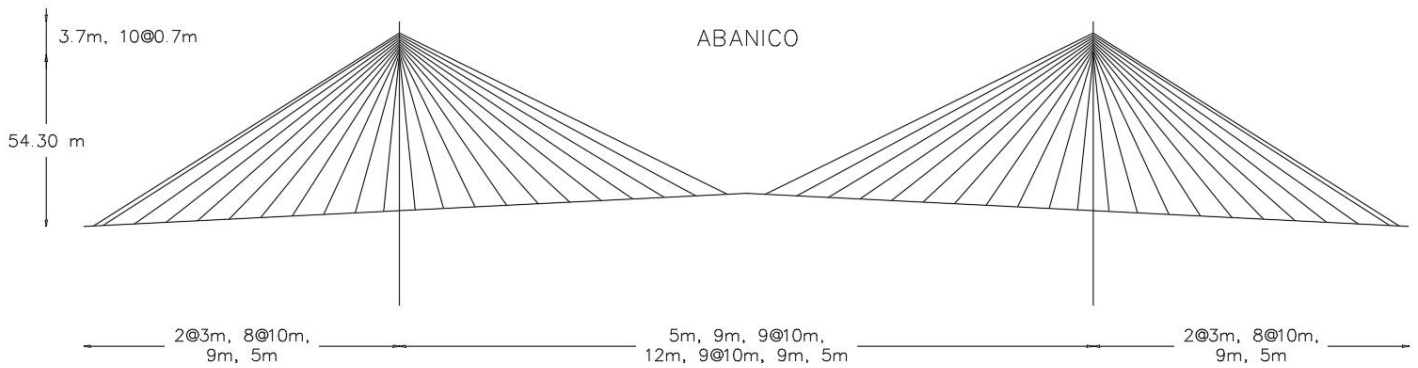


Fig 3.1.1.2. Geometría atirantamiento en abanico

➤ Atirantamiento en ARPA

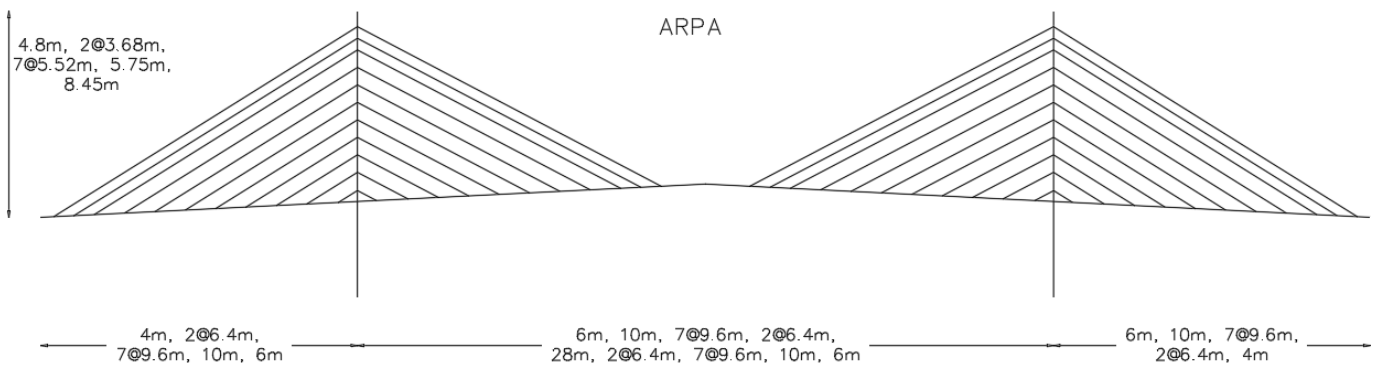


Fig 3.1.1.3. Geometría atirantamiento en arpa

➤ Atirantamiento MIXTO

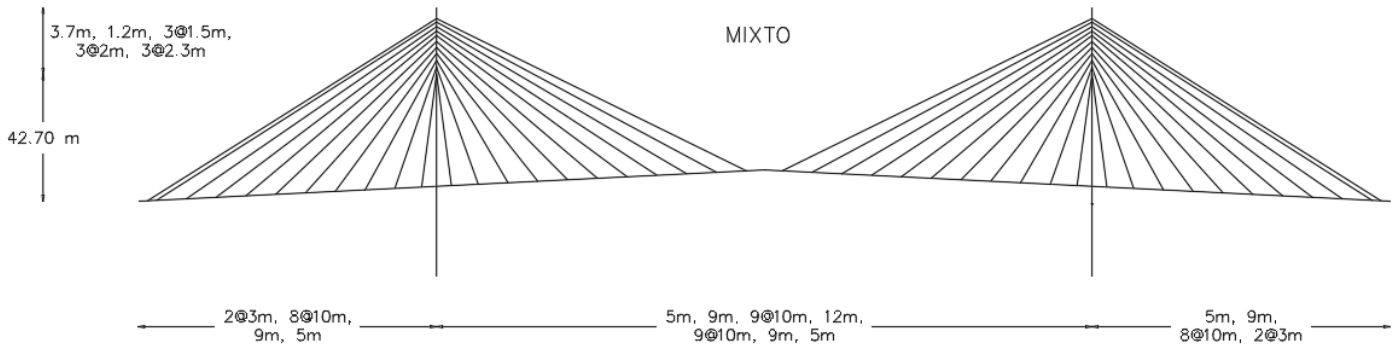


Fig 3.1.1.4. Geometría atirantamiento mixto

Según los **planos de atirantamiento de las estructuras**, se aprecian las siguientes geometrías de pilonos:

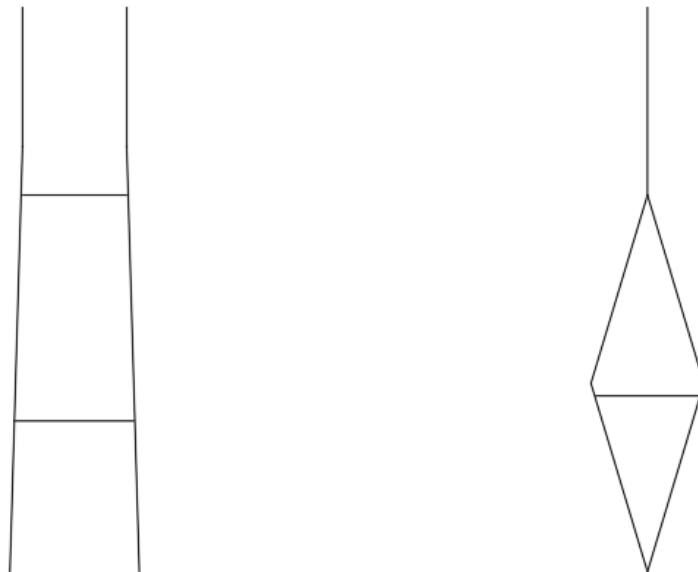


Fig 3.1.1.5. Geometría pilonos general según planos transversales de atirantamiento

La geometría de la izquierda es la que se ha empleado para los puentes atirantados según dos planos laterales verticales, y la geometría derecha, es para los puentes atirantados según un solo plano. Estas son de forma general las configuraciones de pilonos, de forma más particular, las dimensiones de los tramos rectos para las estructuras atirantadas según 2 planos cambian dependiendo del sistema de atirantamiento que se haya empleado.

A modo de resumen, las geometrías empleadas en pilonos y sistemas de atirantamiento quedan de la siguiente forma según la modelización en cuestión:

❖ 2 planos laterales verticales de atirantamiento en ARPA

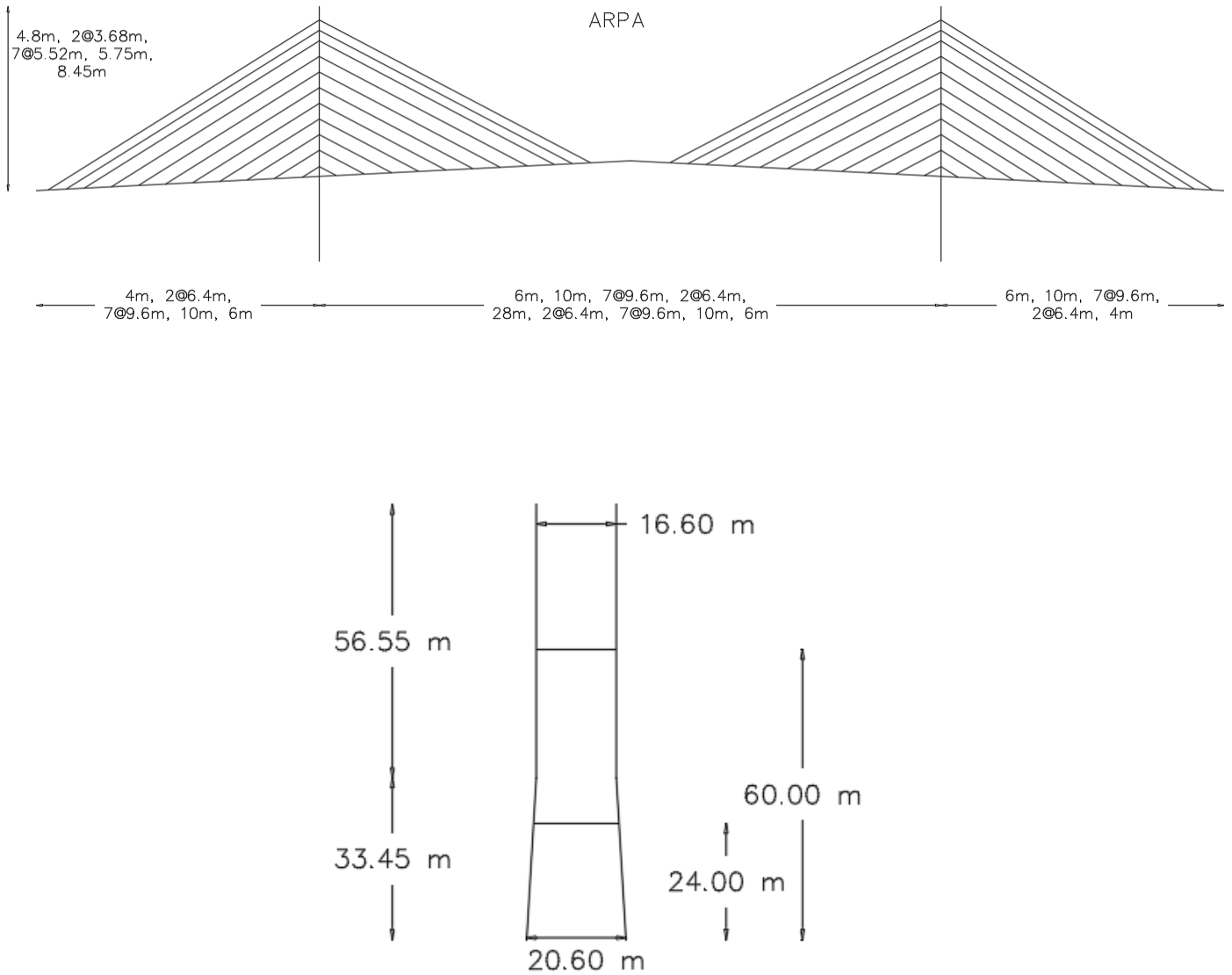


Fig 3.1.1.6. Estructura atirantada según 2 planos laterales, tipología en arpa

El tramo recto en pilonos es donde se localizan los cables, que se extiende unos 56.55m.

❖ 2 planos laterales verticales de atirantamiento en ABANICO

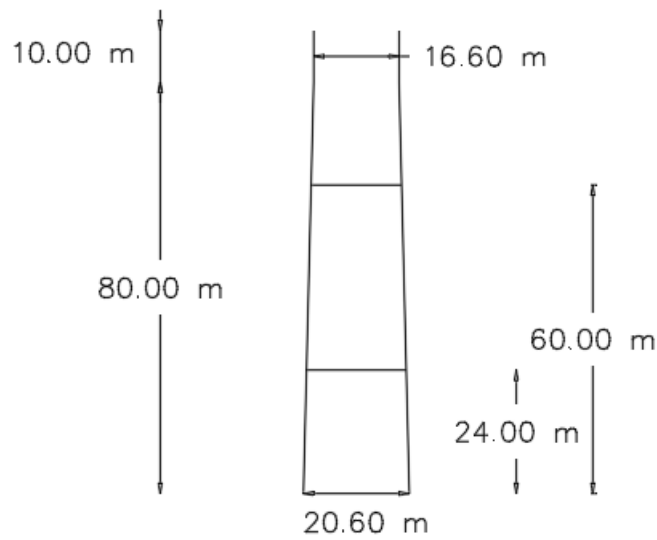
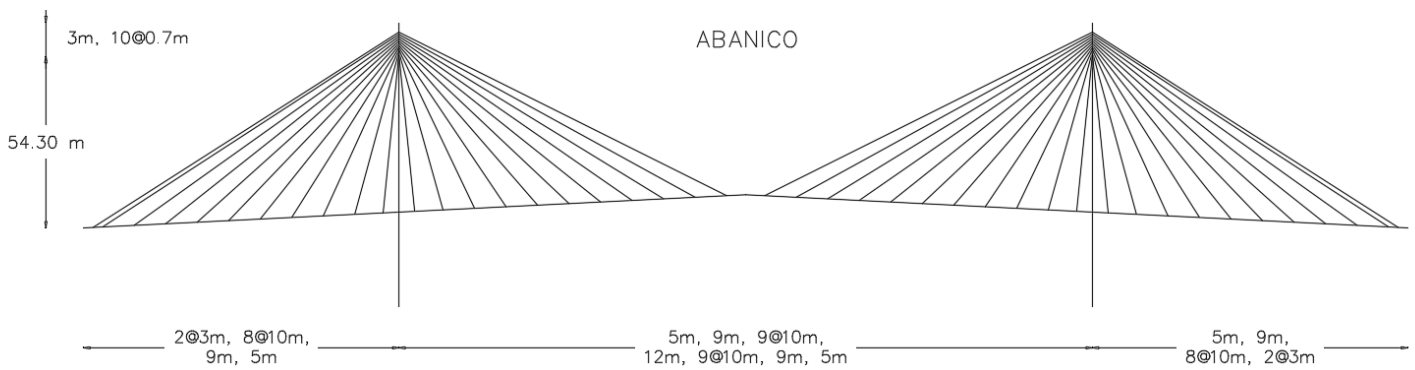


Fig 3.1.1.7. Estructura atirantada según 2 planos laterales, tipología en abanico

Son en los 10m superiores en cabeza de pilonos donde se localizan los cables, más concretamente de 3 a 10m partiendo desde el punto más alto.

❖ 2 planos laterales verticales de atirantamiento MIXTO

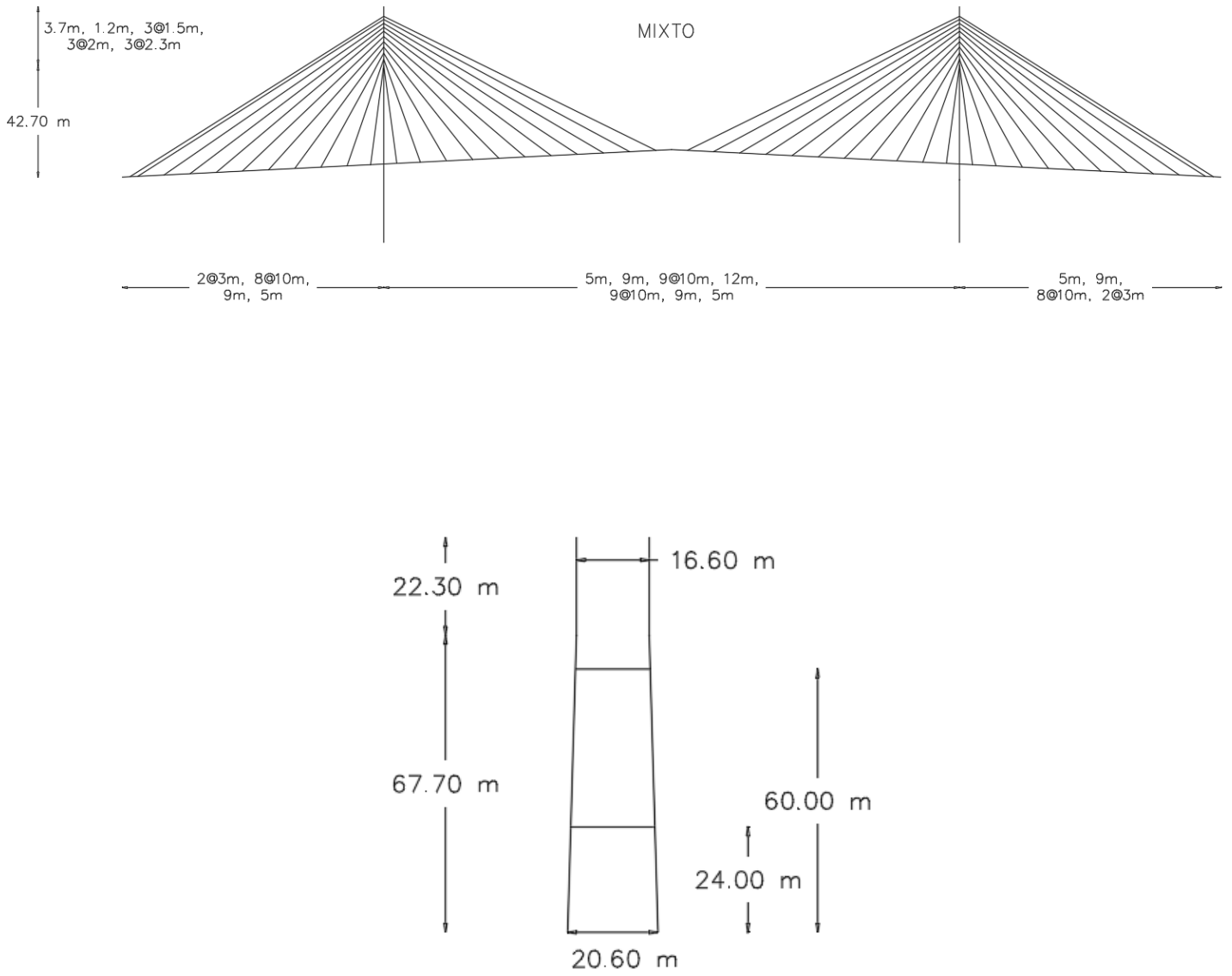


Fig 3.1.1.8. Estructura atirantada según 2 planos laterales, tipología mixta

❖ 1 plano central de atirantamiento en ABANICO

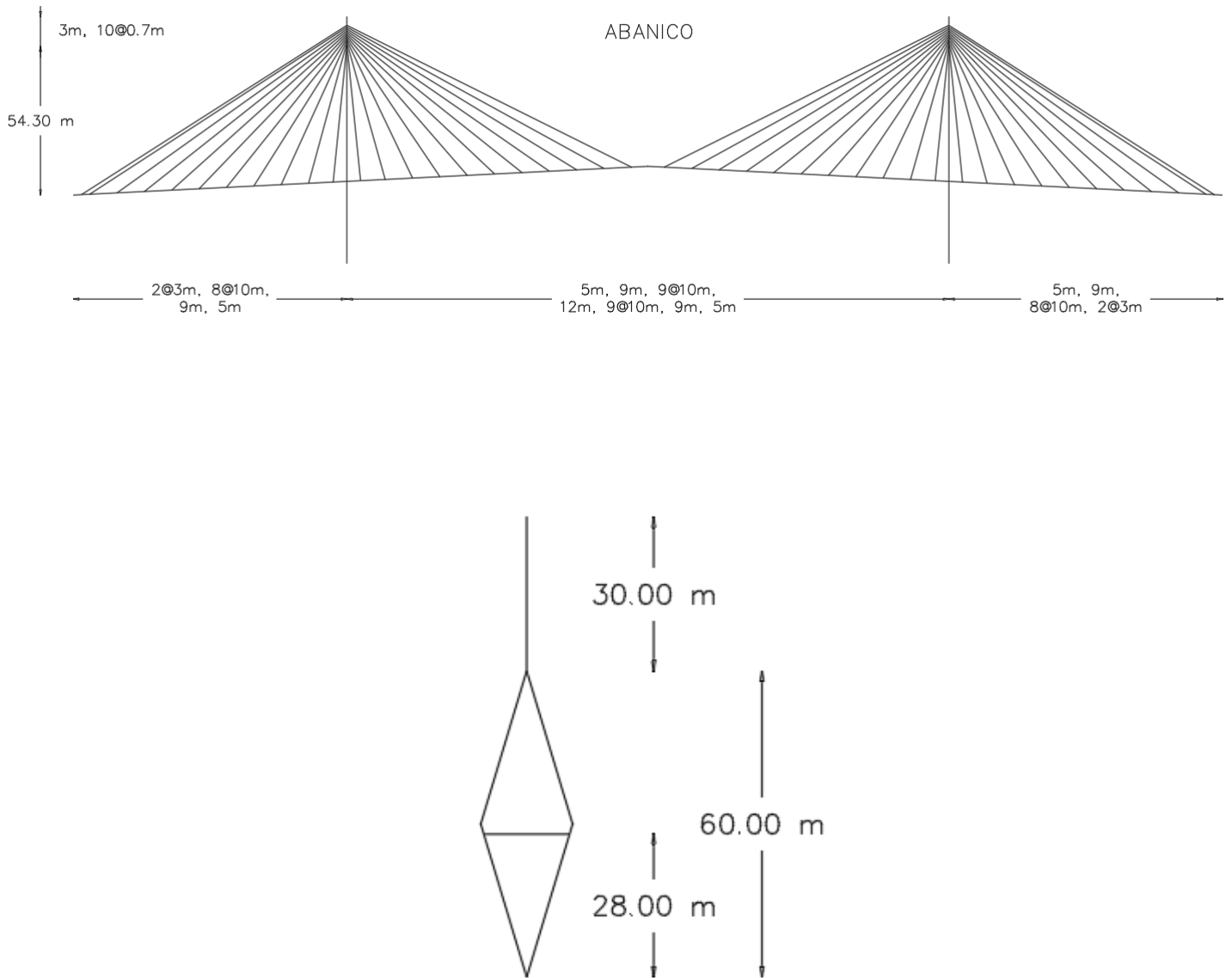


Fig 3.1.1.9. Estructura atirantada un único plano central, tipología en abanico

A diferencia de las estructuras atirantadas según 2 planos laterales verticales, los cables no llegan a ocupar todo el tramo recto de pylon, para este caso en concreto, los cables se extienden desde los 3 hasta los 10m partiendo desde el punto más alto de pylon, por lo que hay un tramo de 20m sin cables.

❖ 1 plano central de atirantamiento MIXTO

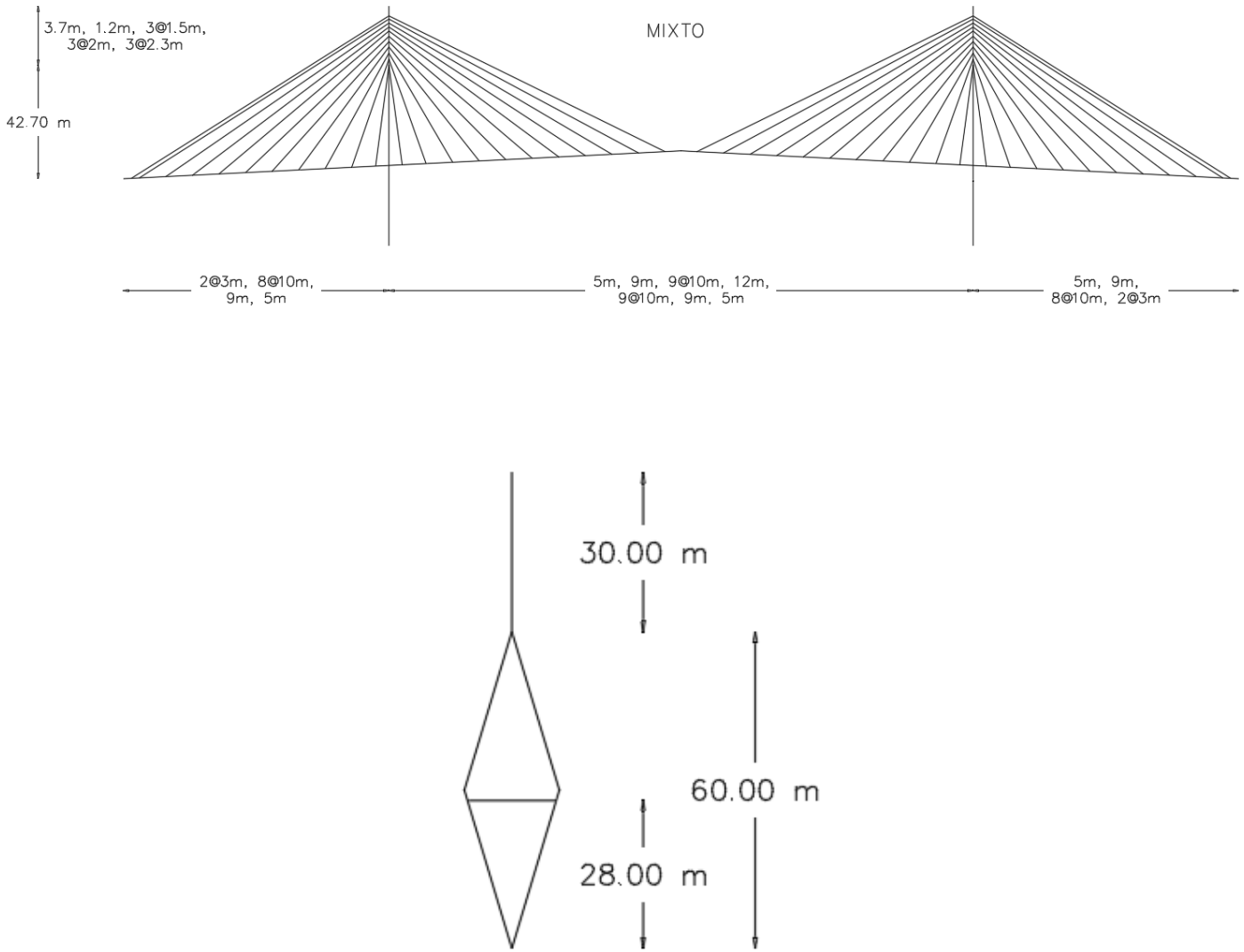


Fig 3.1.1.10. Estructura atirantada un único plano central, tipología mixta

En este caso sucede igual que en el anterior, solo que el espacio ocupado por cables es superior, de unos 18.6m.

Todo lo comentado, nos deja con un total de 88 cables pretensados para los puentes atirantados según 2 planos laterales verticales y 44 para los que solo presentan un plano de atirantamiento.

Se puede observar en la geometría de los pilonos, la existencia de unas vigas transversales que dan rigidez a los pilonos en esta dirección, más adelante se incidirá sobre la sección y materiales de cada elemento.

3.1.2 Secciones de los elementos estructurales

Todos los elementos constituyentes de las estructuras se han introducido en MIDAS Civil a través de sus propiedades mecánicas (áreas e inercias).

3.1.2.1 Tableros

Bien es sabido, que en los puentes atirantados según un solo plano, la principal adversidad que presentan los tableros es la rigidez a torsión, pues al estar tensados solo por plano de cables, el giro del tablero según el eje longitudinal tiene menores restricciones, sucede lo contrario en los puentes que se atirantan según 2, es por esto, que para los sostenidos por un solo plano se ha considerado el empleo de una viga con sección en cajón, y para los puentes atirantados según 2 planos laterales verticales, una viga mixta bijácena (que se ha simplificado a efectos de cálculo).

El **tablero de viga bijácena** es metálico y está constituido por dos vigas en I laterales de acero, unas vigas transversales en I, unos rigidizadores longitudinales en la zona superior y una chapa metálica sobre la que se construye la estructura del firme (ver imagen inferior). Para las modelizaciones en MIDAS se ha simplificado esta sección y se ha tomado como equivalente en propiedades mecánicas, el empleo de una losa metálica superior de unos 30mm, tal y como se puede apreciar en las imágenes:

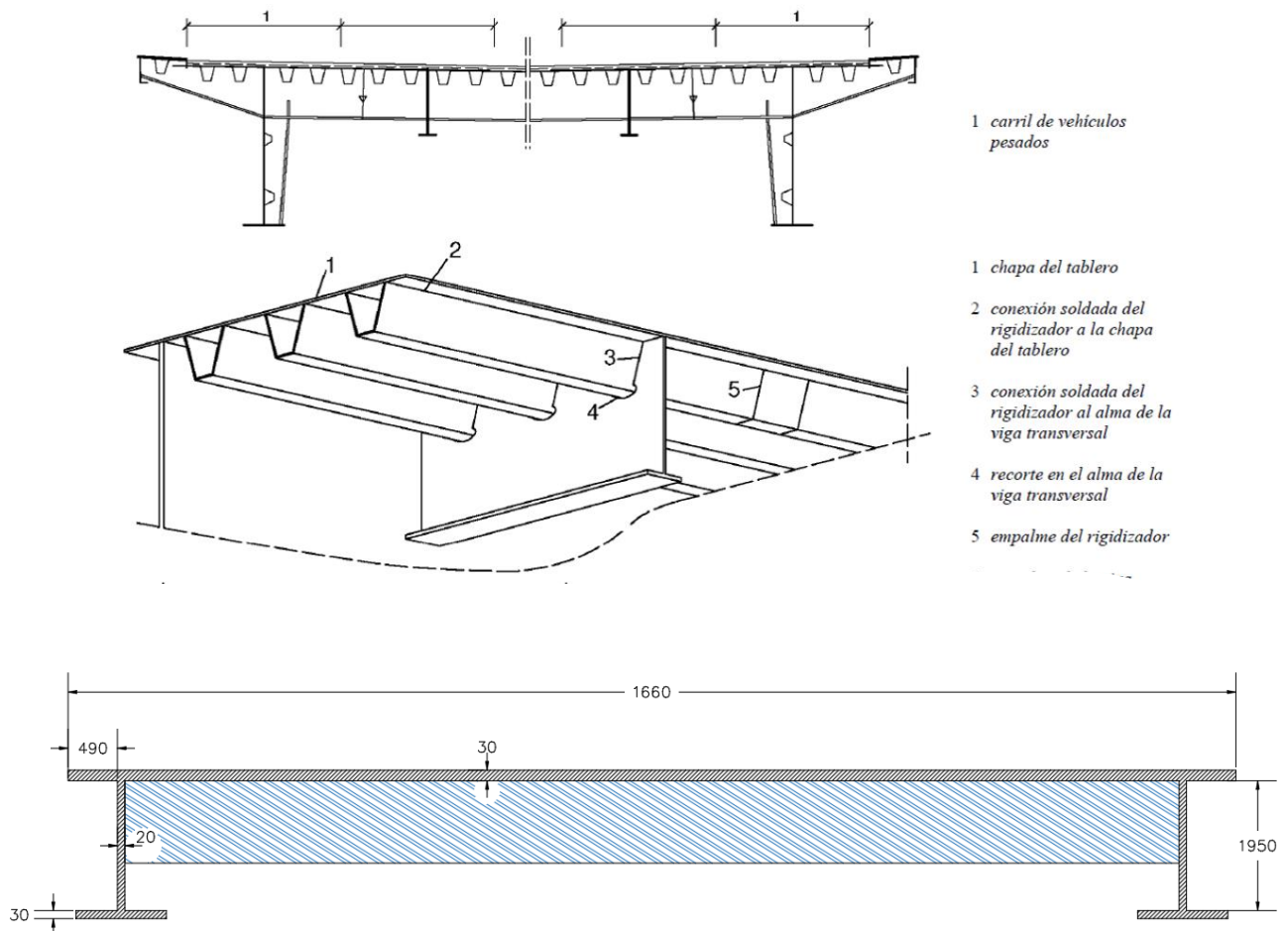


Fig 3.1.2.1.1 Geometría tablero viga bijácena

Estos elementos se han considerado en MIDAS como tipo *beam*.

Las propiedades mecánicas introducidas en el software, se corresponden con las de la mitad de la sección, ya que al tratarse de una viga bijnácena, se ha modelizado en base a dos elementos laterales, cada uno en el extremo geométrico del tablero:



Fig 3.1.2.1.2 Propiedades mecánicas tablero viga bijnácena

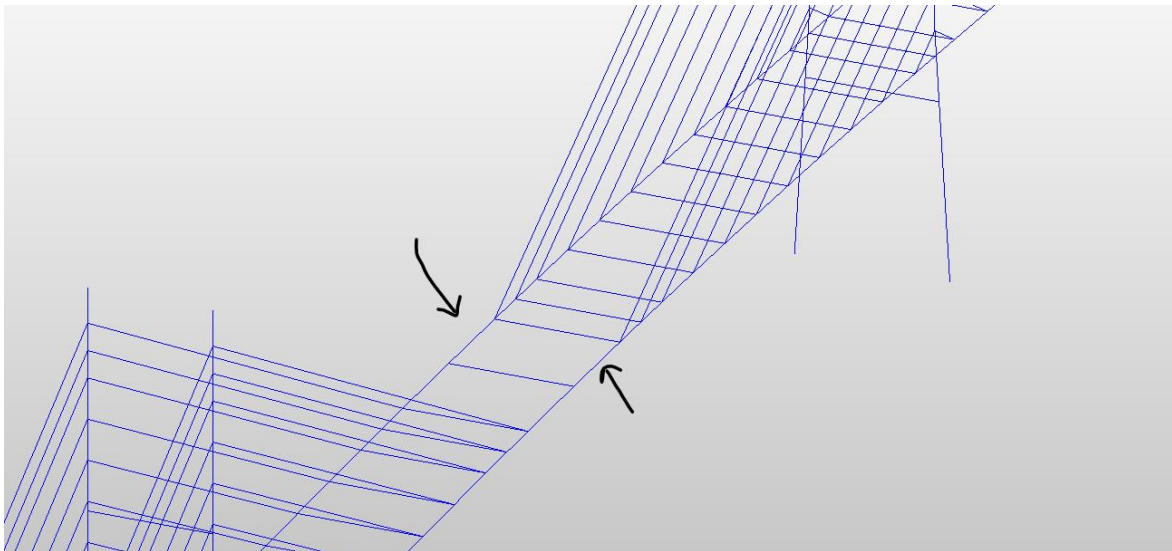


Fig 3.1.2.1.3 Modelización geométrica tablero viga bijnácena

Además de las vigas laterales longitudinales, en este tablero se consideran unas **vigas transversales en I** que poseen la siguiente geometría y propiedades mecánicas (al igual que el tablero, modelizado a través de elementos tipo *beam*):

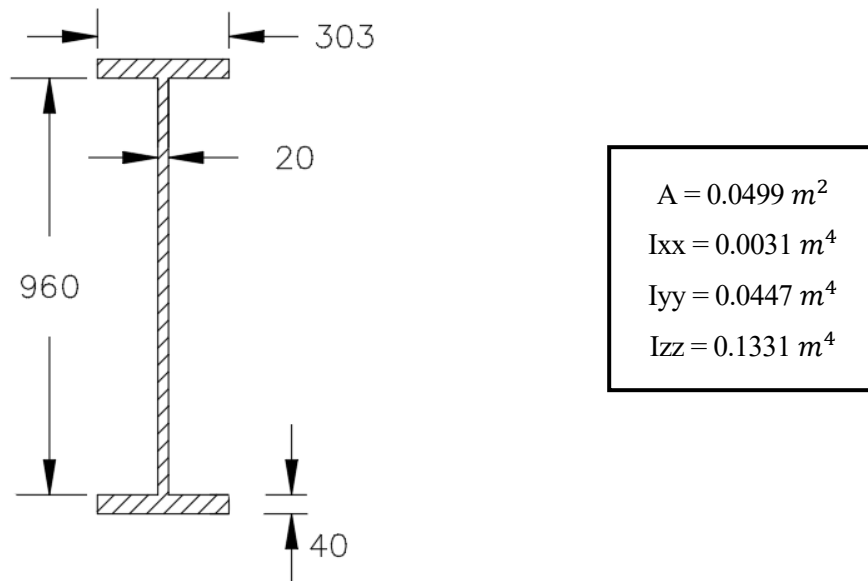


Fig 3.1.2.1.4 Geometría y propiedades mecánicas vigas transversales en I

El **tablero tipo viga cajón** se trata de un tablero cerrado, cuyos límites están conformados por una placa metálica (acero en nuestro caso) de espesor bajo. El principal beneficio que presenta, es que al tratarse de una sección cerrada, la rigidez a torsión es mucho superior a la del tablero de viga bijácena. El tablero tiene la siguiente geometría y propiedades mecánicas:

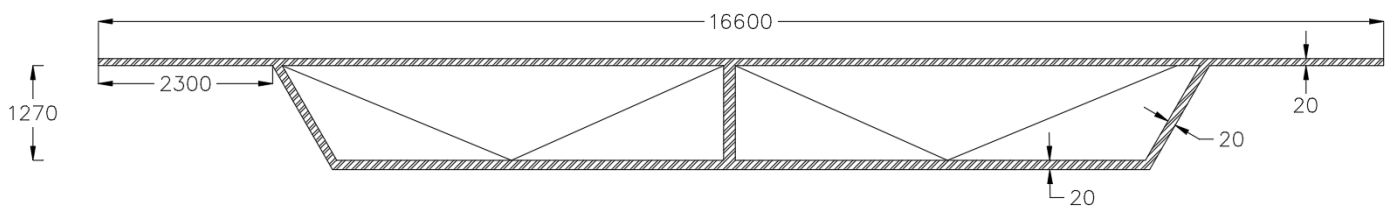


Fig 3.1.2.1.5 Geometría tablero viga ortótropa

$A = 0.601 \text{ m}^2$
$I_{xx} = 0.66 \text{ m}^4$
$I_{yy} = 0.223 \text{ m}^4$
$I_{zz} = 11.422 \text{ m}^4$

Fig 3.1.2.1.6 Propiedades mecánicas tablero viga ortótropa

En este caso, sí se han considerado las propiedades mecánicas de toda la sección, ya que, en los puentes atirantados según un único plano central, el tablero se ha modelizado a través de una línea de elementos tipo *beam*.

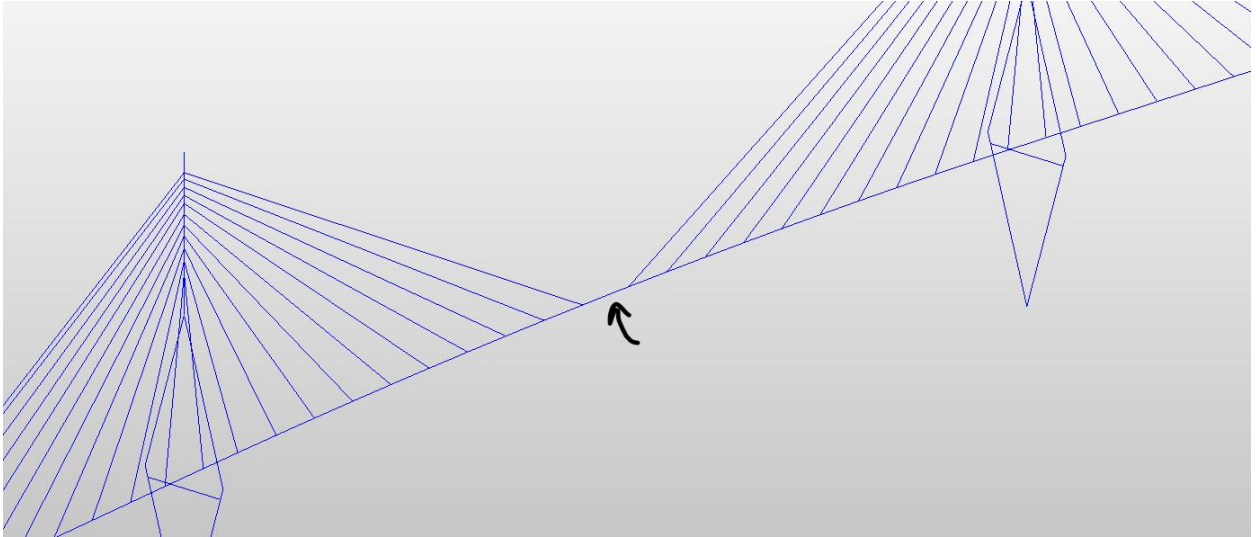


Fig 3.1.2.1.7 Modelización geométrica tablero viga ortótropa

3.1.2.2 Cables

En todas las estructuras, las vainas han sido modelizados como elementos tipo *truss* con una sección equivalente en área al número de cables totales que se tiene por cada una. En estos elementos, solo se ha considerado el área de la propia sección, puesto que al tratarse de cables, las inercias según los distintos ejes son nulas.

Para los cables que componen los **sistemas de atirantamiento** se ha supuesto el empleo de una vaina compuesta por 31 cables, lo cual equivale a considerar un área de acero de 43.40 cm^2 .

Los **cables** que constituyen los **sistemas de rigidización longitudinales** han sido modelizados de la misma forma que los de los sistemas de atirantamiento, con la diferencia de que para obtener el contraste de resultados, las áreas de los elementos *truss* se han ido modificando de menor a mayor número de cables por vaina. Las áreas tenidas en cuenta han sido las siguientes:

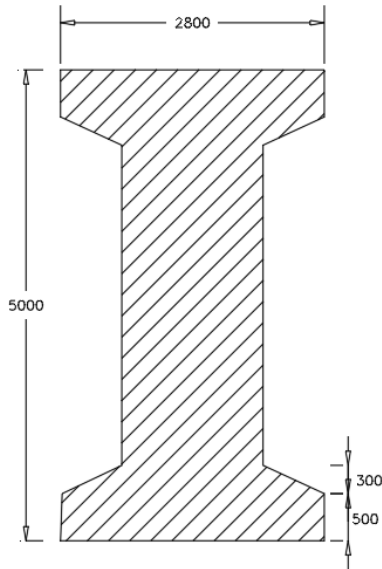
Número cables / vaina	Área total de cables (mm^2)
4	560
7	980
9	1260
12	1680
15	2100
19	2660
22	3080
24	3360
27	3780
31	4340

Tabla 3.1.2.2.1 Número de cables por vaina y sección total de acero

Los números de cables y áreas correspondientes han sido extraídos del catálogo de BBR [8].

3.1.2.3 Pilonos

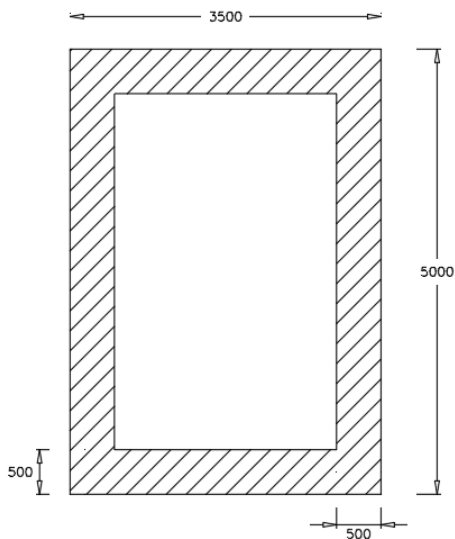
En los pilonos, además de las **vigas** “verticales” que conforman la **geometría principal de los mismos**, nos encontramos con unas transversales. La sección y propiedades mecánicas de las primeras son las siguientes:



$$\begin{aligned}
 A &= 9.2 \text{ m}^2 \\
 I_{xx} &= 19.51 \text{ m}^4 \\
 I_{yy} &= 25.567 \text{ m}^4 \\
 I_{zz} &= 8.123 \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

Fig 3.1.2.3.1 Geometría y propiedades mecánicas sección pilonos

Para las **vigas riostra transversales** se ha utilizado la siguiente geometría:



$$\begin{aligned}
 A &= 7.2 \text{ m}^2 \\
 I_{xx} &= 15.79 \text{ m}^4 \\
 I_{yy} &= 14.472 \text{ m}^4 \\
 I_{zz} &= 7.992 \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

Fig 3.1.2.3.2 Geometría y propiedades mecánicas viga transversal pilonos

3.1.3 Materiales empleados

Para todos los elementos estructurales que se consideran en todas las estructuras modelizadas se han tenido en cuenta 3 materiales diferentes: un acero estructural S275, un acero de pretensar Y1860-S7 y un hormigón HA – 30. Las propiedades de cada uno son las siguientes:

Materiales	Módulo de elasticidad (kN/m^2)	Coefficiente de Poisson	Densidad (kN/m^3)
Acero Y1860-S7	$1.9613 * 10^8$	0.3	77.09
Hormigón HA-30	$2.78 * 10^7$	0.2	23.56
Acero S275	$1.9995 * 10^8$	0.3	77.09

Tabla 3.1.3.1 Materiales y comportamiento

El acero de pretensar Y1860-S7 tiene una tensión de rotura de 1860MPa y se considera como óptima de trabajo el 45% de la de rotura, es decir, 837MPa.

A modo de resumen, en la tabla siguiente se muestran los elementos empleados en las modelizaciones para cada componente estructural de los puentes modelizados así como el material considerado para los mismos:

Componente estructural	Elemento en MIDAS empleado	Material
Tableros	Beam	Acero S275
Pilonos	Beam	Hormigón HA-30
Viga transversal pilonos	Beam	Hormigón HA-30
Cables sistema atirantamiento	Truss	Acero Y1860-S7
Cables rigidización longitudinal	Truss	Acero Y1860-S7

Tabla 3.1.3.2 Material y elementos tipo empleados en modelizaciones para cada elemento estructural

3.1.4 Condiciones de contorno

Cuando hablamos de condiciones de contorno, solemos pensar en las relaciones que la estructura guarda con “el resto”, con lo que no es la estructura, en este apartado no solo se va a incidir en zonas ajenas a la estructura, sino también en las relaciones que algunos elementos estructurales que conforman los puentes guardan entre sí, como pueden ser tablero y pilonos. Vamos a ir paso por paso especificando las interacciones entre elementos.

3.1.4.1 Tablero con estribos

La interacción entre tablero y estribo, se ha considerado a través de 2 *links* en MIDAS. Un **elastic link** que simula un neopreno entre la cara inferior del tablero y la superficie del estribo, y un **rigid link** entre la cara inferior y la superior del tablero (donde se han definido los elementos beam), que establece un comportamiento como sólido rígido (según todos los grados de libertad) entre ambas caras.

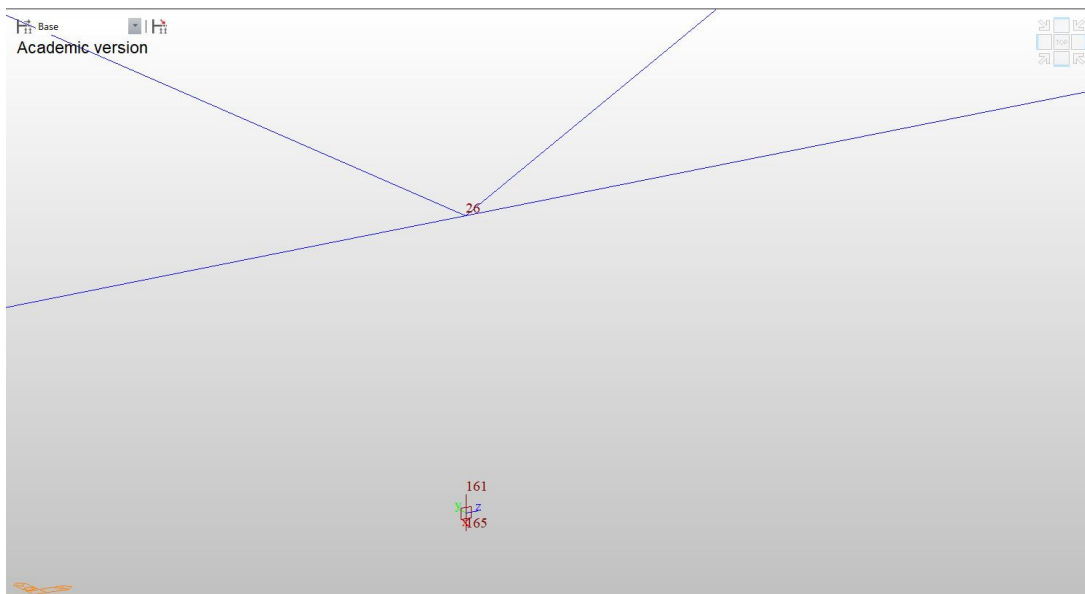


Fig 3.1.4.1.1 Elastic link tablero con estribos

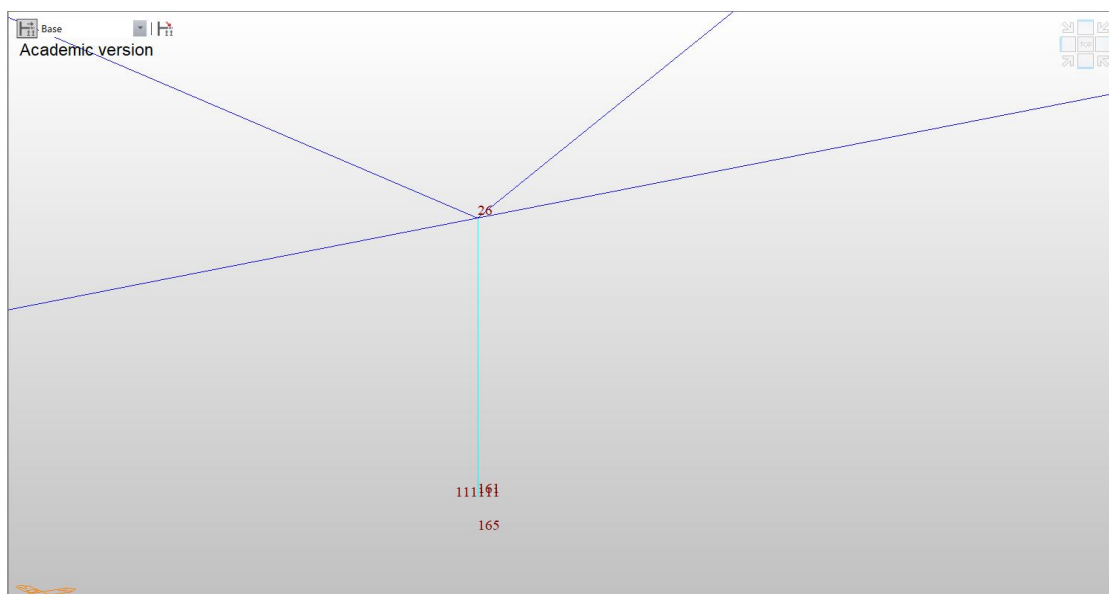


Fig 3.1.4.1.2 Rigid link tablero

En la interacción representada por el elastic link, es donde se han definido las 2 condiciones de contorno especificadas en el capítulo 2 para todas las geometrías estructurales definidas en 3.1.1:

- Apoyo simple donde se impide el desplazamiento en cualquier dirección.
- Apoyo deslizante donde se deja libre el desplazamiento longitudinal del tablero.

La forma de establecer estas condiciones ha sido a través de unas rigideces al desplazamiento y giro según las distintas direcciones.

Previamente, se indicó que el principal problema que afrontan las estructuras atirantadas según un único plano, es la torsión. Para afrontarla, no solo se ha considerado un tablero con mayor rigidez, sino que se han tomado unas rigideces superiores al desplazamiento transversal.

Para las estructuras atirantadas según 2 planos laterales verticales, las rigideces para el neopreno han sido las siguientes:

$$\begin{aligned}
 SD_x &= 199,736,032 \text{ Kn/m} \\
 SD_y &= 73,373 \text{ Kn/m} \\
 SD_z &= 73,373 \text{ Kn/m} \\
 SR_x &= 0 \text{ Kn} * \text{ m/rad} \\
 SR_y &= 0 \text{ Kn} * \text{ m/rad} \\
 SR_z &= 0 \text{ Kn} * \text{ m/rad}
 \end{aligned}$$

Tabla 3.1.4.1.1. Rigideces elastic link apoyo simple 2 planos atirantados

$$\begin{aligned}
 SD_x &= 199,736,032 \text{ Kn/m} \\
 SD_y &= 73,373 \text{ Kn/m} \\
 SD_z &= 0 \text{ Kn/m} \\
 SR_x &= 0 \text{ Kn} * \text{ m/rad} \\
 SR_y &= 0 \text{ Kn} * \text{ m/rad} \\
 SR_z &= 0 \text{ Kn} * \text{ m/rad}
 \end{aligned}$$

Tabla 3.1.4.1.2 Rigideces elastic link apoyo deslizante 2 planos atirantados

Para las estructuras atirantadas según un único plano de atirantamiento central, se han considerado las siguientes rigideces en el apoyo:

$$\begin{aligned}
 SD_x &= 199,736,032 \text{ Kn/m} \\
 SD_y &= 199,736,032 \text{ Kn/m} \\
 SD_z &= 73,373 \text{ Kn/m} \\
 SR_x &= 0 \text{ Kn} * \text{ m/rad} \\
 SR_y &= 0 \text{ Kn} * \text{ m/rad} \\
 SR_z &= 199,736,022 \text{ Kn} * \text{ m/rad}
 \end{aligned}$$

Tabla 3.1.4.1.3. Rigideces elastic link apoyo simple un plano atirantados

$$\begin{aligned}
 SD_x &= 199,736,032 \text{ Kn/m} \\
 SD_y &= 199,736,032 \text{ Kn/m} \\
 SD_z &= 0 \text{ Kn/m} \\
 SR_x &= 0 \text{ Kn} * \text{ m/rad} \\
 SR_y &= 0 \text{ Kn} * \text{ m/rad} \\
 SR_z &= 199,736,022 \text{ Kn} * \text{ m/rad}
 \end{aligned}$$

Tabla 3.1.4.1.4. Rigideces elastic link apoyo deslizante un plano atirantado

3.1.4.2 Tablero con pilonos

Normalmente, en los puentes atirantados continuos, el tablero no tiene apoyos en los pilonos, pero sí suelen colaborar a soportar la torsión y el desplazamiento transversal del mismo, de lo contrario, en los atirantados según un único plano central, el efecto de la sobrecarga se haría muy notorio.

Para nuestro caso, solo he considerado esta interacción en las estructuras atirantadas según un único plano, pues la resistencia a torsión que aporta tener 2 planos de atirantamiento laterales verticales es lo suficientemente elevada como para que la sobrecarga no provoque deformaciones transversales excesivas.

Esta colaboración por parte de los pilonos, se ha tenido en cuenta a través de un **rigid link** en MIDAS, en el cual, el comportamiento como sólido rígido solo se ha atribuido al desplazamiento transversal, y a la torsión del tablero (grados de libertad en los que el pilono rigidiza).

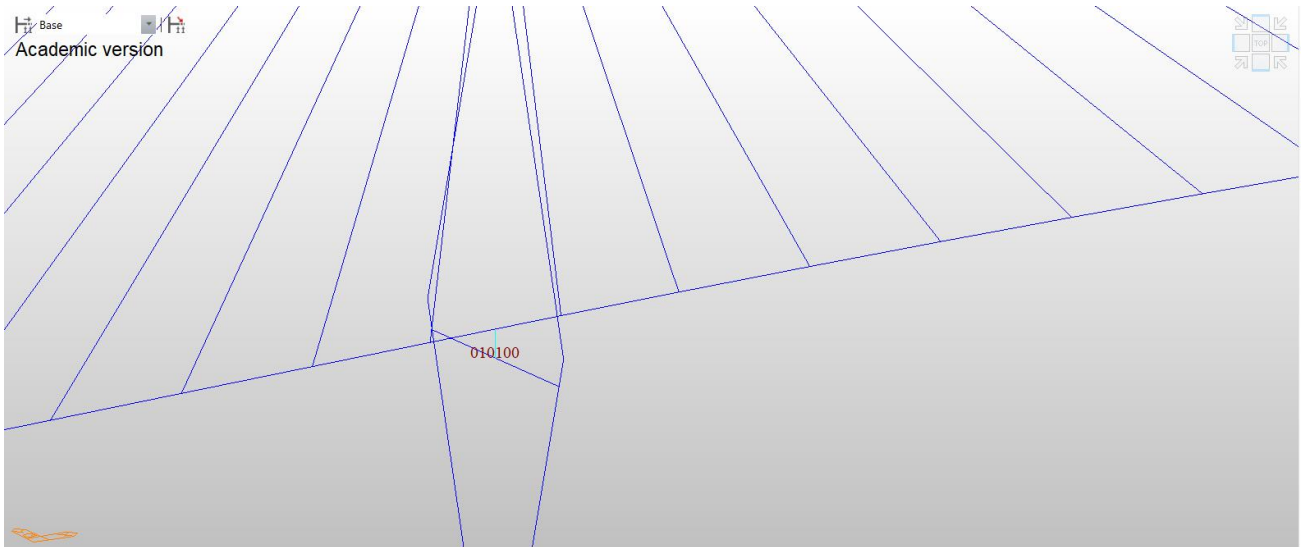


Fig 3.1.4.2.1 Rigid link tablero con vigas pilonos

3.1.4.3 Pilonos con exterior y estribos

A pie de pilono se ha considerado un empotramiento, al igual que en el estribo, justo donde se encuentra el elastic link que une con la cara inferior del tablero.

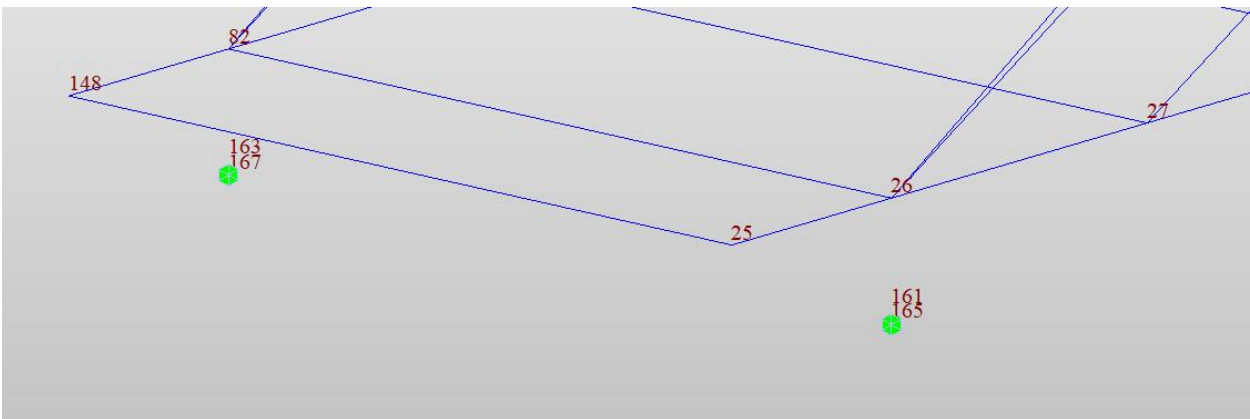


Fig 3.1.4.3.1 Empotramientos apoyos con estribos

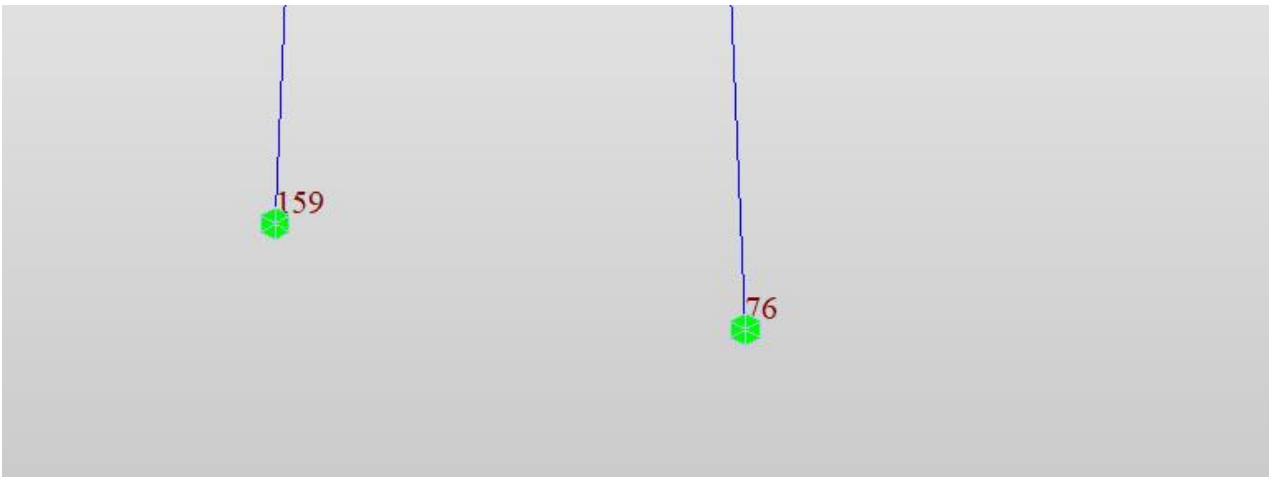


Fig 3.1.4.3.2 Empotramientos estructura con terreno

3.1.5 Sistemas de rigidización longitudinal

Como se ha introducido en el capítulo 2, los sistemas de rigidización longitudinal son la razón de ser de este trabajo, el objetivo que poseen es contrarrestar la flecha vertical que produce la sobrecarga de uso, a través de unas tensiones que experimentarían los cables que componen cada uno.

Es importante mencionar, que estos deben poseer una pretensión previa, pues algunos van a estar sometidos a una determinada compresión cuando actúe la sobrecarga. Como ya se sabe, los cables son elementos estructurales que no poseen rigidez ni a flexión, ni a compresión, solo trabajan a tracción, es por eso, que para cuando actúe una tensión negativa, debe existir una positiva previa que mantenga al cable traccionado, de lo contrario, el cable en cuestión no trabajaría, por lo que no tendría sentido incorporarlo en el sistema.

3.1.5.1 Sistema de rigidización longitudinal 1

Se trata del sistema de rigidización que une las cabezas de los pilonos y se dirigen al punto donde el tablero se apoya con el estribo. Es importante tener claro que a pesar de que los cables se unan con el tablero en este punto, las condiciones de contorno de cada modelización se mantienen:

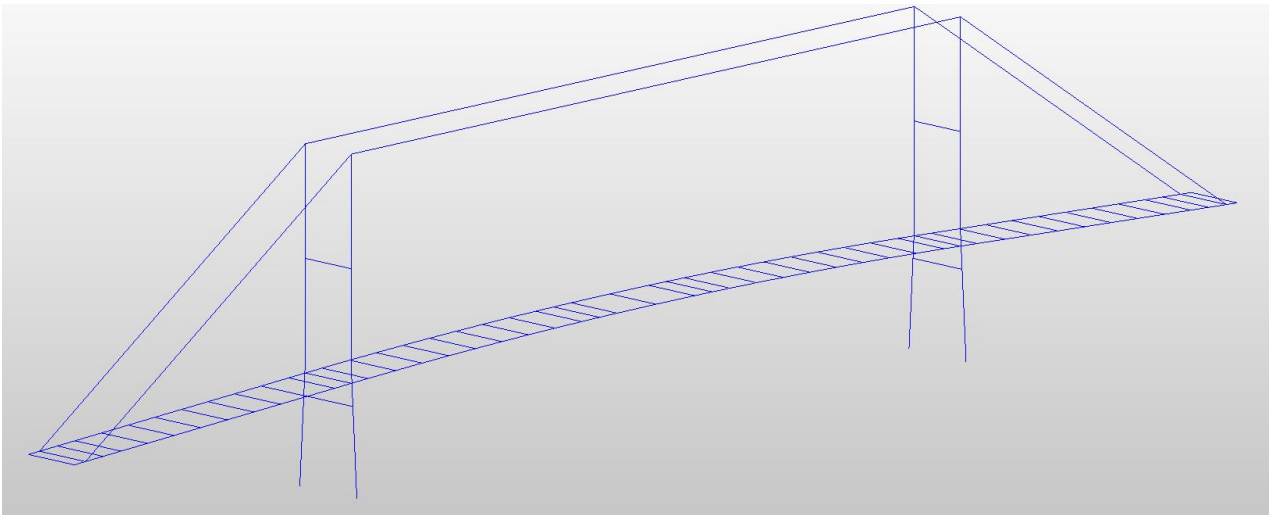


Fig 3.1.5.1.1 Geometría sistema de rigidización longitudinal 1 en estructuras atirantadas según 2 planos

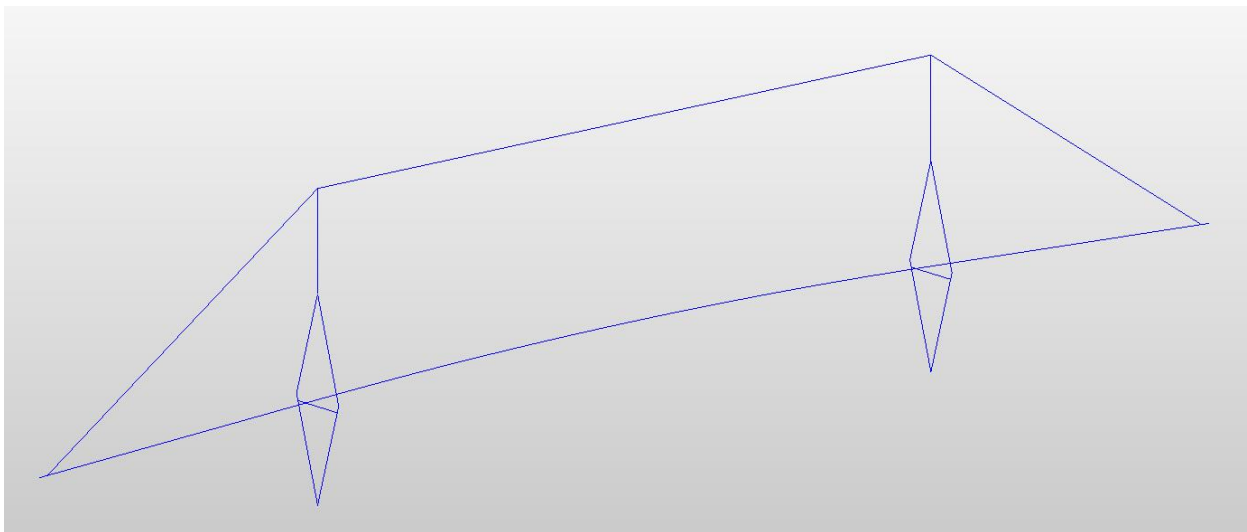


Fig 3.1.5.1.2 Geometría sistema de rigidización longitudinal 1 en estructuras atirantadas según un solo plano central

3.1.5.2 Sistema de rigidización longitudinal 2

La implementación de esta metodología solo se ha estudiado en los puentes atirantados según dos planos laterales verticales. En ella, los cables se unen desde cabeza de pilono a pie de pilono siguiente, y a superficie de tablero donde se encuentra el apoyo establecido entre tablero y estribo.

Existe una peculiaridad geométrica en esta tipología, y es que con objetivo de encajar los cables en el pie de pilono, se han llevado los cables al tablero, a una distancia de 30cm (1 en la figura 3.1.5.2.1) con respecto los límites laterales del mismo en un pilono, y en el otro pilono, a una distancia de 60cm (2 en la figura 3.1.5.2.1):

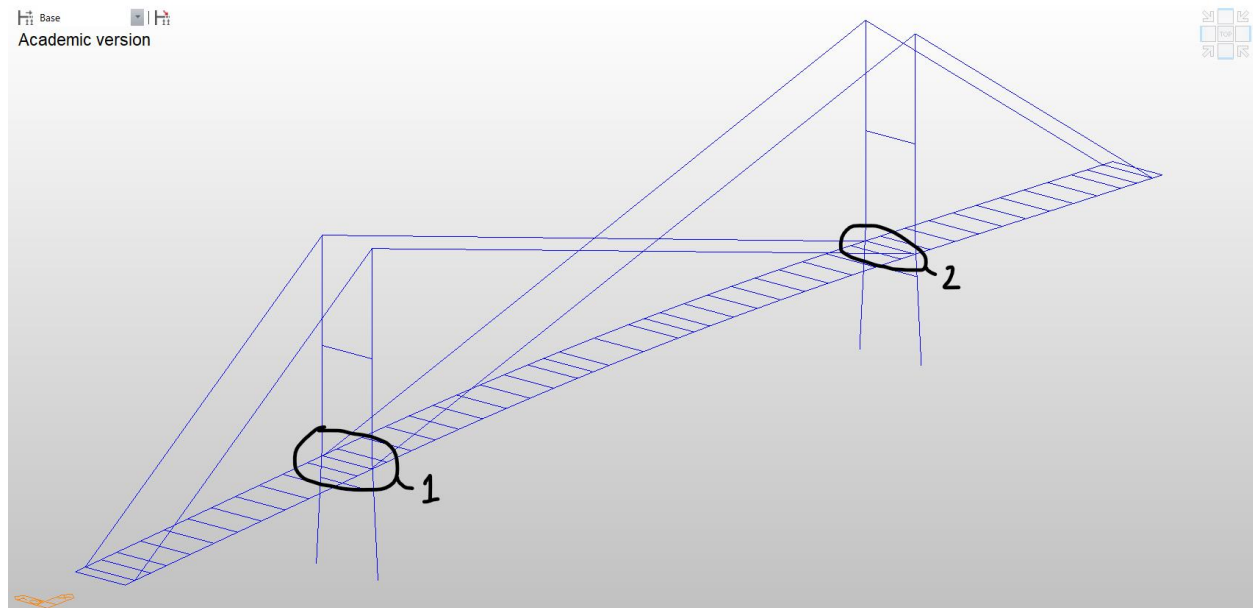


Fig 3.1.5.2.1 Geometría sistema de rigidización longitudinal 2 en estructuras atirantadas según 2 planos

3.2 Modelización de cargas

Los puentes son estructuras que se encuentran sometidas a una gran cantidad de excitaciones, un estudio avanzado debería atender no solo a cargas estáticas como pudieran ser la acción del peso muerto estructural, sino además, a acciones dinámicas, las cuales son de vital consideración.

En mi caso, de forma previa a los análisis en MIDAS, solo he tenido en mente las siguientes cargas estáticas:

- Peso muerto estructural
- Acción de barreras y pavimento
- Pretensión de los cables del sistema de atirantamiento
- Sobrecarga de uso según la IAP-11 [2] (correspondiente al tráfico)

De estos escenarios de carga, de cara a justificar la implementación de los sistemas rigidizadores, basta con considerar la sobrecarga de uso. La justificación la podemos encontrar en el principio de SUPERPOSICIÓN: se ha razonado que las cargas muertas (peso muerto estructural y acción de barreras y pavimento) van a ser contrarrestadas con la pretensión de los cables del sistema de atirantamiento, y que por lo tanto, la sobrecarga de uso será equilibrada por el sistema de rigidización longitudinal.

Es conocido que los puentes atirantados son estructuras que poseen un comportamiento óptimo bajo la acción de las cargas muertas, pues los cables con su correspondiente pretensado se encargan de establecer el equilibrio de manera uniforme con las mismas, provocándose deformaciones pequeñas. El problema viene cuando actúan las acciones variables, como pueden ser la sobrecarga de uso, viento, etc. ya que se tratan de acciones que no son equilibradas por los cables, sino por el tablero, es por esto que los tableros deben poseer inercias que a veces, son considerablemente grandes. El objetivo que tiene estudiar los sistemas de rigidización longitudinal, es ver si pueden contribuir al tablero para soportar estas acciones.

En esta memoria, solo se han reflejado los procedimientos, resultados y conclusiones correspondientes al problema de la sobrecarga de uso; no obstante, de forma ajena he realizado varias modelizaciones y hallado las cargas de pretensado necesarias en cada puente para contrarrestar la acción de las cargas muertas. Un recurso bibliográfico que utilicé antes de empezar el trabajo fue el TFG de Andrés Mauricio García Chacón [8], donde se estudia la repercusión de distintas tipologías de atirantamiento, y me resultó interesante aprender a modelizar estas estructuras y hallar desplazamientos y cargas de pretensado, correspondientes al problema de acciones muertas.

De aquí en adelante, se detalla cómo la normativa recoge la consideración de la sobrecarga de uso en puentes de carreteras y cómo se ha modelizado la misma en MIDAS Civil.

3.2.1 Sobrecarga de uso según la IAP-11

Siguiendo los pasos de la IAP-11 [2], podemos concluir que la plataforma se divide en una serie de carriles virtuales de igual anchura, en los que se considera la existencia de unas cargas que van disminuyendo de un carril a otro.

ANCHURA DE LA PLATAFORMA (w)	NÚMERO DE CARRILES VIRTUALES (n_l)	ANCHURA DEL CARRIL VIRTUAL (w_l)	ANCHURA DEL ÁREA REMANENTE
$w < 5,4 \text{ m}$	$n_l = 1$	3 m	$w - 3 \text{ m}$
$5,4 \text{ m} \leq w < 6 \text{ m}$	$n_l = 2$	$\frac{w}{2}$	0
$w \geq 6 \text{ m}$	$n_l = \text{ent} \left(\frac{w}{3} \right)$	3 m	$w - 3n_l$

En el caso de que la plataforma esté dividida en dos o más partes separadas por una mediana:

- Si en la mediana se dispone una barrera fija e infranqueable, cada parte de la plataforma (incluidos arcones, marcas viales, etc.) se dividirá de forma independiente en carriles virtuales.

Analizando la plataforma de ambos tableros:

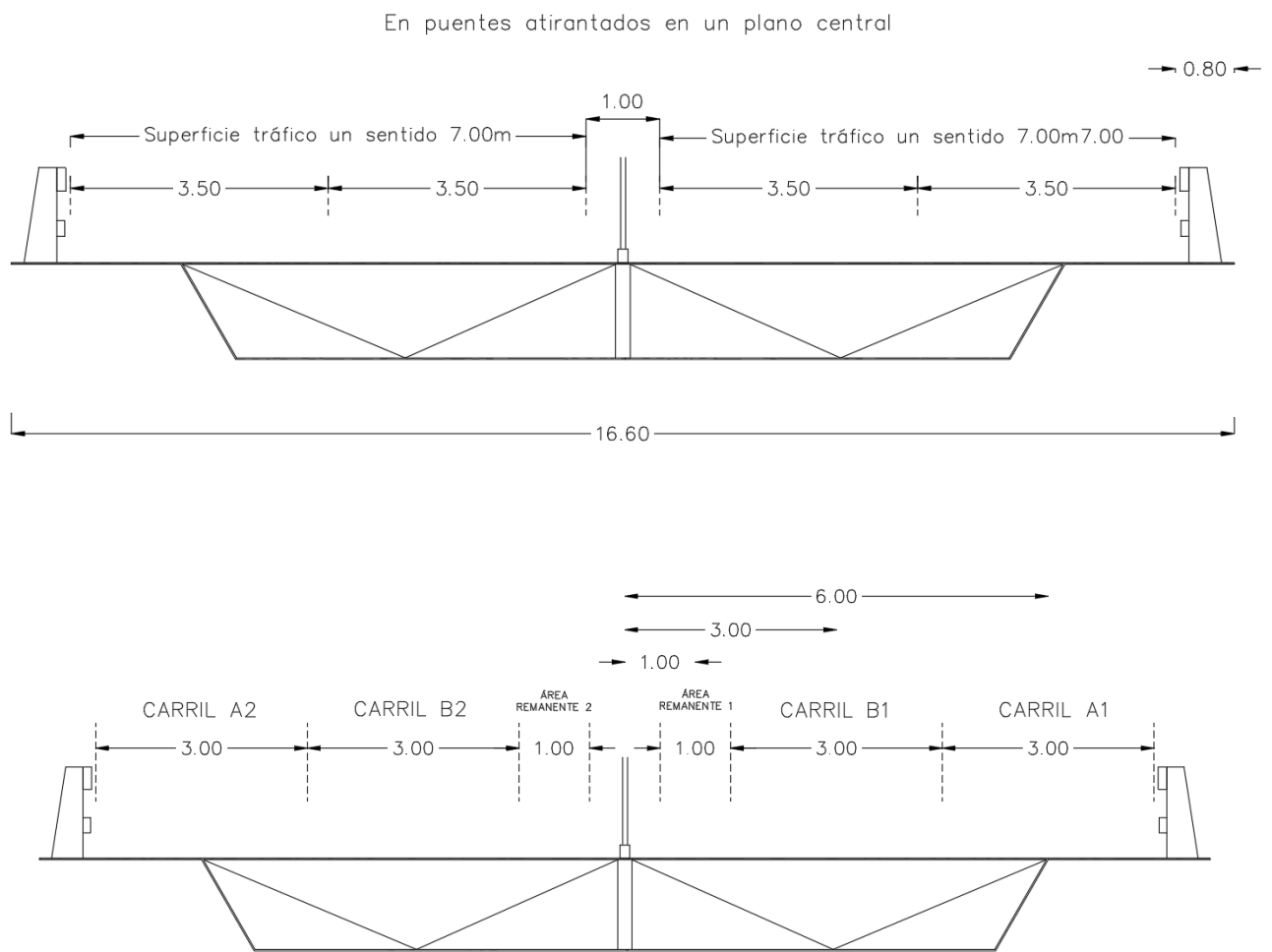


Fig 3.2.1.1 Plataforma y carriles virtuales tablero viga ortótropa

La plataforma de las estructuras atirantadas según un solo plano se ha dividido en 2 como consecuencia de la mediana. Cada parte se ha sido dividida en carriles virtuales tal y como se refleja en el plano superior. Por otro lado, en las estructuras atirantadas según 2 planos laterales verticales se han planteado los carriles unos contiguos a otros.

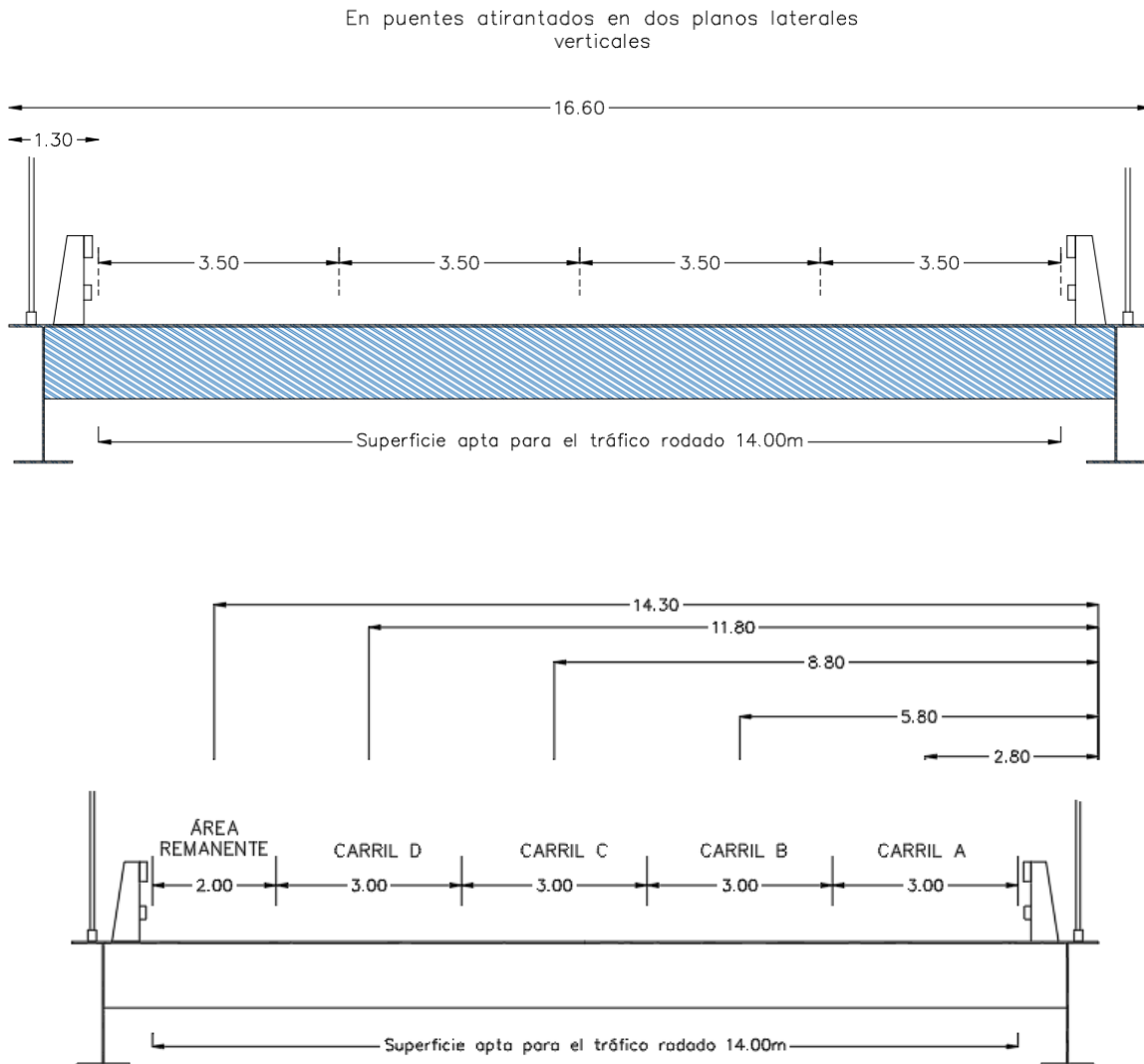


Fig 3.2.1.2 Plataforma y carriles virtuales tablero viga bijnáena

La introducción de la carga de tráfico en MIDAS Civil se realiza de forma sencilla a través de la herramienta *moving loads*, donde para definir los carriles virtuales, basta con especificar el número de ellos, sus anchos y las excentricidades de cada uno (se toma un elemento como referencia, y se le da una excentricidad con respecto a este para colocar el centro del carril virtual). En el caso de las estructuras con 2 planos de atirantamiento laterales, la línea de referencia sobre la que establecer los carriles virtuales la ha definido la viga lateral del tablero, y en el caso de las estructuras atirantadas según un único plano, se ha tomado como referencia la línea central que define el tablero.

Puesto que la sobrecarga de uso va a definir el escenario de Estado Límite de Servicio para el que vamos a analizar las estructuras, vamos a establecer un límite de flecha vertical en centro de vano apto para considerar que la estructura cumple el ELS de deformaciones, este valor se corresponde con lo redactado en el apartado 7.1.1 de la IAP-11, donde se indica que la flecha vertical máxima correspondiente al valor frecuente de la sobrecarga de uso no debe superar un valor de $L/1000$, siendo L la longitud de vano. En nuestro caso, hablamos de que la flecha vertical no debe superar 22cm.

4 RESULTADOS Y COMPARATIVAS

En este capítulo se van a presentar una serie de gráficos en los que se reflejan los resultados extraídos de mayor importancia, además de comparar valores de desplazamientos y tensiones con el objetivo de razonar posteriormente unas conclusiones sobre las distintas geometrías y sistemas de rigidización que estamos tratando. Todos los gráficos se han obtenido en base a los resultados que se pueden encontrar tabulados en el anexo, dado el tamaño de las tablas, he considerado su incorporación aparte para mayor facilidad de lectura.

Los resultados se pueden esquematizar en:

- Para las estructuras sin sistema de rigidización longitudinal:
 - Flecha horizontal en cabeza de pilono y vertical en centro de vano para la sobrecarga de uso
- Para las estructuras con algún sistema de rigidización incorporado:
 - Flecha horizontal en cabeza de pilono y vertical en centro de vano para la sobrecarga de uso.
 - Tensiones máximas y mínimas (tracción y compresión máximas) que se dan en los cables del sistema de atirantamiento en cuestión.

En los gráficos que se muestran a continuación, solo se han representado los valores máximos de flecha vertical en centro de vano y horizontal en cabeza de pilono, según el número de cables por vaina del sistema de rigidización en cuestión, de esta forma, podemos observar la evolución de las deformaciones conforme se aumenta la rigidez del sistema.

De forma más esquemática, el orden que se establece en la representación de gráficos es el siguiente:

- a) Según nº de planos transversales atirantados
 - a. Según tipología de atirantamiento
 - i. Por cada condición de contorno, se han representado las flechas en cada sistema de rigidización.
 1. Estructura APOYADA según sistema rigidizador empleado
 2. Estructura DESLIZANTE según sistema rigidizador empleado
 - ii. Por cada sistema de rigidización, se han representado las flechas en cada condición de contorno.
 1. Sistema de RIGIDIZACIÓN LONGITUDINAL 1 según condición de contorno
 2. Sistema de RIGIDIZACIÓN LONGITUDINAL 2 según condición de contorno

4.1 Estructuras atirantadas según 2 planos laterales verticales

4.1.1 Abanico

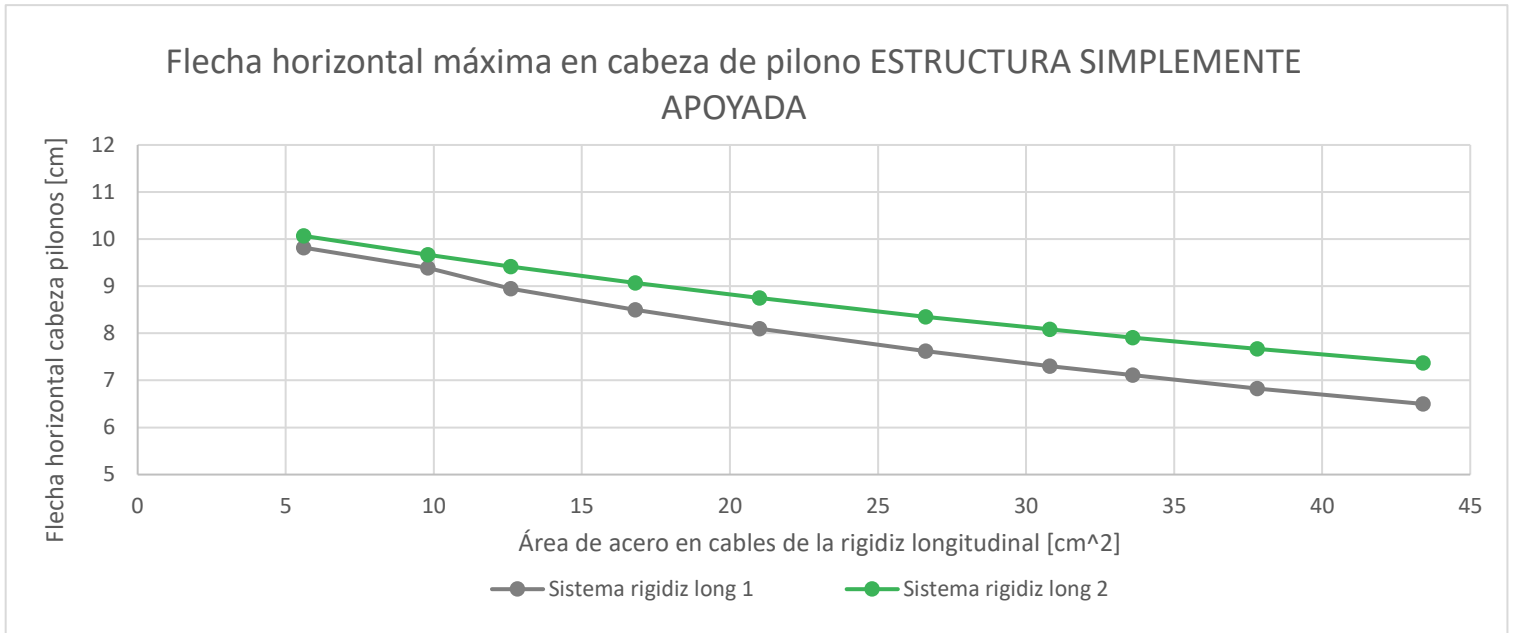


Fig 4.1.1.1. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, abanico, apoyo simple

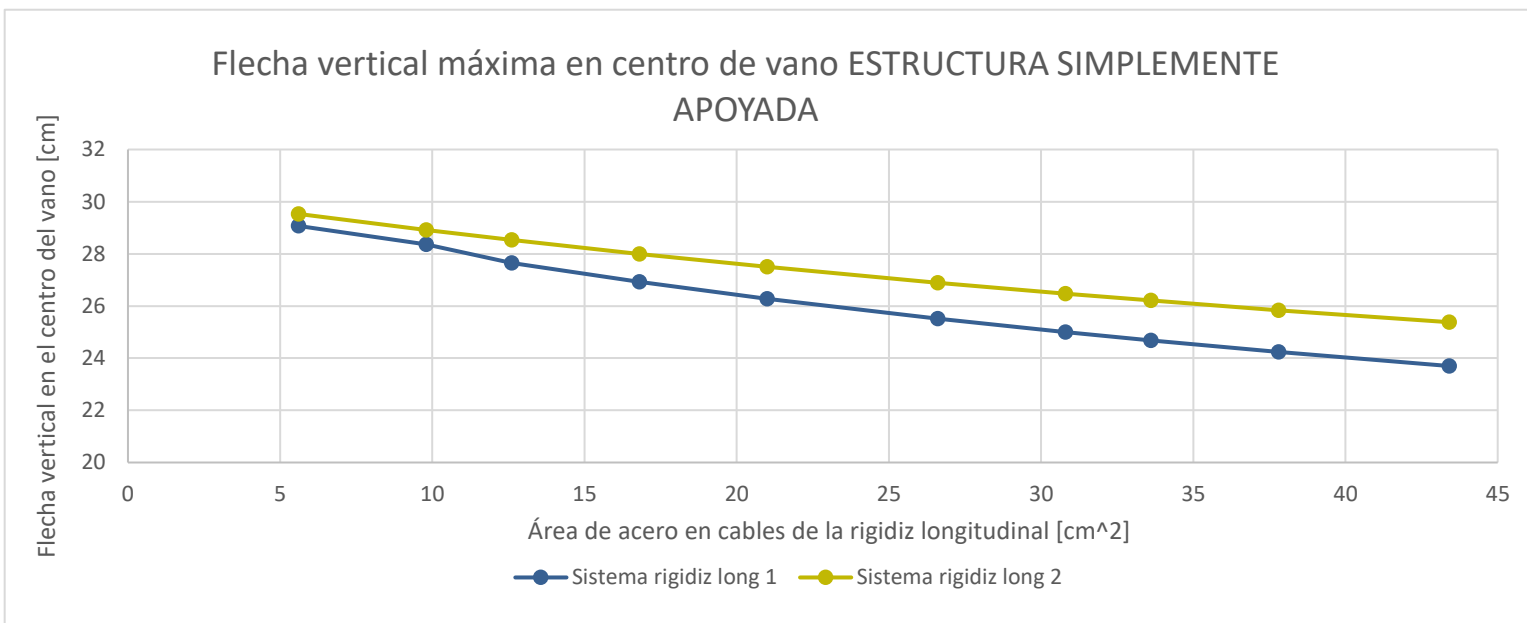


Fig 4.1.1.2. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, abanico, apoyo simple

Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono ESTRUCTURA DESLIZANTE

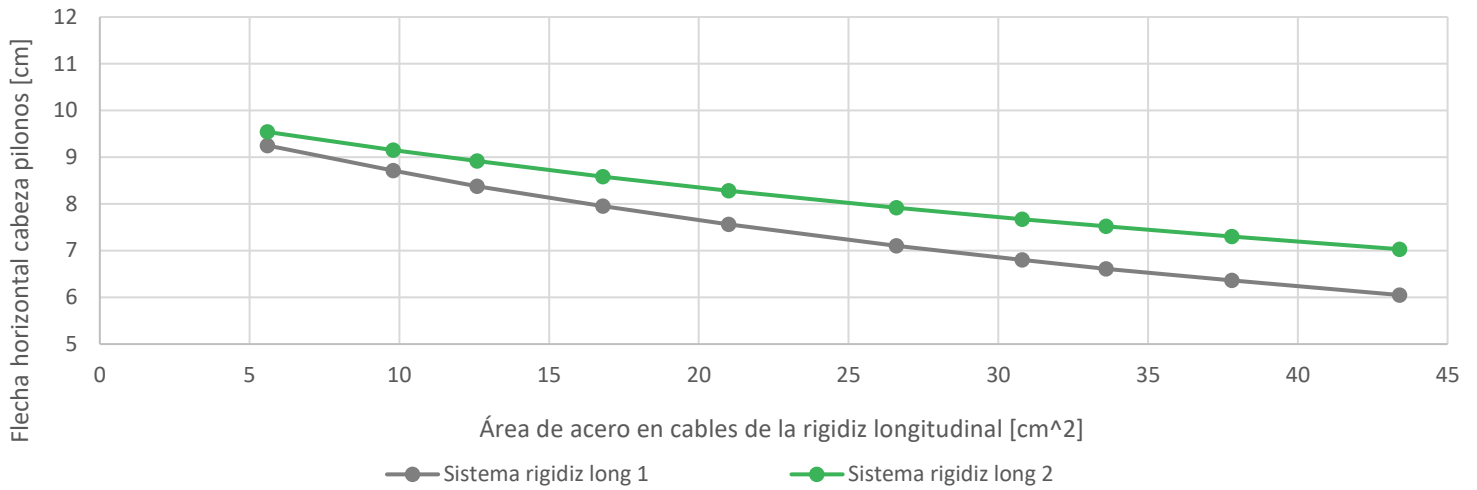


Fig 4.1.1.3. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, abanico, apoyo deslizante

Flecha vertical máxima en centro de vano ESTRUCTURA DESLIZANTE

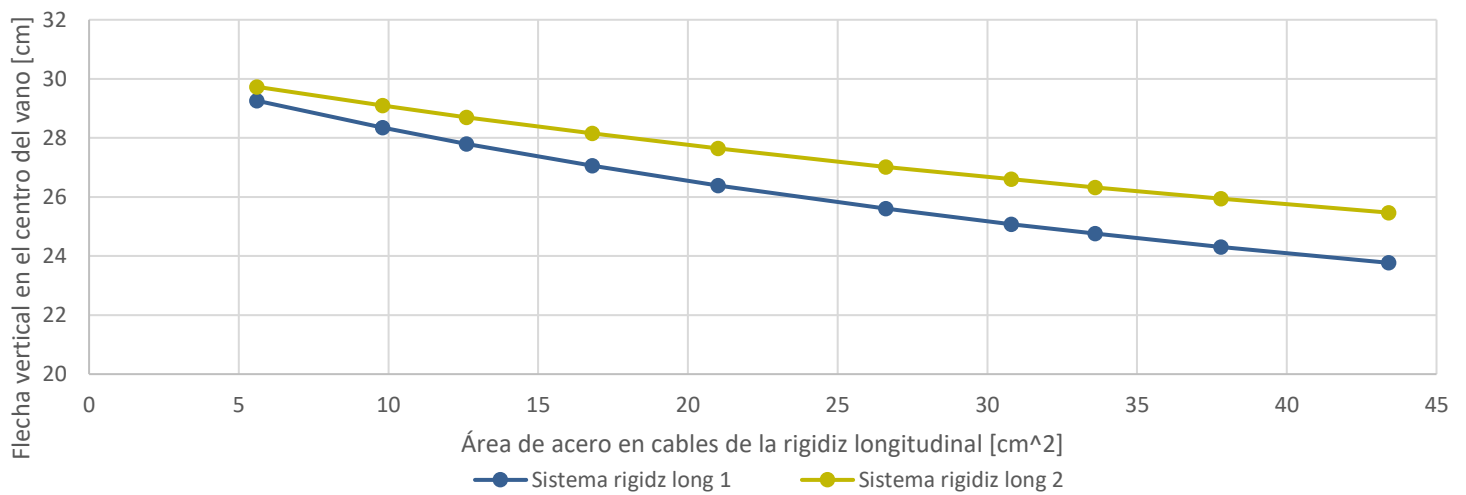


Fig 4.1.1.4. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, abanico, apoyo deslizante

Flecha horizontal máxima en cabeza de pilonos SISTEMA RIGIDIZACIÓN 1

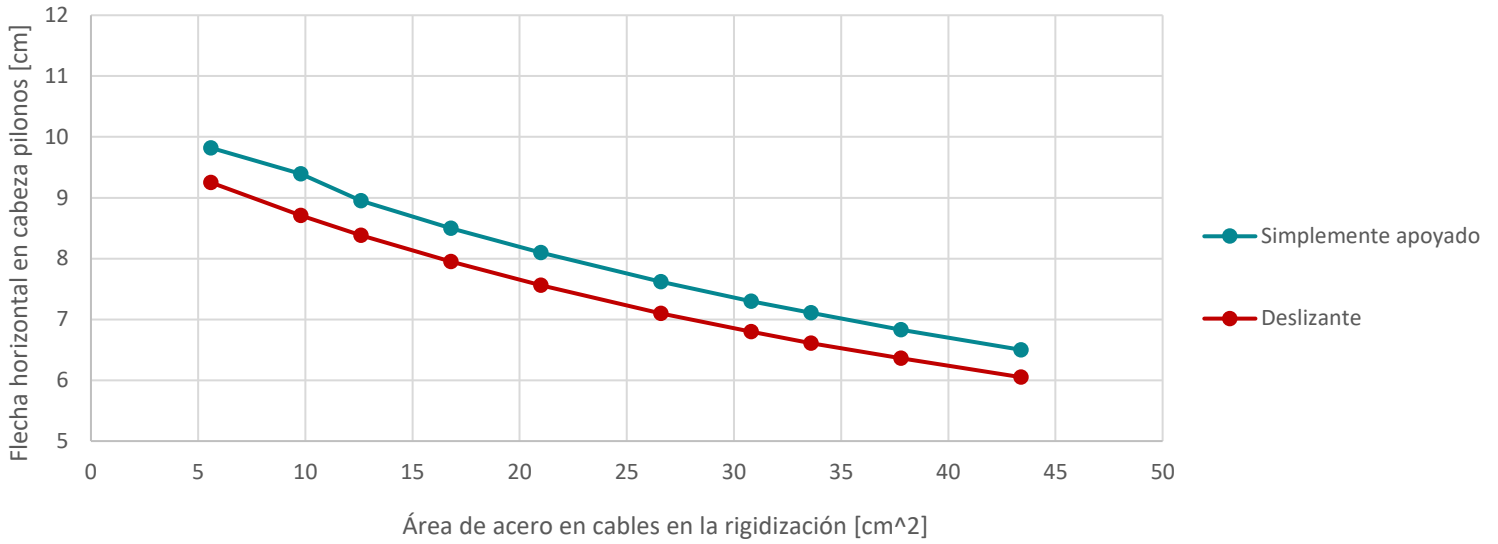


Fig 4.1.1.5. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, abanico, sistema rigidización 1

Flecha vertical máxima en el centro de vano SISTEMA RIGIDIZACIÓN 1

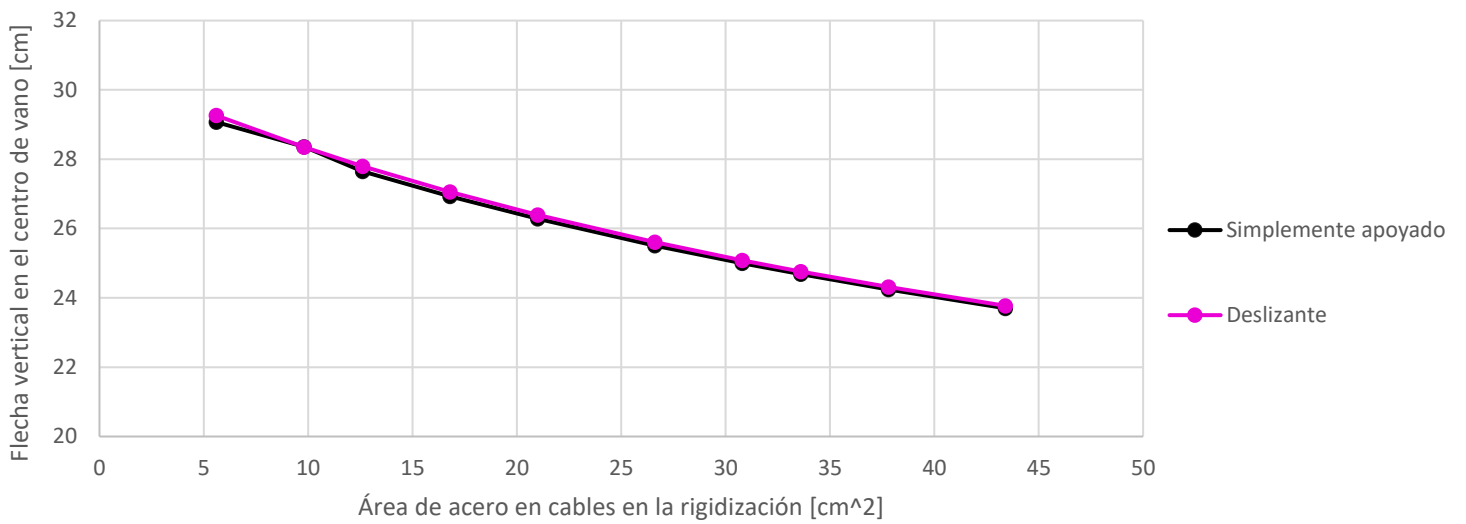


Fig 4.1.1.6. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, abanico, sistema rigidización 1

Flecha horizontal máxima en cabeza de pilonos SISTEMA DE RIGIDIZACIÓN 2

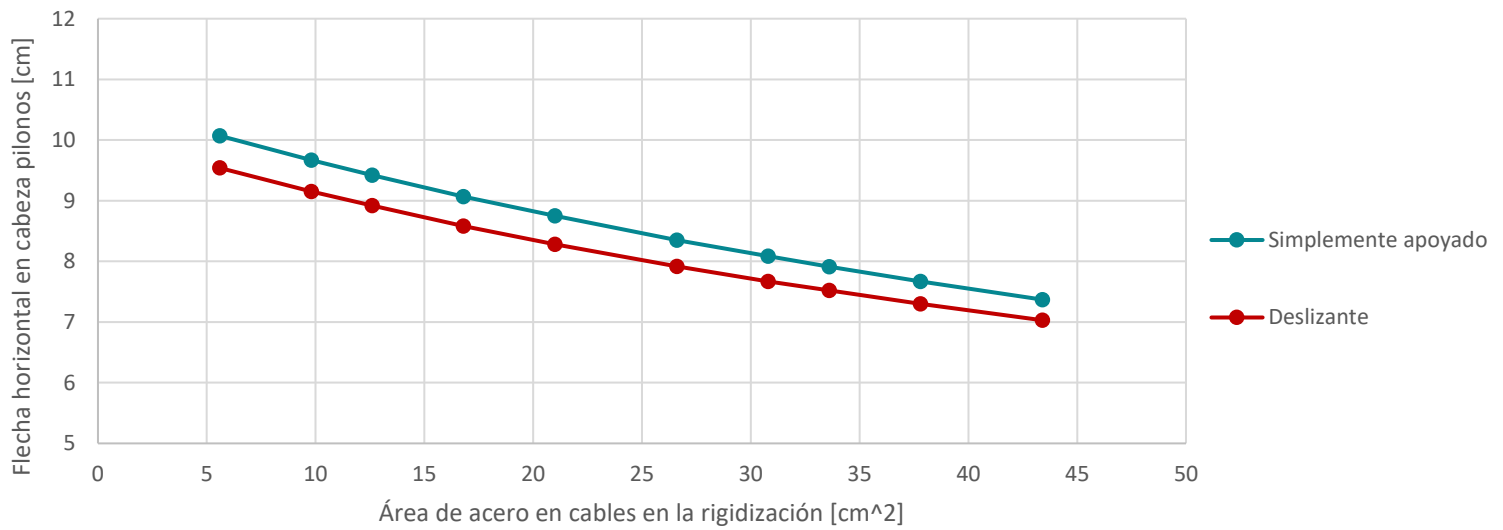


Fig 4.1.1.7. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, abanico, sistema rigidización 2

Flecha vertical máxima en el centro de vano SISTEMA DE RIGIDIZACIÓN 2

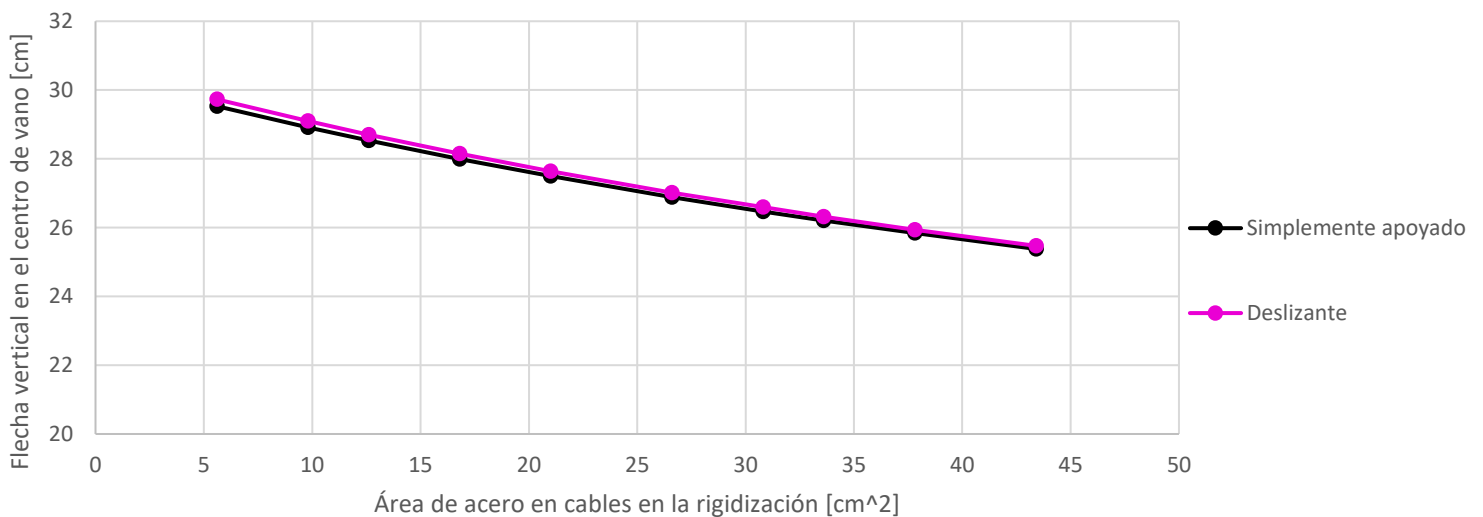


Fig 4.1.1.8. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, abanico, sistema rigidización 2

4.1.2 Arpa

Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono ESTRUCTURA SIMPLEMENTE APOYADA

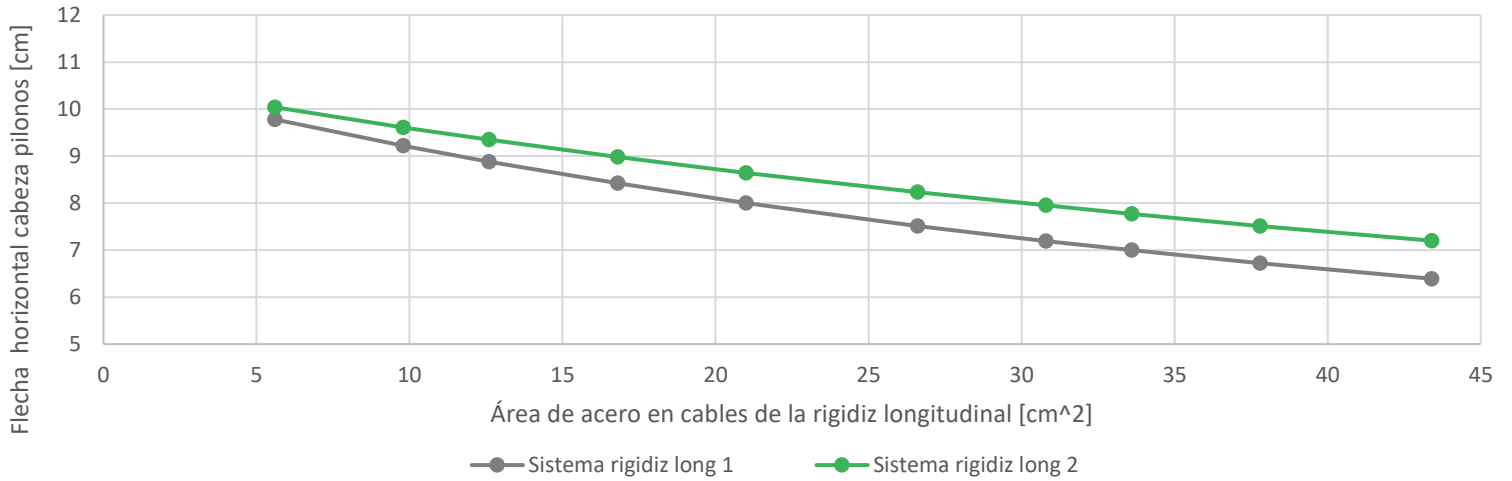


Fig 4.1.2.1. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, arpa, apoyo simple

Flecha vertical máxima en centro de vano ESTRUCTURA SIMPLEMENTE APOYADA

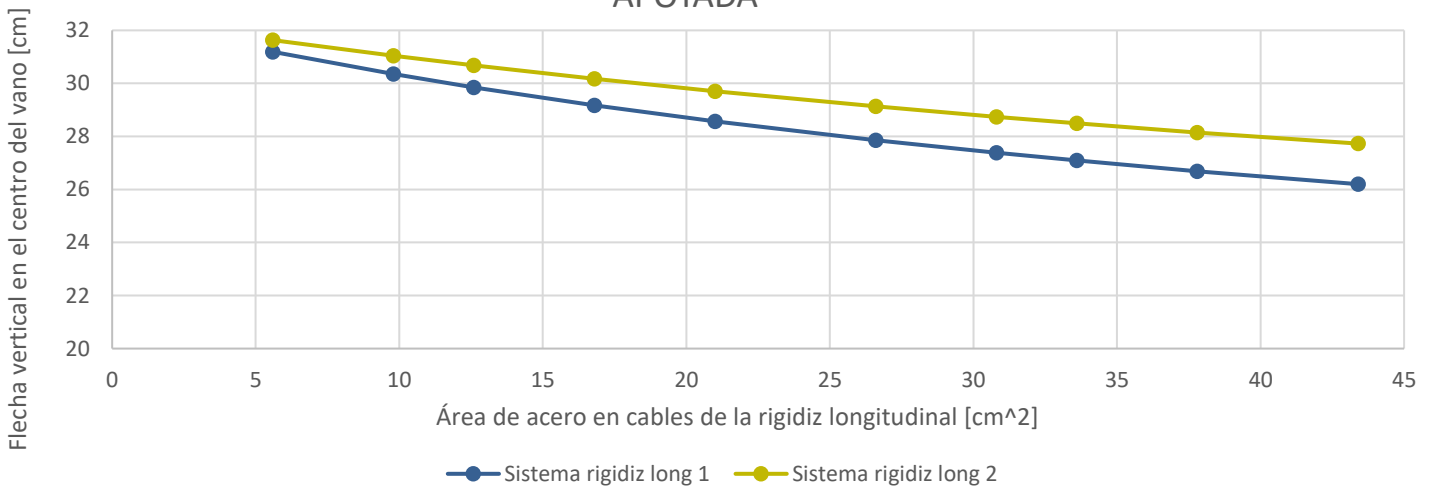


Fig 4.1.2.2. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, arpa, apoyo simple

Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono ESTRUCTURA DESLIZANTE

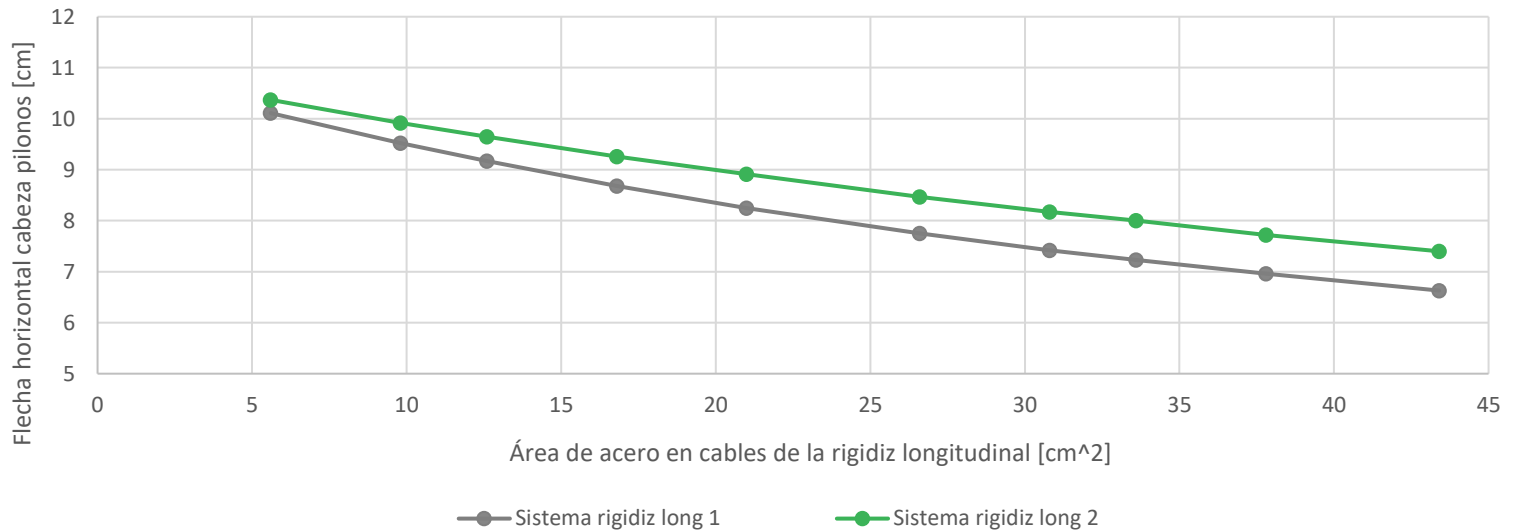


Fig 4.1.2.3. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, arpa, apoyo deslizante

Flecha vertical máxima en centro de vano ESTRUCTURA DESLIZANTE

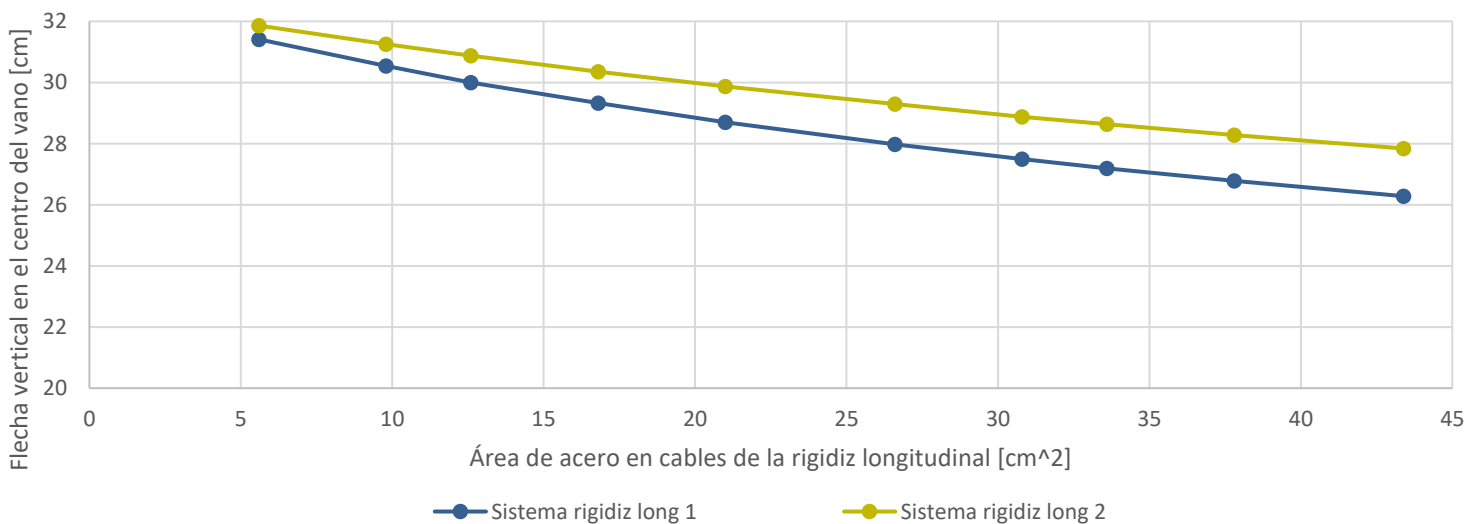


Fig 4.1.2.4. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, arpa, apoyo deslizante

Flecha horizontal máxima en cabeza de pilonos SISTEMA DE RIGIDIZACIÓN 1

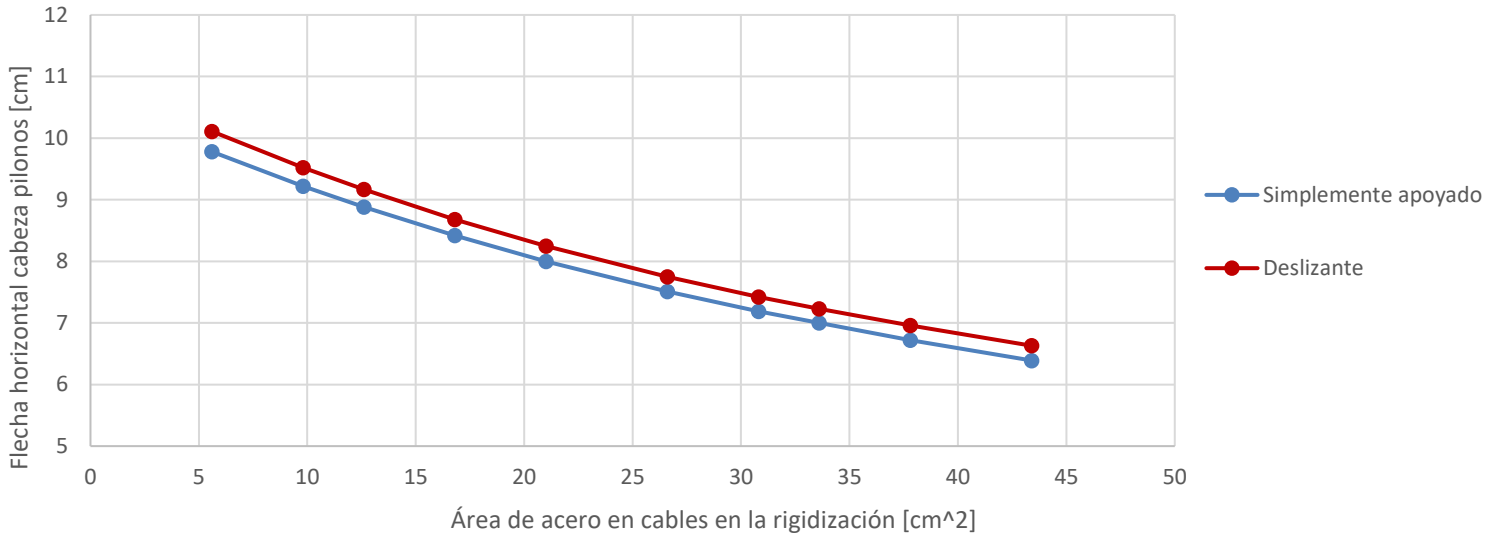


Fig 4.1.2.5. Flecha horizontal máxima en cabeza de pylon, 2 planos laterales, arpa, sistema rigidización 1

Flecha vertical máxima en el centro de vano SISTEMA DE RIGIDIZACIÓN 1

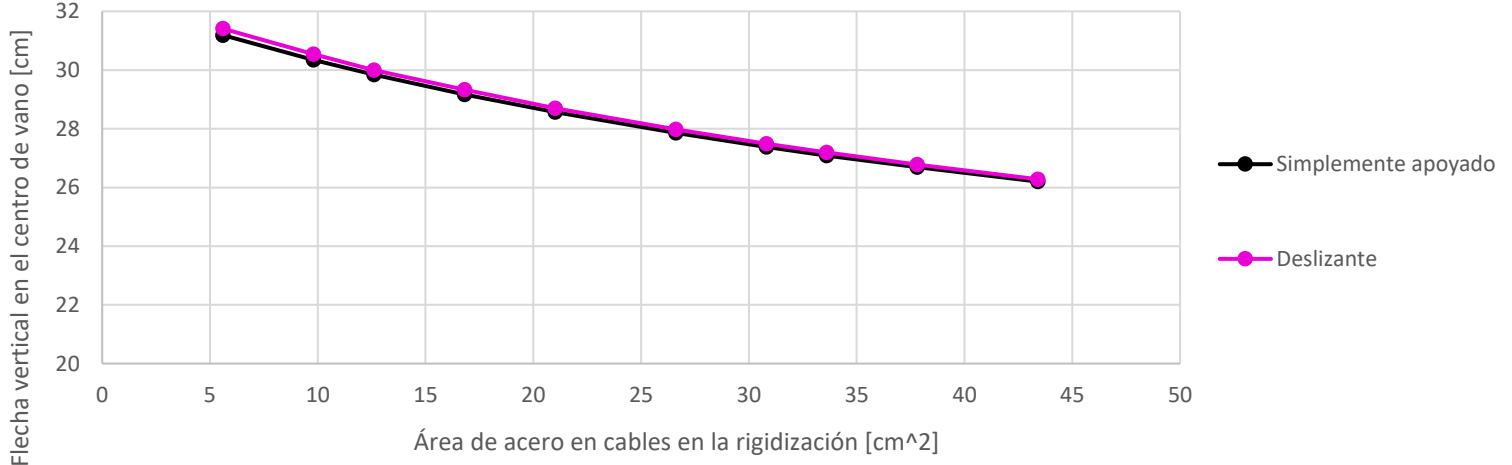


Fig 4.1.2.6. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, arpa, sistema rigidización 1

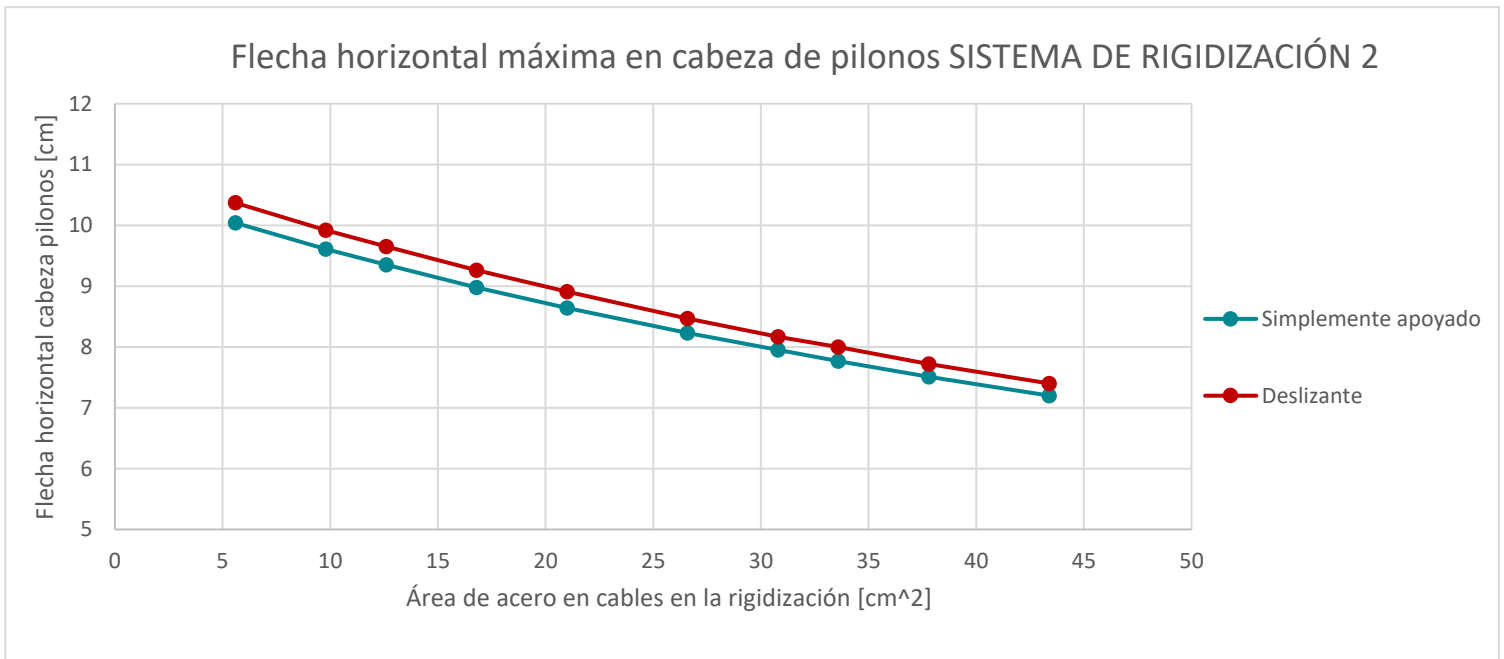


Fig 4.1.2.7. Flecha horizontal máxima en cabeza pilono, 2 planos laterales, arpa, sistema rigidización 2

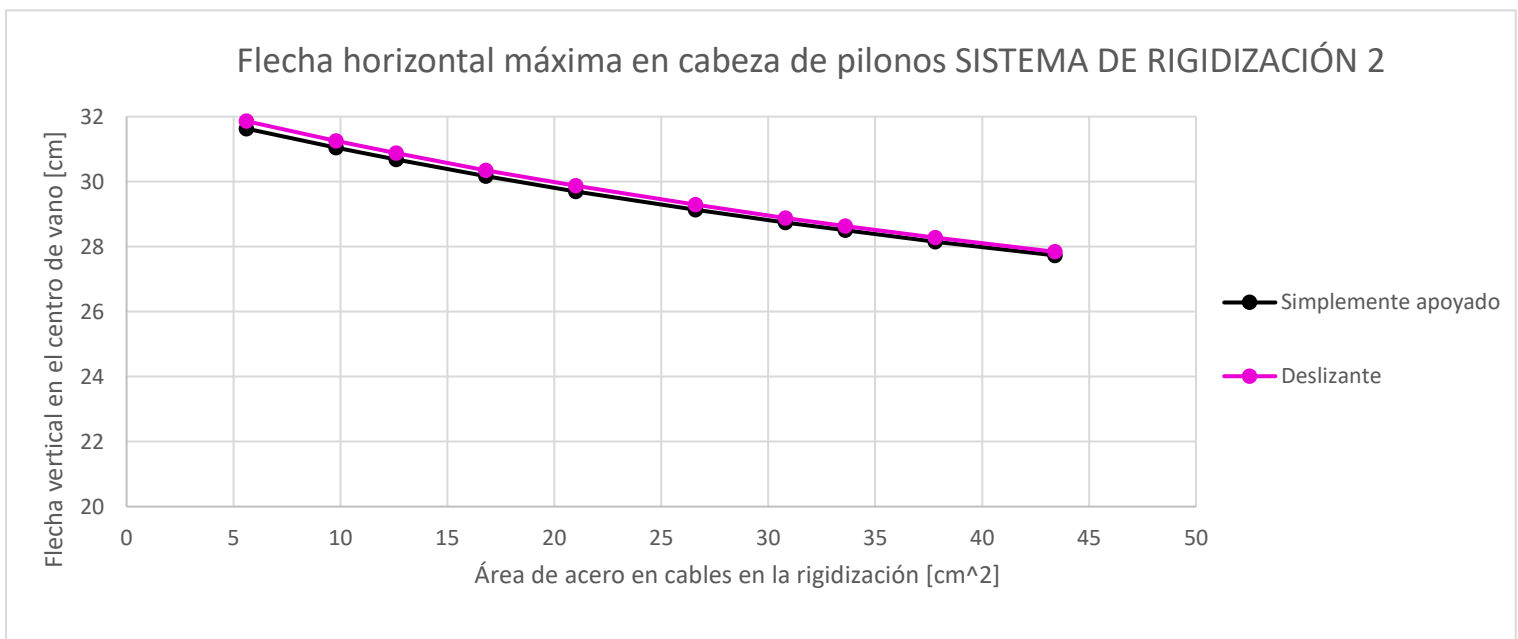


Fig 4.1.2.8. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, arpa, sistema rigidización 2

4.1.3 Mixto

Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono ESTRUCTURA SIMPLEMENTE APOYADA

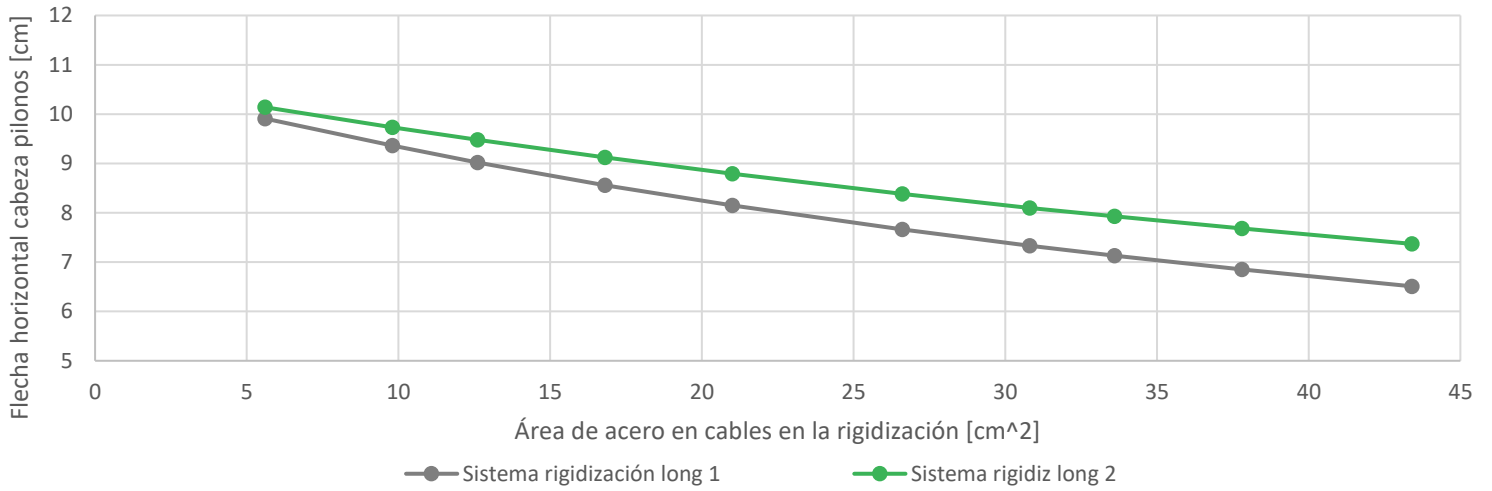


Fig 4.1.3.1. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, mixto, apoyo simple

Flecha vertical máxima en centro de vano ESTRUCTURA SIMPLEMENTE APOYADA

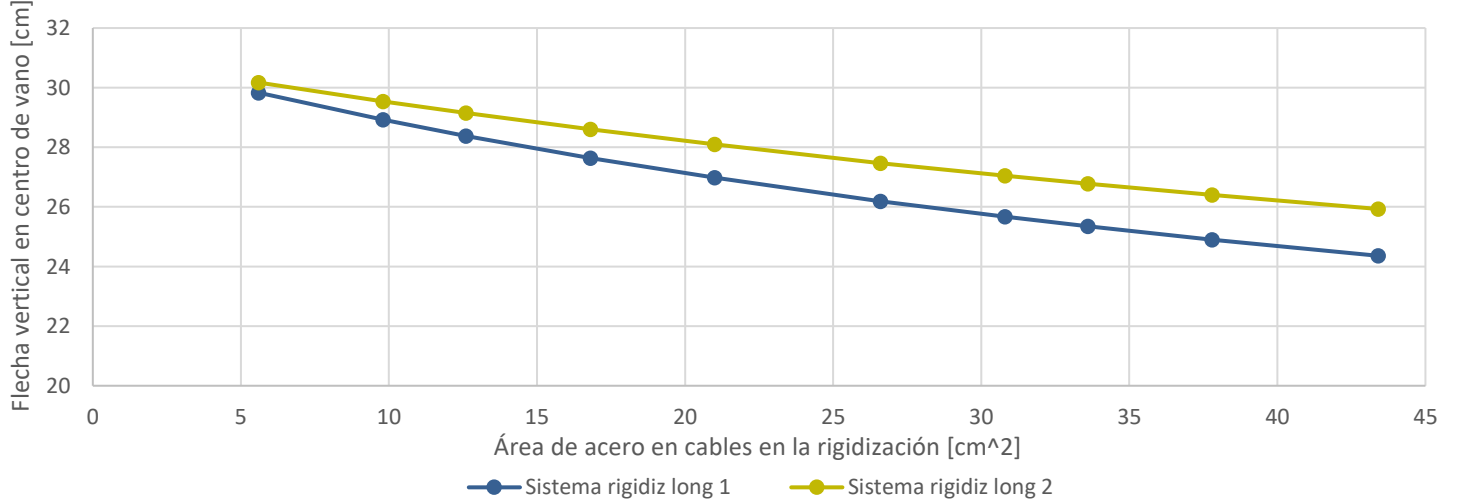


Fig 4.1.3.2. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, mixto, apoyo simple

Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono ESTRUCTURA DESLIZANTE

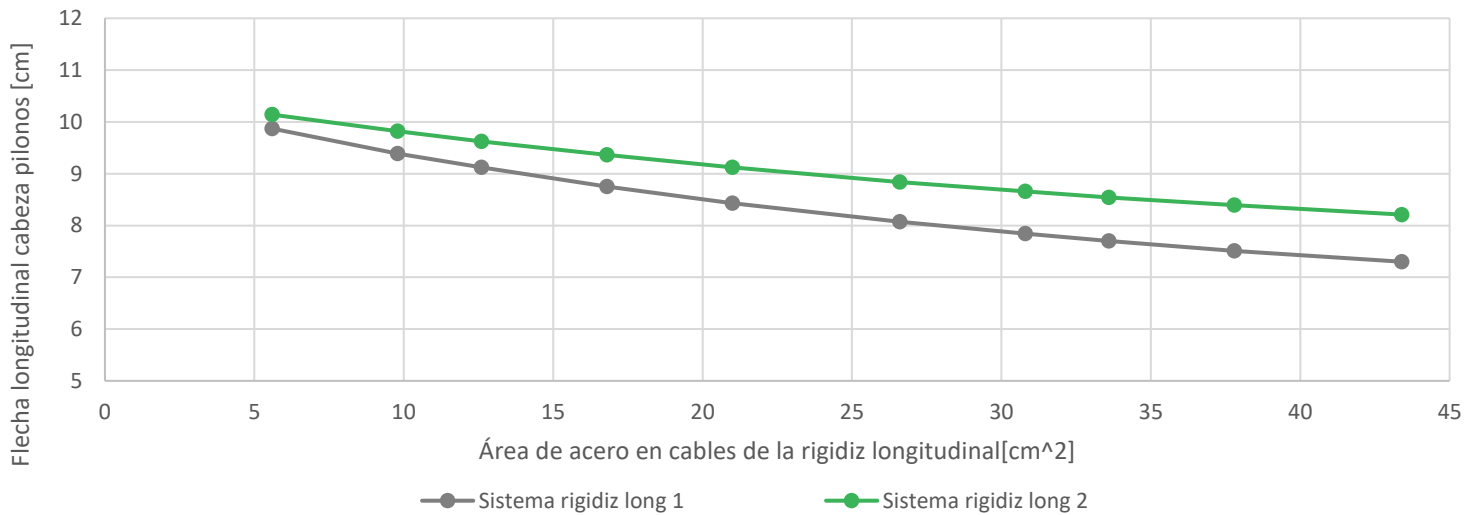


Fig 4.1.3.3. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, mixto, apoyo deslizante

Flecha vertical máxima en centro de vano ESTRUCTURA DESLIZANTE

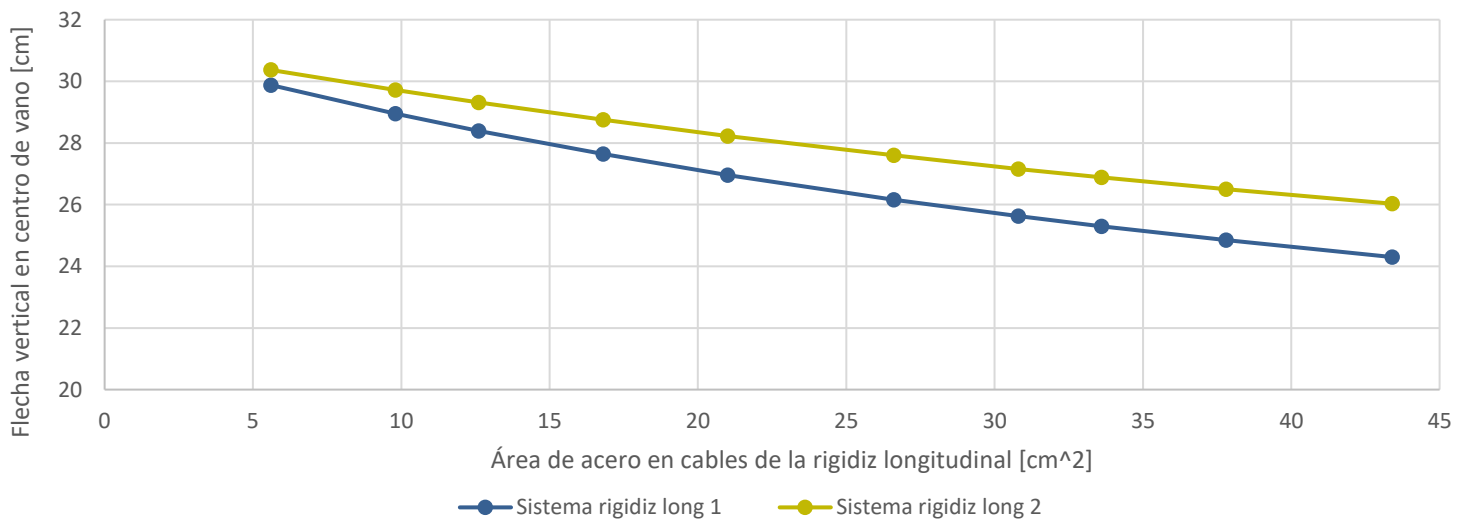


Fig 4.1.3.4. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, mixto, apoyo deslizante

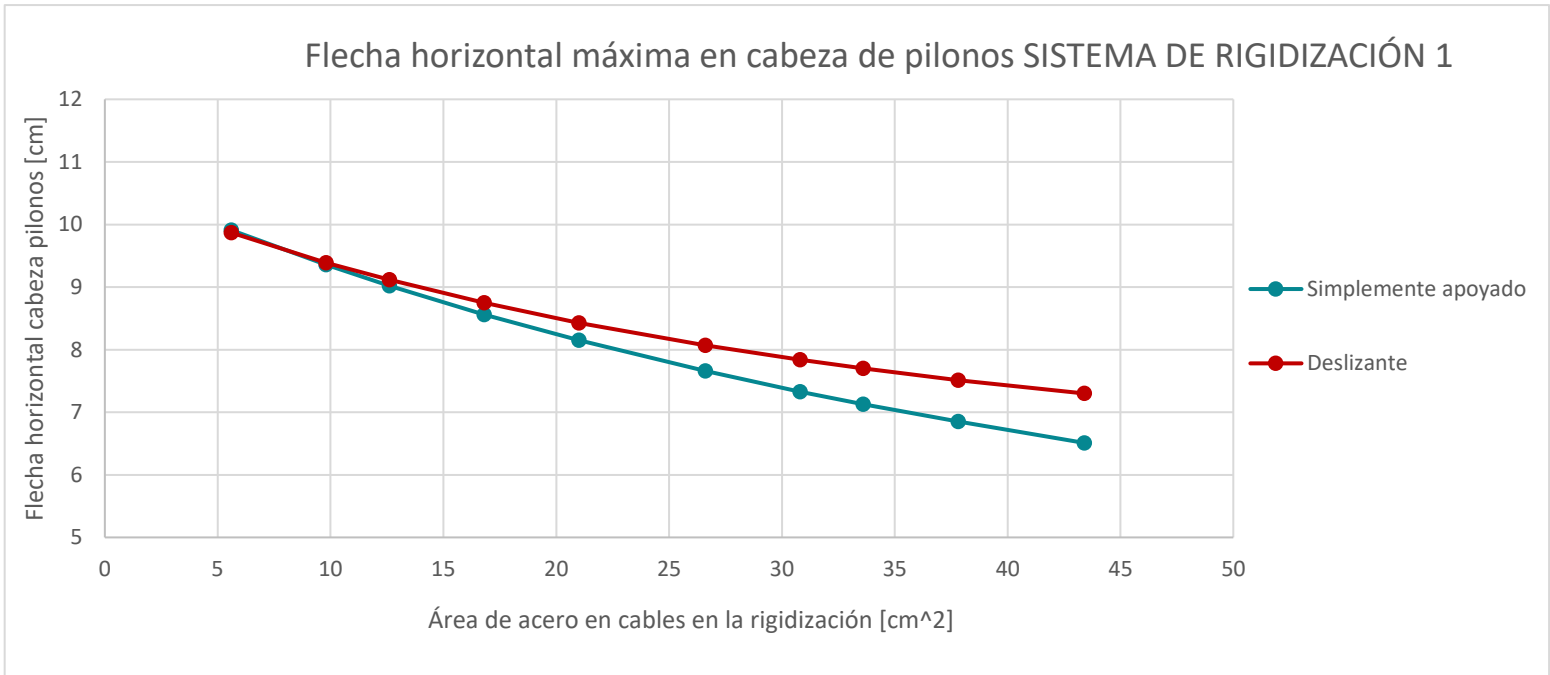


Fig 4.1.3.5. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, mixto, sistema rigidización 1

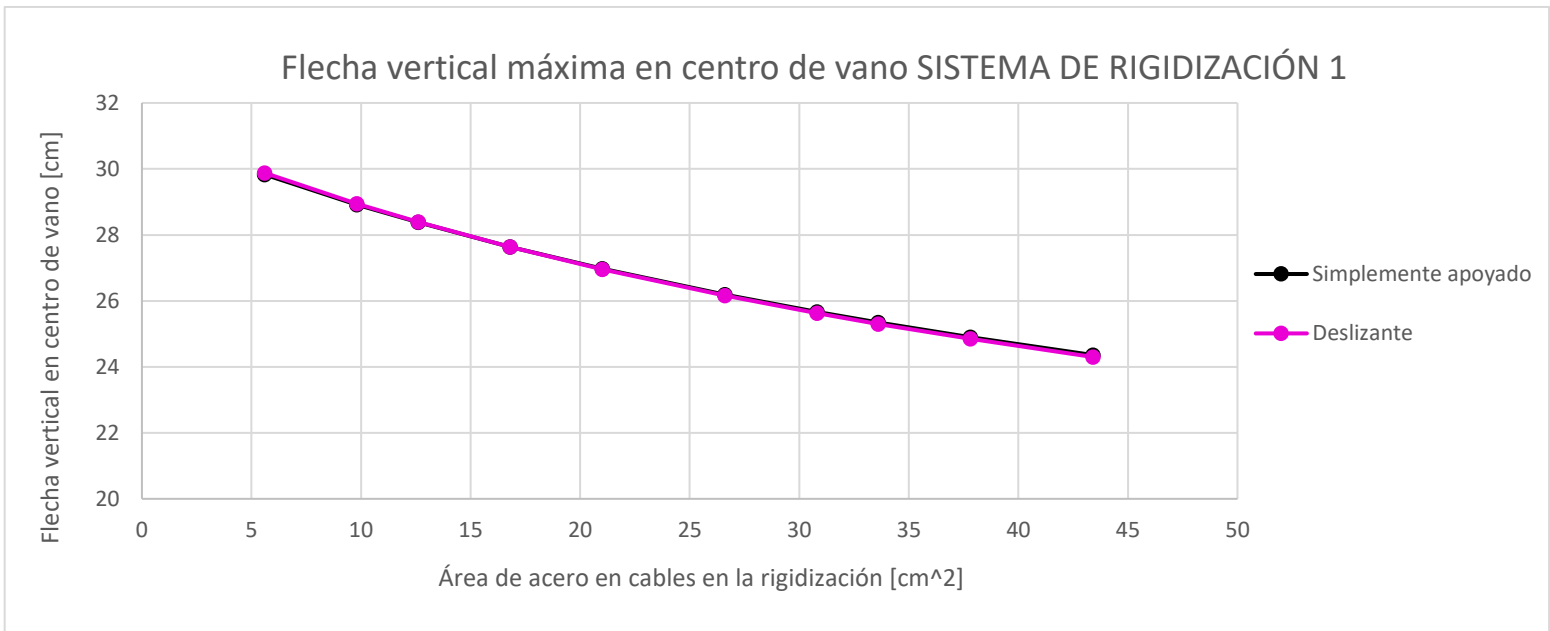


Fig 4.1.3.6. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, mixto, sistema rigidización 1

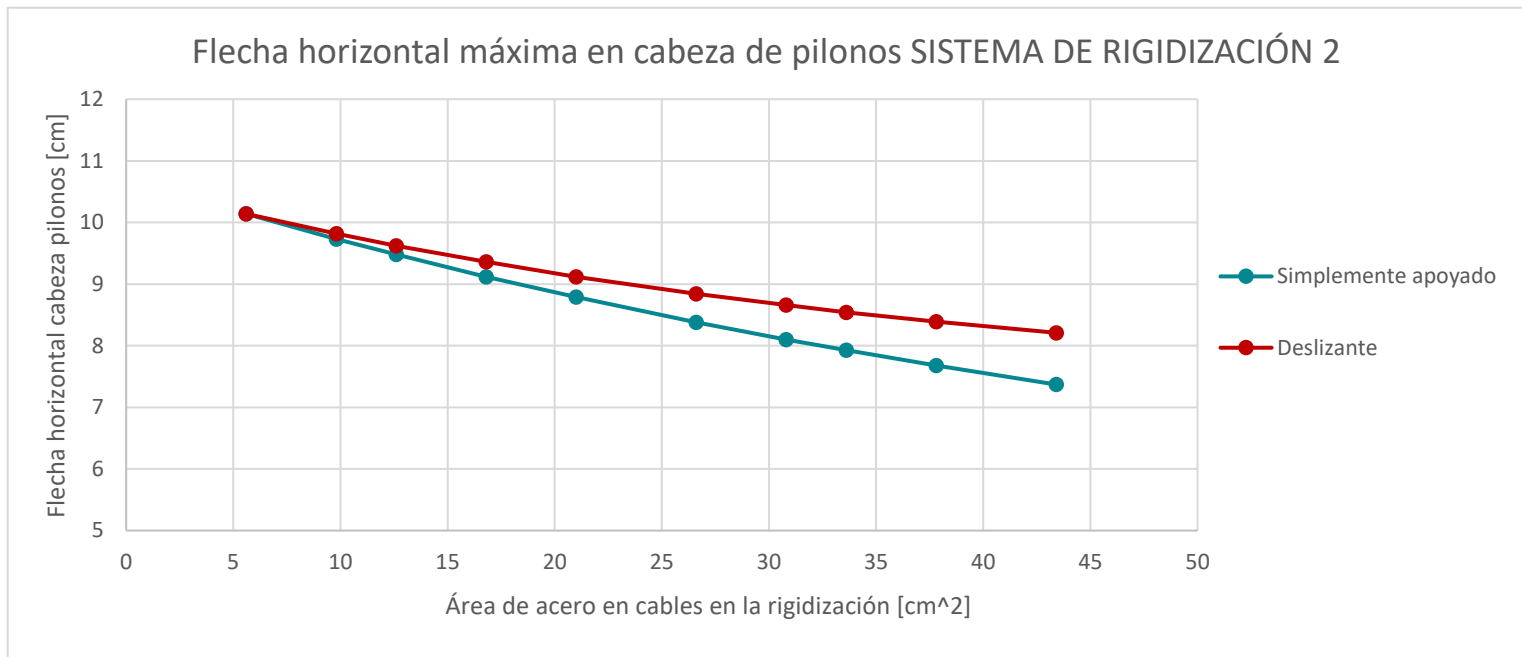


Fig 4.1.3.7. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, 2 planos laterales, mixto, sistema rigidización 2

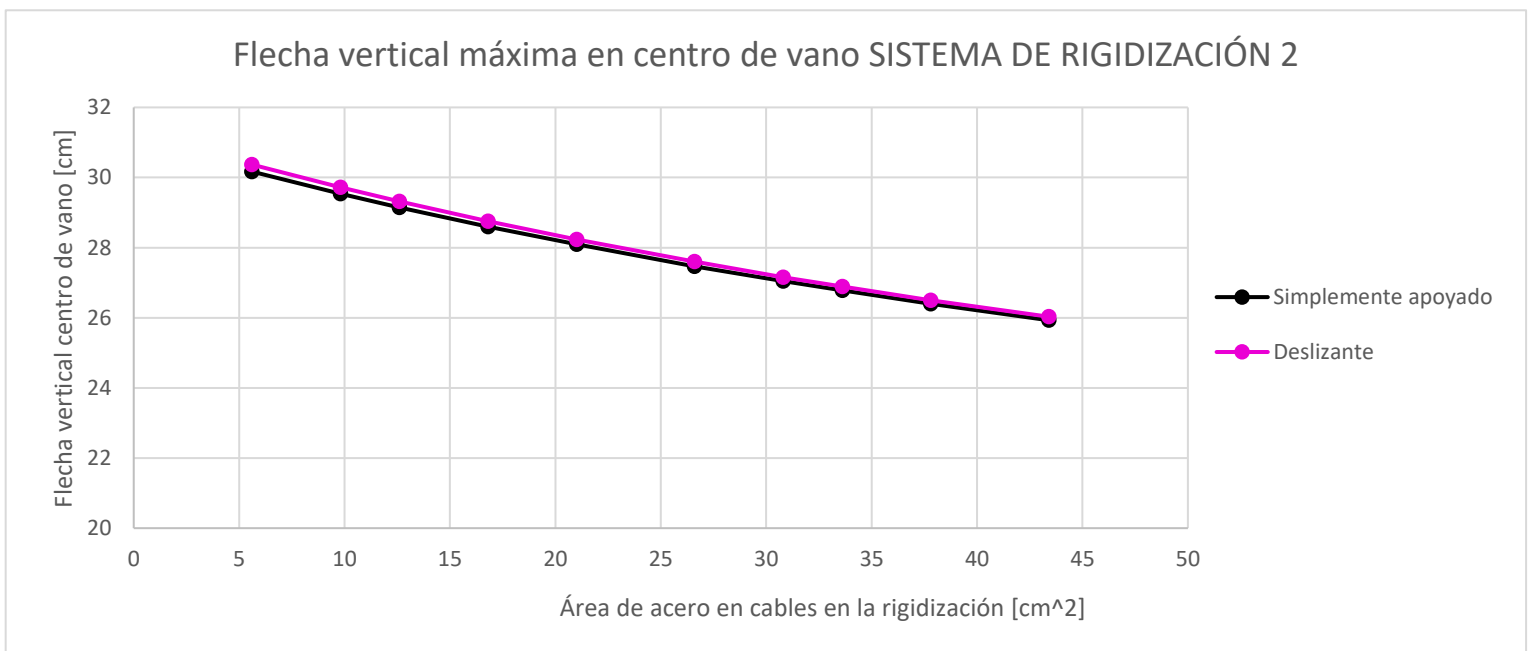


Fig 4.1.3.8. Flecha vertical máxima en centro de vano, 2 planos laterales, mixto, sistema rigidización 2

4.2 Estructuras atirantadas según un solo plano central

4.2.1 Abanico

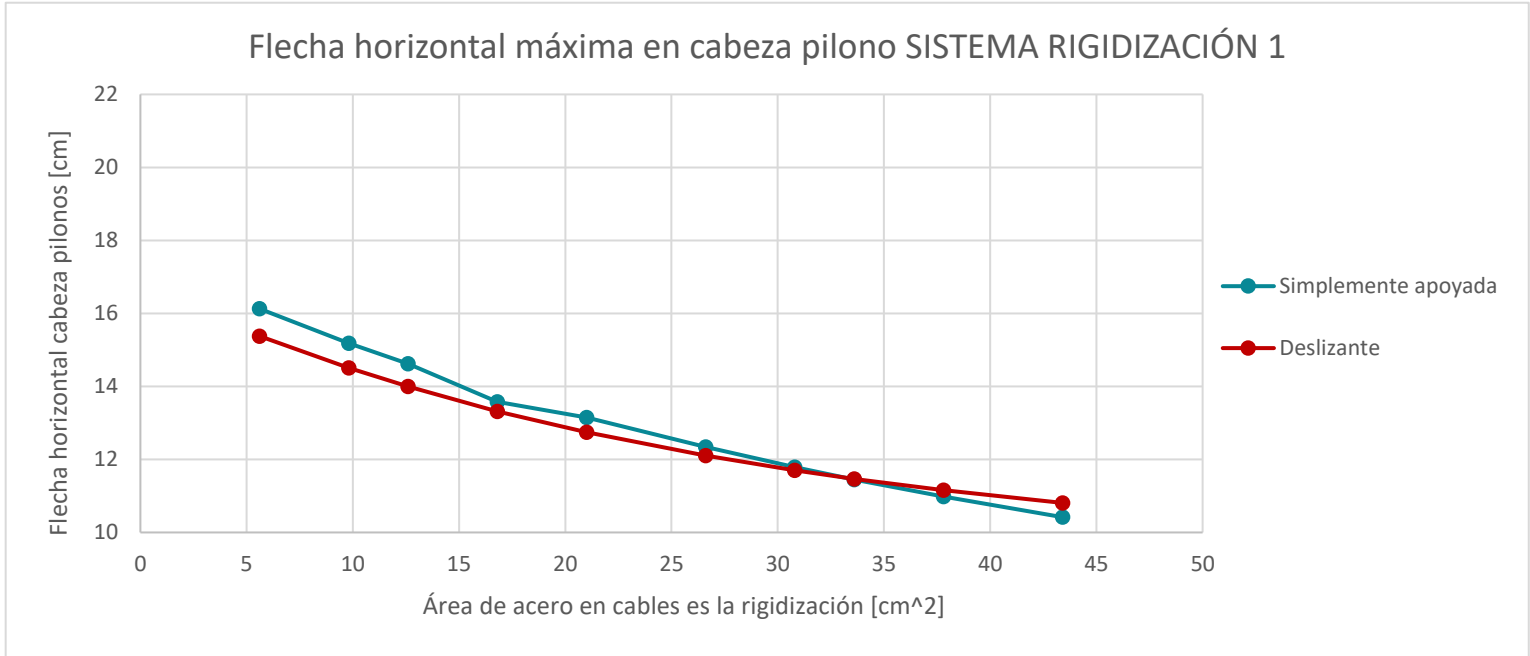


Fig 4.2.1.1. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, un plano central, abanico, sistema rigidización 1

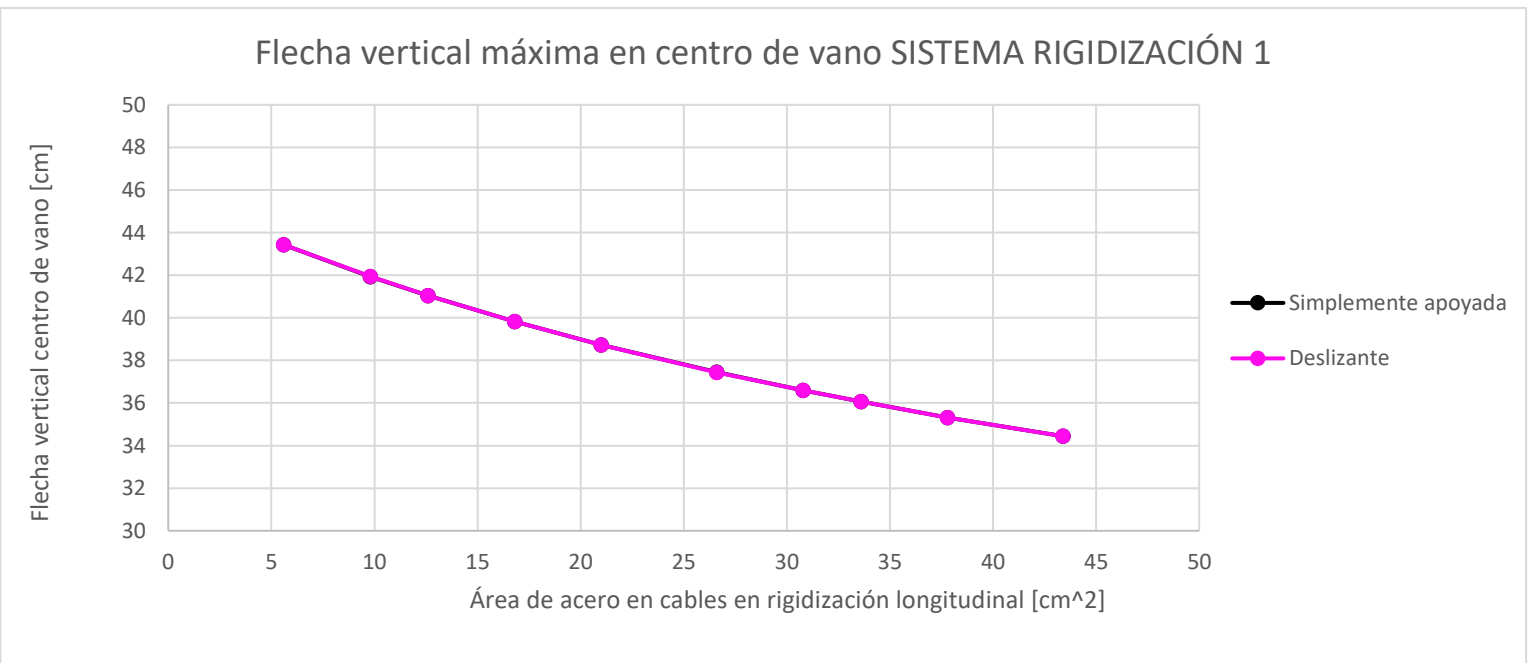


Fig 4.2.1.2. Flecha vertical máxima en centro de vano, un plano central, abanico, sistema rigidización 1

4.2.2 Mixto

Flecha horizontal máxima en cabeza de pilonos SISTEMA RIGIDIZACIÓN 1

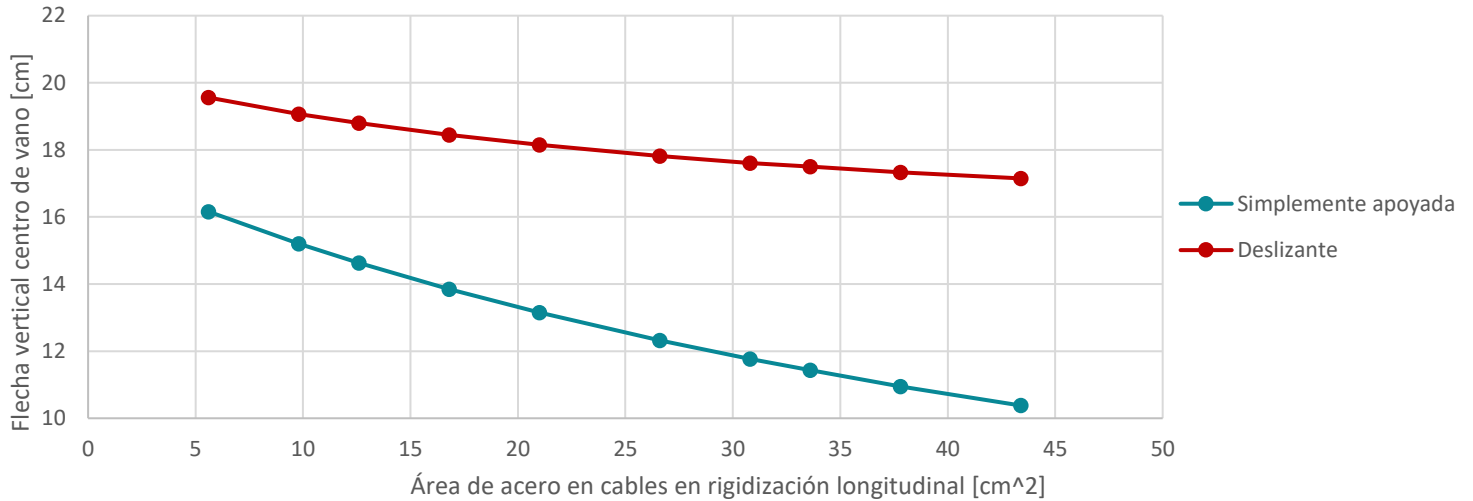


Fig 4.2.2.1. Flecha horizontal máxima en cabeza de pilono, un plano central, mixto, sistema rigidización 1

Flecha vertical máxima en centro de vano SISTEMA RIGIDIZACIÓN 1

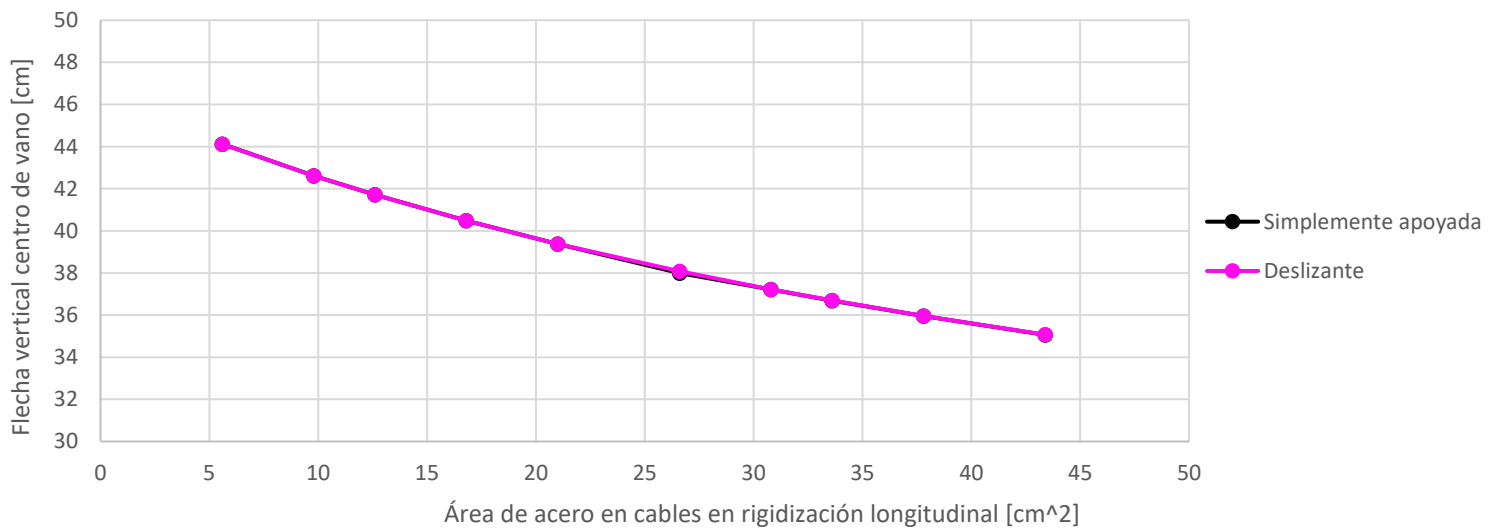


Fig 4.2.2.2. Flecha vertical máxima en centro de vano, un plano central, mixto, sistema rigidización 1

4.3 Punto de partida estructuras sin rigidización

El objetivo de este subapartado es establecer un punto de partida claro, que recoja el comportamiento de las distintas estructuras analizadas antes de incorporar algún sistema de rigidización longitudinal.

Observando los resultados tabulados en los anexos, podemos contemplar los siguientes desplazamientos (cm) para la sobrecarga de uso.

FLECHAS HORIZONTALES EN CABEZA DE PILONO PARA SOBRECARGA DE USO						
	Abanico		Mixto		Arpa	
	Apoyado	Deslizante	Apoyado	Deslizante	Apoyado	Deslizante
2 planos atirantados	10,66	10,11	10,75	10,2	10,67	11,04
1 plano atirantamiento	17,59	16,78	17,64	20,41	-	-

FLECHAS VERTICALES CENTRO DE VANO PARA SOBRECARGA DE USO						
	Abanico		Mixto		Arpa	
	Apoyado	Deslizante	Apoyado	Deslizante	Apoyado	Deslizante
2 planos atirantados	30,45	30,68	31,11	31,34	32,5	32,77
1 plano atirantamiento	45,75	45,76	46,48	46,48	-	-

Tabla 4.3.1 Desplazamientos máximos (cm) para las estructuras sin rigidizar bajo la sobrecarga de uso

Lo primero que podemos observar, es que no existe una gran diferencia entre tener una condición de contorno u otra, puesto que los desplazamientos (tanto horizontales como verticales) son muy próximos; no obstante, los apoyos deslizantes tienen una dificultad extra, y es que al no poseer reacciones horizontales, los ejes de compresión que se transmiten al tablero son elevados, de tal forma que en caso de colocar apoyos deslizantes, sería conveniente un estudio de inestabilidad del tablero (tanto el tablero de viga cajón como el tablero viga cajón). Este detalle va a tenerse en consideración a lo largo de todo este capítulo. En el estudio de D. Ramón Gilsanz [5] se detallan las consecuencias a nivel de esfuerzos que esta condición de contorno posee, y cómo el aumento de compresión, implica mayor cantidad de acero en el tablero, y con ello, mayor costo.

Como sí era de prever, las estructuras atirantadas según un único plano poseen unas flechas muy superiores a las atirantadas según 2 planos laterales, como consecuencia de la escasa rigidez que un único plano de atirantamiento otorga, además de que se ha considerado un único pilono que posee las mismas dimensiones que los pilonos de las estructuras atirantadas según 2 planos laterales, cuando normalmente, se suele considerar una sección que posea una inercia del doble.

Lo más interesante que se puede deducir de la tabla, es que la tipología de atirantamiento bajo la que se presentan las mínimas flechas verticales a contrarrestar, es la tipología en abanico. Esto se debe a la propia geometría del atirantamiento, ya que el hecho de que todos los cables estén más cerca de la cabeza del pilono, añade más rigidez en la zona que posee mayores flechas horizontales, esto se traduce en la existencia de menores flechas verticales en el centro del vano.

4.4 Comparativa de resultados en desplazamientos

Con un simple vistazo de los gráficos, la primera y más importante conclusión que se puede obtener, es que, en efecto, los sistemas de rigidización longitudinal consiguen disminuir tanto flechas horizontales en cabeza de pilonos como verticales en el centro del vano, lo cual era el objeto de este trabajo.

Si los observamos más de cerca, se aprecia que, en todos los casos, los desplazamientos van disminuyendo de forma exponencial conforme aumentamos el número de cables en cada vaina, esto implica una pérdida de eficacia del sistema de rigidización en cuestión, con el aumento de cables en las vainas. Para nuestros casos, no llega a darse la situación en la que se pierda por completo, pero es a lo que se tiende, además, podemos apreciar que este efecto es de mayor notoriedad en el sistema de rigidización 2.

Es importante saber que esto sucede para todas las tipologías de estructuras y condiciones de contorno.

Conocida y mostrada la eficacia de los sistemas, vamos a indagar sobre las diferencias que podemos apreciar entre sistemas de rigidización, condiciones de contorno y tipologías de atirantamiento, atendiendo principalmente a 2 parámetros:

- Capacidad máxima de reducción de flecha (valores resaltados en negrita de las tablas del anexo, que reflejan la diferencia entre flecha sin rigidización longitudinal y la misma flecha, pero con uno de los sistemas de rigidización implementado con el máximo número de cables por vaina).
- Mínima flecha registrada en cada caso.

4.4.1 Comparación entre condiciones de contorno para un mismo sistema de rigidización

En este subapartado se va a analizar la repercusión que tienen las condiciones de contorno sobre las flechas mínimas registradas tras incorporar un sistema de rigidización determinado, para ello, se han extraído comparaciones en base a los gráficos anteriormente expuestos.

En lo referente a las **estructuras atirantadas según 2 planos laterales verticales**, podemos concluir que la decisión de colocar un apoyo simple o deslizante, no va a repercutir de forma notable a las flechas mínimas obtenidas; no obstante, hay casos donde se observan comportamientos singulares.

Si nos centramos en las flechas verticales, tanto la reducción de flechas, como los mínimos registrados son prácticamente iguales bajo ambas condiciones de contorno, lo cual es apreciable en en las gráficas.

Si por otro lado, observamos las flechas horizontales en cabeza de pilono, se aprecian valores mínimos muy cercanos entre sí, y un comportamiento en el gráfico notable.

Para las tipologías en abanico y arpa, estas deformaciones pueden considerarse del mismo valor (diferencia por debajo de 1cm), siendo el apoyo deslizante la condición de contorno con menores flechas para la tipología en abanico, y al revés para la tipología en arpa.

La tipología de atirantamiento mixta merece una mención especial, pues si bien, al igual que en las tipologías anteriores, la diferencia entre flechas horizontales en cabeza de pilono es mínima, estas se van haciendo más notorias conforme se aumentan el número de cables por vaina en el sistema de rigidización en cuestión, presentándose las mayores flechas para el apoyo deslizante. Al igual que en las otras geometrías de atirantamiento, esta particularidad se hace notable en ambas metodologías de rigidización longitudinal. Igualmente, la diferencia máxima (para el máximo número de cables por vaina) es de 1cm, que es insignificante.

Todas las comparativas y conclusiones coinciden para ambos sistemas de rigidización longitudinal.

Si por otro lado, nos centramos en las **estructuras atirantadas según un único plano de atirantamiento**, la repercusión que tienen las condiciones de contorno varían en función de la tipología.

En lo que a la flecha vertical en centro de vano consta, al igual que sucedía en las estructuras atirantadas según 2 planos laterales verticales, no existe diferencia alguna entre emplear un apoyo simple o deslizante.

Los grandes contrastes aparecen cuando analizamos las flechas longitudinales en cabeza de pilono.

Si la estructura a rigidizar presenta un atirantamiento en abanico, no existe apenas diferencia entre emplear una condición de contorno u otra (diferencia de flecha inferior a 1cm), lo que sí se aprecia, es que las flechas bajo un apoyo deslizante son algo menores hasta un determinado número de cables, a partir de los 30 cables por vaina, estas bajo un apoyo simple se hacen menores. Igualmente, se trata de una diferencia minúscula.

Es en la tipología mixta donde sí existe mucha desigualdad entre las deformaciones longitudinales en cabeza de pilono, bajo un apoyo simple y uno deslizante.

Se puede observar en el gráfico correspondiente (Fig 4.2.2.1) que, con un apoyo deslizante, las flechas son mucho superiores a las que obtenemos con uno simple, pudiendo llegar a al doble para el caso con mayor número de cables por vaina. Es la única casuística en la que la repercusión es lo suficientemente alta como para ser tenida en cuenta.

Tras haberse comparado las diferencias entre una condición de contorno y otra en todas las estructuras, hay algunos casos en los que se podría pensar que un apoyo deslizante puede ser la mejor opción, pues la reducción de deformaciones producidas bajo esta condición de contorno es superior en algunos casos; no obstante, conviene recordar la dificultad extra que posee colocar un apoyo deslizante que se comentó en el apartado anterior, y es la compresión que sufre el tablero, además de que las desigualdades (a nivel cuantitativo) entre flechas no son lo suficientemente elevadas como para replantearnos las condiciones de contorno, a menos de que existan agentes externos que condicionen la situación.

4.4.2 Comparación entre sistemas de rigidización longitudinal

En este subapartado hemos prestado atención a los resultados tabulados del anexo, de donde hemos extraído los mínimos de flechas registrados, así como las capacidades máximas de reducción de las mismas.

Primero, vamos a centrarnos en las **estructuras atirantadas según 2 planos laterales verticales**.

Si atendemos a las flechas horizontales en cabeza de pylon nos encontramos con lo siguiente:

Disminución flecha horizontal cabeza de pilonos [cm]						
	Abanico		Arpa		Mixto	
	Apoyado	Deslizante	Apoyado	Deslizante	Apoyado	Deslizante
SRL 1	4,16	4,06	4,28	4,41	4,24	2,9
SRL 2	3,29	3,08	3,47	3,64	3,38	1,99

Flecha horizontal mínima (máx nº de cables por vaina) [cm]						
	Abanico		Arpa		Mixto	
	Apoyado	Deslizante	Apoyado	Deslizante	Apoyado	Deslizante
SRL 1	6,5	6,05	6,39	6,63	6,51	7,3
SRL 2	7,37	7,03	7,2	7,4	7,37	8,21

Tabla 4.4.2.1 Capacidad máxima de reducción de flechas horizontales y valores mínimos obtenidos 2 planos atirantados

- Lo primero que podemos observar, es que el sistema de rigidización longitudinal 1 es el que presenta los valores mínimos de flechas horizontales, y registra la mayor capacidad de reducción de las mismas. Tiene sentido puesto que es en la rigidización longitudinal 1 donde más se aprovecha la capacidad de los cables intermedios para trabajar a axil, en la rigidización 2, el hecho de que los cables estén inclinados resulta en una rigidez aportada por el cable menor, puesto que el desplazamiento horizontal en cabeza de pylon, no es contrarrestado en su totalidad por la capacidad a axil del cable, sino por una componente del mismo que depende de la inclinación que este presenta, pasa lo contrario en el sistema de rigidización 1. Esta misma conclusión se recoge en el apartado de puentes continuos del capítulo 18 del libro de Javier Manterola [3].
- De igual forma, podemos extraer que la implementación de un sistema de rigidización longitudinal posee mayor eficacia en estructuras bajo un atirantamiento en arpa, puesto que la mayor reducción de flechas se atribuye a esta tipología, independientemente de la condición de contorno.
- Podemos ver, que para la tipología en arpa, las estructuras simplemente apoyadas son las que presentan menores flechas horizontales; sin embargo, bajo un apoyo deslizante, la tipología en abanico sigue siendo la que posee menores flechas horizontales.
- Volviendo a las condiciones de contorno, se puede observar que bajo una tipología en arpa, la eficacia que se observa en la disminución de flechas es superior bajo un apoyo deslizante, sucede al contrario si el atirantamiento es en abanico o mixto.

Si observamos con detenimiento los cuadros de resultados superiores, podemos apreciar mejor la comparación entre condiciones de contorno que se realizó en el subapartado anterior. La flecha horizontal en cabeza de pylon es muy próxima entre condiciones de contorno exceptuando la tipología mixta, donde conforme se aumentaban el número de cables, la diferencia de flecha entre apoyos aumentaba un poco más (comparando con las otras tipologías de atirantamiento), lo reflejado en la tabla es el máximo, de ahí que sean valores con mayor diferencia.

Si nos centramos en el criterio de flechas verticales, nos encontramos con lo siguiente:

Disminución flecha vertical en centro de vano [cm]						
	Abanico		Arpa		Mixto	
	Apoyado	Deslizante	Apoyado	Deslizante	Apoyado	Deslizante
SRL 1	6,75	6,91	6,3	6,49	6,75	7,04
SRL 2	5,07	5,21	4,77	4,93	5,18	5,31

Flecha vertical mínima (máx nº de cables por vaina) [cm]						
	Abanico		Arpa		Mixto	
	Apoyado	Deslizante	Apoyado	Deslizante	Apoyado	Deslizante
SRL 1	23,7	23,77	26,2	26,28	24,36	24,3
SRL 2	25,38	25,47	27,73	27,84	25,93	26,03

Tabla 4.4.2.2 Capacidad máxima de reducción de flechas verticales y valores mínimos obtenidos 2 planos atirantados

- Las deducciones que podemos extraer son análogas a las del subapartado anterior, y es que se ve de un vistazo que el sistema de rigidización 1, no solo tiene mayor capacidad de reducción de flechas verticales que el 2, sino que los valores mínimos de las mismas, quedan por debajo de los que se obtienen con el sistema de rigidización longitudinal 2.
- A diferencia de las flechas horizontales, la mayor eficacia en el sistema de rigidización se obtiene para una tipología mixta de atirantamiento, puesto que es la geometría que posee la mayor reducción de flechas verticales.
- Al igual que antes, conviene puntualizar que mayor disminución de flechas verticales, no implica que sea la solución que concluya con menores flechas, en el cuadro se puede observar que la tipología en abanico es la que posee el mínimo de flechas verticales tras la incorporación de un sistema de rigidización, sin importar la condición de contorno.
- Para un mismo sistema de rigidización y dada una tipología de atirantamiento, un apoyo deslizante, posee una eficacia superior de reducción de flechas verticales en centro de vano.

En estos cuadros también pueden fundamentarse las comparaciones de flechas verticales según condiciones de contorno que se realizaron en el subapartado anterior, se observa que la flecha vertical para un mismo sistema de rigidización longitudinal es la misma independientemente del apoyo.

A modo de resumen, para las estructuras atirantadas según 2 planos laterales verticales podemos concluir con:

+ Flecha horizontal en cabeza de pilono

Mayor eficacia bajo atirantamiento en ARPA

Menores flechas (apoyado) en ARPA
Menores flechas (deslizante) en ABANICO

Mayor eficacia (abanico y mixto) bajo APOYO SIMPLE
Mayor eficacia (arpa) bajo APOYO DESLIZANTE

+ Flecha vertical en centro de vano

Mayor eficacia bajo atirantamiento MIXTO
Menores flechas en ABANICO
Mayor eficacia bajo APOYO DESLIZANTE

Fig 4.4.2.1 Resumen desplazamientos estructuras 2 planos atirantados

En lo referente a las **estructuras atirantadas según un único plano**, al solo haber considerado la implementación de un sistema de rigidización (el 1), lo único que podemos hacer es estudiar cómo este sistema se comporta bajo las distintas tipologías de atirantamiento, analizando al igual que antes, flechas horizontales y verticales.

Si nos centramos en las flechas horizontales en cabeza de pilono, observamos lo siguiente:

Disminución flecha horizontal cabeza de pilonos [cm]				
	Abanico		Mixto	
	Apoyado	Deslizante	Apoyado	Deslizante
SRL 1	7,17	5,97	7,26	3,26

Flecha horizontal mínima (máx nº de cables por vaina) [cm]				
	Abanico		Mixto	
	Apoyado	Deslizante	Apoyado	Deslizante
SRL 1	10,42	10,81	10,38	17,15

Tabla 4.4.2.3 Capacidad máxima de reducción de flechas horizontales y valores mínimos obtenidos un plano atirantado

- Analizando las tipologías de atirantamiento, podemos afirmar que si la condición de contorno entre tablero y estribos es simplemente apoyada, la tipología mixta tiene mayor capacidad de reducción de flechas horizontales en cabeza de pilono, si por contra, el apoyo es deslizante, será la tipología en abanico la que posea mayor eficacia. Podemos extrapolar esta comparativa para las menores flechas registradas.
- En lo referente a las condiciones de contorno, podemos observar que la mayor capacidad de reducción de flechas horizontales se da para un apoyo simple (para un mismo sistema de rigidización longitudinal).

Al igual que antes, las deducciones que obtuvimos de comparar condiciones de contorno pueden verificarse de un vistazo a las tablas de arriba, y es que en abanico, la diferencia entre desplazamientos es prácticamente nula, mientras que en la tipología mixta sucede lo contrario, donde de forma más precisa podemos ver que los desplazamientos horizontales son bastante superiores bajo un apoyo deslizante que uno simple.

Pasando a las flechas verticales en centro de vano, podemos comparar lo que sigue:

Disminución flecha vertical en centro de vano [cm]				
	Abanico		Mixto	
	Apoyado	Deslizante	Apoyado	Deslizante
SRL 1	11,31	11,32	11,42	11,41

Flecha vertical mínima (máx nº de cables por vaina) [cm]				
	Abanico		Mixto	
	Apoyado	Deslizante	Apoyado	Deslizante
SRL 1	34,44	34,44	35,06	35,07

Tabla 4.4.2.4 Capacidad máxima de reducción de flechas verticales y valores mínimos obtenidos un plano atirantado

- Lo primero que se puede observar es que la capacidad de reducir la flecha vertical en el centro del vano, es muy parecida en ambas tipologías de atirantamiento, casi idénticas, al igual que la flecha vertical mínima registrada, esto nos lleva a directamente afirmar que en cuanto a flechas verticales, no vamos a hacer ninguna separación según sistemas de atirantamiento, podemos afirmar con seguridad que, independientemente del atirantamiento, la eficacia para reducir flechas verticales es elevada, y además de valores muy similares entre atirantamientos, por lo que no repercute rigidizar bajo una u otra.
- En lo referente a los valores de flecha vertical, se observa que la tipología en abanico es la que registra los mínimos para ambas condiciones de contorno.
- Como se concluyó en el apartado anterior, la diferencia entre condiciones de contorno (en lo que a flechas mínimas respecta) es nula, pues la flecha vertical en el centro de vano permanece igual, se puede afirmar lo mismo referente a la capacidad de reducir estas deformaciones.

A modo de resumen, para las estructuras atirantadas según un único plano, podemos concluir que:

+ Flecha horizontal en cabeza de pilono

Mayor eficacia (apoyado) bajo atirantamiento MIXTO
 Mayor eficacia (deslizante) bajo atirantamiento en ABANICO

Menores flechas (apoyado) en MIXTO
 Menores flechas (deslizante) en ABANICO

Mayor eficacia bajo APOYO SIMPLE

+ Flecha vertical en el centro de vano

Mayor eficacia bajo atirantamiento MIXTO

Menores flechas en ABANICO

Misma eficacia DESLIZANTE Y APOYADO

Fig 4.4.2.2 Resumen desplazamientos estructuras un plano atirantado

Algo que sí se puede apreciar comparando ambas estructuras, es que, en las atirantadas según un único plano, la reducción de flechas es mucho superior a la que se obtiene en las estructuras con 2 planos laterales de atirantamiento; no obstante, como consecuencia de la menor rigidez que presentan estas primeras, las flechas registradas mínimas bajo la implementación de un sistema de rigidización, son mucho mayores a las que tenemos con 2 planos de atirantamiento.

Tras haber obtenido los resultados en deformaciones y haberlos contrastado, puede apreciarse lo siguiente, y es que a pesar de la reducción y eficacia de todos los sistemas de rigidización longitudinal implementados, en ninguna situación la flecha vertical se reduce lo suficiente como para que se cumpla la prescripción de sobrecarga de uso relativa al ELS [2]. El caso más cercano a cumplir, se aprecia en la estructura atirantada según 2 planos laterales verticales, tipología en abanico y simplemente apoyado, donde no verificamos la aptitud por tan solo 1.7cm.

4.5 Comparativa de resultados en tensiones

Antes de entrar en el detalle de las tensiones, conviene expresar claramente qué reflejan estos resultados.

Las tensiones que vienen tabuladas, son los máximos en valor absoluto que se alcanzan para cada cable. Suponiendo la situación de la sobrecarga de uso que provoca estos extremos, apreciamos que los cables laterales experimentan una tracción, que en valor absoluto, va a estar por encima de la máxima compresión que puedan alcanzar bajo la actuación de la sobrecarga de uso, y el mismo razonamiento se aplica a los cables centrales de los sistemas de rigidización, solo que para las compresiones. De ahí que en las tablas, los resultados en tensiones para los cables laterales sean siempre tracciones, y para los centrales compresiones, pues solo se han obtenido los máximos.

Estos valores, no van a ser constantes, al alcanzarse bajo una determinada situación, podríamos razonar, que son un reflejo de la fluctuación en tensiones que sufren los cables, lo cual es de vital importancia a la hora de considerar la fatiga en los mismos. De cara a realizar algunas conclusiones, este aspecto va a ser crucial.

De la misma forma, los resultados en tensiones son una primera aproximación a la tensión de pretensado que debemos aplicar sobre los cables del sistema rigidizador. Al tener todas situaciones en las que pudieran estar comprimidos, es necesario que estos se pretesen previamente bajo una tensión superior a la que sufren de compresión máxima (recordemos que los cables son elementos que trabajan a tracción, tener cables comprimidos no aporta rigidez al sistema). La forma correcta de hallar la carga de pretensado pasaría por calcular las máximas compresiones que se dan en todos los cables, establecer equilibrio entre unos y otros y tomar la situación más desfavorable, todo este procedimiento escapa del alcance de este trabajo.

Centrándonos en los resultados de las tablas, lo primero que podemos observar, es que las tensiones máximas que sufren todos los cables del sistema de rigidización en cuestión, van disminuyendo conforme se aumenta el número por vaina. Lo cual tiene sentido, pues si se aumenta la sección transversal, y la fuerza actuante (correspondiente a la sobrecarga de uso) se mantiene igual, las tensiones que experimenta esa sección son menores. Esto es algo observable en todas las casuísticas de estructuras, sistemas de rigidización, atirantamiento y condiciones de contorno.

Si nos centramos en las **estructuras atirantadas según dos planos laterales verticales** observamos distintos cambios según el cable que se analice.

Si estudiamos los cables laterales (máxima tracción), podemos observar que para un mismo sistema de rigidización longitudinal, la diferencia entre apoyo deslizante o simple es mínima, como mucho se alcanzan los 3 MPa entre una condición de contorno u otra, algo ínfimo teniendo en cuenta las estructuras que tratamos.

La gran diferencia se plasma entre sistemas de rigidización longitudinal. Si observamos las tablas, vemos que para todas las tipologías de atirantamiento, las tensiones de tracción experimentadas en el sistema de rigidización 2 son mayores que en el 1. Además, esta diferencia se hace más notable conforme aumentamos el número de cables por vaina, hasta que llega un punto en el que se mantiene constante (a partir de los 24 cables por vaina). Igualmente, hablamos de diferencias de tensión que rondan los 11 MPa para el caso más desfavorable, que se da bajo la tipología de atirantamiento mixta.

Por lo general, en todas las tipologías de atirantamiento los valores son muy parecidos, y las diferencias entre sistemas de rigidización y entre condiciones de contorno son próximas.

Si analizamos los cables centrales de ambos sistemas de rigidización, observamos diferencias de mayor repercusión que en los cables laterales.

Para un mismo sistema de rigidización longitudinal, de un apoyo deslizante a uno simple, la diferencia es pequeña, al igual que sucedía con los cables laterales; no obstante, se observa algo que antes no, y es que conforme se van aumentando el número de cables por vaina, los valores de máxima compresión se van haciendo más cercanos entre una condición de contorno y otra.

A diferencia de los cables laterales, las tensiones de compresión máxima son mucho superiores en las estructuras rigidizadas bajo el sistema de rigidización longitudinal 1, en este, se observan compresiones máximas del doble de las que se alcanzaban en el sistema de rigidización 2. Esta diferencia, va disminuyendo conforme aumentamos los cables por vaina (al igual hace la tensión).

Todos los aspectos tensionales comentados, son apreciables en todas las tipologías de atirantamiento por igual.

En el caso de las **estructuras atirantadas según un único plano de atirantamiento**, las únicas comparaciones que podemos realizar es entre utilizar una conición de contorno u otra, pues recordemos que en esta tipología estructural, solo se ha considerado la implementación del sistema de rigidización longitudinal 1.

Al igual que en las estructuras atirantadas según 2 planos laterales verticales, tanto cables centrales como laterales, poseen unas tensiones máximas muy parecidas, si no iguales, para ambas condiciones de contorno, por lo que la repercusión del apoyo es nula.

Tras haber comparado ambas tipologías de estructuras según su atirantamiento transversal, podemos contrastar las tensiones que sufren los cables para el sistema de rigidización 1 en ambos casos, y es que como consecuencia de las deformaciones en mayor medida que sufren las estructuras atirantadas por menor número de planos transversales, las tensiones serán también mayores. Los que se ven afectados mayormente son los cables centrales, llegando a sufrir unas tensiones máximas de compresión de 100MPa de diferencia en algunos casos; mientras que los cables laterales, siguen experimentando fluctuaciones superiores, pero con una diferencia algo menor.

Es importante adquirir perspectiva de la situación; estamos utilizando cables diseñados para trabajar en torno a los 800MPa como máximo, y tenemos fluctuaciones de tensiones en los mismos que pueden llegar hasta los 280MPa, el fenómeno de fatiga en nuestro trabajo no ha sido analizado, pero debe tenerse en cuenta.

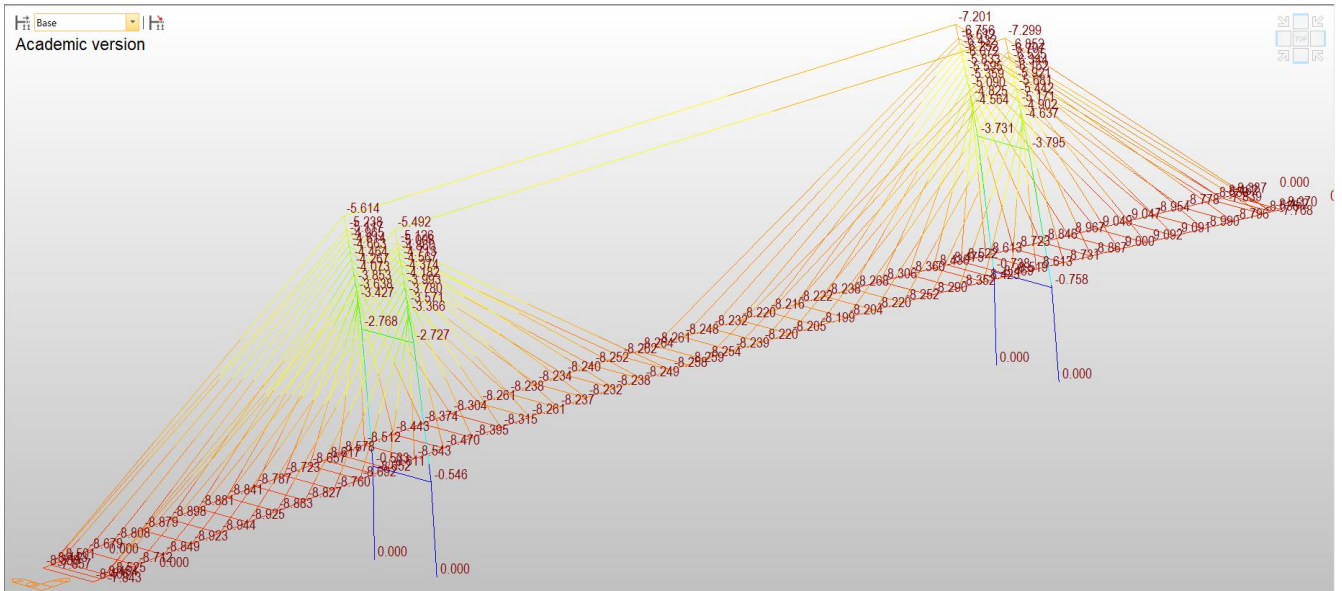


Fig 4.6.2 Flecha longitudinal 2 planos atrantados, mixto, deslizante

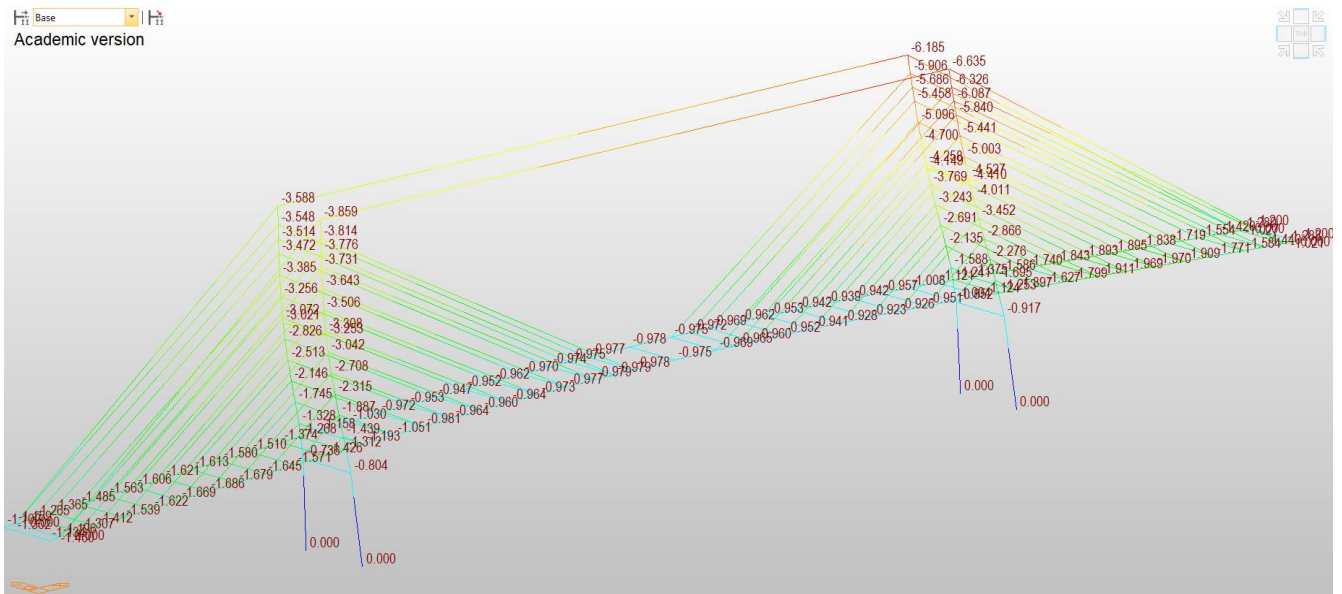


Fig 4.6.3 Flecha longitudinal 2 planos atrantados, arpa, deslizante

La segunda idea clave, es que los sistemas de rigidización longitudinal 2 poseen mayor relación entre situaciones, ya que la máxima compresión en los cables centrales, tracción en laterales y máxima flecha en cabeza de pilono sucede para una misma situación, poseen un comportamiento y una respuesta estructural más previsible.

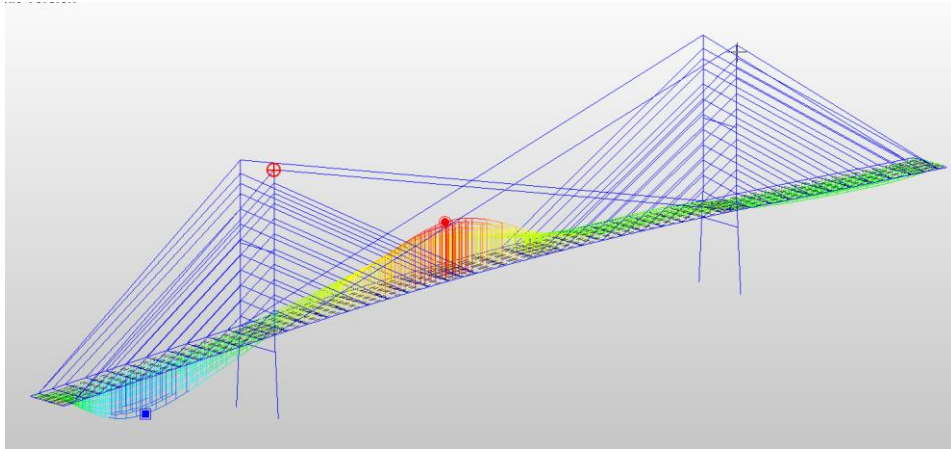


Fig 4.6.4 Situación máxima flecha horizontal cabeza pilono, 2 planos atirantados, arpa, sistema rigidización 2

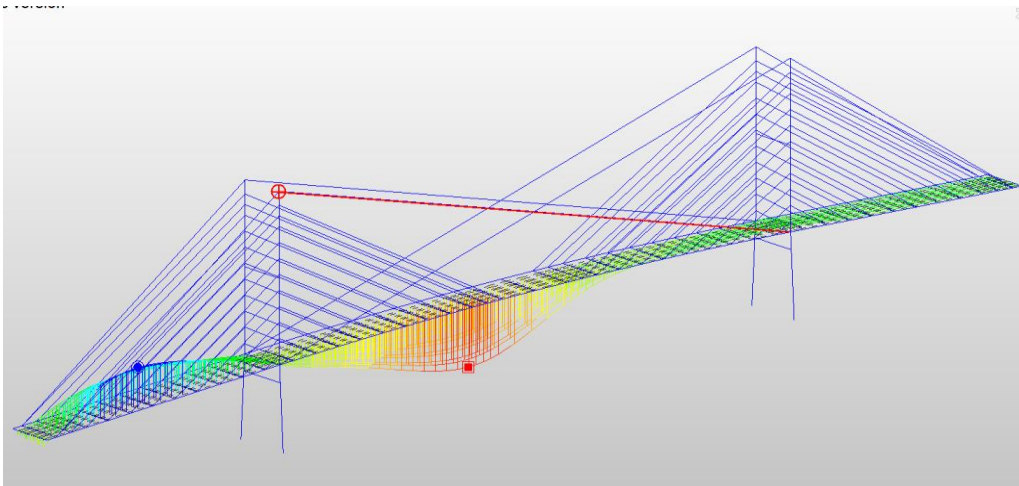


Fig 4.6.5 Situación máxima compresión cable central, 2 planos atirantados, arpa, sistema rigidización 2

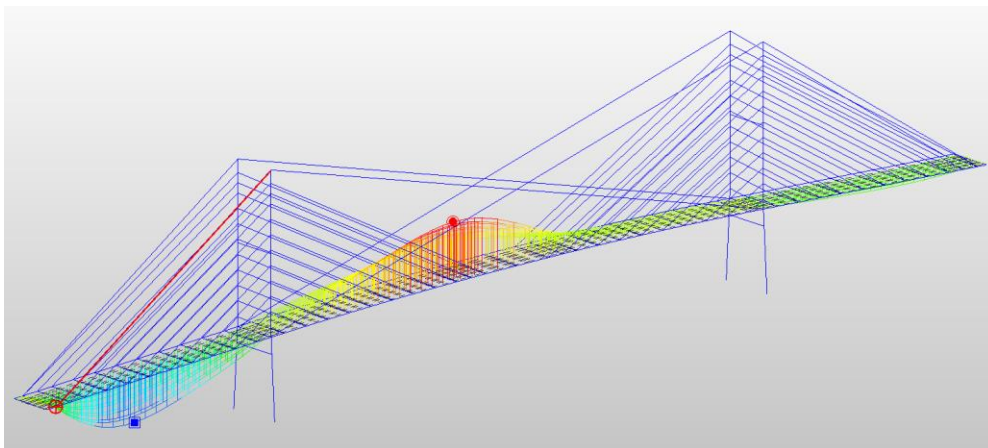


Fig 4.6.6 Situación máxima tracción cable lateral, 2 planos atirantados, arpa, sistema rigidización 2

5 CONCLUSIONES

De forma previa a extraer conclusiones relacionadas con los sistemas de rigidización longitudinal, vamos a partir de la base estructural sin rigidizar.

Como bien se podía intuir, las estructuras atirantadas según 2 planos laterales verticales poseen unas flechas (tanto verticales en el centro de vano como horizontales en cabeza de pilono) inferiores a las que presentan las atirantadas según un solo plano (dada la mayor rigidez de las primeras). De la misma forma, la tipología con menores flechas para la sobrecarga de uso, es en abanico, puesto que la concentración de todos los cables en un punto cercano a la cabeza de pilono, rigidiza en mayor medida esta zona si comparamos con el resto de tipologías de atirantamiento, por lo que, podemos concluir con que la estructura atirantada según 2 planos laterales verticales bajo una tipología en abanico, es la de mayor rigidez, y posiblemente, tras la incorporación de algún sistema de rigidización longitudinal, siga siendo la que menores flechas presente.

Con el objetivo de facilitar la lectura y comprensión, el resto del capítulo se va a dividir según los resultados en torno a los cuales se hayan obtenido conclusiones:

❖ CONCLUSIONES EN DESPLAZAMIENTOS

Tras establecer un punto de partida previo a la incorporación de los sistemas de rigidización, podemos continuar haciendo la afirmación más importante de este trabajo, y es que se ha demostrado cuantitativamente que ambas metodologías son capaces de disminuir las flechas provocadas por la sobrecarga de uso (tanto las horizontales, como las verticales) siendo el sistema de rigidización 1 el más eficaz para disminuirlas, y proporcionando de la misma forma, las deformaciones más bajas.

A la hora de mostrar conclusiones en desplazamientos para las tipologías de atirantamientos y condiciones de contorno, en lo que a la flecha vertical en el centro de vano respecta, podemos concluir que para ambas tipologías de atirantamiento transversal, la mayor eficacia en reducción de flechas se obtiene bajo un atirantamiento MIXTO; mientras que los valores mínimos, siguen manteniéndose bajo un atirantamiento en ABANICO. En lo que a las condiciones de contorno se refiere, podemos afirmar que bajo un apoyo deslizante, la capacidad de reducir flechas es superior; sin embargo, como las deformaciones verticales se mantienen casi iguales para ambas condiciones de contorno, vamos a inclinarnos por el APOYO SIMPLE como la más favorable u óptima, ya que no tiene asociado el problema de compresiones en el tablero.

Las conclusiones que se puedan extraer en torno a las flechas longitudinales en cabeza de pilono son más abstractas, pues no presentan un patrón o comportamiento común. Existen 2 factores que son los principales causantes, y es que recordemos que:

1. En las estructuras atirantadas según 2 planos laterales verticales se ha tenido en cuenta la implementación de un sistema de atirantamiento más que en las atirantadas por un solo plano, hablamos de la tipología en arpa
2. Vimos que en las estructuras atirantadas según un único plano, la condición de contorno tenía una repercusión enorme en la flecha longitudinal mínima en cabeza de pilono para la tipología de atirantamiento mixta

Pues bien, a excepción de las casuísticas en las que influyen estos 2 aspectos o puntos, el comportamiento y conclusiones, son similares: mayor eficacia de reducción de flechas bajo apoyo simple, menores flechas registradas bajo atirantamiento en abanico... La mejor forma de identificar los casos concretos donde no coinciden, es puntualizar aquellos en los que la tipología en arpa es óptima en las estructuras atirantadas según 2 planos, pues estos, serán los casos donde en las estructuras atirantadas según un único plano, las situaciones óptimas cambiarán. En la siguiente imagen comparativa se puede apreciar mejor:

2 planos laterales de atirantamiento

Mayor eficacia bajo atirantamiento en **ARPA**

Menores flechas (apoyado) en **ARPA**
 Menores flechas (deslizante) en **ABANICO**

Mayor eficacia (abanico y mixto) bajo APOYO SIMPLE
 Mayor eficacia (arpa) bajo APOYO DESLIZANTE

1 plano central de atirantamiento

Mayor eficacia (apoyado) bajo atirantamiento MIXTO
 Mayor eficacia (deslizante) bajo atirantamiento en **ABANICO**

Menores flechas (apoyado) en MIXTO
 Menores flechas (deslizante) en **ABANICO**

Mayor eficacia bajo APOYO SIMPLE

Fig 5.1 Comparativa conclusiones en desplazamientos según planos transversales de atirantamiento

❖ CONCLUSIONES EN TENSIONES

En lo referente a los resultados en tensiones, ya se analizó sobre el significado detrás de estos resultados y la importancia que tienen los mismos sobre la vida útil de los cables (fatiga).

Basándonos en los resultados extraídos y contrastados en el capítulo 4, concluimos con que las condiciones de contorno no influyen de forma llamativa en las tensiones máximas que experimentan los cables tanto laterales como centrales de los sistemas de rigidización longitudinal.

La principal diferencia viene de la mano del propio sistema, más que de la tipología de atirantamiento o apoyo. Nos encontramos con que las máximas tracciones que sufren los cables laterales son superiores en el sistema de rigidización 2; mientras que es el 1 en el que se dan las máximas compresiones en los cables centrales, siendo la disparidad más notable en estos últimos.

Como criterio limitante en tensiones, podríamos decir que es el sistema 1 el más perjudicial para los mismos, pues las fluctuaciones de mayor magnitud supondrán unas consecuencias sobre el mantenimiento de los cables de mayor calibre (revisiones de mayor periodicidad, mayor atención a las tensiones registradas en tiempo real...).

❖ CONCLUSIONES SOBRE LAS SITUACIONES DE LOS RESULTADOS

Podríamos pensar que existe relación entre muchos de los resultados obtenidos: la flecha horizontal en cabeza de pilono provoca las máximas tracciones en los cables laterales y de compresión en los centrales; sin embargo, no es así siempre, depende del sistema de rigidización que utilicemos y de las condiciones de contorno y tipologías de atirantamiento. A modo de esquema, en el siguiente cuadro se marcan con una X las casuísticas en las que se pueden relacionar los resultados que se muestran en las columnas superiores:

			Máxima tracción cables laterales + máxima flecha horizontal cabeza de pilono	Máxima tracción cables laterales + Máxima compresión cables centrales	Máxima tracción cables laterales + máxima compresión cables centrales + máxima flecha longitudinal cabeza
2 PLV	ABANICO	SRL 1 apoyado	X		
		SRL 1 deslizante			
		SRL 2 apoyado			X
		SRL 2 deslizante		X	
	ARPA	SRL 1 apoyado	X		
		SRL 1 deslizante	X (rigidez axil cables menos inclinados)		
		SRL 2 apoyado			X
		SRL 2 deslizante			X
	MIXTO	SRL 1 apoyado	X		
		SRL 1 deslizante			
		SRL 2 apoyado			X
		SRL 2 deslizante		X	
1 PC	ABANICO	SRL 1 apoyado	X		
		SRL 1 deslizante			
	MIXTO	SRL 1 apoyado	X		
		SRL 1 deslizante			

Tabla 5.1 Situaciones que se pueden relacionar entre sí en función de la tipología atirantamiento, apoyos y sistema rigidización

Si discretizamos según los sistemas de rigidización, encontramos que es el segundo el que posee un comportamiento más predecible, pues es donde la mayor parte de los resultados extraídos coinciden en situación que las provoca (se puede llegar a relacionar flecha máxima en cabeza de pilono con las tensiones máximas de cables centrales y laterales).

De la misma forma, los apoyos deslizantes complican el problema en este parecer, pues bajo esta condición de contorno se reducen los resultados que pueden relacionarse entre sí, a excepción de si la tipología es en arpa, donde como se ha comentado, la menor inclinación de los cables en el atirantamiento dota de mayor rigidez longitudinal al tablero.

6 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En lo referente a deformaciones, el criterio que va a determinar la aptitud de nuestras estructuras es el que dicta el primer subapartado del capítulo 7 de la IAP-11 [2], como se comentó anteriormente, los sistemas de rigidización longitudinal disminuyen las deformaciones pero no lo suficiente como para cumplir el mismo. Esto nos puede llevar a pensar que los sistemas rigidizadores no son eficientes, y es que realmente, cumplir o no con los criterios restrictivos es algo que depende de cada estructura.

La solución que se podría optar en este caso pasaría por aumentar las inercias de los elementos estructurales que componen el puente (tableros, pilonos...), ya que son estos los que principalmente soportan la sobrecarga de uso, una posible línea futura de investigación, u objeto de otro trabajo, podría ser, para una estructura dada, ver cuánto de rentable puede salir la implementación de un sistema de rigidización longitudinal, frente a aumentar la rigidez de los tableros, o casos en los que sea más viable implementar una metodología de las estudiadas frente a utilizar tableros de superiores características mecánicas.

En este trabajo se ha especificado la no consideración de los efectos dinámicos sobre la estructura. Es conocido que el viento puede suponer una sollicitación agresiva para la vida útil de los cables, sin necesidad de afectar al resto del puente, la consideración de estos efectos, mejoras a implementar en los cables para que sufran mejor comportamiento dinámico, etc. podrían ser temas interesantes a desarrollar en un futuro trabajo.

A pesar de que se haya estudiado la sobrecarga de uso como una carga que realmente repercute poco en el comportamiento no lineal de los cables, un estudio más preciso sería el de considerar en MIDAS Civil a los cables como elementos *cable*, introduciendo todos los parámetros que caracterizan la no linealidad de los mismos, y realizar algún contraste con los resultados obtenidos en este trabajo.

7 REFERENCIAS

- [1] G. d. E. Ministerio de Interior, «Capítulo 1 Artículos generales,» de *Código Estructural*, Madrid, 2021.
- [2] G. d. E. Ministerio de Fomento, IAP-11: Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carreteras, 2012.
- [3] J. Manterola, «Capítulo 18: Puentes atirantados, Morfología y dimensionamiento,» de *Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción TOMO I*, Madrid, CICCPC, 2006.
- [4] N. H. Gerard Parke, «Cable stayed bridges,» de *ICE Manual of Bridge Engineering: Second edition*, ICE manuals, 2008.
- [5] J. M. B. Ramón E. Gilsanz, «Cable Stayed Bridges: degrees of anchoring,» Enero 1983. [En línea].
- [6] J. Manterola, «Capítulo 18: Puentes atirantados, El tirante,» de *TOMO II Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción*, Madrid, CICCPC, 2006.
- [7] A. M. G. Chacón, Trabajo Fin de Grado: Influencia de la morfología longitudinal y transversal del atirantamiento en el comportamiento resistente de puentes atirantados, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2017.

8 ANEXO

8.1 Resultados tabulados estructuras atirantadas según 2 planos

Situación de sobrecarga para 2 planos laterales verticales atirantamiento en abanico										
Estructura sin rigidización simplemente apoyada		Sistema rigidización 1 simplemente apoyado					Sistema rigidización 2 simplemente apoyado			
Flecha horizontal cabeza pilonos [cm]	Flecha vertical centro vano [cm]	Flecha horizontal cabeza pilonos [cm]	Flecha vertical centro vano [cm]	Máximas tensiones rigidización [Mpa]		área cables (cm ²)	Flecha horizontal cabeza pilonos [cm]	Flecha vertical centro vano [cm]	Máximas tensiones rigidización [Mpa]	
				cables laterales	cables centrales				cables laterales	cables centrales
10,66	30,448	9,82	29,07	144,459	-161,07	5,6	10,07	29,53	148,041	-80,186
		9,39	28,36	138,198	-153,44	9,8	9,67	28,91	142,217	-76,928
		8,95	27,65	131,842	-145,717	12,6	9,42	28,53	138,592	-74,903
		8,5	26,93	125,355	-137,859	16,8	9,07	27,99	133,506	-72,059
		8,1	26,28	119,527	-130,82	21	8,75	27,5	128,796	-69,426
		7,62	25,51	112,612	-122,498	26,6	8,35	26,89	123,033	-66,205
		7,3	25	107,996	-116,93	30,8	8,085	26,47	119,052	-63,983
		7,11	24,68	105,175	-113,495	33,6	7,91	26,21	116,545	-62,584
		6,83	24,24	101,341	-108,71	37,8	7,67	25,84	112,985	-60,598
		6,5	23,7	96,932	-102,932	43,4	7,37	25,38	108,579	-58,143
		4,16	6,748				3,29	5,068		
Estructura sin rigidización deslizante		Sistema rigidización 1 deslizante					Sistema rigidización 2 deslizante			
Flecha horizontal cabeza pilonos [cm]	Flecha vertical centro vano [cm]	Flecha horizontal cabeza pilonos [cm]	Flecha vertical centro vano [cm]	Máximas tensiones rigidización [Mpa]		área cables (cm ²)	Flecha horizontal cabeza pilonos [cm]	Flecha vertical centro vano [cm]	Máximas tensiones rigidización [Mpa]	
				cables laterales	cables centrales				cables laterales	cables centrales
10,11	30,68	9,25	29,26	146,472	-164,021	5,6	9,54	29,73	150,121	-82,66
		8,71	28,35	138,405	-154,096	9,8	9,15	29,1	144,12	-79,245
		8,38	27,8	133,545	-148,133	12,6	8,92	28,7	140,392	-77,124
		7,95	27,06	126,918	-140,023	16,8	8,58	28,15	135,165	-74,15
		7,56	26,39	121,026	-132,769	21	8,28	27,64	130,331	-71,4
		7,1	25,61	114,235	-124,208	26,6	7,92	27,02	124,424	-68,043
		6,8	25,08	109,933	-118,489	30,8	7,67	26,6	120,349	-65,727
		6,61	24,76	107,376	-114,965	33,6	7,52	26,32	117,785	-64,27
		6,36	24,31	104,011	-110,059	37,8	7,3	25,94	114,146	-62,203
		6,05	23,77	99,976	-104,142	43,4	7,03	25,47	109,647	-59,649
		4,06	6,91				3,08	5,21		

Tabla 8.1.1 Resultados en desplazamientos y tensiones 2 planos atirantados en abanico

Situación de sobrecarga para 2 planos laterales verticales atirantamiento en arpa										
Estructura simplemente apoyada		Sistema de rigidización longitudinal 1 simplemente apoyado					Sistema de rigidización 2 simplemente apoyado			
Flecha horizontal cabeza pilonos [cm]	Flecha vertical centro tablero [cm]	Flecha horizontal cabeza pilonos [cm]	Flecha vertical centro tablero [cm]	Máximas tensiones rigidización [Mpa]		área cable (cm ²)	Flecha horizontal cabeza pilonos [cm]	Flecha vertical centro tablero [cm]	Máximas tensiones rigidización [Mpa]	
				cables laterales	cables centrales				cables laterales	cables centrales
10,67	32,5	9,78	31,19	143,535	-157,299	5,6	10,04	31,63	147,144	-79,282
		9,22	30,35	135,407	-147,415	9,8	9,61	31,04	141,041	-75,845
		8,88	29,85	130,523	-141,495	12,6	9,35	30,68	137,26	-73,717
		8,42	29,17	123,88	-133,465	16,8	8,98	30,17	131,971	-70,743
		8	28,57	117,972	-126,305	21	8,64	29,7	127,094	-68,012
		7,51	27,86	111,163	-117,881	26,6	8,23	29,13	121,151	-64,705
		7,19	27,38	106,783	-112,27	30,8	7,95	28,74	117,064	-62,452
		7	27,09	104,134	-108,818	33,6	7,77	28,5	114,496	-61,044
		6,72	26,69	100,525	-104,022	37,8	7,51	28,15	110,86	-59,054
		6,39	26,2	96,359	-98,25	43,4	7,2	27,73	106,373	-56,602
		4,28	6,30				3,47	4,77		
Estructura deslizante		Sistema de rigidización longitudinal 1 deslizante					Sistema de rigidización 2 deslizante			
Flecha horizontal cabeza pilonos [cm]	Flecha vertical centro tablero [cm]	Flecha horizontal cabeza pilonos [cm]	Flecha vertical centro tablero [cm]	Máximas tensiones rigidización [Mpa]		área cable (cm ²)	Flecha horizontal cabeza pilonos [cm]	Flecha vertical centro tablero [cm]	Máximas tensiones rigidización [Mpa]	
				cables laterales	cables centrales				cables laterales	cables centrales
11,04	32,77	10,11	31,41	145,377	-160,763	5,6	10,37	31,86	149,085	-81,374
		9,52	30,54	137,002	-150,47	9,8	9,92	31,25	142,775	-77,739
		9,17	30	131,98	-144,319	12,6	9,65	30,88	138,872	-75,492
		8,68	29,33	125,157	-135,99	16,8	9,26	30,35	133,42	-72,358
		8,25	28,7	119,076	-128,578	21	8,91	29,87	128,4	-69,477
		7,75	27,98	112,032	-119,877	26,6	8,47	29,29	122,294	-65,978
		7,42	27,49	107,515	-114,09	30,8	8,17	28,88	118,1	-63,579
		7,23	27,19	104,824	-110,535	33,6	8	28,63	115,469	-62,075
		6,96	26,78	101,158	-105,6	37,8	7,72	28,28	111,745	-59,947
		6,63	26,28	96,799	-99,669	43,4	7,4	27,84	107,156	-57,329
		4,41	6,49				3,64	4,93		

Tabla 8.1.2 Resultados en desplazamientos y tensiones 2 planos atirantados en arpa

Situación de sobrecarga para 2 planos laterales verticales atirantamiento mixto										
Estructura simplemente apoyada		Sistema rigidización longitudinal 1 simplemente apoyado					Sistema de rigidización 2 simplemente apoyado			
Flecha horizontal cabeza pilonos [cm]	Flecha vertical centro tablero [cm]	Flecha horizontal cabeza pilonos [cm]	Flecha vertical centro tablero [cm]	Máximas tensiones rigidización [Mpa]		área cable (cm ²)	Flecha horizontal cabeza pilonos [cm]	Flecha vertical centro tablero [cm]	Máximas tensiones rigidización [Mpa]	
				cables laterales	cables centrales				cables laterales	cables centrales
10,75	31,11	9,91	29,83	146,421	-163,086	5,6	10,14	30,17	149,644	-80,763
		9,36	28,92	138,321	-153,204	9,8	9,73	29,54	143,645	-77,412
		9,02	26,38	133,439	-147,268	12,6	9,48	29,15	139,918	-75,331
		8,56	27,64	126,783	-139,192	16,8	9,12	28,6	134,694	-72,413
		8,15	26,98	120,81	-131,969	21	8,79	28,1	129,863	-69,715
		7,66	26,19	113,736	-123,445	26,6	8,38	27,47	123,958	-66,42
		7,33	25,67	109,026	-117,751	30,8	8,1	27,05	119,886	-64,15
		7,13	25,35	106,16	-114,241	33,6	7,93	26,78	117,323	-62,722
		6,85	24,9	102,264	-109,356	37,8	7,68	26,4	113,686	-60,698
		6,51	24,36	97,76	-103,465	43,4	7,37	25,93	109,189	-58,198
		4,24	6,75				3,38	5,18		
Estructura deslizante		Sistema rigidización longitudinal 1 deslizante					Sistema de rigidización 2 deslizante			
Flecha horizontal cabeza pilonos [cm]	Flecha vertical centro tablero [cm]	Flecha horizontal cabeza pilonos [cm]	Flecha vertical centro tablero [cm]	Máximas tensiones rigidización [Mpa]		área cable (cm ²)	Flecha horizontal cabeza pilonos [cm]	Flecha vertical centro tablero [cm]	Máximas tensiones rigidización [Mpa]	
				cables laterales	cables centrales				cables laterales	cables centrales
10,2	31,34	9,87	29,88	147,988	-165,514	5,6	10,14	30,37	151,742	-83,305
		9,39	28,95	139,712	-155,307	9,8	9,82	29,72	145,573	-79,805
		9,12	26,39	134,749	-149,187	12,6	9,62	29,32	141,746	-77,634
		8,75	27,64	128,05	-140,874	16,8	9,36	28,75	136,384	-74,595
		8,43	26,96	122,168	-133,453	21	9,12	28,23	131,432	-71,791
		8,07	26,16	115,546	-124,709	26,6	8,84	27,6	125,388	-68,375
		7,84	25,63	111,328	-118,877	30,8	8,66	27,16	121,226	-66,026
		7,7	25,3	108,824	-115,287	33,6	8,54	26,89	118,608	-64,55
		7,51	24,85	105,433	-110,294	37,8	8,39	26,5	114,896	-62,461
		7,3	24,3	101,314	-104,28	43,4	8,21	26,03	110,311	-59,892
		2,9	7,04				1,99	5,31		

Tabla 8.1.3 Resultados en desplazamientos y tensiones 2 planos atirantados mixto

8.2 Resultados tabulados estructuras atirantadas según un único plano central

Estructura atirantada en un solo plano central en tipología ABANICO, pilonos en forma de diamante, resultados extraídos para la sobrecarga de uso					
Estructura simplemente apoyada		Estructura con sistema de rigidización 1 simplemente apoyada			
Flecha horizontal en cabeza de pilono (cm)	Flecha vertical en centro de tablero (cm)	Flechas horizontal en cabeza pilono (cm)	Flecha vertical en centro de tablero (cm)	Máximas tensiones rigidización [Mpa]	área cable (cm ²)
				cables laterales	cables centrales
17,59	45,75	16,13	43,43	236,658	-269,323
		15,18	41,93	223,071	-252,602
		14,62	41,04	214,889	-242,556
		13,58	39,82	203,737	-228,895
		13,15	38,73	193,751	-216,682
		12,34	37,45	181,981	-202,28
		11,79	36,59	174,099	-192,669
		11,45	36,06	169,233	-186,75
		10,98	35,32	162,451	-178,519
		10,42	34,44	154,253	-168,602
		7,17	11,31		
Estructura deslizable		Estructura con sistema de rigidización 1 deslizable			
Flecha horizontal en cabeza de pilono (cm)	Flecha vertical en centro de tablero (cm)	Flechas horizontal en cabeza pilono (cm)	Flecha vertical en centro de tablero (cm)	Máximas tensiones rigidización [Mpa]	área cable (cm ²)
				cables laterales	cables centrales
16,78	45,76	15,38	43,43	236,712	-269,489
		14,51	41,94	223,116	-252,722
		14	41,04	214,931	-242,651
		13,32	39,82	203,776	-228,956
		12,75	38,73	193,791	-216,716
		12,11	37,44	182,021	-202,284
		11,7	36,59	174,14	-192,653
		11,47	36,06	169,275	-186,723
		11,16	35,32	162,494	-178,476
		10,81	34,44	154,308	-168,543
		5,97	11,32		

Tabla 8.2.1 Resultados en desplazamientos y tensiones un plano atirantado abanico

Estructura atirantada en un solo plano central en tipología MIXTA, pilonos en forma de diamante, resultados extraídos para la sobrecarga de uso					
Estructura simplemente apoyada		Estructura con sistema de rigidización 1 simplemente apoyada			
Flecha horizontal en cabeza de pilono (cm)	Flecha vertical en centro de tablero (cm)	Flechas horizontal en cabeza pilono (cm)	Flecha vertical en centro de tablero (cm)	Máximas tensiones rigidización [Mpa]	área cable (cm ²)
				cables laterales	cables centrales
17,64	46,48	16,16	44,12	237,926	-270,521
		15,2	42,61	224,163	-253,572
		14,63	41,71	215,883	-243,399
		13,85	40,48	204,605	-229,574
		13,15	39,38	194,504	-217,226
		12,32	38	182,618	-202,678
		11,77	37,22	174,668	-192,976
		11,43	36,69	169,762	-187,004
		10,95	35,95	162,927	-178,703
		10,38	35,06	154,67	-168,709
		7,26	11,42		
Estructura deslizante		Estructura con sistema de rigidización 1 deslizante			
Flecha horizontal en cabeza de pilono (cm)	Flecha vertical en centro de tablero (cm)	Flechas horizontal en cabeza pilono (cm)	Flecha vertical en centro de tablero (cm)	Máximas tensiones rigidización [Mpa]	área cable (cm ²)
				cables laterales	cables centrales
20,41	46,48	19,56	44,12	237,908	-270,658
		19,07	42,61	224,139	-256,666
		18,8	41,71	215,857	-243,469
		18,45	40,48	204,578	-229,613
		18,15	39,38	194,478	-217,238
		17,82	38,09	182,592	-202,66
		17,61	37,22	174,644	-192,94
		17,5	36,7	169,74	-186,958
		17,33	35,95	162,908	-178,643
		17,15	35,07	154,655	-168,633
		3,26	11,41		

Tabla 8.2.2 Resultados en desplazamientos y tensiones un plano atirantado mixto