



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**SISTEMAS DE SOPORTE ESTRUCTURAL  
PARA LA CATENARIA EN LÍNEAS FÉRREAS.  
SIMULACIÓN Y ESTUDIO COMPARATIVO**

**Autor:**

**Sobrino Cerezo, Daniel**

**Tutor:**

**Lorenzana Ibán, Antolín**

**Magdaleno González, Álvaro**

**C.A., I.T., M.M.C. y Teoría de  
Estructuras**

**Valladolid, Julio del 2019.**



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a mi tutor Antolín, por su dedicación, sus consejos y su implicación para la realización de mi TFG. Has sido de mucha ayuda durante todo este tiempo, me has enseñado y he aprendido mucho de tus conocimientos.

En segundo lugar, y no por ello menos importante, a mis padres Miguel y Alejandra, por todo vuestro esfuerzo, apoyo incondicional y paciencia en toda mi carrera universitaria.

En tercer lugar a mis amigos de la carrera, a los que empezaron conmigo y a los que he ido conociendo a lo largo de esta aventura y que han conseguido que las horas de estudio hayan sido mucho más llevaderas.

A cada uno de vosotros, MUCHAS GRACIAS.



## RESUMEN

En el presente trabajo fin de grado se hará alusión a la historia y evolución del ferrocarril en España, la importancia de la Alta Velocidad así como de las estructuras por la que está formada la red ferroviaria.

A continuación centraremos nuestro estudio en el conocimiento de las partes fundamentales por las que está formada la columna de electrificación y que nos permitirá describir las estructuras de sustentación de la catenaria como son el poste, pórtico y semipórtico.

Por último, utilizaremos el programa de elementos finitos Sap2000, con el que obtendremos diferentes desplazamientos, esfuerzos y diagramas de tensiones que nos permitirá realizar una comparación entre las tres estructuras destacadas anteriormente.

## PALABRAS CLAVE

Ferrocarril, catenaria, poste, pórtico, semipórtico.

## ABSTRACT

The present final degree Project will allude to the history and evolution of the railroad in Spain, the importance of the High Speed as well as the structures by which the railway network is formed.

Next we will focus our study on the knowledge of the fundamental parts by which the electrification column is formed and that will allow us to describe the support structures of the catenary, such as the post, gantry and semi-gantry.

Finally, we will use the finite element program Sap2000, with which we will obtain different displacements, stresses and stress diagrams that will allow us to make a comparison between the three structures highlighted above.

## KEY WORDS

Railroad, catenary, post, gantry, semi-gantry.



## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>15</b>
1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO .....	17
1.2. OBJETIVOS .....	17
1.3. PROGRAMA UTILIZADO .....	18
1.4. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	18
<b>CAPÍTULO 2: HISTORIA DE LA RED FERROVIARIA ESPAÑOLA .....</b>	<b>21</b>
<b>CAPÍTULO 3: ESTRUCTURA DE LA RED FERROVIARIA .....</b>	<b>29</b>
3.1. INTRODUCCIÓN.....	29
3.2. INFRAESTRUCTURA .....	30
3.2.1. ELEMENTOS QUE COMPONEN LA INFRAESTRUCTURA DE VÍA .....	30
❖ Terraplenes .....	30
❖ Trincheras .....	30
❖ Rasantes .....	31
❖ Media ladera .....	32
❖ Puentes y viaductos .....	32
❖ Túneles.....	32
❖ Pasos a distinto nivel .....	33
❖ Pasos a nivel .....	33
❖ Drenaje transversal.....	33
3.3. SUPERESTRUCTURA .....	34
3.3.1. VÍA .....	34
❖ Balasto .....	34
❖ Traviesas.....	35
❖ Carril.....	35
3.3.2. APARATOS DE VÍA.....	36
❖ Desvíos.....	37
❖ Travesías.....	37
❖ Combinación de aparatos de vías.....	38
3.3.3. SEÑALIZACIÓN .....	38
3.4. COLUMNA DE ELECTRIFICACIÓN .....	40
3.4.1. MACIZOS DE POSTES Y ANCLAJES.....	40

3.4.2.	POSTES, SEMIPÓRTICOS Y PÓRTICOS .....	42
3.4.3.	MÉNSULAS .....	44
3.4.4.	AISLADORES.....	46
3.4.5.	HILO DE CONTACTO.....	47
3.4.6.	HILO SUSTENTADOR .....	48
3.4.7.	PÉNDOLAS.....	50
3.4.8.	EQUIPOS DE COMPENSACIÓN .....	52
3.4.9.	PANTÓGRAFO .....	53
<b>CAPÍTULO 4: SUPERESTRUCTURA DE SUSTENTACION DE LA CATENARIA.....</b>		<b>55</b>
4.1.	POSTE .....	56
4.2.	PORTICOS RIGIDOS.....	58
4.3.	SEMIPÓRTICO .....	59
<b>CAPÍTULO 5: MODELADO DE LAS ESTRUCTURAS DE SUSTENTACION DE LA CATENARIA .....</b>		<b>61</b>
5.1.	MODELADO DEL POSTE.....	61
5.1.1.	DESPLAZAMIENTOS .....	69
5.1.2.	DIAGRAMA DE AXILES .....	70
5.1.3.	DIAGRAMA DE TENSIONES .....	71
5.1.4.	PANDEO.....	72
5.2.	MODELADO DEL SEMIPÓRTICO.....	73
5.2.1.	DESPLAZAMIENTOS .....	79
5.2.2.	DIAGRAMA DE AXILES .....	80
5.2.3.	DIAGRAMA DE TENSIONES .....	82
5.2.4.	PANDEO.....	84
5.3.	MODELADO DEL PÓRTICO .....	84
5.3.1.	DESPLAZAMIENTOS .....	90
5.3.2.	DIAGRAMA DE AXIL .....	91
5.3.3.	DIAGRAMA DE TENSIONES .....	93
5.3.4.	PANDEO.....	94
5.4.	EFFECTO DEL MOMENTO FLECTOR.....	95
5.5.	DISCUSION DE RESULTADOS .....	96
5.5.1.	Desplazamiento del punto de aplicación de las cargas .....	97
5.5.2.	Desplazamiento de postes y dinteles .....	98

5.5.3. Axiles máximos.....	100
5.5.4. Tensiones máximas de los pilares.....	100
5.5.5. Tensiones máximas en los dinteles.....	100
5.5.6. Coeficientes de pandeo.....	100
5.5.7. Aplicación de la norma.....	101
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES .....</b>	<b>107</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>109</b>
<b>ANEXO I:.....</b>	<b>113</b>
<b>ANEXO II:.....</b>	<b>115</b>
<b>ANEXO III:.....</b>	<b>117</b>
<b>ANEXO IV:.....</b>	<b>119</b>
<b>ANEXO V:.....</b>	<b>121</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Viajeros que utilizaron el tren para desplazamientos (Fuente INE año 2019) .....	15
Figura 1.2: Viajeros que utilizaron el tren de media distancia (Fuente INE año 2019) .....	16
Figura 1.3: Viajeros que utilizaron el tren de larga distancia (Fuente INE año 2019) .....	16
Figura 2.1: Los impulsores del ferrocarril Barcelona-Mataró .....	22
Figura 2.2: Tren AVE S-100. Trayecto Madrid-Sevilla año 1992 .....	23
Figura 2.3: Fragmentación de RENFE en 2005 .....	24
Figura 2.4: Pasajeros por km de alta velocidad. Año 2016 .....	26
Figura 2.5: Líneas de Alta Velocidad en España en 2019 .....	26
Figura 2.6: Red ferroviaria existente en la península .....	27
Figura 3.1: Diferencia entre trinchera y terraplén .....	30
Figura 3.2: Caso Mixto y en Línea .....	31
Figura 3.3: Tipos de rasantes .....	31
Figura 3.4: Estructuras ferroviarias .....	32
Figura 3.5: Túneles .....	32
Figura 3.6: Paso a distinto nivel .....	33
Figura 3.7: Paso a nivel .....	33
Figura 3.8: Balasto .....	34
Figura 3.9: Traviesas y sus elementos de unión .....	35
Figura 3.10: Partes del carril .....	36
Figura 3.11: Elementos que componen los cambios de agujas .....	36
Figura 3.12: Tipos de desvíos sencillos .....	37
Figura 3.13: Tipos de combinaciones de aparatos de vía .....	38

Figura 3.14: Señal semafórica .....	38
Figura 3.15: Señal luminosa .....	39
Figura 3.16: Señal portátil .....	39
Figura 3.17: Señal de limitación de velocidad .....	39
Figura 3.18: Cimentación cilíndrica .....	40
Figura 3.19: Macizos de postes y anclajes .....	41
Figura 3.20: Armadura mediante pernos .....	42
Figura 3.21: Armadura mediante micropilotes .....	42
Figura 3.22: Ejemplos de postes en vía .....	43
Figura 3.23: Ejemplo de pórtico para varias vías .....	43
Figura 3.24. Catenaria con ménsula en celosía .....	44
Figura 3.25. Catenaria con ménsula tubular .....	44
Figura 3.26: Partes que componen el cuerpo de ménsula .....	45
Figura 3.27: Diferentes tipos de aisladores .....	47
Figura 3.28: Sección del hilo de contacto de una catenaria .....	47
Figura 3.29: Posición del hilo de contacto con respecto al eje de la vía .....	48
Figura 3.30: Esquema básico de una sección longitudinal de una catenaria.	49
Figura 3.31: Ejemplos de secciones de hilos sustentadores .....	50
Figura 3.32: Distribución de péndolas .....	50
Figura 3.33: (a) Péndola mecánica (b) Péndola equipotencial .....	51
Figura 3.34: Equipo de compensación mediante contrapesos .....	52
Figura 3.35: Partes fundamentales de un pantógrafo .....	54
Figura 5.1: Propiedades del mallado .....	62
Figura 5.2: Mallado .....	62
Figura 5.3: Selección de materiales .....	63
Figura 5.4: Selección de perfiles .....	64

Figura 5.5: Crear perfil .....	65
Figura 5.6: Creación del perfil .....	66
Figura 5.7: Estructura del poste .....	67
Figura 5.8: Asignación de libertades .....	67
Figura 5.9: Asignación de cargas .....	68
Figura 5.10: Desplazamiento debido a las cargas .....	69
Figura 5.11: Diagrama de axiles .....	70
Figura 5.12: Detalle de axil .....	71
Figura 5.13: Diagrama de tensiones normales $\sigma_{xx}$ .....	72
Figura 5.14: Primer modo de pandeo .....	73
Figura 5.15: Propiedades del mallado .....	74
Figura 5.16: Mallado .....	74
Figura 5.17: Selección de materiales .....	75
Figura 5.18: Selección de perfiles .....	76
Figura 5.19: Estructura del semipórtico .....	77
Figura 5.20: Asignación de libertades .....	78
Figura 5.21: Asignación de cargas .....	78
Figura 5.22: Desplazamiento debido a las cargas .....	79
Figura 5.23: Diagrama de axiles .....	81
Figura 5.24: Detalle de axil .....	82
Figura 5.25: Diagrama de tensiones normales $\sigma_{xx}$ .....	83
Figura 5.26: Detalle de tensiones normales $\sigma_{xx}$ del dintel .....	83
Figura 5.27: Primer modo de pandeo .....	84
Figura 5.28: Propiedades del mallado .....	85
Figura 5.29: Mallado .....	86
Figura 5.30: Selección de materiales .....	86

Figura 5.31: Selección de perfiles .....	87
Figura 5.32: Estructura del pórtico .....	88
Figura 5.33: Asignación de libertades .....	89
Figura 5.34: Asignación de cargas .....	90
Figura 5.35: Desplazamiento debido a las cargas .....	91
Figura 5.36: Diagrama de axiles .....	92
Figura 5.37: Diagrama de tensiones normales $\sigma_{xx}$ .....	93
Figura 5.38: Detalle de tensiones normales $\sigma_{xx}$ en la mitad de la estructura	94
Figura 5.39: Primer modo de pandeo .....	95
Figura 5.40: Detalle del momento flector .....	96
Figura 5.41: Desplazamiento de las cargas .....	97
Figura 5.42: Desplazamiento horizontal de los postes .....	98
Figura 5.43: Desplazamiento vertical de los postes .....	99
Figura 5.44: Desplazamiento de los dinteles .....	99

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Los medios de transporte son una ayuda fundamental para la sociedad ya que nos permite desplazarnos de un lado a otro teniendo, en la actualidad, diversos tipos que se ajustan a nuestras necesidades y que podemos elegir en función de nuestras comodidades. Dichos medios han tenido una gran evolución a lo largo de la historia, es decir, desde sus inicios hasta hoy en día. Podemos diferenciar los vehículos terrestres que comenzaron siendo impulsados mediante animales o la implantación y desarrollo de la máquina de vapor en el siglo XVIII siendo la base en la que se sustenta la revolución industrial inglesa.

El Instituto Nacional de Estadística en el año 2017 llevó a cabo un estudio en el que hizo un ranking del transporte de viajeros en España y la utilización de los mismos. Destaca en primer lugar el avión con 36,62 millones de usuarios seguido del AVE (Alta Velocidad Española) con 21,10 millones, el autobús con 16,46 millones, 11,79 millones de pasajeros transportados en trenes de larga distancia y, en último lugar, el transporte marítimo con 10,68 millones.

En el trabajo que se va a exponer a continuación se destaca la utilización del ferrocarril y el estudio de su estructura como uno de los principales medios de transporte que existen en la actualidad y que ha tenido y tiene un largo recorrido.

Tomando de ejemplo el estudio realizado por el INE (marzo, 2019) [W1], en la figura 1 se puede observar como la utilización en España del tren de manera general y específicamente en los desplazamientos en media y larga distancia ha ido creciendo con el paso del tiempo:

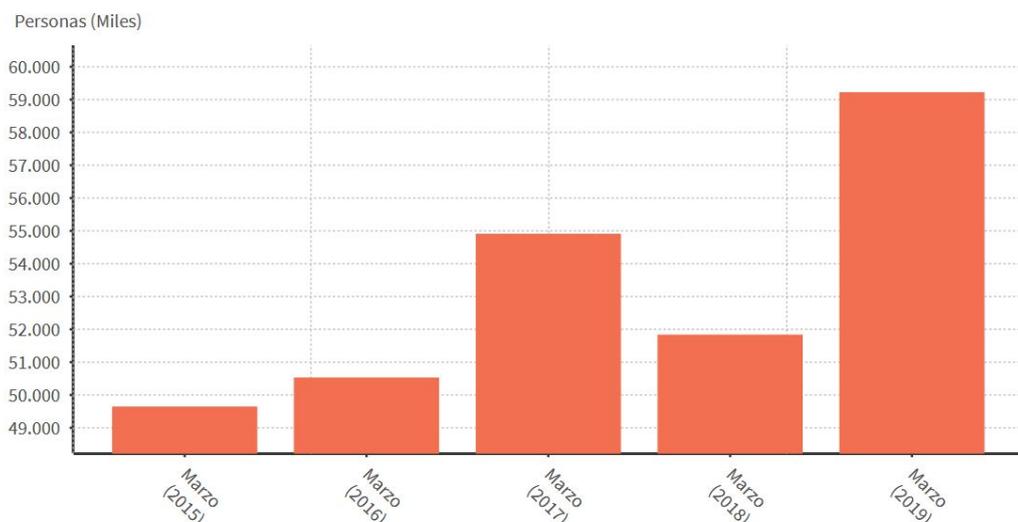


Figura 1.1: Viajeros que utilizaron el tren para desplazamientos (Fuente INE año 2019)

En la figura 2 se observa como en marzo de 2015 el número de pasajeros era de 49.648 pasajeros hasta alcanzar los 59.225 pasajeros con respecto a marzo de este año.

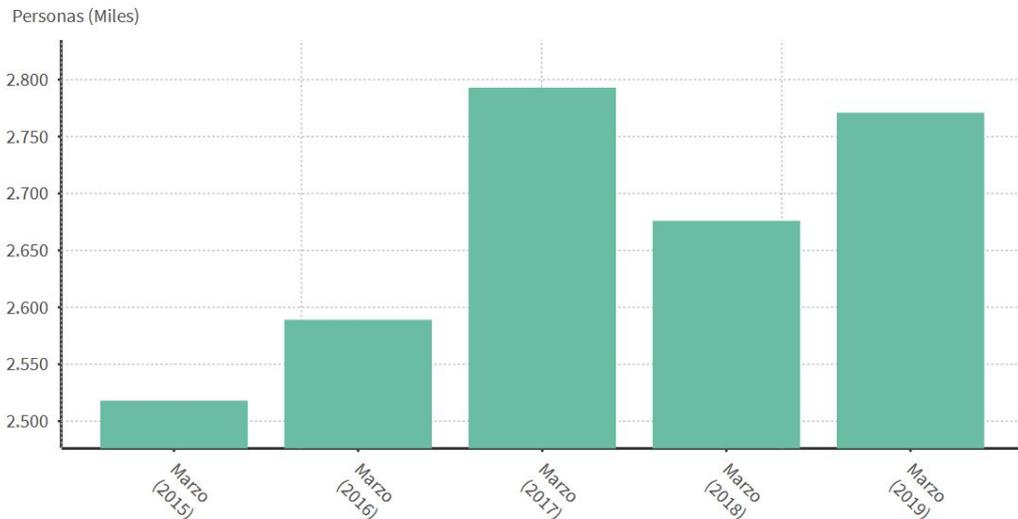


Figura 1.2: Viajeros que utilizaron el tren de media distancia (Fuente INE año 2019)

En la figura 3 se puede observar como en marzo de 2015 el número de pasajeros que utilizaron el tren en su modalidad de media distancia fue de 2.518 personas frente a las 2.771 que lo utilizaron en marzo de 2019.

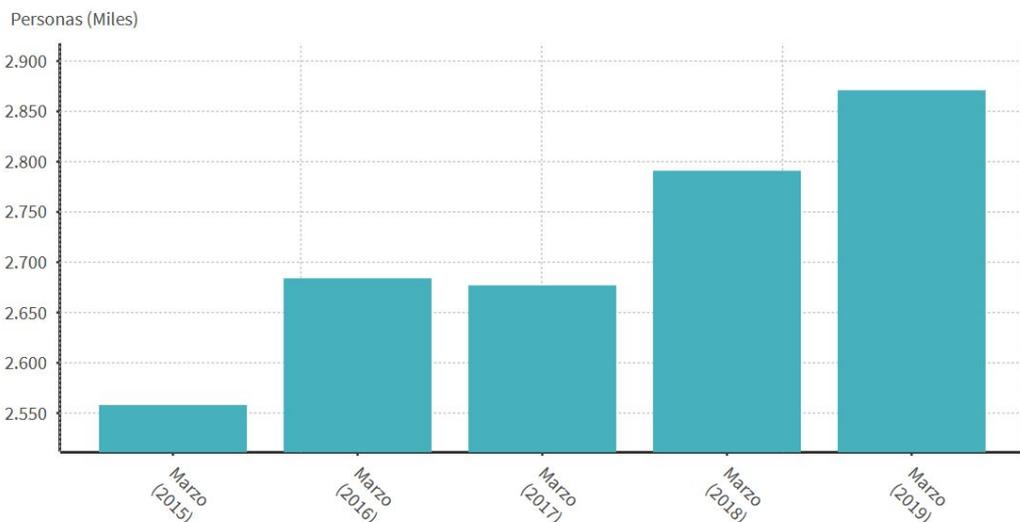


Figura 1.3: Viajeros que utilizaron el tren de larga distancia (Fuente INE año 2019)

En marzo de 2015 el número de pasajeros que optaron por la modalidad de larga distancia fueron de 2.558 personas en contraposición a las que actualmente hacen uso de ella con 2.871 con datos de marzo de 2019.

Se destaca un pequeño descenso en la utilización del tren en lo que en sí respecta en la modalidad de media distancia en marzo de 2018 frente al aumento progresivo en la modalidad de larga distancia. Ello es debido a que las personas optaron para desplazarse dentro de la geografía española el avión, en su gran mayoría destacando un aumento del 10%, y el uso de los trenes larga distancia o AVE con un aumento del 3,8%.

## 1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

En la elección de este medio de transporte como temática del trabajo fin de grado se ha tenido en cuenta varios aspectos formales. Por un lado el personal, ya que mi familia está muy relacionada con el mundo ferroviario, el profesional por la curiosidad e inquietud que me ocasiona poder llegar a comprender de una forma más profunda todo su entramado, y por otro el aspecto académico, ya que bajo mi punto de vista el Grado de Ingeniería Mecánica concentra numerosos conceptos teóricos que son necesarios y nos sirven de base cuando queremos implementarlos en la práctica pero que nos son insuficientes a la hora de aplicarlos debido a la cantidad de complejidades con las que podemos encontrarnos en la realidad; es decir y tomando de ejemplo lo que se va a exponer más adelante, el estudio de la catenaria y sus componentes o estructuras principales.

## 1.2. OBJETIVOS

Este trabajo fin de grado se caracteriza en su mayor parte por ser un trabajo de carácter descriptivo y explicativo de las estructuras principales de la vía férrea, cuya finalidad es la de comparar los esfuerzos que sufren las distintas estructuras que pueden sujetar una catenaria comprobando si se ajustan en la medida de lo posible a la realidad. Para todo ello se han tenido en cuenta los siguientes objetivos a conseguir:

- Comprender de una forma más profunda el funcionamiento de todo lo relacionado con el ferrocarril como es su organización, de qué forma está estructurado y cuáles son los componentes o dispositivos principales que hacen posible la circulación ferroviaria.
- Aprender a lidiar con un proyecto ferroviario real sintetizando la información a la mínima imprescindible necesaria que me permita resumir y sacar las conclusiones necesarias para este trabajo fin de grado.

- Aprender el funcionamiento básico del programa informático Sap2000, modelando las estructuras básicas de la red ferroviaria y calculando los distintos estados tensionales de las estructuras que nos sirvan de comparación entre ellos.

### 1.3. PROGRAMA UTILIZADO

En este trabajo vamos a utilizar el programa informático Sap2000, se trata de un programa de elementos finitos que permite modelar, dimensionar y analizar multitud de problemas relacionados con ingeniería de estructuras.

Hemos elegido este programa por la gran versatilidad que ofrece, pudiendo modelar tanto en 3D como en 2D multitud de estructuras como pueden ser puentes, edificios, estadios, hasta cualquier tipo de infraestructura con necesidad de ser analizada y dimensionada. Permite añadir multitud de acciones como son cargas de viento, sismo o cargas propias así como numerosos perfiles metálicos, de aluminio, conformados en frío, todo ello dependiendo de la normativa a la que se haga referencia en función del país en el que se esté analizando la estructura.

En nuestro caso modelaremos tres estructuras sencillas sometidas a diferentes cargas y las analizaremos únicamente en 2D, comprobando diferentes estados tensionales y comparándolos entre ellos.

### 1.4. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Este trabajo está dividido en 6 capítulos bien diferenciados y correlativos:

- Capítulo 1: en este capítulo se hace una pequeña introducción a los medios de transporte existentes y a su utilización en la sociedad además de indicar también los objetivos principales que se persiguen en este trabajo.
- Capítulo 2: en este capítulo se hace un breve resumen de cómo ha ido evolucionando el ferrocarril español a lo largo de su historia, es decir, desde sus inicios a principios del siglo XIX hasta la actualidad.
- Capítulo 3: en este capítulo se van a explicar las principales subdivisiones en las que está formada la vía ferroviaria como son la infraestructura y la superestructura, para acabar explicando de una forma más amplia el conjunto llamado columna de electrificación cuya función principal es la sujeción de la catenaria.

- Capítulo 4: en este capítulo, mediante información y datos obtenidos de un proyecto ferroviario real, vamos a extraer los datos necesarios para explicar las tres estructuras principales que luego modelaremos en el siguiente capítulo.
- Capítulo 5: en este capítulo vamos a explicar los pasos fundamentales que hemos llevado a cabo con el programa Sap2000 para modelar las estructuras y calcular los diferentes estados tensionales para su posterior comparación.
- Capítulo 6: en este capítulo vamos a exponer las conclusiones a las que hemos llegado a través de toda la información y cálculos realizados en el trabajo.



## CAPÍTULO 2: HISTORIA DE LA RED FERROVIARIA ESPAÑOLA

Los primeros ferrocarriles comenzaron a aparecer en Europa a principios del siglo XIX, siendo en 1804 cuando se inauguró en Inglaterra el primer ferrocarril de servicio público el cual estaba impulsado por caballos.

No sería hasta el 27 de septiembre de 1825, fecha clave en la historia de los caminos de hierro, nombre con el que era también conocido al ferrocarril, cuando se inauguró la primera línea de ferrocarril esta vez impulsada ya por locomotora, y que unía las ciudades de Stockton y Darlington en Inglaterra [4] [5].

En España los primeros intentos de construir el ferrocarril tuvieron lugar a finales de la década de 1820, cuando en 1829 fue otorgada la primera concesión a José Díez Imbrechts, uno de los precursores del ferrocarril en nuestro país, terrateniente de Puerto Real y propietario de una bodega de vinos en Cádiz.

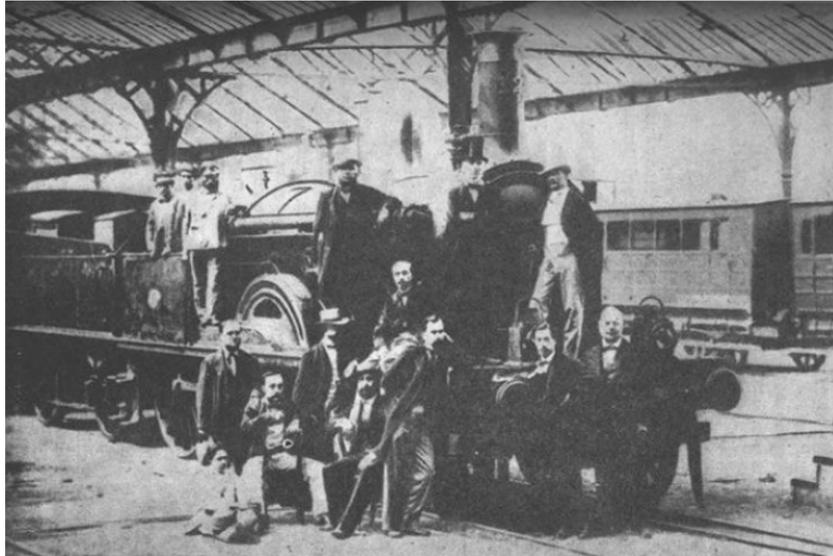
Fue realizado a través de la llamada Asociación para la Empresa de un Carril de Hierro, queriendo construir un ferrocarril desde Jerez hasta El Portal, de una longitud de apenas 6 Km con el objetivo de la exportación de vinos de la región jerezana. Finalmente esta idea fracasó debido a la falta de capital.

El ferrocarril en España en sus comienzos encontró grandes dificultades debido al desconocimiento técnico de la época, la complicada orografía de la península, falta de capital y la inestabilidad económica y política que se vivía en la península por aquella época. Finalmente este transporte fue una de las piezas claves de la revolución industrial española [1].

No fue hasta el 19 de noviembre de 1837 cuando se construyó el primer ferrocarril español, que no fue construido en la península ibérica, si no que se construyó en la provincia caribeña de Cuba, la cual era una provincia del Estado español, entre las ciudades de La Habana y Güines, con el objetivo del transporte de azúcar.

En España para solventar algunos problemas de tipo orográfico, los ingenieros Santa Cruz y Subercase propusieron un ancho de vía con una separación de 1.668 mm, en lugar de los 1.435 mm que se utilizaba en el marco europeo, todo ello propiciado por las peculiaridades orográficas de nuestro país que hace que se requieran máquinas de mayor potencia. Este nuevo estándar de anchura de vía se conoce como “ancho de vía ibérico”.

Para ver el primer ferrocarril dentro de la península ibérica se tuvo que esperar hasta el 28 de octubre de 1848 cuando se inauguró la línea entre Barcelona y Mataró [W2] [W3] con una longitud de 28 Km. El principal responsable de este hito fue Miquel Biada representado en la figura 2.1, habiendo participado también en la construcción de la línea ferroviaria de La Habana y el que es considerado como una persona que sentó las bases de la industria del ferrocarril a nivel nacional.



*Figura 2.1: Los impulsores del ferrocarril Barcelona-Mataró*

Tres años más tarde, en 1851, se inauguraría el tramo de Madrid-Aranjuez y poco después los tramos Langreo-Gijón Barcelona-Granollers y Xativa-Valencia.

En la década de los 50 el ferrocarril se fue extendiendo por todo el país gracias a la aprobación en 1855 de la ley de ferrocarriles que propició un auge muy grande en cuanto a construcciones ferroviarias se refiere, creando diversas compañías de ferrocarriles que permitieron crear nuevos tramos de vías ferroviarias. Destacan 3 grandes compañías como son la MZA, línea que une Madrid-Zaragoza-Alicante creada en 1856, la compañía de Ferrocarriles del Norte creada en 1858 y la compañía de Ferrocarriles Andaluces, línea que une Sevilla-Jerez-Cádiz creada en 1877.

El ferrocarril se convirtió en el medio de transporte preferido del siglo XIX por ventajas como poder asumir una mayor capacidad de carga, mayor velocidad en el transporte y una disminución de tiempo y costes.

A principios del siglo XX la red ferroviaria española ya contaba con 15.000 Km, con más de 10.000 siendo de ancho ibérico y el resto de vía estrecha. A partir de ahora el ritmo de crecimiento del ferrocarril descendió bruscamente debido a las nuevas dificultades económicas, la aparición de la crisis de los años 30 y la guerra civil.

En 1941 nace la Red de los Ferrocarriles Españoles, RENFE, como consecuencia de la intervención estatal que tuvo lugar rescatando las diversas compañías ferroviarias, teniendo como objetivo reconstruir las infraestructuras dañadas durante la guerra civil y establecer el nuevo modelo de gestión de la organización, teniendo a su cargo 12.401 Km de vía.

Durante los años venideros el tren fue perdiendo protagonismo a consecuencia de otros medios de transporte como el coche o el avión, por lo que en la década de los 80 la administración decidió dar un nuevo impulso al ferrocarril, realizando mayores inversiones y modernizando la infraestructura ferroviaria con la que llegaría el tren de alta velocidad.

Se tenía como proyecto realizar un trayecto que uniera la meseta castellana con Andalucía sin tener que pasar por Despeñaperros debido a las complicaciones orográficas que ello ocasionaba. Tras varios años de estudio se llegó a la conclusión de que lo mejor era una línea de ancho internacional, ya que se podrían aprovechar trenes e instalaciones ya probadas por Europa.

A raíz de todo esto llega otra fecha clave en la historia del ferrocarril español como es el 14 de abril de 1992, día en el que se inauguró la primera línea y tren de alta velocidad AVE [W4], entre Madrid y Sevilla coincidiendo con la Exposición Universal de Sevilla. La maquinaria de dicho tren se observa en la figura 2.2.



*Figura 2.2: Tren AVE S-100. Trayecto Madrid-Sevilla año 1992*

Este hito permitió la circulación de trenes a más de 250 Km/h realizando el trayecto entre Madrid y Sevilla en 2 horas y 55 minutos, con paradas intermedias en Ciudad Real, Puertollano y Córdoba. Anteriormente a la llegada del AVE, los trenes convencionales generaban velocidades máximas que oscilaban entre los 70 y 100 Km/h y el trayecto entre Madrid y Sevilla se alargaba hasta las más de 7 horas de duración.

A partir de la implantación del primer tren de alta velocidad, gracias a la buena acogida que tuvo y de superar incluso al avión en lo que a cuota de mercado se refiere, la evolución de los trenes y líneas de alta velocidad va a ser formidable, construyéndose una gran cantidad de líneas de alta velocidad como describiré más adelante.

El de 1 enero de 2005, debido a la entrada en vigor de la Ley del Sector Ferroviario que se promulgo en octubre de 2003, RENFE se fragmentó en dos nuevas empresas públicas totalmente independientes como se observa en la figura 2.3, naciendo el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF), encargado actualmente de mantener las infraestructuras siendo el heredero de la marca RENFE, y RENFE-Operadora, que asume la prestación del servicio de transporte de viajeros y mercancías.



Figura 2.3: Fragmentación de RENFE en 2005

A continuación se muestra un resumen de las líneas de alta velocidad más importantes [W5] y significativas, desde sus comienzos hasta la actualidad:

- Abril de 1992 → LAV Madrid - Sevilla
- Octubre de 2003 → Tramo Madrid – Zaragoza - Lleida correspondiente a la LAV Madrid – Barcelona - frontera francesa
- Noviembre de 2005 → LAV Madrid – Toledo
- Diciembre de 2006 → Tramo Córdoba – Antequera correspondiente a la LAV Córdoba – Málaga
- Diciembre de 2007 → LAV Madrid – Valladolid

- Febrero de 2008 → Tramo Camp de Tarragona – Barcelona correspondiente a la LAV Madrid – Barcelona – frontera francesa
- Diciembre de 2010 → Tramo Madrid – Cuenca – Albacete – Valencia correspondiente a la LAV Madrid – Castilla la Mancha – Comunidad Valenciana – Región de Murcia
- Diciembre de 2011 → Tramo Ourense – Santiago – A Coruña correspondiente a la LAV Madrid – Galicia
- Enero de 2013 → Tramo Barcelona – Figueres correspondiente a la LAV Madrid – Barcelona – frontera francesa
- Septiembre de 2015 → Conexión Valladolid – Palencia – León
- Diciembre de 2015 → Tramo Olmedo – Zamora
- Enero de 2018 → Tramo Valencia – Castellón correspondiente a la LAV Madrid – Castilla La Mancha – Comunidad Valenciana – Región de Murcia

Actualmente la red española de alta velocidad sigue creciendo y está trabajando en la construcción de nuevas infraestructuras, además de encontrarse en fase de estudio o de proyecto otras muchas conexiones que tiene previstas construir, siendo algunas de ellas:

- Tarragona - Valdellós
- Monforte del Cid – Murcia
- Antequera – Granada
- Zamora – Pedralba – Ourense
- Venta de Baños – Burgos
- Plasencia – Badajoz
- Murcia – Almería
- Palencia – Reinosa – Santander

En la actualidad España es el país que tiene la red de alta velocidad más extensa de Europa y la segunda del mundo, únicamente detrás de China [W6] como se puede observar en la figura 2.4, contando con alrededor de 3.240 Km. Sin embargo y aunque las cifras han ido aumentando progresivamente, los españoles usuarios del AVE son los que menos distancia recorren como se demuestra en el gráfico siguiente del año 2016:

## SISTEMAS DE SOPORTE ESTRUCTURAL PARA LA CATENARIA EN LÍNEAS FÉRREAS. SIMULACIÓN Y ESTUDIO COMPARATIVO

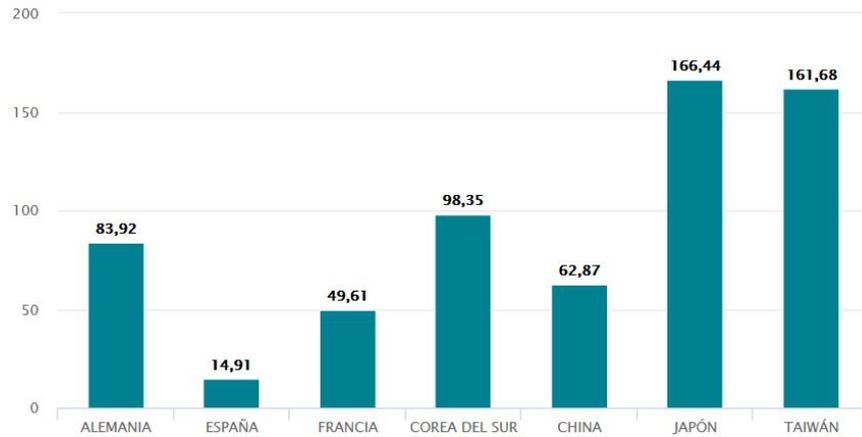


Figura 2.4: Pasajeros por km de alta velocidad. Año 2016

A continuación se van a mostrar dos imágenes del servicio ferroviario con el que contamos actualmente en la península, en la figura 2.5 se muestra la red de alta velocidad de la que disponemos actualmente, mientras que en la figura 2.6 se puede ver toda la red ferroviaria existente y los diferentes anchos de vías que nos podemos encontrar.

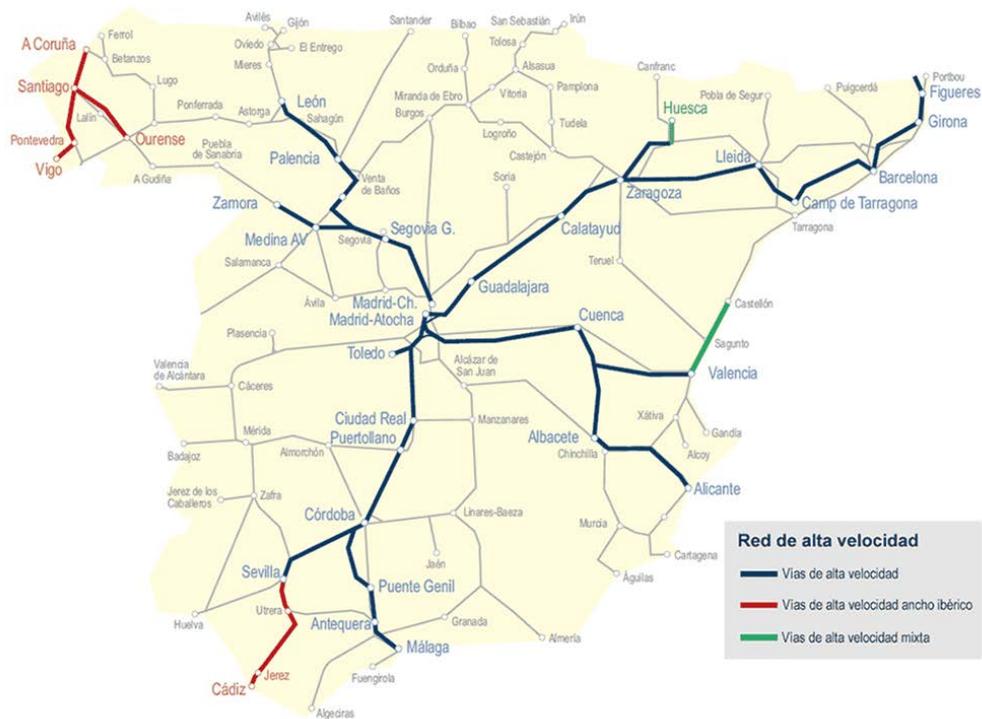


Figura 2.5: Líneas de Alta Velocidad en España en 2019

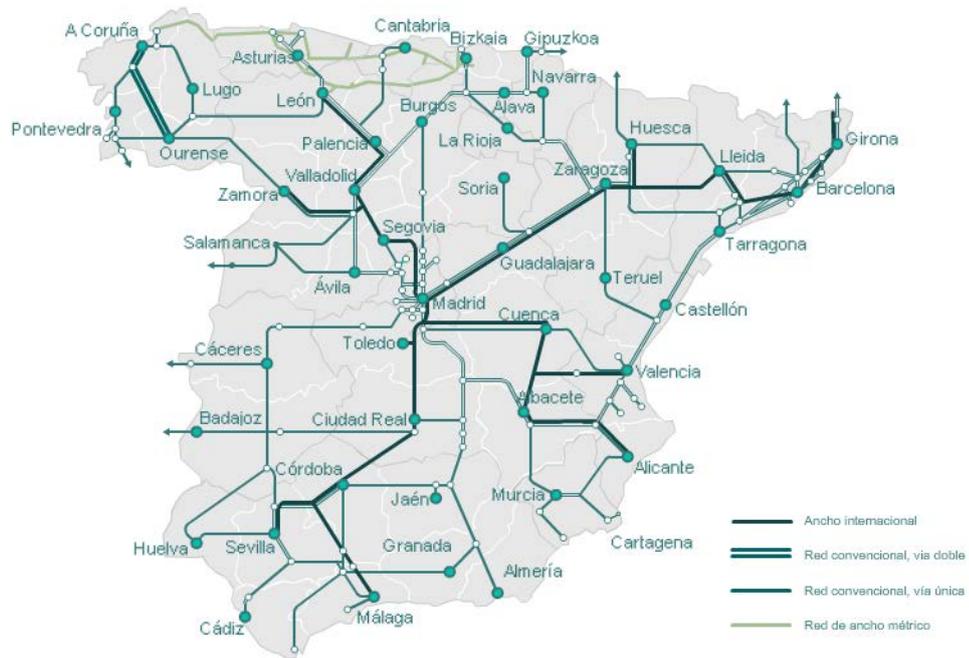


Figura 2.6: Red ferroviaria existente en la península



## CAPÍTULO 3: ESTRUCTURA DE LA RED FERROVIARIA

### 3.1. INTRODUCCIÓN

Para comenzar vamos a explicar la diferencia entre dos términos que a veces pueden llevar a confusión:

- Infraestructura ferroviaria: se define como la totalidad de los elementos vinculados a las vías principales, las de servicio y a los ramales de desviación para particulares, exceptuando las vías situadas dentro de los talleres de reparación de material y depósitos o garajes del mismo. Entre dichos elementos se encuentran los terrenos, estaciones, terminales de carga, obras civiles, instalaciones vinculadas con la gestión y regulación del tráfico y seguridad, electrificación, señalización, etc. [W7]
- Línea ferroviaria: se define como la parte de la infraestructura ferroviaria que une dos puntos determinados del territorio y que está integrada por elementos tales como la plataforma de la vía, superestructura, carriles, traviesas y material de sujeción, obras civiles como puentes, viaductos y tuéneles, y las distintas instalaciones que permiten un correcto funcionamiento y seguridad de los trayectos. Quedan excluidos en este apartado las estaciones y terminales o instalaciones de atención al viajero. [W7]

Previamente a la instalación del tendido de una vía de ferrocarril y de todos los elementos de los que se compone, es necesario e imprescindible realizar operaciones de acondicionamiento y adecuación del terreno sobre el que van a reposar todos los elementos que constituyen la vía. El conjunto de estas operaciones previas llevan a la formación de lo que técnicamente se conoce como infraestructura de vía, es el paso previo necesario que lleva a otro conjunto de operaciones que son las que darán forma a la vía tales como los carriles, traviesas, sujeciones, aparatos de vía, y que se conoce como superestructura de vía.

Una vía, ya sea una línea de alta velocidad o convencional, debe asegurarse cumplir tres aspectos básicos y fundamentales: la seguridad, regularidad y conformidad. Para cumplirlo, y como primera medida de seguridad que se debe adoptar, es proporcionar a los trenes un camino de rodadura continuo y estable que permita transmitir de forma homogénea las cargas generadas por el paso de los trenes a la infraestructura.

A continuación se va a explicar de formas más detallada de que partes se componen la infraestructura y la superestructura [1] [2], nos centraremos en todo lo que se refiere a las líneas de alta velocidad (LAV), aunque muchas partes o componentes son comunes tanto para las vías de alta velocidad como para las vías de ancho ibérico.

## 3.2. INFRAESTRUCTURA

La infraestructura de vía es el conjunto de obras de tierra y de fábrica necesarias para construir la plataforma sobre la que se apoya la superestructura de la vía. Entre las obras de tierra se encuentran los terraplenes, las trincheras y los túneles, mientras que las obras de fábrica son los puentes, viaductos, drenajes y pasos a nivel.

### 3.2.1. ELEMENTOS QUE COMPONEN LA INFRAESTRUCTURA DE VÍA

La infraestructura de una vía ferroviaria está compuesta por una serie de elementos [5] [W8] entre los cuales podemos distinguir los siguientes:

#### ❖ Terraplenes

Los terraplenes están formados por superficies que tienen un cierto grado de inclinación con respecto a la dirección transversal al eje de la vía. Para solventar este problema se emplea material de relleno para crear una superficie por encima de la del terreno completamente horizontal.

#### ❖ Trincheras

Las trincheras tienen un fin similar al de los terraplenes pero su proceso es justamente el contrario, en este caso se lleva a cabo la retirada de material, lo cual nos permite evitar pendientes fuertes y/o túneles salvando una elevación puntual del terreno.

En la figura 3.1 se va a poder distinguir perfectamente entre ambas:

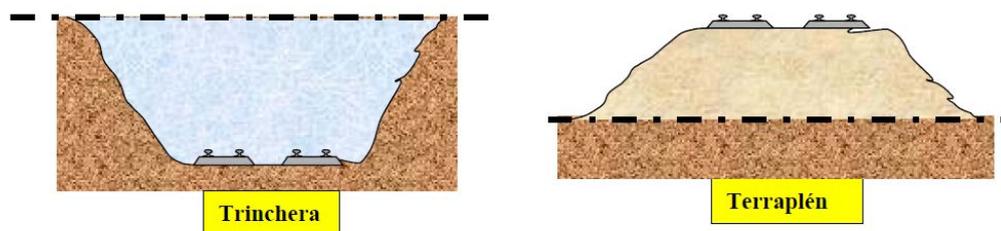


Figura 3.1: Diferencia entre trinchera y terraplén

Nos podemos encontrar también una combinación de ambos casos como se observa en la figura 3.2, que sería el caso Mixto, y que se suele utilizar en vías que transcurren por la ladera de una montaña. Por último tendríamos el caso en Línea, en el que únicamente se va a requerir una correcta nivelación del terreno, en la imagen siguiente vamos a poder apreciar estas diferencias:

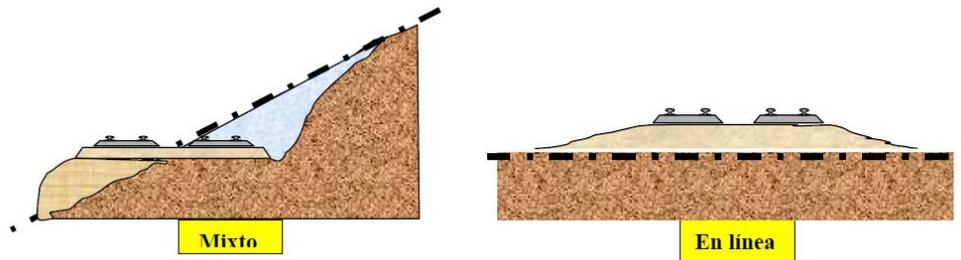


Figura 3.2: Caso Mixto y en Línea

El mantenimiento de los terraplenes y trincheras en el trazado ferroviario es fundamental ya que pueden existir movimientos de tierras o desprendimientos que pueden ocasionar la suspensión del tráfico ferroviario, por lo que es imprescindible un buen cuidado lo que en algunos casos conlleva la reposición de algún terraplén.

#### ❖ Rasantes

El objetivo de este tipo de acción es el de mantener la inclinación entre dos puntos lo más baja posible. Podemos encontrarnos con tres tipos de rasantes tal y como se observa en la figura 3.3, éstos son: en Rampa, cuando se recorre el plano inclinado en sentido ascendente a la circulación, en Pendiente, cuando se recorre el plano inclinado en sentido descendente a la circulación, y Horizontal, cuando no hay declividad alguna.

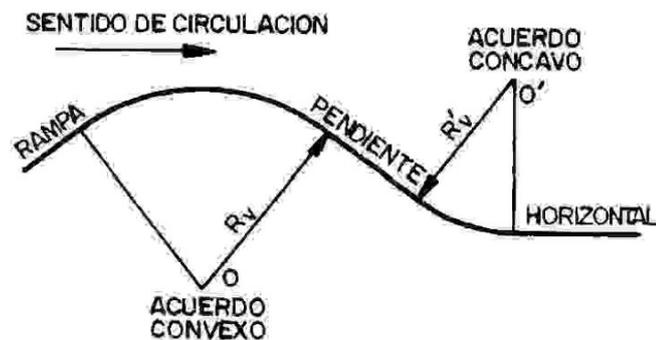


Figura 3.3: Tipos de rasantes

❖ **Media ladera**

Es una solución intermedia entre el terraplén y la trinchera, se lleva a cabo cuando la vía bordea un saliente o colina que tiene una ladera cuya inclinación es más pronunciada que la de un terraplén, pero no tanto como para tener que excavar una trinchera. El objetivo es retirar parte del material que obstaculiza el paso de la mitad del ancho de la vía y emplearlo como relleno para la otra mitad del paso de la vía.

❖ **Puentes y viaductos**

Son estructuras creadas para salvar depresiones del terreno como pueden ser ríos, valles, cruces con otras vías de comunicación o infraestructuras, etc. tal como se observa en la figura 3.4. La diferencia fundamental que hay entre un puente y viaducto es que los viaductos salvan un valle en su totalidad.



*Puente*

*Viaducto*

*Figura 3.4: Estructuras ferroviarias*

❖ **Túneles**

Son perforaciones en el terreno que sirven para cruzar montañas u otros tipos de elevaciones tal como se observa en la figura 3.5, para cruzar grandes núcleos de población o lugares de alto valor ambiental. Con ello se consigue eliminar parcialmente el impacto acústico y visual que genera el tren.



*Figura 3.5: Túneles*

❖ **Pasos a distinto nivel**

Pueden ser tanto inferiores, se observa en la figura 3.6, como superiores. Ambos permiten el cruce entre distintos viales pudiendo ser ferrocarril – carretera o ferrocarril – ferrocarril.



*Figura 3.6: Paso a distinto nivel*

❖ **Pasos a nivel**

Permite el cruce entre distintos viales, tal como se observa en la imagen 3.7. En este caso ambos se encuentran al mismo nivel, debiendo estar regulados y bien señalizados ya que se pueden cruzar tanto trenes, como automóviles e incluso peatones.



*Figura 3.7: Paso a nivel*

❖ **Drenaje transversal**

Canalizaciones utilizadas para que el agua de los cauces, arroyos o ríos no fluya por la explanación en la que se encuentra la vía y pueda producir algún tipo de desprendimiento o corrimiento de tierras ocasionando algún tipo de accidente.

### 3.3. SUPERESTRUCTURA

Una vez construida la infraestructura de la vía, el paso siguiente consiste en montar toda la superestructura de la vía por la que circularán los trenes.

Se entiende por superestructura de vía como el conjunto [W8] formado por carriles, contracarriles, traviesas y demás aparatos de vía necesarios para que los trenes puedan circular con garantías de eficacia y seguridad.

Actualmente la red de vías en la península, gestionada y mantenida por ADIF, está formada por 17.932 Km de vías, de los cuales 3.152 Km son líneas de alta velocidad, y el resto son líneas convencionales.

A continuación se van a explicar los diferentes componentes por los que está formada la superestructura de vía, organizados en varios grupos: vía, aparatos de vía y señalización.

#### 3.3.1. VÍA

Este es el primer elemento y el fundamental por el cual van a poder circular los trenes, y está compuesto por:

##### ❖ Balasto

Es un elemento granular de naturaleza silíceo sobre el que descansan las traviesas tal como se observa en la figura 3.8. Su función principal es amortiguar y repartir las cargas que ejercen los trenes sobre la vía entre una mayor superficie. Las piedras que forman el balasto tienen un tamaño entre 3 y 6 cm y proceden del machaqueo de cuarcitas, basaltos y granitos.

Tiene además otras grandes cualidades [W9] como una gran elasticidad, amortiguando las cargas de los trenes y haciendo que las traviesas queden bien fijadas, garantizando una estabilidad tanto longitudinal como transversal de la vía. Evita el crecimiento de vegetación en la plataforma, reduce el ruido por el paso de trenes y facilita el correcto drenaje de las aguas pluviales.



Figura 3.8: Balasto

❖ Traviesas

Son elementos que se sitúan en dirección transversal al eje de la vía y que constituyen la superficie donde se va a asentar el carril, transmitiendo las cargas producidas por los trenes al balasto. Actualmente se utilizan traviesas polivalentes las cuales permiten un sencillo cambio de ancho entre nacional e internacional, favoreciendo la circulación de trenes de cualquier ancho.

Están construidas de hormigón pretensado monobloque, tal como se observa en la figura 3.9, con un peso entre 295 y 315 Kg y unas dimensiones de 2,6 m de largo, 0,30 m de ancho y 0,24 m de alto [W10].

Para unir el carril y las traviesas y que se forme una unión rígida y sólida, se utilizan primero unas placas de asiento que sirven para regularizar las imperfecciones de ambas superficies de apoyo, cuya función es repartir las cargas además de ser un elemento amortiguador. El carril se fija a la traviesa por medio de sujeciones elásticas con clips y tirafondos.



Figura 3.9: *Traviesas y sus elementos de unión*

❖ Carril

Es una barra de acero laminado con forma de seta, su principal objetivo es la sustentación y el guiado de los trenes, sirviendo también en algunos casos de retorno de los circuitos eléctricos tanto de la catenaria como de señalización. Se distinguen tres partes básicas que se pueden observar en la figura 3.10:

- Cabeza: es la parte superior del carril, constituye el elemento de rodadura y el que está en contacto con las ruedas del tren.
- Patín: es la base del carril y la que se utiliza para sujetarlo a las traviesas.
- Alma: es la parte delgada e intermedia del carril que une la cabeza con el patín.

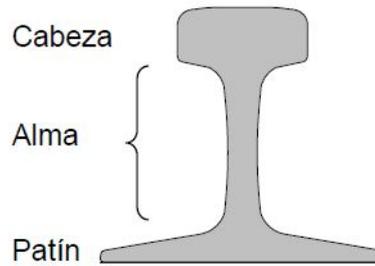


Figura 3.10: Partes del carril

Los carriles se sueldan por sus extremos mediante soldadura aluminotérmica pudiendo llegar a tener una longitud máxima de 288 m.

### 3.3.2. APARATOS DE VÍA

Son elementos que permiten el desdoblamiento de los carriles mediante unas piezas llamadas agujas [W11]. Estas piezas generan una bifurcación, es decir, de una vía salen dos, como se observa en la figura 3.11. Están compuestas de los siguientes elementos [W12]:

- Espadines: son carriles móviles que dependiendo en la posición que se encuentren harán que el tren tome un camino u otro de la bifurcación. Solo uno de los espadines debe estar pegado al rail principal ya que el otro debe dejar un espacio suficiente para que pase la pestaña de la otra rueda del eje.
- Corazón: punto en el que los raíles de las dos vías se juntan.
- Contracarriles: son elementos que evitan que se produzcan descarrilamientos al pasar por el corazón, guiando por dentro a la pestaña de la otra rueda del eje.



Figura 3.11: Elementos que componen los cambios de agujas

Cualquier cambio de agujas dispone de un mecanismo que acciona el desplazamiento de los espadines. Actualmente la mayoría suelen ser eléctricos, los cuales son accionados desde las estaciones o los Centros de Control de Tráfico (CTC), aunque todavía se pueden ver accionamientos mecánicos o manuales, realizados a distancia mediante un cable de acero o in situ en la vía.

En función del tipo de cambio de agujas nos podemos encontrar los siguientes casos:

❖ Desvíos

Es aquel que permite la bifurcación de una vía, haciendo posible el paso de circulación de una vía a otra, dando posibilidad de que los trenes más rápidos adelanten a los que sean más lentos, u ofreciendo una ruta alternativa ante cualquier imprevisto que haya podido surgir durante un trayecto programado. Está compuesto por los siguientes tipos:

- Sencillo: permite el paso de la circulación de una vía a otra. La primera recibe el nombre de vía directa y la segunda el de vía desviada. Ambas se pueden diferenciar en la figura 3.12.



*Figura 3.12: Tipos de desvíos sencillos*

- Dobles o de tres vías: se instalan cuando el espacio del que se dispone es reducido y no permite colocar más de un cambio de agujas seguido. Hace que de una vía salgan tres, generalmente una recta y dos laterales.
- Mixtos: se utilizan cuando es necesario compatibilizar dos anchos de vía.

❖ Travesías

Permiten el cruce de dos vías en oblicuo o perpendicularmente dando continuidad a sus direcciones respectivas.

❖ Combinación de aparatos de vías

Como su propio nombre indica es una combinación de los desvíos y las travесías, formando los siguientes conjuntos tal como se observa en la figura 3.13:

- Escape: formado por dos desvíos sencillos, uno en cada vía y estando comunicados por un tramo de vía en diagonal, con el objetivo de enlazar dos vías paralelas.
- Diagonal: está formada por una vía en diagonal sobre varias vías en paralelo.
- Haz: se trata de una sucesión de cambios de agujas que dan acceso a varias vías situadas en paralelo.
- Bretelle: se trata de dos cambios de agujas de escape enlazados entre sí, teniendo en la parte central la intersección de las dos vías desviadas.



Figura 3.13: Tipos de combinaciones de aparatos de vía

### 3.3.3. SEÑALIZACIÓN

Son dispositivos utilizados para transmitir mensajes desde la vía, estaciones y trenes. Los mensajes se transmiten utilizando sonidos, colores y formas de acuerdo con el código que se recoge en el Reglamento General de Circulación. Los más utilizados son los siguientes:

- Semafóricas (figura 3.14): accionadas mecánicamente desde la estación mediante un cable de acero.



Figura 3.14: Señal semafórica

- Luminosas (figura 3.15): accionadas eléctricamente desde la estación o el Centro de Control de Tráfico. Tiene un aspecto similar a los semáforos de carretera.



*Figura 3.15: Señal luminosa*

- Portátiles (figura 3.16): son aquellas que puede utilizar el personal encargado del tráfico en cualquier momento.



*Figura 3.16: Señal portátil*

- De los trenes: es la señalización que llevan los mismos en cabeza y cola.
- De limitación de velocidad (figura 3.17): pueden dar órdenes permanentes, aquellas que tienen fondo blanco, o temporales, con fondo amarillo.



*Figura 3.17: Señal de limitación de velocidad*

### 3.4. COLUMNA DE ELECTRIFICACIÓN

En este apartado vamos a explicar el laborioso proceso de los elementos más característicos e importantes que son necesarios llevar a cabo para conseguir el montaje completo de la catenaria, permitiendo así la circulación de los trenes de forma correcta.

El primer paso, como ya describimos anteriormente, consiste en realizar operaciones de acondicionamiento y adecuación del terreno, como son las operaciones de desbroce y limpieza del mismo.

Posteriormente se van a llevar a cabo distintas fases de montaje como vamos a explicar a continuación.

#### 3.4.1. MACIZOS DE POSTES Y ANCLAJES

Son cimentaciones de bloques de hormigón armado enterrados en el suelo tal como se observa en la figura 3.18. Su misión es la de asegurar la fijación de los postes y anclajes al suelo, evitando así que estos se puedan desplomar por las distintas cargas y acciones que tiene que soportar. [6]



*Figura 3.18: Cimentación cilíndrica*

Los hay de diversos tipos en función de su forma pudiendo ser en forma de paralelepípedo, trapezoidales o cilíndricos, dependiendo de las características de la plataforma de la vía. Se distinguen también otros dos tipos en función del terreno:

- Macizos en desmonte: se aplica este tipo cuando la cimentación se ubica en un terreno plano, o en una plataforma obtenida a partir de un desmonte, de manera que la inclinación donde se debe ubicar la cimentación sea menor de  $19^\circ$  con respecto a la horizontal del terreno.
- Macizos en terraplén: este caso se aplica cuando el terreno tiene una inclinación por encima de los  $19^\circ$  pero menos de  $45^\circ$ , donde a partir de esta inclinación sería necesario realizar un estudio particular.

Además de estos macizos, existe otro tipo denominado macizo de anclaje que se utiliza como contrapeso en los anclajes de la catenaria y en los puntos fijos de la línea. La diferencia entre ambas se recoge en la figura 3.19.

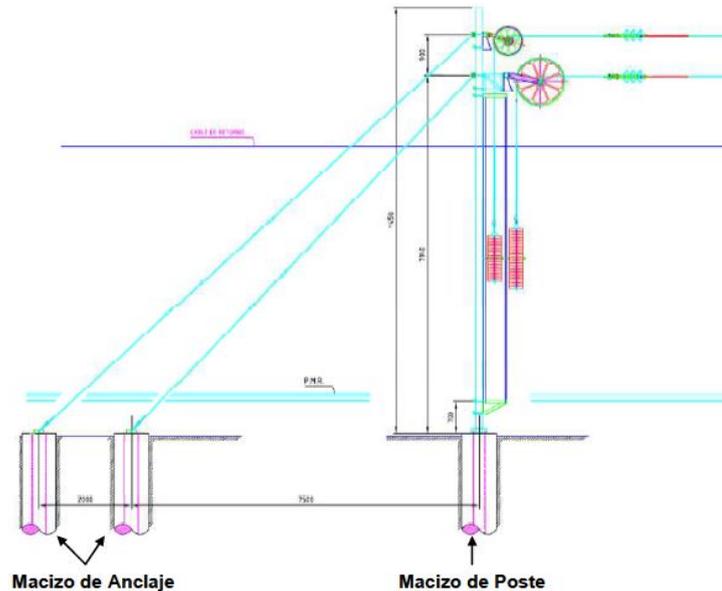


Figura 3.19: Macizos de postes y anclajes

En referencia a la alta velocidad, los macizos en estos casos únicamente se utilizarán los de tipo cilíndrico, se utilizará un hormigón para armar HA-25/B/20/IIa, según la norma EHE, donde se incluirán distintos aditivos según las condiciones que presente el terreno.

Para la realización de los macizos se llevará a cabo una excavación de una profundidad variable mediante una máquina rotoperforadora con un útil de cazo o bien de hélice. Una vez llevada a cabo la excavación se procederá a ejecutar el macizo a partir de hormigón armado que dependerá del tipo de poste que se vaya a emplear y de las características y la capacidad de carga que posea el terreno.

Se utilizarán armaduras de acero corrugado tipo B500S según la norma EHE dentro de los macizos para dar consistencia a la cimentación, sobresaliendo cuatro barras de la armadura por encima de los macizos que servirán como pernos para la posterior fijación de los postes, figura 3.20. En el caso de que fuera cimentación de anclaje se sustituirán estos pernos por herrajes de anclaje adecuados para los tirantes de anclaje.

En los casos en los que el terreno tenga un alto contenido en piedras o sea muy rocoso, en lugar de pernos se llevará a cabo la instalación de micropilotes, figura 3.21, que servirán como base para la fijación del poste.

Cada cimentación llevará una puesta a tierra independiente mediante una pica.

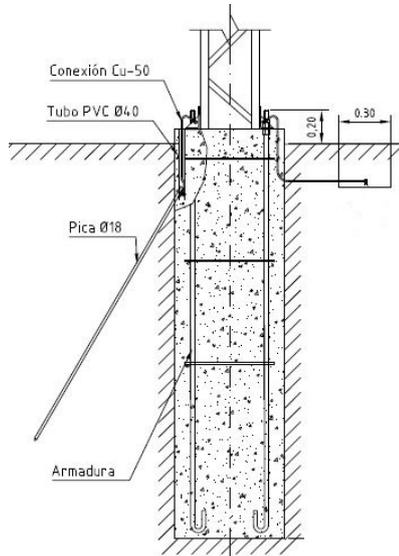


Figura 3.20: Armadura mediante pernos

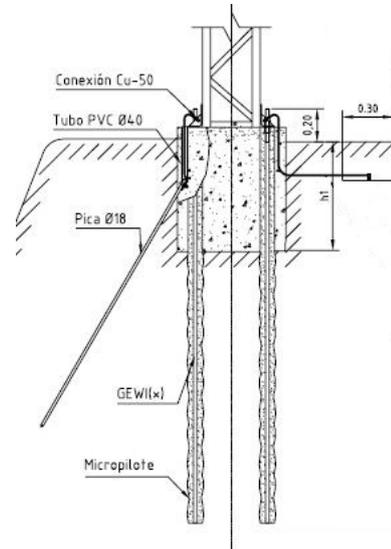


Figura 3.21: Armadura mediante micropilotes

### 3.4.2. POSTES, SEMIPÓRTICOS Y PÓRTICOS

Son los encargados de soportar la catenaria y todos los elementos auxiliares de los que está compuesto y que iremos explicando. Están fijados al suelo mediante los macizos de hormigón previamente descritos.

A la hora de determinar el tipo de poste a utilizar para la sujeción de la línea aérea de contacto, se deben calcular todas las cargas que debe soportar el poste como son los pesos propios de la catenaria, ménsulas y todos los demás elementos auxiliares de los que se componen, acciones como puede ser el hielo o nieve o esfuerzos del conjunto de atirantado que generan tensiones en el poste.

No hay que olvidar también la resistencia del macizo de hormigón de la base, que debe soportar todos estos esfuerzos a los que le está sometiendo el poste para impedir que se produzca un desplome.

Actualmente los postes que se utilizan para la sustentación de las catenarias son de acero S275JR galvanizado, siguiendo la norma UNE EN 10025.

Los postes están formados por dos perfiles laminados tipo UPN en paralelo y unidos mediante diagonales, para el caso de postes abiertos, o cerrados con chapa metálica formando un cajón rectangular, para el caso de postes cerrados. Un ejemplo de poste se puede observar en la imagen 3.22.



*Figura 3.22: Ejemplos de postes en vía*

Pueden tener diferentes alturas dependiendo la función que vayan a realizar, normalmente la altura de los postes para vía general es de 8,55 m, cuando se tenga anclajes de seccionamiento o postes que deban soportar equipos de compensación de tensión, la altura de estos postes será de 9,45 m, y en el caso de que los postes deban soportar pórticos rígidos que lleven tirantes o semipórticos, la altura de dichos postes será de 12,45 m.

Los pórticos, como los de la figura 3.23, se van a utilizar cuando por razones de gálibo no se pueda instalar un único poste independiente para la catenaria de una vía, en ese caso se emplearan pórticos rígidos para varias vías o ménsulas para dos vías, como es el caso de los semipórticos.



*Figura 3.23: Ejemplo de pórtico para varias vías*

Los pórticos estarán compuestos por vigas rectangulares de celosía formadas por montantes de acero con perfil LPN y diagonales, mientras que el material empleado será de acero galvanizado UNE-EN 10025 S275JR como mínimo, al igual que los postes. Las dimensiones de la viga variaran en función de las cargas y de la luz del pórtico.

### 3.4.3. MÉNSULAS

La ménsula es un conjunto de elementos que están unidos al poste permitiéndonos la correcta colocación de la catenaria en la posición adecuada.

Existen principalmente dos tipos de ménsulas, las ménsulas en celosía (figura 3.24) que se utilizan para las líneas convencionales, y las ménsulas tubulares (figura 3.25) que son las que se utilizan para la alta velocidad siendo estas las que vamos a explicar.



*Figura 3.24. Catenaria con  
ménsula en celosía*



*Figura 3.25. Catenaria con  
ménsula tubular*

Las ménsulas tubulares están formadas en la mayoría de los casos por perfiles tubulares huecos de aluminio o de acero con un diámetro y espesor variable dependiendo de los esfuerzos que deban soportar, los cuales están enlazados mecánicamente a través de uniones articuladas.

El conjunto completo de la ménsula esa compuesto por los siguientes elementos:

- Tubo de cuerpo de ménsula
- Tirante de tubo de ménsula
- Tubo diagonal si fuera necesario
- Tubo estabilizador de atirantado
- Péndola de soporte del tubo estabilizador de atirantado
- Aislador de cuerpo de ménsula
- Aislador de tirante de ménsula
- Sustentador
- Rótula de giro de tirante
- Rótula de giro del tubo de cuerpo de ménsula

A continuación en la figura 3.26 se van a poder identificar todos estos elementos de los que se compone una ménsula [W13].

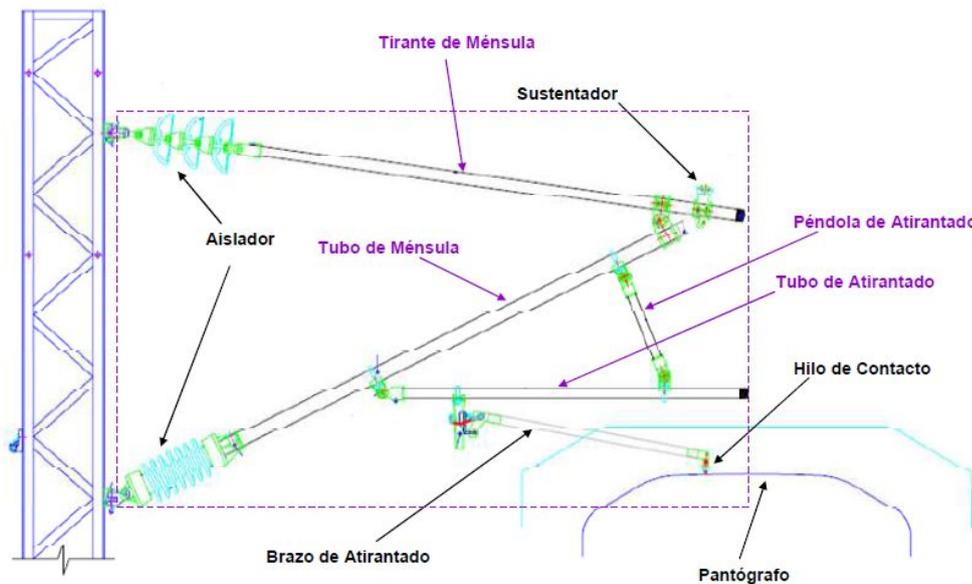


Figura 3.26: Partes que componen el cuerpo de ménsula

Hay que destacar en este tipo de ménsulas la implantación de las rótulas tanto en el tubo de cuerpo de la ménsula como en su tirante, haciendo posible el giro de la ménsula con respecto al poste para permitir el desplazamiento lineal tanto del sustentador como del hilo del contacto cuando se produzcan efectos de dilataciones.

Otra característica a destacar en este tipo de ménsulas es la presencia de los aisladores entre la ménsula y el poste, a diferencia de las ménsulas en celosía donde los aisladores se encuentran en el enganche entre los cables de la catenaria y la ménsula. En este caso al estar entre la ménsula y el poste estos son los que van a sufrir los esfuerzos de tracción o compresión, además de hacer que la ménsula este en constante tensión eléctrica, por lo que habrá que tener especial cuidado a la hora de realizar labores de mantenimiento.

Cabe destacar también dos clasificaciones de este tipo de ménsulas, como son las ménsulas fuera y las ménsulas dentro. La principal diferencia está en la orientación del tubo de atirantado, donde en el primer caso el tubo enfoca hacia fuera de la vía mientras que en el segundo enfoca hacia el interior de la vía.

#### **3.4.4. AISLADORES**

La función principal de los aisladores es la de separar los elementos de la línea aérea de contacto que estén cargados eléctricamente para evitar el contacto entre ellos con la tierra. Estos deben satisfacer los requisitos eléctricos para los que han sido diseñados pero además también deben cumplir ciertos requisitos mecánicos, ya que dependiendo la posición en la que se encuentren en la catenaria podría estar sometido a esfuerzos de tracción o compresión.

A la hora de la elección de estos dispositivos se debe tener en cuenta las condiciones ambientales a las que van a estar sometidos así como los esfuerzos que van a tener que soportar.

Estos conductores se clasifican principalmente según el material de fabricación:

- Aisladores de porcelana
- Aisladores de vidrio
- Aisladores de resina
- Aisladores compuestos: formados normalmente por un núcleo de fibra de vidrio recubierto de una capa de teflón
- Aisladores de silicona: como los aisladores compuestos, estos están formados por un núcleo de fibra de vidrio recubierto en este caso por silicona.

También se pueden clasificar según su forma, donde podremos encontrar diferentes tipos como se aprecia en la figura 3.27 como los aisladores de barra larga, aisladores de caperuza-perno y aisladores sobre poste.



*Figura 3.27: Diferentes tipos de aisladores*

Todos los elementos explicados de la columna de electrificación hasta ahora van a formar lo que se conoce como conjunto de soporte y atirantado.

#### **3.4.5. HILO DE CONTACTO**

El hilo de contacto [2] [7], figura 3.28, es el elemento principal del conjunto denominado línea aérea de contacto del sistema ferroviario, por a través del cual se transmite la corriente eléctrica desde las subestaciones de tracción hasta conseguir alimentar al conjunto de la catenaria, a través del cual el pantógrafo toma la corriente necesaria para conseguir el desplazamiento del tren.



*Figura 3.28: Sección del hilo de contacto de una catenaria*

La posición normal del hilo de contacto, figura 3.29, sería sobre el eje de la vía y a una determinada altura de ella, pero en esta posición el hilo frotaría siempre un mismo punto del pantógrafo por lo que se produciría un sobrecalentamiento de dicho punto además de un desgaste excesivo que seguramente conllevaría a la rotura de la pletina del pantógrafo.

Como consecuencia de todas las causas anteriores este elemento se monta en forma de zigzag a lo largo de todo el recorrido. Este hecho no es más que un descentramiento del hilo de contacto respecto del eje longitudinal de la vía que oscila entre los 20 y 25 cm. Tiene como objetivo evitar un excesivo desgaste en un solo punto de las pletinas del pantógrafo favoreciendo así el desgaste uniforme de toda la superficie de frotación del pantógrafo, alargando su vida útil y reduciendo el coste del mantenimiento del mismo.

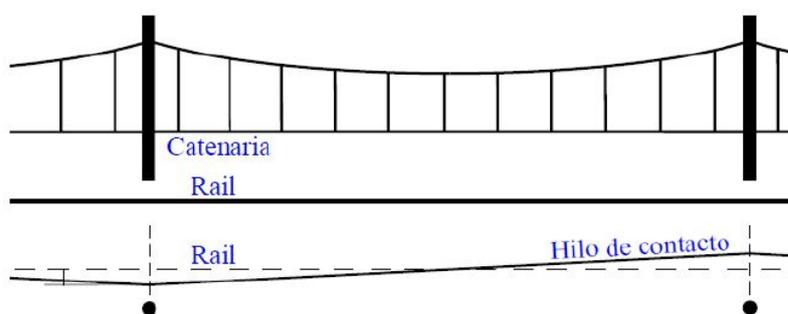


Figura 3.29: Posición del hilo de contacto con respecto al eje de la vía

Estos hilos se fabrican mediante un proceso de trefilado de un macizo con una sección cuasi circular, creando una muesca a una altura y de una profundidad determinada que permitirá estar sujeta de una forma adecuada sin impedir el paso del pantógrafo por ella.

El material con el que se fabriquen será de vital importancia ya que el hilo de contacto estará siempre en contacto con las superficies de frotación de los pantógrafos, por lo que deberá ser de una dureza muy alta, incluso superior a las pletinas del pantógrafo. El material que se suele utilizar para estos hilos son aleaciones de cobre, aluminio, magnesio, en la alta velocidad se suele utilizar generalmente una aleación de cobre – magnesio, con una sección transversal de unos 150 mm<sup>2</sup>.

En la actualidad los dos tipos principales de conjuntos que se utilizan para las catenarias de alta velocidad son la C – 250 y la C – 350, donde la diferencia principal está en sus características mecánicas y la de los elementos que los constituyen.

#### 3.4.6. HILO SUSTENTADOR

El hilo sustentador [7] tiene como función principal soportar todo el peso del sistema formado por el hilo de contacto y las péndolas, figura 3.30, permitiendo mantener todo el conjunto con una determinada tensión mecánica, además de ayudar también a mantener un dimensionamiento eléctrico de la línea correcto.

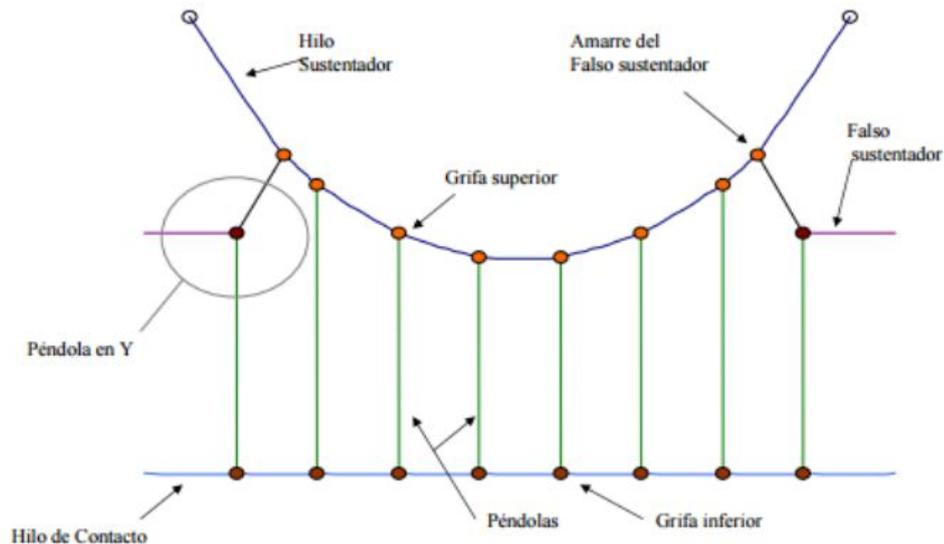


Figura 3.30: Esquema básico de una sección longitudinal de una catenaria

Podemos clasificar la catenaria en función de la posición que el hilo sustentador adopte en la ménsula, así si el hilo sustentador pasa por debajo de la ménsula la denominaremos catenaria suspendida, y si el hilo sustentador está apoyado en la ménsula la denominaremos catenaria apoyada.

Existen algunos montajes de catenaria que con el objetivo de mejorar el trazado del contacto, se colocan unos cables intermedios entre el hilo sustentador y el hilo de contacto denominados falsos sustentadores, o también conocidos como péndolas en Y, cuya función es la de formar una determinada estructura en la catenaria ayudando al hilo sustentador a cumplir con ciertas exigencias del hilo de contacto como puede ser una mayor rigidez del mismo, etc.

Los materiales con los que este hilo está fabricado son varios como pueden ser aleaciones de acero o de aluminio, cobre o bronce, aunque actualmente en líneas de alta velocidad el material que se suele emplear es el cobre. Este hilo se forma a partir de un trenzado de cables de menor sección permitiendo así mejorar sus propiedades mecánicas. Podemos distinguir dicho trenzado en la figura 3.31.

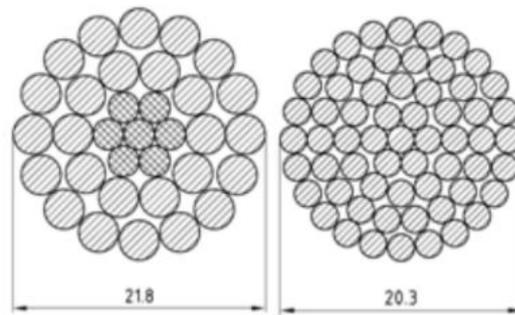


Figura 3.31: Ejemplos de secciones de hilos sustentadores

### 3.4.7. PÉNDOLAS

Las péndolas [7] se definen como el conjunto de cables verticales que permiten distribuir uniformemente el peso del hilo de contacto que soporta el hilo sustentador, tal como se observa en la figura 3.32, manteniéndolo suspendido a una cierta altura con respecto al plano de rodadura de la vía.

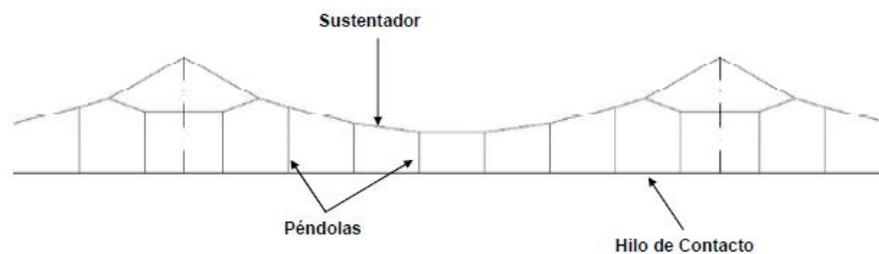


Figura 3.32: Distribución de péndolas

Las péndolas se distribuyen de una forma lo más uniforme posible a lo largo de cada vano, cuanto mayor sea el número de estas se conseguirá una mayor rigidez para el hilo de contacto, pero a la vez será más costoso, por lo que esto dependerá de las exigencias que marque el hilo de contacto.

Las distancias entre péndola y péndola suelen ir desde los 5 hasta los 12 m de separación, deben ser lo suficientemente largo como para que en caso de rotura el hilo toque el suelo activando las alarmas pertinentes, pero lo suficientemente corto como para evitar una flecha excesiva en el hilo de contacto.

Actualmente podemos encontrarnos diferentes tipos de péndolas en función de las necesidades que se soliciten, existen péndolas flexibles, rígidas o deslizantes y péndolas que pueden transmitir la corriente eléctrica o no, pero todas ellas están fabricadas con los mismos materiales pudiendo ser de cobre o de bronce. Las péndolas que no permiten transmitir la corriente eléctrica se denominan péndolas mecánicas, mientras que las péndolas que si permiten el paso de la corriente eléctrica se denominan péndolas equipotenciales. Ambos tipos se observan en la figura 3.33.

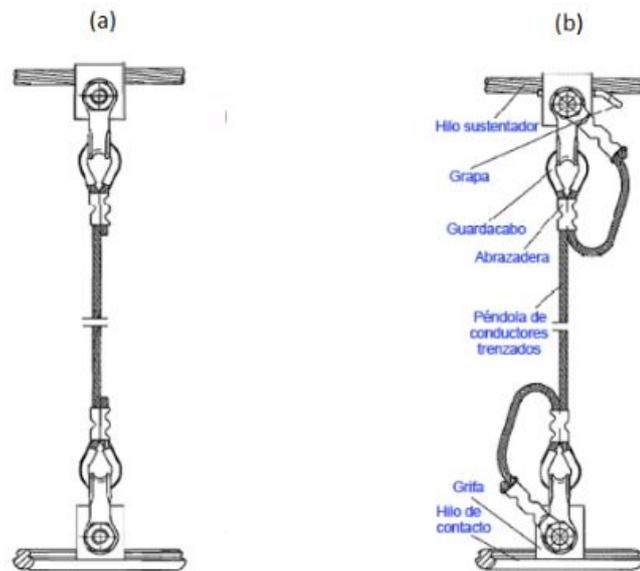


Figura 3.33: (a) Péndola mecánica (b) Péndola equipotencial

El conjunto formado por el hilo de contacto, el hilo sustentador y las péndolas forman lo que denominamos la línea aérea de contacto. Para realizar la unión mecánica garantizando también una buena unión eléctrica de estos elementos se utilizan grifas y terminales de conexión, como se puede observar en la imagen.

Estos elementos habitualmente están fabricados de cobre o aleaciones de cobre por lo que tendrán valores altos de conductividad y buenas características mecánicas necesarias para el objetivo que se busca, el empalme de todos los elementos citados.

El conjunto de péndola y grifa debe permitir, en especial en electrificaciones de corriente continua y en aquellas que se utilicen dos hilos de contacto, adaptarse a las pequeñas inclinaciones que los descentramientos producen sobre el pantógrafo y que será mayor cuanto mayor sea el descentramiento.

### 3.4.8. EQUIPOS DE COMPENSACIÓN

Para mantener un correcto funcionamiento de las líneas de alta velocidad es fundamental tener una altura constante de la línea aérea para que el pantógrafo tenga un contacto regular a lo largo de todo el recorrido. Sin embargo, al estar constituida la línea aérea por cables que son conductores del calor, la electricidad y están sometidos a una cierta tensión mecánica, si le sumamos el efecto de los cambios climatológicos que soportan, todas estas causas pueden originar variaciones en su longitud debido a la dilatación lineal y su elasticidad.

Estas variaciones de longitud que se producen en los cables que forman la catenaria producen cambios en la tensión mecánica inicial para la cual había sido prevista, lo que conlleva también a variaciones en la altura del hilo de contacto con respecto al plano de rodadura. La suma de todos estos efectos tiene como consecuencia que durante la circulación de los trenes, cuanto mayor sea su velocidad, más dificultad tendrá el pantógrafo de estar en constante rozamiento con el hilo de contacto originando saltos y esfuerzos incontrolados que pueden llevar a producir averías tanto del pantógrafo como del hilo de contacto.

Para solucionar estos problemas se montan equipos de compensación mecánica, figura 3.34, que no es más que un sistema de compensación y atirantado formado por tirantes metálicos, contrapesos, poleas y elementos multiplicadores.



*Figura: 3.34: Equipo de compensación mediante contrapesos*

Al no ser posible mantener constante el valor de la tensión a lo largo de todo el recorrido de una vía férrea, la línea aérea no va a estar constituida por un tramo continuo si no que va a ser una sucesión de tramos denominados cantones, los cuales van a tener una longitud que puede variar entre los 900 y 1.200 m.

El punto central del cantón, que será un punto fijo, deberá coincidir con un poste o ménsula y podrá estar formada por dispositivos que regulen automáticamente la tensión mecánica, o por dispositivos que no sean automáticos y que necesiten de unos tensores unidos a los diferentes hilos de la catenaria para poder regular la tensión de forma manual.

El objetivo fundamental de este tipo de equipos radica en mantener constante la tensión mecánica de la línea aérea de contacto, lo que permite como resultado mantener una altura uniforme del hilo de contacto con respecto al plano de rodadura y permitir al pantógrafo un frotamiento con el hilo de contacto homogéneo sin que se produzcan saltos y esfuerzos innecesarios.

Una vez explicados todos los elementos de los que se compone básicamente la columna de electrificación voy a explicar brevemente que es y que función tiene el pantógrafo, ya que aunque no es un elemento propio de la columna de electrificación hemos hecho referencia a él a menudo en las definiciones anteriores.

### **3.4.9. PANTÓGRAFO**

El pantógrafo [W14] es un conjunto de elementos a partir de los cuales el tren recibe la corriente eléctrica necesaria para su funcionamiento, esta energía que proviene de las subestaciones de tracción le es proporcionada a través del hilo de contacto.

Este aparato está situado en la parte superior del tren y su altura se regula automáticamente de manera que pueda alcanzar al hilo de contacto independientemente de la altura a la que este se encuentre.

El pantógrafo está formado por las siguientes partes principales y que se pueden observar en la figura 3.35:

- Bastidor base: parte fija del pantógrafo que soporta al bastidor y que va montada sobre aisladores fijados al techo del tren.

- Bastidor: estructura articulada que permite que el cabezal colector se mueva en dirección vertical con respecto a la base del pantógrafo.
- Cabezal colector: parte del pantógrafo soportada por el bastidor que incluye las tiras de contacto, que son las piezas de desgaste que están en contacto con el hilo de contacto y que las conocemos como frotadores, los cuernos, que son los extremos del cabezal colector cuya función es la de asegurar un paso suave a través del hilo de contacto conocido como trocador, y dependiendo de tipos de pantógrafos, puede incluir también un sistema de suspensión.
- Sistema operativo: dispositivo cuya misión es la de suministrar fuerza que permita al pantógrafo elevarse o descender según la altura a la que se encuentre el hilo de contacto.

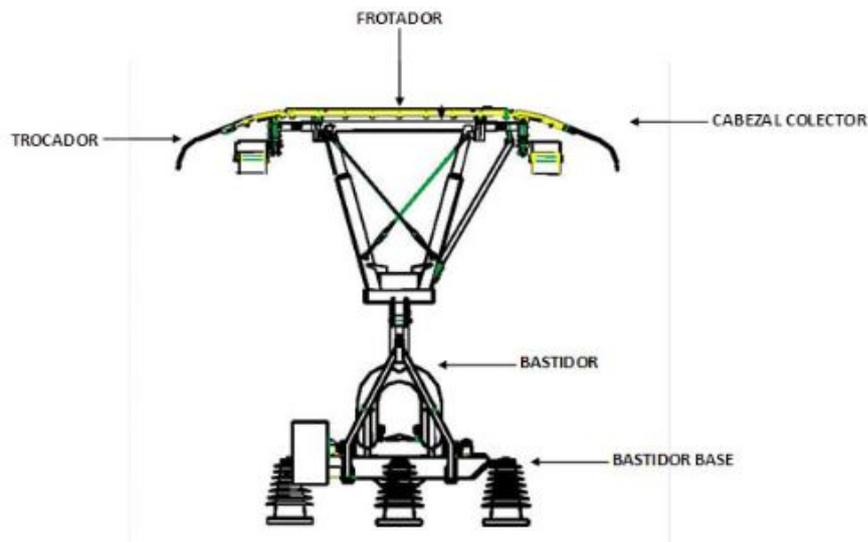


Figura: 3.35: Partes fundamentales de un pantógrafo

Es muy importante que este conjunto funcione a la perfección ya que de ello depende que haya un contacto eficiente y homogéneo entre el frotador y el hilo de contacto.

## CAPÍTULO 4: SUPERESTRUCTURA DE SUSTENTACION DE LA CATENARIA

En este capítulo vamos a tratar de definir las tres estructuras principales que sirven de sustentación para la catenaria y que nos servirán de estudio en el siguiente capítulo a través de su modelación, permitiéndonos calcular diferentes estados tensionales en función de diversas cargas y comparándolos entre ellos.

Para llevar a cabo este estudio nos vamos a basar en información proporcionada de un proyecto ferroviario real, en concreto se define como “Proyecto Constructivo de Electrificación de la línea Medina del Campo – Salamanca – Fuentes de Oñoro. Tramo Medina del Campo – Salamanca. Línea Aérea de Contacto” [4].

El tramo objeto del proyecto está constituido por la línea convencional Medina del Campo – Salamanca – Fuentes de Oñoro que enlaza Castilla y León con Portugal, circulando por ella el tráfico directo entre Portugal y Francia atravesando todo el territorio español. Se pretende electrificar todo el corredor ferroviario desde la frontera portuguesa hasta Irún, lo que conlleva la electrificación de este tramo.

La finalidad de este Proyecto Constructivo es definir técnica y económicamente todas las actuaciones y requisitos, tanto funcionales como operacionales, para la realización de los trabajos relacionados con la Línea Aérea de Contacto de Alta Velocidad Medina del Campo – Salamanca, la cual se encuentra englobada en la prolongación del Corredor Ferroviario Norte – Noroeste.

La solución adoptada para este proyecto de electrificación es la instalación de un sistema de línea aérea de contacto con catenaria compensada. La catenaria será de tipo C – 350 poligonal atirantada, sin flecha en el hilo de contacto y formada por un sustentador, un hilo de contacto y péndolas equipotenciales, compensadas mecánicamente y aptas para poder circular a 350 km/h, satisfaciendo los requisitos de este tipo de líneas según la norma europea EN – 50119.

La línea de contacto estará compensada mecánicamente de forma independiente para el sustentador y el hilo de contacto, y la tensión nominal del sistema será de 25 kV siguiendo la norma EN 50163.

A continuación vamos a explicar las tres estructuras principales de sustentación de dicha catenaria con sus características y propiedades principales.

#### **4.1. POSTE**

Los postes son una de las partes fundamentales de sujeción de las catenarias, ya que tanto los pórticos como los semipórticos, como veremos más adelante, están formados por postes y sus respectivos dinteles.

Los postes que se van a utilizar en este proyecto para la sustentación de la catenaria son de acero S275JR galvanizado, siguiendo la norma UNE EN 10025.

Podemos encontrarnos dos tipos de postes, postes abiertos en el caso de que estén compuestos por dos perfiles laminados tipo UPN en paralelo unidos mediante diagonales, o postes cerrados cuando están constituidos de la misma forma por dos perfiles laminados tipo UPN en paralelo pero en este caso unidos con chapa metálica formando un cajón rectangular.

El acabado de los postes se realizará con un recubrimiento a base de pintura de Esmalte de Poliuretano Alifático Brillante, según norma UNE 48274, de color verde RAL – 6009, identificado como color corporativo de ADIF.

La altura de los postes puede variar en función de la aplicación que vayan a tener, de forma habitual, la altura de los postes para vía general es de 8,55 m, lo que permite un ligero ángulo en el tirante. Si el poste debe soportar equipos de compensación mecánica, anclajes o dinteles de pórticos rígidos autosoportados, es decir sin tirantes, la altura de estos postes será de 9,45 m. En el caso de que los postes deban soportar pórticos rígidos o semipórticos que deban llevar tirantes o pórticos utilizados para la alimentación desde las subestaciones, la altura de estos postes será de 12,45 m.

En puentes y viaductos se utilizaran los mismos postes que en vía general, es decir, los de 8,55 m, la única diferencia que existirá es el tipo de cimentación que se debe utilizar.

A continuación voy a nombrar algunas de las condiciones más significativas que deberán cumplir los postes metálicos:

- Deberán estar calculados para soportar todos los esfuerzos a los que están sometidos, como es la catenaria, ménsula, sustentador, etc.

- Estarán calculados para que su deformación, al estar bajo cargas variables, no altere la geometría de la catenaria fuera de los límites admisibles establecidos.
- La base de los postes deberá estar provista de angulares para su correcta fijación a la cimentación.
- Deberán llevar incorporados letreros de identificación del tipo de poste y su numeración, así como casquillos o bulones para su referencia topográfica.
- Los postes deberán incorporar elementos que impidan el fácil acceso a las partes altas.
- Los postes colocados en zonas de vandalismo o paso de viajeros contarán con protección antiescalada.

En función de los esfuerzos que deba soportar el poste existen gran cantidad de tipos que se pueden utilizar dependiendo del tamaño de los perfiles utilizados.

Con el objetivo de modelar el poste en el siguiente capítulo sin que tenga una dificultad excesiva, he decidido elegir uno de los postes más sencillos que hay para vía general, ya que posteriormente también elegiré de las dos estructuras restantes una de las más sencillas para poder hacer una comparación equiparable. Este poste, que en simbología de ADIF se denomina X - 2AV, tiene una longitud de 8,55 m y es un poste cerrado compuesto por dos perfiles UPN 120 con chapas para su cerramiento de dimensiones 40 x 12 mm, como podemos observar en el Anexo I adjunto.

Tanto este poste como todos los demás deberán cumplir y adjuntar una serie de normas respecto a la documentación y su normativa como son las siguientes:

- Referente a los materiales:
  - Perfiles de acero UNE EN 10025
  - Acero galvanizado según UNE EN ISO 1461:2010
  - Pintura RAL 6009 según ISO 12944 - UNE EN ISO 12944-7:1999
- Referente a las tolerancias:
  - DIN ISO 13920 B - F
  - UNE EN ISO 13920
  - DIN ISO 2768, UNE EN 22768 - 1 - 2
- Referente a las soldaduras:
  - DIN ISO 5817C
  - UNE EN ISO 5817
- Referente al galvanizado:

- ISO 1461

En cuanto al presupuesto, el precio de este tipo de postes es de 555,32€ por unidad, siendo este uno de los postes más sencillos y por tanto de los más baratos de todos los existentes, pudiendo llegar a costar el poste más caro alrededor de los 2.450€.

## 4.2. PORTICOS RIGIDOS

Con el fin de aumentar la fiabilidad de la instalación y de minimizar la posible incidencia de avería de una catenaria con otra colateral, es preferible la instalación de postes independientes para las catenarias de las vías. Únicamente cuando por razones de gálibo esto no se pueda realizar, se emplearán entonces pórticos rígidos para varias vías.

Los pórticos rígidos serán preferiblemente autoportantes y las ménsulas se instalarán en dichos pórticos rígidos mediante los soportes adecuados.

Los pórticos estarán compuestos por vigas rectangulares de celosía formada por montantes de acero con un perfil de tipo L y diagonales.

Para la catenaria que se va a instalar en este proyecto, tipo C – 350, esta especifica que los dinteles para pórticos rígidos autoportados deben tener una luz entre 12 y 28 m, y en caso de que se requiera de luces mayores, estos deberán estudiarse para cada caso en particular. En el supuesto de que los pórticos deban incorporar tirantes debido a su luz, se emplearán en estos casos pórticos rígidos normalizados por ADIF.

El material utilizado serán perfiles de acero S275JR galvanizado como mínimo, según la norma UNE – EN 10025, con un acabado en pintura de color corporativo de ADIF, pintura de color verde RAL – 6009 al igual que en los postes.

Las dimensiones de la viga variarán en funciones de las cargas que esta deba soportar y de la luz del pórtico.

Para nuestro modelo vamos a elegir un poste que en simbología de ADIF se denomina XL – 4AV, tiene una longitud de 9,45 m ya que en este caso dos postes van a tener que soportar un dintel para pórtico rígido, por lo que van a tener que ser un poco más grandes al tener que soportar mayores esfuerzos. Este poste cerrado está compuesto por dos perfiles UPN 160 con chapas para su cerramiento de dimensiones 40 x 12 mm, como se puede observar en el Anexo II adjunto.

En cuanto al dintel del pórtico, este va a tener una longitud de 24 m estando formado por montantes de acero con perfil tipo L 100 x 8 y diagonales de 45 x 5 mm como se observa en el Anexo III adjunto.

Con respecto al presupuesto, el precio de este tipo de postes es de 787,52€ por unidad, mientras que el precio del dintel para pórtico rígido de longitud entre 22 y 24,5 m es de 2.669,57€ por unidad.

### 4.3. SEMIPÓRTICO

A los semipórticos les podemos hacer la misma descripción inicial de la que hemos hecho con los pórticos rígidos ya que se tratan de una estructura muy parecida pero que le vamos a hacer una distinción especial para que se pueda observar la diferencia y explicar los detalles de nuestra elección.

Este tipo de estructuras, al igual que hemos comentado antes, solo se suele utilizar cuando por razones de gálibo no se puede emplear postes independientes, que son mucho más seguros a la hora de una incidencia en la catenaria. Cuando se dé este motivo utilizaremos entonces un semipórtico para dos vías con sus respectivas ménsulas y elementos de sujeción.

Para nuestro modelo vamos a elegir en este caso un poste que en simbología de ADIF se denomina XLL - 7AV, tiene una longitud de 12,45 m ya que ahora al tener que soportar solamente un poste el dintel del semipórtico este va a tener que soportar mayores esfuerzos, por lo que tendrá que tener un tamaño mayor a todos los demás. Este poste cerrado está compuesto por dos perfiles UPN 220 con chapas para su cerramiento de dimensiones 40 x 20 mm, como se puede observar en el Anexo IV adjunto.

En cuanto a lo que se refiere al dintel del semipórtico, este va a tener una longitud de 7,28 m estando formado por montantes de acero con perfil tipo L 70 x 7 y diagonales de 45 x 5 mm como se observa en el Anexo V adjunto.

Con respecto al presupuesto, el precio de este tipo de postes es de 1.645,10€, mientras que el precio del dintel para el semipórtico rígido es de 693,46€.



## **CAPÍTULO 5: MODELADO DE LAS ESTRUCTURAS DE SUSTENTACION DE LA CATENARIA**

En este capítulo vamos a desarrollar el proceso que hemos llevado a cabo para el modelado, con el programa Sap2000, de las tres estructuras que sirven de sustentación de la catenaria descritas en el capítulo anterior.

En primer lugar explicaremos de forma sencilla los pasos básicos que hemos llevado a cabo para definir la estructura al completo como son los materiales, secciones, cargas, restricciones, etc. A continuación mostraremos distintos estados tensionales y diagramas de desplazamientos viendo los esfuerzos que produce las cargas en la estructura completando con las explicaciones necesarias para cada situación. En el último apartado realizaremos una comparativa entre las tres estructuras viendo si cumplen los perfiles para las secciones escogidas y añadiendo tablas de valores que sirvan de comparación entre ellas para ver si sufren esfuerzos parecidos.

Una de las características principales y comunes a los tres modelados que explicaré a continuación es que van a ser modelos planos, es decir en 2D, ya que hemos elegido este tipo al simplificarse las operaciones. Eliminaremos de los modelos elementos reales que no influyen mucho a la hora del cálculo práctico como son los feeders, aisladores o elementos de conexión, simplificaremos la zapata y todos los nudos de unión serán rígidos a excepción de algunas rótulas que podremos en elementos tirantes.

Como el objetivo es la comparación de los elementos estructurales definidos en el capítulo anterior (poste, semipórtico y pórtico) los resultados de desplazamientos, axiles, tensiones y coeficientes de pandeo se refieren sólo a dichos elementos estructurales, no a las ménsulas sobre las que se aplican las cargas.

### **5.1. MODELADO DEL POSTE**

Para realizar el modelado del poste en el programa Sap2000 el primer paso será definir la malla que utilizaremos para dibujar la estructura, para ello fijándonos en la figura 5.1 definiremos sus propiedades como son el número de líneas del mallado, la distancia entre ellas y el punto inicial de los ejes de coordenadas.

Al ser un modelo en 2D nos van a interesar únicamente dos direcciones del plano, en este caso hemos elegido representarlo en el plano XZ, por lo que en la dirección Y vamos a definir que solo haya un nivel y pondremos como distancia un metro, aunque estos valores no nos vayan a influir para nada en los cálculos. En la dirección del eje X, la horizontal, tendremos 10 divisiones separadas cada una de ellas 0,5 m mientras que en el eje Z, el vertical, dibujaremos 27 divisiones separadas cada una 0,35 m. El centro de los ejes de coordenadas pondremos el más sencillo, el origen en el (0, 0, 0).

Posteriormente a realizar este mallado inicial realizaremos algunas modificaciones de distancias ya que inicialmente el programa no te permite poner distancias parciales entre líneas, por lo que una vez tienes hecho un mallado inicial, entrando en las propiedades de dicho mallado puedes ir modificando distancias parciales, obteniendo finalmente nuestro mallado como el que se observa en la figura 5.2.

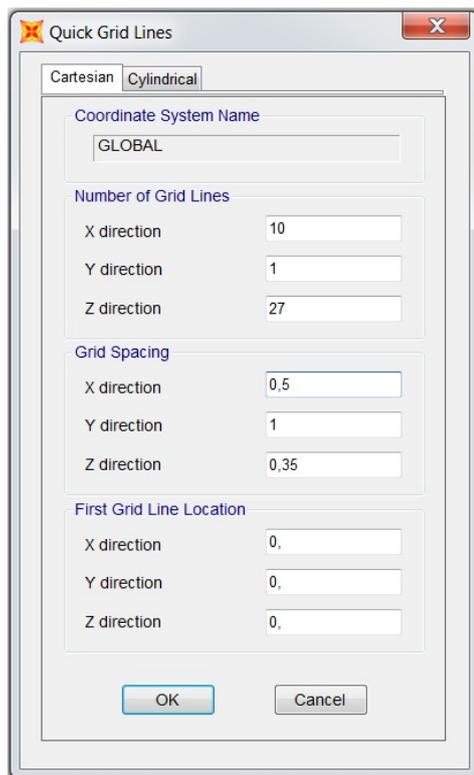


Figura 5.1: Propiedades del mallado

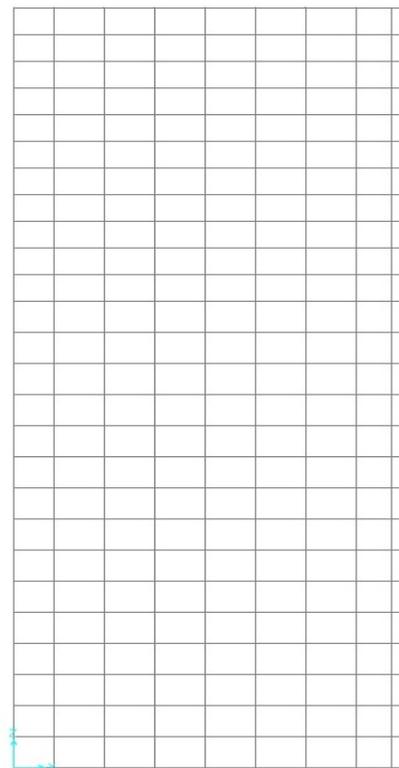


Figura 5.2: Mallado

Después de trazar el mallado con el que tendremos que dibujar la estructura, primeramente debemos definir los materiales y los perfiles que utilizaremos para las distintas partes de las que está compuesta la estructura.

Para esta estructura vamos a utilizar dos tipos de materiales como presenta la figura 5.3, uno es el acero S275, que lo utilizaremos para los dos elementos por los que está compuesto el poste, y el otro material es el aluminio, que lo utilizaremos para los dos elementos que componen la ménsula.

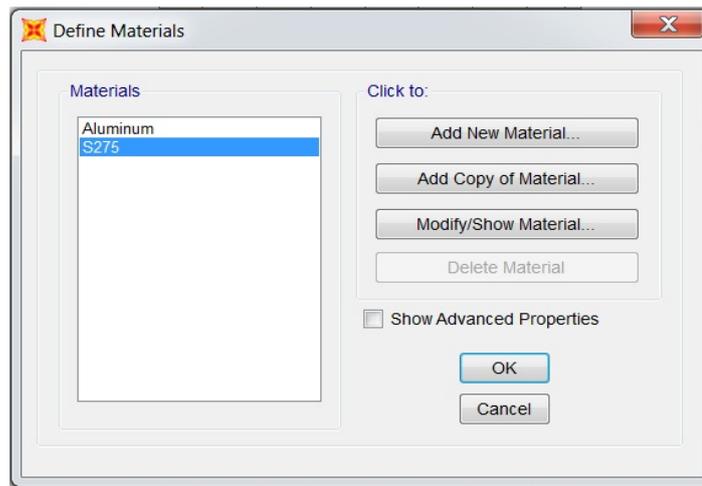


Figura 5.3: Selección de materiales

Una vez tenemos definidos los materiales pasamos a definir los tipos de perfiles que van a formar nuestra estructura, estos perfiles son los que observamos en la figura 5.4.

Para formar la estructura del poste hemos definido dos perfiles, uno es el perfil de acero UPN 120, este es el perfil en forma de U que va colocado en lados opuestos y unido mediante los otros perfiles, que son unas chapas de acero de 40 x 12 mm formando un cuerpo rectangular. Al ser un modelo plano, cuando dibujemos la estructura sobre el mallado solo veremos una de estas chapas dibujada, por lo que en sus propiedades tendremos que poner que tanto su área como momento de inercia estén multiplicados por dos para que se simule la situación real del poste, que es la existencia de dos chapas uniendo ambos perfiles UPN.

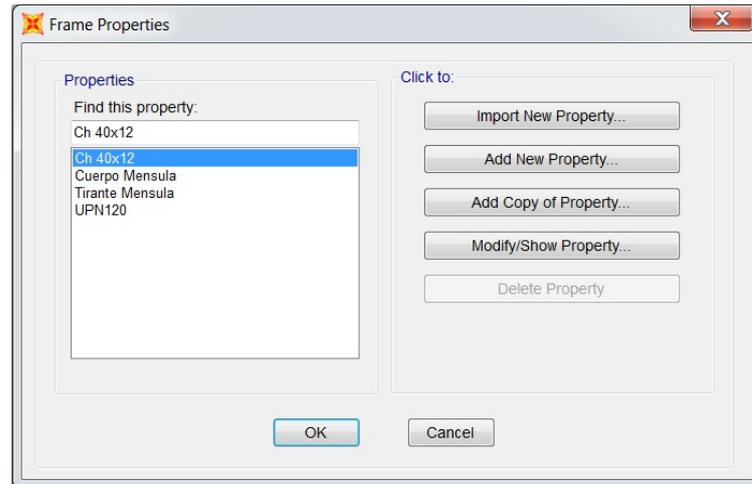


Figura 5.4: Selección de perfiles

En cuanto a la ménsula hemos definido también dos tipos de perfiles, uno es el Cuerpo de la Ménsula, que se corresponde con la barra horizontal que posteriormente se verá en la figura 5.7, la cual está formada por un tubo de aluminio de 70 mm de diámetro con un espesor de 5 mm, y sobre el cual irán colocadas las cargas que va a soportar toda la estructura. El otro perfil es el Tirante de la Ménsula, que se corresponde con la barra en diagonal que veremos en la figura 5.7, y que está compuesto por un tubo de aluminio de 55 mm de diámetro con un espesor de 5 mm, siendo este tirante el que sujeta el cuerpo de la ménsula mediante su unión al poste.

Hay que destacar que a la hora de crear el perfil UPN 120 para el poste no hemos podido elegir el perfil normalizado europeo que viene predefinido en el programa, ya que a la hora de representar diferentes diagramas de estados tensionales, los esfuerzos no aparecían en el mismo plano, si no que alguno de los esfuerzos aparecían en distinto plano y para poder verlos hacía falta la vista tridimensional.

Dado que nuestro estudio se basa en que es un sistema en 2D hemos tenido que crear el perfil de forma manual, para ello voy a describir los pasos que hemos seguido: hemos ido a la pestaña *define* → *section properties* → *frame sections* y hemos seleccionado *add new property*, elegimos tipo “*other*” y seleccionamos *section designer* donde nos aparece una pantalla como la que vemos en la figura 5.5.

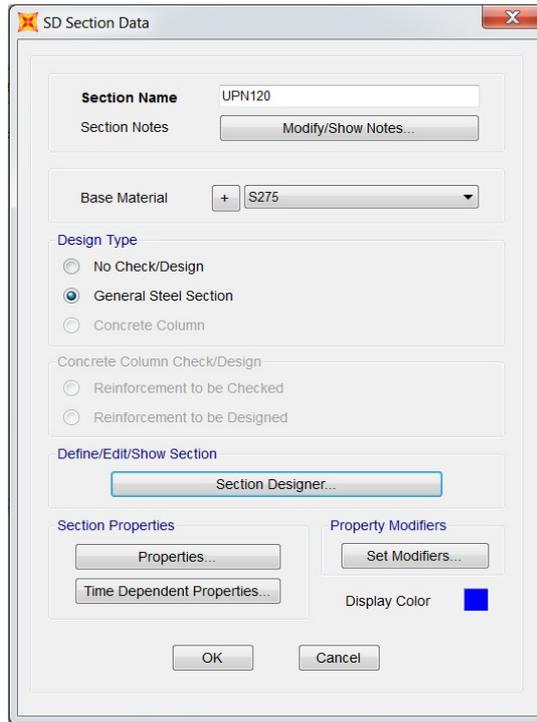


Figura 5.5: Crear perfil

En esta pantalla tenemos la opción de nombrar el perfil, elegir el material que queremos para dicho perfil y en la pestaña llamada *section designer*, deberemos entrar y dibujar el perfil que necesitamos para nuestra estructura. En la nueva pantalla que nos aparecerá, dibujaremos el perfil tipo UPN, como el de la figura 5.6, y añadiremos sus propiedades características como son el ancho (width), alto (height) y los dos espesores (flange y web thick) según vemos en la imagen. El dato característico para que luego los diagramas nos salgan correctamente dibujados es que debemos girar los ejes del perfil 90° respecto a su situación inicial, quedándonos el perfil definido como vemos en la figura 5.6.

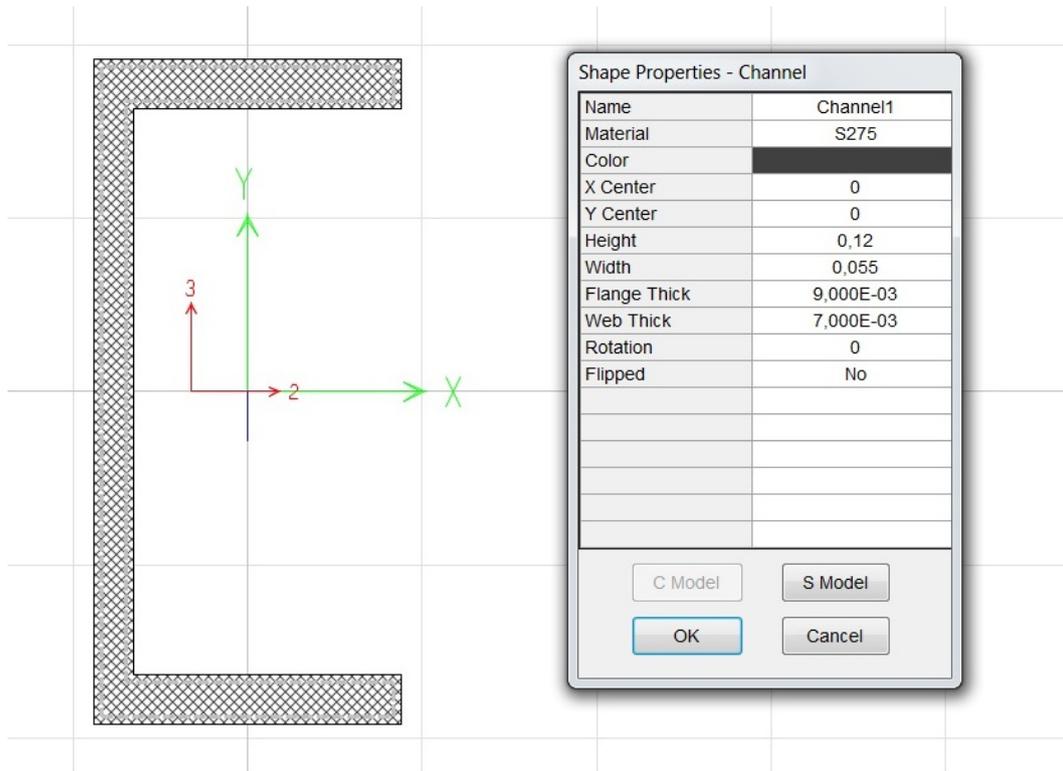


Figura 5.6: Creación del perfil

Una vez realizados todos estos pasos ya tenemos todos nuestros perfiles definidos de forma correcta, por lo que lo siguiente será dibujar nuestra estructura y ponerla las restricciones necesarias.

A la hora de ir dibujando nuestra estructura, cada barra que dibujemos la asignaremos el perfil que le corresponda, así una vez dibujada toda la estructura tendremos todos los perfiles asociados a las barras y estará completamente definida, como podemos observar en la figura 5.7. En la base del poste como va unido a la cimentación le asignaremos la restricción de empotramiento.

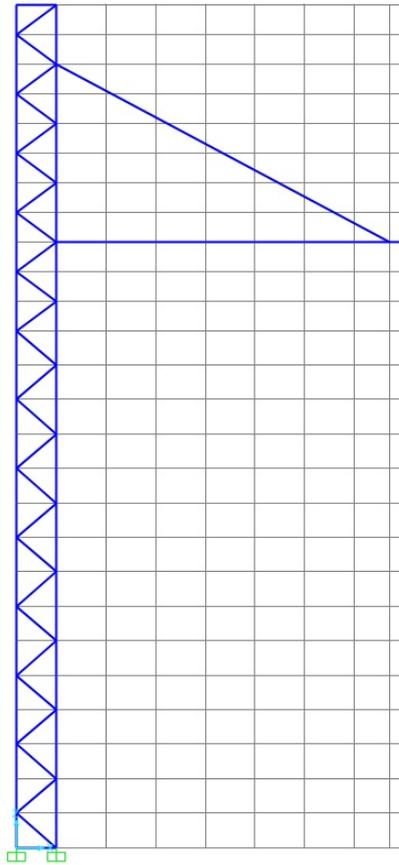


Figura 5.7: Estructura del poste

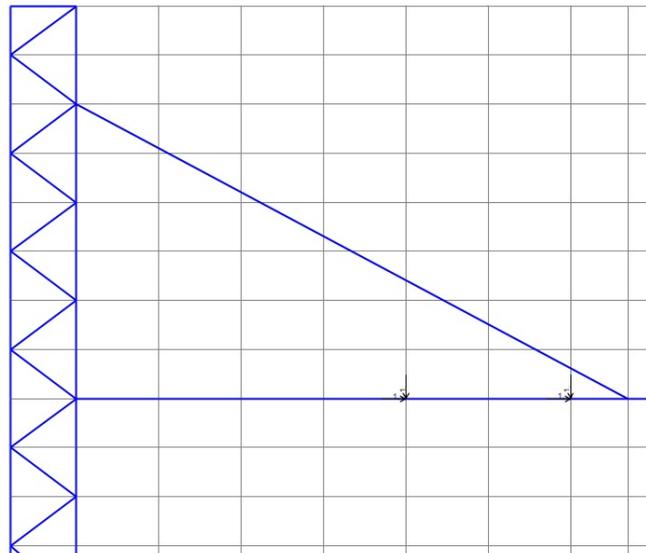
A continuación asignaremos al tirante de la ménsula y al inicio del cuerpo de la ménsula la libertad en forma de rótula como observamos en la figura 5.8, esto se debe a que estos tramos puede tener cierto grado de giro para contrarrestar los diferentes esfuerzos a los que están sometidos.



Figura 5.8: Asignación de libertades

Teniendo la estructura completamente dibujada y con todas las restricciones o libertades asignadas, el último paso será asignarle las cargas. En este caso las cargas las colocaremos en el cuerpo de la ménsula en dos puntos distanciados un metro entre ellos como se observa en la figura 5.9, siendo estos los puntos de sujeción del cable de la catenaria y a los que les asignaremos un valor unitario de fuerza, puesto que vamos a suponer este valor genérico pudiendo más tarde multiplicar por el valor real y obtener los esfuerzos.

En cada punto de sujeción de la catenaria se ha considerado una fuerza vertical hacia abajo, con la que se modela todo el peso de los elementos sustentados, y una fuerza horizontal, con la que se modela el efecto de la tensión de la línea en trazados curvos. Este estado de carga es el que se ha considerado representativo para los estudios comparativos que se van a realizar en este trabajo.



*Figura 5.9: Asignación de cargas*

Una vez tenemos toda la estructura bien definida podemos ejecutar el programa y calcular la deformación que sufrirá la estructura ante la acción de las cargas y los diferentes diagramas de esfuerzos y estados tensionales.

A continuación vamos a mostrar dichos diagramas que nos servirán posteriormente de comparación entre ellos:

### 5.1.1. DESPLAZAMIENTOS

En la siguiente figura 5.10 podemos observar cómo la acción de las fuerzas ha producido un desplazamiento tanto en el poste como en la ménsula. Esto es debido básicamente a que como el poste únicamente está empotrado en su extremo inferior y las cargas están aplicadas en la ménsula, éstas están descentradas con respecto al eje del poste, lo que origina que haya un desplazamiento en la dirección de las cargas.

Como las cargas tienen dirección hacia abajo y a la derecha, el desplazamiento de la estructura se producirá en estas direcciones como podemos comprobar. El desplazamiento del perfil izquierdo del poste tiene un valor de  $1,536E-05$  m en la dirección del eje X y un valor de  $5,066E-07$  m en dirección del eje Z mientras que el perfil derecho del poste tiene un valor de  $1,536E-05$  m en la dirección del eje X y un valor de  $-5,481E-07$  m en la dirección del eje Z.

Como podemos observar todos estos valores de desplazamientos son muy pequeños ya que hemos aplicado una carga de valor unitario.

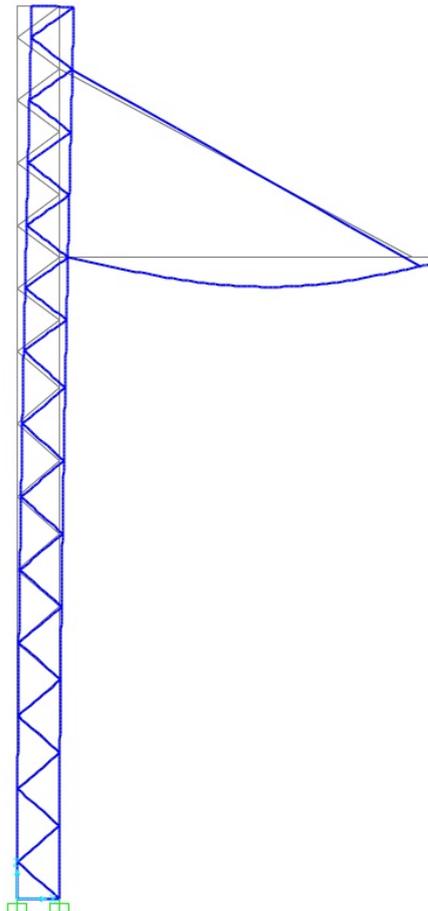


Figura 5.10: Desplazamiento debido a las cargas

### 5.1.2. DIAGRAMA DE AXILES

La siguiente figura 5.11 muestra los diagramas de axiles que sufre la estructura debido a las cargas aplicadas. Los diagramas de axiles de color rojo se corresponden a las zonas que se encuentran a compresión mientras que los axiles en color azul son las zonas que se encuentran a tracción.

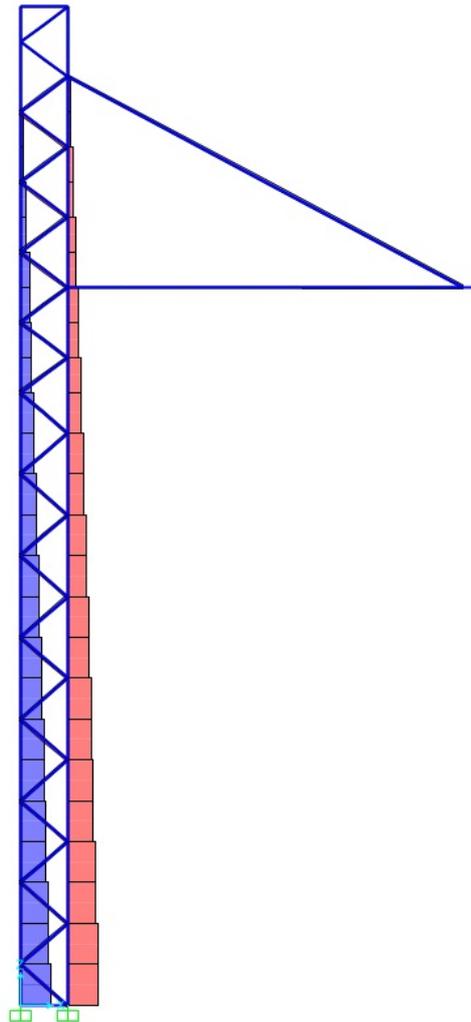


Figura 5.11: Diagrama de axiles

Este hecho se debe a tener las cargas aplicadas en la ménsula, estas cargas van a hacer que la estructura se desplace un poco hacia la derecha como vimos en el caso anterior, por ello al girar la estructura hacia la derecha hace que el perfil derecho del poste se comprima, produciéndose un acortamiento de las barras, y por lo siguiente que el perfil contrario, el izquierdo, se traccione produciéndose el alargamiento de dichas barras.

Cuanto mayor es la distancia de la carga a la base del poste mayores valores de esfuerzo axial tendremos, es por ello que en la base del poste es donde se encuentra el mayor valor de esfuerzo axial tanto a tracción como a compresión. El valor del esfuerzo axial a compresión en la base es de -43,17 N y el de tracción es de 42,81 N.

A medida que vamos ascendiendo los valores de los axiles van decreciendo llegando a valores justo antes del tirante de la ménsula de -3,57 N y 4,13 N, prácticamente la décima parte del valor máximo, hasta llegar a valores prácticamente nulos por encima de dicho tirante como podemos ver en la figura 5.12.

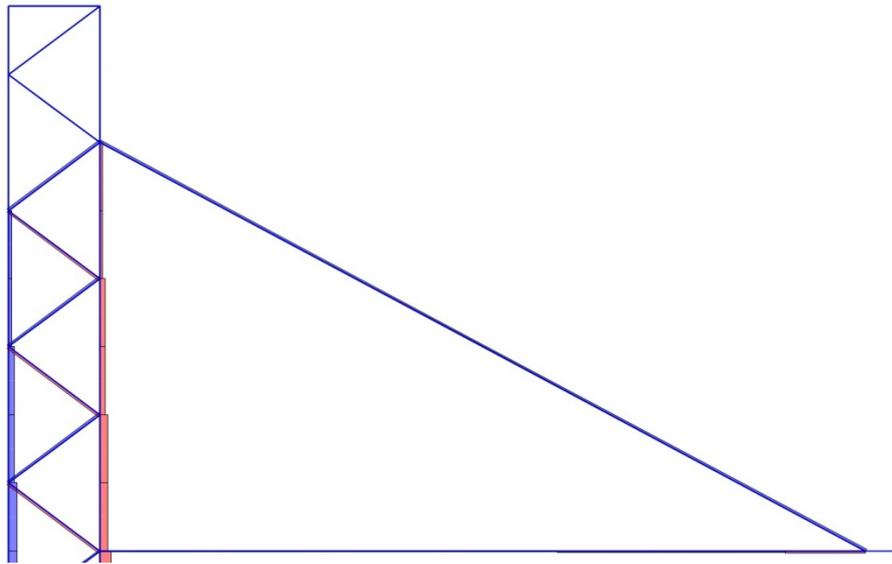


Figura 5.12: Detalle de axial

### 5.1.3. DIAGRAMA DE TENSIONES

En la siguiente figura 5.13 vamos a mostrar el diagrama de tensiones siendo este uno de los resultados más importantes a la hora de realizar un análisis en componentes metálicos.

Este diagrama se corresponde con la tensión  $\sigma_{xx}$  de la estructura ya que hemos considerado despreciar los esfuerzos cortantes debido a que son bastante inferiores a los axiles que serán los predominantes en una estructura triangulada como es la nuestra.

Los valores que obtenemos de este tipo de diagramas nos permiten comprobar si las cargas a las que hemos sometido la estructura van a provocar el fallo de alguna barra de dicha estructura o por si el contrario está bien diseñada y tiene un factor de seguridad adecuado.

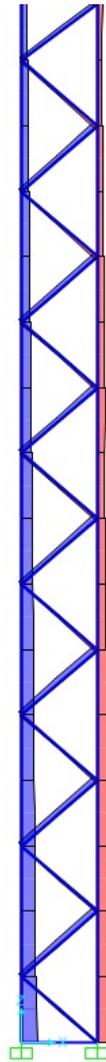


Figura 5.13: Diagrama de tensiones normales  $\sigma_{xx}$

En esta imagen podemos ver como los valores máximos de las tensiones en el poste están en su base con un valor de 28182,8 Pa y van disminuyendo a medida que ascienden por el poste.

#### 5.1.4. PANDEO

Como hemos dicho anteriormente, nosotros nos vamos a centrar en las deformaciones que sufra el poste, por lo tanto a la hora de calcular este diagrama nos vamos a quedar con el primer modo que nos proporcione el programa y haga referencia al poste, este modo va a ser el que podemos observar a continuación en la figura 5.14.

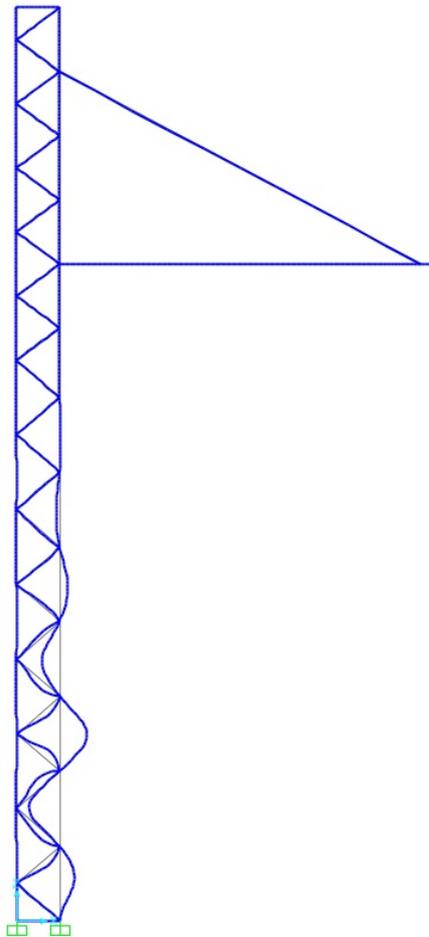


Figura 5.14: Primer modo de pandeo

Como era previsible, en casos anteriores vimos que el perfil derecho del poste era el que estaba sometido a compresión y de mayores valores en la base del poste, por lo tanto ese perfil es el que puede pandear y fallar. Para este modo obtenemos un coeficiente de pandeo de 88372,8.

## 5.2. MODELADO DEL SEMIPÓRTICO

De la misma forma que en el caso anterior, el primer paso es definir la malla que vamos a utilizar para dibujar la estructura, para ello fijándonos en la figura 5.15 definiremos sus propiedades como son el número de líneas del mallado, la distancia entre ellas y el punto de inicio de los ejes de coordenadas.

Como solo nos interesa el plano XZ al ser un modelo plano en 2D, en la dirección Y vamos a definir únicamente un nivel y que tenga una distancia genérica de un metro, ya que estos datos no van a influir a la hora de realizar los cálculos. En la dirección del eje X, la horizontal, tendremos 16 divisiones separadas cada una de ellas 1 metro mientras que en el eje Z, el vertical, vamos a tener 40 divisiones separadas cada una 0,35 m. El centro de los ejes de coordenadas será el mismo, el origen en el (0, 0, 0).

Una vez realizado este mallado inicial haremos algunas modificaciones de distancias parciales entre divisiones entrando en las propiedades del mallado, ya que todas no tienen la misma distancia, quedando finalmente el mallado como el que se observa en la figura 5.16.

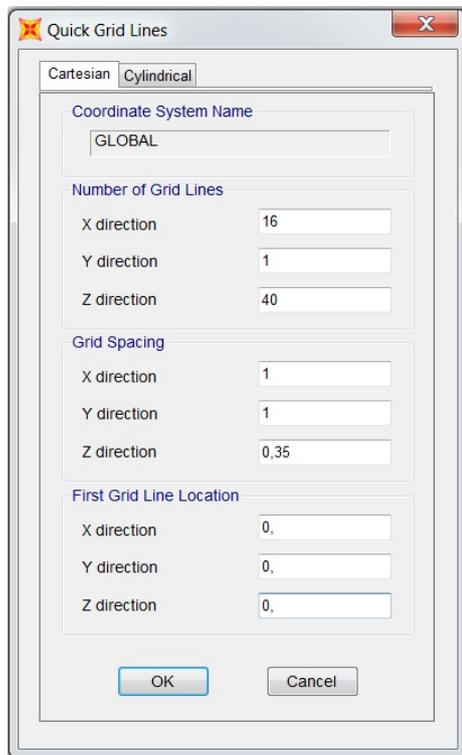


Figura 5.15: Propiedades del mallado



Figura 5.16: Mallado

Después de trazar el mallado tenemos que definir los materiales y los perfiles que utilizaremos para las distintas partes de las que está compuesta la estructura.

Para esta estructura vamos a utilizar dos tipos de materiales como se puede ver en la figura 5.17, uno es el acero S275 que lo utilizaremos para los elementos por los que está compuesto el poste y el dintel, mientras que el otro material es el aluminio, que lo utilizaremos para los elementos que componen las ménsulas y los elementos tirantes.

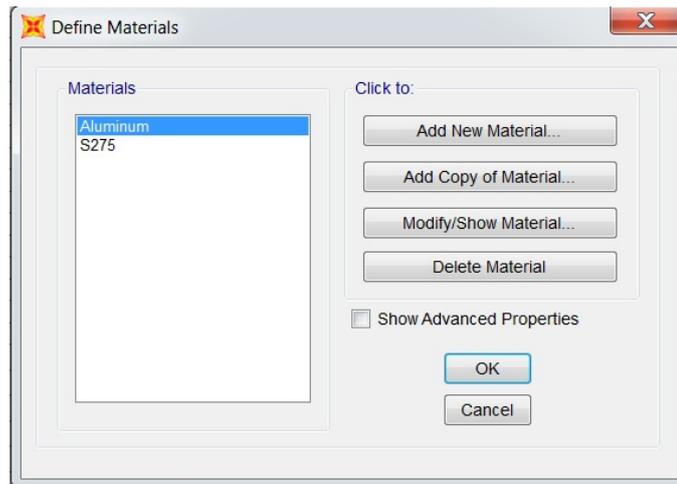


Figura 5.17: Selección de materiales

Una vez tenemos definidos los materiales que vamos a utilizar pasamos a definir los tipos de perfiles que van a formar parte de nuestra estructura como podemos observar en la figura 5.18.

Para formar la estructura del poste hemos definido dos perfiles, uno es el perfil de acero UPN 220, este perfil en forma de U es el que va colocado en lados opuestos y unido mediante el otro tipo de perfiles, que son unas chapas de acero de 40 x 20 mm formando un cuerpo rectangular. De la misma manera que antes, al ser un modelo plano cuando dibujemos la estructura sobre el mallado solo veremos una de estas chapas dibujada, por lo que en sus propiedades multiplicaremos por dos tanto el área como el momento de inercia de la chapa para simular la situación real del poste, que es la existencia de dos chapas uniendo ambos perfiles UPN.

Para el dintel hemos definido dos perfiles también, los cordones superiores e inferiores del dintel están compuestos por un perfil angular de acero L 70 x 7 mientras que las diagonales interiores están compuestas por un perfil de acero angular L 45 x 5. En este caso tendremos que multiplicar a ambos perfiles por dos tanto el área como el momento de inercia, esto es debido a que el dintel tiene forma de cajón cuadrado, pero al dibujarlo en un sistema plano solo vemos el perfil que se encuentra por delante pero también tenemos otro perfil detrás, por eso vamos a tener que duplicar su valor para que simule el sistema real.

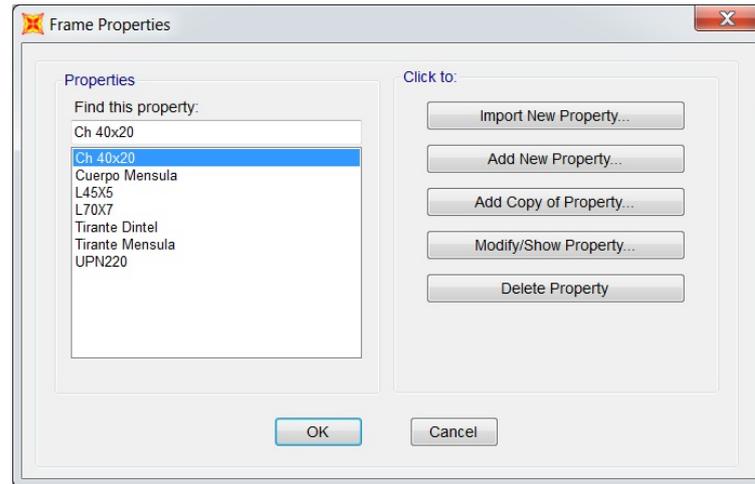


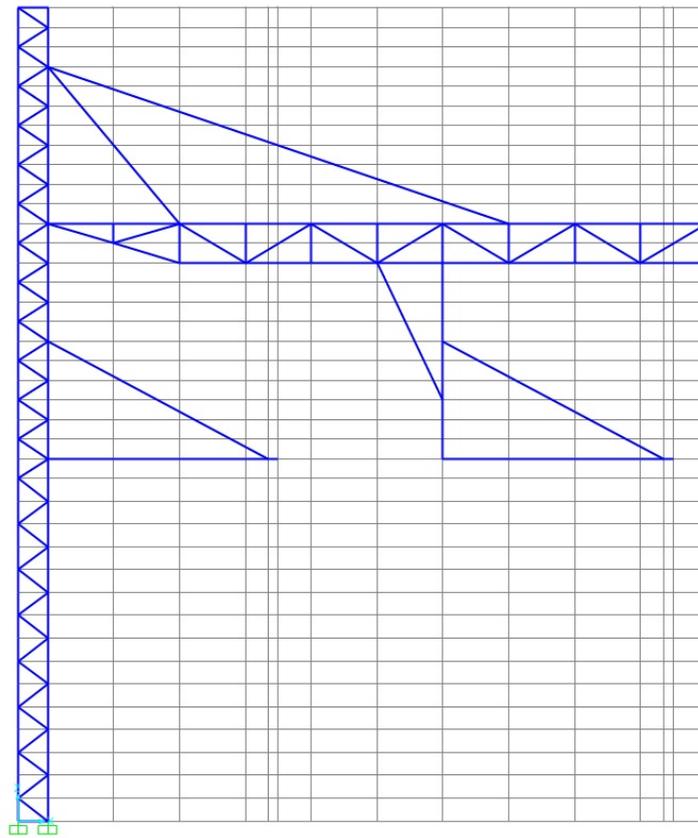
Figura 5.18: Selección de perfiles

Con referencia a las ménsulas, en este caso vamos a tener dos pero ambas están formadas por los mismos perfiles. Hemos definido dos perfiles, uno es el Cuerpo de la Ménsula que se corresponde con la barra horizontal que veremos en la figura 5.19, la cual está formada por un tubo de aluminio de 70 mm de diámetro con un espesor de 5 mm, y sobre la cual irán colocadas las cargas de la estructura. El otro perfil es el Tirante de la Ménsula, que se corresponde con la barra en diagonal que se verá en la figura 5.19, y que está compuesta por un tubo de aluminio de 55 mm de diámetro con un espesor de 5 mm, siendo este tirante el que sujeta el cuerpo de la ménsula mediante su unión al poste. En la ménsula que va sujeta únicamente en el dintel tendremos otro tirante que sujete dicha ménsula pero su perfil es el mismo que el denominado Tirante de la Ménsula.

Para una correcta sujeción del dintel se colocan dos tirantes unidos al poste y que sirven de sustento para el dintel, ambos tirantes serán tubos de aluminio de 55 mm de diámetro con un espesor de 5 mm.

Una vez creados de forma correcta todos los perfiles necesarios el siguiente paso es dibujar la estructura en nuestro mallado y poner las restricciones que sean necesarias.

A la hora de ir dibujando nuestra estructura tenemos que asegurarnos de que cada barra que dibujemos tenga asignado el perfil que le corresponda para así una vez dibujada toda la estructura tener todos los perfiles asociados a las barras estando completamente definida como podemos ver en la figura 5.19. En la base del poste, al ir unido a la cimentación, le asignaremos la restricción de empotramiento.



*Figura 5.19: Estructura del semipórtico*

A continuación asignaremos a la unión del dintel con el poste, a la unión del cuerpo de la ménsula con el poste, como a ambos extremos de los tirantes existentes la libertad en forma de rótula como observamos en la figura 5.20, esto se debe a que estos tramos puede tener cierto grado de giro para contrarrestar los diferentes esfuerzos a los que están sometidos.

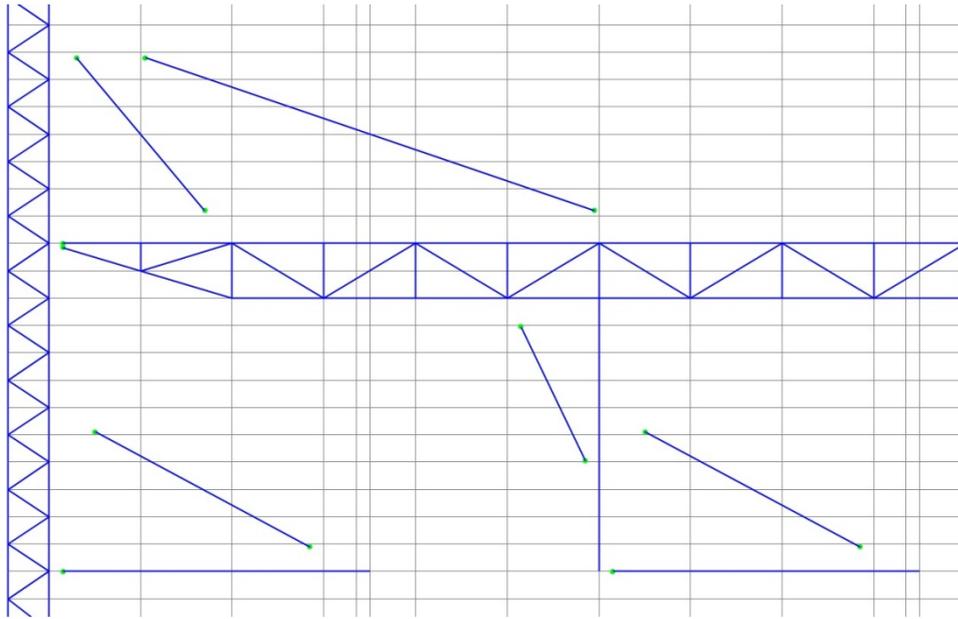


Figura 5.20: Asignación de libertades

Por último, una vez tenemos la estructura completamente dibujada y con todas las restricciones o libertades asignadas, debemos situar las cargas en la estructura. Las cargas irán colocadas en el cuerpo de la ménsula en dos puntos distanciados un metro entre ellos como se puede observar en la figura 5.21. Estos puntos serán los de sujeción de la catenaria y les asignaremos un valor unitario de fuerza, ya que vamos a suponer este valor genérico pudiendo más tarde multiplicar por el valor real y obtener los esfuerzos.

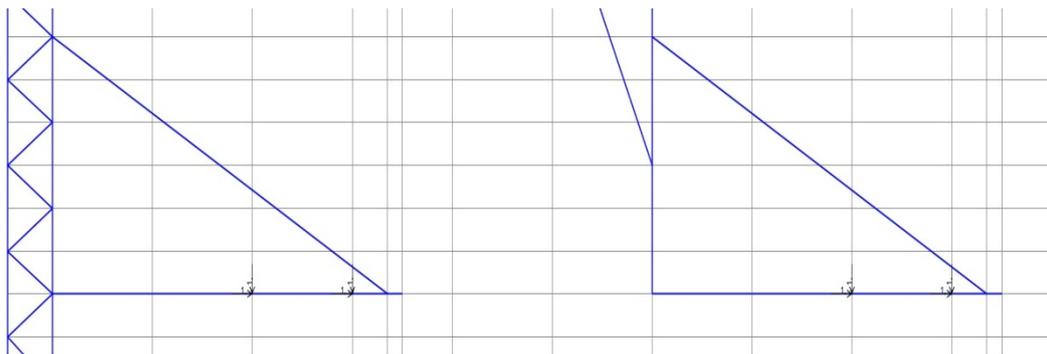


Figura 5.21: Asignación de cargas

Una vez tenemos toda la estructura completamente definida podemos ejecutar el programa y calcular la deformación que sufrirá la estructura ante la acción de las cargas y los diferentes diagramas de esfuerzos y estados tensionales.

A continuación vamos a mostrar dichos diagramas que nos servirán posteriormente de comparación entre ellos:

### 5.2.1. DESPLAZAMIENTOS

En la siguiente figura 5.22 podemos observar cómo la acción de las fuerzas ha producido un desplazamiento tanto en el poste como en el dintel y en las ménsulas. Esto es debido básicamente a que como el poste únicamente está empotrado en su extremo inferior y las cargas están aplicadas en las ménsulas, éstas están descentradas con respecto al eje del poste, lo que origina que haya un desplazamiento en la dirección de las cargas y que será mayor cuanto más alejadas estén.

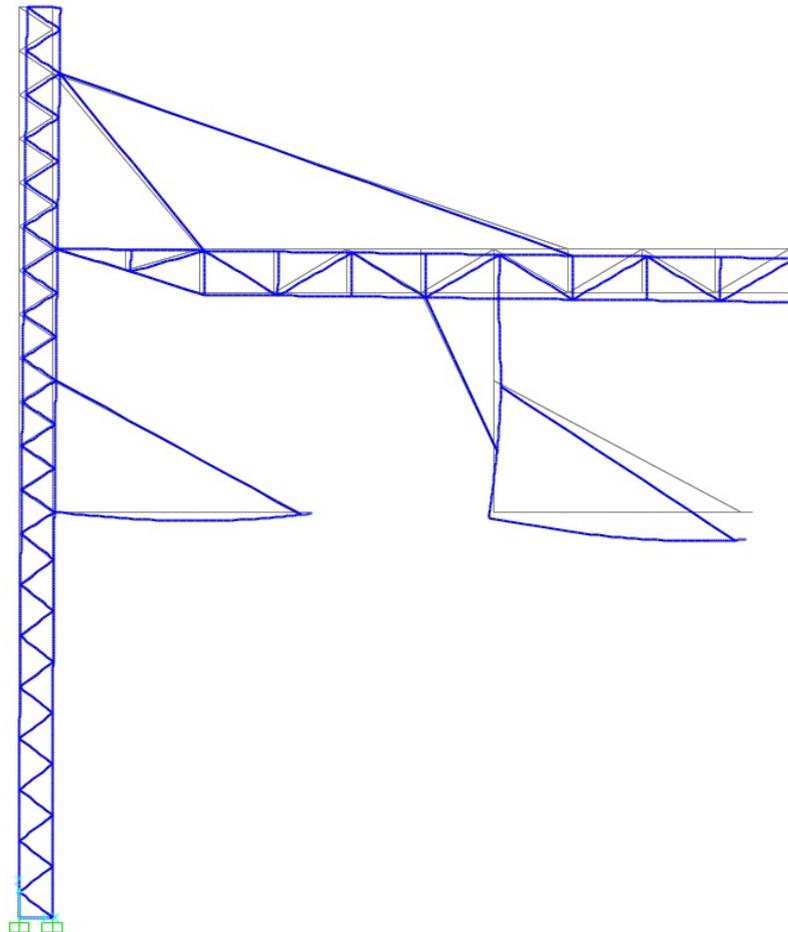


Figura 5.22: Desplazamiento debido a las cargas

Como las cargas tienen dirección hacia abajo y a la derecha, el desplazamiento se producirá en estas direcciones como podemos comprobar. El desplazamiento del perfil izquierdo del poste tiene un valor de  $2,768E-05$  m en la dirección del eje X y un valor de  $6,909E-07$  m en dirección del eje Z mientras que el perfil derecho del poste tiene un valor de  $2,768E-05$  m en la dirección del eje X y un valor de  $-7,402E-07$  m en la dirección del eje Z.

En cuanto al desplazamiento del dintel, el cordón superior tiene un desplazamiento en su extremo de valor  $1,724E-05$  m en la dirección del eje X y un valor de  $-3,365E-05$  m en la dirección del eje Z mientras que el cordón inferior tiene un desplazamiento de  $1,528E-05$  en la dirección del eje X y un valor de  $-3,365E-05$  en la dirección del eje Z.

Como podemos observar todos estos valores de desplazamientos son muy pequeños ya que hemos aplicado una carga de valor unitario.

#### 5.2.2. DIAGRAMA DE AXILES

La siguiente figura 5.23 muestra los diagramas de axiles que sufre la estructura debido a las cargas aplicadas. Los diagramas de axiles de color rojo se corresponden a las zonas que se encuentran a compresión mientras que los axiles en color azul son las zonas que se encuentran a tracción.

Este hecho se debe a tener las cargas aplicadas en las ménsulas, estas cargas van a hacer que la estructura se desplace un poco hacia la derecha como vimos en el caso anterior, por ello al girar la estructura hacia la derecha hace que el perfil derecho del poste se comprima y por lo siguiente que el perfil contrario, el izquierdo, se traccione.

Cuanto mayor es la distancia de las cargas a la base del poste mayores valores de esfuerzo axil tendremos, es por ello que en la base del poste es donde se encuentra el mayor valor de esfuerzo axil tanto a tracción como a compresión. El valor del esfuerzo axil a compresión en la base es de  $-97,91$  N y el de tracción es de  $96,64$  N.

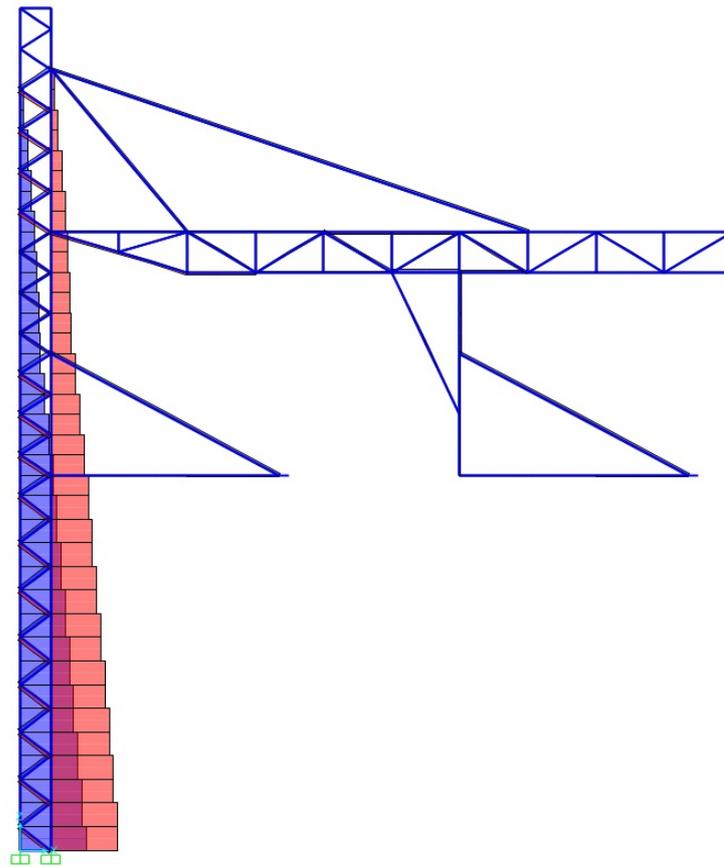


Figura 5.23: Diagrama de axiles

A medida que vamos ascendiendo los valores de los axiles van decreciendo, como podemos ver en la figura 5.24, llegando a valores justo antes del tirante del dintel de  $-5,66$  N y  $5,35$  N, prácticamente valores veinte veces menos que el valor máximo, hasta llegar a valores prácticamente nulos por encima de dicho tirante.

Con relación al dintel, según vemos en la figura 5.24, observamos que los valores de los esfuerzos son bastante más pequeños que los soportados por el poste. Tenemos unos valores un poco más elevados donde está situada la ménsula que únicamente está sujeta por el dintel, aquí vemos como debido al peso y las cargas el cordón inferior está sometido a tracción, con un valor de  $4,68$  N, mientras que el cordón superior está sometido a compresión con un valor de  $-3,53$  N.

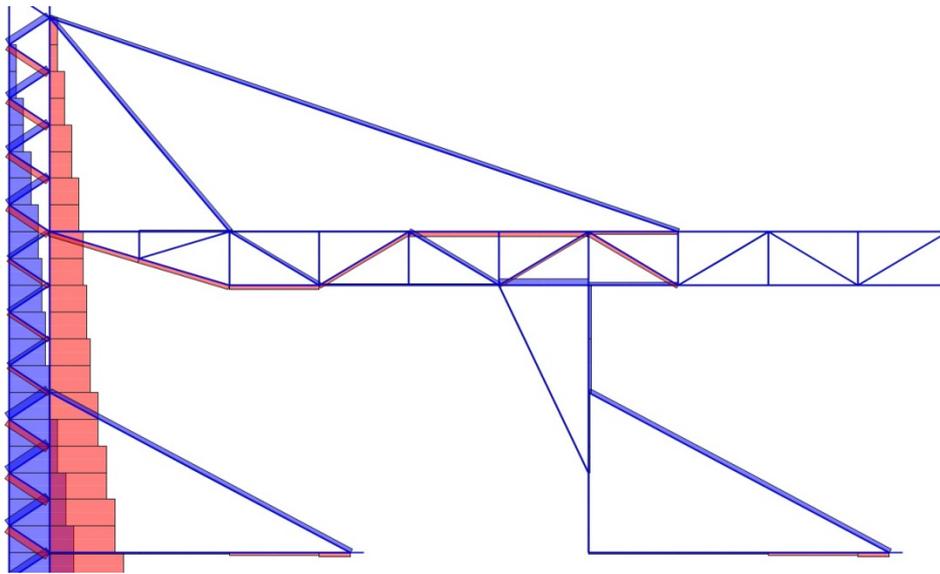


Figura 5.24: Detalle de axil

### 5.2.3. DIAGRAMA DE TENSIONES

En la siguiente figura 5.25 vamos a mostrar el diagrama de tensiones siendo este uno de los resultados más importantes a la hora de realizar un análisis en componentes metálicos.

Este diagrama se corresponde con la tensión  $\sigma_{xx}$  de la estructura ya que hemos considerado despreciar los esfuerzos cortantes debido a que son bastante inferiores a los axiles que serán los predominantes en una estructura triangulada como es la nuestra.

Los valores que obtenemos de este tipo de diagramas nos permiten comprobar si las cargas a las que hemos sometido la estructura van a provocar el fallo de alguna barra de dicha estructura o por si el contrario está bien diseñada y tiene un factor de seguridad adecuado.

En la imagen podemos ver como los valores máximos de las tensiones, sin tener en cuenta las ménsulas, están en la base del poste con un valor de 29542,1 Pa.

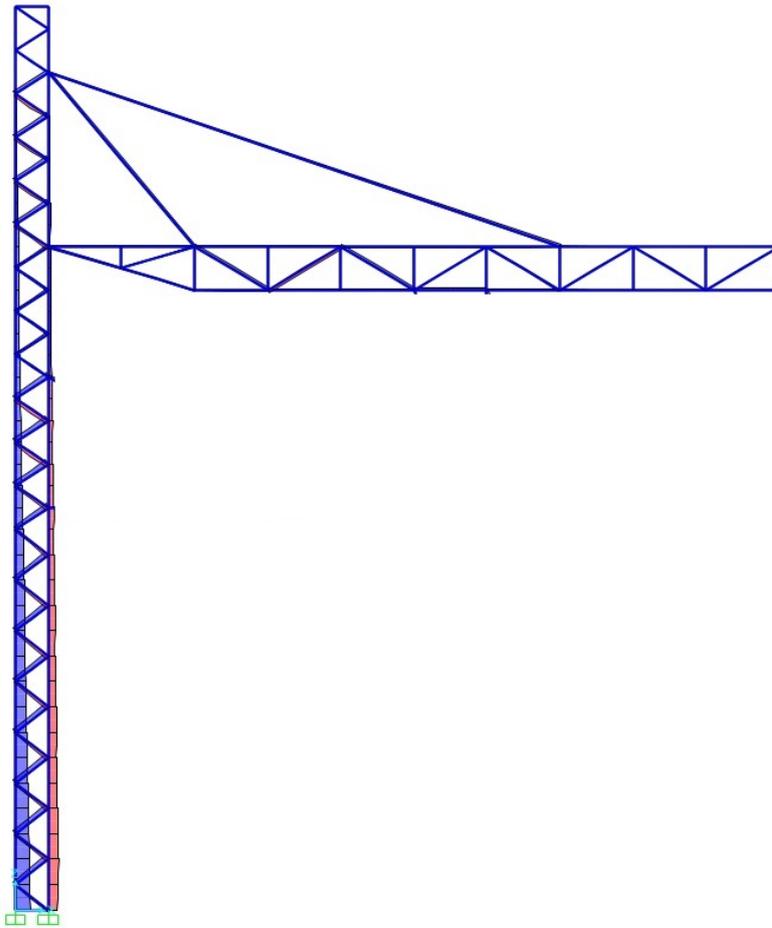


Figura 5.25: Diagrama de tensiones normales  $\sigma_{xx}$

Si nos fijamos en la siguiente figura 5.26, vemos como en el dintel los valores son mucho más pequeños comparados con el poste, teniendo como valor máximo 5452,9 Pa.

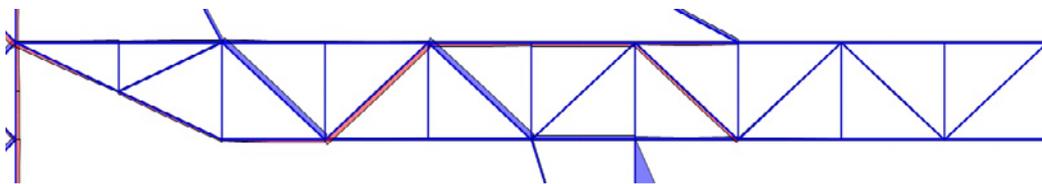


Figura 5.26: Detalle de tensiones normales  $\sigma_{xx}$  del dintel

#### 5.2.4. PANDEO

Como hemos dicho anteriormente, nos vamos a centrar en las deformaciones que sufra el semipórtico, por lo tanto a la hora de calcular este diagrama nos vamos a quedar con el primer modo que nos de el programa y haga referencia al semipórtico, este modo va a ser el que podemos observar en la figura 5.27.

Como era previsible, en casos anteriores vimos que el perfil derecho del poste era el que estaba sometido a compresión y de mayores valores en la base del poste, por lo tanto ese perfil es el que puede pandear y fallar. Para este modo obtenemos un coeficiente de pandeo de 136511,3.

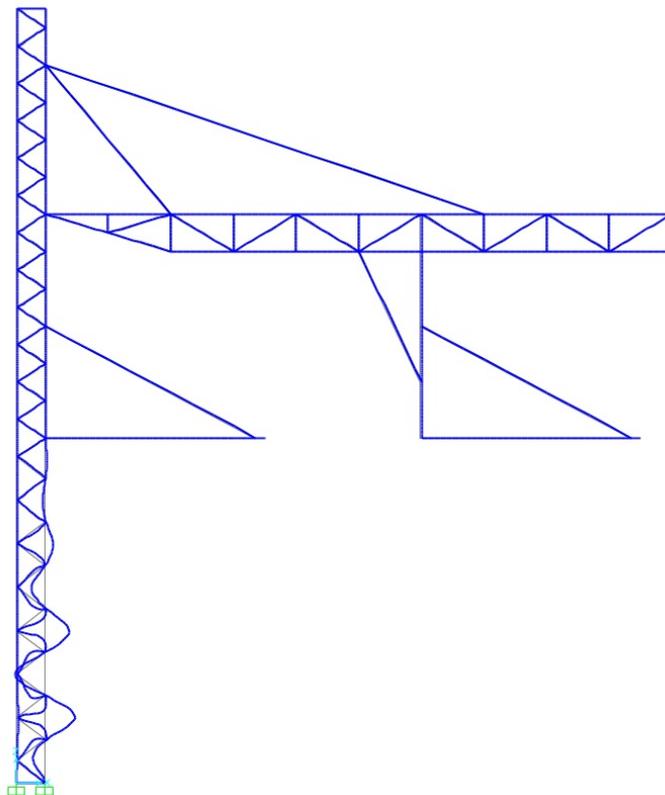


Figura 5.27: Primer modo de pandeo

#### 5.3. MODELADO DEL PÓRTICO

Igual que en los casos anteriores, el primer paso para construir la estructura es definir la malla en la que vamos a dibujar, para ello fijándonos en la figura 5.28 vamos a definir sus propiedades como son el número de líneas del mallado, la distancia entre ellas y el punto de inicio de los ejes de coordenadas.

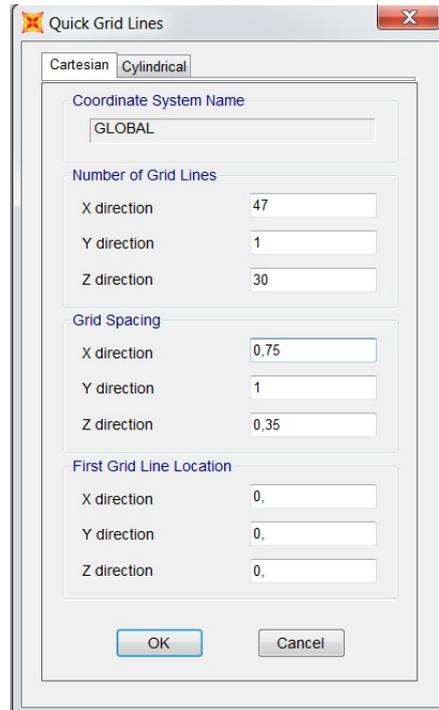


Figura 5.28: Propiedades del mallado

Al interesarnos solo el plano XZ por ser uno modelo plano en 2D, en la dirección Y vamos a definir únicamente un nivel y que tenga una distancia genérica de un metro, ya que estos valores no van a influir a la hora de realizar los cálculos. En la dirección del eje X, la horizontal, tendremos 47 divisiones separadas cada una de ellas 0,75 m mientras que en el eje Z, el vertical, tendremos 30 divisiones separadas cada una 0,35 m. El centro de los ejes de coordenadas será el mismo, el origen en el (0, 0, 0).

Una vez realizado el mallado inicial haremos algunas modificaciones de distancias parciales entre divisiones entrando en las propiedades del mallado, esto se debe a que no todas tienen la misma distancia, quedando finalmente el mallado como el que observamos en la figura 5.29.

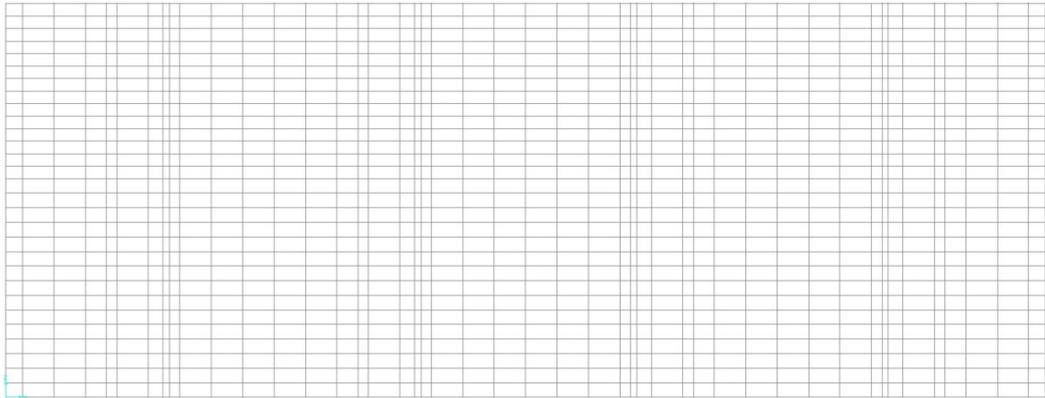


Figura 5.29: Mallado

Una vez tenemos trazado el mallado hay que definir los materiales y los perfiles que utilizaremos para las distintas partes de las que está compuesta la estructura.

Para esta estructura vamos a utilizar dos tipos de materiales como se puede ver en la figura 5.30, uno es el acero S275 que lo utilizaremos para los elementos por los que está compuesto el poste y el dintel, mientras que el otro material es el aluminio, que lo vamos a utilizar para los elementos que componen las ménsulas y elementos tirantes.

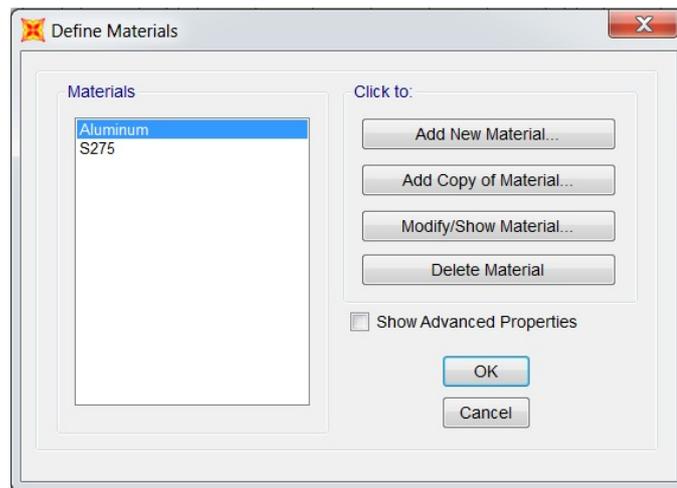


Figura 5.30: Selección de materiales

Una vez definidos los materiales vamos a pasar a definir los tipos de perfiles que van a formar parte de nuestra estructura tal como podemos observar en la figura 5.31.

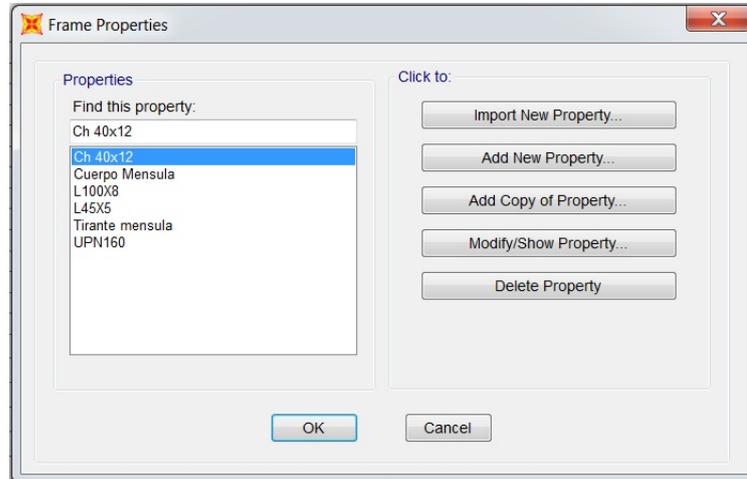


Figura 5.31: Selección de perfiles

Para formar la estructura del poste hemos definido dos perfiles, uno es el perfil de acero UPN 160, este perfil en forma de U es el que va colocado en lados opuestos y unido mediante el otro tipo de perfiles, que son unas chapas de acero de 40 x 12 mm formando un cuerpo rectangular. De la misma forma, al ser un modelo plano, cuando dibujemos la estructura sobre el mallado solo veremos una de estas chapas dibujada por lo que en sus propiedades deberemos multiplicar tanto su área como su momento de inercia por dos para simular la situación real del poste, que es la existencia de dos chapas uniendo ambos perfiles UPN.

Para la estructura del dintel hemos definido también dos perfiles, los cordones superiores e inferiores del dintel están compuestos por un perfil angular de acero L 100 x 8 mientras que los montantes están formados por un perfil angular de acero L 45 x 5. En este caso también deberemos multiplicar a ambos perfiles por dos tanto su área como el momento de inercia ya que el dintel tiene forma de cajón cuadrado, pero al dibujarlo en un sistema plano únicamente vemos el perfil que se encuentra por delante pero también existe otro por detrás, por eso tenemos que duplicar su valor para que simule el sistema real.

En referencia a las ménsulas, en este caso vamos a tener 4, pero todas van a estar formadas por los mismos perfiles. Hemos definido dos, uno es el Cuerpo de la Ménsula que se corresponde con la barra horizontal que veremos en la figura 5.32, la cual está formada por un tubo de aluminio de 70 mm de diámetro con un espesor de 5 mm, siendo esta la barra sobre la cual irán colocadas las cargas que deberá soportar la estructura. El otro perfil es el Tirante de la Ménsula, que se corresponde con la barra en diagonal que veremos en la figura 5.32, y que está compuesta por un tubo de aluminio de 55 mm con un espesor de 5 mm, siendo este el tirante que sujeta al cuerpo de la ménsula mediante su unión al poste. En las ménsulas que van sujetas únicamente en el dintel dispondremos de otro tirante que sujete las ménsulas estando estos unidos al dintel pero teniendo un perfil igual que el denominado Tirante de la Ménsula.

Una vez creados todos los perfiles necesarios de forma correcta el siguiente paso es dibujar la estructura en nuestro mallado y poner las restricciones que sean necesarias.

A medida que vamos dibujando nuestra estructura tenemos que asegurarnos de que cada barra tenga asignado el perfil que le corresponda para así una vez dibujada toda la estructura tener todos los perfiles asociados a las barras consiguiendo estar completamente definida como podemos ver en la figura 5.32. En la base del poste, al ir unido a la cimentación, le asignaremos la restricción de empotramiento.

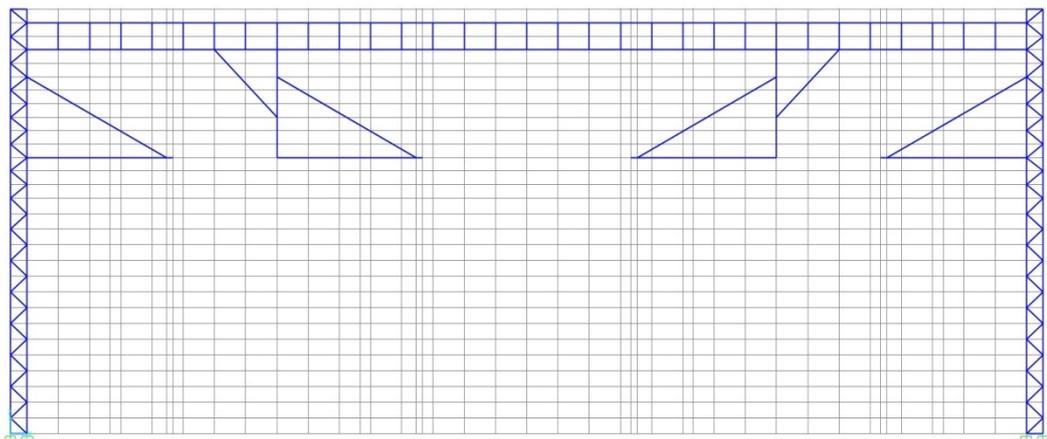


Figura 5.32: Estructura del pórtico

A continuación asignaremos tanto a la unión del cuerpo de la ménsula con el poste como a los distintos tirantes que hay la libertad en forma de rótula como observamos en la figura 5.33. Esto se debe a que estos tramos pueden tener cierto grado de giro para contrarrestar los diferentes esfuerzos a los que están sometidos.

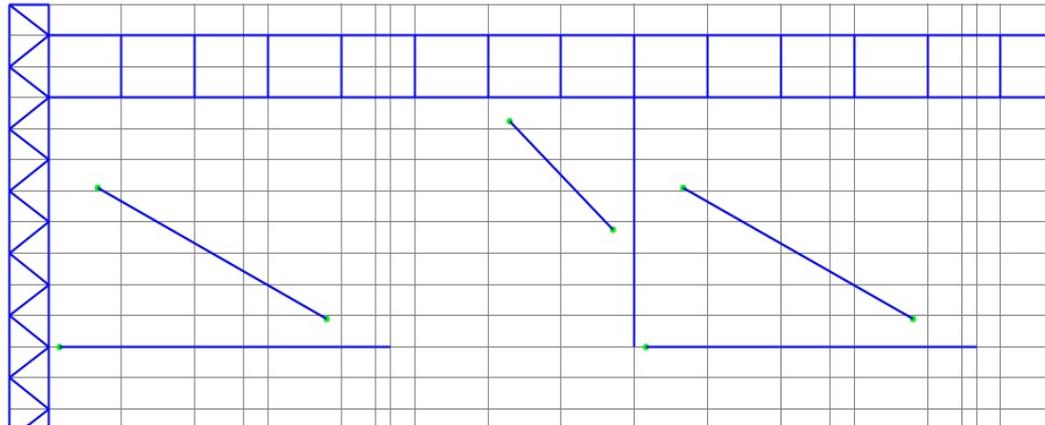


Figura 5.33: Asignación de libertades

Al ser simétrica la estructura hemos representado solo la mitad para que se pueda comprobar mejor donde están situadas las rótulas, ya que si ponemos la estructura completa la imagen es demasiado grande para poder verlo correctamente.

Por último, una vez tenemos la estructura completamente dibujada y con las restricciones y libertades asignadas, debemos situar las cargas. Las cargas, igual que en los demás casos, irán situadas en el cuerpo de la ménsula en dos puntos distanciados un metro como podemos observar en la figura 5.34. Estos puntos serán de sujeción de la catenaria y les asignaremos un valor unitario de fuerza, ya que vamos a suponer este valor genérico de carga pudiendo más tarde multiplicar por el valor real y obtener los esfuerzos.

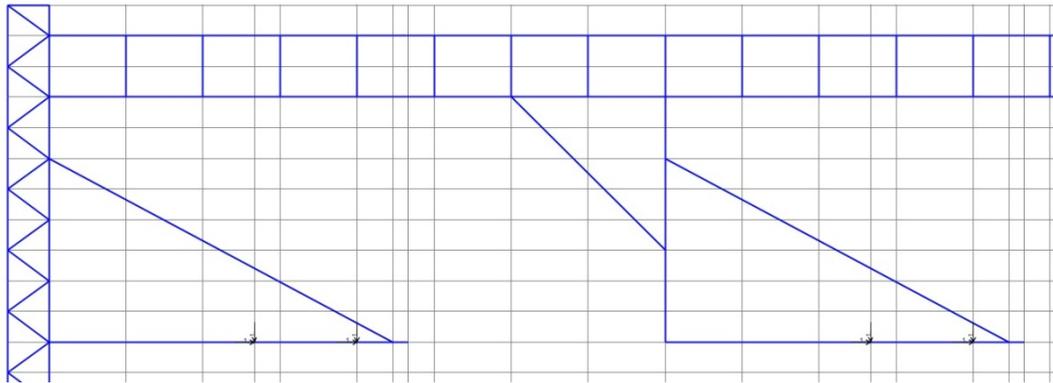


Figura 5.34: Asignación de cargas

Al igual que antes hemos representado únicamente la mitad de la estructura para que se pueda ver mejor los puntos donde están colocadas las cargas de nuestra estructura.

Una vez tenemos toda la estructura completamente definida podemos ejecutar el programa y calcular la deformación que sufrirá la estructura ante la acción de las cargas y los diferentes diagramas de esfuerzos y estados tensionales.

A continuación vamos a mostrar dichos diagramas que nos servirán posteriormente de comparación entre ellos:

### 5.3.1. DESPLAZAMIENTOS

En la siguiente figura 5.35 podemos observar cómo la acción de las fuerzas ha producido un pequeño desplazamiento tanto en los postes como en el dintel y las ménsulas. Esto es debido básicamente a que como los postes únicamente están empotrados en su extremo inferior y las cargas están aplicadas en las ménsulas, éstas están descentradas con respecto al eje de los postes, lo que origina que haya un desplazamiento en la dirección de las cargas.

En este caso al tener una estructura formada por dos postes unidos mediante un dintel, los postes van a sufrir menos desplazamientos ya que es una estructura más rígida y por lo tanto más consistente.

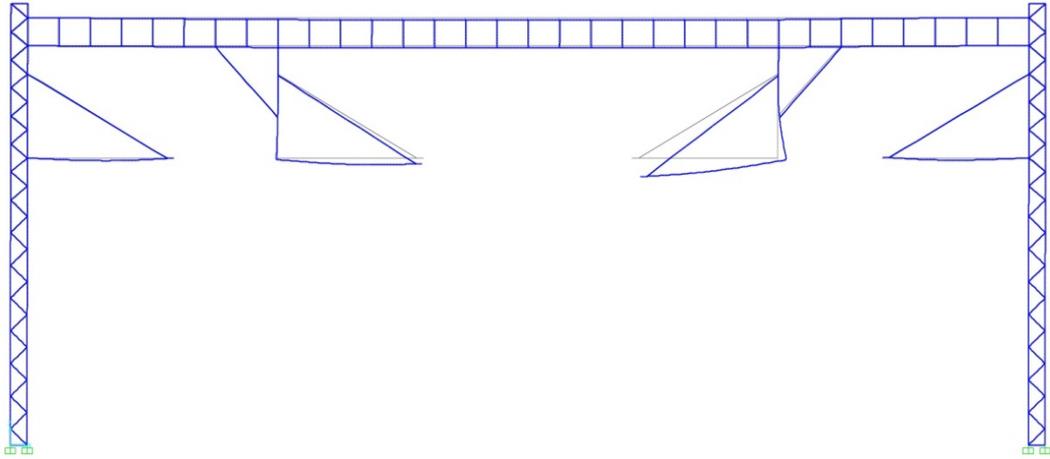


Figura 5.35: Desplazamiento debido a las cargas

Los desplazamientos tanto en los postes como en el dintel son tan pequeños que al ser una estructura tan grande apenas se aprecia ese desplazamiento incluso haciendo un gran zoom en la zona.

Como las cargas tienen dirección hacia abajo y a la derecha, el desplazamiento se producirá en estas direcciones como podemos comprobar.

El desplazamiento del perfil izquierdo del poste izquierdo tiene un valor de  $1,123E-05$  m en la dirección del eje X y un valor de  $2,902E-07$  m en dirección del eje Z mientras que el perfil derecho del poste tiene un valor de  $1,123E-05$  m en la dirección del eje X y un valor de  $-3,503E-07$  m en la dirección del eje Z.

El desplazamiento del perfil izquierdo del poste derecho tiene un valor de  $1,055E-05$  m en la dirección del eje X y un valor de  $9,03E-08$  m en la dirección del eje Z mientras que el perfil derecho del poste tiene un valor de  $1,055E-05$  m en la dirección del eje X y un valor de  $-1,58E-07$  m en la dirección del eje Z.

Como podemos observar todos estos valores de desplazamientos son muy pequeños ya que hemos aplicado una carga de valor unitario.

### 5.3.2. DIAGRAMA DE AXIL

La siguiente figura 5.36 muestra los diagramas de axiles que sufre la estructura debido a las cargas aplicadas. Los diagramas de axiles de color rojo se corresponden a las zonas que se encuentran a compresión mientras que los axiles en color azul son las zonas que se encuentran a tracción.

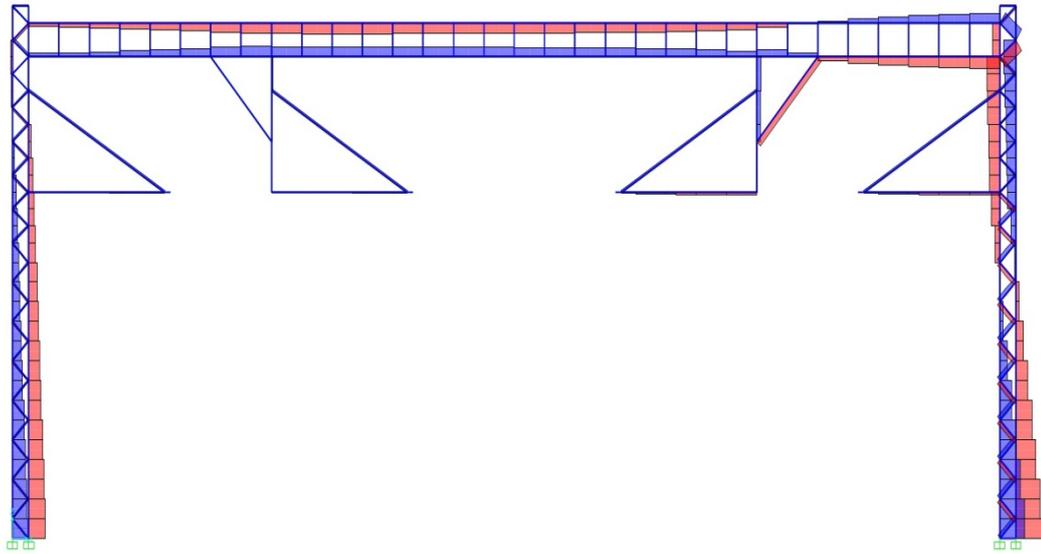


Figura 5.36: Diagrama de axiles

Este hecho se debe a tener las cargas aplicadas en las ménsulas, estas cargas van a hacer que la estructura se desplace un poco hacia la derecha como vimos en el caso anterior, por ello al girar la estructura hacia la derecha hace que el perfil derecho del poste se comprima y por lo siguiente que el perfil contrario, el izquierdo, se traccione.

En este caso al tener dos postes que están sujetando tanto el dintel como las distintas ménsulas, los esfuerzos van a estar repartidos entre ambos. Podemos ver como al poste izquierdo le ocurre lo mismo que en los casos anteriores, donde los mayores esfuerzos están en la base del poste, con valores de  $-40,82$  N en la zona de compresión y de  $38,6$  N en la zona de tracción, y a medida que vamos ascendiendo los valores van siendo mucho menores.

La situación del poste derecho es bien distinta, al tener las fuerzas en las 4 ménsulas con la dirección hacia abajo y hacia la derecha, va a hacer que el poste derecho soporte mayores esfuerzos al provocar las fuerzas que el conjunto se desplace completamente hacia la derecha. En la mitad inferior del poste vamos a tener el perfil izquierdo traccionado con un valor máximo en la base de  $60,85$  N y el perfil derecho comprimido con un valor máximo en el poste de  $-69,71$  N, mientras que en la mitad superior del poste este hecho se va a revertir teniendo el perfil izquierdo comprimido con un valor máximo en la unión del poste con el dintel de  $-31,2$  N y el perfil derecho traccionado con un valor máximo de  $30,59$  N.

Con relación al dintel, al tener una luz tan grande como son 24 m, podemos observar que en este caso los valores de los esfuerzos son más pequeños que los soportados por el poste, pero no son tan insignificantes como en los casos anteriores, ya que tenemos unos valores en torno a los 17 N a tracción en el cordón inferior, y unos valores en torno a 19 N a compresión en el cordón superior. Estos valores se encuentran principalmente en la zona central del dintel y se debe a que el dintel debe sujetar dos conjuntos de ménsulas, por lo que estos valores van a ser debido a su propio peso y a las cargas que están soportando las ménsulas.

### 5.3.3. DIAGRAMA DE TENSIONES

En la siguiente figura 5.37 vamos a mostrar el diagrama de tensiones siendo este uno de los resultados más importantes a la hora de realizar un análisis en componentes metálicos.

Este diagrama se corresponde con la tensión  $\sigma_{xx}$  de la estructura ya que hemos considerado despreciar los esfuerzos cortantes debido a que son bastante inferiores a los axiles que serán los predominantes.

Los valores que obtenemos de este tipo de diagramas nos permiten comprobar si las cargas a las que hemos sometido la estructura van a provocar el fallo de alguna barra de dicha estructura o por si el contrario está bien diseñada y tiene un factor de seguridad adecuado.

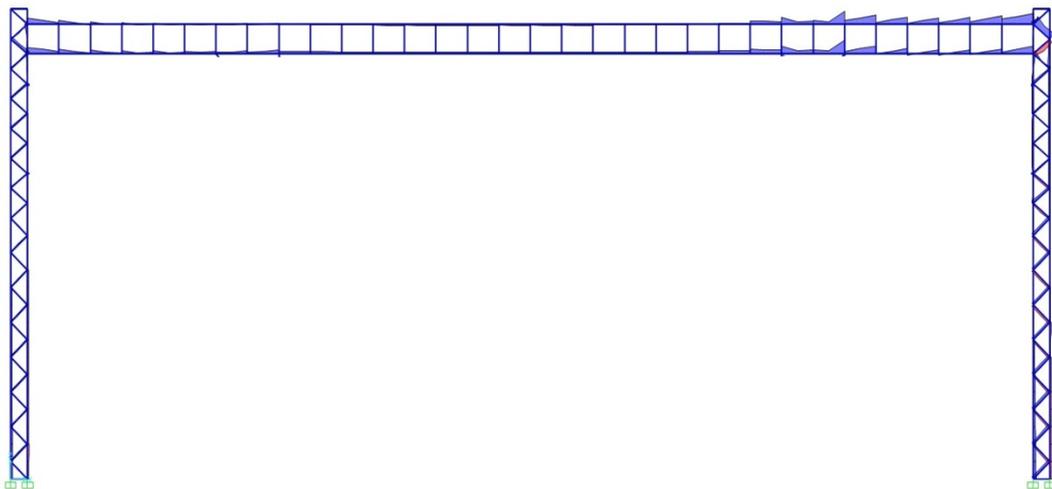


Figura 5.37: Diagrama de tensiones normales  $\sigma_{xx}$

En la siguiente figura 5.38 podemos ver como el valor máximo en referencia al poste lo tenemos en su base con un valor de 29754,8 Pa.

No obstante también observamos como en el dintel hay unas tensiones notables especialmente en el lugar donde el conjunto de la ménsula está unido al dintel teniendo como valor máximo de 110163,92 Pa.

El origen de estas tensiones es el momento flector que aparece en esa zona, que es significativo al no estar triangulado el dintel, y que genera tensiones normales que se suman a las debidas al axil y por tanto hay que tener en cuenta.

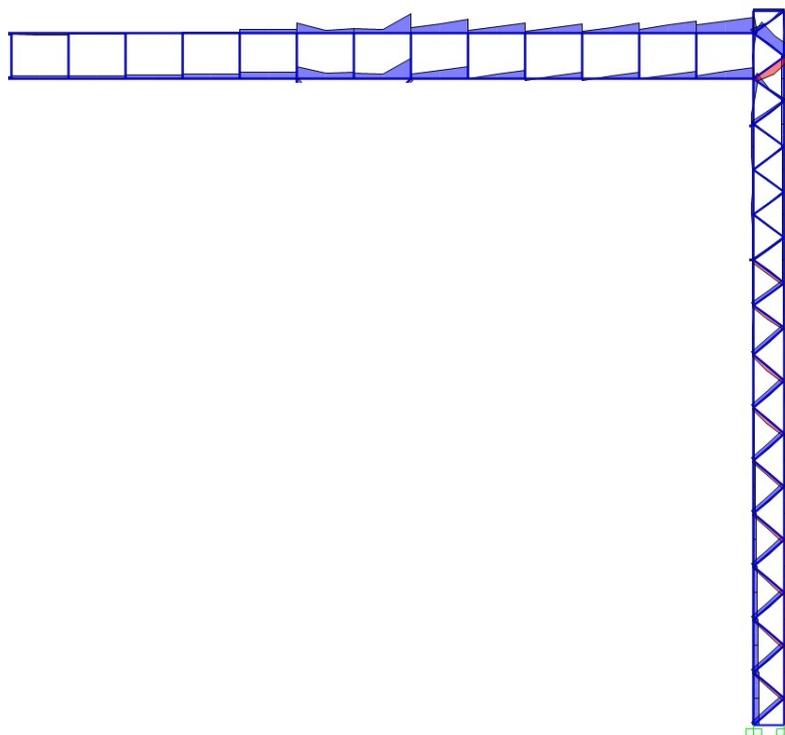


Figura 5.38: Detalle de tensiones normales  $\sigma_{xx}$  en la mitad de la estructura

#### 5.3.4. PANDEO

Del mismo modo que en casos anteriores nos vamos a centrar en las deformaciones que sufra el poste, por lo tanto a la hora de calcular este diagrama nos vamos a quedar con el primer modo que nos de el programa que sea positivo y que haga referencia al poste, este modo va a ser el que podemos observar en la figura 5.39.

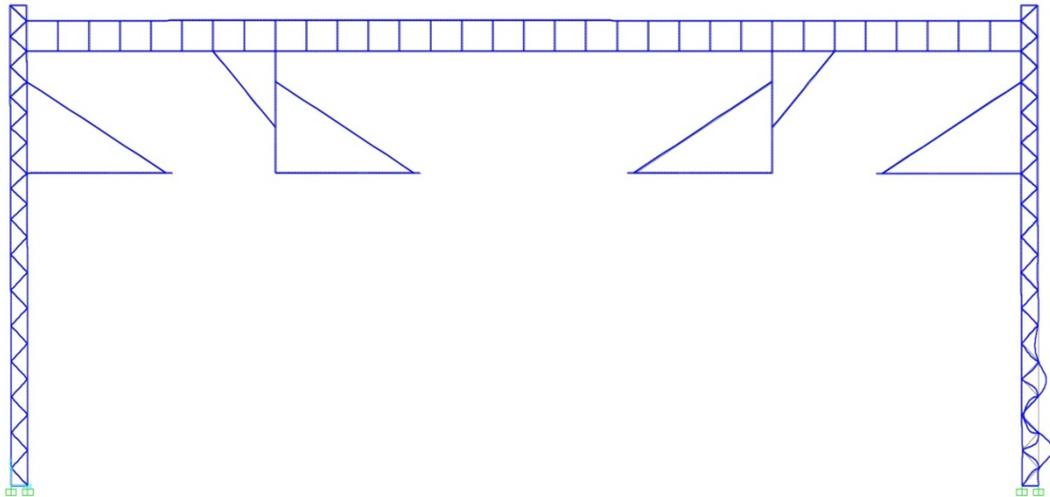


Figura 5.39: Primer modo de pandeo

Como era previsible, en el caso anterior vimos que el perfil derecho del poste era el que estaba sometido a compresión y de mayores valores en la base del poste, por lo tanto ese perfil es el que puede pandear y fallar. Para este modo obtenemos un coeficiente de pandeo de 116620,1.

#### 5.4. EFECTO DEL MOMENTO FLECTOR

Hay que destacar que hemos declinado representar los diagramas de esfuerzos flectores de las estructuras ya que hemos comprobado que son mucho más pequeños que los esfuerzos axiales que son los predominantes en este tipo de estructuras trianguladas.

Esto se demuestra a través de la siguiente fórmula (1):

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} \quad (1)$$

Vamos a explicar esta fórmula para el caso del poste, conocido el axil máximo de valor 43,17 y el área de la sección del perfil su cociente nos da un valor de 25334,5, mientras que con el momento máximo que vemos en la figura 5.40 con un valor de 0,08 y su módulo resistente, obteniendo un valor de 4477.

Como podemos comprobar las tensiones debidas al axil son mucho más predominantes que las debidas al flector ya que tiene un valor que es aproximadamente 6 veces más grande.

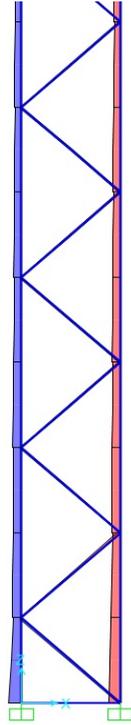


Figura 5.40: Detalle del momento flector

Esta predominancia de los axiles frente al momento flector ocurre también en el semipórtico pero en el pórtico hay cierta variación, como hemos podido comprobar antes, las tensiones en el dintel justo en la zona donde se une el conjunto de la ménsula son bastante relevantes.

## 5.5. DISCUSION DE RESULTADOS

A continuación vamos a explicar los resultados que hemos obtenido en todos los apartados anteriores y que conclusiones podemos obtener de todos ellos, para lo cual aplicaremos la norma y veremos por qué método de los tres que vamos a explicar las estructuras van a fallar antes y por lo tanto es el más restrictivo.

Comprobaremos cuánto pueden resistir nuestras estructuras a partir de los siguientes datos y aplicaremos los tres métodos siguientes:

- Criterio de flecha: comprobaremos cuánto desplazamiento producen nuestras cargas en la estructura y comparándolo con el máximo admisible veremos en qué momento se produce el fallo.
- Criterio de tensión: a partir de las tensiones obtenidas comprobaremos en que momento superaría la tensión máxima admisible y se produciría el fallo.

- Criterio de estabilidad: veremos en qué momento se produce el pandeo de los postes y el consiguiente fallo de las estructuras.

Para los tres modelos hemos aplicado una fuerza unitaria hacia abajo y hacia la derecha, o lo que es lo mismo, una única fuerza inclinada a 45° de valor 1,41 N, y como en cada ménsula tenemos dos puntos de aplicación de cargas, en total vamos a tener un estado de cargas por ménsula de 2,82 N.

Seguidamente vamos a mostrar primero los diferentes datos y resultados obtenidos para posteriormente realizar la comprobación de estos tres métodos.

### 5.5.1. Desplazamiento del punto de aplicación de las cargas

En la siguiente tabla se muestran los desplazamientos que sufren los puntos de aplicación de las cargas aplicadas en el cuerpo de la ménsula. Para realizar estas comparaciones hemos considerado elegir los puntos de aplicación de cargas que sufran los mayores desplazamientos ya que serán las situaciones más extremas.

	Poste	Semipórtico	Pórtico
<b>Horizontal</b>	0,906E-05 m	1,954E-05 m	10E-05 m
<b>Vertical</b>	-3,193E-05 m	-9,859E-05 m	-20E-05 m

En la figura 5.41 podemos ver un gráfico donde se puede observar los mayores desplazamientos que sufren las ménsulas en el punto de aplicación de las cargas, concluyendo que en el pórtico es la estructura donde las ménsulas tienen mayor desplazamiento en esos puntos mientras que el poste es el más consistente y por lo tanto el que menos desplazamiento sufre.

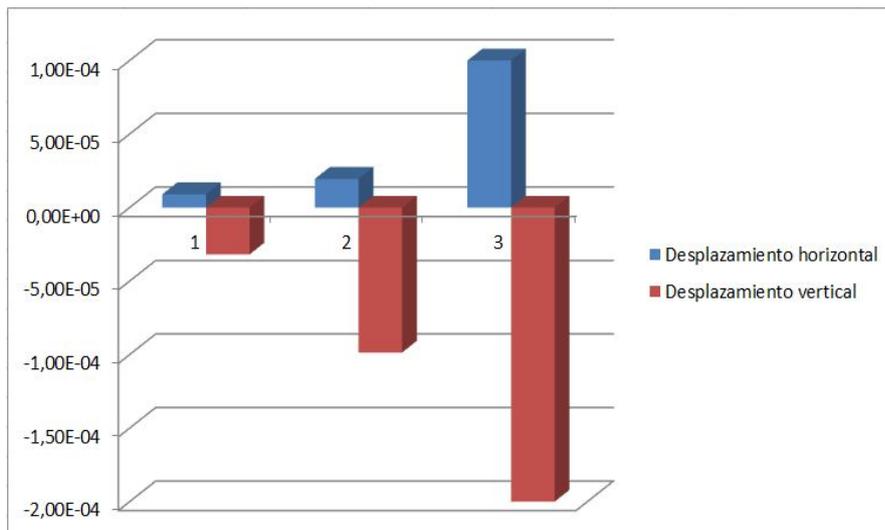


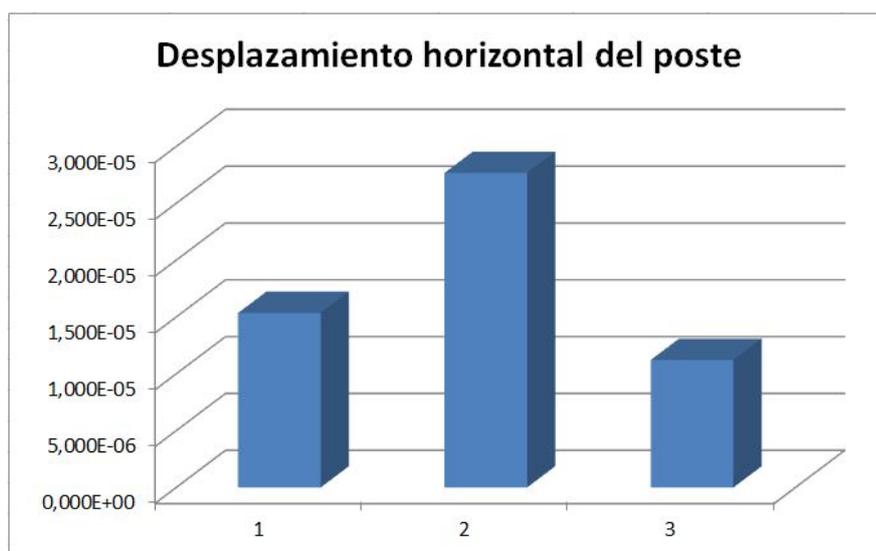
Figura 5.41: Desplazamiento de las cargas

### 5.5.2. Desplazamiento de postes y dinteles

En la siguiente tabla se muestran los mayores desplazamientos que sufren los postes de las tres estructuras así como los dinteles del pórtico y semipórtico. Los puntos mostrados se corresponden con el perfil derecho de los postes y en su punto más alto ya que es donde se encuentra su máximo desplazamiento, siendo este hacia la derecha y hacia abajo como se observa. En cuanto a los dinteles en el semipórtico hemos elegido el extremo derecho del cordón inferior mientras que en el pórtico hemos elegido el punto intermedio del dintel de su cordón inferior también, para que la comparación sea equivalente.

	Poste	Poste Sem.	Dintel Sem.	Poste Port.	Dintel Port.
<b>Horizontal</b>	1,536E-05 m	2,768E-05 m	1,528E-05 m	1,123E-05 m	1,008E-05 m
<b>Vertical</b>	-5,481E-07 m	-7,402E-07 m	-3,365E-05 m	-3,503E-07 m	-2,406E-05 m

En las figuras 5.42 y 5.43 se muestran los desplazamientos de los postes de las tres estructuras en los puntos indicados, donde observamos que el poste del semipórtico es el que sufre mayores desplazamientos y eso será debido a que es un único poste el que tiene que soportar todo el peso del dintel y del cuerpo de la ménsula que va unido a él, por lo que tendrá mayores esfuerzos y hará que el poste se desplace más.



*Figura 5.42: Desplazamiento horizontal de los postes*

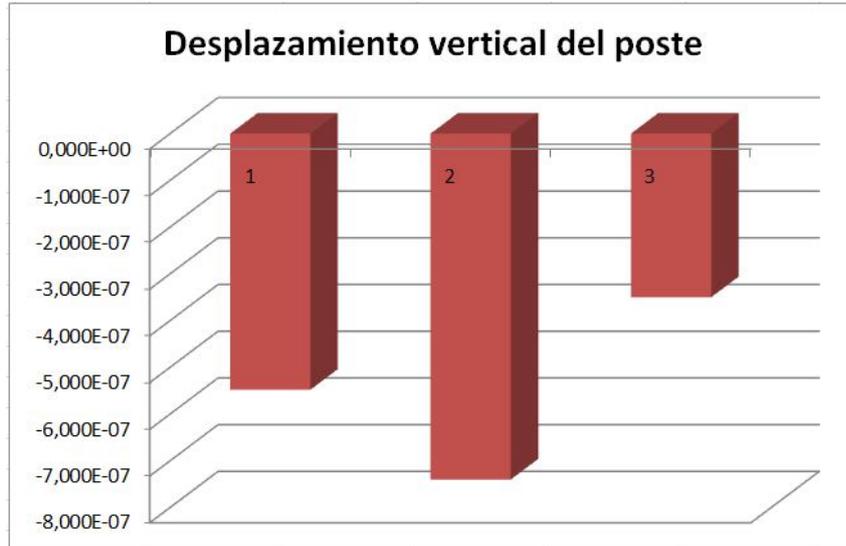


Figura 5.43: Desplazamiento vertical de los postes

En la próxima figura 5.44 se muestra los desplazamientos que sufren los dinteles del semipórtico y pórtico. Como se puede comprobar el dintel del semipórtico es el que sufre mayores desplazamientos como era de esperar, ya que si en las figuras anteriores hemos comprobado que el poste del semipórtico es el que sufre mayores desplazamientos por lo siguiente el dintel de dicha estructura será también el que sufra los mayores desplazamientos, ya que la estructura se moverá como conjunto.

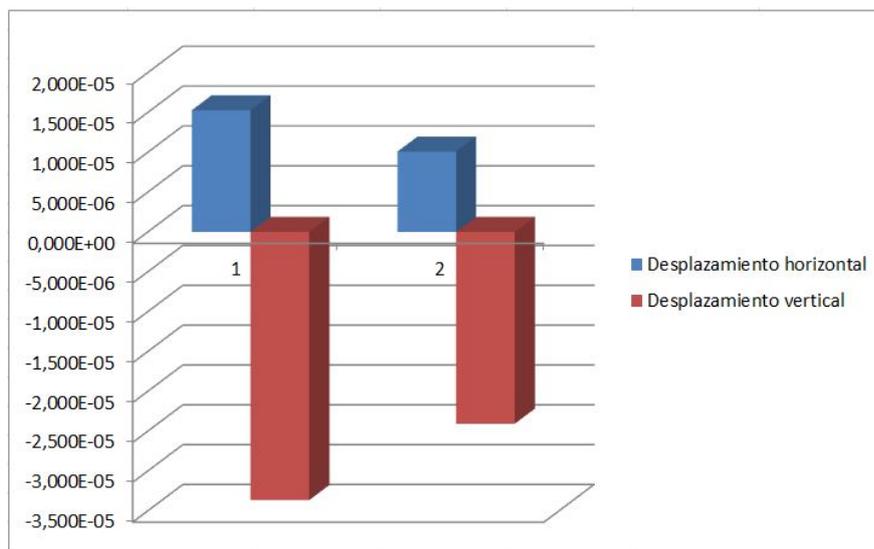


Figura 5.44: Desplazamiento de los dinteles

### 5.5.3. Axiles máximos

En la siguiente tabla mostramos los valores máximos de los axiles que sufren las tres estructuras. En los tres casos dichos valores se encuentran en la base de los postes y cómo podemos comprobar el poste del semipórtico es el que sufre los mayores valores de axiles.

Poste	Semipórtico	Pórtico
43,17 N	97,91 N	69,71 N

### 5.5.4. Tensiones máximas de los pilares

En esta tabla se muestran los valores máximos de las tensiones que sufren las estructuras. Al igual que en el caso anterior estos valores los encontramos en las bases de los postes pero en este caso el mayor de los tres está en el pórtico, aunque como vemos los tres valores son muy parecidos.

Poste	Semipórtico	Pórtico
28182,8 Pa	29542,1 Pa	29754,8 Pa

### 5.5.5. Tensiones máximas en los dinteles

Vamos a destacar las tensiones máximas que hay en los dinteles ya que aunque en el semipórtico no tenga un valor elevado que sea muy relevante, en el pórtico sí que hay una tensión considerable que posteriormente analizaremos y veremos que ocurre.

Semipórtico	Pórtico
5452,9 Pa	110163,92 Pa

### 5.5.6. Coeficientes de pandeo

En esta última tabla se muestran los valores de los coeficientes de pandeo que hemos obtenido en las tres estructuras, viendo cómo se puede comprobar que el valor máximo lo tiene el semipórtico.

Poste	Semipórtico	Pórtico
88372,8	136511,3	116620,1

Una vez mostrados todos los datos obtenidos y vistas las diferentes comparaciones vamos a pasar a realizar la comprobación según la norma de los tres métodos existentes para ver cuál es el más restrictivo.

### 5.5.7. Aplicación de la norma

El primer criterio que vamos a comprobar es el criterio de tensión. Para ello tendremos que comprobar que la tensión es menor que la del material que hemos utilizado, en nuestro caso un acero S275, es decir, que tendremos una tensión máxima admisible de 275 MPa.

Para el poste:

Conocido el valor de la tensión del pilar de 28182,8 N multiplicado por un factor  $\lambda$  sabemos que tiene que ser menor que la resistencia del material de 275 MPa.

$$28182,8 * \lambda = 275E06 \rightarrow \lambda = 9757,72$$

Una vez calculado  $\lambda$ , este factor multiplicado por el estado de cargas que disponemos de 2,82N nos da como resultado el valor de carga máxima que soportaría la estructura antes de fallar.

$$9757,72 * 2,82 = 27516,8 \text{ N} \rightarrow 27,52 \text{ KN}$$

Es decir, nuestra estructura soportaría 27,52 KN de carga antes de que falle.

Para el semipórtico:

De la misma forma que antes, conocido el valor de la tensión del pilar de 29542,1 N multiplicado por el factor  $\lambda$  tiene que ser menor que la resistencia del material de 275 MPa.

$$29542,1 * \lambda_1 = 275E06 \rightarrow \lambda_1 = 9308,75$$

Una vez disponemos del factor  $\lambda_1$ , le multiplicamos por el estado de cargas que disponemos de 2,82 N y por 2 ya que tenemos 2 ménsulas y tendremos como resultado la carga máxima que soportaría el pilar antes de fallar.

$$9308,75 * 2,82 * 2 = 52501,35 \text{ N} \rightarrow 52,5 \text{ KN}$$

Según este resultado, nuestra estructura soportaría 52,5 KN de carga antes de que esta fallase.

Tenemos que comprobar también la resistencia del dintel aunque se puede ver a simple vista que será más resistente que el pilar ya que su valor de la tensión es bastante más pequeño.

Para comprobarlo vamos a realizar el mismo procedimiento, sabiendo que el valor de la tensión en el dintel es de 5452,9 N:

$$5452,9 * \lambda_2 = 275E06 \rightarrow \lambda_2 = 50431,9$$

$$50431,9 * 2,82 * 2 = 284435,9 \rightarrow 284,4 \text{ KN}$$

Como observamos, para que el dintel falle la carga aplicada debe ser de 284,4 KN, que si la comparamos con la que soporta el pilar de 52,5 KN, vemos que en este caso es más restrictivo el pilar frente al dintel ya que este fallaría antes al soportar menor carga.

Para el pórtico:

De la misma manera, conocido el valor de la tensión del pilar de 29754,8 N multiplicado por el factor  $\lambda$  tiene que ser menor que la resistencia del material de 275 MPa.

$$29754,8 * \lambda_1 = 275E06 \rightarrow \lambda_1 = 9242,2$$

Ahora que tenemos conocido  $\lambda_1$ , multiplicamos este factor por el estado de cargas de nuestra estructura de 2,82 N y por 4 ya que en este caso tenemos 4 ménsulas y obtenemos la carga máxima que soportaría nuestro pilar antes de fallar.

$$9242,2 * 2,82 * 4 = 104252 \text{ N} \rightarrow 104,25 \text{ KN}$$

Según este resultado nuestro pilar aguantaría una carga máxima de 104,25 KN antes de que se produjera el fallo.

De la misma forma que antes, ahora vamos a comprobarla resistencia del dintel ya que en este caso su tensión tiene un valor bastante alto y es posible que el fallo se produzca antes en el dintel que en el pilar.

Vamos a realizar el mismo procedimiento sabiendo que la tensión en el dintel es de 110163,92 N.

$$110163,92 * \lambda_2 = 275E06 \rightarrow \lambda_2 = 2496,3$$

$$2496,3 * 2,82 * 4 = 28158,3 \rightarrow 28,16 \text{ KN}$$

Como podemos comprobar, la carga necesaria para que el dintel del pórtico falle es de 28,16 KN que es bastante menos que los 104,25 KN que soporta el pilar, por lo tanto, en este caso el dintel es más restrictivo que el pilar dado que este fallaría antes.

A continuación vamos a aplicar el segundo criterio de la norma, criterio de estabilidad, comprobando mediante el coeficiente de pandeo de cada estructura la carga máxima que soporta antes de que la estructura pandee y por lo tanto falle.

Para realizar estas comprobaciones multiplicaremos a los coeficientes de pandeo de las estructuras por el estado de cargas que tenemos aplicado de 2,82 N y por el número de ménsulas que disponga cada estructura, por lo que obtendremos los siguientes resultados:

- Poste:  $88372,8 * 2,82 = 249211,3 \text{ N} \rightarrow 249,21 \text{ KN}$
- Semipórtico:  $136511,3 * 2,82 * 2 = 769923,7 \text{ N} \rightarrow 769,92 \text{ KN}$
- Pórtico:  $116620,1 * 2,82 * 4 = 1315474,73 \text{ N} \rightarrow 1315,5 \text{ KN}$

A la vista de los resultados y de los valores de carga tan elevados, para el poste el criterio de tensiones es más restrictivo, ya que la carga con la que fallaría es de 27,52 KN que es bastante más pequeña que en el criterio a pandeo de 249,21 KN.

Para el semipórtico también es más restrictivo el criterio de tensiones, ya que fallaría primero el pilar al tener un valor de carga de 52,5 KN, bastante más pequeño que el valor a pandeo de 769,92 KN.

Para el pórtico ocurre lo mismo, es más restrictivo el criterio de tensiones donde fallaría en primer lugar el dintel ya que tiene un valor de carga máximo de 28,16 KN, bastante más pequeño que el valor a pandeo de 1315,52 KN.

Por último vamos a comprobar el criterio de flecha, verificando que el desplazamiento no supere el máximo admisible. En este caso y según la restricción del proyecto en el que me he basado, la flecha máxima que se permite es de 20 mm, por lo que vamos a calcular la carga máxima que podría soportar la estructura.

Para el poste:

Conocido el valor del desplazamiento de la carga de valor  $3,193\text{E-}05 \text{ m}$  multiplicado por un factor  $\lambda$  debe ser menor o igual al valor del desplazamiento máximo admisible de 0,02 m.

$$3,193\text{E-}05 * \lambda \leq 0,02 \rightarrow \lambda = 626,4$$

Una vez tenemos calculado  $\lambda$ , este factor multiplicado por el estado de cargas de la estructura nos da el valor de carga máxima que puede soportar nuestra estructura antes de que incumpla el requisito exigido.

$$626,4 * 2,82 = 1766,36 \text{ N} \rightarrow 1,77 \text{ KN}$$

Nuestra estructura del poste soportaría 1,77 KN, lo que comparado con los otros dos criterios calculados anteriormente vemos que el más restrictivo es este, el criterio de flecha, debido a que es el que menor valor de carga soporta, por lo tanto sería el que lo incumple en primer lugar.

Para el semipórtico:

De la misma forma, conocido el valor del desplazamiento de la carga de  $9,859E-05$  multiplicado por el factor  $\lambda$  deber ser menor o igual al valor del desplazamiento máximo admisible de  $0,02$  m.

$$9,859E-05 * \lambda \leq 0,02 \rightarrow \lambda = 202,86$$

Una vez tenemos calculado  $\lambda$  multiplicado por el estado de cargas de nuestra estructura y por 2 ya que en este caso tenemos 2 ménsulas, obtenemos la carga máxima que puede soportar.

$$202,86 * 2,82 * 2 = 1194,1 N \rightarrow 1,14 KN$$

Por lo tanto nuestra estructura soportaría  $1,14$  KN, pero si lo comparamos con los otros dos criterios calculados anteriormente vemos que el más restrictivo es este, el criterio de flecha, debido a que es el que menor valor de carga soporta por lo que sería el que lo incumple en primer lugar.

Para el pórtico:

Como en los casos anteriores conocido el valor del desplazamiento de la carga de  $20E-05$  multiplicado por un factor  $\lambda$  debe ser menor o igual al valor del desplazamiento máximo admisible de  $0,02$  m.

$$20E-05 * \lambda \leq 0,02 \rightarrow \lambda = 100$$

Una vez tenemos calculado  $\lambda$  multiplicado por el estado de cargas de nuestra estructura y por 4 ya que en este caso tenemos 4 ménsulas, obtenemos la carga máxima que puede soportar.

$$100 * 2,82 * 4 = 1128 N \rightarrow 1,13 KN$$

Por lo tanto nuestra estructura soportaría  $1,13$  KN, pero si lo comparamos con los otros dos criterios calculados anteriormente vemos que el más restrictivo es este, el criterio de flecha, debido a que es el que menor valor de carga soporta por lo que sería el que lo incumple en primer lugar.

A continuación voy a mostrar una tabla donde vamos a poder ver claramente porqué el criterio de flecha es el más restrictivo:

	<b>Poste</b>	<b>Semipórtico</b>	<b>Pórtico</b>
<b>Criterio de tensiones</b>	27,52 KN	52,5 KN	28,16 KN
<b>Criterio de pandeo</b>	249,21 KN	769,92 KN	1315,5 KN
<b>Criterio de flecha</b>	1,77 KN	1,14 KN	1,13 KN

Como conclusión a la vista de esta tabla podemos indicar que los menores valores y por tanto los limitantes los encontramos en el criterio de flecha, por lo que según la norma este es el criterio más restrictivo y el primero que hay que cumplir, lo que conlleva a que si se cumple este criterio se cumplirán todos los demás.



## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

Las conclusiones principales que podemos extraer de este trabajo fin de grado se caracterizan por tener una visión social y otra de carácter técnico. Para concluir se trazaran líneas futuras a tener en cuenta a partir de todo lo establecido en este trabajo.

Desde el punto de vista social:

- El ferrocarril, y más concretamente la alta velocidad española (AVE), es la segunda opción de transporte elegido entre la sociedad únicamente por detrás del avión como principal elección.
- España es el país que tiene la red de alta velocidad más extensa de Europa y la segunda del mundo, únicamente detrás de China, contando con alrededor de 3.240 Km.
- Comprender las diferentes operaciones previas necesarias que hay que tener en cuenta en la infraestructura de vía para adecuar el terreno a sus necesidades así como todos los elementos que componen la superestructura de la vía.
- La importancia de comprender todos los elementos por los que está formada la columna de electrificación y que hacen posible el paso de la corriente a través de la catenaria permitiendo la circulación de los trenes.

Desde el punto de vista técnico:

- Comprender y explicar las tres estructuras principales de sustentación de la catenaria extrayendo sus características y propiedades principales de un proyecto ferroviario real que me va a permitir a partir de sus datos realizar una comparación a través de un modelado mediante la utilización de un programa de elementos finitos.
- Mediante el aprendizaje del funcionamiento del programa Sap2000 he podido hacer un estudio comparativo obteniendo diferentes diagramas de desplazamientos o estados tensionales de las tres estructuras fundamentales de sustentación de la catenaria siendo éstas el poste, pórtico y semipórtico.

- A partir de las conclusiones obtenidas en el capítulo 5, hemos podido comprobar que según la norma el método más restrictivo en este caso es la flecha ya que es lo que primero falla en nuestras estructuras debido a que la restricción que se impone a la flecha es bastante importante no permitiendo apenas desplazamiento vertical.

Líneas futuras:

Como líneas futuras, este proyecto podría continuarse incluyendo el estudio de las ménsulas y con ello conseguir una perspectiva más amplia y completa en lo que respecta a las estructuras de las vías ferroviarias.

De igual forma, se podría realizar el estudio en el programa de elementos finitos Sap2000 con una visión en 3D que nos permitiría una perspectiva más realista del poste, semipórtico y pórtico.

Asimismo, se podrían incluir a la hora de realizar el estudio, elementos por los que están formadas las estructuras tales como cables de sujeción, cimentaciones, entre otros.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Z. Barcenilla. Cálculo mecánico de la catenaria de la línea de Alta Velocidad Madrid – Galicia. Tramo: Olmedo – Zamora. Trabajo fin de carrera 2010.
- [2] M.A. Navas. Diseño y cálculo de la línea aérea de contacto del tramo de una línea de ferrocarril de alta velocidad. Trabajo fin de grado 2018.
- [3] C. Alonso. Proyecto Constructivo. Electrificación de la línea Medina del Campo - Salamanca - Fuentes de Oñoro. Tramo Medina del Campo - Salamanca. Línea Aérea de Contacto. TIFSA y ARDANUY. Madrid, Junio de 2010.
- [4] J.L. García. El AVE Madrid – Lisboa por Extremadura: Efectos territoriales y diferentes alternativas. Historia del ferrocarril en España. Pág. 18 – 21.
- [5] ADIF. Convocatoria de factor de circulación de entrada: Conceptos básicos ferroviarios. 2007 – 2008.
- [6] Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo (INSHT). Infraestructuras ferroviarias: instalaciones de electrificación, señalización y comunicaciones. Seguridad. 2015
- [7] I.M. Varas. Análisis de tensiones en ménsulas ferroviarias. Trabajo fin de máster 2016.

## WEBGRAFIA

[W1] INE (Instituto Nacional de Estadística). Recuperado el: 01 de abril 2019

<https://www.epdata.es/datos/transporte-viajeros-ine-datos-graficos/123/espana/106>

[W2] Historia y vida. M. Fernández (2018, 05/10). Recuperado el: 06 de abril 2019

[https://www.lavanguardia.com/historiayvida/historia-del-ferrocarril-en-espana\\_12520\\_102.html](https://www.lavanguardia.com/historiayvida/historia-del-ferrocarril-en-espana_12520_102.html)

[W3] Historia de España y el mundo (2017, 08/12). Recuperado el: 06 de abril 2019

<http://www.historiaespanaymundo.com/secciones/made-in-spain/primer-ferrocarril-espana>

[W4] ADIF. Alta velocidad. Recuperado el: 08 de abril 2019

[http://www.adifaltavelocidad.es/es\\_ES/infraestructuras/lineas\\_de\\_alta\\_velocidad/madrid\\_sevilla/historia\\_madrid-sevilla.shtml](http://www.adifaltavelocidad.es/es_ES/infraestructuras/lineas_de_alta_velocidad/madrid_sevilla/historia_madrid-sevilla.shtml)

[W5] ADIF. Alta velocidad. Recuperado el: 08 de abril 2019

[http://www.adifaltavelocidad.es/es\\_ES/infraestructuras/lineas\\_de\\_alta\\_velocidad/lineas\\_de\\_alta\\_velocidad.shtml](http://www.adifaltavelocidad.es/es_ES/infraestructuras/lineas_de_alta_velocidad/lineas_de_alta_velocidad.shtml)

[W6] España, exportación e inversiones (ICEX). Recuperado el: 12 de abril 2019

<https://www.icex.es/icex/es/Navegacion-zona-contacto/revista-el-exportador/observatorio2/REP2018795143.html>

[W7] Boletín Oficial del Estado (BOE). 30/12/2004. Recuperado el: 15 de abril 2019

<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2004-21908>

[W8] A. de Juan. Conceptos básicos de la infraestructura ferroviaria. (2015, 06/04). Recuperado el: 17 de abril 2019

<https://www.trenvista.net/descubre/mundo-ferroviario/conceptos-basicos-infraestructura-ferroviaria/>

[W9] Más que ingeniería: El blog de los futuros ingenieros. El balasto o “esas piedrecillas bajo la vía”. Recuperado el: 17 de abril 2019

<https://masqueingenieria.com/blog/que-es-el-balasto/>

[W10] ADIF. Traviesas polivalentes. Recuperado el: 24 de abril 2019

[http://www.adif.es/es\\_ES/ocio\\_y\\_cultura/fichas\\_informativas/ficha\\_informativa\\_00037.shtml](http://www.adif.es/es_ES/ocio_y_cultura/fichas_informativas/ficha_informativa_00037.shtml)

[W11] Más que ingeniería: El blog de los futuros ingenieros. Aparatos de vía: los desvíos ferroviarios. Recuperado el: 25 de abril 2019

<https://masqueingenieria.com/blog/aparatos-de-via-los-desvios/>

[W12] A. de Juan. Conociendo a fondo el cambio de agujas. (2015, 11/05).  
Recuperado el: 26 de abril 2019

<https://www.trenvista.net/descubre/mundo-ferroviario/conociendo-a-fondo-cambio-de-agujas/>

[W13] M.J. Cabrera y C.A. Pérez. Elementos de sustentación para la catenaria  
C – 350. (2016, 02/05). Recuperado el: 02 de mayo 2019

<https://www.eadic.com/elementos-de-sustentacion-para-la-catenaria-c-350/>

[W14] ADIF. Modelos de catenaria de Adif. Recuperado el: 10 de mayo 2019

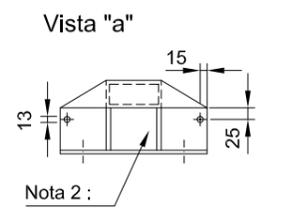
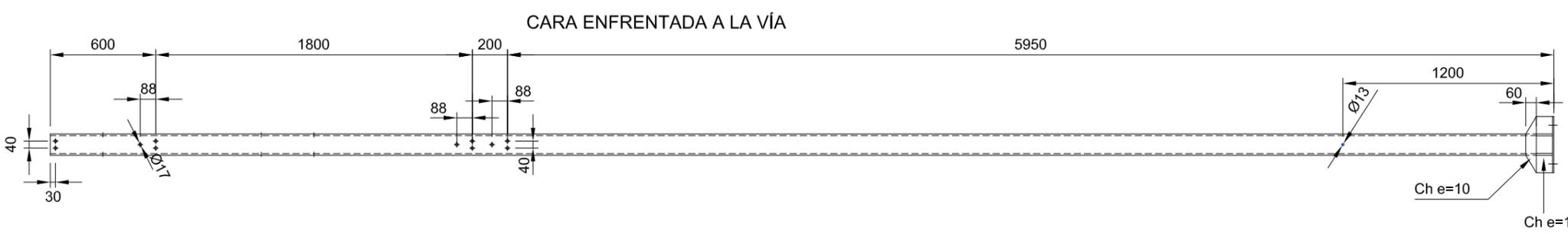
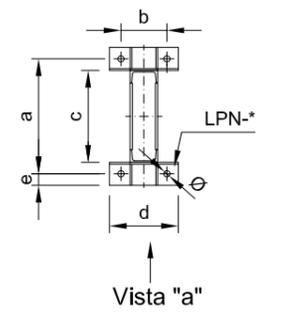
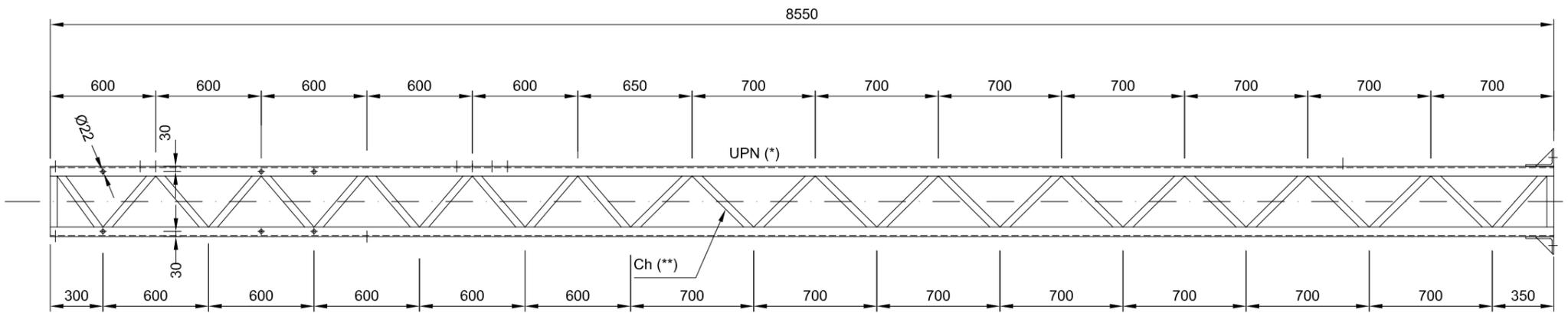
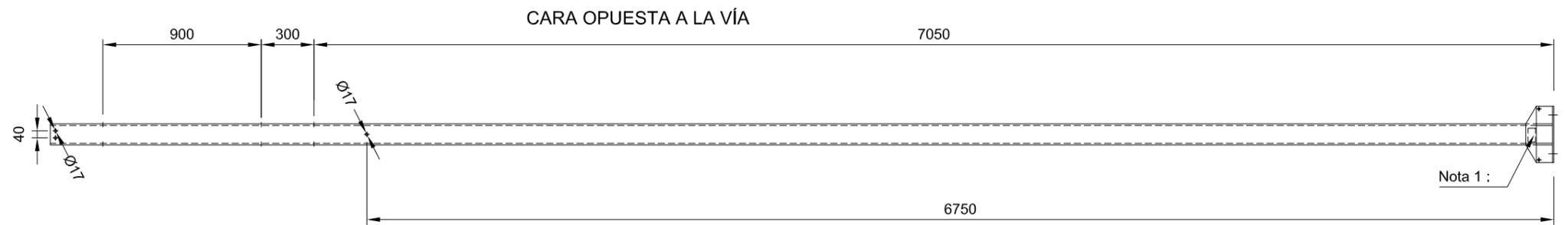
[http://www.adif.es/es\\_ES/comunicacion\\_y\\_prensa/fichas\\_de\\_actualidad/ficha\\_actualidad\\_00070.shtml](http://www.adif.es/es_ES/comunicacion_y_prensa/fichas_de_actualidad/ficha_actualidad_00070.shtml)



**ANEXO I:**

**LÍNEA AÉREA DE CONTACTO. POSTES TIPO X – AV DE  
VIA GENERAL 8,55 M**





POSTE	UPN(x)	Ch (xx)	LPN(x)	a/b mm.	c	d	e	φ
X-1AV	100	40x10	100x100x10	500/200	400	300	50	25
X-2AV	120	40x12	100x100x10	500/200	400	300	50	31
Ver Nota 2	X-3AV	140	40x12	100x100x10	500/200	400	300	31
X-4AV	160	40x12	100x100x10	500/250	400	350	50	38
X-5AV	180	40x14	150x150x12	600/300	450	400	75	38
X-6AV	200	40x14	150x150x12	600/300	450	400	75	38
Ver Nota 2	X-7AV	220	40x20	150x150x12	600/300	450	75	47

MATERIAL: S275JR UNE-EN 10025: 2006  
 ACABADO: SEGÚN ET 03.500.001.2  
 SOLDADURA: CORDONES CERRADOS EN LAS ESQUINAS

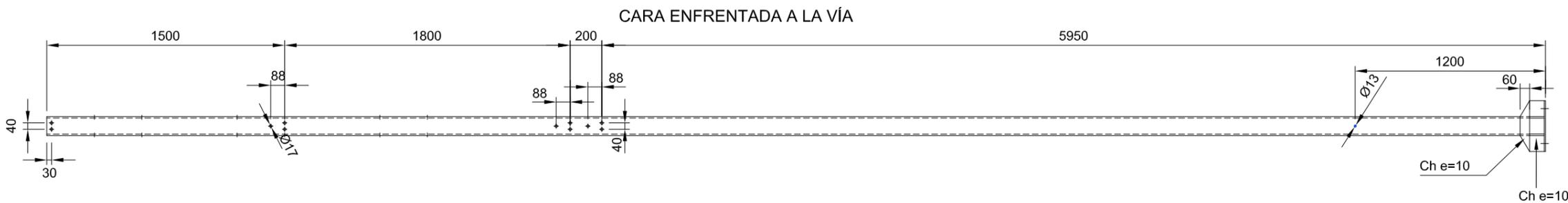
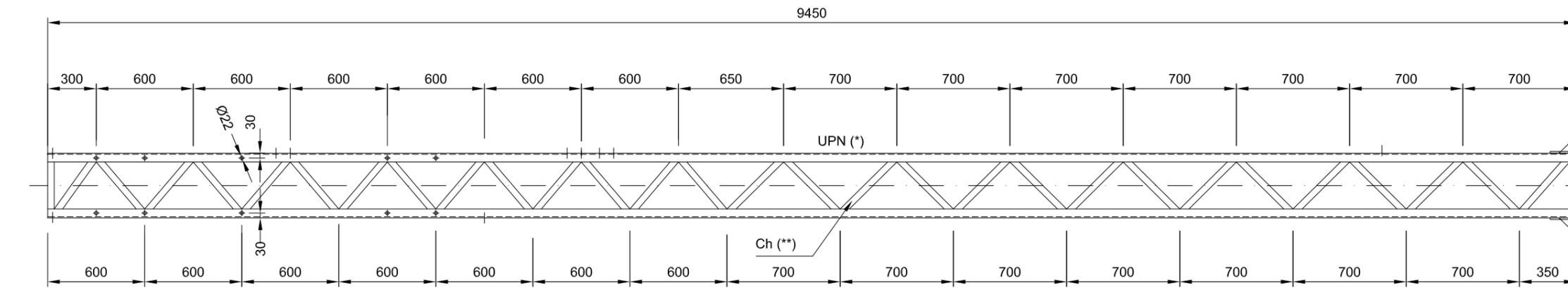
Nota 1: - A marcar en el recuadro :  
 Lote de fabricación.  
 Tipo de poste.  
 Marca de fabricante.

Nota 2: - En los postes X-3AV y X-7AV los cartabones irán 10 mm. desplazados hacia el interior.

**ANEXO II:**

**LÍNEA AÉREA DE CONTACTO. POSTES TIPO XL – AV  
DE VIA GENERAL 9,45 M.**





POSTE	UPN(x)	Ch (xx)	LPN(x)	a/b mm.	c	d	e	φ
XL-2AV	120	40x12	100x100x10	500/200	400	300	50	31
XL-3AV(x)	140	40x12	100x100x10	500/200	400	300	50	31
XL-4AV	160	40x12	100x100x10	500/250	400	350	50	38
XL-5AV	180	40x14	150x150x12	600/300	450	400	75	38
XL-6AV	200	40x14	150x150x12	600/300	450	400	75	38
XL-7AV(x)	220	40x20	150x150x12	600/300	450	400	75	47
XL-8AV(x)	240	40x20	150x150x12	600/300	450	400	75	47

MATERIAL: S275JR UNE-EN 10025: 2006  
 ACABADO: SEGÚN ET 03.500.001.2  
 SOLDADURA: CORDONES CERRADOS EN LAS ESQUINAS

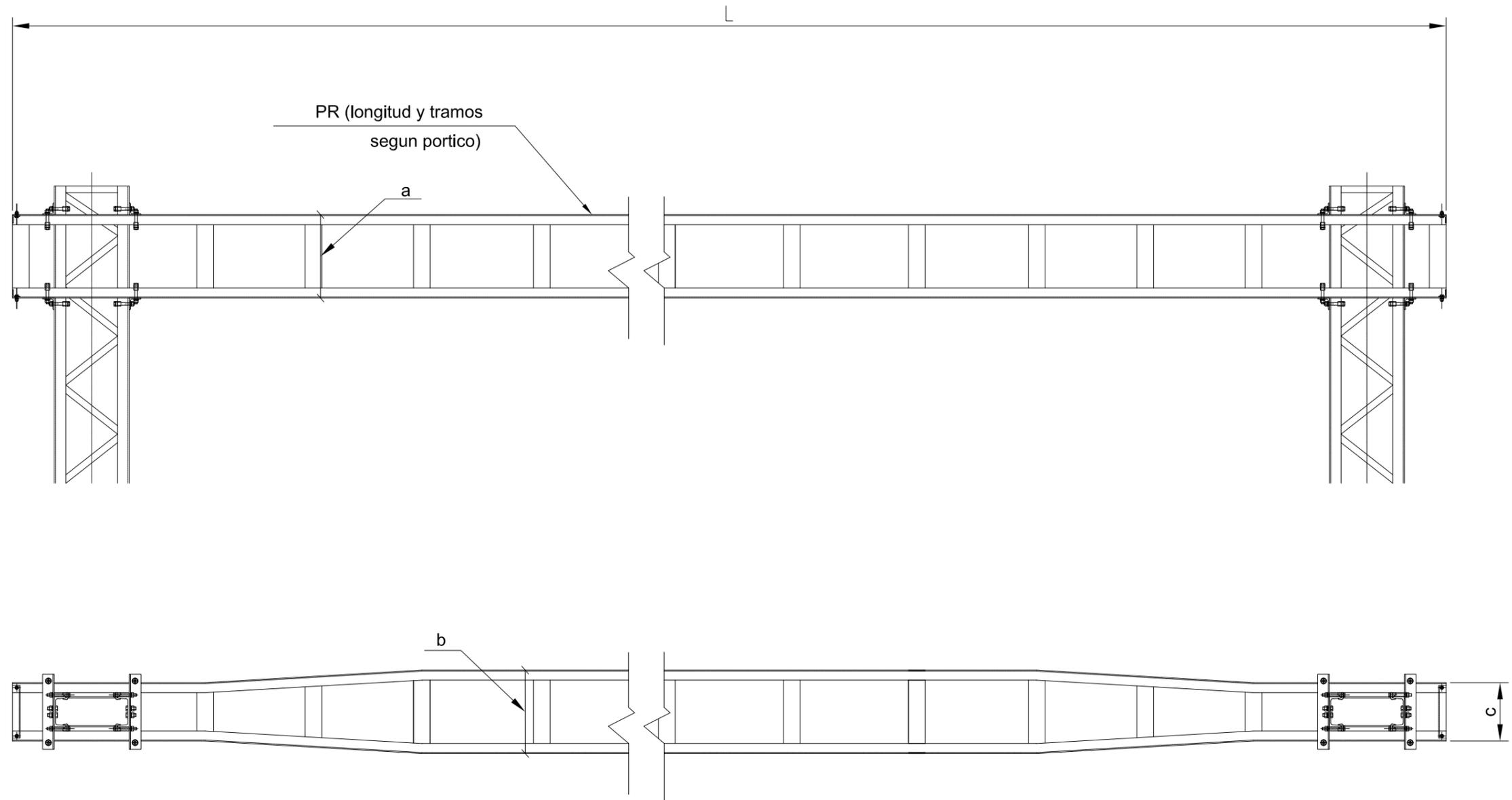
Nota 1: - A marcar en el recuadro:  
 Lote de fabricación.  
 Tipo de poste.  
 Marca de fabricante.

(x) Nota 2: En los postes XL-3AV, XL-7AV y XL-8AV los dos cartabones irán desplazados 10 mm. cada uno hacia el eje del poste

**ANEXO III:**

**LÍNEA AÉREA DE CONTACTO. PÓRTICOS. DINTEL DEL  
PÓRTICO**





L	a	b	c	montantes	presillas	diagonales
$12 \leq 12,4$ m	0.50	0.50	0.35	L60x6	100x6	L45x5
$13,5 \leq 18,5$ m	0.50	0.50	0.40	L80x8	120x8	L45x5
$19 \leq 21,5$ m	0.50	0.50	0.50	L100x8	120x8	L45x5
$22 \leq 24,5$ m	0.7	0.5	0.5	L100x8	120x8	L45x5
$25 \leq 28$ m	0.7	0.5	0.5	L100x8	L45x5	L45x5



SECRETARÍA DE ESTADO  
DE PLANIFICACIÓN E  
INFRAESTRUCTURAS  
SECRETARÍA GENERAL  
DE INFRAESTRUCTURAS  
DIRECCIÓN GENERAL  
DE INFRAESTRUCTURAS  
FERROVIARIAS

TÍTULO DEL PROYECTO:  
**PROYECTO CONSTRUCTIVO.  
ELECTRIFICACIÓN DE LA LÍNEA MEDINA DEL CAMPO -  
SALAMANCA - FUENTES DE OÑORO.  
TRAMO MEDINA DEL CAMPO - SALAMANCA.  
LÍNEA AÉREA DE CONTACTO.**

EMPRESA CONSULTORA:  
**Ardanuy**  
Ingeniería s.a.

AUTOR DEL PROYECTO:  
  
CARLOS ALONSO ANDINO  
INGENIERO INDUSTRIAL

ESCALA ORIGINAL DIN A1  
S/E  
NUMÉRICA GRÁFICA

FECHA  
JUNIO  
2010

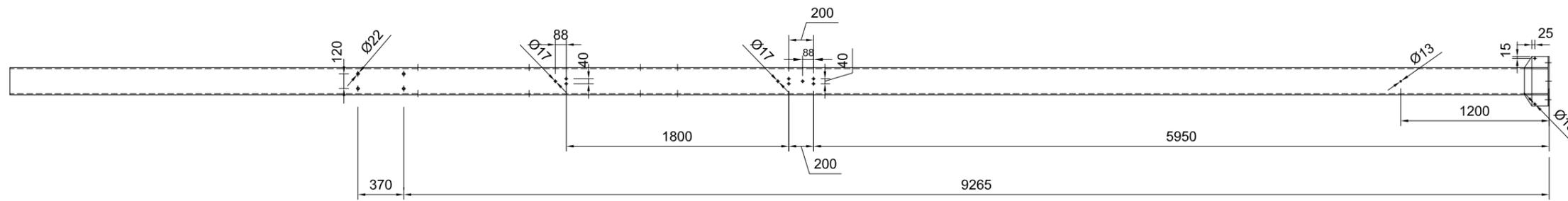
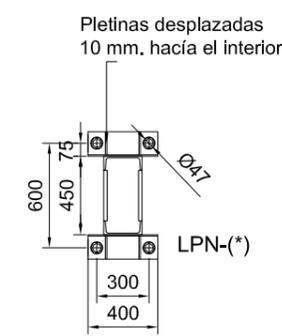
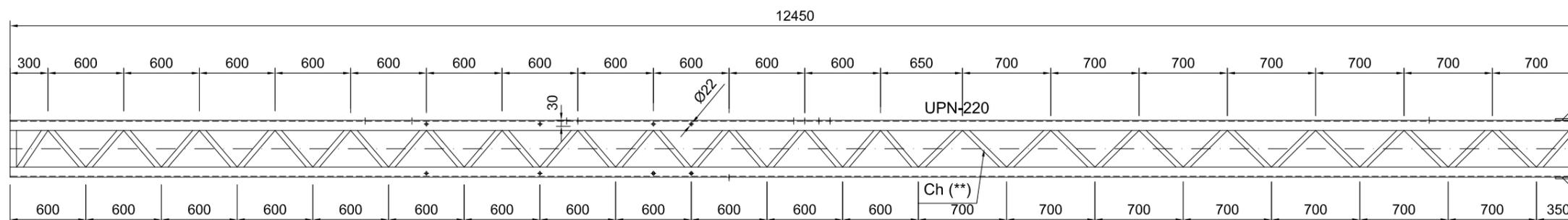
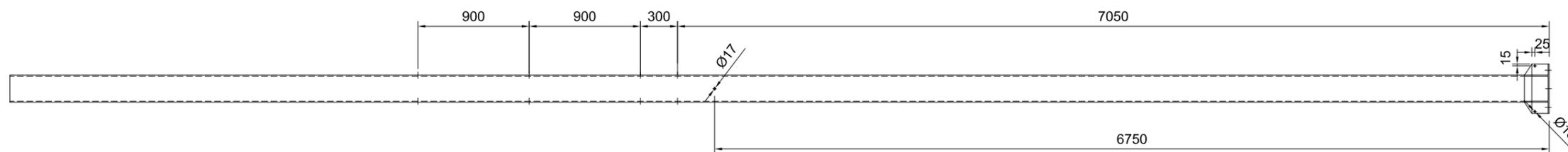
Nº DE PLANO  
2.7.1  
Nº DE HOJA  
HOJA 1 DE 1

TÍTULO DE PLANO  
**LÍNEA AÉREA DE CONTACTO**  
PÓRTICOS  
DINTEL DE PÓRTICO

**ANEXO IV:**

**LÍNEA AÉREA DE CONTACTO. POSTES TIPO XLL – 7AV  
PARA SEMIPÓRTICO.**





POSTE	UPN(x)	Ch (x x)	LPN(x)
XLL-7AV	220	40x20	150x150x12

SOLDADURA: CORDONES CERRADOS EN LAS ESQUINAS

**ANEXO V:**

**LÍNEA AÉREA DE CONTACTO. PÓRTICOS. DINTEL DEL  
SEMIPÓRTICO.**



