

Trabajo de Fin de Master
Master Universitario en Ingeniería Industrial

Modelización y Cálculo mediante MEF de un Pórtico
de la Línea de Alta Velocidad Madrid-Galicia

Autor: Carlos Vicente Alonso

Tutor: Luis Rodríguez-Tembleque

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

Sevilla, 2019



Trabajo de Fin de Master
Master Universitario en Ingeniería Industrial

Modelización y Cálculo mediante MEF de un Pórtico de la Línea de Alta Velocidad Madrid- Galicia

Autor:
Carlos Vicente Alonso

Tutor:
Luis Rodríguez-Tembleque
Profesor titular

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Trabajo de Fin de Master: Modelización y Cálculo mediante MEF de un Pórtico de la Línea de Alta Velocidad
Madrid-Galicia

Autor: Carlos Vicente Alonso

Tutor: Luis Rodriguez-Tembleque

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

Resumen

España es un país líder en el sector de la Alta Velocidad, donde se lleva más de 25 años desarrollando proyectos de gran envergadura, superando actualmente los 3000Km de trazado. Desde 2010 somos el primer país de Europa (y segundo del mundo tras China) en kilómetros de líneas de Alta Velocidad, conectando muchas de las capitales españolas. A pesar de ello aún no está completo el mapa de alta velocidad previsto para la península, por lo que se siguen realizando proyectos de estas características.

Una parte importante de estos proyectos es la electrificación. Electrificar largas líneas ferroviarias requiere, entre otras cosas, una gran cantidad de elementos portantes como postes y pórticos, los cuales se emplean para sustentar la catenaria.

Los pórticos son elementos grandes que repercuten un alto coste, no solo por su contenido en acero, sino también por la fabricación, transporte y montaje de estas estructuras pesadas.

En este trabajo se realizará el análisis de un pórtico de 26m de longitud (para 5 vías, soportando los 20 conductores de 8 catenarias). Este pórtico es el más grande dentro de los pórticos no atirantados y sus postes tienen una altura de 10m.

Los cálculos a realizar incluyen el Análisis Estático (comprobación de los Estados Límite Ultimo y de Servicio ante las hipótesis de acciones) y Dinámico (frecuencia natural, vibraciones), así como el dimensionamiento de las cimentaciones.

Abstract

Spain is a leading country in High Speed trains, where it has been developing more than 25 years of large-scale projects, currently exceeding 3000Km of layout. Since 2010, we became the first country in Europe (and second in the world after China) in kilometers of High Speed lines, connecting many of the main cities in Spain. In spite of this, the high-speed map planned for the country is not yet complete, so projects of this nature continue to be carried out.

An important part of these projects is electrification. Electrifying long rail lines requires, among other things, a large number of structural elements such as poles and porticos, which are used to support the catenary.

The porticos are large elements with a high cost, not only for their steel content, but also for the manufacture, transport and assembly of these heavy structures.

In this work the analysis of a gantry of 26m length (for 5 tracks, supporting the 20 wires of 8 catenaries) will be carried out. It is the largest within the non-cable-stayed and its poles have a height of 10m.

The calculations to be made include the Static Analysis (verification of the Ultimate Limit and Service States for all the hypothesis of actions) and Dynamic (natural frequency, vibrations), as well as the sizing of the foundations.

Índice

Resumen	7
Abstract	9
Índice	11
Índice de Tablas	13
Índice de Figuras	16
1 Introducción	20
1.1 Contexto	20
1.2 Motivación del Trabajo	21
1.3 Objetivos del Proyecto	21
1.4 Organización del Proyecto	21
2 Definiciones y estructura	22
2.1 Definiciones y Características de LAC de Alta Velocidad	22
2.2 Definición de la estructura. Pórtico de 26m	27
2.2.1 Modelo	27
2.2.2 Ménsulas	29
2.2.3 Elementos del pórtico	30
3 Modelizado y Cargas	37
3.1 Modelizado del pórtico	37
3.1.1 Asignación de nodos y elementos	37
3.1.2 Material y Secciones	44
3.1.3 Tipos de elementos	45
3.1.4 Orientación de barras	45
3.1.5 Mallado	46
3.1.6 CERIG	46
3.1.7 Condiciones de contorno	46
3.2 Cargas sobre la Estructura	47
3.2.1 Cargas permanentes	47
3.2.2 Cargas de Viento	48
3.2.3 Cargas por hielo	48
3.2.4 Cargas de mantenimiento	49
3.2.5 Cargas accidentales	49
3.2.6 Sismos	49
3.2.7 Combinaciones	49
4 Análisis estático	50
4.1 Dimensionamiento de cargas.	50
4.1.1 Ménsulas.	50
4.1.2 Viento en el pórtico.	65
4.1.3 Mantenimiento.	67
4.1.4 Accidentales.	67
4.2 ELU	71
4.2.1 Situaciones Permanentes o Transitorias (S1)	71
4.2.2 Situaciones Accidentales (S2)	92
4.3 ELS	103
4.3.1 Combinación poco probable (S3)	103
4.3.2 Combinación frecuente (S4)	107
5 Análisis dinámico	109

5.1 Pórtico sin catenaria (M1)	109
5.2 Pórtico con catenaria (M2)	114
5.2 Vibraciones y resonancia	119
5.2.1 Vibraciones transmitidas por los bogies	119
5.2.2 Efectos de succión	121
6 Análisis de la cimentación	123
6.1 Método Sultzberger	123
6.1.1 Introducción	123
6.1.2 Parámetros de cálculo	124
6.1.3 Cálculo de macizos prismáticos en desmonte	125
6.1.4 Cálculo de Macizos Cilíndricos	128
6.1.5 Dimensionamiento de las Cimentaciones:	130
6.2 Método O.R.E.	134
6.2.1 Introducción	134
6.2.2 Parámetros de cálculo	134
6.2.3 Cálculo de macizos cilíndricos	134
6.2.4 Dimensionamiento de las Cimentaciones:	136
7 Resultados	137
7.1 Resumen y análisis de los resultados	137
7.1.1 Análisis Estático. ELU	137
7.1.2 Análisis Estático. ELS	141
7.1.3 Análisis Dinámico	141
7.1.4 Análisis de la Cimentación.	142
7.2 Conclusiones	143
8 Anexos	144
8.1 Anexo 1. Validación del modelizado.	144
8.2 Anexo 2. Sismos.	148
8.2.1 Clasificación de las construcciones	148
8.2.2 Criterios de Aplicación de la Norma	148
8.2.3 Mapa de Peligrosidad Sísmica. Aceleración sísmica básica	148
8.2.4 Clasificación del Terreno	149
8.2.5 Aceleración Sísmica de Cálculo	150
8.2.6 Conclusiones	150
8.3 Anexo 3. Tabla de coordenadas y Relaciones.	151
Bibliografía	157

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1 Parámetros del Cálculo de Ménsulas	50
Tabla 4-2 Cargas de Hielo en Conductores	51
Tabla 4-3 Cargas de Viento en Conductores	51
Tabla 4-4 Datos y Reacciones en la Ménsula 1	57
Tabla 4-5 Datos y Reacciones en la Ménsula 2	58
Tabla 4-6 Datos y Reacciones en la Ménsula 3	59
Tabla 4-7 . Datos y Reacciones en la Ménsula 4	60
Tabla 4-8 . Datos y Reacciones en la Ménsula 5	61
Tabla 4-9 Datos y Reacciones en la Ménsula 6	62
Tabla 4-10 Datos y Reacciones en la Ménsula 7	63
Tabla 4-11 Datos y Reacciones en la Ménsula 8	64
Tabla 4-12 Coeficientes de Simultaneidad	71
Tabla 4-13 Coeficientes Parciales - ELU	72
Tabla 4-14 Parámetros para cada hipótesis – S1	72
Tabla 4-15 Hipótesis 1 (Hielo predominante con Viento Longitudinal) - S1	75
Tabla 4-16 Hipótesis 2 (Hielo predominante con Viento Transversal) - S1	75
Tabla 4-17 Hipótesis 3 (Mantenimiento predominante con Viento Longitudinal) - S1	75
Tabla 4-18 Hipótesis 4 (Mantenimiento predominante con Viento Transversal) - S1	76
Tabla 4-19 Hipótesis 5 (Viento Longitudinal Predominante) - S1	76
Tabla 4-20 Hipótesis 6 (Viento Transversal Predominante) - S1	76
Tabla 4-21 Valores Máximos Absolutos - S1	76
Tabla 4-22 Valores para las comprobaciones - S1	77
Tabla 4-23 Asignación de clase – ELU	78
Tabla 4-24 Resumen de Clase de Sección - S1	82
Tabla 4-25 Comprobación de Cortante - S1	83
Tabla 4-26 Parámetros para el cálculo de resistencia - S1	84
Tabla 4-27 Comprobación de Resistencia - S1	84
Tabla 4-28 Valor coeficiente de imperfección. Tabla 35.1.2.a	86
Tabla 4-29 Elección de curvas de pandeo. Tabla 35.1.2.b	87
Tabla 4-30 Comprobación de Estabilidad de Euler - S1	88
Tabla 4-31 Tabla 71.2.3.1.a	89
Tabla 4-32 Longitud de pandeo. Tabla 71.2.3.1.b	90
Tabla 4-33 Obtención del Axial en Soportes compuestos - S1	90
Tabla 4-34 Comprobación Estabilidad – Eje débil Sección 1 [UPN-260] Clase 1 - S1	91
Tabla 4-35 Comprobación Estabilidad – Eje fuerte Sección 1 [UPN-260] Clase 1 - S1	91
Tabla 4-36 Comprobación Estabilidad - Sección 2 [Pletina rectangular 50x20] Clase 1 - S1	91

Tabla 4-37 Porcentaje de Aprovechamiento - S1	91
Tabla 4-38 Parámetros para cada hipótesis – S2	92
Tabla 4-39 Hipótesis 1/2 (Hielo predominante con viento indiferente) - S2	93
Tabla 4-40 Hipótesis 3/4 (Mantenimiento predominante con viento indiferente) - S2	93
Tabla 4-41 Hipótesis 5 (Viento longitudinal predominante) - S2	93
Tabla 4-42 Hipótesis 6 (Viento transversal predominante) - S2	94
Tabla 4-43 Valores Máximos Absolutos - S2	94
Tabla 4-44 Valores para las comprobaciones - S2	94
Tabla 4-45 Asignación de clase - S2	95
Tabla 4-46 Resumen de Clase de Sección - S2	97
Tabla 4-47 Comprobación de Cortante - S2	98
Tabla 4-48 Parámetros para comprobaciones de resistencia clase 1 - S2	99
Tabla 4-49 Parámetros para comprobaciones de resistencias clase 3 - S2	99
Tabla 4-50 Comprobación de Resistencia – S2	99
Tabla 4-51 Comprobación de Estabilidad de Euler - S2	100
Tabla 4-52 Obtención del Axial en Soportes compuestos – S2	101
Tabla 4-53 Comprobación Estabilidad – Eje débil Sección 1 [UPN-260] Clase 1 – S2	102
Tabla 4-54 Comprobación Estabilidad – Eje fuerte Sección 1 [UPN-260] Clase 1 – S2	102
Tabla 4-55 Comprobación Estabilidad - Sección 2 [Pletina rectangular 50x20] Clase 1 – S2	102
Tabla 4-56 Porcentaje de aprovechamiento – S2	102
Tabla 4-57 Coeficientes Parciales ELS	104
Tabla 4-58 Valores de los parámetros para cada hipótesis – S3	104
Tabla 4-59 Flechas máximas en el dintel – S3	105
Tabla 4-60 Flechas máximas en los postes – S3	106
Tabla 4-61 Valores de los parámetros para cada hipótesis – S4	107
Tabla 4-62 Flechas máximas en el dintel – S4	108
Tabla 4-63 Flechas máximas en los postes – S4	108
Tabla 6-1 Reacciones en las cimentaciones para la hipótesis 1	131
Tabla 6-2 Reacciones en las cimentaciones para la hipótesis 2	131
Tabla 6-3 Reacciones en las cimentaciones para la hipótesis 3	131
Tabla 6-4 Reacciones en las cimentaciones para la hipótesis 4	131
Tabla 6-5 Reacciones en las cimentaciones para la hipótesis 5	131
Tabla 6-6 Reacciones en las cimentaciones para la hipótesis 6	131
Tabla 6-7 Momento resistente al vuelco para cada macizo	132
Tabla 6-8 Reacciones en las cimentaciones para las hipótesis 1 y 2	133
Tabla 6-9 Reacciones en las cimentaciones para las hipótesis 3 y 4	133
Tabla 6-10 Reacciones en las cimentaciones para la hipótesis 5	133
Tabla 6-11 Reacciones en las cimentaciones para la hipótesis 6	133

Tabla 6-12 Familia de Macizos de $d=0,75m$	135
Tabla 6-13 Familia de Macizos de $d=1m$	136
Tabla 7-1 Comparativa de porcentajes de aprovechamiento ELU	137
Tabla 7-2 Comparativa de porcentajes de aprovechamiento ELS	141
Tabla 7-3 Comparación de resultados	142
Tabla 8-1 Segmento de 12m (Dintel)	145
Tabla 8-2 Peso del segmento de 12m (Dintel)	145
Tabla 8-3 Segmentos de 7m (Dintel)	145
Tabla 8-4 Peso segmentos de 7m (Dintel)	145
Tabla 8-5 Postes	146
Tabla 8-6 Peso de postes	146
Tabla 8-7 Tubos de silletas jabalcones y soportes	146
Tabla 8-8 Peso de silletas, jabalcones y soportes	146
Tabla 8-9 Comparativo	147
Tabla 8-10 Coeficiente C en función del tipo de terreno	149
Tabla 8-11 Valor del coeficiente C	149
Tabla 8-12 Obtención de coeficientes	150
Tabla 8-13 Coordenadas de los Keypoints (en mm)	151
Tabla 8-14 Nodos inicial y final de las líneas	153

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Planta de la Obra	20
Figura 2-1 Esquema de Catenaria	22
Figura 2-2 Compensación Mecánica	22
Figura 2-3 Ejemplo de Ménsula	23
Figura 2-4 Efecto del Peralte	23
Figura 2-5 Secuencia Tipo de Descentramientos	24
Figura 2-6 Seccionamiento Tipo de 4 Vanos	25
Figura 2-7 Ménsulas Dobles de Seccionamiento. Semieje (izquierda), Eje (derecha)	25
Figura 2-8 Agujas Aéreas	26
Figura 2-9 Reducción de Intensidades en sistemas Bitensión	26
Figura 2-10 Conductores en Sección Tipo	26
Figura 2-11 Alzado del Modelo	27
Figura 2-12 Planta del Modelo	28
Figura 2-13 Punto 100 de Aguja Tangencial	29
Figura 2-14 Datos de las Ménsulas	29
Figura 2-15 Frontal del Poste	30
Figura 2-16 Sección Transversal del Poste	30
Figura 2-17 Caras del Dintel	30
Figura 2-18 Sección Transversal del Dintel	31
Figura 2-19 Detalle de los contratacones	31
Figura 2-20 Silletas para Ménsulas. Silletas simple y Doble	32
Figura 2-21 Esquema de Trayectoria de Feeder	32
Figura 2-22 Silleta de Feeder	33
Figura 2-23 Componentes Principales de las Ménsulas	34
Figura 2-24 Cimentación Cilíndrica Tipo	34
Figura 2-25 Cimentación Cilíndrica en Desmonte	35
Figura 2-26 Cimentación Cilíndrica en Terraplén	35
Figura 3-1 Esquema de la Mitad Izquierda de la Pieza Central (Pieza 1)	37
Figura 3-2 Cara 1-2-3-4, de la Pieza 1	38
Figura 3-3 Esquema de la Mitad Derecha de la Pieza Central (Pieza 2)	38
Figura 3-4 Cara 1-2-3-4, de la Pieza 2	39
Figura 3-5 Montantes Frontales y Traseros, Pieza 2	39
Figura 3-6 Esquema de la pieza Extrema Izquierda (Pieza 3)	40
Figura 3-7 Cara 1-2-3-4, de la Pieza 3	40
Figura 3-8 Montantes, Pieza 3	41

Figura 3-9 Esquema de la pieza Extrema Derecha (Pieza 4)	41
Figura 3-10 Cara 1-2-3-4, de la Pieza 4	42
Figura 3-11 Montantes, Pieza 4	42
Figura 3-12 Nodos de Poste Izquierdo (Pieza 5)	42
Figura 3-13 Elementos de Poste Izquierdo (Pieza 5)	43
Figura 3-14 Detalle Unión Poste-Dintel, Lado Izquierdo	43
Figura 3-15 Nodos de Poste Derecho (Pieza 6)	43
Figura 3-16 Elementos de Poste Derecho (Pieza 6)	44
Figura 3-17 Detalle Unión Poste-Dintel, Lado Derecho	44
Figura 4-1 Esquema de la Geometría de la vía	52
Figura 4-2 Puntos Característicos de las Ménsulas	52
Figura 4-3 Puntos de aplicación de cargas de mantenimiento	67
Figura 4-4 Longitud de Regulación	68
Figura 4-5 Rotura de conductores. Situación previa a la rotura	69
Figura 4-6 Rotura de conductores. Situación final	69
Figura 4-7 Ménsula 2, longitud inferior a 2.025m	70
Figura 4-8 Acciones sobre el pórtico en la Hipótesis 1 - S1	73
Figura 4-9 Acciones sobre el pórtico en la Hipótesis 6 - S1	73
Figura 4-10 Información sobre el Elemento Beam188	74
Figura 4-11 Creación de las ETables	74
Figura 4-12 Selección de elementos 1, Cordones de los postes	74
Figura 4-13 Ejemplo de resultados de las ETables	74
Figura 4-14 Tensione sobre la sección	78
Figura 4-15 Tabla 20.3a de la EAE	79
Figura 4-16 Tabla 20.3b de la EAE	80
Figura 4-17 Tensiones sobre Ala y Alma - S1	80
Figura 4-18 Tabla 20.3c de la EAE	82
Figura 4-19 Gráfica 35.1.2	86
Figura 4-20 Tensiones en ala y Alma - S2	96
Figura 4-21 Ejemplo de deformada	104
Figura 4-22 Deformaciones en el Dintel, en la coordenada Z.	105
Figura 4-23 Selección de nodos del dintel y desplazamiento nodal máximo	105
Figura 4-24 Deformaciones en los Postes, en la coordenada Y.	106
Figura 5-1 Análisis Modal	109
Figura 5-2 Frecuencias naturales - M1	109
Figura 5-3 Primer modo de Vibración - M1	110
Figura 5-4 Segundo modo de Vibración - M1	110
Figura 5-5 Tercer modo de Vibración - M1	111
Figura 5-6 Cuarto modo de Vibración - M1	111

Figura 5-7 Quinto modo de Vibración - M1	111
Figura 5-8 Sexto modo de Vibración - M1	112
Figura 5-9 Séptimo modo de Vibración - M1	112
Figura 5-10 Octavo modo de Vibración - M1	112
Figura 5-11 Noveno modo de Vibración - M1	113
Figura 5-12 Décimo modo de Vibración - M1	113
Figura 5-13 Elementos Mass21	115
Figura 5-14 Primer modo de Vibración – M2	115
Figura 5-15 Segundo modo de Vibración – M2	115
Figura 5-16 Tercer modo de Vibración – M2	116
Figura 5-17 Cuarto modo de Vibración – M2	116
Figura 5-18 Quinto modo de Vibración – M2	116
Figura 5-19 Sexto modo de Vibración – M2	117
Figura 5-20 Séptimo modo de Vibración – M2	117
Figura 5-21 Octavo modo de Vibración – M2	117
Figura 5-22 Noveno modo de Vibración – M2	118
Figura 5-23 Décimo modo de Vibración – M2	118
Figura 5-24 Frecuencias naturales – M2	118
Figura 5-25 Sistema de amortiguación	119
Figura 5-26 Distribución de ejes y bogies.	120
Figura 5-27 Propagación de ondas. Modern Railway Track (Esveld)	120
Figura 5-28 Desplazamientos en Viaducto	121
Figura 5-29 Presión aerodinámica	122
Figura 6-1 Composición de la Plataforma	123
Figura 6-2 Fuerzas sobre el Macizo	125
Figura 6-3 Variación de C_y	125
Figura 6-4 Efecto del Peso en el terreno	127
Figura 6-5 Efecto del Giro sobre macizos Cilíndricos	128
Figura 6-6 Proyección sobre X	130
Figura 6-7 Valor de las Reacciones	130
Figura 7-1 Esfuerzos axiales en la hipótesis 6 de situaciones Permanentes y Transitorias.	138
Figura 7-3 Esfuerzos axiales en la hipótesis 6 de situaciones Accidentales	139
Figura 7-5 Aumento de Gálibo	140
Figura 7-6 Desplazamiento de Silletas	140
Figura 8-1 Peligrosidad sísmica	149

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto

Los elementos que conforman el pórtico analizado en este trabajo se engloban en el ámbito de la línea de Alta Velocidad Madrid-Galicia, en concreto en el “Proyecto de Línea Aérea de Contacto y Sistemas Asociados del Tramo Zamora-Pedralba”. Esta obra cuenta con un presupuesto de 65 millones de euros y un trazado de 115km de vía doble, lo que supone más de 250km de catenaria.

Se trata del penúltimo tramo del corredor que conectará Madrid con la línea de Alta Velocidad existente en Galicia (el tramo Orense-Santiago). Los trabajos se completarn en los próximos meses y permitirá reducir la duración del viaje en tren entre Madrid y Galicia, ya que los trenes llegarán a Zamora por la vía de alta velocidad existente y continuarn por este nuevo trazado hasta Pedralba, punto en el que pasan a la línea convencional sin electrificación. De esta forma, aunque la línea no est  completa, la mayor parte del recorrido se podrá hacer por vías de alta velocidad.

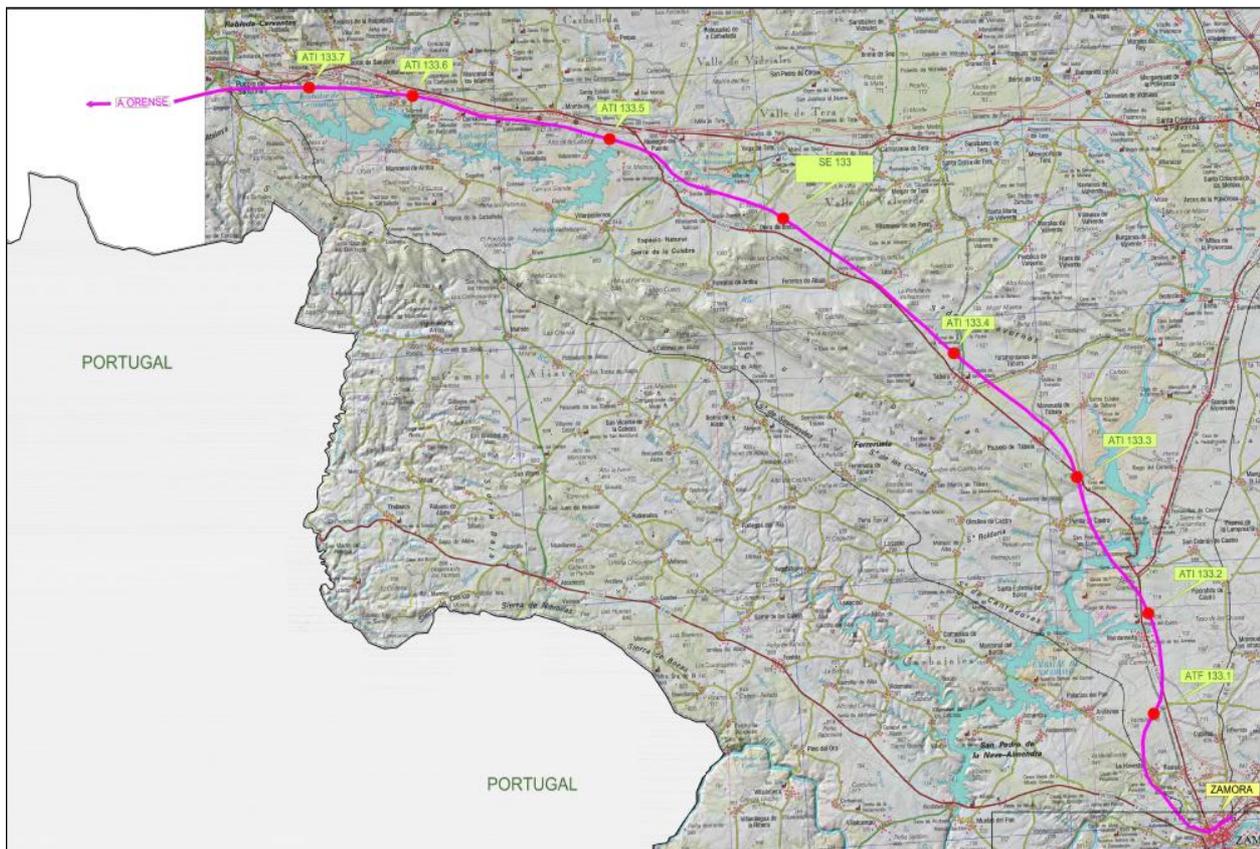


Figura 1-1 Planta de la Obra

El siguiente y último tramo, Pedralba-Orense, ha sido licitado recientemente por lo que la finalización completa de la línea Madrid-Galicia se espera para 2022.

La tecnología empleada ha sido ratificada en su funcionamiento mediante la experiencia acumulada en obras anteriores (Madrid - Lérida - Barcelona, Córdoba - Málaga, Figueras - Perpignan, Albacete – Alicante). Satisface los requerimientos de normativa para este tipo de líneas, en particular la E.T.I. del subsistema energía y la norma UNE EN-50119 para la velocidad de circulación de 350 km/h.

Los cálculos aquí desarrollados toman como referencia algunos datos reales (equipos, elementos, piezas, etc.) pero están realizados de forma independiente a los trabajos de ingeniería del proyecto constructivo, empleando medios (software) y criterios distintos.

1.2 Motivación del Trabajo

En el sector ferroviario se construyen grandes líneas que implican un gran número de elementos portantes como postes y pórticos, los cuales se estandarizan y se emplean para distintas situaciones. Solo en la obra Zamora – Pedralba se cuenta con más de 2500 postes y 50 pórticos. Además, muchas de las líneas de Alta Velocidad del territorio nacional comparten diseño y elementos principales, por lo que las cantidades totales son muy elevadas.

Concretamente, los pórticos (aspecto central de este proyecto) son elementos grandes que repercuten un alto coste, no solo por su contenido en acero, sino también por la fabricación, transporte y montaje de estas estructuras pesadas.

Conocer en qué medida los elementos de las estructuras de esta Línea de Alta Velocidad presentan sobredimensionamiento, permitiría evaluar los posibles sobrecostes en los que se incurriría. Esto lleva a la idea de desarrollar un cálculo detallado, motivado por la reducción potencial de costes.

1.3 Objetivos del Proyecto

En base a esa motivación, este proyecto tendrá como objetivo el cálculo pormenorizado de un tipo de pórtico empleado en las líneas de alta velocidad. Este cálculo implicará, como puntos principales, analizar todas las acciones y las hipótesis para estas acciones, situaciones accidentales, análisis dinámico y análisis de las cimentaciones.

Para ello se tomará un pórtico estandarizado (de 26m) como los empleados en esta línea y se diseñará una configuración de catenarias que implique el mayor nivel de sollicitud posible en el mismo, teniendo en cuenta en todo momento los requisitos y limitaciones de diseño que rigen la ingeniería de la electrificación de alta velocidad.

De esta forma, el pórtico será representativo de todos los pórticos del mismo tipo presentes en la línea.

1.4 Organización del Proyecto

Para conseguir dicho objetivo se organiza el proyecto de la siguiente manera:

- Se definirá la estructura a analizar y sus elementos principales, así como los conceptos sobre la Línea Aérea de Contacto más importantes que estén relacionados con este trabajo.
- Se hará un estudio detallado de las cargas a considerar, las hipótesis y las condiciones de contorno. En este punto también se desarrollarán los aspectos más importantes que han de tenerse en cuenta durante el proceso de modelizado.
- Posteriormente se procede a desarrollar el Análisis Estático (comprobación de los Estados Límite Último y de Servicio ante las hipótesis de acciones) y Dinámico (frecuencia natural, vibraciones) del pórtico. Posteriormente se realizará el dimensionamiento de las cimentaciones mediante la comparación de dos métodos de cálculo.
- Por último, se analizarán y comentarán los resultados obtenidos. Se expondrán las conclusiones en base a los objetivos y motivación del proyecto.

2 DEFINICIONES Y ESTRUCTURA

En este apartado se definirán algunos conceptos básicos de la línea aérea de contacto que son recurrentes en este trabajo. También se definirá la configuración del pórtico, desarrollando sus componentes principales.

2.1 Definiciones y Características de LAC de Alta Velocidad

LAC: La Línea Aérea de Contacto suministra la corriente al tren desde las subestaciones de tracción. Un tren AVE con composición sencilla (200m) posee una potencia aproximada de 10MVA, lo que a 25kV requiere 400A, valores mucho más bajos que los que presentaría el mismo tren en un sistema convencional de 3kV, donde se necesitarían 3.000A.

Esta reducción sustancial de la intensidad a costa de aumentar la tensión es la clave de la Alta Velocidad. Presenta una serie de connotaciones de índole eléctrica y de diseño, pero también mecánica, es decir, permite emplear una catenaria más ligera (conductores de menor diámetro), y por tanto más flexible que en las líneas convencionales, reduciendo la fuerza de contacto entre hilo y pantógrafo lo que permite velocidades mayores.

La fuerza de contacto depende de otro factor, que es la flecha que presenta el hilo de contacto entre apoyos, la cual debe de ser mínima. Esto sería imposible empleando un único hilo, ya que los vanos rondan los 55-64m y se producirían grandes deflexiones. Por lo tanto, se recurre al cable sustentador, del cual se suspenden las péndolas (en torno a 8 por vano), que son calculadas individualmente y con precisión para garantizar que el hilo de contacto se encuentra en la posición exacta (5.3m sobre el eje de vía).

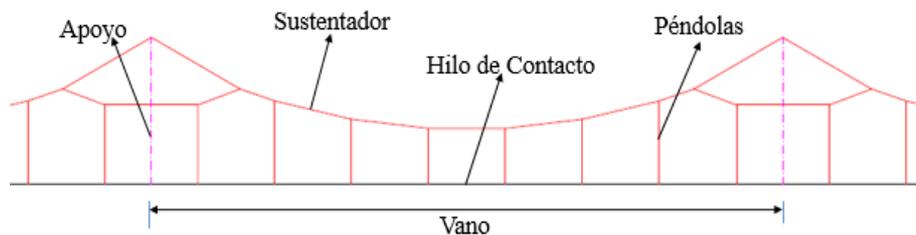


Figura 2-1 Esquema de Catenaria

Compensación mecánica: Ambos conductores presentan un tense (3150kg en hilo de contacto y 1575kg en el sustentador) que, junto con las péndolas, aseguran una flecha mínima en todo el hilo de contacto. Se busca mantener un tense constante a pesar de las posibles dilataciones de los conductores. Esto se consigue por medio de unas contrapesas conectadas a los cables mediante poleas de relación 1:5 y 1:3 respectivamente. Estas contrapesas se desplazan verticalmente dentro de su rango de movimiento en función de la temperatura.

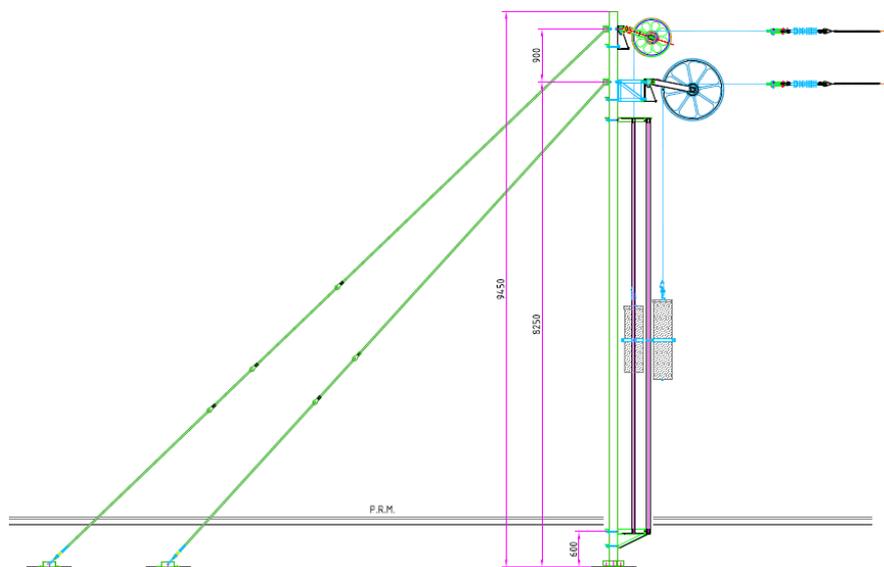


Figura 2-2 Compensación Mecánica

Ménsulas: Siguiendo la premisa de emplear una catenaria ligera y flexible, se diseñan unas ménsulas tubulares ubicadas en los apoyos y que soportan ambos conductores. Para sujetar el hilo de contacto se emplea un brazo que ha de ser articulado para no suponer un punto “duro” al paso del pantógrafo. La ménsula representada en la siguiente figura es de tipo 1, con atirantado dentro -20cm.

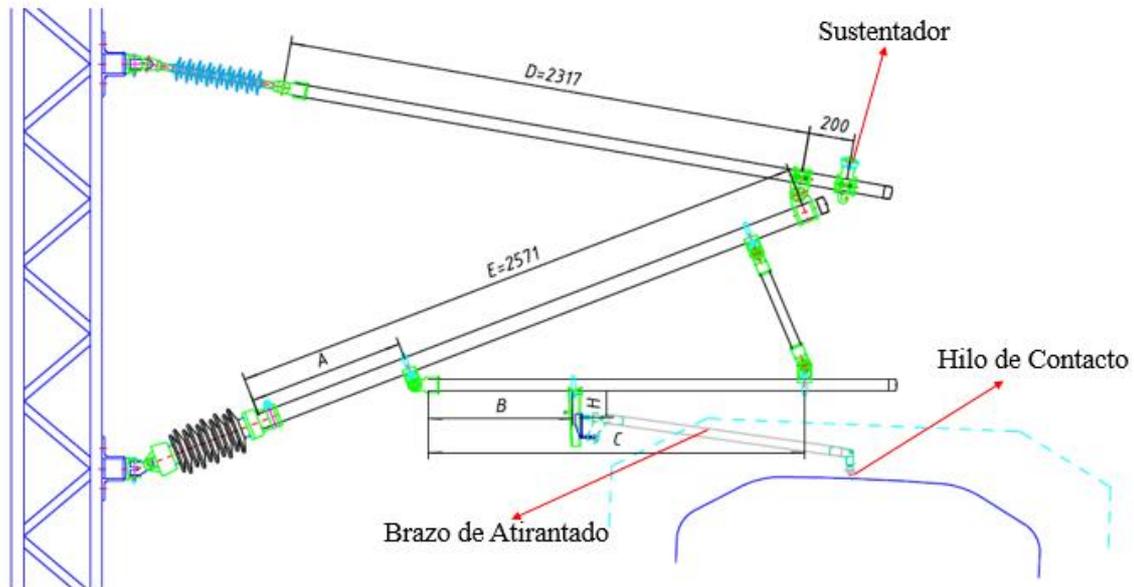


Figura 2-3 Ejemplo de Ménsula

Todas las ménsulas, que superan las 4500 en esta obra, han de ser calculadas con detalle y de forma individual, garantizando que soporten las cargas a las que están sometidas y que su geometría sea la adecuada para ubicar ambos conductores en su punto exacto.

Son muchos parámetros que condicionan la geometría de la ménsula y hacen que todas sean diferentes. Algunos de estos parámetros son:

- Gálibo*: Es la distancia (en horizontal) entre la cara interior del poste y la cara interior del rail más cercano.
- PRM*: Es la distancia (en vertical) entre la base del poste y el rail más bajo.
- Radio*: Radio de curvatura de la traza.
- Peralte*: Relacionado con el radio. Para atenuar las aceleraciones no compensadas que se sufren dentro del tren durante los giros por causa de las fuerzas centrífugas, se añade un ángulo a la vía. El ángulo es proporcional al radio y a la velocidad de diseño.

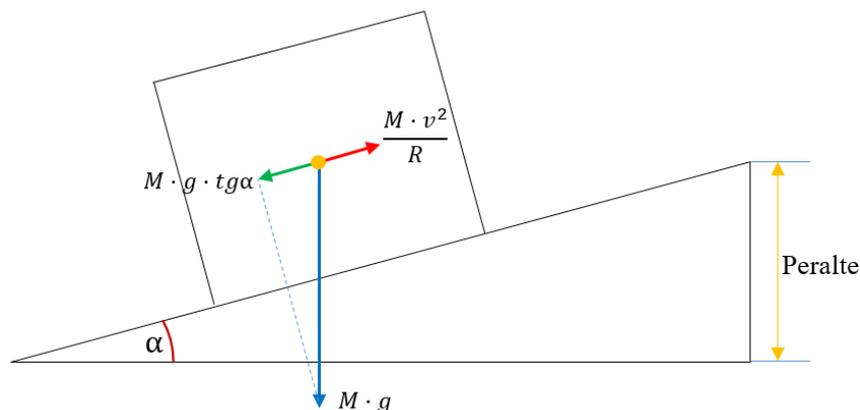


Figura 2-4 Efecto del Peralte

-*Descentramiento*: Para evitar un desgaste concentrado sobre las pastillas del pantógrafo, se obliga al hilo a realizar un zigzag entre los apoyos. El valor nominal es +20cm en ménsulas fuera, tipo 2 (se aleja 20cm del poste) y -20 en ménsulas dentro, tipo 1 (se acercan 20cm al poste).

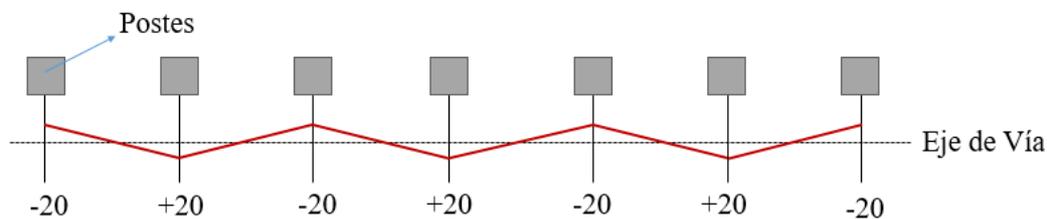


Figura 2-5 Secuencia Tipo de Descentramientos

-*Tense*: Las ménsulas soportan un esfuerzo radial debido al descentramiento que provocan en los conductores tensados, su valor es un porcentaje del tense del conductor y es proporcional al descentramiento.

-*Vano*: Es la distancia entre la ménsula y los apoyos anteriores y posteriores a la misma. El vano máximo y nominal según las condiciones de diseño será de 64m, reduciéndose en las zonas de curvas. Entre otras cosas, a mayor vano mayor será el peso de los conductores descansando en las ménsulas.

-*Altura de canaria*: Es la distancia entre hilo y sustentados en los apoyos. Por condiciones de diseño se emplea 1.4m en ménsulas simples.

Seccionamientos: Como se ha explicado antes, la compensación mecánica de la catenaria permite evitar los problemas de dilatación en los conductores manteniendo el tense constante. Pero esta compensación tiene un límite, ya que para hilos muy largos las dilataciones serían excesivas y superarían el rango de movimiento de las contrapesas.

Se ha establecido un valor de cantón máximo de 1200m aproximadamente, de modo que la compensación mecánica se aplica a segmentos (cantones) de esta longitud, no a la línea entera. Para mantener la continuidad mecánica y eléctrica de la catenaria al pasar de un cantón a otro se establecen los seccionamientos, en los que un cantón finaliza (catenaria “vieja”), mientras que otro cantón nuevo le sustituye (catenaria “nueva”). Completar este proceso requiere varios vanos.

Para un seccionamiento estándar de 4 vanos:

- El primer punto es un anclaje de seccionamiento (A/S), donde la catenaria “nueva” está anclada al poste (con su correspondiente compensación) y se encuentra a 1.5m por encima de la posición del hilo de la catenaria “vieja”. En este punto solo hay una ménsula.
- El siguiente punto es un semieje (S/E) donde la catenaria “nueva” ha bajado hasta los 600mm, aunque sigue lejos del alcance del pantógrafo. Se tienen 2 ménsulas.
- Pasado este punto, la catenaria “nueva” sigue bajando mientras la “antigua” comienza a elevarse, cruzándose ambas en el eje (E) formando una tijera, donde las dos tienen una elevación en torno a 13mm. En este punto se tienen 2 ménsulas.
- El seccionamiento se cierra simétricamente con otro semieje y anclaje de seccionamiento en los cuales el proceso es el mismo, pero a la inversa. La catenaria “nueva” ha bajado hasta su posición de diseño mientras que la “antigua” se eleva a 600mm en el S/E y finalmente se ancla y se compensa en el A/S a 1.5m.

Los seccionamientos permiten también aislar eléctricamente un cantón de otro. Esto es común a la hora de establecer una separación entre los tramos alimentados por distintas subestaciones o fases. Estos seccionamientos se denominan de Lámina de Aire y tienen algunas connotaciones diferentes, como una mayor distancia eléctrica.

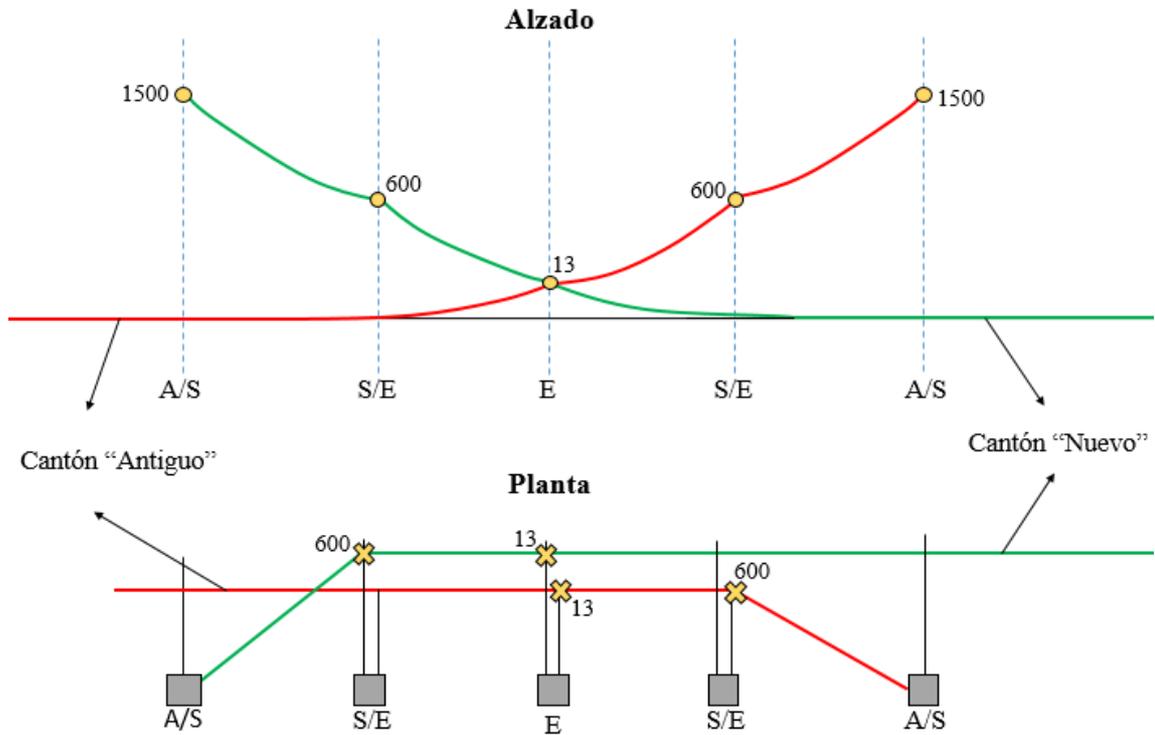


Figura 2-6 Seccionamiento Tipo de 4 Vanos

Ménsulas dobles: Como se ha visto, existen 3 apoyos en cada seccionamiento en los cuales se tienen ménsulas dobles. Se tratan de ménsulas independientes, separadas 1.5m la una de la otra. En estos casos se adapta la configuración de una de ellas (la más cercana al poste) aumentando su altura de catenaria de 1.4m a 2.3m para evitar interferencias entre hilos.

En un semieje, la ménsula elevada no tiene brazo ya que a 600mm por encima de la posición estándar del hilo está fuera del alcance del pantógrafo. En los ejes ambas presentan brazo.

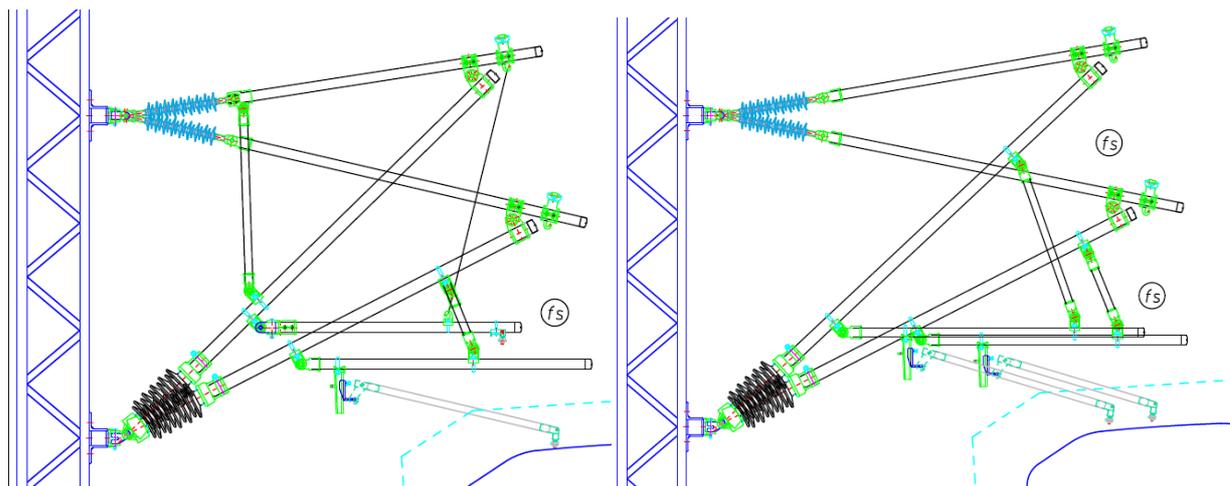


Figura 2-7 Ménsulas Dobles de Seccionamiento. Semieje (izquierda), Eje (derecha)

Agujas: Existe otra circunstancia en la que se tienen ménsulas dobles o incluso triples. Cuando una vía se bifurca dando lugar a una vía desviada que se va separando de la principal, se requiere la instalación de una aguja aérea. Esto implica añadir una nueva catenaria que siga la traza de la vía desviada, compartiendo algunos apoyos con la catenaria principal. Durante este proceso el comportamiento de la catenaria y su diseño es similar a una situación de seccionamiento. Pueden ser de tipo tangencial o cruzadas.

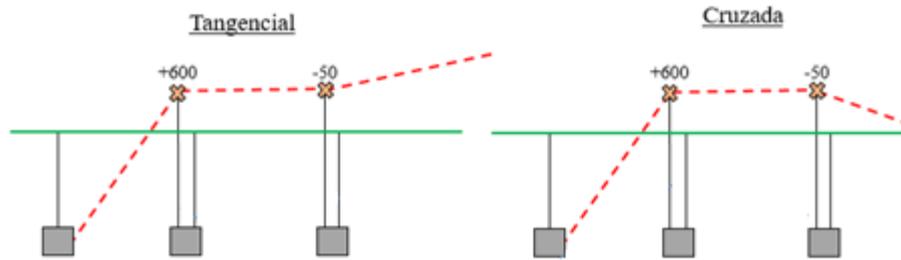


Figura 2-8 Agujas Aéreas

Feeder negativo y cable de retorno: Por último, se definirán otros conductores que son indispensables en la instalación y que acompañan a la catenaria en toda su longitud, descansando sobre los mismos apoyos.

El primero de ellos, feeder negativo, es propio de los sistemas bitensión, o 2x25, y consiste en un conductor de aluminio que presenta una tensión de 25kV desfasados 180° con respecto a los 25kV de la catenaria, de modo que la diferencia de potencial entre ambos es de 50kV. Esto permite, mediante un complejo sistema de autotransformadores, reducir aún más la intensidad en la línea colaborando en la reducción de peso en la catenaria (ya que no harían falta diámetros efectivos grandes). Hay un feeder por cada vía principal, es decir, 2 feeders por línea a pesar de que puedan existir más de dos vías en algún punto.

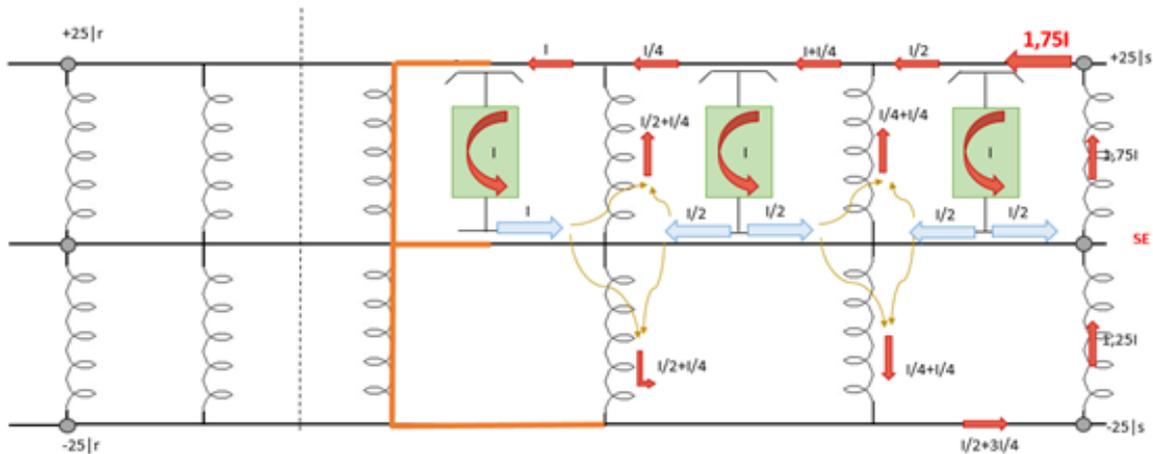


Figura 2-9 Reducción de Intensidades en sistemas Bitensión

El segundo de ellos, cable de tierra o retorno, se emplea como medida de protección. Conecta los apoyos entre sí poniéndolos a tierra y además, en colaboración con los raíles, cierra el circuito de retorno a la subestación.

Ambos descansan sobre los mismos postes y pórticos que la catenaria, lo que implica una carga más a considerar. La sección tipo se muestra a continuación.

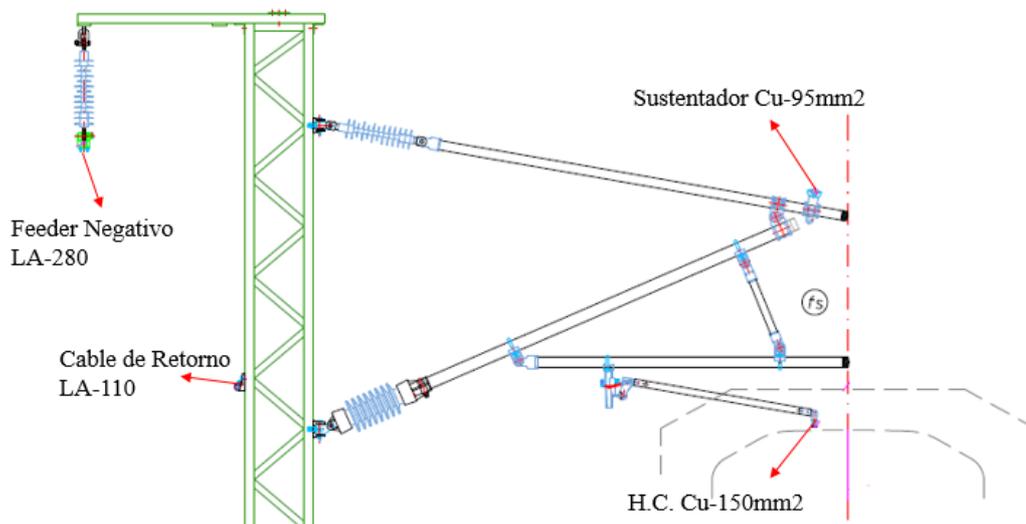


Figura 2-10 Conductores en Sección Tipo

2.2 Definición de la estructura. Pórtico de 26m

El pórtico a analizar, un pórtico rígido de 26m, es el más grande dentro de los no atirantados. Sus postes están compuestos por dos perfiles UPN-260 unidos mediante diagonales. Estos postes tienen 10m de altura.

Se trata de un pórtico especial debido a su tamaño, que se utiliza en aquellas situaciones en las que se han de electrificar varias vías y no se dispone de espacio suficiente entre ellas como para colocar postes individuales, que es la opción que se emplea por defecto siempre que sea posible. En estos casos se recurre a pórticos que cubren toda la playa de vías y soportan las ménsulas y conductores de varias catenarias simultáneamente. Los pórticos se emplean principalmente en las estaciones, PB (Puestos de Banalización) y en los PAET (Puestos de Adelantamiento y Estacionamiento de Trenes).

Con el objetivo de analizar el comportamiento de este pórtico, se diseña una distribución de catenarias para que sirva de apoyo a 5 vías (el máximo número de vías que puede acoger un pórtico de 26m, debido a los gálibos mínimos y distancias entre vías que han de respetarse). Las dos vías principales (V1 y V2) se conectan mediante los correspondientes desvíos (d1 y d2) con las vías secundarias (V3 y V4 respectivamente). Al mismo tiempo, está presente otra vía secundaria V5.

Como se ha explicado anteriormente, la existencia de vías desviadas requiere agujas aéreas tangenciales, lo que implica dobles ménsulas. Complementariamente a esto, la vía 5 presenta un seccionamiento cuyo eje se encuentra en este pórtico. Todo ello resulta en 8 catenarias (20 conductores) soportadas por la estructura, siendo esta la situación en la que este pórtico presentaría una mayor solitud de cargas.

Se describirá a continuación la configuración de pórtico y ménsulas capaz de satisfacer los requerimientos de diseño descritos anteriormente, dando cabida a 8 catenarias.

2.2.1 Modelo

La configuración definida para este pórtico se representa a continuación. En la vista en alzado se aprecian las 5 vías y las 8 ménsulas, así como los principales datos geométricos de la estructura.

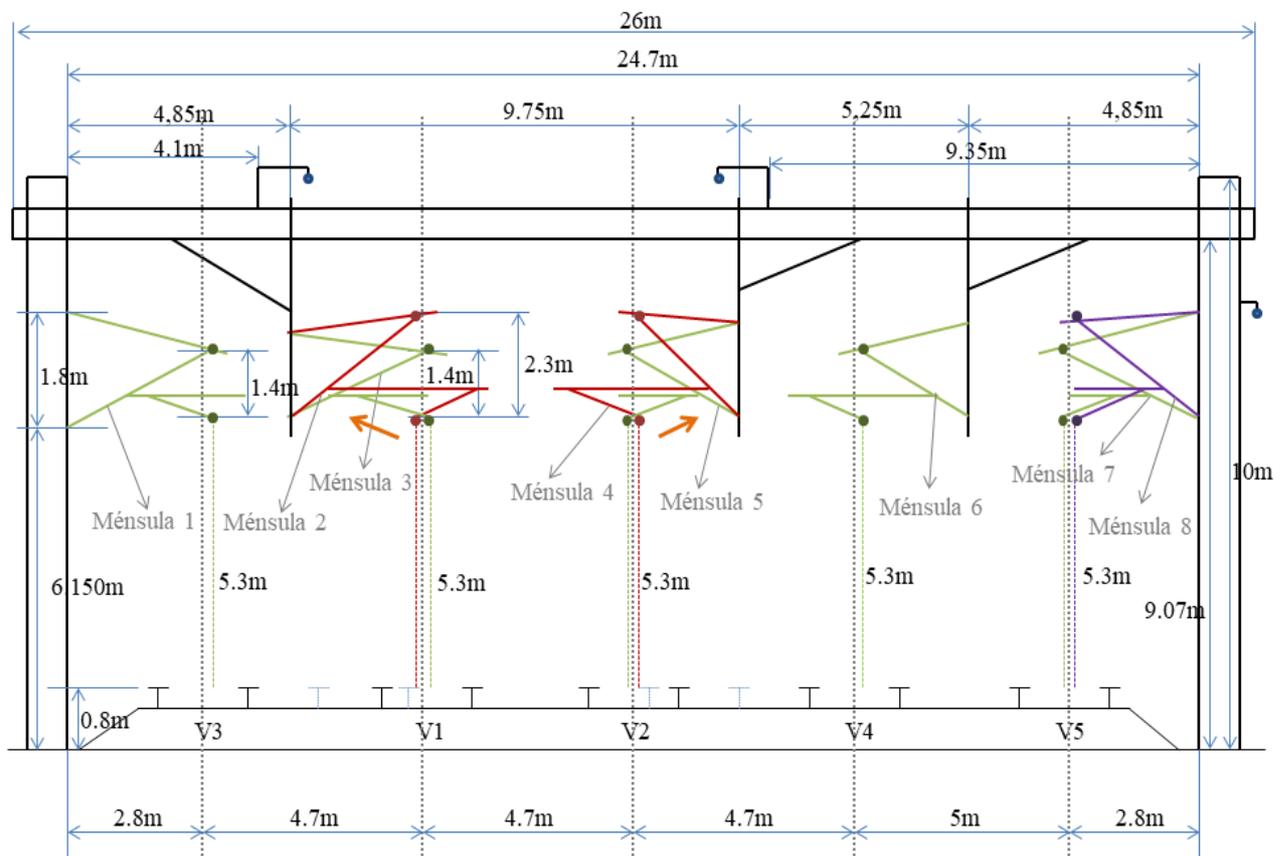


Figura 2-11 Alzado del Modelo

En la vista en planta se aprecian las vías principales V1 y V2, sus secundarias V3 y V4, los desvíos d1 y d2 y la V5. En total, son 8 las catenarias (representadas en verde) en este pódico (representado en rojo), con sus correspondientes 8 ménsulas. Las parejas de ménsulas 2-3 y 4-5 se corresponden con el P100 de las agujas aéreas, mientras que las ménsulas 7-8 son parte del eje del seccionamiento.

Para este tipo de agujas los descentramientos son -800mm en la catenaria del desvío y -250mm en la principal. Además, presentan brazos especiales, uno curvo de 2000mm y otro recto de 1200mm respectivamente, a diferencia de las situaciones estándar que emplean brazos rectos de 1150mm.

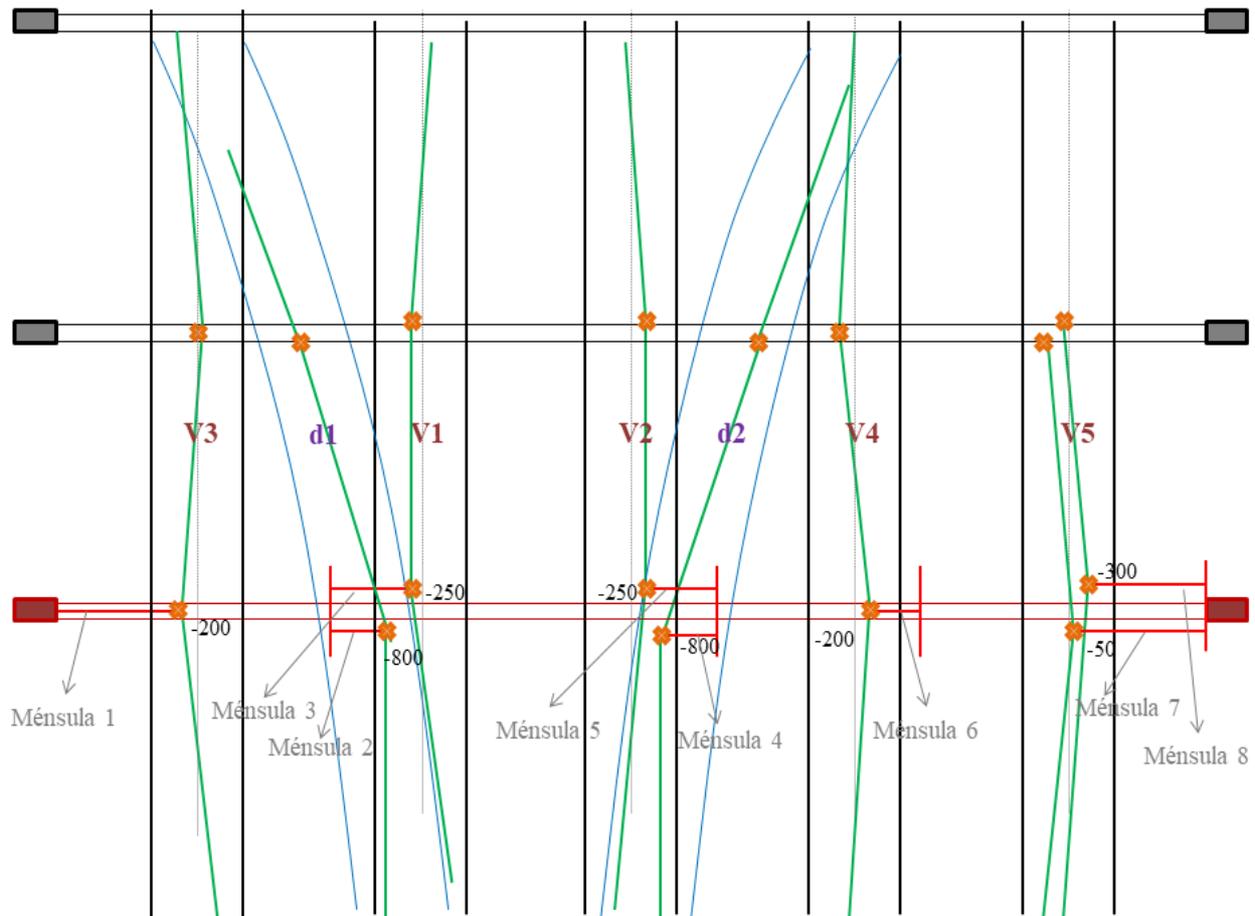


Figura 2-12 Planta del Modelo

El diseño de las ménsulas en las agujas es muy complejo, ya que influyen muchos parámetros. Como concepto principal, el P100 de una aguja representa el punto en el que los ejes de la vía principal y desviada distan 100cm. Esto significa que el pantógrafo puede pasar por dos posiciones distintas en este punto (dependiendo de si el tren circula por la vía principal o desviada), de modo que los brazos han de diseñarse para evitar invadir el gálibo cinemático de los pantógrafos.

Otra consideración especial de las agujas es que el brazo curvo presenta una elevación negativa de -50mm con respecto a la posición de referencia del hilo, de 5.3m. Esto se hace para que el pantógrafo de un tren que se desplaza por la vía desviada encuentre el hilo de la vía principal algo más elevado y evitar así que pueda colarse por debajo del pantógrafo. Un suceso de estas características implicaría unas consecuencias desastrosas en la catenaria.

A modo de ejemplo, se muestra la pareja de ménsulas 2 y 3.

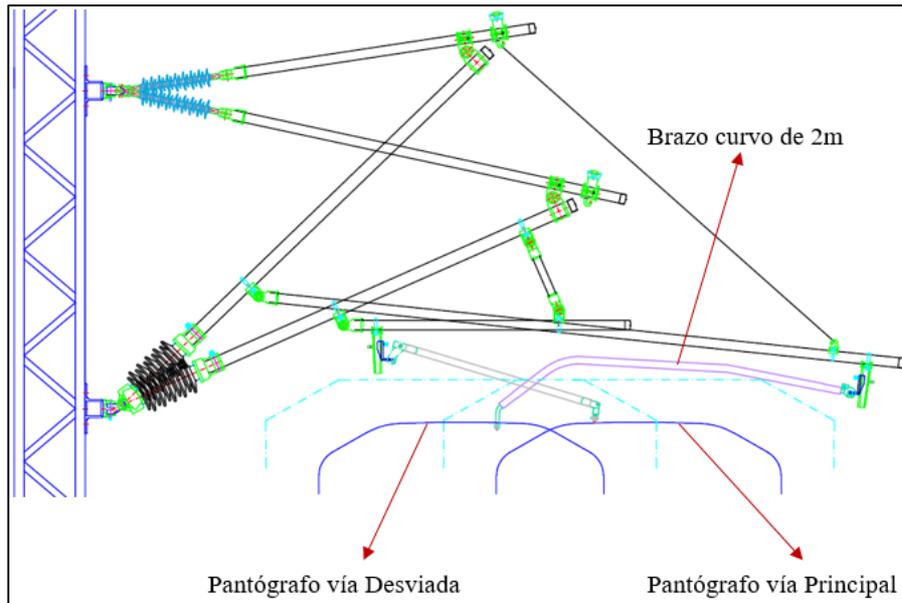


Figura 2-13 Punto 100 de Aguja Tangencial

2.2.2 Ménsulas

Los datos que se emplearán para el cálculo de las ménsulas, tanto geométricos como de vía, se indican a continuación. Son datos pertenecientes ménsulas reales en situaciones similares, que junto con los criterios de diseño de LAC, servirán para definir con detalle la configuración de esta estructura.

Ménsula 1		
L_brazo = 1150	V_a = 64761	
Ten_sus = 1575	V_p = 58756	
Ten_hc = 3150	Desc = -200	
PRM = 831	Desc_a = 300	
Dist tac = 1800	Desc_p = 200	
Alt cat = 1400	Alt 1° tac = 6150	
Alt hc = 5300	Gálibo = 2412	
Elev hc = 0	Peralte/Radio = 0	

Ménsula 2,3		
Brazo Curvo (1°)	Brazo Recto (2°)	Común
L_brazo = 2000	L_brazo = 1200	Peralte/Radio = 0
Elev hc = -50	Elev hc = 0	Ten_sus = 1575
Desc = -800	Desc = -250	PRM = 772
Desc_a = -800	Desc_a = -250	Alt hc = 5300
Desc_p = -3900	Desc_p = 200	Dist tac = 1800
Alt cat = 2300	Alt cat = 1400	Alt 1° tac = 6150
Ten_hc = 1575	Ten_hc = 3150	dpl = 4500
		V_a = 64761
		V_p = 58756
		Gálibo = 2655

Ménsula 6		
L_brazo = 1150	V_a = 64761	
Ten_sus = 1575	V_p = 58756	
Ten_hc = 3150	Desc = 200	
PRM = 761	Desc_a = -250	
Dist tac = 1800	Desc_p = -200	
Alt cat = 1400	Alt 1° tac = 6150	
Alt hc = 5300	Gálibo = 2950	
Elev hc = 0	Peralte/Radio = 0	

Ménsula 4,5		
Brazo Curvo (1°)	Brazo Recto (2°)	Común
L_brazo = 2000	L_brazo = 1200	Peralte/Radio = 0
Elev hc = -50	Elev hc = 0	Ten_sus = 1575
Desc = -800	Desc = -250	PRM = 767
Desc_a = -800	Desc_a = -250	Alt hc = 5300
Desc_p = -3900	Desc_p = 200	Dist tac = 1800
Alt cat = 2300	Alt cat = 1400	Alt 1° tac = 6150
Ten_hc = 1575	Ten_hc = 3150	dpl = 4500
		V_a = 64761
		V_p = 58756
		Gálibo = 2412

Ménsula 7,8		
(1°)	(2°)	Común
L_brazo = 1150	L_brazo = 1150	Peralte/Radio = 0
Elev hc = 13	Elev hc = 13	Ten_sus = 1575
Desc = -50	Desc = -300	PRM = 802
Desc_a = 300	Desc_a = 50	Alt hc = 5300
Desc_p = 300	Desc_p = 50	Dist tac = 1800
Alt cat = 1400	Alt cat = 2300	Alt 1° tac = 6150
Ten_hc = 3150	Ten_hc = 3150	dpl = 4500
		V_a = 64761
		V_p = 58756
		Gálibo = 2379

Figura 2-14 Datos de las Ménsulas

2.2.3 Elementos del pórtico

2.2.3.1 Postes

Los dos postes tienen una altura total de 10m. Están formados por dos perfiles (cordones) enfrentados, unidos mediante pletinas diagonales. El alma de ambos cordones es paralela a la vía, siendo sus alas perpendiculares.

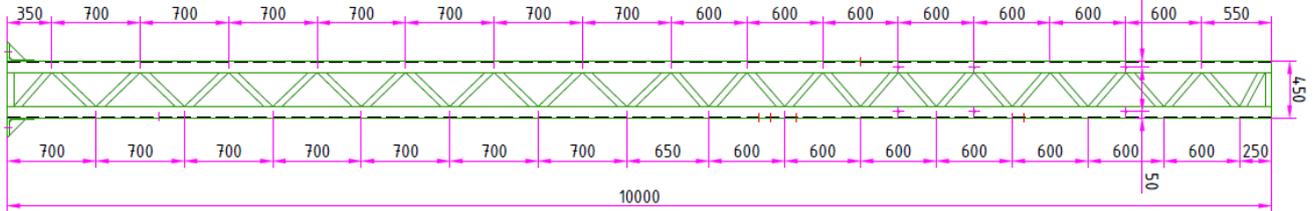


Figura 2-15 Frontal del Poste

Cordones: Perfiles UPN-260. Presentan taladros en el lado vía para la instalación de los tacones de las ménsulas y en el lado campo para la pinza de cable de retorno.

Diagonales: Pletinas de sección rectangular, tipo ch-50x20. Su longitud no es igual para todas ellas, ya que siguen el patrón mostrado en la figura 2-14..

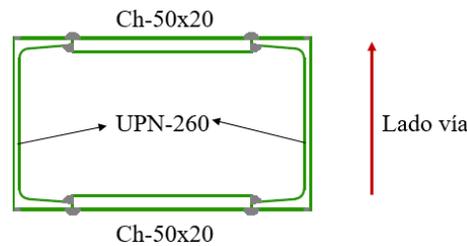


Figura 2-16 Sección Transversal del Poste

2.2.3.2 Dintel

El dintel está formado por dos piezas extremas y una central. La pieza central mide 12m, mientras que las piezas extremas miden 7m cada una, confiriéndole un total de 26m de extremo a extremo.

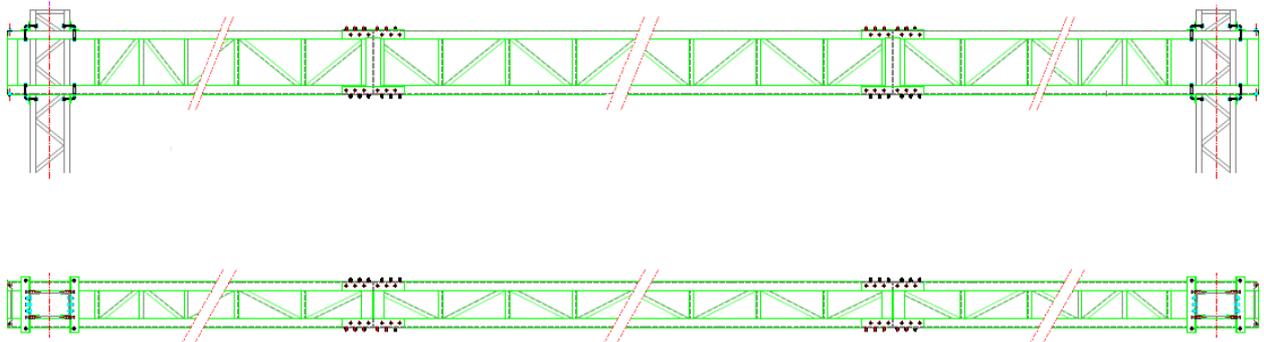


Figura 2-17 Caras del Dintel

Cordones: Perfiles LPN 100x8, 8 de ellas miden 7m de longitud y 4 miden 12m.

Presillas: Barras LPN 45x5. Conectan en vertical y horizontal los cordones de la misma cara. Se tienen 52 de estas barras de 700mm y 52 de 500mm.

Antitorción: Barras LPN 45x5. Se colocan en parejas y cruzadas, dentro del dintel, para ofrecer rigidez a la estructura. Van ubicadas cada dos segmentos y conectan los cordones opuestos. En total hay 24.

Diagonales: Barras LPN 45x5. Conectan en diagonal los cordones de la misma cara. Existen 96 de estos elementos.

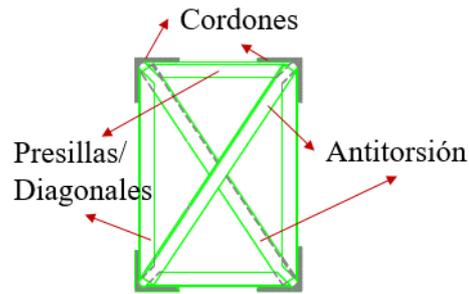


Figura 2-18 Sección Transversal del Dintel

2.2.3.3 Contratacones:

A efectos de modelizado, estos elementos no se representan, pero se obliga a los puntos que unen a mantener una unión rígida. 4 de estas piezas unen rígidamente cada poste al dintel, mientras que otros 10 contratacones unen dintel con silletas. En total hay 18.

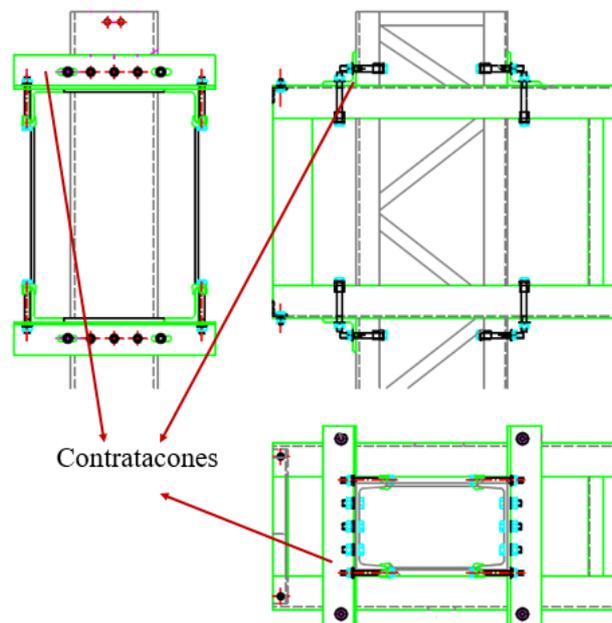


Figura 2-19 Detalle de los contratacones

2.2.3. Silletas

En el caso de las vías exteriores (V3 y V5), las ménsulas van colocadas sobre los propios postes del pórtico, mientras que para las vías intermedias (V1, V2 y V4) se requieren silletas, que son elementos colocados en el dintel con el objetivo de ubicar las ménsulas. Además de este tipo de silleta, se emplean otras destinadas a la suspensión de feeders sobre el dintel.

Silletas de ménsula: Los componentes de estas silletas son tubos cuadrados 80x4mm de 3.7m de longitud, un jabalcón cilíndrico 54x2.6mm y un soporte de giro para las ménsulas. Además de los contratacones que las unen rígidamente al dintel.

Si la ménsula es sencilla, solamente se requiere un tubo cuadrado en el centro del dintel (tubo sobre el que se apoya la ménsula directamente) y un jabalcón, mientras que para ménsulas dobles se requieren 2 tubos, uno a cada lado del dintel y dos jabalcones. Como el dintel tiene un ancho de 50cm, no pueden colocarse las ménsulas sobre los tubos verticales directamente ya que han de distar 1.5m. Por ese motivo se instalan 2 soportes de giro de ménsula.

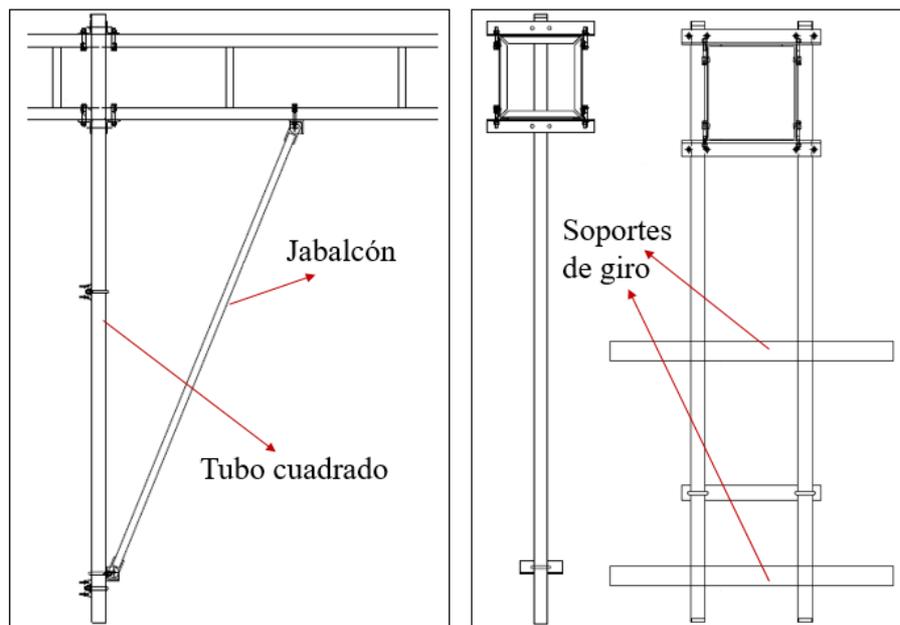


Figura 2-20 Silletas para Ménsulas. Silletas simple y Doble

Silletas de feeder: Los feeders van suspendidos sobre aisladores. En los casos estándar en los que los apoyos son postes, se coloca una pequeña silleta y el feeder se suspende en la cara campo (tal y como recoge la figura 2-9). Al tratarse de un pórtico, no se puede ni suspender por debajo del dintel (porque el feeder no respetaría la distancia eléctrica con la catenaria y otros elementos) ni se puede suspender en el poste del pórtico como si se tratase de un poste normal (para no forzar un quiebro en el feeder al pasar del poste anterior al pórtico siguiente). Este fenómeno se ilustra a continuación.

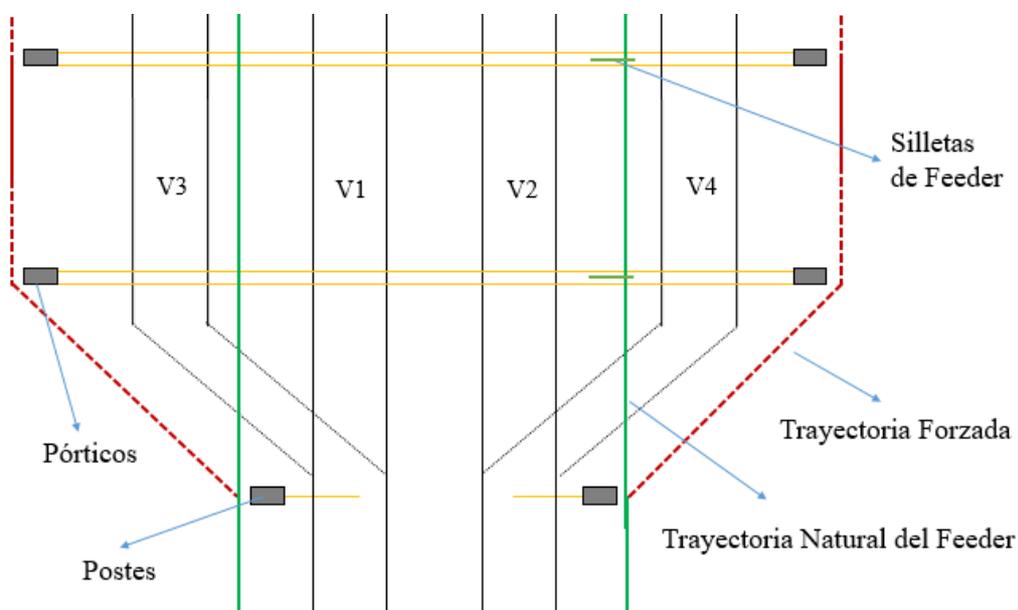


Figura 2-21 Esquema de Trayectoria de Feeder

La solución pasa por suspender el feeder por encima del dintel mediante una silleta, manteniendo la trayectoria natural. Esta silleta consta de dos tubos cuadrados 80x80x4mm, unidos en forma de L y reforzado con un jabalcón de 80cm. Del extremo de la pieza superior se suspende una cadena de aisladores de vidrio de 4.5kg, que se conectará al feeder con una grapa. La conexión con el dintel se lleva a cabo mediante contratacones.

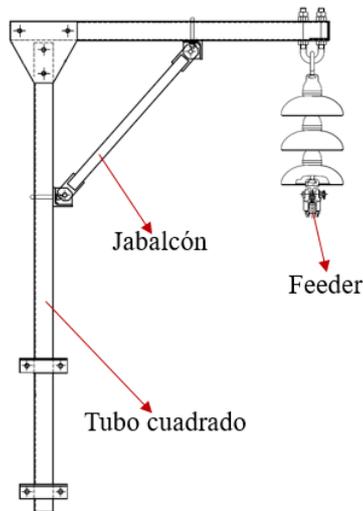


Figura 2-22 Silleta de Feeder

2.2.3.5 Ménsulas

En una ménsula hay más de 70 componentes, que van desde los tubos hasta pasadores y tornillos. Como elementos principales se tiene:

Tubos de Aluminio: Todos los tubos de la ménsula presentan el mismo espesor de 6mm, pero se diferencian en su diámetro dependiendo del uso.

- El cuerpo del tirante (tubo superior) tiene un diámetro 55mm, con un peso lineal de 2.49kg/m. Suele medir entre 2m y 2.5m, por lo que implican un peso aproximado de 5.5kg
- El cuerpo de la ménsula (tubo central) tiene diámetro 70mm, con un peso de 3.25kg/m. Mide entre 2.2m y 3m, lo que implica un peso en torno a 8kg.
- El tubo de atirantado (tubo horizontal) tiene también diámetro de 55mm. En ménsulas tipo 1 este tubo mide aproximadamente 1.5m, y en las de tipo 2 llega a 3.5m.
- Las ménsulas tipo 1 presentan un tubo de refuerzo que conecta el tubo de tirante con el de atirantado. Su diámetro es de 42mm y suele medir 0.5m

Brazo de atirantado: El brazo es un tubo cuadrado de aluminio, de 40x20mm con espesor de 2.5mm y un peso lineal de 0.75kg/m. El brazo estándar de 1150mm pesa 0.86kg mientras que el empleado en las agujas, de 2m, pesa 1.5kg.

Aisladores: Hay dos aisladores en las ménsulas. El aislador del tubo del tirante trabaja a tracción pura por lo que se fabrica de composite, que es más ligero, 2.35kg. El aislador del tubo de ménsula trabaja a compresión y flexión, es de porcelana y tiene un peso notablemente superior al de composite, 12.8kg.

Fundición de Aluminio y tornillería: Existen un gran número de piezas que permite la unión entre tubos, el giro de los tacones de ménsulas, el agarre de los conductores, etc. Por lo general, se estima un peso de 5kg para todos estos componentes.

Como valor total, se consideran un promedio de **40kg** por ménsula para el cálculo.

Los componentes más importantes se indican a continuación.

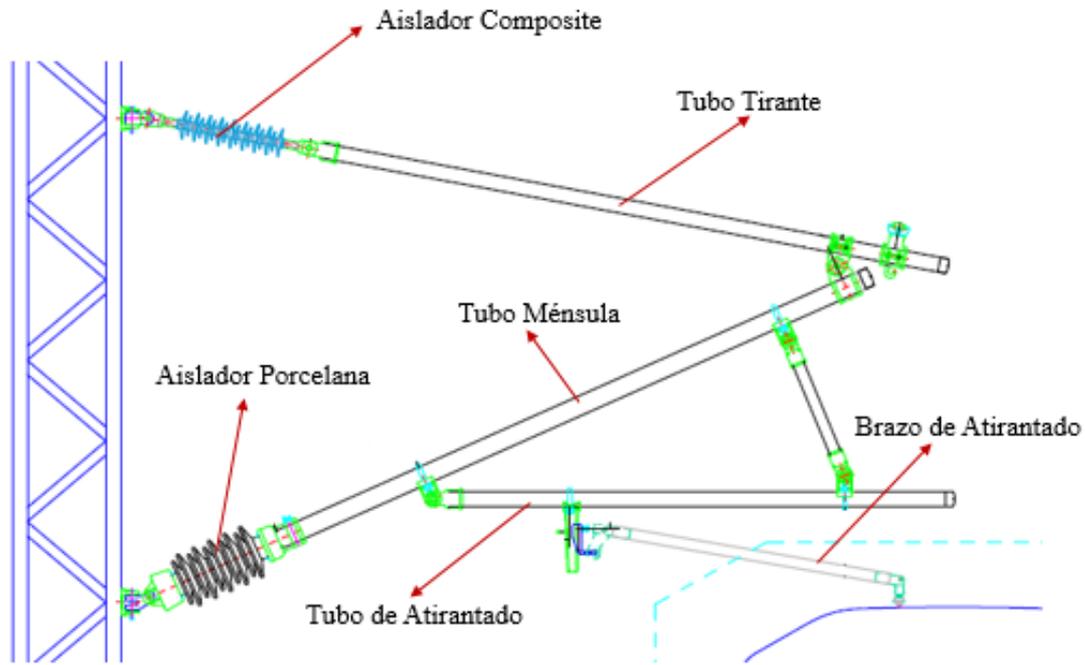


Figura 2-23 Componentes Principales de las Ménsulas

2.2.3.6 Cimentaciones

Debido a las características de la plataforma ferroviaria en AVE se pueden emplear maquinas pilotadoras cilíndricas que taladran con la profundidad y diámetro necesario. Este procedimiento es mucho más rápido y sencillo que excavar cimentaciones prismáticas mediante excavadoras. Por este motivo las cimentaciones en las líneas de alta velocidad son de tipo cilíndricas.

Una vez realizada la excavación se coloca la pica de tierra y una armadura compuesta por 4 pernos. Pasados 3 días tras el vertido del hormigón de alta densidad, se coloca el poste sobre estos pernos y se nivela por medio de unas tuercas. Una vez aplomado se realiza un recrecido en la cimentación llegando hasta la base del poste.

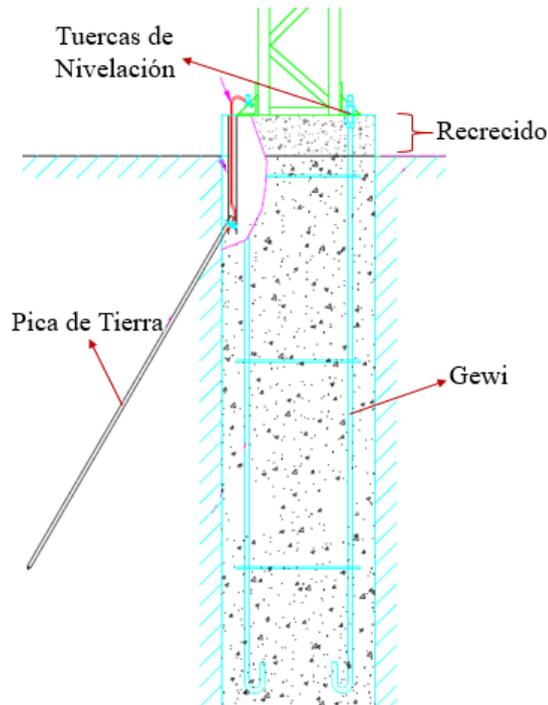


Figura 2-24 Cimentación Cilíndrica Tipo

Otro factor importante a la hora de analizar los macizos es la pendiente del terreno en la que se encuentra. Existen macizos en desmante o terraplén.

El caso más común, sobre todo en los proyectos de nueva plataforma como los de alta velocidad, es el de cimentación en desmante. En estos casos el terreno en la zona de la cimentación presenta una pendiente leve (suficiente para facilitar el drenaje) por lo que el macizo se encuentra enterrado de manera uniforme.

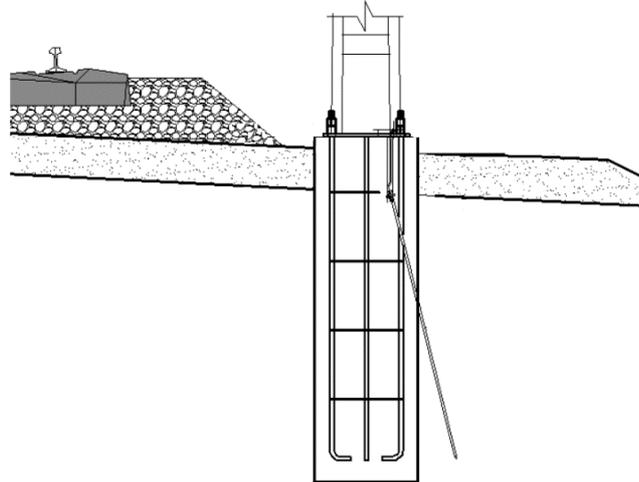


Figura 2-25 Cimentación Cilíndrica en Desmante

En los casos de terraplén, una pendiente muy pronunciada implica que parte del lado exterior del macizo no trabaja, por lo que se requieren macizos mayores ya que se ve reducida su capacidad resistente al vuelco.

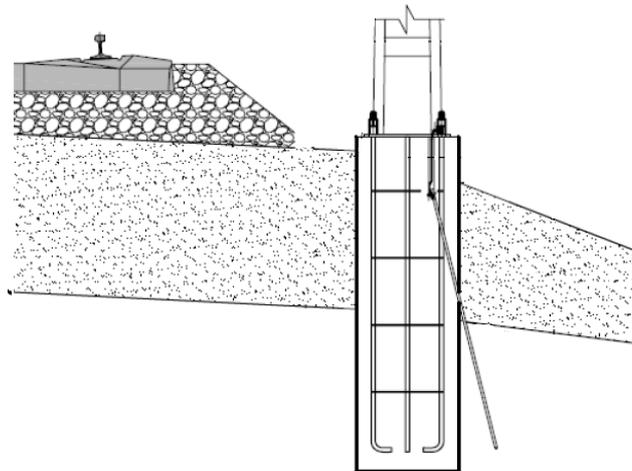


Figura 2-26 Cimentación Cilíndrica en Terraplén

Las cimentaciones para este pódico serán de tipo desmante y se calcularán en función del momento producido en la base de los postes, comprobando que la resistencia al vuelco es suficiente. Por lo general, las dimensiones de las cimentaciones de los postes estándar se asignan mediante tablas, pero este caso requiere un análisis personalizado de la situación. Este cálculo se llevará a cabo en el apartado 6 de este proyecto.

2.2.3.7 Conductores:

Los conductores que soportará el pódico son los siguientes:

Hilo de contacto. Cable Cobre-Magnesio Cu-Mg 0,5 BC-150 mm². de acuerdo a norma UNE-EN 50149

- Sección transversal: 150 mm²
- Carga de rotura mínima: 75 kN
- Tense: 31,5 kN

- Masa: 1,335 kg/m
- Resistencia máxima a 20 °C: 0,185 Ω/km

Sustentador. Cable de Cobre de 95 mm² de acuerdo a la norma C-95 UNE 207015

- Sección transversal: 95 mm²
- Diámetro: 12,95 mm
- Material: Cobre electrolítico
- Carga de rotura mínima: 38,82 KN
- Tensión de trabajo: 15,45 KN
- Peso por metro: 0,864 Kg/m
- Corriente permanente a 80°C: 385 A

Cable de retorno. Aluminio–Acero LA 110 mm² 94AL1/22ST1A de acuerdo a EN 50182 UNEEN 50182

- Sección transversal: 116,2 mm²
- Fuerza de rotura mínima: 43,17 kN
- Masa: 0,43 kg/m
- Fuerza tensora: 381 kg a 20°C

Feeder negativo. Cable Aluminio-Acero LA 280 (242AL1/39ST1A) de acuerdo a la norma EN 50182

- Sección transversal: 281,1 mm²
- Fuerza de rotura mínima: 84,89 kN
- Masa: 0,976 kg/m
- Fuerza tensora: 381 kg a 20°C

Péndolas: Cable de bronce II de 16 mm² de acuerdo a la norma DIN 48201

3 MODELIZADO Y CARGAS

El siguiente paso consiste en representar la geometría del pórtico en Ansys mediante un modelizado de todos los elementos. Este proceso involucra un gran número de keypoints y líneas. En este apartado se muestra el procedimiento seguido.

3.1 Modelizado del pórtico

3.1.1 Asignación de nodos y elementos

A la hora de generar los keypoints y las líneas, se toma como origen de coordenadas el punto central del dintel para poder emplear la simetría y simplificar el procedimiento. De esta forma, los nodos de la esquina superior de la cara frontal del dintel tendrán coordenadas (+X, +Z), la esquina inferior será (+X, -Z), y las homólogas de la cara posterior serán (-X, +Z) y (-X, -Z) respectivamente. En cuanto a la coordenada Y, varía según el segmento (un segmento mide 75cm, excepto en el último, que mide 1m), desde -13m en el extremo izquierdo hasta +13m en el extremo derecho.

A continuación, se muestra el patrón seguido para la asignación de los keypoints y líneas de la estructura principal, con la numeración empleada. En el Anexo 3 se recogen las tablas de coordenadas y la relación entre keypoints para crear las líneas.

3.1.1.1 Parte izquierda de la pieza central de 12 metros.

Nodos

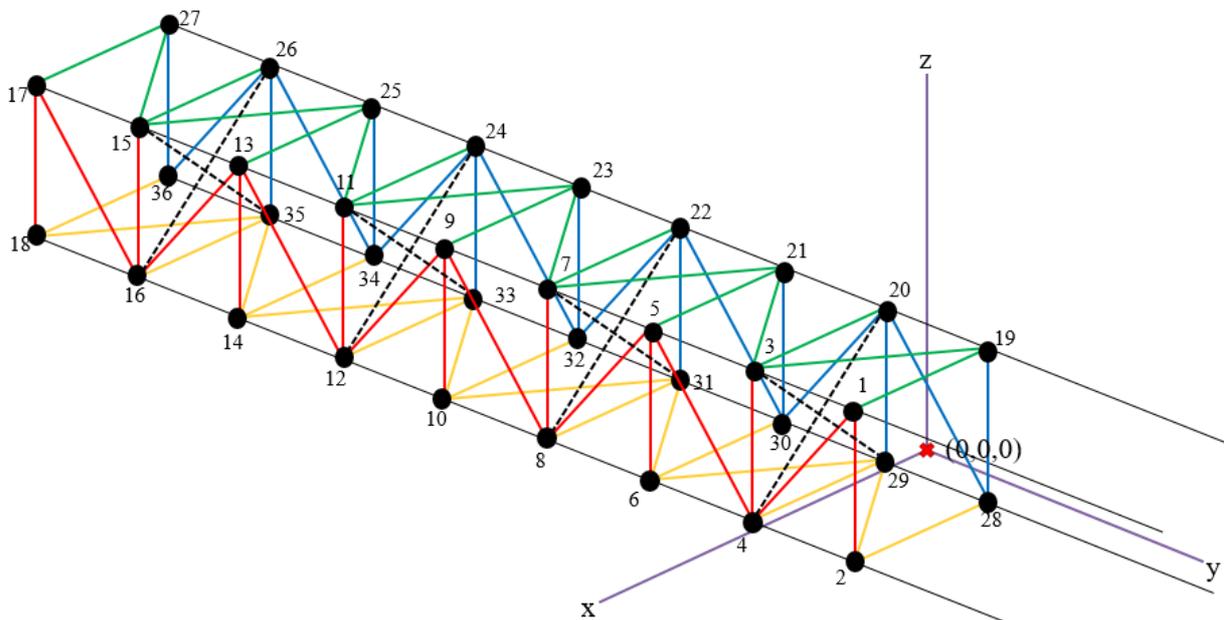


Figura 3-1 Esquema de la Mitad Izquierda de la Pieza Central (Pieza 1)

Elementos

A la cara frontal (en rojo) se le asignan las barras antitorsión (representadas con líneas discontinuas negras), por simplificación del procedimiento. Estos conectan keypoints de esquinas opuestas en diagonal y se colocan cada dos segmentos. Las flechas indican los segmentos en los que se ubican estas barras antitorsión.

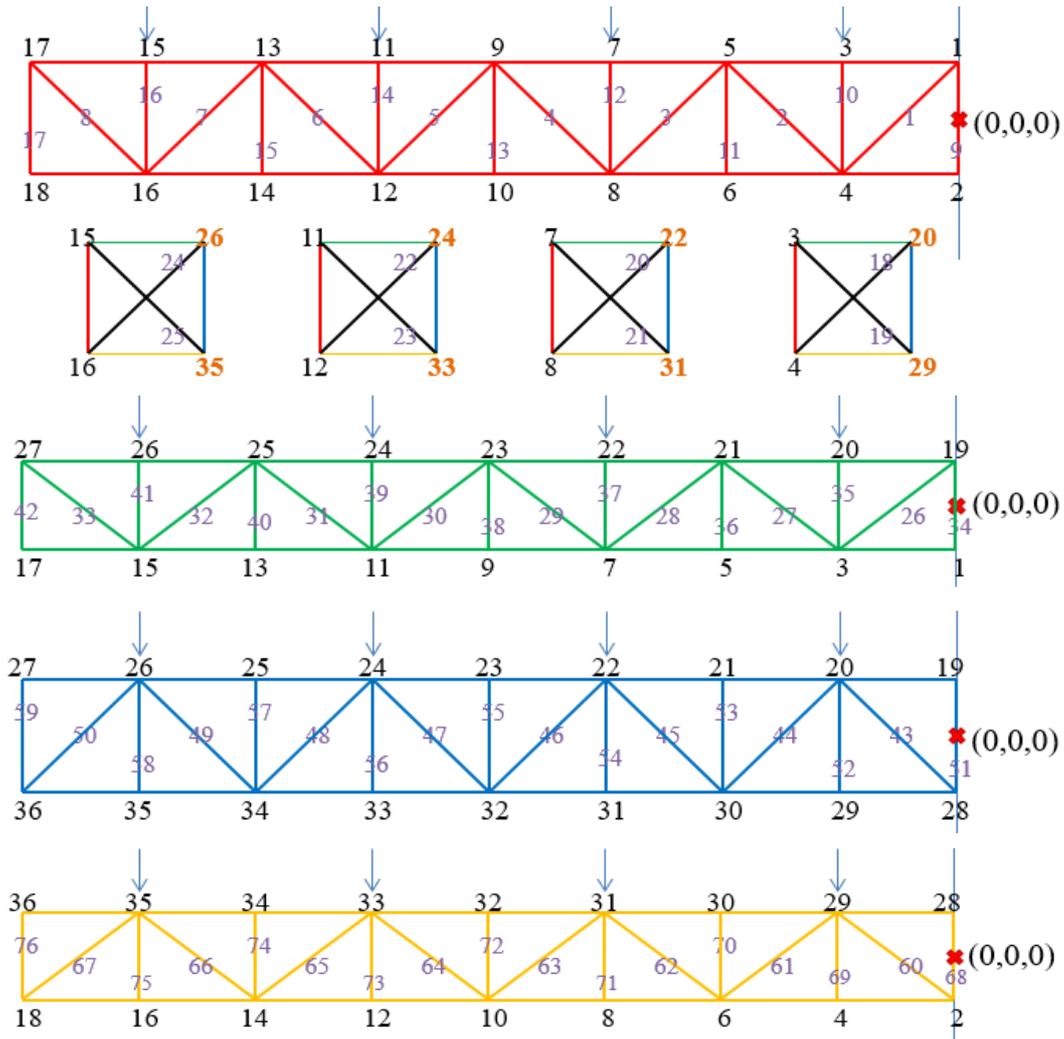


Figura 3-2 Cara 1-2-3-4, de la Pieza 1

3.1.1.1 3.1.1.2- Parte derecha de la pieza central de 12 metros.

Nodos

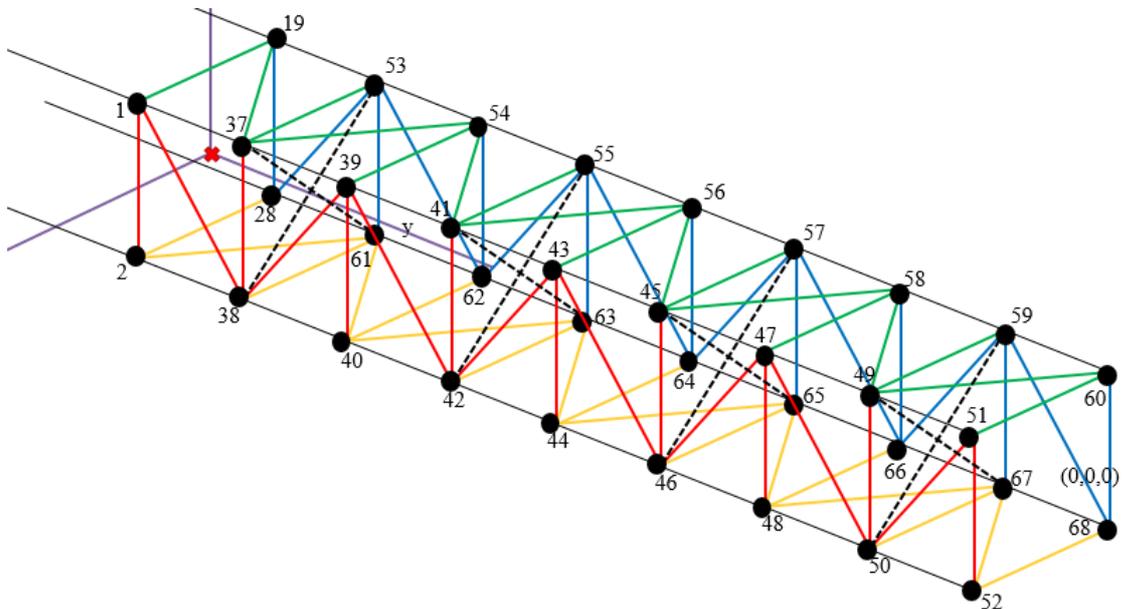


Figura 3-3 Esquema de la Mitad Derecha de la Pieza Central (Pieza 2)

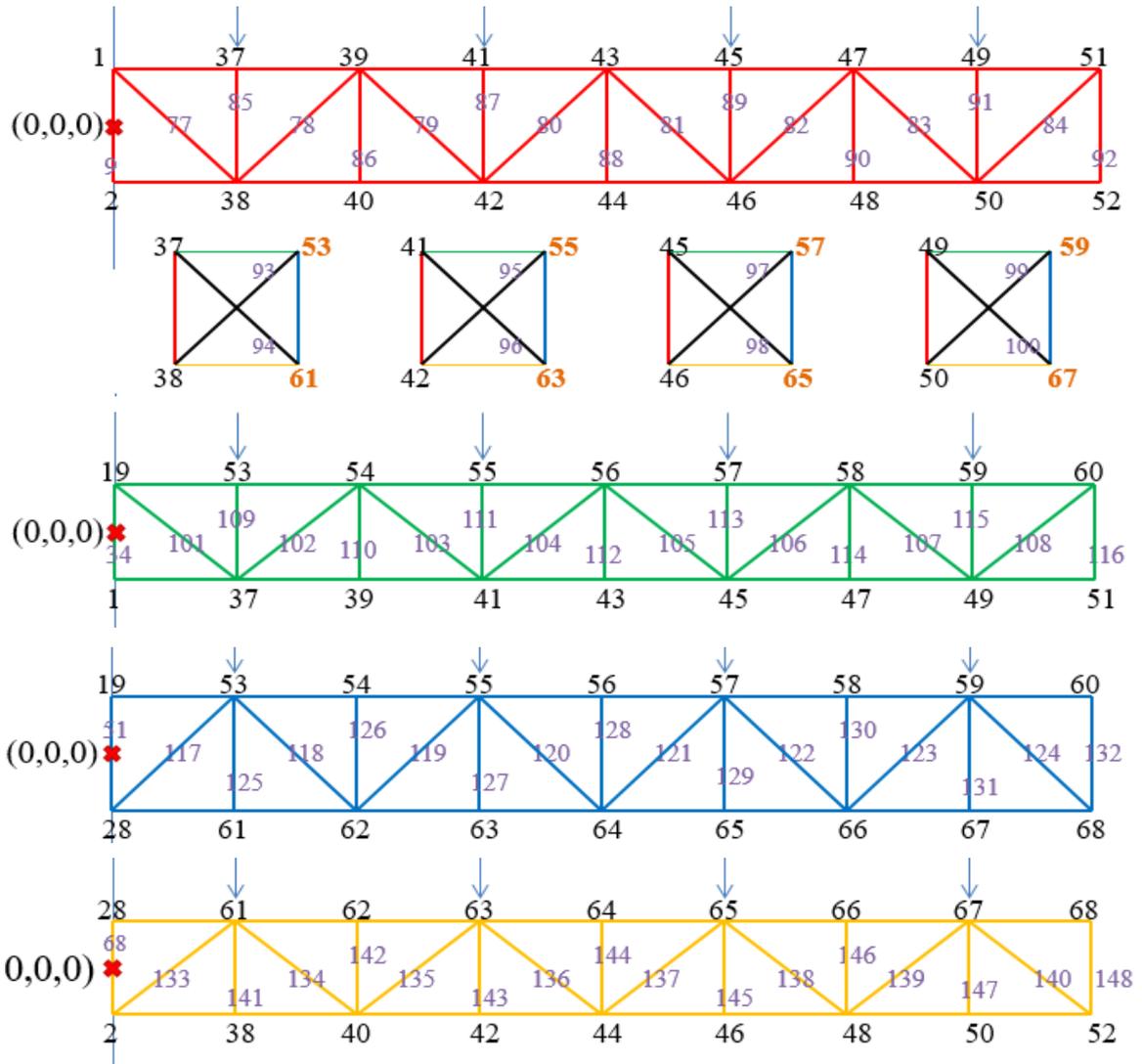


Figura 3-4 Cara 1-2-3-4, de la Pieza 2

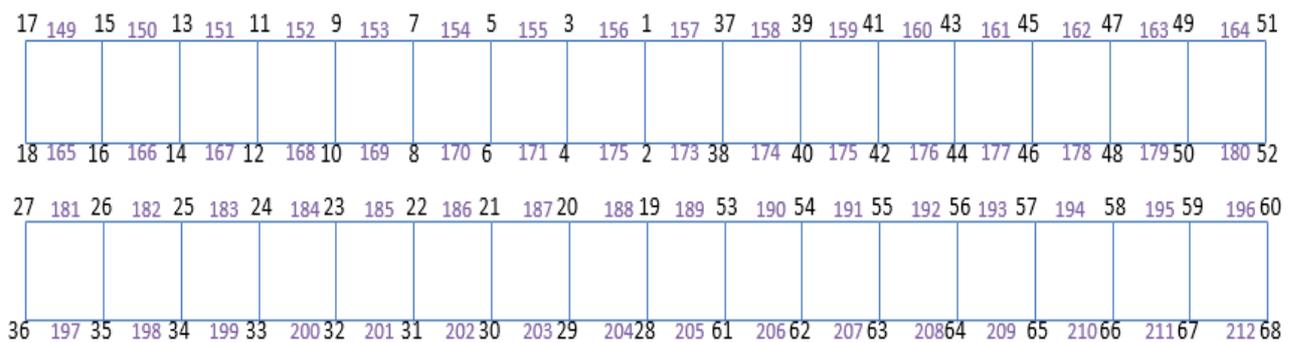


Figura 3-5 Montantes Frontales y Traseros, Pieza 2

3.1.1.3 Pieza izquierda de 7 metros.

Nodos

Cabe destacar que el segmento final del dintel es más largo, 1 metro frente a los 0.75m del resto, y no dispone de presillas diagonales. En este segmento se ubicará el poste, por lo que se crean una serie de keypoints (85-86-87-88-99-100-110-111) para la posterior unión rígida entre los cordones del dintel y los del poste.

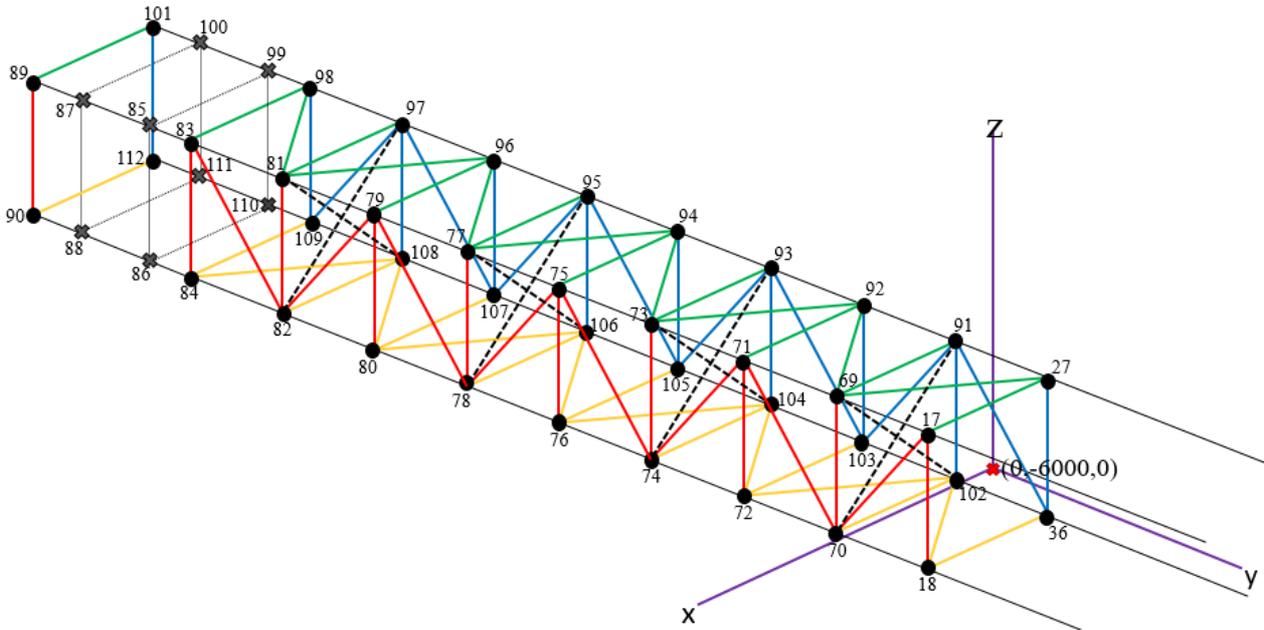


Figura 3-6 Esquema de la pieza Extrema Izquierda (Pieza 3)

Elementos

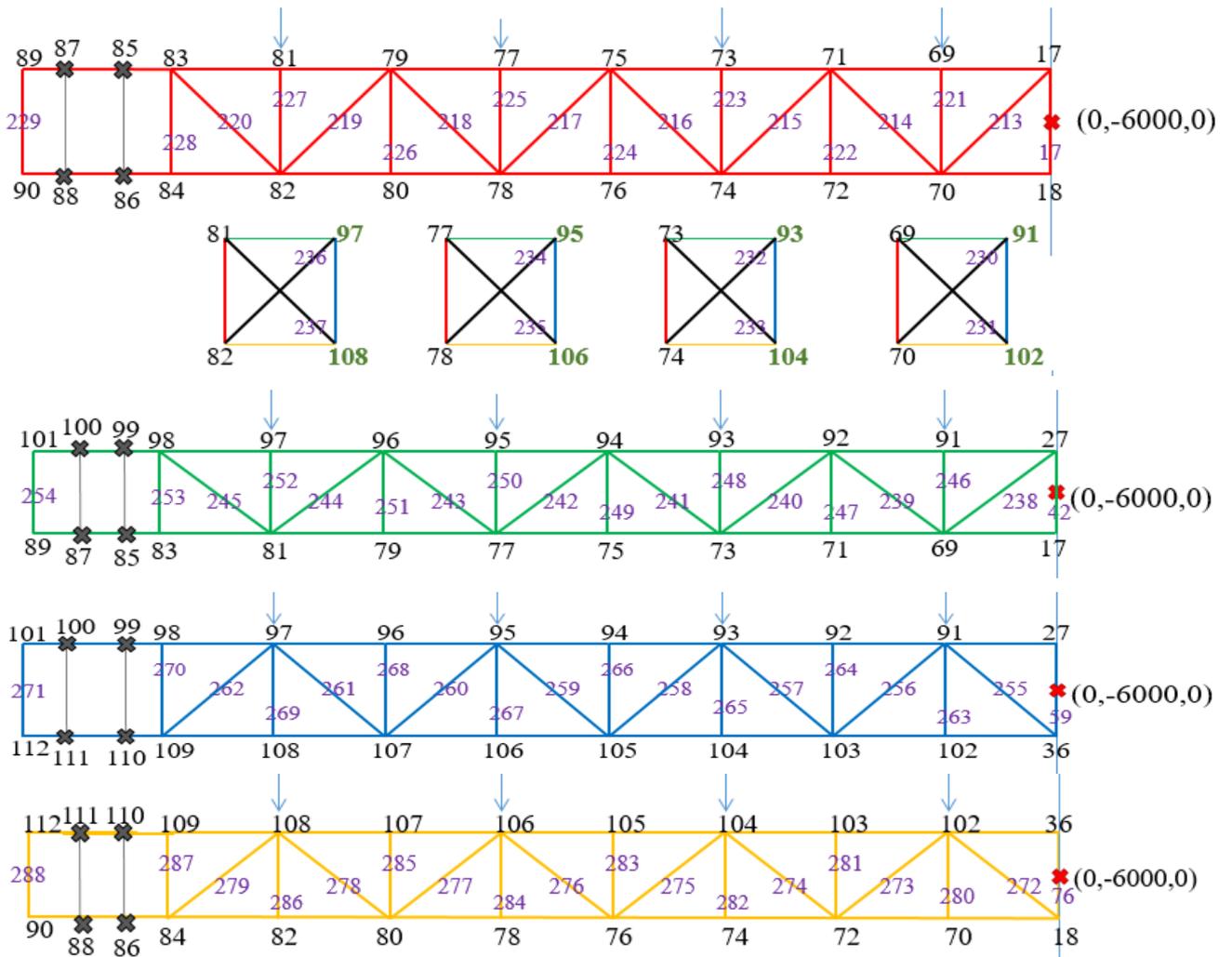


Figura 3-7 Cara 1-2-3-4, de la Pieza 3

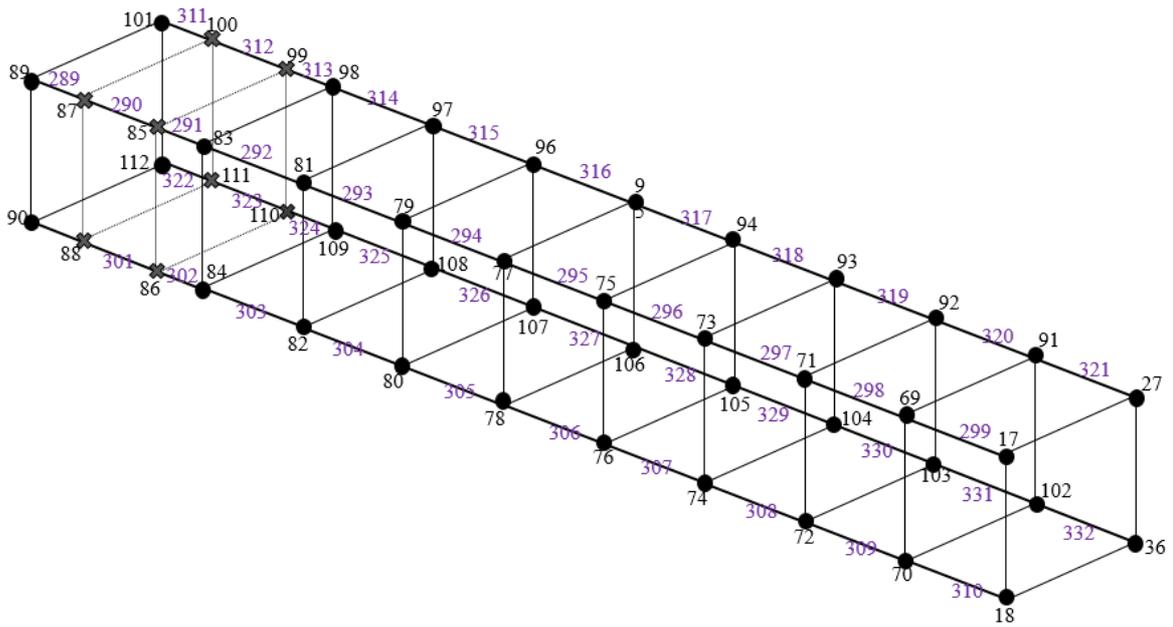


Figura 3-8 Montantes, Pieza 3

3.1.1.4 Pieza derecha de 7 metros.

Nodos

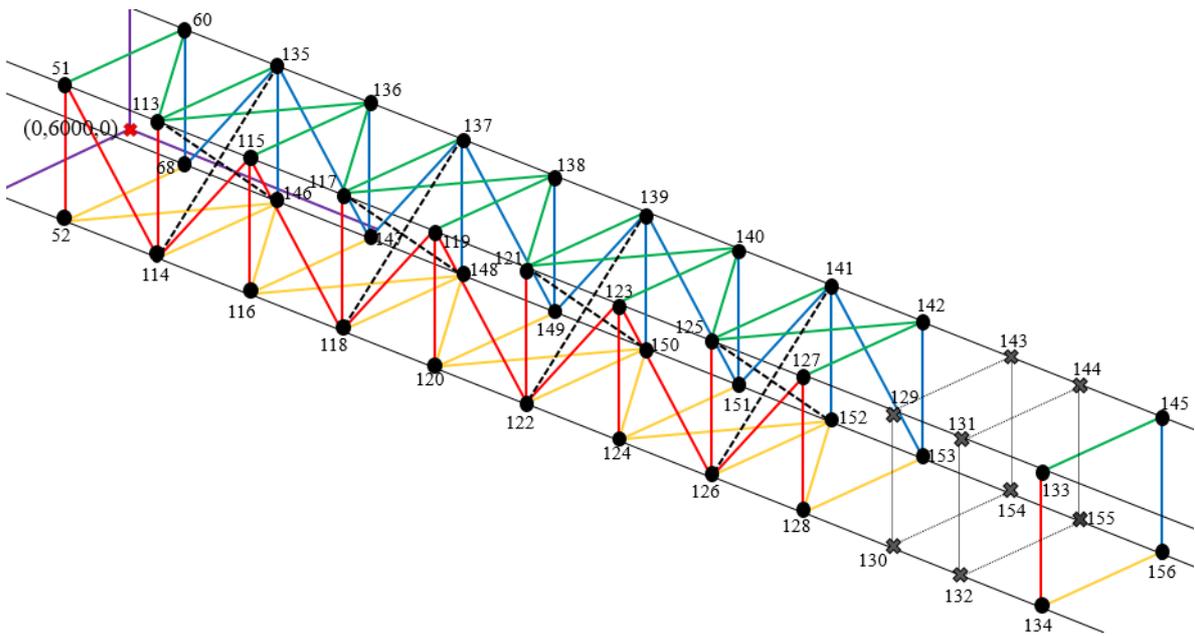
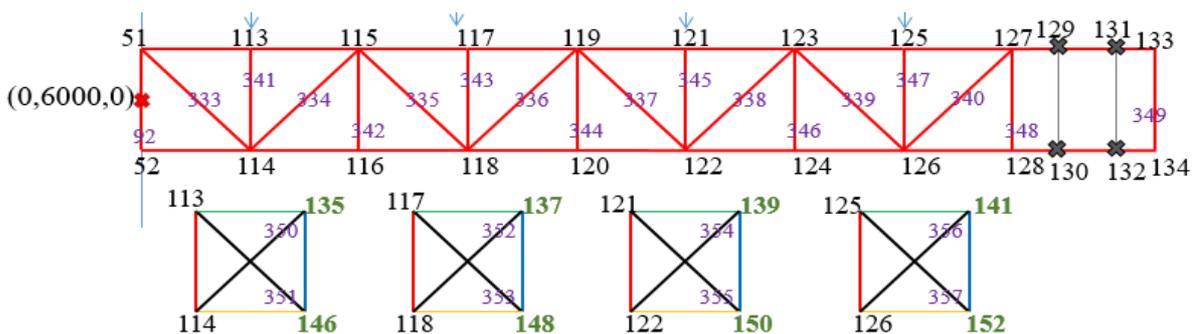


Figura 3-9 Esquema de la pieza Extrema Derecha (Pieza 4)

Elementos



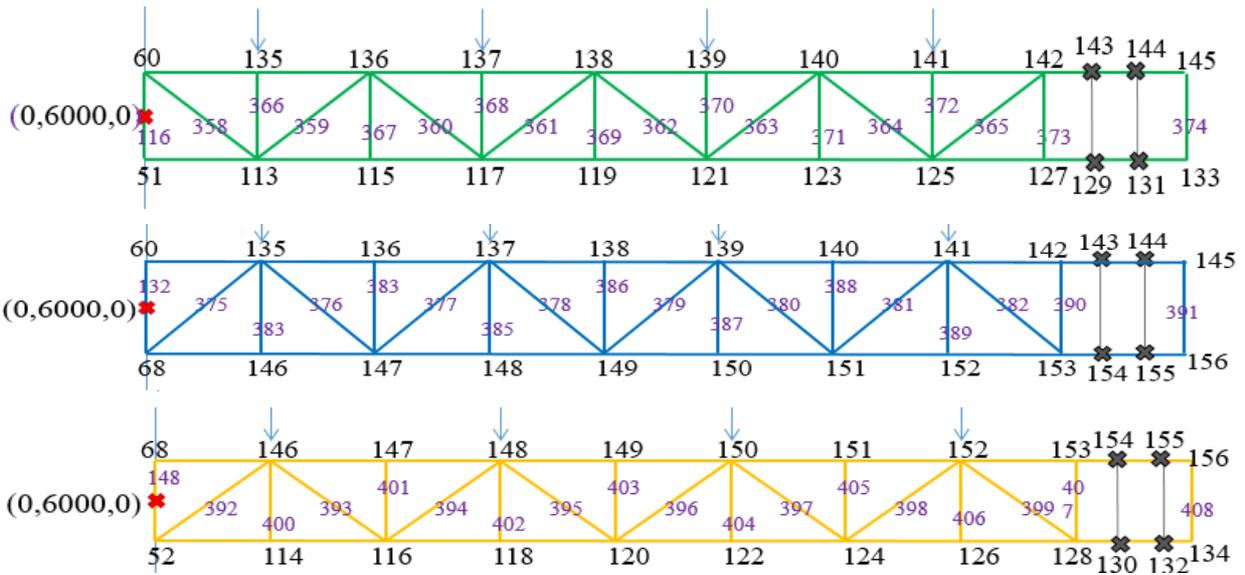


Figura 3-10 Cara 1-2-3-4, de la Pieza 4

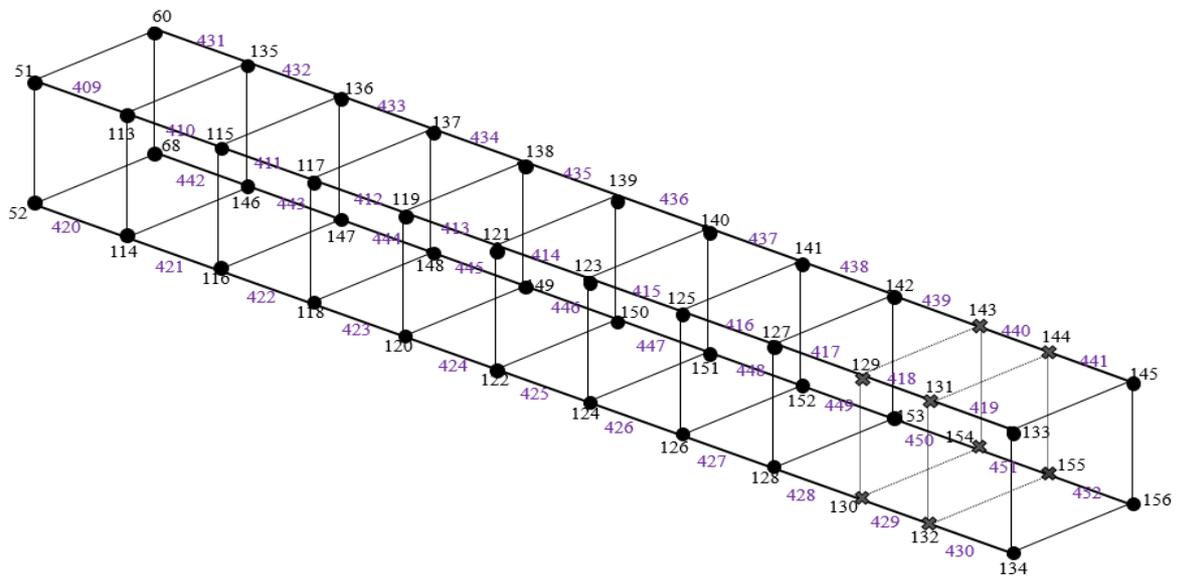


Figura 3-11 Montantes, Pieza 4

3.1.1.5 Poste izquierdo.

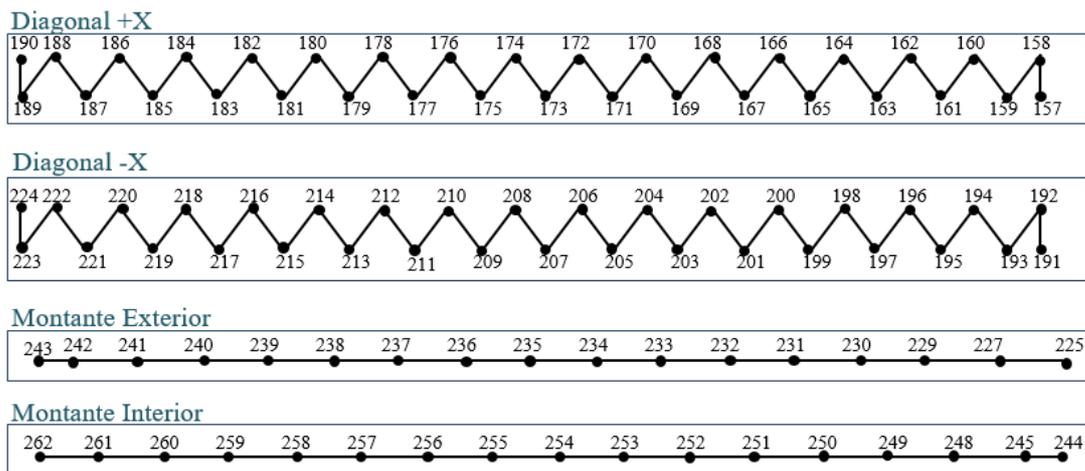
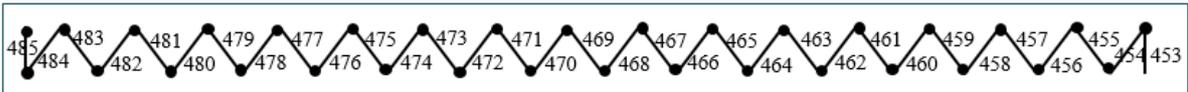


Figura 3-12 Nodos de Poste Izquierdo (Pieza 5)

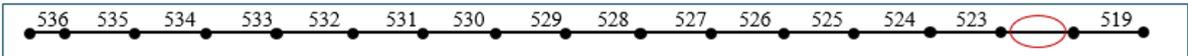
Diagonal +X



Diagonal -X



Montante Exterior



Montante Interior

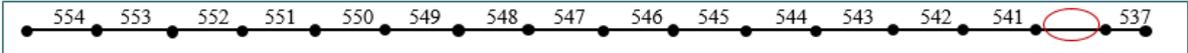


Figura 3-13 Elementos de Poste Izquierdo (Pieza 5)

Para unir los postes rígidamente con el dintel, se añaden nuevos keypoints (226-228-246-248) para la unión rígida con el último segmento del dintel. Se muestra el detalle de la zona de unión.

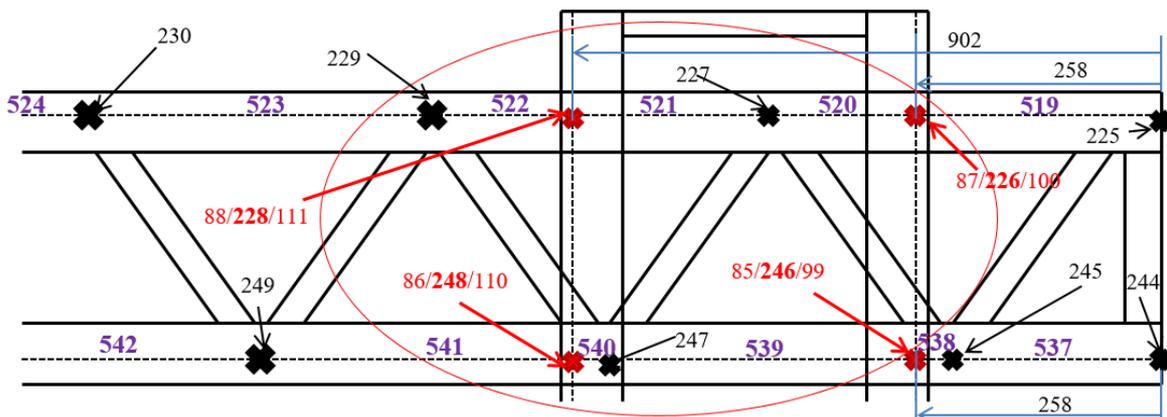
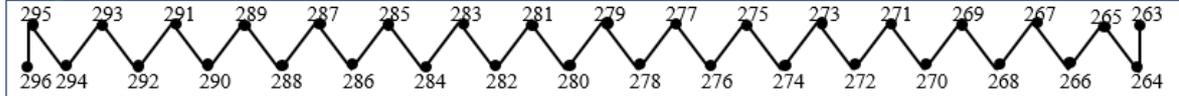


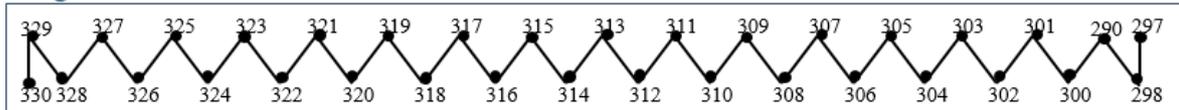
Figura 3-14 Detalle Unión Poste-Dintel, Lado Izquierdo

3.1.1.6 Poste Derecho.

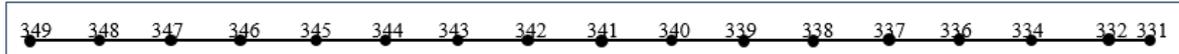
Diagonal +X



Diagonal -X



Montante Exterior



Montante Interior

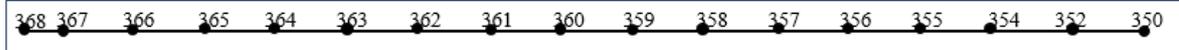
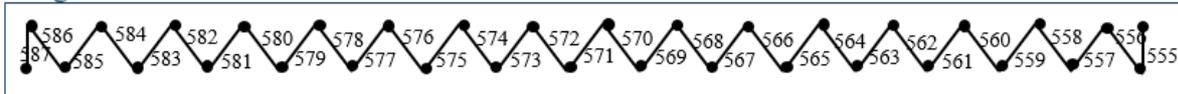


Figura 3-15 Nodos de Poste Derecho (Pieza 6)

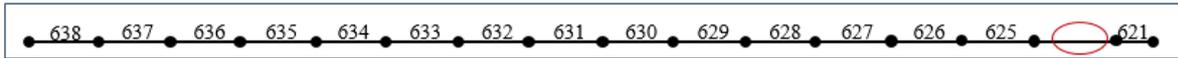
Diagonal +X



Diagonal -X



Montante Exterior



Montante Interior

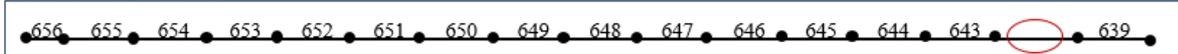


Figura 3-16 Elementos de Poste Derecho (Pieza 6)

Detalle de la unión entre cordones. Los nuevos keypoints son 333-335-351-352.

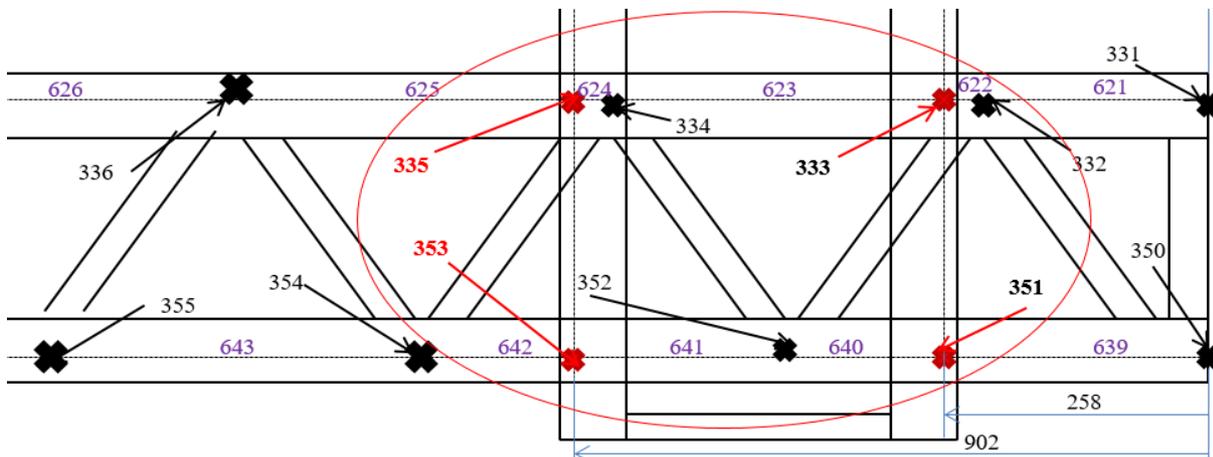


Figura 3-17 Detalle Unión Poste-Dintel, Lado Derecho

3.1.2 Material y Secciones

El material empleado para todos los elementos modelizados del pórtico es acero AE-275B de acuerdo a la UNE-EN 10.025-94 con acabado galvanizado en caliente y pintado con el RAL de Adif.

- ✓ Módulo elástico $210 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$
- ✓ Coeficiente de Poisson 0,3
- ✓ Densidad 7850 Kg/m^3

Este material se aplica a todas las secciones.

1-Cordones de postes. Perfil UPN-260

$$w1_1=90e-3 \quad t1_1=14e-3$$

$$w1_2=90e-3 \quad t1_2=14e-3$$

$$w1_3=260e-3 \quad t1_3=10e-3$$

2-Diagonales de los postes. Pletina ch-50x20

$$w2_1=20e-3 \quad w2_2=50e-3$$

3- Cordones del dintel. LPN 100x8

$$w3_1=100e-3 \quad t3_1=8e-3$$

$$w3_2=100e-3 \quad t3_2=8e-3$$

4- Barras antitorsión, presillas verticales y diagonales del dintel. LPN 45x5

$$w4_1=45e-3 \quad t4_1=5e-3$$

$$w4_2=45e-3 \quad t4_2=5e-3$$

6- Tubo de las Silletas de ménsulas y feeder. Cuadrado 80x4

$$w6_1=80e-3 \quad t6_2=4e-3$$

$$w6_2=80e-3 \quad t6_3=4e-3$$

$$t6_1=4e-3 \quad t6_4=4e-3$$

7- Tubo de los jabalcones. Cilíndrico 54x2,6

$$W7_1=51,4e-3 \quad W7_2=54e-3$$

8- Soporte de giro para dos ménsulas. Tubo cuadrado 100x6.

$$w8_1=100e-3 \quad t8_2=6e-3$$

$$w8_2=100e-3 \quad t8_3=6e-3$$

$$t8_1=6e-3 \quad t8_4=6e-3$$

Nota: Mencionar que no existe sección 5, ya que originalmente se asignó a un elemento que finalmente no se incluye en el pórtico, pero se mantuvo la nomenclatura (pasando de la sección 4 a la 6) para evitar problemas con el código txt. empleado en Ansys.

3.1.3 Tipos de elementos

Todas estas secciones se modelizarán con elementos BEAM a excepción de la 2 y 4 que son elementos LINK.

3.1.4 Orientación de barras

Algunas de las piezas presentan secciones que no son perfectamente simétricas de modo que es necesario orientarlas. Esto ocurre con los cordones de los postes, (que han de colocarse enfrentados), con las diagonales de los postes y con los cordones del dintel. El resto de piezas del dintel, a pesar de presentar un perfil LPN, no se analiza su orientación ya que a efectos de cálculo no presenta variación.

3.1.5 Mallado

Una vez definidos todas las líneas se discretizan por sets, facilitando así el proceso ya que las líneas se han ido creando por tipos. En este punto se les asigna material y sección, así como la orientación de los elementos que lo requieran, mediante keypoints auxiliares.

Los elementos link se discretizan con un solo elemento por barra, mientras que para los beam se emplean dos elementos. De este modo los keypoints y las líneas pasan a ser nodos y elementos respectivamente, sobre los que aplicar cargas y obtener resultados.

3.1.6 CERIG

Como se ha explicado anteriormente, existen varias circunstancias en las que se han de establecer uniones rígidas con el objetivo de simular el efecto de un contratación. Esto ocurre entre dintel y postes, y entre dintel y silletas.

Se realiza mediante el comando CERIG, que se aplica sobre nodos, por ello hay que realizar esta operación una vez mallada y discretizada la estructura.

3.1.7 Condiciones de contorno

Los postes van empotrados en las cimentaciones, siendo estos sus únicas restricciones externas. Esto afecta a los últimos nodos de los cordones de los postes e impide tanto giros como desplazamientos.

DK, 243, ALL, 0

DK, 262, ALL, 0

DK, 349, ALL, 0

DK, 368, ALL, 0

3.2 Cargas sobre la Estructura

Una vez definida la configuración del pórtico y su modelizado, se concretan las cargas que actúan sobre la estructura.

3.2.1 Cargas permanentes

3.2.1.1 Peso propio de la estructura

Esta carga depende de la geometría de la estructura y de los componentes utilizados, en función de la densidad de los mismos.

-Se aplica sobre todos los elementos como efecto de la gravedad.

3.2.1.2 Tense de los conductores

Se ha mencionado anteriormente el concepto de esfuerzo radial que sufren las ménsulas a causa del descentramiento, ya que el hecho de desviar un cable tensado repercute una acción en función del valor del desplazamiento. Por lo tanto, habrá una carga permanente horizontal.

-Esta carga será parte de las reacciones permanentes que se produce en los dos tacones de las ménsulas, y se aplican en:

Ménsula 1: Sobre los nodos 731 y 743

Ménsula 2: Sobre los nodos 1208 y 1210

Ménsula 3: Sobre los nodos 1209 y 1211

Ménsula 4: Sobre los nodos 1212 y 1214

Ménsula 5: Sobre los nodos 1213 y 1215

Ménsula 6: Sobre los nodos 1014 y 1015

Ménsula 7: Sobre los nodos 1218 y 1222

Ménsula 8: Sobre los nodos 1217 y 1221

3.2.1.3 Peso propio de los conductores

El peso de los 20 conductores (8 sustentadores, 8 hilos de contacto, 2 feeders negativos y 2 cables de retorno) repercute sobre el pórtico, ya que este soporta la mitad del vano anterior y posterior. El peso total dependerá del peso lineal de cada conductor y de las semilongitudes a cada lado del pórtico.

-Esta carga también será parte de las reacciones permanentes de la ménsula, actuando en los mismos puntos que el tense de los conductores:

Ménsula 1: Sobre los nodos 731 y 743

Ménsula 2: Sobre los nodos 1208 y 1210

Ménsula 3: Sobre los nodos 1209 y 1211

Ménsula 4: Sobre los nodos 1212 y 1214

Ménsula 5: Sobre los nodos 1213 y 1215

Ménsula 6: Sobre los nodos 1014 y 1015

Ménsula 7: Sobre los nodos 1218 y 1222

Ménsula 8: Sobre los nodos 1217 y 1221

3.2.2 Cargas de Viento

3.2.2.1 Longitudinal

Se entiende viento longitudinal como aquel que incide con la misma dirección que el dintel, es decir, en perpendicular a la vía. Bajo este tipo de viento, el efecto se sufre en uno de los postes (derecho o izquierdo, en función de la dirección del viento) y sobre los conductores. Esta situación hará que en algunas ménsulas se incremente el efecto del atirantado y en otras se reduzca. Son fuerzas por unidad de longitud, por lo tanto el vano anterior y posterior es determinante, así como la sección del conductor.

Existen dos posibilidades, ya que el viento presenta dos posibles direcciones. En principio la diferencia entre uno y otro será reducida, por lo que solo se analizará una dirección. Para determinar cuál de las dos direcciones es más perjudicial, se analiza el número de atirantados que verían su esfuerzo radial incrementado. Observando el esquema del modelo se puede deducir que un viento de derecha a izquierda afectará a más atirantados. Por lo tanto, el viento longitudinal más perjudicial se aplica:

-Como una carga por unidad de longitud sobre el cordón de la cara exterior del poste derecho, afecta desde el nodo 845 al 880.

-Sobre las ménsulas, repercutiendo en los mismos puntos que los efectos de tense.

Ménsula 1: Sobre los nodos 731 y 743

Ménsula 2: Sobre los nodos 1208 y 1210

Ménsula 3: Sobre los nodos 1209 y 1211

Ménsula 4: Sobre los nodos 1212 y 1214

Ménsula 5: Sobre los nodos 1213 y 1215

Ménsula 6: Sobre los nodos 1014 y 1015

Ménsula 7: Sobre los nodos 1218 y 1222

Ménsula 8: Sobre los nodos 1217 y 1221

3.2.2.2 Transversal

Se entiende viento transversal como aquel que incide perpendicular al dintel, es decir, en el sentido de la vía. Este tipo de viento no tiene efecto sobre los conductores, pero sí sobre los postes y el dintel. Este último, al tratarse de una estructura en celosía, requerirá un estudio de su área proyectada.

De igual modo que para el viento longitudinal, se pueden dar dos posibilidades de viento dependiendo del sentido. En condiciones normales ambos casos presentarían un resultado casi idéntico, pero si se tiene en cuenta la aparición de una fuerza accidental (explicada más adelante) a causa de la rotura del cable, se obtiene una situación favorable “viento en contra del sentido de la fuerza derivada de la rotura” y otra desfavorable “viento en el mismo sentido que la fuerza derivada de la rotura”. La opción de viento transversal a analizar será esta segunda opción. Por lo tanto, actuará sobre:

-Los cordones de los postes, en su cara frontal, implicando una carga por unidad de longitud entre los nodos 809 y 844 (poste derecho) y entre los nodos 773 y 808 (izquierdo).

-El dintel en su cara frontal, aplicado sobre los cordones en los nodos 301-376 y 377-452.

3.2.3 Cargas por hielo

La carga de hielo consiste en un aumento del peso de los conductores a causa de la acumulación de agua en estado sólido.

-Un aumento del peso de los conductores supone reacciones en los tacones de ménsulas, aplicadas en los mismos puntos que el peso de los conductores.

Ménsula 1: Sobre los nodos 731 y 743

Ménsula 2: Sobre los nodos 1208 y 1210

Ménsula 3: Sobre los nodos 1209 y 1211

Ménsula 4: Sobre los nodos 1212 y 1214

Ménsula 5: Sobre los nodos 1213 y 1215

Ménsula 6: Sobre los nodos 1014 y 1015

Ménsula 7: Sobre los nodos 1218 y 1222

Ménsula 8: Sobre los nodos 1217 y 1221

3.2.4 Cargas de mantenimiento

Se considera su aplicación en el punto más desfavorable (centro del dintel) y se dimensiona como el peso de un operario y su equipo. Aplica sobre:

-Los nodos superiores del punto central del dintel, el 24 y el 1.

3.2.5 Cargas accidentales

La estructura podría verse sometida a una carga derivada de la rotura de los conductores. Esta acción se considera una carga accidental debido a la reducida probabilidad de que se desencadene, y a que su efecto podría ser devastador para la estructura. En el apartado 4.1.4 se desarrolla la explicación sobre este fenómeno.

Se aplicaría sobre el segundo tacón de ménsula, aunque este suceso no afecta a todas las ménsulas, si no que han de cumplirse una serie de condicionantes. Los nodos sobre los que potencialmente podría actuar son:

Ménsula 2: Sobre los nodos 1208 y 1210

Ménsula 4: Sobre los nodos 1212 y 1214

3.2.6 Sismos

La presencia de sismos y el efecto de los mismos puede analizarse al evaluar el ELU, ya que en el punto 13.2 de la EAE se recoge un tipo de situación dedicada a la actuación de una acción sísmica.

No obstante, como se ha calculado en el Anexo 2, la zona en la que se encuentra la obra presenta una aceleración básica inferior a 0.04g (siendo g la aceleración de la gravedad), por lo que de acuerdo a la NCSE-02, no es necesario tener en cuenta los efectos sísmicos.

3.2.7 Combinaciones

Muchos de los nodos podrían sufrir la acción de varias cargas al mismo tiempo, de modo que el valor de la carga a aplicar será la suma de todas ellas.

Una vez definidas las cargas, y teniendo en cuenta que no todas son permanentes, se establecerán a una serie de hipótesis.

Para implementar esto se recurre a una formulación única en el archivo de texto que recoja todas las combinaciones al mismo tiempo. La diferencia entre una hipótesis y otra se puede supeditar a unos parámetros.

Cada parámetro estará vinculado a un tipo de carga (viento, hielo, permanentes...) y tomarán el valor 0 cuando esa acción no aplique. Cuando la acción esté presente, el valor del parámetro dependerá de los coeficientes parciales y de simultaneidad de cargas en las hipótesis planteadas, atendiendo al tipo de análisis (ELU, ELS) y a la situación (Acciones permanentes y transitorias, Acciones Accidentales...)

Estas combinaciones y sus coeficientes se describen en el capítulo siguiente.

4 ANÁLISIS ESTÁTICO

Con la estructura modelizada, se procede a la realización de los análisis pertinentes. El objetivo de este apartado es definir las pautas y los criterios seguidos para simular distintas situaciones en el pórtico y poder llegar a las conclusiones que marcan los objetivos de este proyecto.

En el análisis estático se implementarán las comprobaciones clásicas de resistencia mecánica del pórtico, en términos de Estado Límite Último y Estado Límite de Servicio. Como resultado de este análisis se podrá concluir la viabilidad de la estructura y los grados de aprovechamiento.

4.1 Dimensionamiento de cargas.

Previamente se había determinado el nodo sobre el que actúa cada carga. En este punto se dimensionan sus valores.

4.1.1 Ménsulas.

Las ménsulas se calculan de forma individual. En primer lugar, se lleva a cabo un cálculo geométrico que determina las longitudes y ángulos de los tubos. Estos resultados se emplean en el cálculo mecánico para obtener los momentos que se producen en la ménsula. Los datos requeridos para el cálculo de ménsulas, tanto geométrico como mecánico, son los siguientes:

Tabla 4-1 Parámetros del Cálculo de Ménsulas

V_a	Longitud del vano anterior, desde el apoyo previo hasta el pórtico
V_p	Longitud del vano posterior, desde el pórtico hasta el apoyo siguiente
d	Descentramiento que presenta la ménsula en cuestión.
d_a	Descentramiento de la ménsula anterior para la misma catenaria
d_p	Descentramiento de la ménsula posterior para la misma catenaria
T_h	El valor del tense del hilo de contacto
T_s	El valor del tense del sustentador
P_h	El peso lineal del hilo de contacto
P_s	El peso lineal del sustentador
PRM	Altura del rail con respecto a la base del poste
A_v	Ancho de vía. Distancia entre railes.
P_e	Peralte de la vía
h_h	Altura del hilo de contacto con respecto a la vía
e_h	Elevación del hilo de contacto en la ménsula
t_l	Altura con respecto a la base del poste del primer tacón de la ménsula
a_c	Distancia entre el hilo y el sustentado en la ménsula
D	Distancia entre los dos tacones de la ménsula
G	Gálibo. Distancia entre poste y raíl
α	Ángulo del tubo del tirante, obtenido tras el cálculo geométrico
P_m	Peso de todos los componentes de la ménsula

Q_{vh}	Fuerza que produce el viento sobre el hilo de contacto
Q_{vs}	Fuerza que produce el viento sobre el sustentador
Q_h	Aumento del peso lineal de los conductores por efecto del hielo

Según la norma EN-50125-2-2002 (Railway applications – Environmental conditions for equipment. Part 2: Fixed electrical installations), el valor de la fuerza del hielo es:

Tabla 4-2 Cargas de Hielo en Conductores

Class	Iceload N/m
I 0 (no ice)	0
I 1 (low)	3,5
I 2 (medium)	7
I 3 (heavy)	15

Se tomará un valor intermedio de 7N/m. Este valor es válido para conductores con un diámetro entre 10mm y 20mm. Esto aplica a todos los conductores presenten en el pórtico. En cuanto al viento sobre conductores, se seguirá la norma EN 50119:2009:

$$Q_{wc} = q_k \cdot G_c \cdot D \cdot C_c \cdot \cos^2 \theta$$

Donde,

Tabla 4-3 Cargas de Viento en Conductores

Parámetros	Símbolo	H.C.	Sust.	Feeder	Retorno	Unid.
Presión dinámica	q_k	74,01	74,01	74,01	74,01	Kg/m ²
Coef. de Respuesta estructural	G_c	0.75	0.75	0.75	0.75	-
Diámetro	D	14.22	12.65	19.8	14	mm
Coef. Resistencia aerodinámica	C_c	1.1	1.2	1	1.2	
Fuerza sobre conductores	Q_{wc}	0.904	0.839	1.21	0.933	Kg/m

4.1.1.1 Cálculo Geométrico:

El objetivo de este cálculo es ubicar de forma precisa el hilo de contacto y el sustentador. Para ello hay que tener en cuenta la geometría de la vía, las distancias al poste, la curva, etc.

Una vez izado el poste se toman las medidas necesarias para el cálculo, en función del cual se fabrican y se montan las ménsulas. El procedimiento de cálculo geométrico se explica a continuación:

1- El dato de partida es la coordenada 0, en la base del poste. En función de este punto se obtiene la posición del primer tacón de ménsula, punto 1 (situado a 6150mm de la base del poste en la coordenada Y), y de este se obtiene la posición del segundo tacón, el punto 2, sumando la distancia entre tacones (1800mm en la coordenada Y).

A continuación se calculan las coordenadas del punto 8, que marca la ubicación del hilo con respecto a la base del poste:

$$X_8 = G + \frac{Av}{2} \cdot \cos \alpha_{pe} + \left(h_h + \frac{d}{2} \right) \cdot \sen \alpha_{pe} - d \cdot \cos \alpha_{pe} \quad (4.1)$$

$$Y_8 = PRM + \frac{P_e}{2} + \left(h_h + \frac{d}{2} \right) \cdot \cos \alpha_{pe} + d \cdot \sen \alpha_{pe} \quad (4.2)$$

En cuanto a la posición del sustentador, punto 3, presenta la misma coordenada X, pero se encuentra por encima una distancia igual a la altura de catenaria.

$$Y_3 = Y_8 + a_c \quad (4.3)$$

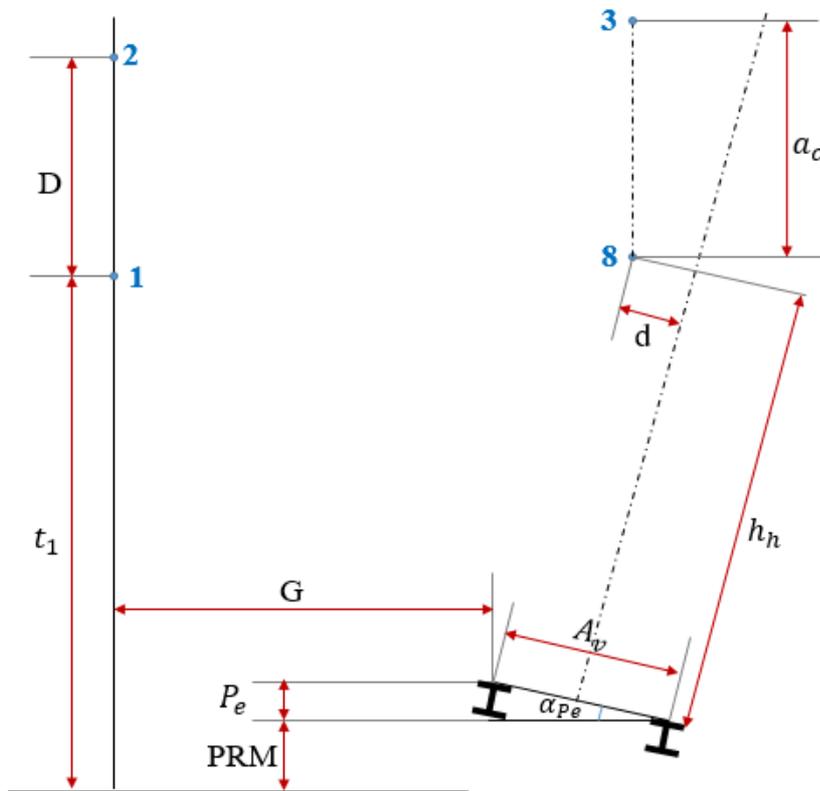


Figura 4-1 Esquema de la Geometría de la vía

Tras este primer paso se conoce la ubicación de los conductores con respecto al poste, condicionado por la geometría de la vía. Ahora se diseña una ménsula que permita colocar los hilos en esa posición, conociendo además las coordenadas de sus apoyos.

2- Este paso se basa en la geometría de las piezas de fundición de aluminio que no se detallarán aquí. A efectos de resumen, se parte de los datos de los puntos 1, 2, 3 y 8 y la ubicación del punto 4 se determina en base a las dimensiones del borne de fijación del sustentador. De un modo similar se procede con 5, 6 y 7. Conociendo estos puntos se obtienen los ángulos del tirante y del cuerpo de ménsula.

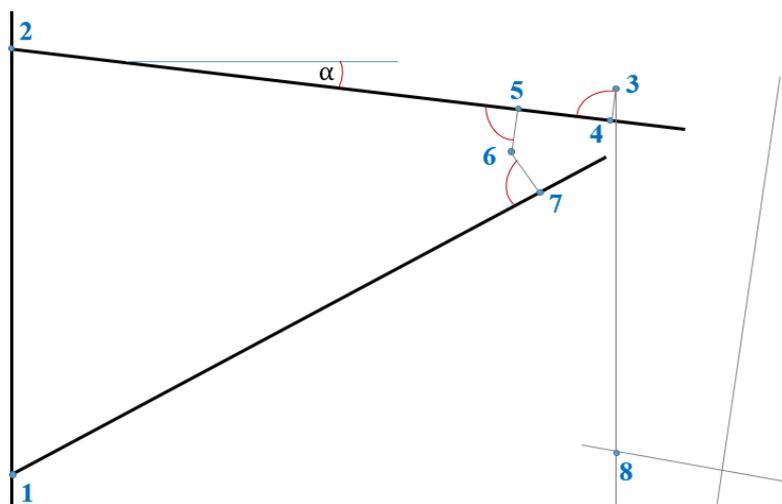


Figura 4-2 Puntos Característicos de las Ménsulas

3-Otros parámetros (como la longitud de tubos, posición de aislador, ángulo del brazo, etc.) se calculan con criterios similares y más complejos, lo que implica un proceso largo no relevante para este análisis.

4.1.1.2 Cálculo Mecánico:

De la geometría de la ménsula podemos extraer las distancias horizontales y verticales de los puntos de aplicación de las fuerzas, con respecto al punto de equilibrio de momentos. Este punto de equilibrio, O, será el primer tacón de la ménsula.

Distancias

La distancia horizontal se requiere para calcular el momento de las cargas verticales. Serán las distancias de O a los hilos (misma distancia para ambos) y al centro de gravedad de la ménsula.

- La distancia horizontal entre los hilos y O se calcula como:

$$dh_{hilos} = G + d \quad (4.4)$$

- Mientras que para el centro de gravedad de la ménsula se toma la mitad de este valor.

$$dh_{ménsula} = \frac{dv_{hilos}}{2} \quad (4.5)$$

En cuanto a la distancia vertical, servirá para calcular el momento de las fuerzas horizontales, es decir, tense y viento. Las dos distancias verticales son la posición del hilo y la del sustentador con respecto al punto O.

- La distancia vertical entre el hilo y O se calcula como:

$$dv_{hilo} = t_1 - PRM - h_h - e_h \quad (4.6)$$

- La distancia vertical entre el sustentador y O se calcula como:

$$dv_{sust} = dv_{hilo} + a_c \quad (4.7)$$

Fuerzas

Como fuerzas verticales presentes en las ménsulas:

- Peso del hilo:

$$FP_h = \left(\frac{V_a + V_p}{2} \right) \cdot P_h \quad (4.8)$$

- Peso del sustentador:

$$FP_s = \left(\frac{V_a + V_p}{2} \right) \cdot P_s \quad (4.9)$$

- Peso de la ménsula, se consideran un promedio:

$$FP_m = 400N \quad (4.10)$$

- Incremento de peso por hielo sobre el hilo:

$$FH_h = \left(\frac{V_a + V_p}{2} \right) \cdot Q_h \quad (4.11)$$

- Incremento de peso por hielo sobre el sustentador:

$$FH_s = \left(\frac{V_a + V_p}{2} \right) \cdot Q_s \quad (4.12)$$

Como fuerzas horizontales presentes en las ménsulas:

- El tense repercutido sobre la ménsula por efecto del descentramiento del hilo:

$$FT_h = T_h \cdot \left(\frac{d - d_a}{V_a} + \frac{d - d_p}{V_p} \right) \quad (4.13)$$

- El tense repercutido sobre la ménsula por efecto del descentramiento del sustentador:

$$FT_s = T_s \cdot \left(\frac{d - d_a}{V_a} + \frac{d - d_p}{V_p} \right) \quad (4.14)$$

- El efecto del viento sobre el hilo de contacto:

$$FV_h = Q_{vh} \cdot \left(\frac{V_a - V_p}{2} \right) \quad (4.15)$$

- El efecto del viento sobre el sustentador:

$$FV_s = Q_{vs} \cdot \left(\frac{V_a - V_p}{2} \right) \quad (4.16)$$

Momentos

El siguiente paso es dimensionar los momentos producidos por todas estas fuerzas en función de su distancia con respecto al punto O.

- Momento por peso de hilo:

$$MP_h = FP_h \cdot dh_{hilos} \quad (4.17)$$

- Momento por peso de sustentador:

$$MP_s = FP_s \cdot dh_{hilos} \quad (4.18)$$

- Momento por peso de la ménsula:

$$MP_m = FP_m \cdot dh_{ménsula} \quad (4.19)$$

- Momento del hielo sobre el hilo:

$$MH_h = FH_h \cdot dv_{hilo} \quad (4.20)$$

- Momento del hielo sobre el sustentador:

$$MH_s = FH_s \cdot dv_{sust} \quad (4.21)$$

- Momento repercutido sobre la ménsula por efecto del descentramiento del hilo:

$$MT_h = FT_h \cdot dv_{hilo} \quad (4.22)$$

- Momento repercutido sobre la ménsula por efecto del descentramiento del sustentador:

$$MT_h = FT_h \cdot dv_{hilo} \quad (4.23)$$

- Momento por el viento sobre el hilo de contacto:

$$MV_h = FV_h \cdot dv_{hilo} \quad (4.24)$$

- Momento por el viento sobre el sustentador:

$$MV_s = FV_s \cdot dv_{sust} \quad (4.25)$$

Reacciones

De este cálculo se pueden extraer los valores de las distintas situaciones de cargas. Existe por un lado el efecto de las cargas permanentes, por otro el efecto del viento, y por último el efecto del hielo. Se calcularán las distintas situaciones por separado, ya que para poder analizar las hipótesis de cargas en el cálculo posterior es necesario conocer los incrementos en las reacciones que producen el viento y el hielo con respecto a las reacciones normales en las condiciones en las que solo actúan cargas permanentes.

De esta forma, en un nodo sobre el que puedan actuar las cargas permanentes, hielo y viento, se programará la aplicación de una carga equivalente a la suma de todas esas fuerzas, donde el hielo y el viento son el incremento (positivo o negativo) que se produce en esa reacción con respecto a la carga permanente. Se muestra un ejemplo para el nodo 731.

$$F, 731, FY, \text{Permanente}*(F1) + \text{Hielo}*(F2) + \text{Viento}*(F3)$$

Si solo existe carga permanente, los coeficientes “Hielo” y “Viento” serán 0, mientras que bajo la hipótesis de hielo, se tendrá un valor equivalente a la suma de las “Permanentes” más el incremento que suponga el hielo.

Hacerlo de esta forma permite tener presentes las cargas permanentes en todo momento.

Siguiendo este razonamiento, primero se obtendrán las reacciones para las acciones permanentes

- Reacción horizontal en el tirante.

$$RTH_P = \frac{MP_h + MP_s + MP_m + MT_h + MT_s}{D} \quad (4.26)$$

- Reacción horizontal en el cuerpo de ménsula:

$$RMH_P = FT_h + FT_h - RTH_P \quad (4.27)$$

- Reacción vertical del tirante

Considerando el tacón del tirante como una unión articulada, se puede emplear la siguiente relación:

$$RTV_P = RTH_P \cdot \tan(\alpha) \quad (4.28)$$

- Reacción vertical en el cuerpo de la ménsula:

$$RMV_P = FP_h + FP_s + FP_m - RTV_P \quad (4.29)$$

Al calcular las reacciones a causa del hielo se omite las acciones permanentes y el viento

- Incremento de la reacción horizontal en el tirante.

$$RTH_H = \frac{MH_h + MH_s}{D} \quad (4.30)$$

- Incremento de la reacción horizontal en el cuerpo de la ménsula

Al analizar la fuerza del hielo, no habrá acciones horizontales actuando, de modo que:

$$RMH_H = 0 - RTH_H = -RTH_H \quad (4.31)$$

- Incremento de la reacción vertical del tirante

$$RTV_H = RTH_H \cdot \tan(\alpha) \quad (4.32)$$

- Incremento de la reacción vertical en el cuerpo de la ménsula

$$RMV_H = FH_h + FH_s - RTV_H \quad (4.33)$$

Por último, se calculan las reacciones a causa del viento omitiendo las permanentes y le hielo.

- Incremento de la reacción horizontal en el tirante (dependiendo del signo del viento)

$$RTH_V = \frac{\pm MV_h \pm MV_s}{D} \quad (4.34)$$

- Incremento de la reacción horizontal en el cuerpo de ménsula:

$$RMH_V = FV_h + FV_s - RTH_V \quad (4.35)$$

- Incremento de la reacción vertical del tirante

$$RTV_V = RTH_V \cdot \tan(\alpha) \quad (4.36)$$

- Incremento de la reacción vertical en el cuerpo de la ménsula

Al analizar la fuerza del viento, no habrá acciones verticales actuando, de modo que:

$$RMV_V = 0 - RTV_V \quad (4.37)$$

A continuación se recogen las tablas con los cálculos descritos.

4.1.1.3 Resultados

Ménsula 1

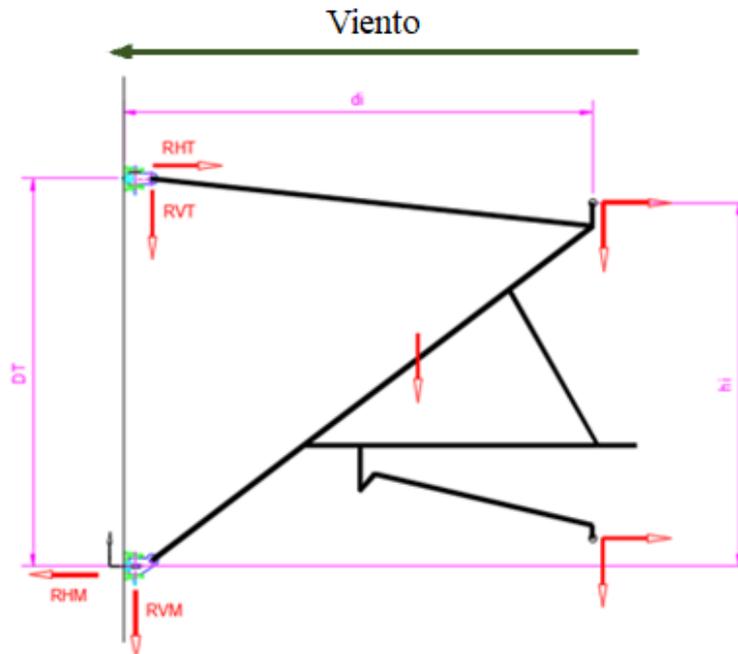


Tabla 4-4 Datos y Reacciones en la Ménsula 1

Datos		
Parámetro	Valor	Ud
V_a	64,76	m
V_p	58,76	m
d	-0,20	m
d_a	0,30	m
d_p	0,20	m
T_h	31.500,00	N
T_s	15.750,00	N
P_h	13,35	N/m
P_s	8,64	N/m
PRM	0,83	m
h_h	5,30	m
e_h	0,00	m
t_1	6,15	m
a_c	1,40	m
D	1,80	m
G	2,41	m
α	0,17	Rad
P_m	250,00	N
Q_{vh}	9,04	N/m
Q_{vs}	8,39	N/m
Q_h	7,00	N/m

Distancias horizontales (m)	
dh_{hilos}	2,21
$dh_{ménsula}$	1,11
Distancias verticales (m)	
dv_{hilos}	0,02
dv_{sust}	1,42

Momentos (N·m)	
MP_h	1.823,74
MP_s	1.180,31
MP_m	442,40
MH_h	956,27
MH_s	956,27
MT_h	-8,70
MT_s	-324,70
MV_h	10,61
MV_s	735,26

R. Incremento por Viento (N)	
RTH_v	-414,37
RMH_v	-662,08
RTV_v	-73,06
RMV_v	73,06

Fuerzas Verticales (N)	
FP_h	824,48
FP_s	533,59
FP_m	400,00
FH_h	432,31
FH_s	432,31
Fuerzas Horizontales (N)	
FT_h	-457,65
FT_s	-228,82
FV_h	558,30
FV_s	518,15

R. Cargas Permanentes (N)	
RTH_p	1.729,47
RMH_p	-2.415,95
RTV_p	304,95
RMV_p	1.453,12

R. Incremento por Hielo (N)	
RTH_h	1.062,52
RMH_h	-1.062,52
RTV_h	187,35
RMV_h	677,27

Ménsula 2

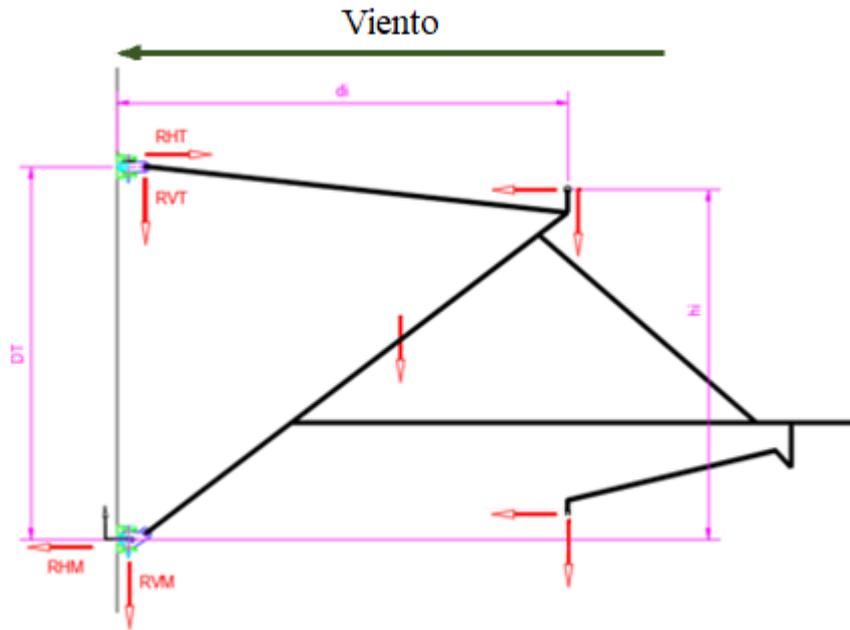


Tabla 4-5 Datos y Reacciones en la Ménsula 2

Datos		
Parámetro	Valor	Ud
V_a	64,76	m
V_p	58,76	m
d	-0,80	m
d_a	-0,80	m
d_p	-3,90	m
T_h	15.750,00	N
T_s	15.750,00	N
P_h	13,35	N/m
P_s	8,64	N/m
PRM	0,77	m
h_h	5,30	m
e_h	-0,05	m
t_1	6,15	m
a_c	2,30	m
D	1,80	m
G	2,66	m
α	0,16	Rad
P_m	250,00	N
Q_{vh}	9,04	N/m
Q_{vs}	8,39	N/m
Q_h	7,00	N/m

Distancias horizontales (m)	
dh_{hilos}	1,86
$dh_{ménsula}$	0,93
Distancias verticales (m)	
dv_{hilos}	0,13
dv_{sust}	2,43

Momentos (N·m)	
MP_h	1.529,40
MP_s	989,82
MP_m	371,00
MH_h	801,93
MH_s	801,93
MT_h	106,37
MT_s	2.017,62
MV_h	71,46
MV_s	1.258,08

R. Incremento por Viento (N)	
RTH_v	-738,63
RMH_v	-337,82
RTV_v	-116,99
RMV_v	116,99

Fuerzas Verticales (N)	
FP_h	824,48
FP_s	533,59
FP_m	400,00
FH_h	432,31
FH_s	432,31
Fuerzas Horizontales (N)	
FT_h	830,98
FT_s	830,98
FV_h	558,30
FV_s	518,15

R. Cargas Permanentes (N)	
RTH_p	2.785,67
RMH_p	-1.123,71
RTV_p	441,21
RMV_p	1.316,86

R. Incremento por Hielo (N)	
RTH_h	891,04
RMH_h	-891,04
RTV_h	141,13
RMV_h	723,49

Ménsula 3

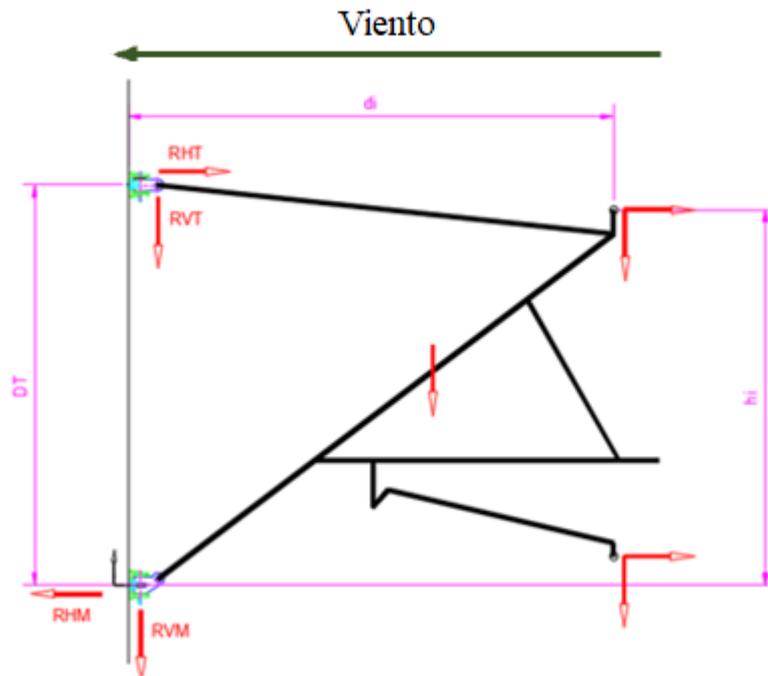


Tabla 4-6 Datos y Reacciones en la Ménsula 3

Datos		
Parámetro	Valor	Ud
V_a	64,76	m
V_p	58,76	m
d	-0,25	m
d_a	-0,25	m
d_p	0,20	m
T_h	31.500,00	N
T_s	15.750,00	N
P_h	13,35	N/m
P_s	8,64	N/m
PRM	0,77	m
h_h	5,30	m
e_h	0,00	m
t_1	6,15	m
a_c	1,40	m
D	1,80	m
G	2,66	m
α	-0,10	Rad
P_m	250,00	N
Q_{vh}	9,04	N/m
Q_{vs}	8,39	N/m
Q_h	7,00	N/m

Distancias horizontales (m)	
dh_{hilos}	2,41
$dh_{ménsula}$	1,20
Distancias verticales (m)	
dv_{hilos}	0,08
dv_{sust}	1,48

Momentos (N·m)	
MP_h	1.982,86
MP_s	1.283,29
MP_m	481,00
MH_h	1.039,70
MH_s	1.039,70
MT_h	-18,82
MT_s	-178,29
MV_h	43,55
MV_s	765,83

R. Incremento por Viento (N)	
RTH_v	-449,65
RMH_v	-626,80
RTV_v	47,26
RMV_v	-47,26

Fuerzas Verticales (N)	
FP_h	824,48
FP_s	533,59
FP_m	400,00
FH_h	432,31
FH_s	432,31
Fuerzas Horizontales (N)	
FT_h	-241,25
FT_s	-120,63
FV_h	558,30
FV_s	518,15

R. Cargas Permanentes (N)	
RTH_p	1.972,25
RMH_p	-2.334,13
RTV_p	-207,29
RMV_p	1.965,36

R. Incremento por Hielo (N)	
RTH_h	1.155,23
RMH_h	-1.155,23
RTV_h	-121,42
RMV_h	986,04

Ménsula 4

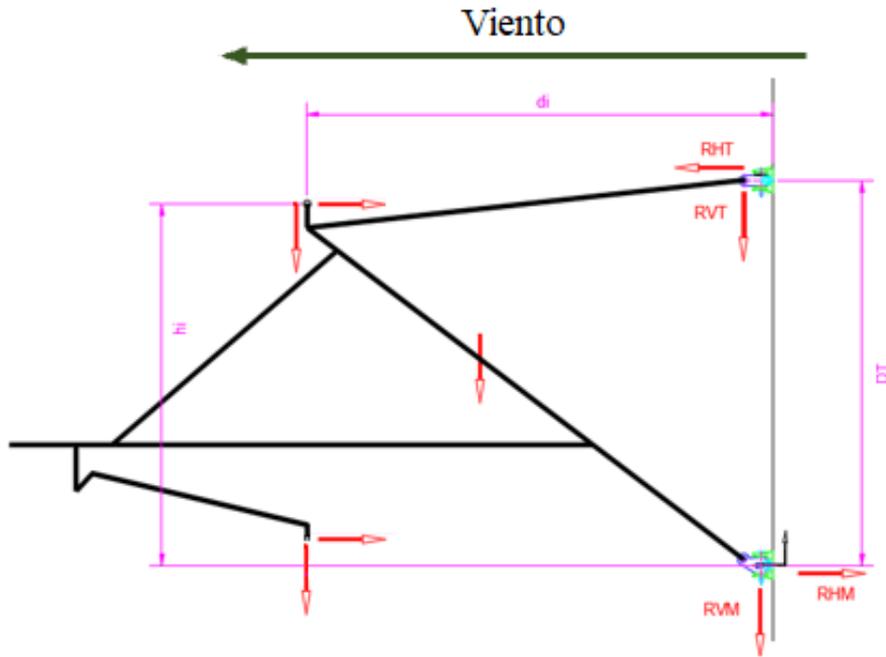


Tabla 4-7 . Datos y Reacciones en la Ménsula 4

Datos		
Parámetro	Valor	Ud
V_a	64,76	m
V_p	58,76	m
d	-0,80	m
d_a	-0,80	m
d_p	-3,90	m
T_h	15.750,00	N
T_s	15.750,00	N
P_h	13,35	N/m
P_s	8,64	N/m
PRM	0,77	m
h_h	5,30	m
e_h	-0,05	m
t_i	6,15	m
a_c	2,30	m
D	1,80	m
G	2,41	m
α	0,16	Rad
P_m	250,00	N
Q_{vh}	9,04	N/m
Q_{vs}	8,39	N/m
Q_h	7,00	N/m

Distancias horizontales (m)	
dh_{hilos}	1,61
$dh_{ménsula}$	0,81
Distancias verticales (m)	
dv_{hilos}	0,13
dv_{sust}	2,43

Momentos (N·m)	
MP_h	1.329,06
MP_s	860,15
MP_m	322,40
MH_h	696,88
MH_s	696,88
MT_h	110,52
MT_s	2.021,77
MV_h	74,25
MV_s	1.260,67

R. Incremento por Viento (N)	
RTH_v	-741,62
RMH_v	-334,83
RTV_v	-117,46
RMV_v	117,46

Fuerzas Verticales (N)	
FP_h	824,48
FP_s	533,59
FP_m	400,00
FH_h	432,31
FH_s	432,31
Fuerzas Horizontales (N)	
FT_h	830,98
FT_s	830,98
FV_h	558,30
FV_s	518,15

R. Cargas Permanentes (N)	
RTH_p	2.579,94
RMH_p	-917,99
RTV_p	408,62
RMV_p	1.349,45

R. Incremento por Hielo (N)	
RTH_h	774,31
RMH_h	-774,31
RTV_h	122,64
RMV_h	741,98

Ménsula 5

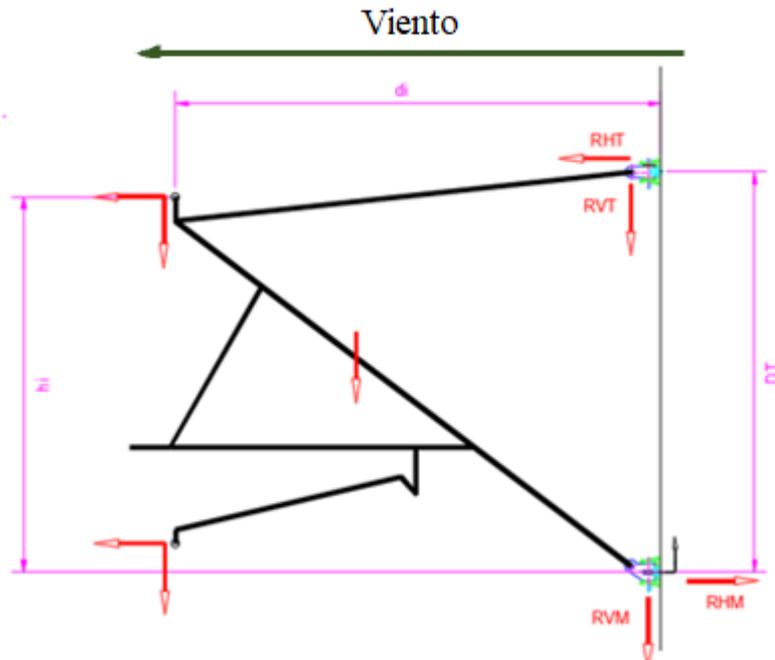


Tabla 4-8 . Datos y Reacciones en la Ménsula 5

Datos		
Parámetro	Valor	Ud
V_a	64,76	m
V_p	58,76	m
d	-0,25	m
d_a	-0,25	m
d_p	0,20	m
T_h	31.500,00	N
T_s	15.750,00	N
P_h	13,35	N/m
P_s	8,64	N/m
PRM	0,77	m
h_h	5,30	m
e_h	0,00	m
t_1	6,15	m
a_c	1,40	m
D	1,80	m
G	2,41	m
α	-0,10	Rad
P_m	250,00	N
Q_{vh}	9,04	N/m
Q_{vs}	8,39	N/m
Q_h	7,00	N/m

Distancias horizontales (m)	
dh_{hilos}	2,16
$dh_{ménsula}$	1,08
Distancias verticales (m)	
dv_{hilos}	0,08
dv_{sust}	1,48

Momentos (N·m)	
MP_h	1.782,52
MP_s	1.153,63
MP_m	432,40
MH_h	934,65
MH_s	934,65
MT_h	-20,02
MT_s	-178,89
MV_h	46,34
MV_s	768,42

R. Incremento por Viento (N)	
RTH_v	-452,64
RMH_v	-623,81
RTV_v	47,57
RMV_v	-47,57

Fuerzas Verticales (N)	
FP_h	824,48
FP_s	533,59
FP_m	250,00
FH_h	432,31
FH_s	432,31
Fuerzas Horizontales (N)	
FT_h	-241,25
FT_s	-120,63
FV_h	558,30
FV_s	518,15

R. Cargas Permanentes (N)	
RTH_p	1.760,91
RMH_p	-2.122,79
RTV_p	-185,08
RMV_p	1.943,15

R. Incremento por Hielo (N)	
RTH_h	1.038,50
RMH_h	-1.038,50
RTV_h	-109,15
RMV_h	973,77

Ménsula 6

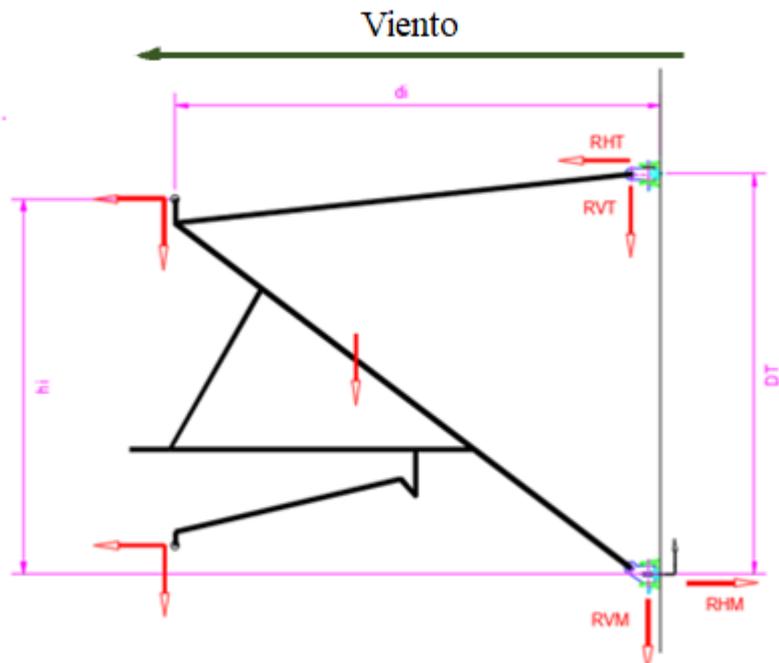


Tabla 4-9 Datos y Reacciones en la Ménsula 6

Datos		
Parámetro	Valor	Ud
V_a	64,76	m
V_p	58,76	m
d	0,20	m
d_a	-0,25	m
d_p	-0,20	m
T_h	31.500,00	N
T_s	15.750,00	N
P_h	13,35	N/m
P_s	8,64	N/m
PRM	0,76	m
h_h	5,30	m
e_h	0,00	m
t_i	6,15	m
a_c	1,40	m
D	1,80	m
G	2,95	m
α	0,17	Rad
P_m	250,00	N
Q_{vh}	9,04	N/m
Q_{vs}	8,39	N/m
Q_h	7,00	N/m

Distancias horizontales (m)	
dh_{hilos}	3,15
$dh_{ménsula}$	1,58
Distancias verticales (m)	
dv_{hilos}	0,08
dv_{sust}	1,48

Momentos (N·m)	
MP_h	2.599,57
MP_s	1.682,42
MP_m	630,60
MH_h	1.363,07
MH_s	1.363,07
MT_h	38,57
MT_s	322,61
MV_h	49,69
MV_s	771,53

R. Incremento por Viento (N)	
RTH_v	-456,23
RMH_v	-620,22
RTV_v	-80,45
RMV_v	80,45

Fuerzas Verticales (N)	
FP_h	824,48
FP_s	533,59
FP_m	400,00
FH_h	432,31
FH_s	432,31
Fuerzas Horizontales (N)	
FT_h	433,33
FT_s	216,66
FV_h	558,30
FV_s	518,15

R. Cargas Permanentes (N)	
RTH_p	2.929,87
RMH_p	-2.279,88
RTV_p	516,62
RMV_p	1.241,45

R. Incremento por Hielo (N)	
RTH_h	1.514,52
RMH_h	-1.514,52
RTV_h	267,05
RMV_h	597,57

Ménsula 7

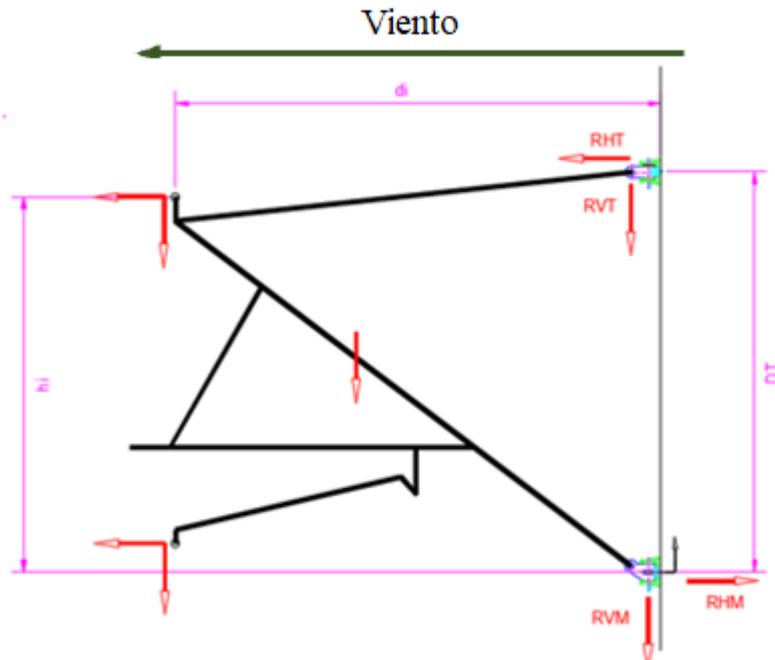


Tabla 4-10 Datos y Reacciones en la Ménsula 7

Datos		
Parámetro	Valor	Ud
V_a	64,76	m
V_p	58,76	m
d	-0,05	m
d_a	0,30	m
d_p	0,30	m
T_h	31.500,00	N
T_s	15.750,00	N
P_h	13,35	N/m
P_s	8,64	N/m
PRM	0,80	m
h_h	5,30	m
e_h	0,01	m
t_1	6,15	m
a_c	1,40	m
D	1,80	m
G	2,38	m
α	0,21	Rad
P_m	250,00	N
Q_{vh}	9,04	N/m
Q_{vs}	8,39	N/m
Q_h	7,00	N/m

Distancias horizontales (m)	
dh_{hilos}	2,33
$dh_{ménsula}$	1,16
Distancias verticales (m)	
dv_{hilos}	0,04
dv_{sust}	1,44

Momentos (N·m)	
MP_h	1.920,20
MP_s	1.242,74
MP_m	465,80
MH_h	1.006,85
MH_s	1.006,85
MT_h	-12,53
MT_s	-256,78
MV_h	19,54
MV_s	743,55

R. Incremento por Viento (N)	
RTH_v	-423,94
RMH_v	-652,51
RTV_v	-90,11
RMV_v	90,11

Fuerzas Verticales (N)	
FP_h	824,48
FP_s	533,59
FP_m	400,00
FH_h	432,31
FH_s	432,31
Fuerzas Horizontales (N)	
FT_h	-357,88
FT_s	-178,94
FV_h	558,30
FV_s	518,15

R. Cargas Permanentes (N)	
RTH_p	1.866,35
RMH_p	-2.403,18
RTV_p	396,71
RMV_p	1.361,36

R. Incremento por Hielo (N)	
RTH_h	1.118,72
RMH_h	-1.118,72
RTV_h	237,79
RMV_h	626,83

Ménsula 8

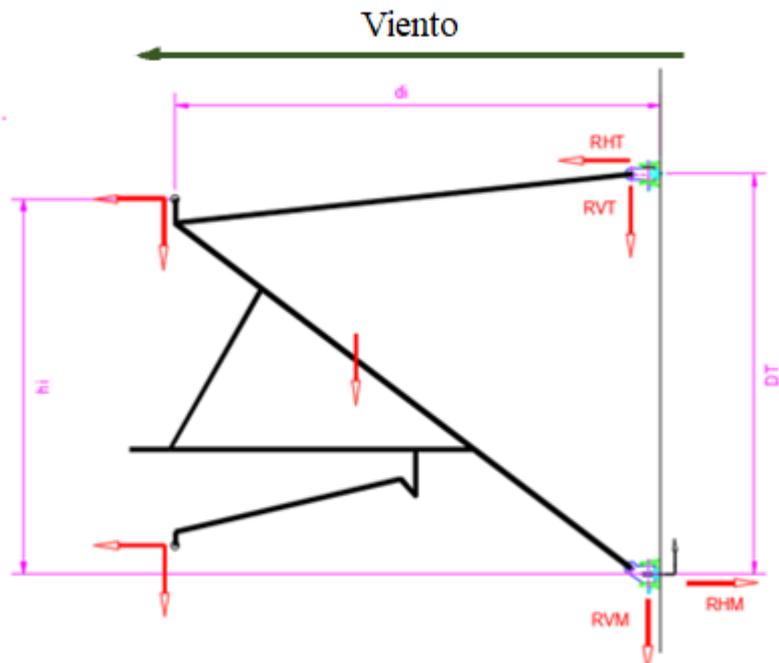


Tabla 4-11 Datos y Reacciones en la Ménsula 8

Datos		
Parámetro	Valor	Ud
V_a	64,76	m
V_p	58,76	m
d	-0,30	m
d_a	0,05	m
d_p	0,05	m
T_h	31.500,00	N
T_s	15.750,00	N
P_h	13,35	N/m
P_s	8,64	N/m
PRM	0,80	m
h_h	5,30	m
e_h	0,01	m
t_i	6,15	m
a_c	2,30	m
D	1,80	m
G	2,38	m
α	-0,12	Rad
P_m	250,00	N
Q_{vh}	9,04	N/m
Q_{vs}	8,39	N/m
Q_h	7,00	N/m

Distancias horizontales (m)	
dh_{hilos}	2,08
$dh_{ménsula}$	1,04
Distancias verticales (m)	
dv_{hilos}	0,04
dv_{sust}	2,34

Momentos (N·m)	
MP_h	1.714,09
MP_s	1.109,34
MP_m	415,80
MH_h	898,77
MH_s	898,77
MT_h	-12,53
MT_s	-417,83
MV_h	19,54
MV_s	1.209,89

R. Incremento por Viento (N)	
RTH_v	-683,02
RMH_v	-393,43
RTV_v	83,86
RMV_v	-83,86

Fuerzas Verticales (N)	
FP_h	824,48
FP_s	533,59
FP_m	400,00
FH_h	432,31
FH_s	432,31
Fuerzas Horizontales (N)	
FT_h	-357,88
FT_s	-178,94
FV_h	558,30
FV_s	518,15

R. Cargas Permanentes (N)	
RTH_p	1.560,49
RMH_p	-2.097,31
RTV_p	-191,60
RMV_p	1.949,67

R. Incremento por Hielo (N)	
RTH_h	998,63
RMH_h	-998,63
RTV_h	-122,62
RMV_h	987,24

4.1.2 Viento en el pórtico.

Sobre el pórtico actuarán dos hipótesis de viento, longitudinal y transversal.

4.1.2.1 Viento transversal sobre postes

A continuación, se desarrollan los cálculos necesarios para obtener la presión ejercida por el viento. Al tratarse de territorio español se seguirá la IAP para dimensionar la presión (apartado 3.2.3.2.1).

-Velocidad de cálculo. V_c

La presión depende de la velocidad de cálculo, que se obtiene mediante la ecuación:

$$V_c = V_{ref} \cdot C_r \cdot C_t \cdot C_z \cdot C_g = 38,28159 \frac{m}{s} \quad (4.38)$$

Donde,

- Velocidad de referencia. V_{ref}

En la figura 3 del apartado antes mencionado de la IAP se obtiene este coeficiente en función de la zona geográfica, que es 24m/s.

- Factor de topografía. C_t

De acuerdo a la IAP, se toma el valor 1 para casos generales.

- Factor de riesgo. C_r

Para un periodo de retorno de 100 años, se toma el valor de 1,04.

- Factor de altura. C_z

Depende del tipo de entorno, que en este caso es II (zona rural). Se calcula con la ecuación:

$$C_z = K_z \cdot \ln\left(\frac{h}{Z_0}\right) \quad (4.39)$$

Donde “h” toma un valor de 10m (altura pórtico), “ K_z ” y “ Z_0 ” se obtienen de la tabla 1 del apartado 2.3.2.1, tomando valores de 0.19 y 0.05 respectivamente.

- Factor de ráfaga. C_g

Se calcula de acuerdo a la ecuación:

$$C_g = \sqrt{\left(1 + \left(\frac{7 \cdot K_z}{C_z \cdot C_t}\right)\right)} = 1,52354 \quad (4.40)$$

- Masa específica del aire. m_a

Se toma un valor de 1.25kg/m³

-Presión del Viento q_p

La presión del viento se obtiene mediante la ecuación:

$$q_p = \frac{m_a \cdot V_c^2}{2} = \frac{1,25 \cdot 38,28159^2}{2} = 915,9253 \frac{N}{m^2} \quad (4.41)$$

- Fuerza del Viento Q_{estr}

Para obtener la fuerza de aplicación sobre postes, se sigue ahora la norma EN 50119:2017, donde se analizan las acciones particularizadas para la Línea Aérea de Contacto. La ecuación es:

$$Q_{estr} = q_p \cdot A \cdot G_{str} \cdot C_{sr} = 915,9253 \cdot 3,422 \cdot 1 \cdot 1.4 = 4.388,654 \text{ N} \quad (4.42)$$

Donde,

- Factor de resonancia. G_{str}

Se toma el valor de 1 para elementos metálicos empleados en L.A.C.

- Coeficiente de Arrastre. C_{sr}

Como se trata de acción transversal, se toma el valor 1.4

- Área. A

Se trata, en este caso, del área del lateral de dos UPN-260 de 10m, más 60 diagonales.

$$A = 10 \cdot 0.09 \cdot 2 + 60 \cdot 0.05 \cdot \sqrt{0.3^2 + 0.45^2} = 3,422m^2 \quad (4.43)$$

- Carga del viento sobre postes. Q_v

Una vez obtenida la fuerza, podemos transformarla en una carga lineal. En este caso, al tratarse de los postes, se aplicará sobre 20m lineales (10 por poste) implicando:

$$Q_v = \frac{4.388,654 \text{ N}}{20m} = 219,4327 \frac{\text{N}}{m} \quad (4.44)$$

4.1.2.2 Viento transversal sobre el dintel

La presión del viento tiene el mismo valor, pero a la hora de obtener la fuerza sobre el dintel (celosía) se emplea otra ecuación y otros coeficientes. De acuerdo a la norma EN 50119:2017:

- El factor de resonancia (G_{lat}) pasa a ser 1,05 al tratarse de una celosía.
- El coeficiente de arrastre (C_{lat}) depende del ratio de solidez entre área proyectada y efectiva. La norma EN 1991-4:200.7.11 considera 2,8 como un valor adecuado.
- El ángulo de incidencia del viento (ϕ) se considera 90° , situación más desfavorable.

La ecuación para el cálculo de la fuerza sobre celosías es:

$$Q_{Wt} = q_p \cdot G_{lat} \cdot (1 + 0,2 \cdot \sin^2(2\phi)) \cdot (C_{lat1} \cdot A_{lat1} \cdot \cos^2(\phi) + C_{lat2} \cdot A_{lat2} \cdot \sin^2(\phi))$$

Donde,

$$A_{lat1} = 26 \cdot 2 \cdot 0,1 + 36 \cdot 0.045 \cdot 0.5 + 32 \cdot 0,045 \cdot \sqrt{0,75^2 + 0,5^2} = 7,307m^2 \quad (4.45)$$

- Fuerza del Viento Q_{est}

Con estos nuevos datos, el valor de la fuerza es:

$$Q_{Wt} = q_p \cdot A_{lat1} \cdot G_{lat} \cdot C_{lat1} = 915,9253 \cdot 7,307 \cdot 1,05 \cdot 2,8 = 19.679,13 \text{ N} \quad (4.46)$$

- Carga del viento sobre dintel. Q_v

Esta carga aplica sobre dos cordones del pórtico de longitud 26m.

$$Q_v = \frac{19.679,13 \text{ N}}{26 \cdot 2 \text{ m}} = 378,4447 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (4.47)$$

4.1.2.3 Viento longitudinal sobre postes

La única diferencia con respecto al cálculo del viento transversal sobre postes es el coeficiente de arrastre, que en este caso toma valor 2. El área de actuación es la cara trasera de un LPN-260 de 10m.

$$A = 10 \cdot 0,26 = 2,6 \text{ m}^2$$

- Fuerza del Viento Q_{estr}

$$Q_{estr} = q_p \cdot A \cdot G_{str} \cdot C_{sr} = 915,9253 \cdot 2,6 \cdot 1 \cdot 2 = 4.762,811 \text{ N} \quad (4.48)$$

- Carga del viento sobre postes. Q_v

Esta fuerza se distribuye sobre la parte trasera de un único cordón de poste de 10m.

$$Q_v = \frac{4.762,811 \text{ N}}{10 \text{ m}} = 476,2811 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (4.49)$$

4.1.3 Mantenimiento.

La hipótesis del mantenimiento contempla la aplicación de una carga en el punto más desfavorable equivalente al peso de una persona y su equipo. Este valor suele considerarse de 1000N en el centro del vano. Se divide en dos acciones puntuales de 500N actuando en los nodos superiores (+Z) del dintel en la coordenada Y=0.

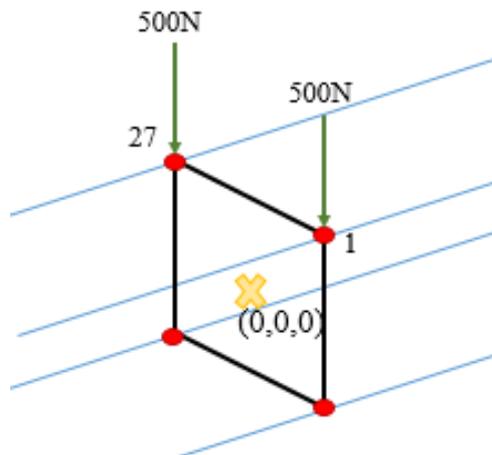


Figura 4-3 Puntos de aplicación de cargas de mantenimiento

4.1.4 Accidentales.

La rotura de conductores, aunque improbable, es un fenómeno que puede tener varias causas:

- Rotura por desgaste.
- Rotura derivada por un cortocircuito en un conductor.
- Rotura por el pantógrafo, al salirse el de la zona de frotamiento y pasar por debajo de este.
- Rotura por factores externos. Como la caída de algún objeto o vehículo desde un paso superior.

Es sabido de experiencias en líneas convencionales que en algunas circunstancias esta rotura acaba repercutiendo sobre las estructuras, al absorber las ménsulas el tense íntegro de los conductores. Esto puede derivar, entre otras cosas, en el vuelco o fallo de los postes.

Las líneas convencionales forman la red más extensa y llevan mucho tiempo en explotación, algunas incluso más de 50 años durante los cuales solo se han efectuado labores de mantenimiento. Esto, sumado a la configuración de los equipos que las componen, ha permitido que en algunas circunstancias se desencadenen los accidentes mencionados.

En cuanto a la Alta Velocidad, este fenómeno sería aún menos probable. En este punto se determinarán las condiciones que tendrían que cumplirse en una línea compuesta por los equipos aquí descritos, para que esto ocurra. Si dichas condiciones fuesen posibles en este pórtico, se estudiará su efecto dentro del análisis de Situaciones Accidentales del ELU, con el objetivo de cuantificar hasta qué punto sería perjudicial para el sistema.

La rotura de los conductores es bastante grave en sí misma (en términos de tiempo de reparación, ya que hay que volver a instalar un cantón entero). Esto podría incrementarse aún más si se le suma el vuelco de la cimentación o la rotura de alguno de los elementos del pórtico, ya que aumentaría los tiempos de reparación como resultado del montaje de nuevo pórtico.

El desarrollo del fenómeno es:

Tras la rotura del hilo y sustentador, las contrapesas que mantienen el tense descienden hasta llegar al suelo, momento en el que los conductores se destensan. Durante este proceso las ménsulas giran sobre sus tacones. Si antes de que las contrapesas completen su recorrido, alguna ménsula ha girado completamente hasta quedar paralela a la vía, absorberá todo el tense del conductor.

Los conceptos que influyen en esto son la longitud de regulación de las contrapesas, la relación de reducción de las poleas y la longitud de la ménsula.

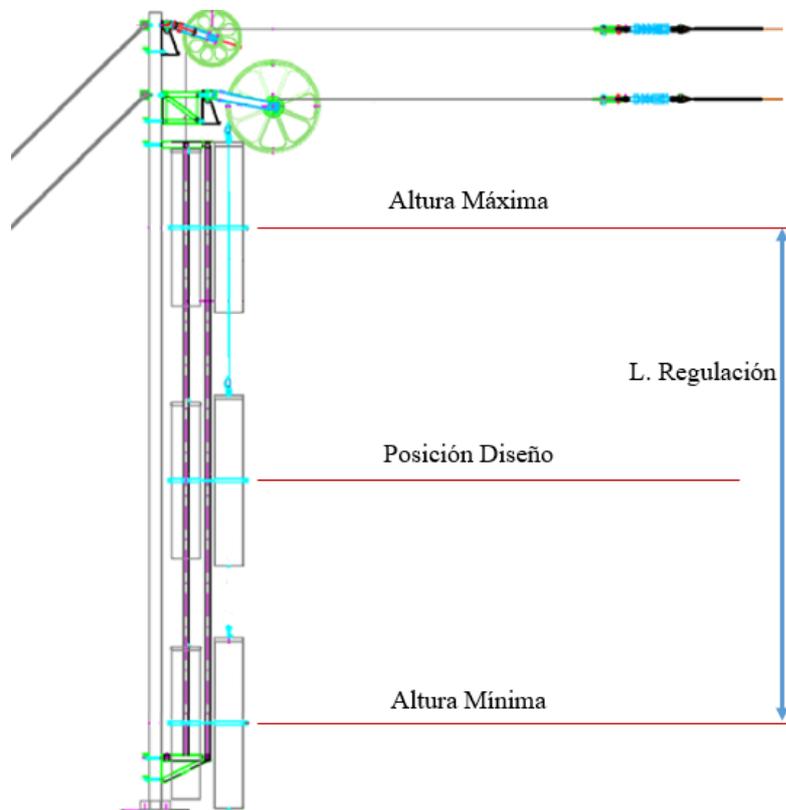


Figura 4-4 Longitud de Regulación

✓ *Longitud de Regulación:*

Es el rango de movimiento que presenta la contrapesada para poder asumir todas las variaciones de la dilatación de un semicantón. Se obtiene de la ecuación:

$$\Delta L = R \cdot \alpha \cdot L \cdot \Delta T \quad (4.50)$$

Su valor se dimensiona tomando como referencia el semicantón máximo, que es una condición de diseño de la línea, y en este caso se limita a 650m., Para este valor, se obtiene una longitud de regulación de los equipos de compensación de 6.075m.

✓ *Relación de las poleas.*

Para conseguir los tenses de 3150kg en hilo y 1575kg en el sustentador sin tener que recurrir a contrapesas muy grandes, se emplean poleas de relación 1:5 y 1:3 respectivamente. Una polea 1:3 permite alcanzar los 1575Kg de tense en el sustentador por medio de una contrapesa de 525kg, pero al mismo tiempo obliga a que la contrapesa se desplace 3 metros por cada metro de dilatación del cable.

Esto significa que con una longitud de regulación de 6.075m, el desplazamiento máximo en los conductores antes de que la contrapesa llegue al suelo desde la posición más alta, es 1.25m para el hilo de contacto y 2.025m para el sustentador.

✓ *Longitud de las ménsulas.*

Llegados a este punto, se sabe una contrapesa podría mantener el tense en los conductores hasta que el desplazamiento sea 1.25m en el hilo y 2.025m en el sustentador.

No es viable el montaje de una ménsula con una longitud menor que 1.25m, por lo tanto el tense del hilo nunca se aplicará sobre la estructura, pero longitudes de 2.025m sí que son comunes.

Por lo tanto, una ménsula menor de 2.025m de longitud, bajo las condiciones descritas anteriormente, podrían llegar al punto de soportar todo el tense del sustentador, repercutiéndolo sobre el poste o silleta. Esta fuerza sería 1575Kg.

A continuación se muestran esquemas que representan las situaciones descritas.

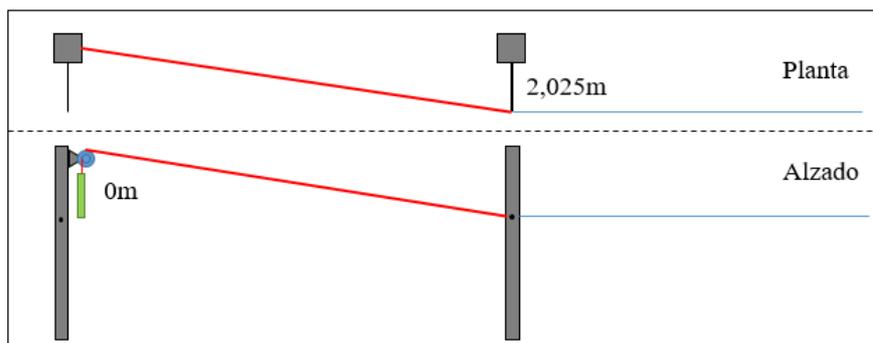


Figura 4-5 Rotura de conductores. Situación previa a la rotura

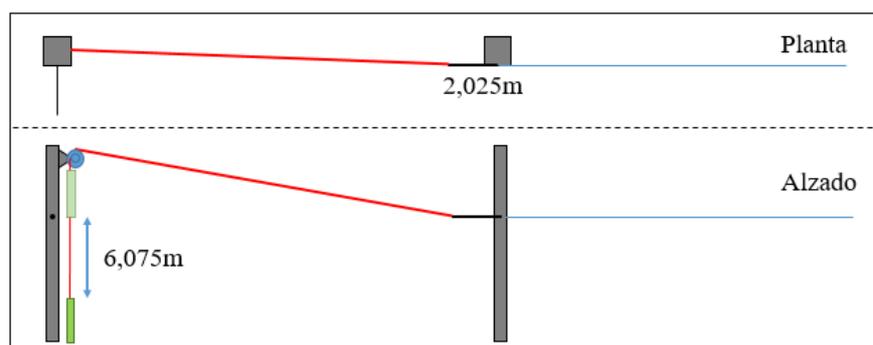


Figura 4-6 Rotura de conductores. Situación final

Las ménsulas potencialmente afectadas por este fenómeno solo pueden ser la 2 y la 4. La siguiente imagen muestra como ejemplo la ménsula 2, donde se aprecia la longitud inferior a 2.025m

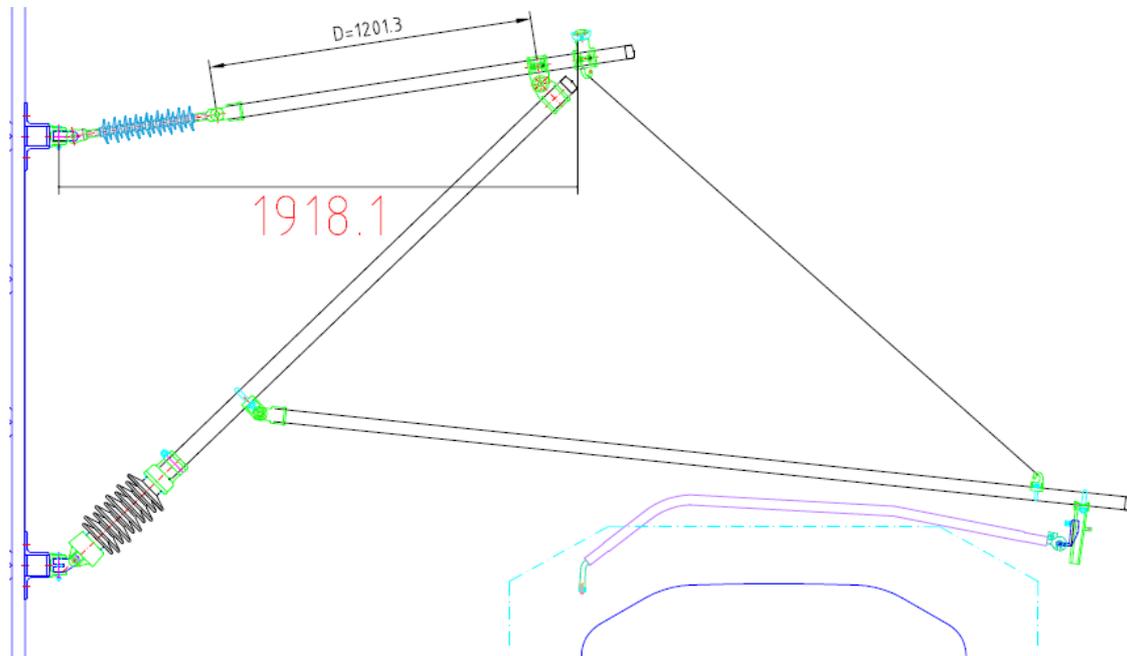


Figura 4-7 Ménsula 2, longitud inferior a 2.025m

Como se ha dicho anteriormente, se trata de un suceso muy improbable ya que implica:

- 1) Temperaturas bajas para que la contrapesa se encuentre en la zona superior y disponga de más longitud de regulación.
- 2) Existencia de ménsulas cortas, o bien por agujas o por gálidos especiales.
- 3) La ménsula corta debe estar cerca del punto de rotura, ya que son las primeras ménsulas las que sufren la carga, produciéndose un destense progresivo en la línea.
- 4) Aún con todo, es posible que la carga no repercuta sobre el pórtico, ya que otros elementos podrían fallar antes, como la silleta. Este es otro aspecto que se analizará.

Aun siendo improbable, en este pórtico podrían darse las condiciones necesarias para que se desencadene este fenómeno, por lo tanto se tendrá en cuenta en el cálculo y se analizará su repercusión. En base a los resultados se podría proponer una modificación en el diseño para asegurar que no se den las circunstancias mencionadas anteriormente.

4.2 ELU

Hasta este punto se ha definido el modelizado del pórtico, los nodos sobre los que se aplica cada carga y el valor de las mismas.

El siguiente paso es analiza el Estado Límite Último de los elementos del pórtico. Un rebasamiento de este límite implica que parte o toda la estructura colapsaría, al superar su capacidad resistente bajo cierta suposición de cargas.

Antes de proceder con el cálculo es necesario determinar las combinaciones de acciones que pueden darse. Los criterios para establecer las combinaciones se extraen de la instrucción de EAE, en su capítulo III.

Se analizarán por un lado las situaciones permanentes o transitorias y por otro las situaciones accidentales. Las situaciones sísmicas no es necesario analizarlas, como se explica en el Anexo 2.

4.2.1 Situaciones Permanentes o Transitorias (S1)

Esta es la comprobación general que se lleva a cabo para evaluar los efectos de las cargas más probables. Los coeficientes parciales para los casos desfavorables son superiores a la unidad.

4.2.1.1 Combinaciones

$$\sum_{j \geq 1} Y_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum_{j \geq 1} Y_{G,j}^* \cdot G_{k,j}^* + Y_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} Y_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

H1- Hielo predominante con viento longitudinal

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_{Q,1} \cdot Q_{H,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{0,2} \cdot Q_{V1,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{0,3} \cdot Q_{M,3}$$

H2- Hielo predominante con viento transversal

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_{Q,1} \cdot Q_{H,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{0,2} \cdot Q_{V2,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{0,3} \cdot Q_{M,3}$$

H3- Mantenimiento predominante con viento longitudinal

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_{Q,1} \cdot Q_{M,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{0,2} \cdot Q_{V1,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{0,3} \cdot Q_{H,3}$$

H4- Mantenimiento predominante con viento transversal

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_{Q,1} \cdot Q_{M,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{0,2} \cdot Q_{V2,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{0,3} \cdot Q_{H,3}$$

H5- Viento longitudinal predominante

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_{Q,1} \cdot Q_{V1,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{0,2} \cdot Q_{H,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{0,3} \cdot Q_{H,3}$$

H6- Viento transversal predominante

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_{Q,1} \cdot Q_{V2,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{0,2} \cdot Q_{H,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{0,3} \cdot Q_{H,3}$$

4.2.1.2 Coeficientes

Los valores de los los coeficientes parciales y de simultaneidad de las hipótesis dependen del tipo de acción. De acuerdo con la EAE:

Tabla 4-12 Coeficientes de Simultaneidad

	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Hielo	0,5	0,2	0
Viento	0,6	0,2	0
Mantenimiento	0,7	0,7	0,6

Tabla 4-13 Coeficientes Parciales - ELU

	Permanentes o transitorias		Accidentales	
	Favorable	Desfavorable	Favorable	Desfavorable
Permanente	1	1.35	1	1
Variable	0	1.5	0	1
Accidental	-	-	1	1

Para poder simplificar las combinaciones en una sola ecuación en la que se recojan las posibles acciones, se recurre a unos parámetros, vinculados a cada acción, que tendrán valores distintos para cada hipótesis.

Las combinaciones se simplifican a:

$$X_1 \cdot G_{P2} + X_2 \cdot Q_H + X_3 \cdot Q_M + X_4 \cdot Q_{V1} + X_5 \cdot Q_{V2} + X_6 \cdot A$$

El coeficiente L_{G1} es una acción permanente que está vinculada al peso propio de los elementos y se aplica como aceleración de la gravedad. X_1 se vincula con las acciones permanentes derivadas del tense de las catenarias, mientras que X_2 , X_3 , X_4 y X_5 se vinculan a las acciones variables, siendo estas la carga por hielo, mantenimiento, viento longitudinal y viento transversal, respectivamente. Por último, el parámetro X_6 estará presente en aquellas hipótesis que contemplen las cargas accidentales.

Tabla 4-14 Parámetros para cada hipótesis – S1

Parámetro	H1	H2	H3	H4	H5	H6
L_G1	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35
X_1	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35
X_2	1,5	1,5	1,5·0,5	1,5·0,5	1,5·0,5	1,5·0,5
X_3	0,7·1,5	0,7·1,5	1,5	1,5	1,5·0,7	1,5·0,7
X_4	0,6·1,5	0	0,6·1,5	0	1,5	0
X_5	0	0,6·1,5	0	0,6·1,5	0	1,5
X_6	0	0	0	0	0	0

De esta forma, para un único documento txt. se pueden obtener los resultados de las distintas hipótesis solo modificando estos parámetros con el valor correspondiente, simplificando así las operaciones de obtención de resultados.

Como ejemplo, se muestra la asignación de valores para la hipótesis 2 y la aplicación de cargas en el nodo 1212, que es el punto de aplicación de las reacciones del tirante de la ménsula 4.

$$L_{G1} = 1.35$$

$$X_1 = 1.35$$

$$X_2 = 1.5$$

$$X_3 = (1.5) \cdot (0.7)$$

$$X_4 = 0$$

$$X_5 = (0.6) \cdot (1.5)$$

$$X_6 = 0$$

$$ACEL, 0, 0, L_{G1} \cdot (9.81)$$

!Nodo 1212

$$F, 1212, FZ, X_1 \cdot (-408.62) + X_2 \cdot (-122.64) + X_4 \cdot (117.46)$$

$$F, 1212, FY, X_1 \cdot (-2579.94) + X_2 \cdot (-774.31) + X_4 \cdot (-741.62)$$

$$F, 1212, FX, X_6 \cdot (-15750)$$

4.2.1.3 Obtención de Resultados

Se muestra el modelizado del pórtico y la aplicación de cargas de las hipótesis 1 y 6.

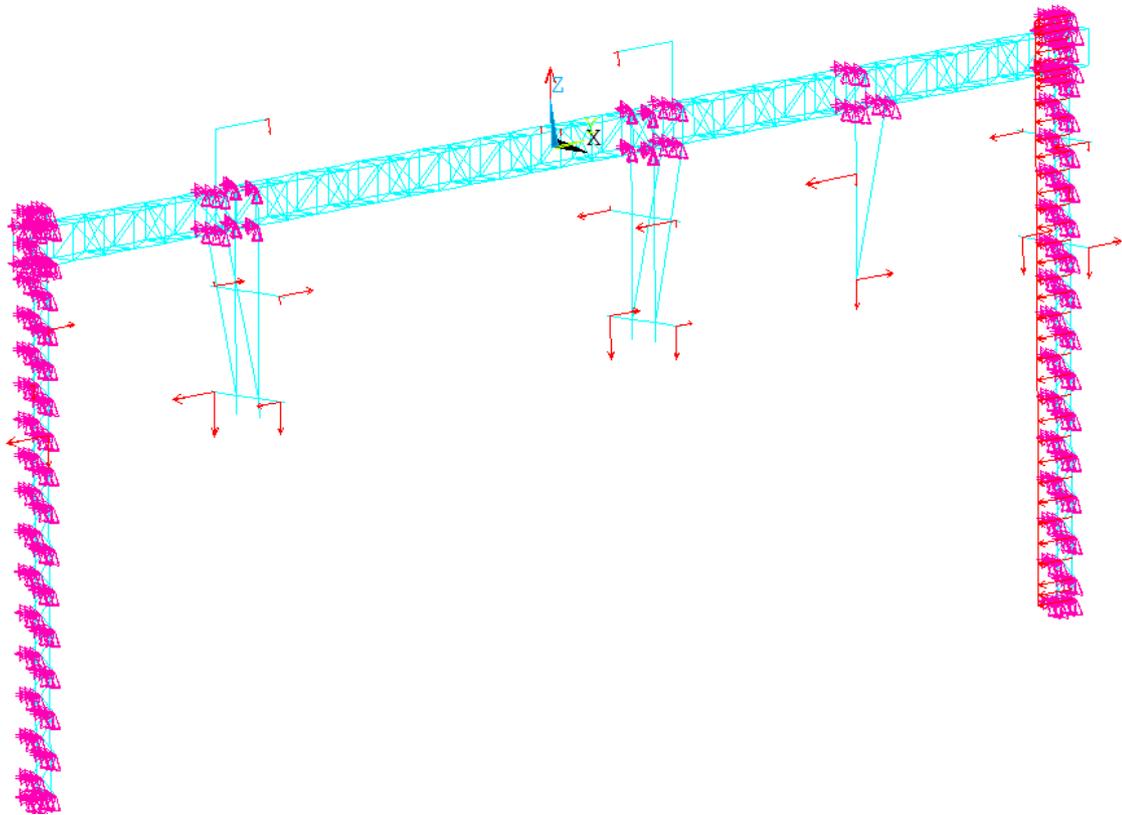


Figura 4-8 Acciones sobre el pórtico en la Hipótesis 1 - S1

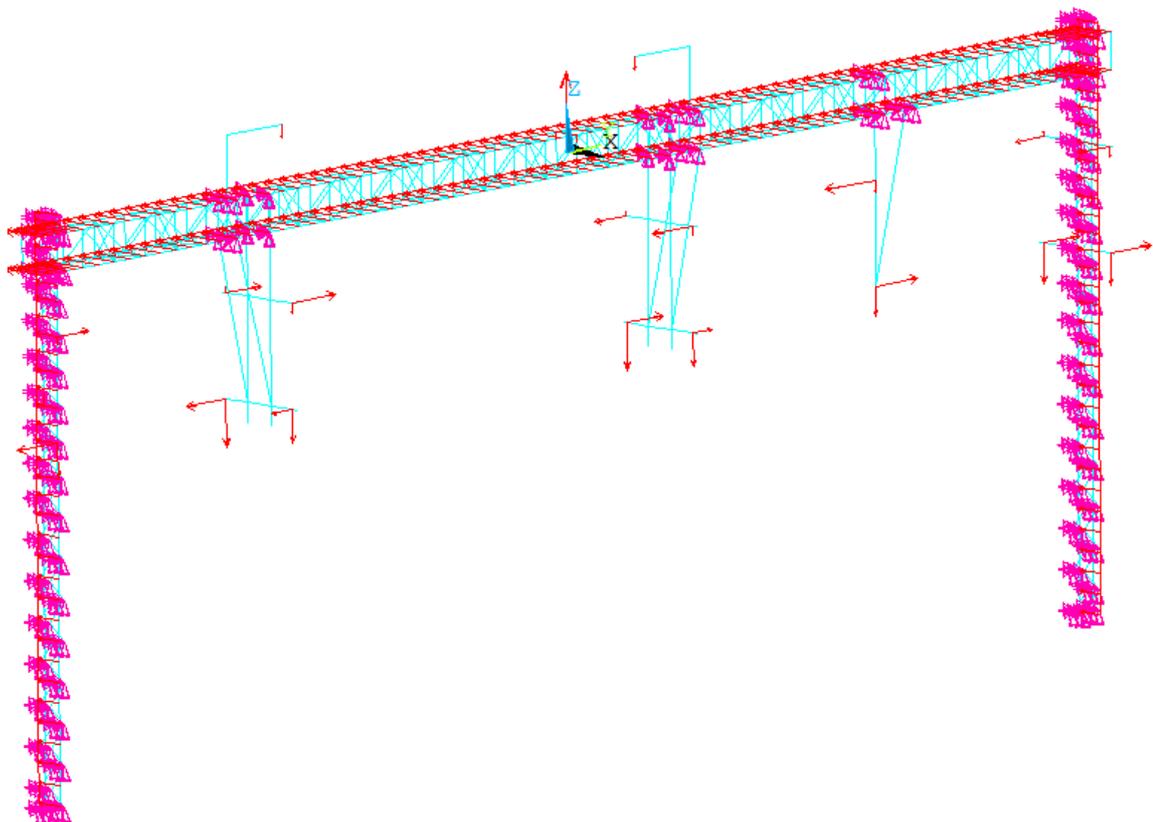


Figura 4-9 Acciones sobre el pórtico en la Hipótesis 6 - S1

El procedimiento para obtener los valores en cada una de las hipótesis pasa por definir las ETables en términos de axial, momentos y cortante (en “Y” y en “Z”), ya que estos serán los valores necesarios en la comprobación.

Output Quantity Name	ETABLE and ESOL Command Input		
	Item	I	J
Fx	SMISC	1	14
My	SMISC	2	15
Mz	SMISC	3	16
SFz	SMISC	5	18
SFy	SMISC	6	19

Figura 4-10 Información sobre el Elemento Beam188

Currently Defined Data and Status:

Label	Item	Comp	Time Stamp	Status
N_I	SMIS	1	Time= 1.0000	(Current)
N_J	SMIS	14	Time= 1.0000	(Current)
MY_I	SMIS	2	Time= 1.0000	(Current)
MY_J	SMIS	15	Time= 1.0000	(Current)
MZ_I	SMIS	3	Time= 1.0000	(Current)
MZ_J	SMIS	16	Time= 1.0000	(Current)
SF_Z	SMIS	5	Time= 1.0000	(Current)
SF_Y	SMIS	6	Time= 1.0000	(Current)

Figura 4-11 Creación de las ETables

Para simplificar el procedimiento, se seleccionarán los elementos por número de sección, ya que son estas las que se comprueban.

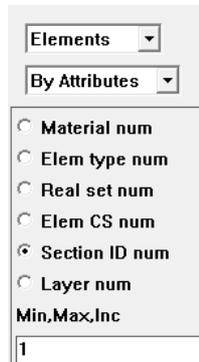


Figura 4-12 Selección de elementos 1, Cordones de los postes

Para cada sección, se obtienen las ETables definidas anteriormente. Estas reflejan los valores máximos y mínimos.

File

900	15.929	15.929	-0.77998E-009	-0.77998E-009	0.63374E-009	0.63374E-009
906	-4140.5	-4140.5	58.403	58.403	135.08	135.08
907	-1245.7	-1245.7	-0.40661E-008	-0.40661E-008	1454.6	1454.6
908	0.22149E-009	0.22149E-009	727.31	727.31	-0.29795E-009	-0.29795E-009
909	-3044.6	-3044.6	14.759	14.759	-136.06	-136.06
910	-1205.3	-1205.3	-0.47464E-008	-0.47464E-008	-1400.8	-1400.8
911	0.0000	0.0000	700.42	700.42	0.29260E-009	0.29260E-009

MINIMUM VALUES						
ELEM	906	906	885	885	910	910
VALUE	-4140.5	-4140.5	-116.20	-116.20	-1400.8	-1400.8

MAXIMUM VALUES						
ELEM	887	887	908	908	907	907
VALUE	18630.	18630.	727.31	727.31	1454.6	1454.6

Figura 4-13 Ejemplo de resultados de las ETables

4.2.1.4 Resultados

El procedimiento anterior se realiza para cada sección dentro de cada hipótesis. Esto implica una enorme cantidad de valores.

Todos ellos conformarán una envolvente para cada sección, donde se analicen los valores máximos posibles, aunque no puedan darse todos a la vez. Esto garantiza que, si los elementos soportan esas condiciones, serán capaces de soportar cualquier solicitud real que se pueda dar. Tomando estos como referencia se procederá a las comprobaciones.

En las siguientes tablas se recogen los valores resultantes del cálculo:

Tabla 4-15 **Hipótesis 1** (Hielo predominante con Viento Longitudinal) - S1

Sección	Axial (N)		M _y (N·m)		M _z (N·m)		FCz		FCy	
	Min	Máx.	Min	Min	Máx.	Min	Min	Min	Máx.	Min
Cordones Poste	255.290	-293.770	249,38	-685,18	3352,3	-3874,2	130,92	-7,47	113.830	-121.17
Diagonales Poste	82354	-79280	-	-	-	-	-	-	-	-
Cordones Dintel	89780	-96974	1771,6	-1675,30	1679,7	-1729,6	11.100	-7.762,7	11.072	-7.843,8
Barras Dintel	31379	-27600	-	-	-	-	-	-	-	-
Silleta cuadrada	23824	-6335,40	942,92	-137,66	1524,4	-2193,6	914,44	-1.417,9	6.092,2	-4.387
Jabalcones	-2756	-18538	250,16	174,82	37,06	-31,38	-312,14	-858,95	333,91	-373,11
Soporte ménsula	334,25	-430,75	1360	-202,86	2190,5	-1897,20	3.623,5	-4.170,4	5.448	-5.311

Tabla 4-16 **Hipótesis 2** (Hielo predominante con Viento Transversal) - S1

Sección	Axial (N)		M _y (N·m)		M _z (N·m)		FCz		FCy	
	Min	Máx.	Min	Min	Máx.	Min	Min	Min	Máx.	Min
Cordones Poste	209.810	-245.920	47.216	-47.405	3.558,7	-3.503,7	6.070,9	-6.075,7	90.652	-98.554
Diagonales Poste	66.840	-64.315	-	-	-	-	-	-	-	-
Cordones Dintel	131.920	-138.090	1.686,6	-1.516	1.605,1	-1.655,6	9.560,9	-8.416,2	9.329,8	-8.564,9
Barras Dintel	29.521	-26.180	-	-	-	-	-	-	-	-
Silleta cuadrada	21.494	-5.133,2	942,92	-139,66	1.885,8	-1.832,1	859,45	-1.417,9	5.538,9	-4.181,9
Jabalcones	-4.666,9	-16.232	236,59	184,94	34,57	-29,69	-413,18	-792,21	370,24	-351,64
Soporte ménsula	317,39	-396,06	1.388,3	-188,45	1.944,9	-2.143,9	3.698,9	-4.213	5.097,2	-4.644,4

Tabla 4-17 **Hipótesis 3** (Mantenimiento predominante con Viento Longitudinal) - S1

Sección	Axial (N)		M _y (N·m)		M _z (N·m)		FCz		FCy	
	Min	Máx.	Min	Min	Máx.	Min	Min	Min	Máx.	Min
Cordones Poste	238.800	-274.920	255,52	-520,71	4070,7	-520,71	100,54	-7,20	106.470	-113.300
Diagonales Poste	77.062	-74.193								
Cordones Dintel	81.788	-88.808	1633	-1552,9	1556,5	-1693,9	10.381	-7.241,2	10.351	-7.315,4
Barras Dintel	27.516	-23.937								
Silleta cuadrada	20.336	-5.303,7	727,31	-111,440	1093,1	-1762,3	880,82	-1.093,7	5.187,90	-3.633,8
Jabalcones	-980,32	-15.920	206,31	142,24	33,660	-29,21	-227,03	-740,75	304,96	-339,65
Soporte ménsula	275,66	-368,56	1082,3	-159,66	1885	-1551,9	2.883	-3.430,9	4.581,60	-4.731,1

Tabla 4-18 **Hipótesis 4** (Mantenimiento predominante con Viento Transversal) - S1

Sección	Axial (N)		M _y (N·m)		M _z (N·m)		FCz		FCy	
	Min	Máx.	Min	Min	Máx.	Min	Min	Min	Máx.	Min
Cordones Poste	193.520	-227.070	47225	-47403	3277,1	-3784,8	6.077,2	-6.075,4	83.290	-90.765
Diagonales Poste	61.547	-59.228	-	-	-	-	-	-	-	-
Cordones Dintel	124.520	-131.290	1548,1	-1393,6	1481,9	-1619,9	8.842,4	-7.883,5	8.609,1	-7.950,9
Barras Dintel	25.658	-22.517	-	-	-	-	-	-	-	-
Silleta cuadrada	18.006	-4.101,4	727,31	-113,45	1454,6	-1400,8	825,83	-1.093,7	4.634,6	-3.492,5
Jabalcones	-2.891	-13.320	192,74	152,350	31,17	-27,52	-328,07	-657,78	341,28	-318,18
Soporte ménsula	258,79	333,87	1110,6	-145,25	1.639,3	-1.798,6	2.958,5	-3.473,4	4.428,9	-4.063,7

Tabla 4-19 **Hipótesis 5** (Viento Longitudinal Predominante) - S1

Sección	Axial (N)		M _y (N·m)		M _z (N·m)		FCz		FCy	
	Min	Máx.	Min	Min	Máx.	Min	Min	Min	Máx.	Min
Cordones Poste	267.160	-304.090	254,56	456,49	3958,7	-4165,1	90,02	-6,58	120.750	-127.270
Diagonales Poste	86.592	-83.381	-	-	-	-	-	-	-	-
Cordones Dintel	81.415	-88.387	1623,9	-1633,5	1625,1	-1669,1	11.384	-7.430,2	11.360	-7.456,2
Barras Dintel	29.460	-25.741	-	-	-	-	-	-	-	-
Silleta cuadrada	21.838	-6.087	727,31	-119,28	852,13	-2003,3	851,94	-1.093,7	5.253,2	-3.867
Jabalcones	137,53	-17.578	209,21	144,95	33,25	-29,90	-169,32	-792,89	298,7	-359,7
Soporte ménsula	292,53	-392,92	1063,4	-170,86	2053	-1497,9	2.832,7	-3.402,6	4.957,7	-5.176,1

Tabla 4-20 **Hipótesis 6** (Viento Transversal Predominante) - S1

Sección	Axial (N)		M _y (N·m)		M _z (N·m)		FCz		FCy	
	Min	Máx.	Min	Min	Máx.	Min	Min	Min	Máx.	Min
Cordones Poste	191230	-224500	51.119	-51.298	3.238,8	-3.744,2	7.088,4	-7.086,7	82.259	-89.679
Diagonales Poste	60.806	-58.512	-	-	-	-	-	-	-	-
Cordones Dintel	133.220	-139.800	1.526,4	-1.375,4	1.477,8	-1.617,4	8.792,4	-7.833,7	8.474,9	-7.819,1
Barras Dintel	25.792	-22.696	-	-	-	-	-	-	-	-
Silleta cuadrada	17991	-4096,2	727,31	-116,47	1.454,6	-1.400,8	804,73	-1.093,7	4.514,8	-3.583,8
Jabalcones	-2943,2	-13.296	190,66	155,5	30,5	-27,38	-331,17	-658,21	346,92	-320,04
Soporte ménsula	260,78	-334,28	1.110,6	-145,78	1.640,7	-1.797,6	2.958,5	-3.473,4	4.428,90	-4.063,7

4.2.1.5 Envoltentes

Tabla 4-21 **Valores Máximos Absolutos** - S1

Sección	Axial (N)		M _y (N·m)		M _z (N·m)		FCz		FCy	
	Min	Máx.	Min	Min	Máx.	Min	Min	Min	Máx.	Min
Cordones Poste	267.160	304.090	51.119	51.298	4.070,7	4.165,1	7.088,4	7.086,7	120.750	127.270
Diagonales Poste	86.592	83.381	-	-	-	-	-	-	-	-
Cordones Dintel	133.220	139.800	1.771,6	1.775,3	1.679,7	1.729,6	11.384	8.416,2	11.36	8.564,9
Barras Dintel	31.379	27.600	-	-	-	-	-	-	-	-
Silleta cuadrada	23.824	6.335,4	942,92	139,66	1.885,8	2.193,6	914,44	1.417,9	6.092,2	4.387,6
Jabalcones	4.666,9	18.538	250,16	184,94	37,06	31,38	413,18	858,95	370,24	373,11
Soporte ménsula	334,25	430,75	1.388,3	202,86	2.190,5	2.143,9	3.698,90	4.213	5.448	5.448

Partiendo de la tabla de envolventes, se pueden extraer los valores necesarios a la hora de realizar las comprobaciones. Primero se analizará el cortante máximo por sección para determinar el tipo de análisis a realizar. Para la comprobación de resistencia son necesarios los valores máximos (y absolutos) de flexión en cada eje y el mayor valor de axial independientemente del signo. Finalmente, para la estabilidad se analizará también los valores máximos de flexión y el axial de compresión mayor de cada sección.

Tabla 4-22 Valores para las comprobaciones - S1

Sección	Cortante	Resistencia			Estabilidad		
		Axial Abs.	Flexión (Y y Z)		Compresión	Flexión (Y y Z)	
UPN-260	127.270,00	304.090,00	51.298,00	4.165,10	304.090,00	51.298,00	4.165,10
Pletina 50x20	0,00	86.592,00	0,00	0,00	83.381,00	0,00	0,00
LPN-100x8	11.384,00	139.800,00	1.771,60	1.729,60	139.800,00	1.771,60	1.729,60
LPN-45x5	0,00	31.379,00	0,00	0,00	27.600,00	0,00	0,00
Tubo 80x4	6.092,20	23.824,00	942,92	2.193,60	6.335,40	942,92	2.193,60
Cilindro 54x2,6	858,95	18.538,00	250,16	37,06	18.538,00	250,16	37,06
Tubo 100x6	5.448,00	430,75	1.388,30	2.190,50	430,75	1.388,30	2.190,50

4.2.1.6 Clasificación de las secciones

Para llevar a cabo las comprobaciones necesarias, se requiere primero clasificar las secciones en función de su comportamiento frente a los esfuerzos. De esta forma se puede cuantificar el efecto de la abolladura en las chapas y cómo afecta esto a su respuesta resistente. La Instrucción de Acero Estructural, en su capítulo 5, las clasifica en:

Clase 1. Plásticas. alcanzan su capacidad resistente plástica sin sufrir fenómenos de abolladura.

Clase 2. Compactas. alcanzan su capacidad resistencia plástica, pero la abolladura limita su capacidad de rotación.

Clase 3. Semicompactas. La fibra más comprimida puede alcanzar su límite elástico, pero la presencia de abolladura impide alcanzar su momento resistente plástico.

Clase 4. Esbeltas. La abolladura limita incluso el desarrollo de su capacidad resistente elástica, por lo que ni la fibra más comprimida alcanza el límite elástico.

Se considera, para clases 1 y 2, que la distribución de tensiones sigue un comportamiento plástico, mientras que para clase 3 y 4 se sigue la ley elástica.

Como paso previo a la clasificación de las secciones pueden compararse las tensiones derivadas del axial y del momento flector, de modo que si σ_N es mayor que σ_M , se podrá aproximar la situación de cargas a un caso de axial puro. Esto permite simplificar el proceso ya que existen tablas que recogen la clasificación de las secciones para aquellos perfiles trabajando bajo axial puro. Las tablas de perfiles de Arcelor pueden usarse con este fin.

En el caso de no tratarse de una situación de axial puro, se procederá a calcular la clase tal y como se describe en la EAE.

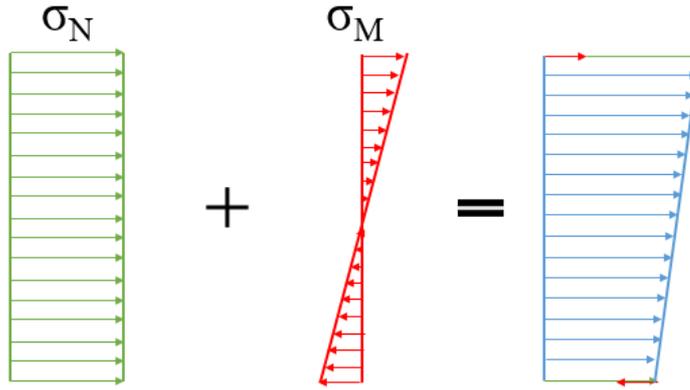


Figura 4-14 Tensione sobre la sección

Tabla 4-23 Asignación de clase – ELU

Cordones Poste – [UPN-260]					
Axial	304.090,00	N	σ_N	62,96	Mpa
Flector	51.298,00	N·m	σ_M	138,27	Mpa
Área	48,3	mm ²	62,96 < 138,27		
Módulo resistente	371	mm ³	$\sigma_N < \sigma_M$	Calcular Clase	

Diagonales Poste – [Pletina rectangular 50x20]					
Axial	86.592,00	N	σ_N	201,38	Mpa
Flector	0,00	N·m	σ_M	0,00	Mpa
Área	4,30	mm ²	201,38 > 0		
Módulo resistente	2,43	mm ³	$\sigma_N > \sigma_M$	Clase 1	

Cordones Dintel – [LPN 100x8]					
Axial	139.800,00	N	σ_N	90,19	Mpa
Flector	1.771,60	N·m	σ_M	88,85	Mpa
Área	15,50	mm ²	90,10 > 88,85		
Módulo resistente	19,94	mm ³	$\sigma_N > \sigma_M$	Clase 2	

Barras Dintel – [LPN 45x5]					
Axial	31.379,00	N	σ_N	39,97	Mpa
Flector	0,00	N·m	σ_M	0,00	Mpa
Área	7,85	mm ²	39,97 > 0		
Módulo resistente	32.241,00	mm ³	$\sigma_N > \sigma_M$	Clase 1	

Silletas cuadradas – [Tubo cuadrado 80x4]					
Axial	23.824,00	N	σ_N	20,54	Mpa
Flector	2.193,60	N·m	σ_M	80,65	Mpa
Área	11,60	mm ²	20,54 < 80,65		
Módulo resistente	27,20	mm ³	$\sigma_N < \sigma_M$	Calcular Clase	

Jabalcones – [Tubo cilíndrico 54x2,6]					
Axial	18.538,00	N	σ_N	55,67	Mpa
Flector	250,16	N·m	σ_M	58,86	Mpa
Área	3,33	mm ²	55,67 < 58,86		
Módulo resistente	4,25	mm ³	$\sigma_N < \sigma_M$	Calcular Clase	

Soporte ménsulas – [Tubo cuadrado 100x6]					
Axial	279,51	N	σ_N	0,20	Mpa
Flector	2.364,40	N·m	σ_M	36,09	Mpa
Área	21,30	mm ²	0,2 < 36,09		
Módulo resistente	60,70	mm ³	$\sigma_N < \sigma_M$	Calcular Clase	

Tras este primer paso, las secciones que han de clasificarse son 4. Para ello se sigue las pautas del apartado 3 del artículo 20 del capítulo 5 de la EAE. Las tablas a utilizar son la 20.3.a, 20.3.b y 30.3.c.

Cordones de Poste – [UPN-260]

Este perfil presenta una distinción clara entre alma y ala, por lo que se recurre a las tablas 20.3.a y 20.3.b. En la primera de estas tablas se analiza la situación de los paneles interiores (en este caso, alma) y en la segunda se analizan las alas voladas.

Clase	Panel flectado	Panel comprimido	Panel flexocomprimido			
Ley de tensiones en los paneles (compresión +)						
1	$\frac{c}{t} \leq 72\epsilon$	$\frac{c}{t} \leq 33\epsilon$	Cuando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ Cuando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$			
2	$\frac{c}{t} \leq 83\epsilon$	$\frac{c}{t} \leq 38\epsilon$	Cuando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ Cuando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$			
Ley de tensiones en los paneles (compresión +)						
3	$\frac{c}{t} \leq 124\epsilon$	$\frac{c}{t} \leq 42\epsilon$	Cuando $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ Cuando $\psi \leq -1^*$: $c/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$			
$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	f_y (N/mm ²)	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Figura 4-15 Tabla 20.3.a de la EAE

Clase	Panel comprimido	Panel flexocomprimido				
		Extremo comprimido	Extremo traccionado			
Ley de tensiones en los paneles (compresión +)						
1	$\frac{c}{t} \leq 9\epsilon$	$\frac{c}{t} \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$\frac{c}{t} \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
2	$\frac{c}{t} \leq 10\epsilon$	$\frac{c}{t} \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$\frac{c}{t} \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
Ley de tensiones en los paneles (compresión +)						
3	$\frac{c}{t} \leq 14\epsilon$	$\frac{c}{t} \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$				
$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	f_y (N/mm ²)	235	275	355	420	460
	α	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Figura 4-16 Tabla 20.3b de la EAE

Para saber la situación en la que se encuentran tanto el alma como el ala, se analiza la distribución de las tensiones en la sección, primero asumiendo un comportamiento plástico, bajo las situaciones de axial y flector.

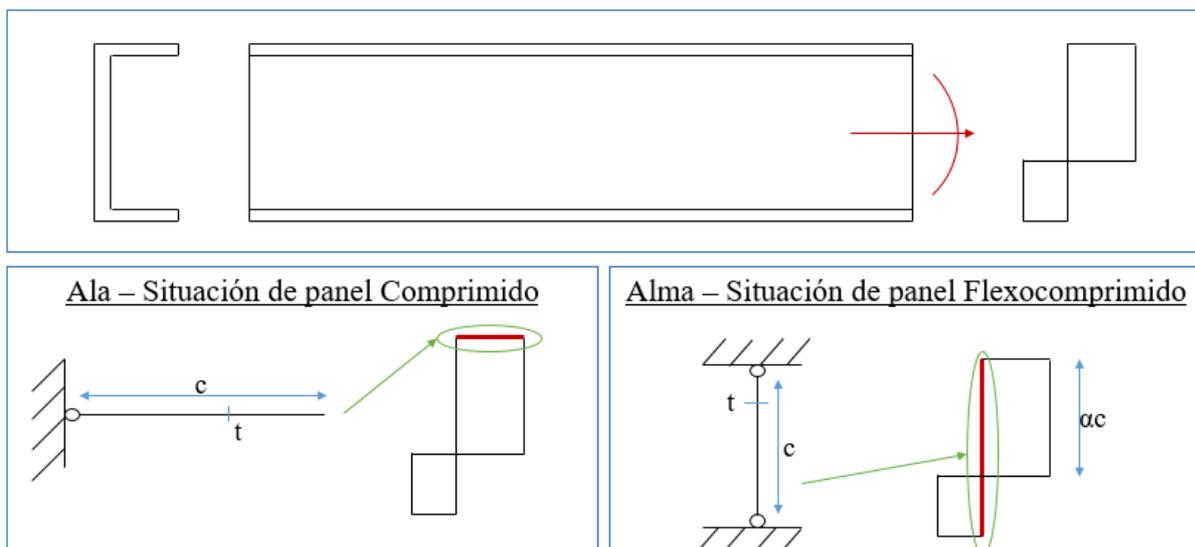


Figura 4-17 Tensiones sobre Ala y Alma - S1

Ala. Se sigue la tabla 20.3.b, primera columna (panel comprimido). Se comprueba la restricción:

$$\frac{c}{t} \leq 9 \cdot \varepsilon \quad (4.51)$$

$$\frac{76mm}{14mm} \leq 9 \cdot 0,92 \quad 5,43 \leq 8,28 \quad (4.52)$$

Al cumplirse esta restricción, la sección del ala será de clase 1.

Alma. Empleando la tabla 20.3.a, tercera columna (panel flexocomprimido), se comprueba que se cumpla una de las siguientes restricciones:

$$\alpha > 0.5 \quad : \quad \frac{c}{t} \leq \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} \quad (4.53)$$

$$\alpha \leq 0.5 \quad : \quad \frac{c}{t} \leq \frac{36 \cdot \varepsilon}{\alpha} \quad (4.54)$$

Donde,

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{N}{2 \cdot c \cdot t \cdot f_y} \quad (4.55)$$

“N” puede ser positivo (compresión) o negativo (tensión). La primera opción es más restrictiva ya que aumenta el valor de α , lo que a su vez reduce el rango para la clasificación. Desde el punto de vista conservador, se usará el término positivo con este fin.

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{304.090 N}{2 \cdot 200mm \cdot 10mm \cdot 275Mpa} = 0,78 \quad (4.56)$$

Como $\alpha > 0.5$ se emplea la primera restricción:

$$\frac{200}{10} \leq \frac{396 \cdot 0.92}{13 \cdot 0.78 - 1} \quad 20 \leq 40,06 \quad (4.57)$$

Tanto el ala como el alma presentan clase 1, por lo tanto a la sección de los perfiles de los postes, UPN-260, se le asignará **clase 1** bajo estas situaciones de cargas.

Silletas cuadradas – [Tubo cuadrado 80x4]

Para este tipo de perfil se emplea también la tabla 20.3.a. Del mismo modo que en el caso anterior el panel se encuentra bajo la acción de axial y flector por lo que se emplean las mismas ecuaciones.

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{6335,60 N}{2 \cdot 60mm \cdot 4mm \cdot 275Mpa} = 0,548 \quad (4.58)$$

$$\frac{60mm}{4mm} \leq \frac{396 \cdot 0.92}{13 \cdot 0.548 - 1} \quad 15 \leq 59,42 \quad (4.59)$$

Cumplida esta restricción, las silletas presentan una sección **de clase 1**.

Jabalcones – [Tubo cilíndrico 54x2,6]

Al tratarse de un perfil circular, se recurre a la tabla 20.3.c. En este caso los parámetros a analizar serán el espesor y el diámetro.

Clase		Sección comprimida				
Ley de tensiones en los paneles (compresión +)						
3		$h/t \leq 15e : \frac{b+h}{2t} \leq 11,5e$				
Clase		Sección flexada y/o comprimida				
1		$\frac{d}{t} \leq 50e^2$				
2		$\frac{d}{t} \leq 70e^2$				
3		$\frac{d}{t} \leq 90e^2$				
$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	f_y (N/mm ²)	235	275	355	420	460
	e	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	e^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

Figura 4-18 Tabla 20.3c de la EAE

$$\frac{d}{t} \leq 50 \cdot \epsilon^2 \quad \frac{54mm}{2,6mm} \leq 50 \cdot 0,92^2 \quad 20,77 \leq 42,32 \quad (4.60)$$

Este resultado implica que los jabalcones presentan una sección **clase 1**.

Soporte ménsulas – [Tubo cuadrado 100x6]

Mismo criterio que para las silletas cuadradas.

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{430,75 N}{2 \cdot 80 \cdot 6 \cdot 275 Mpa} = 0,501 \quad \frac{80}{6} \leq \frac{396 \cdot 0,92}{13 \cdot 0,501 - 1} \quad 13,33 \leq 66,08 \quad (4.61)$$

Cumplida esta restricción, los soportes de ménsulas presentan una sección **de clase 1**.

Tabla 4-24 Resumen de Clase de Sección - S1

Sección	Clase
Cordones Poste – [UPN-260]	1
Diagonales Poste – [Pletina rectangular 50x20]	1
Cordones Dintel – [LPN 100x8]	2
Barras Dintel – [LPN 45x5]	1
Silletas cuadradas – [Tubo cuadrado 80x4]	1
Jabalcones – [Tubo cilíndrico 54x2,6]	1
Soporte ménsulas – [Tubo cuadrado 100x6]	1

4.2.1.7 Comprobación de Cortante

Previamente a las comprobaciones de resistencia y estabilidad, se procede a comprobar si las fuerzas cortantes cumplen o no el criterio de la EAE en su punto 34.7.1:

“Cuando el valor del esfuerzo cortante V_{Ed} no supere el 50% de la resistencia plástica de la sección, $V_{pl,Rd}$, no deberá reducirse el valor de la resistencia de cálculo de la sección a flexión”

Donde,

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{pl,Rd}}{2} \quad (4.62)$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_{cortante} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (4.63)$$

Para ello se toman los valores máximos de la envolvente del cortante para cada sección.

Tabla 4-25 Comprobación de Cortante - S1

FCz_i		FCz_j		FCy_i		FCy_j	
Máx.	Min	Máx.	Min	Máx.	Min	Máx.	Min
7.088,40	7.086,70	7.088,40	7.086,70	120.750,00	127.270,00	120.750,00	127.270,00
-	-	-	-	-	-	-	-
11.384,00	8.416,20	11.384,00	8.416,20	11.360,00	8.564,90	11.360,00	8.564,90
-	-	-	-	-	-	-	-
914,44	1.417,90	914,44	1.417,90	6.092,20	4.387,60	6.092,20	4.387,60
413,18	858,95	413,18	858,95	370,24	373,11	370,24	373,11
3.698,90	4.213,00	3.698,90	4.213,00	5.448,00	5.448,00	5.448,00	5.448,00

Cordones Poste	V_{Ed}	127.270,00	$A_{cortante}$	27,1	V_{pl}	409.781,23	Válido
Diagonales Poste	V_{Ed}	-	$A_{cortante}$	-	V_{pl}	-	-
Cordones Dintel	V_{Ed}	11.384,00	$A_{cortante}$	11	V_{pl}	166.331,86	Válido
Barras Dintel	V_{Ed}	-	$A_{cortante}$	-	V_{pl}	-	-
Silletas cuadradas	V_{Ed}	6.092,20	$A_{cortante}$	5,3	V_{pl}	80.141,72	Válido
Jabalcones	V_{Ed}	858,95	$A_{cortante}$	1,59	V_{pl}	24.042,51	Válido
Soporte ménsulas	V_{Ed}	5.448,00	$A_{cortante}$	8,21	V_{pl}	124.144,05	Válido

En vista a estos resultados se calculará la resistencia de la sección a axial y flexión (apartado 7.2 del artículo 34 del capítulo IX) sin necesidad de emplear reducciones por cortante.

4.2.1.8 Comprobación de Resistencia

Conocidas las acciones sobre los elementos y el tipo de sección, se procede con la primera comprobación para el estado último.

Esta comprobación depende de la clase de las secciones, pero como todas ellas son tipo 1 ó 2, se puede emplear la misma ecuación para todas, donde el módulo resistente usado es el plástico.

$$\frac{N_{Ed}}{A \cdot f_y} + \frac{M_{y,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_y} + \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_y} \leq 1 \quad (4.64)$$

Tabla 4-26 Parámetros para el cálculo de resistencia - S1

M_{Ed}	Momento de cálculo actuando sobre el elemento
N_{Ed}	Valor de cálculo del esfuerzo Axial
W_{pl}	Módulo resistente <u>Plástico</u>
f_y	Límite Elástico del Acero
A	Área sección transversal
γ_{M0}	Resistencia de Secciones Transversales ELU. Tabla 15,3

Esta ecuación considera el valor axial mayor presente en el perfil (de tensión o compresión, indiferentemente), y los valores absolutos de los momentos máximos tanto en eje Z como Y. A continuación, se desarrollan los cálculos para cada sección.

Tabla 4-27 Comprobación de Resistencia - S1

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	304.090,00	$W_{pl,z}$	91,60	Término 1	0,24	≤ 1
$M_{Ed,y}$	51.298,00	A	48,30	Término 2	0,44	
$M_{Ed,z}$	4.165,10	γ_{M0}	1,05	Término 3	0,17	
$W_{pl,y}$	442,00	f_y	275,00	Total	0,85	Válido

Cordones Poste – [UPN-260] Clase 1

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	86.592,00	$W_{pl,z}$	-	Término 1	0,77	≤ 1
$M_{Ed,y}$	-	A	4,30	Término 2	0,00	
$M_{Ed,z}$	-	γ_{M0}	1,05	Término 3	0,00	
$W_{pl,y}$	-	f_y	275,00	Total	0,77	Válido

Diagonales Poste – [Pletina rectangular 50x20] Clase 1

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	139.800,00	$W_{pl,z}$	19,94	Término 1	0,34	≤ 1
$M_{Ed,y}$	1.771,60	A	15,50	Término 2	0,27	
$M_{Ed,z}$	1.729,60	γ_{M0}	1,05	Término 3	0,26	
$W_{pl,y}$	19,94	f_y	275,00	Total	0,88	Válido

Cordones Dintel – [LPN 100x8] Clase 2

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	31.379,00	$W_{pl,z}$	-	Término 1	0,12	≤ 1
$M_{Ed,y}$	-	A	10,00	Término 2	0,00	
$M_{Ed,z}$	-	γ_{M0}	1,05	Término 3	0,00	
$W_{pl,y}$	-	f_y	275,00	Total	0,12	Válido

Barras Dintel – [LPN 45x5] Clase 1

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	23.824,00	$W_{pl,z}$	27,20	Término 1	0,08	≤ 1
$M_{Ed,y}$	942,92	A	11,60	Término 2	0,13	
$M_{Ed,z}$	2.193,60	γ_{M0}	1,05	Término 3	0,31	
$W_{pl,y}$	27,20	f_y	275,00	Total	0,52	Válido

Silletas cuadradas – [Tubo cuadrado 80x4] Clase 1

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	18.538,00	$W_{pl,z}$	6,16	Término 1	0,12	≤ 1
$M_{Ed,y}$	250,16	A	5,78	Término 2	0,16	
$M_{Ed,z}$	37,06	γ_{M0}	1,05	Término 3	0,02	
$W_{pl,y}$	6,16	f_y	275,00	Total	0,30	Válido

Jabalcones – [Tubo cilíndrico 54x2,6] Clase 1

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	430,75	$W_{pl,z}$	60,70	Término 1	0,01	≤ 1
$M_{Ed,y}$	1.388,30	A	21,30	Término 2	0,09	
$M_{Ed,z}$	2.190,50	γ_{M0}	1,05	Término 3	0,14	
$W_{pl,y}$	60,70	f_y	275,00	Total	0,24	Válido

Soporte ménsulas – [Tubo cuadrado 100x6] Clase 1

4.2.1.9 Comprobaciones de Estabilidad

Una vez comprobada la resistencia de la estructura frente a los esfuerzos, se procede a analizar su estabilidad, es decir, su comportamiento frente al fenómeno de pandeo.

Se distinguen dos grupos. Por un lado se analizan los elementos del dintel donde los elementos trabajando principalmente a axial seguirán las pautas del punto 35.1.1 y 35.1.2 de la EAE, mientras que el caso de los cordones del dintel se sigue el apartado 3 del artículo 35 ya que los efectos del flector son considerables.

El otro grupo engloba a los postes en su conjunto, esto es, cordones y diagonales. Este tipo de elementos, llamados soportes compuestos, tienen su propia consideración dentro de la EAE desarrollado en el artículo 71.

Elementos del dintel:

Para los elementos trabajando principalmente a axial se comprueba si el valor de cálculo de axil de compresión (N_{Ed}) es menor que la resistencia a pandeo del elemento ($N_{b,Rd}$).

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \quad (4.65)$$

A la hora de calcular la resistencia a pandeo del elemento hay que tener en cuenta la clase de sección y distinguir entre las clases 1,2 y 3 (que emplean el área de la sección transversal) y la clase 4, que emplea le área efectiva.

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{Clase 1, 2 y 3} \quad (4.66)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{Clase 4} \quad (4.67)$$

El límite elástico del acero (f_y) tiene un valor de 275Mpa y el coeficiente de resistencia de las secciones transversales frente a inestabilidad vale 1.05.

En cuanto al coeficiente de reducción por pandeo (χ) es siempre menor que 1 y se calcula como:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (4.68)$$

Donde,

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (4.69)$$

El coeficiente de imperfección α depende de las curvas de pandeo. Se obtiene de la tabla 35.1.2.a en función de la curva que se aplique a cada caso. Estas curvas se representan en el gráfico 35.1.2 donde se relaciona la esbeltez adimensional con el coeficiente de reducción.

Tabla 4-28 Valor coeficiente de imperfección. Tabla 35.1.2.a

Curva de pandeo	a_0	a	b	c	d
Coeficiente de imperfección α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

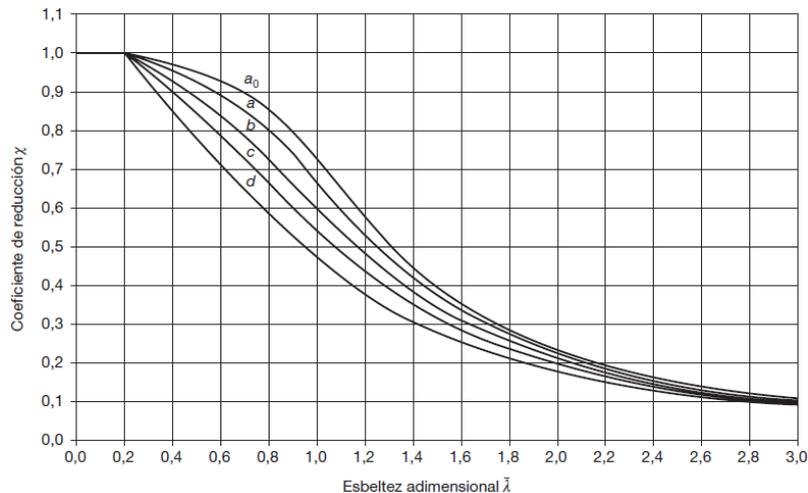


Figura 4-19 Gráfica 35.1.2

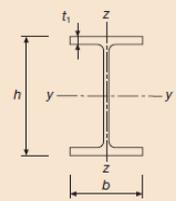
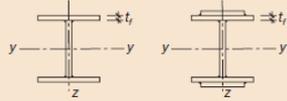
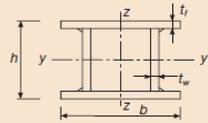
Otra manera de obtener la curva de pandeo consiste en emplear la tabla 35.1.2.b. Dependiendo del tipo de perfil, ejes de pandeo y tipo de acero, se puede hallar la curva.

Conocido el coeficiente de imperfección se calcula la esbeltez adimensional $\bar{\lambda}$ dependiendo nuevamente de la clase de la sección.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad \text{Clase 1, 2 y 3} \quad (4.70)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{ef} \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad \text{Clase 4} \quad (4.71)$$

Tabla 4-29 Elección de curvas de pandeo. Tabla 35.1.2.b

Sección transversal	Límites	Pandeo alrededor del eje	Curva de pandeo	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Secciones de perfiles laminados 	$h/b > 1,2$ $t_f \leq 40 \text{ mm}$	Y-Y	a	a ₀
		Z-Z	b	a ₀
	$h/b > 1,2$ $40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	Y-Y	b	a
		Z-Z	c	a
$h/b \leq 1,2$ $t_f \leq 100 \text{ mm}$	Y-Y	b	a	
	Z-Z	c	a	
$h/b \leq 1,2$ $t_f > 100 \text{ mm}$	Y-Y	d	c	
	Z-Z	d	c	
Secciones de vigas en I armadas soldadas 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	Y-Y	b	b
		Z-Z	c	c
$t_f > 40 \text{ mm}$	Y-Y	c	c	
	Z-Z	d	d	
Secciones de perfiles huecos 	Acabados en caliente	Cualquiera	a	a ₀
	Conformados en frío	Cualquiera	c	c
Secciones de vigas en cajón armadas soldadas 	En general (excepto caso recuadro inferior)	Cualquiera	b	b
		Soldadura gruesa $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $H/t_w < 30$	Cualquiera	c
Secciones de perfiles en U, en T y macizas 		Cualquiera	c	c
Secciones de perfiles angulares 		Cualquiera	b	b

El esfuerzo axial crítico N_{cr} para pandeo se calcula con la forma clásica:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2} \quad (4.72)$$

El pandeo se analiza en el eje débil, Z, donde el momento de inercia es menor. Por otro lado, la longitud crítica de pandeo se obtiene como:

$$L_{cr} = (L * \beta) \quad (4.73)$$

Donde β es el coeficiente de pandeo que depende de las condiciones de contorno del elemento.

Para los cordones del dintel se busca satisfacer las siguientes restricciones, definidas en el punto 35.3 de EAE para elementos sometidos a compresión y flexión.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

Conocidos ya todos los parámetros que intervienen en este cálculo, se procede a analizar individualmente cada sección.

Tabla 4-30 Comprobación de Estabilidad Dintel - S1

Datos del cálculo				Comprobación			
N_{Ed}	139.800,00	f_y	275,00	N_{cr}	5.335.376,54	N_{Rk}	426250
β	1,00	γ_{m1}	1,05	φ	0,55	K_{yy}	0,9264
L	750,00	I_z	1.448.000,00	$\chi_y=\chi_z$	0,97	K_{yz}	0,5334
L_{crit}	750,00	E	210.000,00	$\bar{\lambda}$	0,28	K_{zy}	0,5558
α	0,34	A	1.550,00	$N_{b,rd}$	393.951,47	K_{zz}	0,8889

Coef. 1	Coef. 2	Coef. 3	Total	Criterio	
0,3549	0,3143	0,1766	0,8458	<1	Válido
0,3549	0,1886	0,2944	0,8378		

Sección 3 LPN-100x8

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	27.600,00	F_y	275,00	N_{cr}	288.876,74	$N_{Ed} < N_{b,Rd}$
β	1,00	γ_{M1}	1,05	φ	0,78	
L	750,00	I_z	78.400,00	χ	0,82	27600 < 91963,06
L_{cr}	750,00	E	210.000,00	$\bar{\lambda}$	0,64	Válido
α	0,34	A	430,00	$N_{b,Rd}$	91.963,06	

Sección 4 LPN-45x5

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	6.335,40	F_y	275,00	N_{cr}	2.255.007,21	$N_{Ed} < N_{b,Rd}$
β	1,00	γ_{M1}	1,05	φ	0,59	
L	1.000,00	I_z	1.088.000,00	χ	0,96	6335,4 < 291343,25
L_{cr}	1.000,00	E	210.000,00	$\bar{\lambda}$	0,38	Válido
α	0,21	A	1.160,00	$N_{b,Rd}$	107.749,76	

Sección 6 Tubo rectangular 80x4

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	1,00	F_y	275,00	N_{cr}	242.496,18	$N_{Ed} < N_{b,Rd}$
β	1.000,00	γ_{M1}	1,05	φ	0,73	
L	1.000,00	I_z	117.000,00	χ	0,88	18538 < 77132,92
L_{cr}	0,21	E	210.000,00	$\bar{\lambda}$	0,61	Válido
α	1,00	A	333,00	$N_{b,Rd}$	77.132,92	

Sección 7 Tubo cilíndrico 54x2,6

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	430,75	F_y	275,00	N_{cr}	6.300.755,45	$N_{Ed} < N_{b,Rd}$
β	1,00	γ_{M1}	1,05	φ	0,56	
L	1.000,00	I_z	3.040.000,00	χ	0,98	430,75 < 544660,84
L_{cr}	1.000,00	E	210.000,00	$\bar{\lambda}$	0,30	Válido
α	0,21	A	2.130,00	$N_{b,Rd}$	544.660,84	

Sección 8 Tubo rectangular 100x6

Pandeo en soportes compuestos:

El criterio de validación consiste en comprobar si la resistencia a pandeo es mayor que el esfuerzo axil de cálculo en el cordón, que es el axil en el centro del elemento compuesto, teniendo en cuenta que este esfuerzo ha de ser calculado en base a N_{Ed} .

$$N_{cor,Ed} = 0,5 \cdot N_{Ed} + \frac{M_{Ed} \cdot h_0 \cdot A_{cor}}{2 \cdot I_{ef}} \quad (4.74)$$

Donde M_{Ed} es el valor de cálculo del máximo momento flector en el centro del elemento compuesto.

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed} \cdot e_0 + M'_{Ed}}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}} \quad (4.75)$$

En esta ecuación,

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{ef}}{L^2} \quad (4.76)$$

M'_{Ed} Es el valor de cálculo máximo de momento flector en el centro del elemento compuesto.

h_0 Es la distancia entre centros de gravedad de los cordones del elemento compuesto

A_{cor} Área de sección transversal de un cordón

e_0 Imperfección geométrica. Se toma $L/500$

I_{ef} Inercia efectiva del elemento compuesto.

S_v Rigidez a cortante

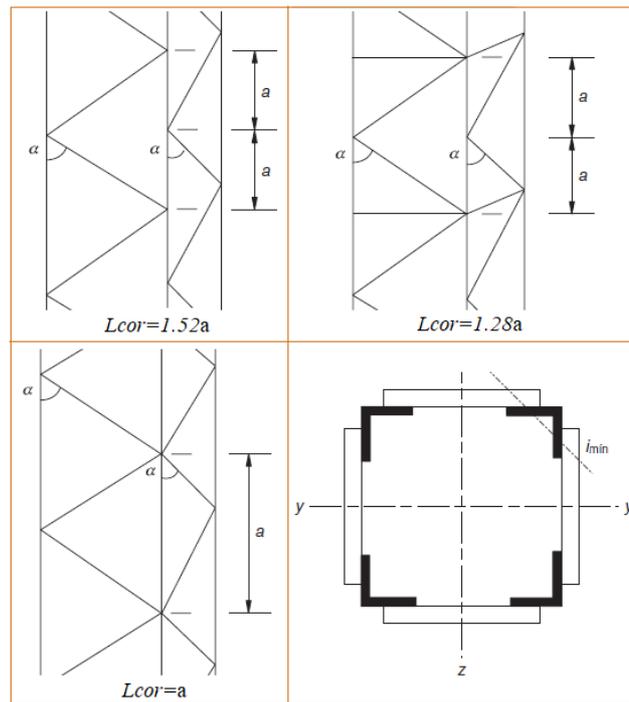
En este caso el poste compuesto conforma una estructura triangulada, por lo que se siguen las fórmulas del apartado 71.2.3.1. Dependiendo del sistema de triangulación puede obtenerse S_v

Tabla 4-31 Tabla 71.2.3.1.a

Sistema de triangulación			
S_v	$\frac{nEA_v a h_0^2}{2d^3}$	$\frac{nEA_v a h_0^2}{d^3}$	$\frac{nEA_v a h_0^2}{d^3 \left[1 + \frac{A_v h_0^3}{A_v d^3} \right]}$

De forma parecida, empleando la tabla 71.2.3.1.b se obtiene la longitud de pandeo del cordón.

Tabla 4-32 Longitud de pandeo. Tabla 71.2.3.1.b



Conocidos los términos de las ecuaciones, se procede con la comprobación.

Tabla 4-33 Obtención del Axial en Soportes compuestos - S1

Datos		Cálculo	
h _o	346,00	L	10.000,00
n	2,00	e _o	20,00
a	600,00	I _{ef}	289.114.140,00
d	721,11	M' _{ed}	107.176,52
A _d	1.000,00	S _v	21.754.765,70
A _{cor}	4.830,00	N _{cr}	5.992.228,60
E	210.000,00	M _{Ed}	13.979.584,58
N _{Ed}	603.790,00	N_{cor,Ed}	342.298,42

De esta forma se ha obtenido el valor del axial equivalente en los cordones. El siguiente punto es comprobar si la resistencia al pandeo de la sección, calculada mediante el pandeo de Euler de igual modo que en el resto de elementos del dintel, es mayor que N_{cor,Ed}

$$N_{cor,Ed} \leq N_{b,Rd} \quad (4.77)$$

Ha de tenerse en cuenta que el perfil HEB presenta un eje fuerte (y-y) y otro débil (z-z) por lo que se han de comprobar ambos. La resistencia de los cordones vendrá limitada por el eje que genere una χ menor.

Para ello se emplea el momento de inercia correspondiente a cada eje así como las longitudes de pandeo, ya sea la longitud total del poste (10m) o la longitud entre nudos (0.6m)

Otra consideración es que los valores de esfuerzos en el soporte serán la suma del máximo sufrido en cada cordón. Por ejemplo, para obtener N_{Ed} se sumarán los 304.090,00N sufridos por el elemento 783 más los 299.700,00N soportados por el elemento 771 del otro cordón, siendo ambos los valores máximos. De igual modo se procede con M'_{Ed}

Tabla 4-34 Comprobación Estabilidad – Eje débil Sección 1 [UPN-260] Clase 1 - S1

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
$N_{cor,Ed}$	342.298,42	f_y	275,00	N_{cr}	11.680.347,82	$N_{cor,Ed} < N_{b,Rd}$
β	1,00	Y_{M1}	1,05	φ	0,58	
L_{cor}	750,00	I_z	3.170.000,00	χ	0,95	342298,42 < 1202120,71
L_{crit}	750,00	E	210.000,00	$\bar{\lambda}$	0,34	Válido
α	0,34	A	4.830,00	$N_{b,Rd}$	1.202.120,71	

Tabla 4-35 Comprobación Estabilidad – Eje fuerte Sección 1 [UPN-260] Clase 1 - S1

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
$N_{cor,Ed}$	342.298,42	f_y	275,00	N_{cr}	999.001,36	$N_{cor,Ed} < N_{b,Rd}$
β	1,00	Y_{M1}	1,05	φ	1,33	
L_{cor}	10.000,00	I_z	48.200.000,00	χ	0,50	342298,42 < 637856,92
L_{crit}	10.000,00	E	210.000,00	$\bar{\lambda}$	1,15	Válido
α	0,34	A	4.830,00	$N_{b,Rd}$	637.856,92	

Por último, solo falta por comprobar la resistencia a pandeo de las diagonales de los soportes. Este procedimiento se hará también mediante el método de Euler. Las secciones son clase 1 como se ha podido calcular con anterioridad.

Tabla 4-36 Comprobación Estabilidad - Sección 2 [Pletina rectangular 50x20] Clase 1 - S1

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
$N_{cor,Ed}$	83.381,00	f_y	275,00	N_{cr}	341.171,51	$N_{cor,Ed} < N_{b,Rd}$
β	1,00	Y_{M1}	1,05	φ	1,07	
L_{cor}	450,00	I_z	33.333,33	χ	0,60	83381 < 157452,65
L_{crit}	450,00	E	210.000,00	$\bar{\lambda}$	0,90	Válido
α	0,49	A	1.000,00	$N_{b,Rd}$	157.452,65	

4.2.1.10 Porcentaje de aprovechamiento

Obtenidas ambas comprobaciones, se puede establecer una envolvente de tensiones para determinar qué grado de aprovechamiento presenta cada sección, considerando las cargas más altas posibles bajo las combinaciones de hipótesis.

Habrán un porcentaje de aprovechamiento para la resistencia y otro para la estabilidad, de modo que el más restrictivo de ellos será el que se tome, siendo la futura referencia para conocer el grado de sobredimensionamiento presente en la estructura.

Tabla 4-37 Porcentaje de Aprovechamiento - S1

	Sección	Resistencia	Estabilidad	Aprovechamiento
1	Cordones Poste	85,71%	53,66%	85,71%
2	Pletinas Poste	76,89%	52,96%	76,89%
3	Cordones Dintel	88,04%	84,58%	88,04%
4	Angulares Dintel	11,98%	30,01%	30,01%
6	Silletas cuadradas	51,87%	2,17%	51,87%
7	Jabalcones cilíndricos	30,05%	24,03%	30,05%
8	Soporte de ménsulas	22,59%	0,08%	22,59%

4.2.2 Situaciones Accidentales (S2)

Evalúa la presencia de acciones poco probables. Los coeficientes parciales son igual a la unidad.

4.2.2.1 Combinaciones

$$\sum_{j \geq 1} Y_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum_{j \geq 1} Y_{G,j}^* \cdot G_{k,j}^* + Y_A \cdot A_k + Y_{Q,1} \cdot \Psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} Y_{Q,i} \cdot \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

H1- Hielo predominante con viento longitudinal

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_A \cdot A_1 + Y_{Q,1} \cdot \Psi_{1,1} \cdot Q_{H,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{2,2} \cdot Q_{V1,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{2,3} \cdot Q_{M,3}$$

H2- Hielo predominante con viento transversal

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_A \cdot A_1 + Y_{Q,1} \cdot \Psi_{1,1} \cdot Q_{H,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{2,2} \cdot Q_{V2,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{2,3} \cdot Q_{M,3}$$

H3- Mantenimiento predominante con viento longitudinal

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_A \cdot A_1 + Y_{Q,1} \cdot \Psi_{1,1} \cdot Q_{M,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{2,2} \cdot Q_{V1,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{2,3} \cdot Q_{H,3}$$

H4- Mantenimiento predominante con viento transversal

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_A \cdot A_1 + Y_{Q,1} \cdot \Psi_{1,1} \cdot Q_{M,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{2,2} \cdot Q_{V2,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{2,3} \cdot Q_{H,3}$$

H5- Viento longitudinal predominante

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_A \cdot A_1 + Y_{Q,1} \cdot \Psi_{1,1} \cdot Q_{V1,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{2,2} \cdot Q_{M,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{2,3} \cdot Q_{H,3}$$

H6- Viento transversal predominante

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_A \cdot A_1 + Y_{Q,1} \cdot \Psi_{1,1} \cdot Q_{V2,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{2,2} \cdot Q_{M,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{2,3} \cdot Q_{H,3}$$

4.2.2.2 Coeficientes

Empleando las mismas tablas que en la situación anterior se obtienen los coeficientes parciales y de simultaneidad. Del mismo modo se procede para determinar los parámetros.

$$X_1 \cdot G_{P2} + X_2 \cdot Q_H + X_3 \cdot Q_M + X_4 \cdot Q_{V1} + X_5 \cdot Q_{V2} + X_6 \cdot A$$

En este caso hay presencia del parámetro X_6 vinculado a la carga accidental.

Tabla 4-38 Parámetros para cada hipótesis – S2

Parámetro	H1/H2	H3/H4	H5	H6
L_G1	1	1	1	1
X_1	1	1	1	1
X_2	1·0.2	1·0	1·0	1·0
X_3	1·0.6	1·0.7	1·0.6	1·0.6
X_4	0·1	0·1	0.2·1	0·1
X_5	0	0·1	0·1	0.2·1
X_6	1	1	1	1

4.2.2.3 Obtención de Resultados

El procedimiento es el mismo que el descrito en el apartado anterior, se definen las ETables y se realizan los cálculos para cada sección. En este caso, de las 6 hipótesis se tienen 4 efectivas ya que en las situaciones de hielo y mantenimiento no se considera la actuación de ningún tipo de viento.

4.2.1.4 Resultados

En las siguientes tablas se recogen los valores resultantes del cálculo:

Tabla 4-39 **Hipótesis 1/2** (Hielo predominante con viento indiferente) - S2

Sección	Axial (N)		M _y (N·m)		M _z (N·m)		FCz		FCy	
	Min	Máx.	Min	Min	Máx.	Min	Min	Min	Máx.	Min
Cordones Poste	131.170	-154.500	88.880	-95.552	2.204,8	-2.507,8	24.237	-14.801	56.334	-61.415
Diagonales Poste	41.532	-40.087	-	-	-	-	-	-	-	-
Cordones Dintel	240.180	-233.460	6.191,7	-2.702,1	6.257,8	-2.884,1	13.931	-22.135	24.788	-15.791
Barras Dintel	93.117	-93.805	-	-	-	-	-	-	-	-
Silleta cuadrada	22.825	-22.286	1.698	-583,74	873,06	-833,22	7.519,5	-9.026,7	4.215	-3.894
Jabalcones	9.087,9	-20.255	138,29	89,51	88,91	-121,9	-291,8	-426,6	1.677,4	-1.217,2
Soporte ménsula	19.687	-19.687	691,04	-139,84	1.085,6	-1.155,6	1.840,5	-17.740	2.963,9	-2.952,1

Tabla 4-40 **Hipótesis 3/4** (Mantenimiento predominante con viento indiferente) - S2

Sección	Axial (N)		M _y (N·m)		M _z (N·m)		FCz		FCy	
	Min	Máx.	Min	Min	Máx.	Min	Min	Min	Máx.	Min
Cordones Poste	126.730	-149.370	88.880	-95.552	2.128,1	-2.420,9	24.237	-14.809	54.327	-59.291
Diagonales Poste	40.089	-38.700	-	-	-	-	-	-	-	-
Cordones Dintel	238.380	-231.480	6.154,1	-2.697,4	6.255,8	-2.880,8	13.894	-22.086	24.660	-15.695
Barras Dintel	83.146	-83.405	-	-	-	-	-	-	-	-
Silleta cuadrada	22.408	-22.674	1.689,9	-582,89	758,06	-718,23	7.554,2	-9.020	4.193,8	-3.892,6
Jabalcones	9.654,2	-19.557	128,29	77,81	88	-121,34	-270,31	-390,73	1.677,9	-1.215,6
Soporte ménsula	19.687	-19.687	617	-128,09	1.004,1	-1.063,5	1.643	-17.669	2.785,7	-2.946,2

Tabla 4-41 **Hipótesis 5** (Viento longitudinal predominante) - S2

Sección	Axial (N)		M _y (N·m)		M _z (N·m)		FCz		FCy	
	Min	Máx.	Min	Min	Máx.	Min	Min	Min	Máx.	Min
Cordones Poste	136.01	-159.370	88.879	-95.550	2.294,9	-2.583,5	24.236	-14.812	59.197	-64.038
Diagonales Poste	43.345	-41.839	-	-	-	-	-	-	-	-
Cordones Dintel	237.840	-231.120	6.186	-2.679,8	6.269	-2.880	13.866	-22.105	24.690	-15.640
Barras Dintel	83.051	-83.555	-	-	-	-	-	-	-	-
Silleta cuadrada	22.715	-22.977	1.685,7	-584	677,7	-798,56	7.569,3	-9.009,9	4.337,8	-3.776,2
Jabalcones	9.266,3	-20.109	120,24	86,58	74,84	-101,16	-284,83	-405,01	1.670,7	-1.220
Soporte ménsula	19.687	-19.687	610,71	-128,52	1.060,1	-1.007,8	1.626,2	-17.613	2.637,9	-2.954,4

Tabla 4-42 **Hipótesis 6** (Viento transversal predominante) - S2

Sección	Axial (N)		M _y (N·m)		M _z (N·m)		FC _z		FC _y	
	Min	Máx.	Min	Min	Máx.	Min	Min	Min	Máx.	Min
Cordones Poste	126.160	-148.730	98.759	-106.080	2.118,5	-2.412,3	23.809	-14.383	54.047	-59.013
Diagonales Poste	39.898	-38.514	-	-	-	-	-	-	-	-
Cordones Dintel	251.040	-244.300	6.145,1	-2.742,9	6.364,4	-2.937,3	14.338	-22.529	24.797	-15.829
Barras Dintel	85.056	-83.432	-	-	-	-	-	-	-	-
Silleta cuadrada	22.496	-22.844	1.686,3	-581,61	758,06	-718,23	7.577,8	-9.023,1	4.163,5	-3.912,6
Jabalcones	9.605	-19.531	124,04	83,56	74,28	-100,78	-268,52	-390,18	1.675,9	-1.209,8
Soporte ménsula	19.687	-19.687	617,00	-116,63	1.001,3	-1.065,8	1.643	-17.691	2.785	-2.938

4.2.2.5 Envolventes

Tabla 4-43 **Valores Máximos Absolutos** - S2

Sección	Axial (N)		M _y (N·m)		M _z (N·m)		FC _z		FC _y	
	Min	Máx.	Min	Min	Máx.	Min	Min	Min	Máx.	Min
Cordones Poste	136.010	169.370	98.759	106.080	2.294,9	2.583,5	24.237	14.812	59.197	64.038
Diagonales Poste	43.345	41.839	-	-	-	-	-	-	-	-
Cordones Dintel	251.040	244.300	6.191,7	2.742,9	6.364,7	2.937,3	14.338	22.529	24.791	15.829
Barras Dintel	93.117	93.805	-	-	-	-	-	-	-	-
Silleta cuadrada	22.825	22.977	1.698	584	873,06	833,22	7.577,80	9.026,7	4.337,8	3.912,6
Jabalcones	9.654,2	20.255	138,29	89,51	88,91	121,9	291,8	426,6	1.677,9	1.220
Soporte ménsula	19.687	19.687	691,04	139,84	1.085,6	1.155,6	1.840,5	17.740	2.963,9	2.954,4

De nuevo, se tomarán los valores máximos de axial (negativos) para analizar el pandeo en cada sección, y los axiales positivos juntos con los momentos flectores, para efectuar la comprobación de la combinación de axial con flexión.

Tabla 4-44 **Valores para las comprobaciones** - S2

Sección	Cortante	Resistencia			Estabilidad		
		Axial	Flexión		Compresión	Flexión	
UPN-260	64.038,00	159.370,00	106.080,00	2.583,50	159.370,00	106.080,00	2.583,50
Pletina 50x20	0,00	43.345,00	0,00	0,00	41.839,00	0,00	0,00
LPN-100x8	24.791,00	251.040,00	6.191,70	6.364,70	244.300,00	6.191,70	6.364,70
LPN-45x5	0,00	93.117	0,00	0,00	93.805,00	0,00	0,00
Tubo 80x4	9.026,70	22.977,00	1.698,00	873,06	22.977,00	1.698,00	873,06
Cilindro 54x2,6	1.677,90	20.255,00	138,29	121,90	20.255,00	138,29	121,90
Tubo 100x6	17.740,00	19.687,00	691,04	1.155,60	19.687,00	691,04	1.155,60

4.2.2.6 Clasificación de las Secciones.

Las secciones ya se habían clasificado para los supuestos anteriores pero ahora la situación de tensiones dentro de los perfiles puede cambiar al tratarse de cargas distintas. Esto implica una nueva comprobación siguiendo los mismos criterios que los empleados anteriormente.

Se comprobará si alguna de las secciones se puede asimilar a un caso de compresión pura y simplificar así el proceso.

Tabla 4-45 Asignación de clase - S2

Cordones Poste – [UPN-260]					
Axial	159370	N	σ_N	33,00	Mpa
Flector	106080	N·m	σ_M	285,93	Mpa
Área	48,3	mm ²	33,00 < 285,93		
Módulo resistente	371	mm ³	$\sigma_N < \sigma_M$	Calcular Clase	

Diagonales Poste – [Pletina rectangular 50x20]					
Axial	43345	N	σ_N	100,80	Mpa
Flector	0	N·m	σ_M	0,00	Mpa
Área	4,3	mm ²	100,80 > 0		
Módulo resistente	2,43	mm ³	$\sigma_N > \sigma_M$	Clase 1	

Cordones Dintel – [LPN 100x8]					
Axial	251040	N	σ_N	161,96	Mpa
Flector	6364,7	N·m	σ_M	319,19	Mpa
Área	15,5	mm ²	120,80 > 107,21		
Módulo resistente	19,94	mm ³	$\sigma_N > \sigma_M$	Calcular Clase	

Barras Dintel – [LPN 45x5]					
Axial	93805	N	σ_N	119,50	Mpa
Flector	0	N·m	σ_M	0,00	Mpa
Área	7,85	mm ²	119,50 > 0		
Módulo resistente	85056	mm ³	$\sigma_N > \sigma_M$	Clase 1	

Silletas cuadradas – [Tubo cuadrado 80x4]					
Axial	22977	N	σ_N	19,81	Mpa
Flector	1698	N·m	σ_M	62,43	Mpa
Área	11,6	mm ²	19,81 < 62,43		
Módulo resistente	27,2	mm ³	$\sigma_N < \sigma_M$	Calcular Clase	

Jabalcones – [Tubo cilíndrico 54x2,6]					
Axial	20255	N	σ_N	60,83	Mpa
Flector	138,29	N·m	σ_M	32,54	Mpa
Área	3,33	mm ²	60,83 < 32,54		
Módulo resistente	4,25	mm ³	$\sigma_N < \sigma_M$	Clase 1	

Soporte ménsulas – [Tubo cuadrado 100x6]					
Axial	19687	N	σ_N	9,24	Mpa
Flector	1155,6	N·m	σ_M	19,04	Mpa
Área	21,3	mm ²	9,24 < 19,04		
Módulo resistente	60,7	mm ³	$\sigma_N < \sigma_M$	Calcular Clase	

Cordones Poste – [UPN-260]

Este perfil presenta una distinción clara entre alma y ala, por lo que se recurre a las tablas 20.3.a y 20.3.b donde en la primera se analiza la situación de los paneles interiores (en este caso alma) y en la segunda se analizan las alas voladas

Para saber la situación en la que se encuentran tanto el alma como el ala, se analiza la distribución de las tensiones en la sección, primero asumiendo un comportamiento plástico, bajo las situaciones de axial y flector.

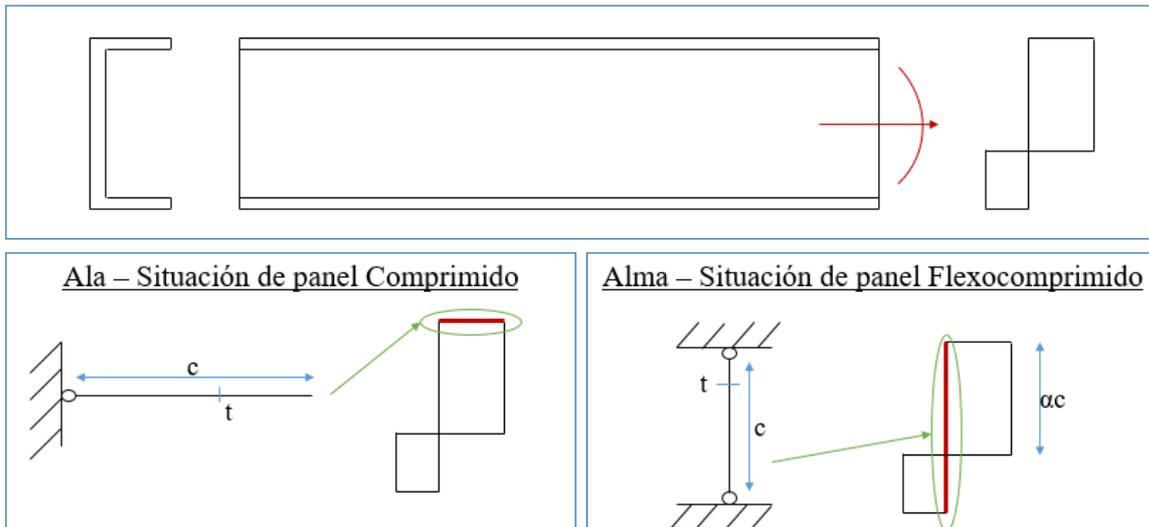


Figura 4-20 Tensiones en ala y Alma - S2

Ala. Se sigue la tabla 20.3.b, primera columna (panel comprimido) se comprueba la siguiente restricción.

$$\frac{c}{t} \leq 9 \cdot \varepsilon \quad (4.78)$$

$$\frac{76mm}{14mm} \leq 9 \cdot 0,92 \quad 5,43 \leq 8,28 \quad (4.79)$$

Al cumplirse esta restricción, la sección del ala será de clase 1.

Alma. Empleando la tabla 20.3.a, tercera columna (panel flexocomprimido), se comprueba que se cumplan las siguientes restricciones.

$$\alpha > 0.5 \quad : \quad \frac{c}{t} \leq \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} \quad (4.80)$$

$$\alpha \leq 0.5 \quad : \quad \frac{c}{t} \leq \frac{36 \cdot \varepsilon}{\alpha} \quad (4.81)$$

Donde,

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{N}{2 \cdot c \cdot t \cdot f_y} \quad (4.82)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{159370 N}{2 \cdot 200mm \cdot 10mm \cdot 275Mpa} = 0,64 \quad (4.83)$$

Se emplea la primera restricción:

$$\frac{200}{10} \leq \frac{396 \cdot 0.92}{13 \cdot 0.64 - 1} \quad 20 \leq 49,34 \quad (4.84)$$

Como tanto el ala como el alma presentan clase 1, a la sección de los perfiles de los postes, UPN-260, se le asignará sección **clase 1** bajo estas situaciones de cargas.

Cordones Dintel – [LPN 100x8]

Este tipo de sección puede ser analizado con la tabla 20.3.b considerando uno de sus lados como un ala comprimida. Las ecuaciones son:

$$\frac{c}{t} \leq 14 \cdot \varepsilon \quad \frac{100mm}{8mm} \leq 14 \cdot 0,92 \quad 12,5 \leq 12,88 \quad (4.85)$$

Este resultado implica que la sección presenta una **clase 3**.

Silletas cuadradas – [Tubo cuadrado 80x4]

Para este tipo de perfil se emplea también la tabla 20.3.a. El panel interior se encuentra bajo la acción de axial y flector por lo que se emplean las ecuaciones:

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{22977N}{2 \cdot 60mm \cdot 4mm \cdot 275Mpa} = 0,674 \frac{c}{t} \leq 14 \cdot \varepsilon \quad \frac{100mm}{8mm} \leq 14 \cdot 0,92 \quad 12,5 \leq 12,88 \quad (4.86)$$

$$\frac{60mm}{4mm} \leq \frac{396 \cdot 0.92}{13 \cdot 0,674 - 1} \quad 15 \leq 46,93 \quad (4.87)$$

Cumplida esta restricción, las silletas presentan una sección de **clase 1**.

Soporte ménsulas – [Tubo cuadrado 100x6]

Mismo criterio que para las silletas cuadradas.

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{19687 N}{2 \cdot 80 \cdot 6 \cdot 275Mpa} = 0,574 \quad \frac{80}{6} \leq \frac{396 \cdot 0.92}{13 \cdot 0,574 - 1} \quad 13,33 \leq 56,31 \quad (4.88)$$

Cumplida esta restricción, los jabalones presentan una sección de **clase 1**.

Tabla 4-46 Resumen de Clase de Sección - S2

Sección	Clase
Cordones Poste – [UPN-260]	1
Diagonales Poste – [Pletina rectangular 50x20]	1
Cordones Dintel – [LPN 100x8]	3
Barras Dintel – [LPN 45x5]	1
Silletas cuadradas – [Tubo cuadrado 80x4]	1
Jabalones – [Tubo cilíndrico 54x2,6]	1
Soporte ménsulas – [Tubo cuadrado 100x6]	1

4.2.1.7 Comprobación de Cortante

Previamente a las comprobaciones de resistencia y estabilidad, se procede a comprobar si las fuerzas cortantes cumplen o no el criterio de la EAE en su punto 34.7.1:

“Cuando el valor del esfuerzo cortante V_{Ed} no supere el 50% de la resistencia plástica de la sección, $V_{pl,Rd}$, no deberá reducirse el valor de la resistencia de cálculo de la sección a flexión”

Donde,

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{pl,Rd}}{2} \quad (4.89)$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_{cortante} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (4.90)$$

Tabla 4-47 Comprobación de Cortante - S2

FCz_i		FCz_j		FCy_i		FCy_j	
Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min
24.237,00	14.812,00	24.237,00	14.809,00	59.197,00	64.038,00	56.334,00	64.038,00
14.338,00	22.529,00	14.338,00	22.529,00	24.791,00	15.829,00	24.791,00	15.829,00
7.577,80	9.026,70	7.577,80	9.026,70	4.337,80	3.912,60	4.337,80	3.912,60
291,80	426,60	291,80	426,60	1.677,90	1.220,00	1.677,90	1.220,00
1.840,50	17.740,00	1.840,50	17.740,00	2.963,90	2.954,40	2.963,90	2.954,40

Cordones Poste	V_{Ed}	64.038,00	$A_{cortante}$	27,1	V_{pl}	409.781,23	Válido
Diagonales Poste	V_{Ed}	-	$A_{cortante}$	-	V_{pl}	-	-
Cordones Dintel	V_{Ed}	24.791,00	$A_{cortante}$	11	V_{pl}	166.331,86	Válido
Barras Dintel	V_{Ed}	-	$A_{cortante}$	-	V_{pl}	-	-
Silletas cuadradas	V_{Ed}	9.026,70	$A_{cortante}$	5,3	V_{pl}	80.141,72	Válido
Jabalcones	V_{Ed}	1.677,90	$A_{cortante}$	1,59	V_{pl}	24.042,51	Válido
Soporte ménsulas	V_{Ed}	17.740,00	$A_{cortante}$	8,21	V_{pl}	124.144,05	Válido

En vista a estos resultados se calculará la resistencia de la sección a axial y flexión (apartado 7.2 del artículo 34 del capítulo IX) sin necesidad de emplear reducciones por cortante

4.2.2.8 Comprobación de Resistencia

Conocidas las acciones sobre los elementos y el tipo de sección, se procede con la primera comprobación para el estado último.

Esta comprobación depende de la clase de las secciones, por una lado para las de clase 1 o 2, se puede emplear la siguiente ecuación, (donde el módulo resistente es el plástico).

$$\frac{N_{Ed}}{A \cdot f_y} + \frac{M_{y,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_y} + \frac{M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_y} \leq 1 \quad (4.91)$$

Tabla 4-48 Parámetros para comprobaciones de resistencia clase 1 - S2

M_{Ed}	Momento de cálculo actuando sobre el elemento
N_{Ed}	Valor de cálculo del esfuerzo Axial
W_{pl}	Módulo resistente <u>Plástico</u>
f_y	Límite Elástico del Acero
A	Área sección transversal
γ_{M0}	Resistencia de Secciones Transversales ELU. Tabla 15,3

Mientras que para la sección clase 3 se emplea una ecuación cuya única diferencia radica en el empleo del módulo resistente elástico en lugar del plástico. Esto se debe a la diferencia de comportamiento entre secciones ya que en las de clase 3 se alcanzaría el límite elástico, pero no permite llegar a su momento resistente plástico.

$$\frac{N_{Ed}}{A \cdot f_y} + \frac{M_{y,Ed}}{W_{el,y} \cdot f_y} + \frac{M_{z,Ed}}{W_{el,z} \cdot f_y} \leq 1 \quad (4.92)$$

Tabla 4-49 Parámetros para comprobaciones de resistencias clase 3 - S2

M_{Ed}	Momento de cálculo actuando sobre el elemento
N_{Ed}	Valor de cálculo del esfuerzo Axial
W_{el}	Módulo resistente <u>Elástico</u>
f_y	Límite Elástico del Acero
A	Área sección transversal
γ_{M0}	Resistencia de Secciones Transversales ELU. Tabla 15,3

Estas ecuaciones consideran el valor axial mayor presente en el perfil (de tensión o compresión, indiferentemente), y los valores absolutos de los momentos máximos tanto en eje Z como Y. A continuación se desarrollan los cálculos para cada sección.

Tabla 4-50 Comprobación de Resistencia – S2

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	169.370,00	$W_{pl,z}$	91,60	Término 1	0,13	≤ 1
$M_{Ed,y}$	106.080,00	A	48,30	Término 2	0,92	
$M_{Ed,z}$	2.583,50	γ_{M0}	1,05	Término 3	0,11	
$W_{pl,y}$	442,00	f_y	275,00	Total	1,16	No válido

Cordones Poste – [UPN-260] Clase 1

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	43.345,00	$W_{pl,z}$	-	Término 1	0,38	≤ 1
$M_{Ed,y}$	-	A	4,30	Término 2	0,00	
$M_{Ed,z}$	-	γ_{M0}	1,05	Término 3	0,00	
$W_{pl,y}$	-	f_y	275,00	Total	0,38	Válido

Diagonales Poste – [Pletina rectangular 50x20] Clase 1

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	251.040,00	$W_{pl,z}$	19,94	Término 1	0,62	≤ 1
$M_{Ed,y}$	6.191,70	A	15,50	Término 2	0,95	
$M_{Ed,z}$	6.364,70	γ_{M0}	1,05	Término 3	0,97	
$W_{pl,y}$	19,94	f_y	275,00	Total	2,54	No válido

Cordones Dintel – [LPN 100x8] Clase 2

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	93.805	$W_{pl,z}$	0,00	Término 1	0,36	≤ 1
$M_{Ed,y}$	0,00	A	10,00	Término 2	0,00	
$M_{Ed,z}$	0,00	γ_{M0}	1,05	Término 3	0,00	
$W_{pl,y}$	0,00	f_y	275,00	Total	0,36	Válido

Barras Dintel – [LPN 45x5] Clase 1

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	22.977,00	$W_{pl,z}$	27,20	Término 1	0,08	≤ 1
$M_{Ed,y}$	1.698,00	A	11,60	Término 2	0,24	
$M_{Ed,z}$	873,06	γ_{M0}	1,05	Término 3	0,12	
$W_{pl,y}$	27,20	f_y	275,00	Total	0,44	Válido

Silletas cuadradas – [Tubo cuadrado 80x4] Clase 1

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	20.255,00	$W_{pl,z}$	6,16	Término 1	0,13	≤ 1
$M_{Ed,y}$	138,29	A	5,78	Término 2	0,09	
$M_{Ed,z}$	121,90	γ_{M0}	1,05	Término 3	0,08	
$W_{pl,y}$	6,16	f_y	275,00	Total	0,30	Válido

Jabalcones – [Tubo cilíndrico 54x2,6] Clase 1

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	19.687,00	$W_{pl,z}$	60,70	Término 1	0,04	≤ 1
$M_{Ed,y}$	691,04	A	21,30	Término 2	0,04	
$M_{Ed,z}$	1.155,60	γ_{M0}	1,05	Término 3	0,07	
$W_{pl,y}$	60,70	f_y	275,00	Total	0,15	Válido

Soporte ménsulas – [Tubo cuadrado 100x6] Clase 1

4.2.2.9 Comprobaciones de Estabilidad

Los criterios seguidos para la comprobación de estabilidad son los mismos que para el caso de acciones permanentes y transitorias.

Pandeo clásico:

Tabla 4-51 Comprobación de Estabilidad Dintel- S2

Datos del cálculo				Comprobación			
N_{Ed}	244.300,00	f_y	275,00	N_{cr}	5.335.376,54	N_{Rk}	426250
β	1,00	γ_{m1}	1,05	ϕ	0,55	K_{yy}	0,9461
L	750,00	L_z	1.448.000,00	$\chi_y=\chi_z$	0,97	K_{yz}	0,5284
L_{crit}	750,00	E	210.000,00	$\bar{\lambda}$	0,28	K_{zy}	0,5677
α	0,34	A	1.550,00	$N_{b,rd}$	393.951,47	K_{zz}	0,8806

Coef. 1	Coef. 2	Coef. 3	Total	Criterio	
0,6202	1,1217	0,6440	2,3858	< 1	No Válido
0,6202	0,6730	1,0733	2,3665		

Sección 3 LPN-100x8

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	93.805,00	F_y	275,00	N_{cr}	288.876,74	$N_{Ed} < N_{b,Rd}$
β	1,00	Y_{M1}	1,05	φ	0,78	93805 > 91963,06
L	750,00	I_z	78.400,00	χ	0,82	
L_{cr}	750,00	E	210.000,00	$\bar{\lambda}$	0,64	No Válido
α	0,34	A	430,00	$N_{b,Rd}$	91.963,06	

Sección 4 LPN-45x5

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	22.977,00	F_y	275,00	N_{cr}	2.255.007,21	$N_{Ed} < N_{b,Rd}$
β	1,00	Y_{M1}	1,05	φ	0,59	22977 < 291343,25
L	1.000,00	I_z	1.088.000,00	χ	0,96	
L_{cr}	1.000,00	E	210.000,00	$\bar{\lambda}$	0,38	Válido
α	0,21	A	1.160,00	$N_{b,Rd}$	291.343,25	

Sección 6 Tubo rectangular 80x4

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	20.255,00	F_y	275,00	N_{cr}	242.496,18	$N_{Ed} < N_{b,Rd}$
β	1,00	Y_{M1}	1,05	φ	0,73	18538 < 77132,92
L	1.000,00	I_z	117.000,00	χ	0,88	
L_{cr}	1.000,00	E	210.000,00	$\bar{\lambda}$	0,61	Válido
α	0,21	A	333,00	$N_{b,Rd}$	77.132,92	

Sección 7 Tubo cilíndrico 54x2,6

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
N_{Ed}	19.687,00	F_y	275,00	N_{cr}	6.300.755,45	$N_{Ed} < N_{b,Rd}$
β	1,00	Y_{M1}	1,05	φ	0,56	430,75 < 544660,84
L	1.000,00	I_z	3.040.000,00	χ	0,98	
L_{cr}	1.000,00	E	210.000,00	$\bar{\lambda}$	0,30	Válido
α	0,21	A	2.130,00	$N_{b,Rd}$	544.660,84	

Sección 8 Tubo rectangular 100x6

Pandeo en soportes compuestos:

Conocidos los términos de las ecuaciones, se procede con la comprobación.

Tabla 4-52 Obtención del Axial en Soportes compuestos – S2

Datos		Cálculo	
h_o	346,00	L	10.000,00
n	2,00	e_o	20,00
a	600,00	I_{ef}	289.114.140,00
d	721,11	M'_{ed}	212.160,00
A_d	1.000,00	S_v	21.754.765,70
A_{cor}	4.830,00	N_{cr}	5.992.228,60
E	210.000,00	M_{Ed}	7.529.869,03
N_{Ed}	338.740,00	$N_{cor,Ed}$	191.132,63

De esta forma se ha obtenido el valor del axial equivalente en los cordones. El siguiente punto es comprobar si la resistencia al pandeo de la sección, calculada mediante el pandeo de Euler de igual modo que en el resto de elementos del dintel, es mayor que $N_{cor,Ed}$

$$N_{cor,Ed} \leq N_{b,Rd} \quad (4.77)$$

Tabla 4-53 Comprobación Estabilidad – Eje débil Sección 1 [UPN-260] Clase 1 – S2

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
$N_{cor,Ed}$	191.132,63	f_y	275,00	N_{cr}	11.680.347,82	$N_{cor,Ed} < N_{b,Rd}$
β	1,00	γ_{MI}	1,05	φ	0,58	191132,63 < 1202120,71
L_{cor}	750,00	I_z	3.170.000,00	χ	0,95	
L_{crit}	750,00	E	210.000,00	$\bar{\lambda}$	0,34	Válido
α	0,34	A	4.830,00	$N_{b,Rd}$	1.202.120,71	

Tabla 4-54 Comprobación Estabilidad – Eje fuerte Sección 1 [UPN-260] Clase 1 – S2

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
$N_{cor,Ed}$	191.132,63	f_y	275,00	N_{cr}	999.001,36	$N_{cor,Ed} < N_{b,Rd}$
β	1,00	γ_{MI}	1,05	φ	1,33	191132,63 < 637856,92
L_{cor}	10.000,00	I_z	48.200.000,00	χ	0,50	
L_{crit}	10.000,00	E	210.000,00	$\bar{\lambda}$	1,15	Válido
α	0,34	A	4.830,00	$N_{b,Rd}$	637.856,92	

Por último, solo falta por comprar la resistencia a pandeo de las diagonales de los soportes. Este procedimiento se hará también mediante el método de Euler. Las secciones son clase 1 como se ha podido calcular con anterioridad.

Tabla 4-55 Comprobación Estabilidad - Sección 2 [Pletina rectangular 50x20] Clase 1 – S2

Datos del cálculo				Comprobación		Criterio
$N_{cor,Ed}$	41.839,00	f_y	275,00	N_{cr}	341.171,51	$N_{cor,Ed} < N_{b,Rd}$
β	1,00	γ_{MI}	1,05	φ	1,07	41839 < 157452,65
L_{cor}	450,00	I_z	33.333,33	χ	0,60	
L_{crit}	450,00	E	210.000,00	$\bar{\lambda}$	0,90	Válido
α	0,49	A	1.000,00	$N_{b,Rd}$	157.452,65	

4.2.1.10 Porcentaje de aprovechamiento

Obtenidas ambas comprobaciones, se puede establecer una envolvente de tensiones para determinar qué grado de aprovechamiento presenta cada sección, considerando las cargas más altas posibles bajo las combinaciones de hipótesis.

Habrà un porcentaje de aprovechamiento para la resistencia y otro para la estabilidad, de modo que el más restrictivo de ellos será el que se toma, siendo una referencia para conocer el grado de sobredimensionamiento presente en la estructura.

Tabla 4-56 Porcentaje de aprovechamiento – S2

Sección	Resistencia	Estabilidad	Aprovechamiento
1 Cordones Poste	115,79%	29,96%	115,79%
2 Pletinas Poste	38,49%	26,57%	38,49%
3 Cordones Dintel	254,07%	238,58%	254,07%
4 Angulares Dintel	35,82%	102,01%	102,01%
6 Silletas cuadradas	43,65%	7,89%	43,65%
7 Jabalcones cilíndricos	29,51%	26,26%	29,51%
8 Soporte de ménsulas	15,14%	3,61%	15,14%

4.3 ELS

Una vez superado el Estado Límite de Servicio, la estructura no colapsa pero deja de cumplir las características de diseño y pierde su funcionalidad. Los parámetros que determinan su viabilidad son la flecha que se alcance en algún punto del dintel y la deflexión de los postes.

Al ser una estructura metálica tipo pórtico podrían seguirse las instrucciones del CET DB-SE, en su punto 4.3.3.1 Flechas, que determinan que las deflexiones en el dintel para este tipo de estructuras deben ser inferior a $L/300$ (siendo L 26m en este caso).

No obstante, debido a lo ya mencionado en los apartados introductorios, la precisión a la hora de determinar la ubicación del hilo de contario ha de ser máxima, por lo que se puede seguir un criterio aún más restrictivo elevando el límite a $L/500$. Este es el criterio seguido por Adif, reflejado en el Tomo 1 de LAC, y será el empleado en estos cálculos.

Esto se hace para evitar que el efecto de la flecha se combine con otros efectos o características de diseño y acabe derivando en una imprecisión de atirantado, por ejemplo. Por lo tanto, el valor límite usado para realizar la comprobación será $L/500$ en el caso del dintel.

En cuanto a los postes, también ha de analizarse su deflexión total ya que no todas las ménsulas se ubican en el dintel, estando las ménsulas 1, 7 y 8 colocadas los postes, de modo que se podría producir en ellas un efecto similar al descrito anteriormente.

En este caso, siguiendo la misma instrucción de Adif, se limita la deflexión de los postes a $L/250$, siendo L 10m.

4.3.1 Combinación poco probable (S3)

El procedimiento es muy similar a lo realizado durante el estudio del ELU aunque emplea otros coeficientes. Se desarrolla a continuación.

4.3.1.1 Combinaciones

$$\sum_{j \geq 1} Y_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum_{j \geq 1} Y_{G,j}^* \cdot G_{k,j}^* + Y_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} Y_{Q,i} \cdot \Psi_{0,1} \cdot Q_{k,i}$$

H1- Hielo predominante con viento longitudinal

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_{Q,1} \cdot Q_{H,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{0,2} \cdot Q_{V1,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{0,3} \cdot Q_{M,3}$$

H2- Hielo predominante con viento transversal

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_{Q,1} \cdot Q_{H,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{0,2} \cdot Q_{V2,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{0,3} \cdot Q_{M,3}$$

H3- Mantenimiento predominante con viento longitudinal

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_{Q,1} \cdot Q_{M,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{0,2} \cdot Q_{V1,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{0,3} \cdot Q_{H,3}$$

H4- Mantenimiento predominante con viento transversal

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_{Q,1} \cdot Q_{M,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{0,2} \cdot Q_{V2,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{0,3} \cdot Q_{H,3}$$

H5- Viento longitudinal predominante

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_{Q,1} \cdot Q_{V1,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{0,2} \cdot Q_{H,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{0,3} \cdot Q_{H,3}$$

H6- Viento transversal predominante

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_{Q,1} \cdot Q_{V2,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{0,2} \cdot Q_{H,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{0,3} \cdot Q_{H,3}$$

4.3.1.2 Coeficientes

Los coeficientes de simultaneidad se obtienen de la misma tabla que para las situaciones Permanentes y Transitorias, mientras que los coeficientes parciales se obtienen de:

Tabla 4-57 Coeficientes Parciales ELS

Tipo	Favorable	Desfavorable
Permanente	1	1
Variable	0	1

$$X_1 \cdot G_{P2} + X_2 \cdot Q_H + X_3 \cdot Q_M + X_4 \cdot Q_{V1} + X_5 \cdot Q_{V2} + X_6 \cdot A$$

Tabla 4-58 Valores de los parámetros para cada hipótesis – S3

Parámetro	H1	H2	H3	H4	H5	H6
L_G1	1	1	1	1	1	1
X_1	1	1	1	1	1	1
X_2	1	1	1·0.5	1·0.5	1·0.5	1·0.5
X_3	0.7·1	0.7·1	1.5	1	1·0.7	1·0.7
X_4	0.6·1	0	0.6·1	0	1	0
X_5	0	0.6·1	0	0.6·1	0	1
X_6	0	0	0	0	0	0

Se muestra el ejemplo de la deformada general del pórtico bajo la hipótesis de cargas 1.

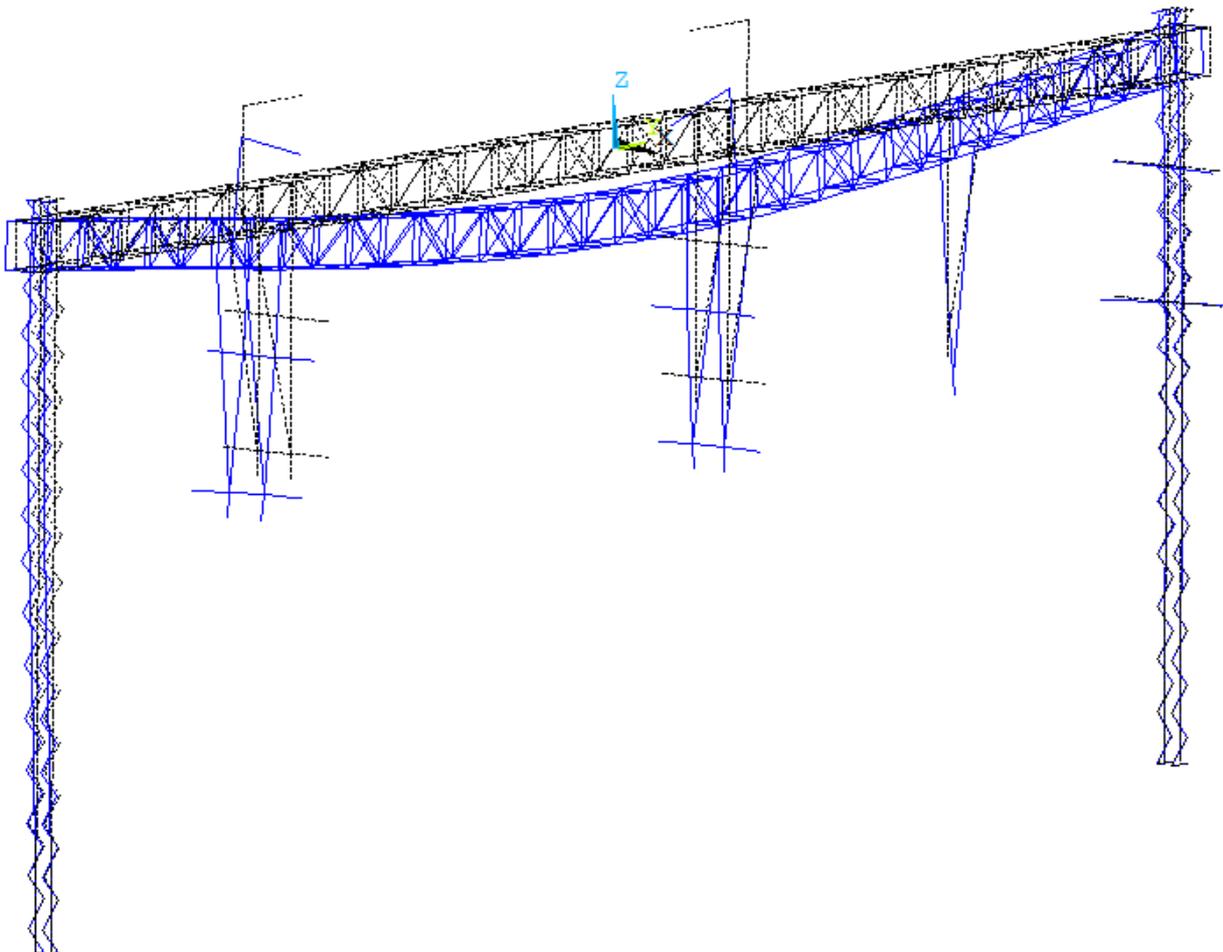


Figura 4-21 Ejemplo de deformada

4.2.2.3 Obtención de Resultados

Como el único criterio de validación es la limitación dada por la flecha, la obtención de los resultados resulta más sencilla. Así como los esfuerzos se analizan en los elementos, los desplazamientos se evalúan en los nodos.

Dintel.

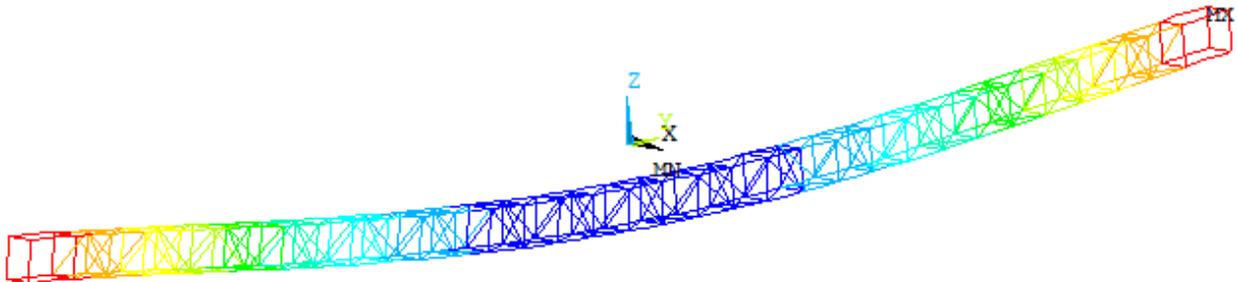


Figura 4-22 Deformaciones en el Dintel, en la coordenada Z.

Para obtener los valores de desplazamiento del dintel basta con generar los resultados en el Posprocesador, seleccionando el desplazamiento vertical en Z dentro de las soluciones nodales.

Como solo interesan los nodos vinculados al dintel, puede hacerse una selección de nodos mediante coordenadas. Al estar el origen de coordenadas en el centro del dintel, los nodos con cota Z entre -0.35 y +0.35 se corresponden con los del dintel.

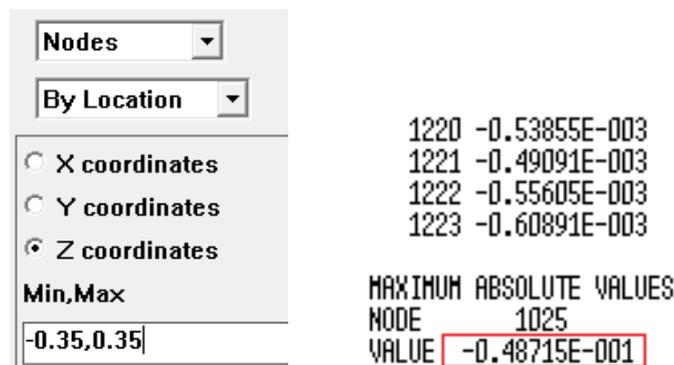


Figura 4-23 Selección de nodos del dintel y desplazamiento nodal máximo

Realizando este procedimiento para cada hipótesis se llega a la tabla resumen, donde se recoge el desplazamiento máximo en los nodos del dintel.

Tabla 4-59 Flechas máximas en el dintel – S3

Hipótesis 1 (Hielo predominante con Viento Longitudinal)	4,76
Hipótesis 2 (Hielo predominante con Viento Transversal)	4,70
Hipótesis 3 (Mantenimiento predominante con Viento Longitudinal)	4,27
Hipótesis 4 (Mantenimiento predominante con Viento Transversal)	4,44
Hipótesis 5 (Viento Longitudinal Predominante)	4,35
Hipótesis 6 (Viento Transversal Predominante)	4,87

$$Flecha \leq \frac{L}{500} \quad 4,87\text{cm} \leq \frac{26\text{m}}{500} \quad 4,87\text{cm} \leq 5,2\text{cm} \quad \text{CUMPLE} \quad (4.93)$$

Postes



Figura 4-24 Deformaciones en los Postes, en la coordenada Y.

Para los postes se analiza el desplazamiento en el eje Y de los nodos con coordenadas entre 12.35 y 12.8 (para el poste derecho) y entre -12.35 y -12.8 para el poste izquierdo.

Realizando este procedimiento para cada hipótesis se llega a la tabla resumen, donde se recoge el desplazamiento máximo en los nodos de los postes.

Tabla 4-60 Flechas máximas en los postes – S3

Hipótesis 1 (Hielo predominante con Viento Longitudinal)	2.37
Hipótesis 2 (Hielo predominante con Viento Transversal)	2.21
Hipótesis 3 (Mantenimiento predominante con Viento Longitudinal)	2.28
Hipótesis 4 (Mantenimiento predominante con Viento Transversal)	1.88
Hipótesis 5 (Viento Longitudinal Predominante)	2.78
Hipótesis 6 (Viento Transversal Predominante)	2.02

$$Flecha \leq \frac{L}{150} \quad 2,78cm \leq \frac{10m}{250} \quad 2.78cm \leq 4cm \quad \text{CUMPLE} \quad (4.94)$$

4.3.2 Combinación frecuente (S4)

A continuación, se desarrolla la última situación.

4.3.2.1 Combinaciones

$$\sum_{j \geq 1} Y_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum_{j \geq 1} Y_{G,j}^* \cdot G_{k,j}^* + Y_{Q,1} \cdot \Psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} Y_{Q,i} \cdot \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

H1- Hielo predominante con viento longitudinal

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_{Q,1} \cdot \Psi_{1,1} \cdot Q_{H,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{2,2} \cdot Q_{V1,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{2,3} \cdot Q_{M,3}$$

H2- Hielo predominante con viento transversal

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_{Q,1} \cdot \Psi_{1,1} \cdot Q_{H,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{2,2} \cdot Q_{V2,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{2,3} \cdot Q_{M,3}$$

H3- Mantenimiento predominante con viento longitudinal

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_{Q,1} \cdot \Psi_{1,1} \cdot Q_{M,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{2,2} \cdot Q_{V1,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{2,3} \cdot Q_{H,3}$$

H4- Mantenimiento predominante con viento transversal

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_{Q,1} \cdot \Psi_{1,1} \cdot Q_{M,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{2,2} \cdot Q_{V2,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{2,3} \cdot Q_{H,3}$$

H5- Viento longitudinal predominante

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_{Q,1} \cdot \Psi_{1,1} \cdot Q_{V1,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{2,2} \cdot Q_{M,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{2,3} \cdot Q_{H,3}$$

H6- Viento transversal predominante

$$Y_{G,1} \cdot G_{P,1} + Y_{G,2} \cdot G_{P,2} + Y_{Q,1} \cdot \Psi_{1,1} \cdot Q_{V2,1} + Y_{Q,2} \cdot \Psi_{2,2} \cdot Q_{M,2} + Y_{Q,3} \cdot \Psi_{2,3} \cdot Q_{H,3}$$

4.3.2.2 Coeficientes

Empleando las mismas tablas que en la situación anterior se obtienen los coeficientes parciales y de simultaneidad. Del mismo modo se procede para determinar los parámetros.

$$X_1 \cdot G_{P2} + X_2 \cdot Q_H + X_3 \cdot Q_M + X_4 \cdot Q_{V1} + X_5 \cdot Q_{V2} + X_6 \cdot A$$

Tabla 4-61 Valores de los parámetros para cada hipótesis – S4

Parámetro	H1/H2	H3/H4	H5	H6
L_G1	1	1	1	1
X_1	1	1	1	1
X_2	1·0.2	1·0	1·0	1·0
X_3	0.6·1	0.7·1	0.6·1	0.6·1
X_4	0·1	0·1	0.2·1	0·1
X_5	0·1	0·1	0·1	0.2·1
X_6	0	0	0	0

4.3.2.3 Obtención de Resultados

El procedimiento es el mismo que el descrito en el apartado anterior. En este caso, de las 6 hipótesis se tienen 4 efectivas.

Dintel

Tabla 4-62 Flechas máximas en el dintel – S4

Hipótesis 1/2 (Hielo predominante con viento indiferente)	4,07
Hipótesis 3/4 (Mantenimiento predominante con viento indiferente)	3,87
Hipótesis 5 (Viento longitudinal predominante)	3,91
Hipótesis 6 (Viento transversal predominante)	3,86

$$Flecha \leq \frac{L}{500} \quad 4,07cm \leq \frac{26m}{500} \quad 4,07cm \leq 5,2cm \quad \text{CUMPLE} \quad (4.95)$$

Postes

Tabla 4-63 Flechas máximas en los postes – S4

Hipótesis 1/2 (Hielo predominante con viento indiferente)	2.13
Hipótesis 3/4 (Mantenimiento predominante con viento indiferente)	1.84
Hipótesis 5 (Viento longitudinal predominante)	2.66
Hipótesis 6 (Viento transversal predominante)	1.92

$$Flecha \leq \frac{L}{250} \quad 4,07cm \leq \frac{10m}{250} \quad 2.66cm \leq 4cm \quad \text{CUMPLE} \quad (4.96)$$

5 ANÁLISIS DINÁMICO

Una vez analizada la estructura bajo condiciones estáticas, se realizará también un análisis modal para extraer las frecuencias naturales de los distintos modos de vibración de la estructura. El enfoque de este apartado presenta dos puntos principales.

- En primer lugar, se analizará el efecto producido sobre los modos de vibración al añadir masa a la estructura. Para ello se compararán 2 modelos.
- La parte central de este apartado será analizar a qué acciones derivadas del paso del tren con potencial para desencadenarse un efecto de resonancia está sometido el pórtico, y concluir si estos fenómenos pueden llegar a ocurrir o no.

5.1 Pórtico sin catenaria (M1)

Se analizarán los modos de vibración y las frecuencias naturales del primer modelo de pórtico, este modelo incluye la estructura principal y silletas pero se excluyen las ménsulas y los conductores.

Para llevar a cabo este análisis, se parte de la estructura modelizada, con sus condiciones de contorno, pero sin aplicar ninguna carga. El tipo de análisis ha de ser cambiado de estático a modal.

Tras eso se selecciona el número de modos de vibración que se obtendrán. Para este análisis se tomarán los 10 primeros modos y no se modifica ningún otro parámetro.

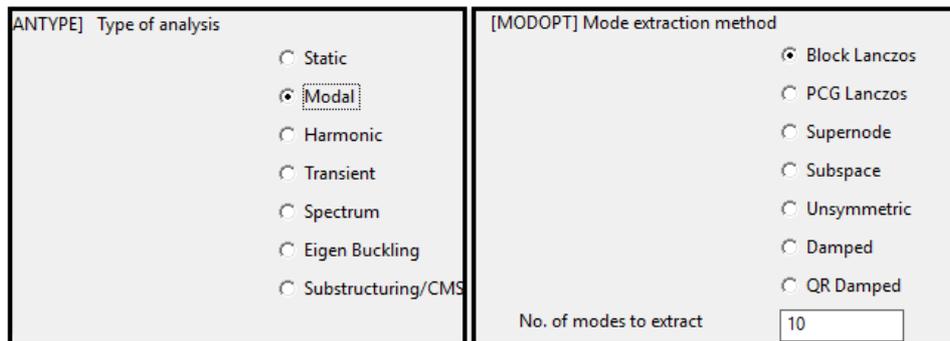


Figura 5-1 Análisis Modal

Al resolver el sistema se pueden obtener las deformadas, que bajo este análisis obedecen a los modos de vibración, una vez seleccionado el set de datos cargados. El primer set se corresponde con el primer modo de vibración y a cada uno se le asigna una deformada. También se puede obtener un resumen de las distintas frecuencias naturales asignadas a cada modo.

```
***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****
```

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	1.0194	1	1	1
2	1.7318	1	2	2
3	2.9176	1	3	3
4	3.2566	1	4	4
5	4.0855	1	5	5
6	4.5023	1	6	6
7	4.8382	1	7	7
8	6.4060	1	8	8
9	8.6899	1	9	9
10	8.9913	1	10	10

Figura 5-2 Frecuencias naturales - M1

A continuación, se muestran los distintos modos obtenidos tras este primer análisis.

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =1
FREQ=1.01942
DMX =.024301

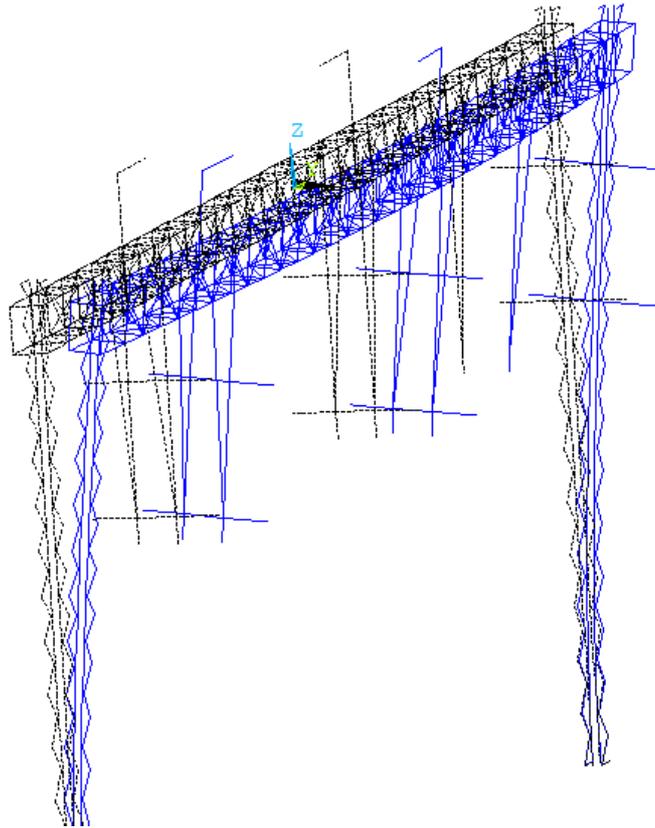


Figura 5-3 Primer modo de Vibración - M1

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =2
FREQ=1.73184
DMX =.029051

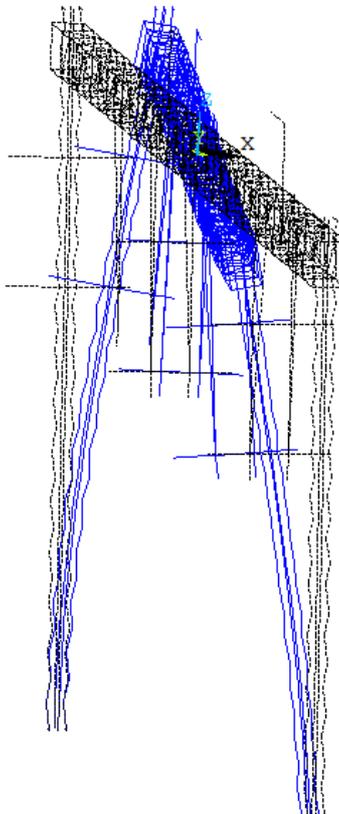


Figura 5-4 Segundo modo de Vibración - M1

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =3
FREQ=2.91761
DMX =.019611

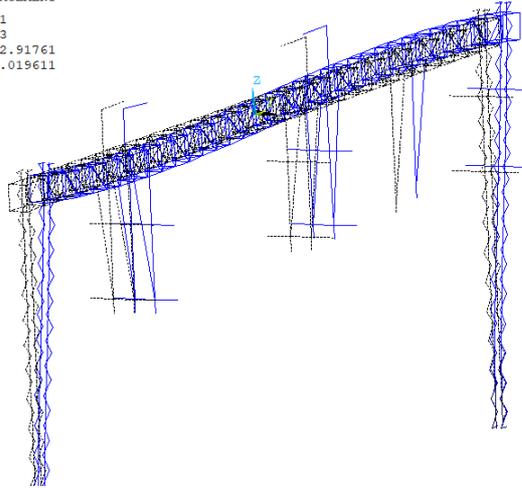


Figura 5-5 Tercer modo de Vibración - M1

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =4
FREQ=3.25662
DMX =.066443

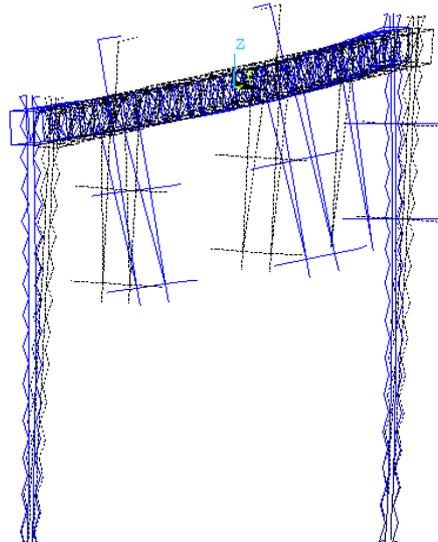


Figura 5-6 Cuarto modo de Vibración - M1

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =5
FREQ=4.08547
DMX =.030049

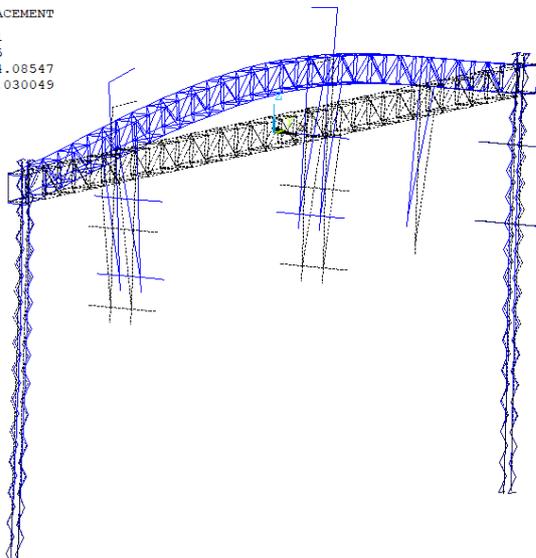


Figura 5-7 Quinto modo de Vibración - M1

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =6
FREQ=4.50234
DMX =.093611

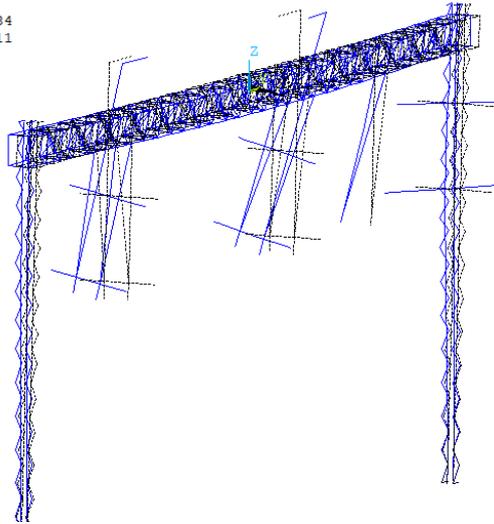


Figura 5-8 Sexto modo de Vibración - M1

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =7
FREQ=4.8382
DMX =.233928

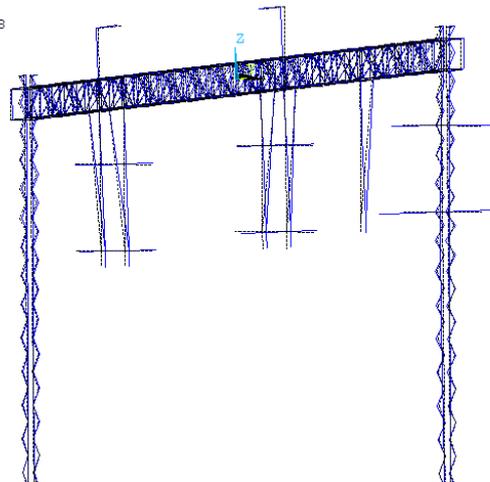


Figura 5-9 Séptimo modo de Vibración - M1

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =8
FREQ=6.40595
DMX =.091042

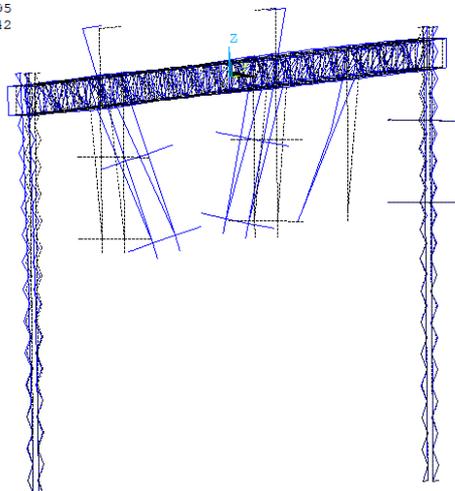


Figura 5-10 Octavo modo de Vibración - M1

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =9
FREQ=8.68991
DMX =.236208

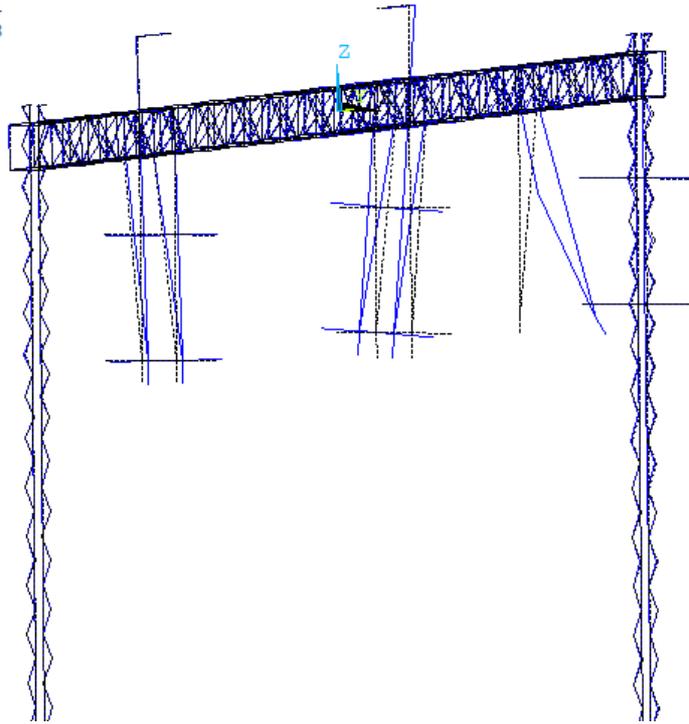


Figura 5-11 Noveno modo de Vibración - M1

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =10
FREQ=8.9913
DMX =.046524

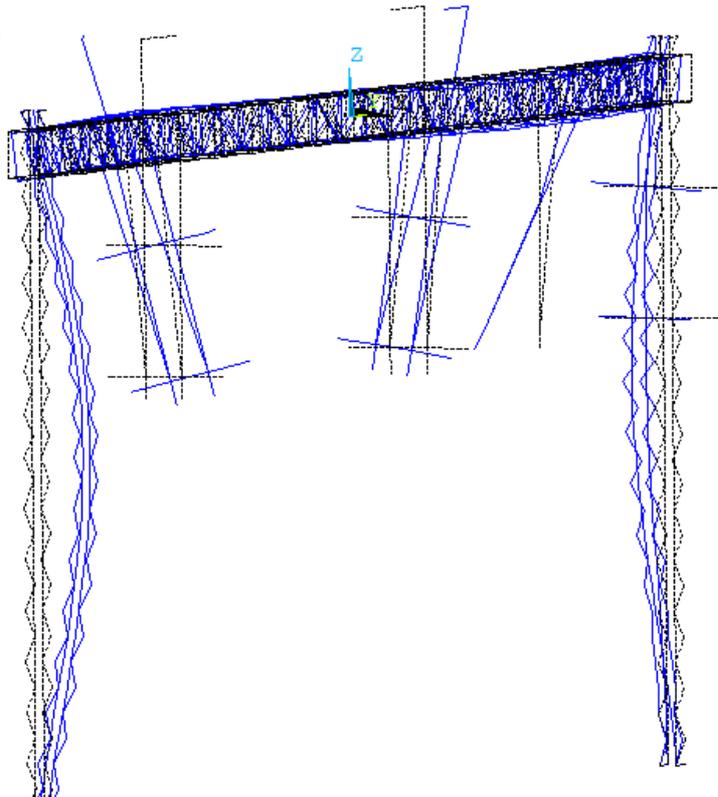


Figura 5-12 Décimo modo de Vibración - M1

5.2 Pórtico con catenaria (M2)

Para simular la presencia de elementos que no han sido modelizados, como las ménsulas y los conductores, se puede recurrir a elementos puntuales de tipo masa ubicados en el punto de aplicación del peso del cuerpo simulado. Este será el Modelo 2.

Aplicar masas sobre el pórtico modificará en cierta medida las frecuencias naturales y los modos con respecto a lo obtenido en el apartado anterior.

El primer paso es obtener la masa de ménsulas y conductores, y los nodos sobre los que se aplican. En la tabla siguiente se recogen estos datos.

La primera fila indica que la ménsula 1 y los conductores que soporta, presentan un peso de 1758,07N repartidos en dos nodos, el 731 y 743. El reparto se realiza de forma equitativa a modo de simplificación, por lo que cada nodo soporta 879.03N. Por lo tanto, se crearán dos elementos mass21 en esos puntos asignándoles la masa calculada.

Tabla 5.1- Masas sobre silletas

Conjunto Sustituido	Nodos sobre los que repartir las cargas		Peso de Ménsulas y/o Conductores (N)	Peso en el Nodo 1 (N)	Peso en el Nodo 2 (N)
Ménsula 1	731	743	1.758,07	879,03	879,03
Ménsula 2	1208	1210	1.758,07	879,03	879,03
Ménsula 3	1209	1211	1.758,07	879,03	879,03
Ménsula 4	1212	1214	1.758,07	879,03	879,03
Ménsula 5	1213	1215	1.758,07	879,03	879,03
Ménsula 6	1014	1015	1.758,07	879,03	879,03
Ménsula 7	1218	1222	1.758,07	879,03	879,03
Ménsula 8	1217	1221	1.758,07	879,03	879,03
Feeder 1	1021		507,70	507,70	-
Feeder 2	1025		507,70	507,70	-
Cable Tierra 1	686		485,06	485,06	-
Cable Tierra 2	845		485,06	485,06	-

Para modelizar ese elemento masa hay que definir un nuevo tipo de elemento y una constante real que se vinculará al mismo (peso).

ET,3,MASS21

Como hay 3 valores de masas distintos (879.03, 507.7 y 485.06), se crearán 3 constantes reales vinculadas a ellas. Por último, se genera un elemento vinculado a cada nodo, haciendo referencia al tipo de elemento y a la constante real. Completada la creación de estos elementos la situación del modelo es:

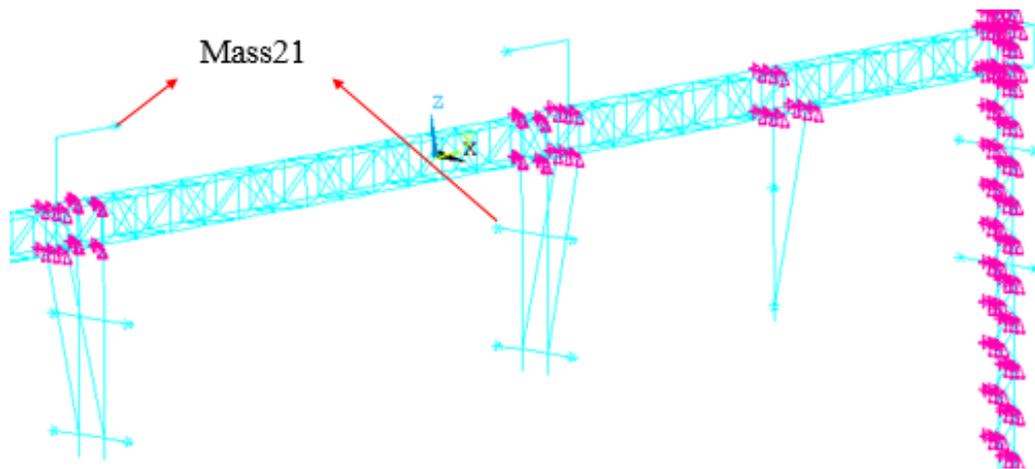


Figura 5-13 Elementos Mass21

Calculando los modos y frecuencia de la misma forma que en apartado anterior se llega a:

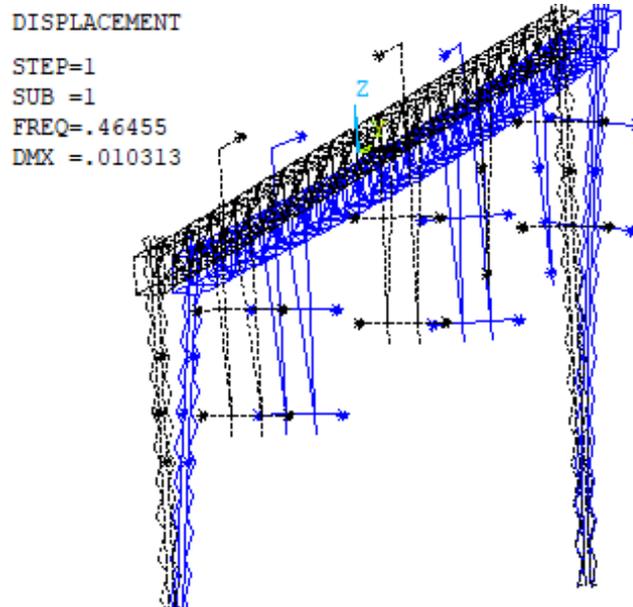


Figura 5-14 Primer modo de Vibración – M2

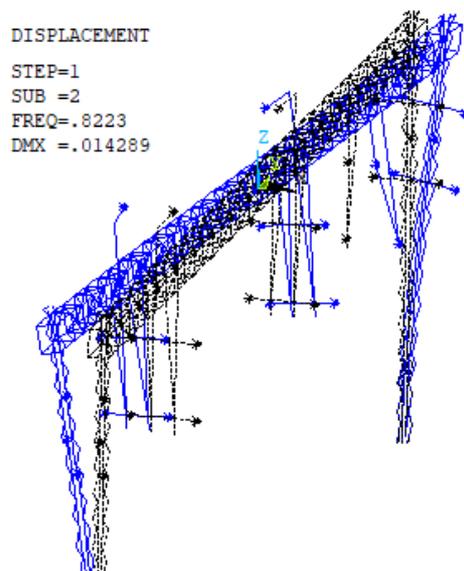


Figura 5-15 Segundo modo de Vibración – M2

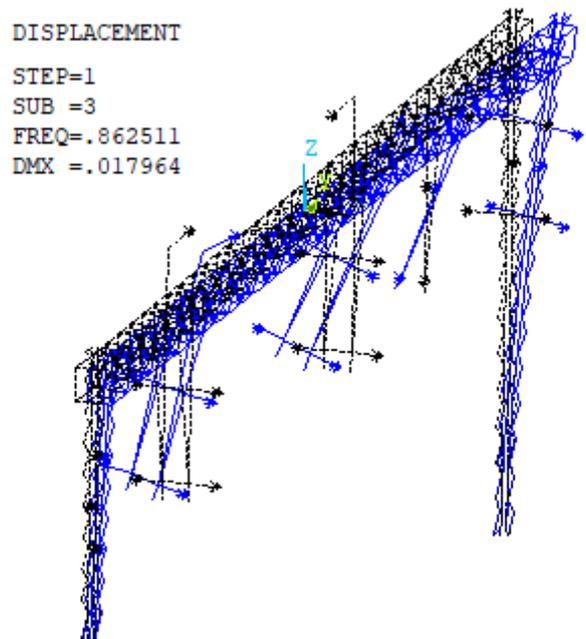


Figura 5-16 Tercer modo de Vibración – M2

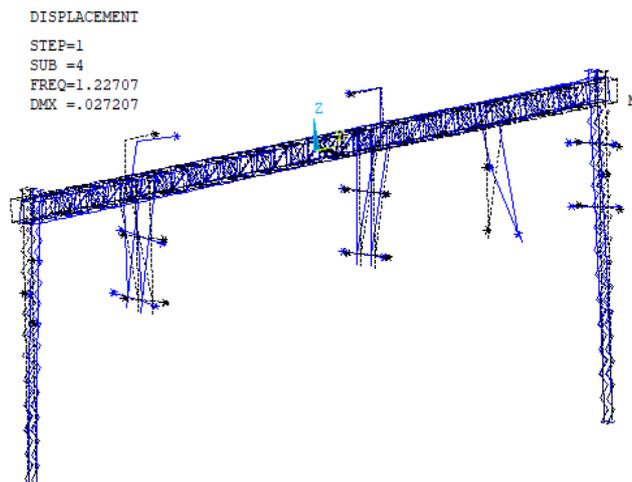


Figura 5-17 Cuarto modo de Vibración – M2

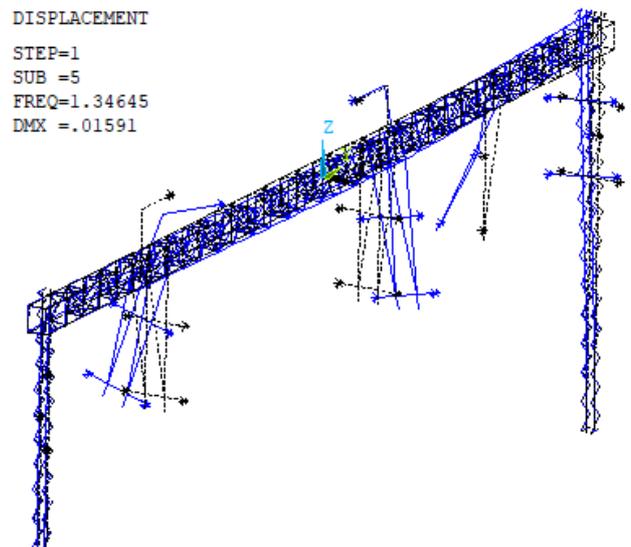


Figura 5-18 Quinto modo de Vibración – M2

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =6
FREQ=1.59117
DMX =.036354

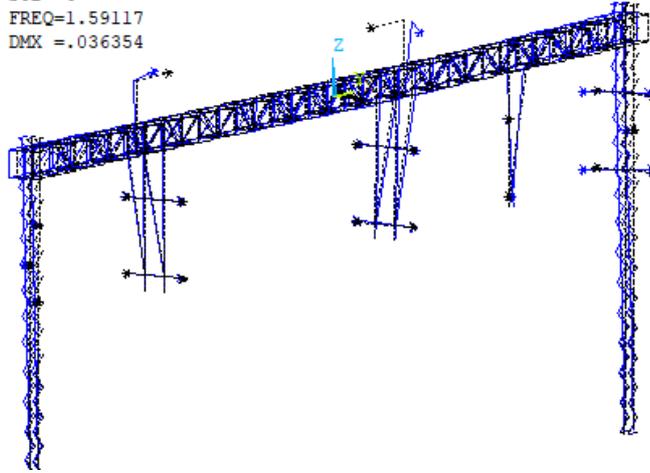


Figura 5-19 Sexto modo de Vibración – M2

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =7
FREQ=1.97837
DMX =.029396

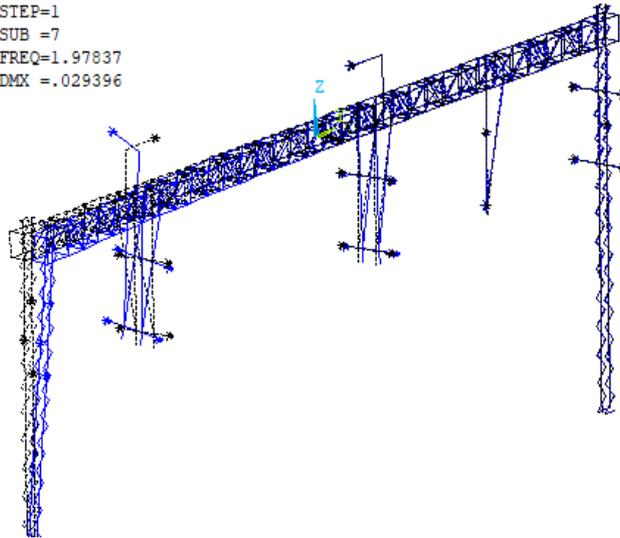


Figura 5-20 Séptimo modo de Vibración – M2

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =8
FREQ=2.91759
DMX =.019611

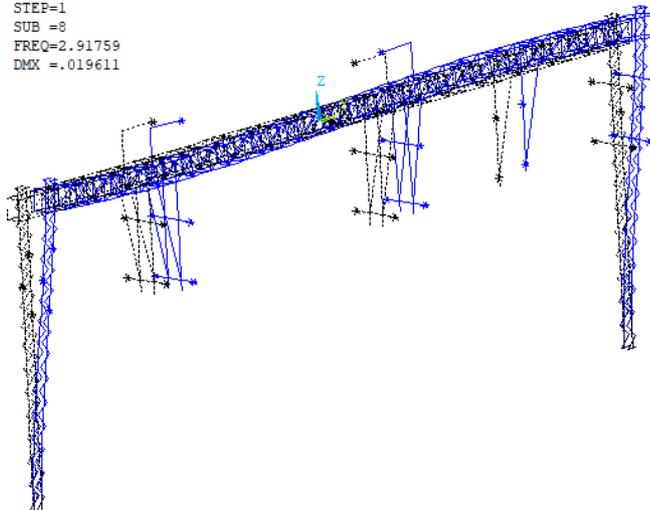


Figura 5-21 Octavo modo de Vibración – M2

DISPLACEMENT
 STEP=1
 SUB =9
 FREQ=2.96969
 DMX =.039262

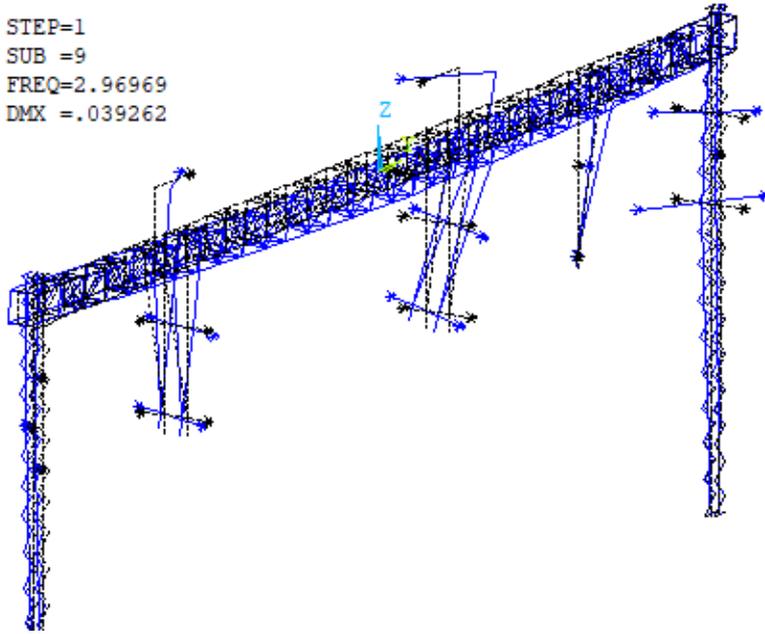


Figura 5-22 Noveno modo de Vibración – M2

DISPLACEMENT
 STEP=1
 SUB =10
 FREQ=4.08546
 DMX =.030049

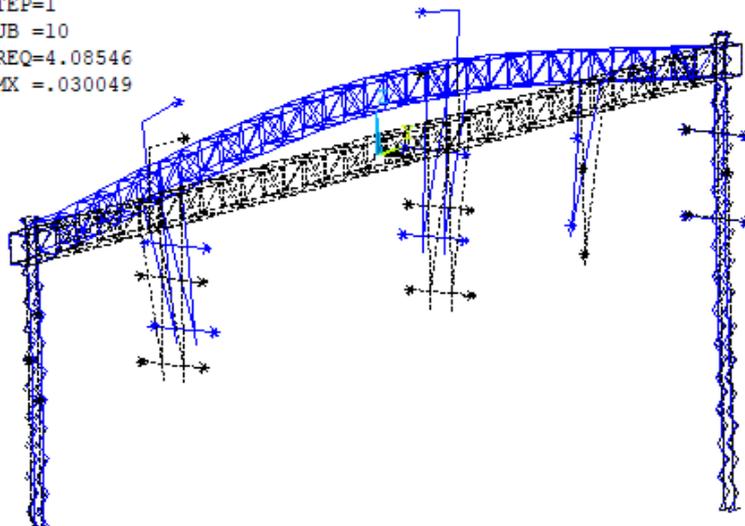


Figura 5-23 Décimo modo de Vibración – M2

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.46455	1	1	1
2	0.82230	1	2	2
3	0.86251	1	3	3
4	1.2271	1	4	4
5	1.3464	1	5	5
6	1.5912	1	6	6
7	1.9784	1	7	7
8	2.9176	1	8	8
9	2.9697	1	9	9
10	4.0855	1	10	10

Figura 5-24 Frecuencias naturales – M2

5.2 Vibraciones y resonancia

Como parte central de este análisis dinámico, se estudiarán las posibles circunstancias que puedan provocar un estado de resonancia en el pórtico, derivando en un fallo en el mismo.

Al tratarse de elementos próximos a las vías del tren, se analizará en qué manera podría un tren de alta velocidad, circulando a velocidades próximas a 350Km/h, generar fuerzas periódicas o cíclicas que puedan ser transmitidas a la estructura.

5.2.1 Vibraciones transmitidas por los bogies

La circulación de trenes de alta velocidad puede llegar a generar un alto nivel de tensiones en la superestructura ferroviaria debido al carácter dinámico de estos esfuerzos.

Estas vibraciones están directamente relacionadas con la frecuencia de paso de los bogies y sus armónicos de orden superior. Estos elementos se sitúan a una distancia fija, lo que genera cargas que se repite de forma constante a medida que el tren se va desplazando a una cierta velocidad. Esto crea unas pulsaciones que se transmiten al carril. De acuerdo con los estudios realizados al respecto, estas vibraciones se mueven en un rango de frecuencias de 5 a 25 Hz.

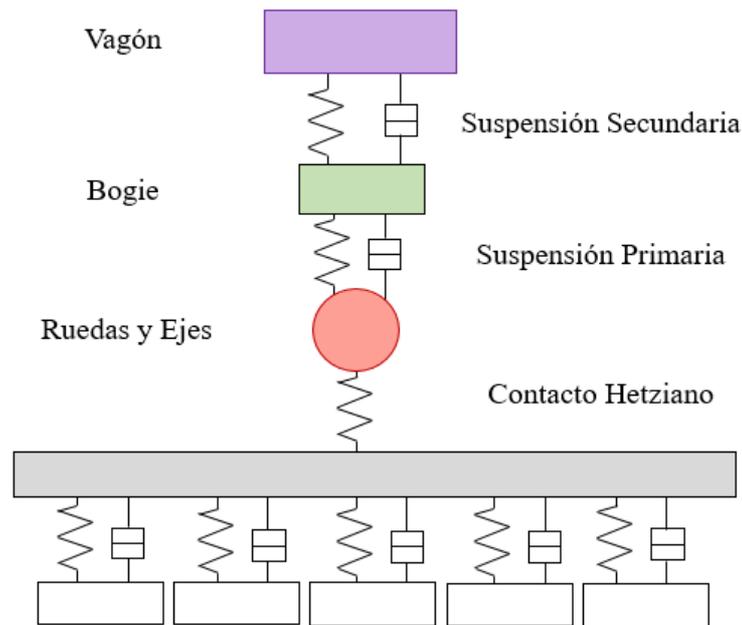


Figura 5-25 Sistema de amortiguación

Nota: Se emplea el termino de contacto hertziano para definir el contacto entre la rueda y el carril, que se produce a altas velocidades y en una superficie de contacto muy pequeña.

Por ejemplo, para las velocidades más altas, de 350Km/h, y considerando un tren en el que los pares de bogies presentan una distancia homogénea de 10m, se podría deducir:

$$f = \frac{350 \frac{Km}{h} \cdot \frac{1000m}{1Km} \cdot \frac{1h}{3600s}}{10m} = 9.72 \approx 10Hz$$

El cálculo previo es un cálculo simplificado para determinar la frecuencia de las cargas generadas por los bogies, pero puede hacerse estudios más completos donde se evalúe también la frecuencia de paso por ejes y la frecuencia de paso por traviesas. Por lo tanto, dependiendo del tipo de tren, velocidades y tipo de vía, se puede alcanzar valores dentro del rango mencionado anteriormente, de 5 Hz a 25Hz.

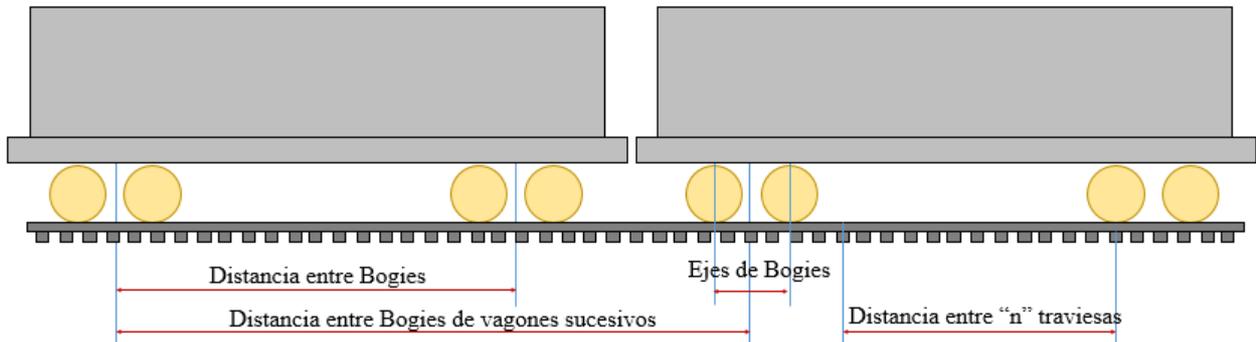


Figura 5-26 Distribución de ejes y bogies.

Vía de balasto

En las vías con balasto estos esfuerzos deben ser amortiguados y absorbidos por la capa granular del balasto, que sufre un elevado nivel de vibraciones en sus partículas pudiendo llegar a afectar su comportamiento mecánico, con fenómenos como la licuefacción, cuyo efecto es la descompactación de los granos de la cama de balasto.

En condiciones normales el balasto absorbe estas vibraciones, pero existe un fenómeno, conocido como *velocidad crítica*, que ha de ser estudiado.

Cuando las ondas se propagan por un terreno de suelo blando se desplazan a velocidades relativamente bajas, que, dado el gran avance en la Alta Velocidad, pueden ser similares a las velocidades de circulación de los trenes actuales. En situaciones en las que la velocidad de vibración en la superficie del balasto es igual a la velocidad de la carga, se produce una acumulación de energía bajo el tren. La velocidad mínima a partir de la cual se desencadena este efecto de resonancia es conocido como Velocidad Crítica del tren.

En la figura 5-27 se representa este fenómeno. Las ondas se propagan por el terreno coincidiendo con las del tren, generando una acumulación de energía bajo los bogies.

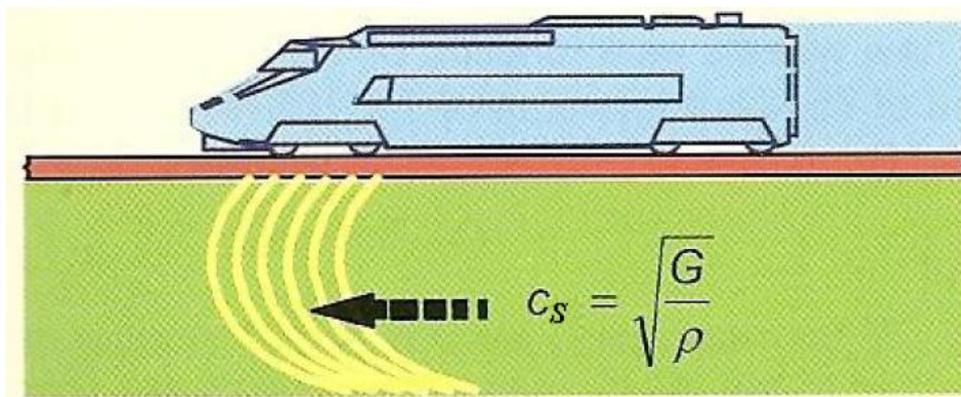


Figura 5-27 Propagación de ondas. Modern Railway Track (Esveld)

Según un estudio realizado en la línea Goteborg–Malmö en Suecia, por la Administradora del Ferrocarril Sueco (Banverket) a finales de los años 90, se detectó que cuando los trenes circulaban a velocidades cercanas a los 200 Km/h, los desplazamientos se amplificaban significativamente, generando serio riesgo de descarrilamiento. La razón era que el tren atravesaba una zona de arcillas muy blandas, por lo que las ondas generadas por el paso de la acción dinámica estaban muy próximas a los 200 Km/h del tren. Todo esto generó un efecto de resonancia, transmitiendo vibraciones excesivas al suelo, balasto, y postes de catenaria.

De los resultados de estos estudios se ha concluido que es necesario implementar una serie de condiciones de diseño específicas (en los proyectos de vía y plataforma) con el fin en garantizar la seguridad de los pasajeros.

Como estos fenómenos aparecen a velocidades bastante altas, sigue existiendo un margen amplio de velocidad para la circulación. De acuerdo al estudio mencionado anteriormente, para una velocidad 0,7 veces la velocidad crítica, el efecto dinámico era de 1,5 veces el estático, considerado admisible.

Por lo tanto, una opción sería reducir la velocidad del tren en aquellos puntos donde las velocidades críticas pueden ser más bajas, en base a estudios geotécnicos de la traza. Esta idea, aunque muy simple y efectiva, puede chocar con el concepto de trenes de alta velocidad, ya que se busca maximizar los tramos en los que se pueda circular a velocidades próximas a la de diseño de la vía.

Por lo tanto, como conclusión a lo explicado anteriormente, se puede deducir que en condiciones normales las vibraciones transmitidas a los postes son despreciables porque son absorbidas íntegramente por el balasto, pero bajo ciertas condiciones puede producirse resonancia generando deflexiones inadmisibles.

Esta situación afectaría a la catenaria, que es el punto central de este trabajo, pero sería el menor de los efectos ya que la integridad de la vía, del tren y la seguridad de los pasajeros serían prioritarios. Como estos fenómenos se conocen y se pueden prever, se busca evitarlos en los proyectos de vía y plataforma (realizando estudios del terreno y limitando las velocidades u otra medida preventiva). Por lo tanto las vibraciones de paso del tren nunca podrán causar resonancia sobre los elementos de catenaria.

Vía en placa

Otra solución para la velocidad crítica en balasto sería emplear vía en placa, de modo que las ondas no se propagan por el terreno blando sino que lo hacen a través del hormigón, aumentando sus velocidad de propagación muy por encima del rango de velocidades de los trenes.

Vía en viaducto

Otro suceso peculiar derivado del paso del tren, es el efecto producido en los viaductos, cuyos tableros vibran y se desplazan, transmitiendo ese movimiento a la base del poste.

Estos desplazamientos tienen una frecuencia igual a las vibraciones derivadas del paso del tren y su valor máximo se produce en el centro del vano entre dos pilares, este es el motivo por el que se evita colocar postes de electrificación en estos puntos, y se busca colocarlos coincidentes con los pilares del viaducto, punto donde el desplazamiento es mínimo.

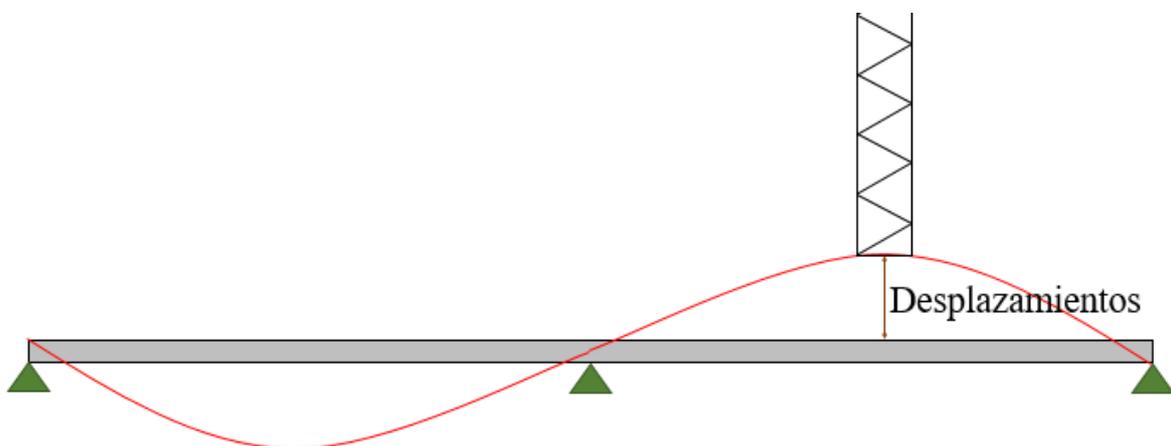


Figura 5-28 Desplazamientos en Viaducto

5.2.2 Efectos de succión

El paso de los trenes, además de generar vibraciones en la vía, también genera efectos de succión. La norma UNE EN 1991-2-2019, en su capítulo 6.6 (Efectos Slipstream provocados por el paso de los trenes) dice:

*“El paso de tráfico de ferrocarril somete a **cualquier** estructura situada ceca de la vía a una onda viajera de presión-succión”*

La norma cuantifica estas acciones sobre estructuras largas (de 5m de longitud, pudiendo reducirse a 2.5m aplicando un coeficiente de mayoración) próximas a la vía de la siguiente manera:

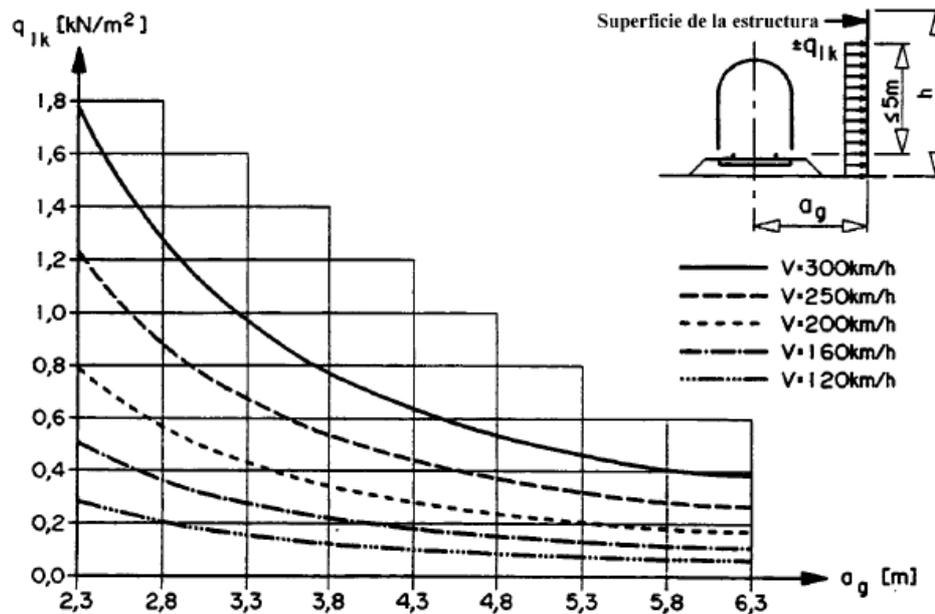


Figura 5-29 Presión aerodinámica

Dichas acciones pueden aproximarse a cargas en la cabeza y cola del tren. Su valor depende de la velocidad del tren, forma aerodinámica del mismo, forma de la estructura y la separación entre vía y estructura.

Este cálculo sólo es válido para estructuras relativamente largas como barreras acústicas (quedando excluidos los postes del pórtico, de 0.26m de ancho), pero también habrá una ligera acción actuando en el poste, difícil de cuantificar.

Esta fuerza no se calcula ni se estudia a la hora de realizar las comprobaciones del ELU debido a su bajo valor, pero es interesante analizar si esta carga, aún siendo pequeña, pudiese llegar a generar vibraciones en el pórtico resultando en fenómenos de resonancia.

Para ello hay que analizar su frecuencia de actuación. Las cargas se producen en los extremos de los trenes (cola y cabeza), así como en los puntos de unión de trenes en composición doble.

El diseño de las líneas de Alta Velocidad va precedido por un dimensionamiento eléctrico del sistema que permite definir el número y ubicación de las Subestaciones de tracción y otros elementos como ATI y ATF (Autotransformadores intermedios y de final de tramo). De este análisis también se extrae información importante como el tipo y diámetro de los conductores a emplear.

Con este análisis se asegura que la línea podrá garantizar la potencia necesaria para todos los trenes de la malla circulando a una frecuencia máxima (en condiciones de funcionamiento sin incidentes) de un vehículo cada 3 minutos.

Por lo tanto, en el caso más desfavorable, esta fuerza actuará 3 veces ante el paso de cada tren, evento que se producirá cada 3 minutos. De esta forma la frecuencia podría llegar a valer:

$$f = \frac{3}{3 \cdot 60} = 0.017 \text{ Hz}$$

Estos valores estarán siempre fuera del rango de frecuencias naturales del pórtico.

6 ANÁLISIS DE LA CIMENTACIÓN

En este apartado se dimensionará la cimentación necesaria para cumplir con el momento de vuelco atendiendo a dos métodos que se usan en la actualidad. Como se ha explicado con anterioridad, una estructura como esta requiere de un estudio de cimentación personalizado.

6.1 Método Sultzberger

6.1.1 Introducción

Este método es uno de los empleados para el cálculo del momento resistente en ADIF y en las líneas de alta tensión con postes empotrados en el terreno. Además de en España, se emplea también en Francia y Bélgica. Los resultados fueron comprobados mediante ensayos por la Asociación Suiza de Electricistas.

Este método solo se puede emplear en plataforma ferroviaria nueva, es decir, un terreno preparado para el posterior montaje de vía que cumple con una serie de propiedades en base a su distribución de capas. Estas capas son el balasto, subbalasto y capa de forma. Si se tratase de renovación de vía con una plataforma existente que no cumple con las condiciones, sería necesario usar otro método.

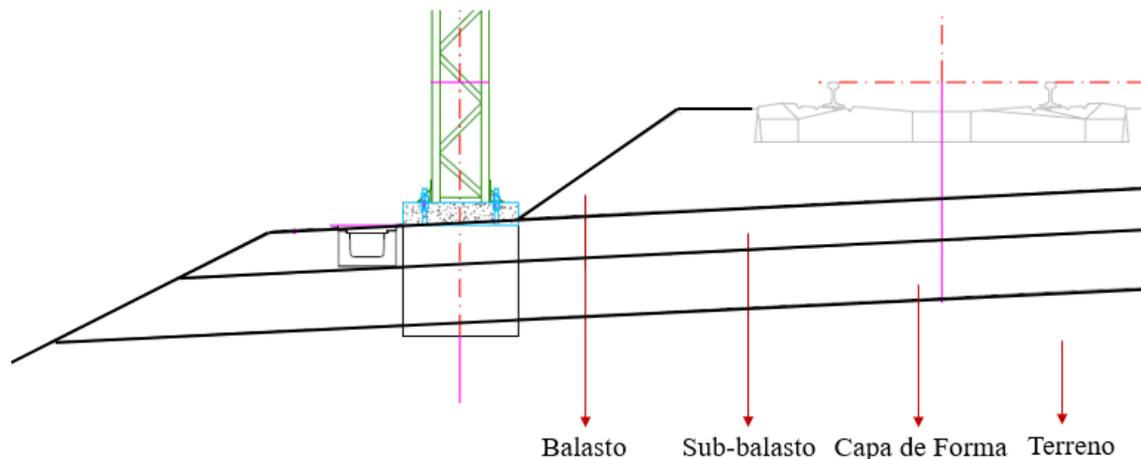


Figura 6-1 Composición de la Plataforma

Para el cálculo de las cimentaciones se seguirán las siguientes reglas:

- Coefficiente de seguridad al vuelco

En las cimentaciones de apoyos cuya estabilidad esté fundamentalmente confiada a las reacciones verticales del terreno, el coeficiente de seguridad no deberá ser inferior a 1,5.

- Angulo de giro de los cimientos

No se admitirá un ángulo de giro cuyo valor de la tangente sea superior a 0,005, para alcanzar el equilibrio de las acciones volcadoras máximas con las reacciones del terreno.

El reglamento técnico español (CENELEC) de líneas eléctricas aéreas de alta tensión admite una tangente del ángulo de giro de 0,01. El motivo para emplear coeficientes más estrictos es que en el AVE se busca la máxima precisión a la hora de ubicar el hilo de contacto, donde las tolerancias son mínimas. Por lo que un giro en la cimentación puede suponer un desplazamiento inadmisibles de los conductores, sobre todo en colaboración con la propia flecha que puede sufrir el poste.

- Características del terreno

Se supone un coeficiente de compresibilidad a 2 metros de profundidad de 6 Kg/cm³ como promedio, ya que:

$C_0 = 8 \text{ Kg/cm}^3$ (para terreno normal).

$C_0 = 4 \text{ Kg/cm}^3$ (para terreno inconsistente).

• Tipo de poste

Si se trata de un poste estándar, se comprueba la cimentación para el valor de rotura de poste, esto es, las fuerzas que producirían fallo de estado límite (tensiones), por lo que si el poste resiste, también lo hará la cimentación. Esto se hace para evitar el tener que calcular todos los casos posibles, ya que un mismo poste suele tener muchos usos (puede ser poste de PF, AnPF, Eje, Ménsula dentro, fuera...) con solicitaciones de carga distinta, esto daría como resultado muchas cimentaciones diferentes, dificultando el estandarizado. Dimensionando para el estado límite se garantiza que la cimentación es válida para todos los usos que pueda tener el poste, aunque puede estar sobredimensionada.

Si el poste es especial, como para pórticos muy grandes, no tiene sentido aplicar ese criterio porque dimensionar para su estado límite nos llevaría a cimentaciones demasiado grandes, por lo que se realiza un cálculo “personalizado” en estos casos. Esta es la situación a analizar en este pórtico, que emplea postes de 10m de altura.

6.1.2 Parámetros de cálculo

a (m):	Lado del macizo perpendicular a la vía. (Para cimentación prismática)
b (m):	Lado del macizo paralelo a la vía. (Para cimentación prismática)
h (m):	Profundidad empotrada del macizo.
D (m):	Diámetro del macizo. (Para cimentación cilíndrica)
M (N·m):	Momento producido por las cargas exteriores.
G (m):	Distancia del punto de giro al nivel del terreno.
M_1 (N·m):	Momento producido por las fuerzas F1 y F2 reacciones del terreno.
M_2 (N·m):	Momento producido por el peso $P = F_3$.
m_1 (N·m):	Momento que produce F1 respecto del punto de giro
m_2 (N·m):	Momento que produce F2 respecto del punto de giro.
tg α :	Tangente del ángulo de giro del macizo.
y (m):	Punto que dista “y” del nivel del terreno.
z (m):	Parte de “a” sobre la que actúa la fuerza F3.
δ_y (m):	Desplazamiento horizontal del punto “y”.
p_y (N/m ²):	Presión sobre el terreno en el punto “y”.
P (N):	Peso del macizo, poste y cables que cargan sobre él.
C_y (N/m ³):	Coficiente de compresibilidad en el punto “y”.
C_h (N/m ³):	Coficiente de compresibilidad sobre la cara frontal en la base del macizo.
C_0 (N/m ³):	Coficiente de compresibilidad en el suelo del macizo.

6.1.3 Cálculo de macizos prismáticos en desmonte

El estudio de macizos para postes, está basado en verificar que el momento de vuelco máximo permitido por la cimentación, que vendrá dado por el coeficiente de compresibilidad del terreno y la geometría del macizo es superior al momento de vuelco dado por las fuerzas externas aplicadas al poste.

El cálculo está basado en las siguientes hipótesis:

1. El macizo de cimentación gira bajo el momento M alrededor de un punto produciendo, según la figura, unas deformaciones que son proporcionales a la $\tan \alpha$ y la distancia en vertical (para las paredes frontales) y en horizontal (para base del macizo) al punto de giro.

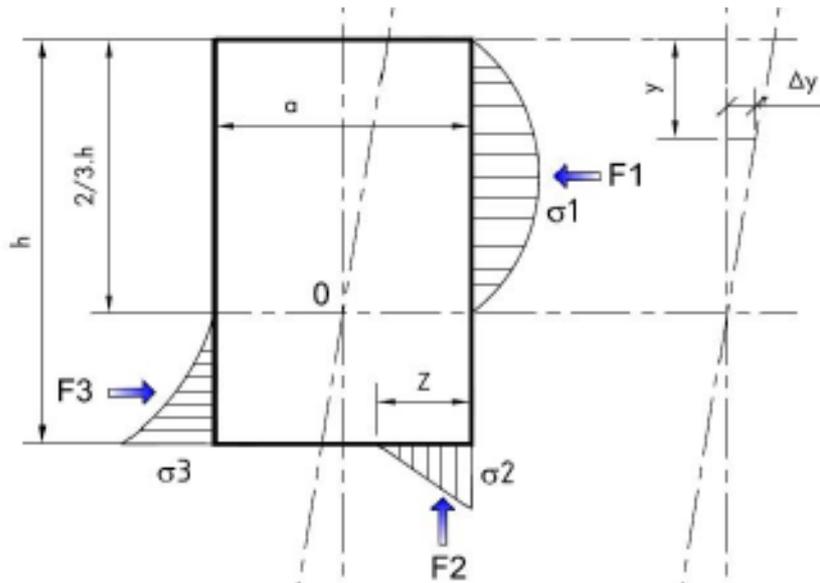


Figura 6-2 Fuerzas sobre el Macizo

2. La resistencia del terreno es nula en la superficie y varía linealmente con la profundidad. C_y (N/m^3) es el coeficiente de compresibilidad del terreno a la profundidad "y" (fuerza que aplicada a 1 cm^2 produce una deformación de 1 cm) y C_h en la base del macizo.

$$C_y = \frac{c_h}{h} \cdot y$$

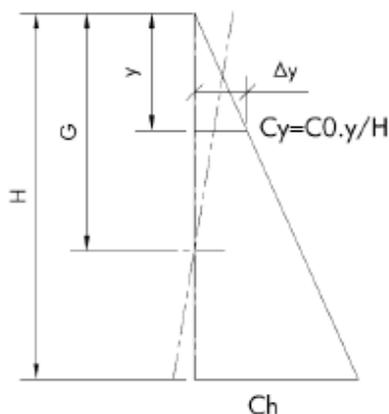


Figura 6-3 Variación de C_y

3. Así mismo, se desprecian las presiones producidas por la fuerza exterior al ser muy pequeñas comparadas con las de reacción de las tierras.

4. El momento resistente es producido en parte por M1, la reacción de las tierras sobre las caras frontales y por M2, reacción de las tierras en la base (este momento es función del peso P).

Determinación de M1 por la reacción de las tierras sobre las caras frontales

Para $0 < y < G$:

$$\delta_y = (G - y) \cdot \tan \alpha \quad (6.1)$$

$$p_y = \delta_y \cdot C_y = (G - y) \cdot \tan \alpha \cdot C_h \cdot \frac{y}{h} \quad (6.2)$$

$$df_y = p_y \cdot b \cdot dy = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} (G - y) \cdot y \cdot dy \quad (6.3)$$

$$F_1 = \int_0^G \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} \cdot (G - y) \cdot y \cdot dy = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} \cdot \left[G \cdot \frac{y^2}{2} - \frac{y^3}{3} \right]_0^G = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} \cdot \frac{G^3}{6} \quad (6.4)$$

Para $G < y < h$:

$$\delta_y = (y - G) \cdot \tan \alpha \quad (6.5)$$

$$p_y = \delta_y \cdot C_y = (y - G) \cdot \tan \alpha \cdot C_h \cdot \frac{y}{h} \quad (6.6)$$

$$df_y = p_y \cdot b \cdot dy = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} (y - G) \cdot y \cdot dy \quad (6.7)$$

$$F_2 = \int_0^G \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} \cdot (y - G) \cdot y \cdot dy = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} \cdot \left[\frac{y^3}{3} - G \cdot \frac{y^2}{2} \right]_0^G \quad (6.8)$$

$$F_2 = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} \cdot \left[\frac{h^3}{3} - G \cdot \frac{h^2}{2} - \frac{G^3}{3} + \frac{G^3}{2} \right] \quad (6.9)$$

Igualando F1 y F2:

$$\frac{G^3}{6} = \frac{h^3}{3} - G \cdot \frac{h^2}{2} - \frac{G^3}{6} \quad (6.10)$$

$$0 = \frac{h^3}{3} - \frac{G \cdot h^2}{2} \quad (6.11)$$

$$G = \frac{2}{3} \cdot h \quad (6.12)$$

Resultando que el punto de giro se encuentra a 2/3 de la profundidad empotrada.

Momento debido a la reacción frontal

Para $0 < y < G$:

$$dm_1 = df_1 \cdot (G - y) = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} (G - y)^2 \cdot y \cdot dy \quad (6.13)$$

$$m_1 = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} \int_0^G (G - y)^2 \cdot y \cdot dy = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} \cdot \left[G^2 \cdot \frac{y^2}{2} - 2G \cdot \frac{y^3}{3} + \frac{y^4}{4} \right]_0^G \quad (6.14)$$

$$m_1 = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} \cdot \frac{G^4}{12} = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} \cdot \frac{16h^4}{972} \quad (6.15)$$

Para $G < y < h$:

$$dm_2 = df_2 \cdot (y - G) = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} (y - G)^2 \cdot y \cdot dy \quad (6.16)$$

$$m_2 = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} \int_0^G (y^3 - 2Gy^2 + G^2 \cdot y) \cdot dy = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} \cdot \left[\frac{y^4}{4} - 2G \cdot \frac{y^3}{3} + G^2 \cdot \frac{y^2}{2} \right]_G^H \quad (6.17)$$

$$m_2 = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} \cdot \left[\frac{h^4}{4} - 2G \cdot \frac{h^3}{3} + G^2 \cdot \frac{h^2}{2} - \frac{G^4}{4} + 2 \cdot \frac{G^4}{3} - \frac{G^4}{2} \right] \quad (6.18)$$

$$m_2 = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} \cdot h^4 \cdot \left[\frac{1}{4} - \frac{4}{9} + \frac{4}{18} - \frac{16}{324} + \frac{32}{243} - \frac{16}{162} \right] = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha}{h} \cdot \frac{11 \cdot h^3}{972} \quad (6.19)$$

El momento M1 será:

$$M_1 = m_1 + m_2 = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha \cdot h^3}{36} \quad (6.20)$$

Determinación de M2 por la reacción del suelo

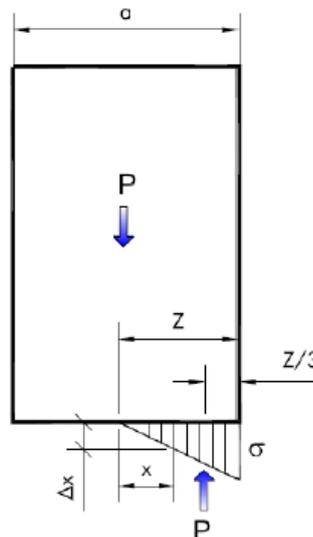


Figura 6-4 Efecto del Peso en el terreno

El desplazamiento vertical del punto A esquina del macizo es:

$$\delta_z = z \cdot \tan \alpha \quad (6.21)$$

y la presión:

$$p_A = z \cdot \tan \alpha \cdot C_0 \quad (6.22)$$

La reacción total vertical del terreno sobre la base es:

$$F_3 = \frac{p_A}{2} \cdot b \cdot z = \frac{b \cdot C_0 \cdot \tan \alpha}{2} \cdot z^2 = P \quad (6.23)$$

de donde:

$$z^2 = \frac{2 \cdot P}{b \cdot C_0 \cdot \tan \alpha} \quad (6.24)$$

y el momento producido por P y F3:

$$M_2 = P \cdot \left(\frac{a}{2} - \frac{z}{3} \right) = P \cdot \left(\frac{a}{2} - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P}{b \cdot C_0 \cdot \tan \alpha}} \right) \quad (6.25)$$

Determinación de M Total

El momento total resulta:

$$M = M_1 + M_2 = \frac{b \cdot C_h \cdot \tan \alpha \cdot h^3}{36} + \left(\frac{a}{2} - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P}{b \cdot C_0 \cdot \tan \alpha}} \right) \quad (6.26)$$

Los valores considerados son:

- $\tan \alpha = 0,005$
- C_0 =Coeficiente de compresibilidad a 2 m. de profundidad; 6Kg/cm^3 .

6.1.4 Cálculo de Macizos Cilíndricos

En base al cálculo desarrollado previamente, se obtiene su equivalente para los macizos cilíndricos. Las consideraciones y simbología empleados en macizos prismáticos son también válidas en este caso.

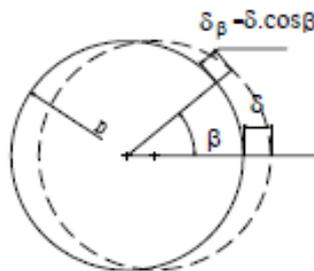


Figura 6-5 Efecto del Giro sobre macizos Cilíndricos

Teniendo en cuenta que en el macizo de hormigón el desplazamiento de todos los puntos de una franja en dirección de “x” es variable y vale δ , con dirección perpendicular a la circunferencia:

$$\delta_{\beta} = \delta \cdot \cos \beta \quad (6.27)$$

Si la franja dista “y” de la superficie del terreno:

$$\delta = (G - y) \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (6.28)$$

$$\delta_{\beta} = (G - y) \cdot \tan \alpha \cdot \cos \beta \quad (6.29)$$

La presión:

$$p_{\beta} = (G - y) \cdot \tan \alpha \cdot C_h \cdot \frac{y}{h} \cdot \cos \beta \cdot dy \quad (6.30)$$

$$df_{\beta} = (G - y) \cdot \tan \alpha \cdot C_h \cdot \frac{y}{h} \cdot (\cos \beta) \cdot R \cdot d\beta \cdot dy \quad (6.31)$$

La proyección sobre x,

$$df_{\beta y} = df \cdot \cos \alpha (G - y) \cdot \tan \alpha \cdot C_h \cdot \frac{y}{h} \cdot (\cos \beta) \cdot R \cdot d\beta \cdot dy \quad (6.32)$$

La fuerza total para una franja de dy será:

$$df_y = (G - y) \cdot \tan \alpha \cdot C_h \cdot \frac{y}{h} \cdot 2 \cdot \left(\int_0^{x/2} R \cdot (\cos \beta)^2 d\beta \right) \cdot dy \quad (6.33)$$

Integrando,

$$f_y = (G - y) \cdot \tan \alpha \cdot C_h \cdot \frac{y}{h} \cdot dy \cdot D \cdot \frac{\pi}{4} \quad (6.34)$$

Esta fuerza tiene la misma expresión que los macizos prismáticos. Sustituyendo:

$$b \quad \text{por} \quad D \cdot \frac{\pi}{4} \quad (6.35)$$

Por tanto, la reacción frontal de las tierras será:

$$M_1 = \frac{D \cdot \frac{\pi}{4} \cdot C_h \cdot \tan \alpha \cdot h^3}{36} \quad (6.36)$$

Esta expresión está obtenida suponiendo que no hay rozamiento, pero teniendo en cuenta que hay deslizamiento entre el macizo y el terreno bajo la acción de unas presiones p_{β} , aparecerán unas fuerzas tangenciales por unidad de superficie,

$$V_{\beta} = p_{\beta} \cdot \mu \quad (6.37)$$

Se suele tomar como coeficiente de rozamiento para un terreno normal ($\mu=0,4$):

$$V_{\beta} = p_{\beta} \cdot \mu = \mu \cdot (G - y) \cdot \tan \alpha \cdot C_h \cdot \frac{y}{h} \cdot \cos \beta \quad (6.38)$$

siendo su proyección sobre x:

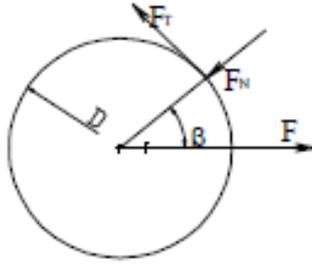


Figura 6-6 Proyección sobre X

$$V_{\beta}(x) = \mu \cdot (G - y) \cdot \tan \alpha \cdot C_h \cdot \frac{y}{h} \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta \quad (6.39)$$

La fuerza total sobre una franja de espesor dy debida a p_{β} y V_{β}

$$df_y = (G - y) \cdot \tan \alpha \cdot C_h \cdot \frac{y}{h} \cdot dy \cdot \left(\frac{\pi D}{4} + \mu \cdot 0.5 \right) \quad (6.40)$$

$$M_1 = \frac{D \cdot C_h \cdot \tan \alpha \cdot h^3}{36} \cdot \left(\frac{\pi}{4} + \mu \cdot 0.5 \right) \quad (6.41)$$

En el caso particular de $\mu = 0,4$

$$M_1 = 0.985 \cdot \frac{D \cdot C_h \cdot \tan \alpha \cdot h^3}{36} \quad (6.42)$$

Haciendo la aproximación de $0,985D \approx D$, y comparando con los macizos prismáticos, la expresión del momento es la misma, solamente cambiando b por D.

En el caso de cimentaciones cilíndricas, se desprecia el efecto de M2, existiendo solamente M1.

6.1.5 Dimensionamiento de las Cimentaciones:

Tras calcular cada hipótesis, se obtiene fácilmente los valores de las reacciones en los empotramientos de los postes. Estos valores, en términos de momentos, servirán para obtener el momento de vuelco.

```

PRRSOL Command
File
PRINT M REACTION SOLUTIONS PER NODE
**** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING ****
LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0
THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM
NODE MX MY MZ
708 -1196.7 74751. 384.22
779 -898.11 80755. -475.16
818 844.51 80574. 400.68
889 1141.8 74507. -383.77
TOTAL VALUES
VALUE -108.51 0.31059E+006 -74.032

```

Figura 6-7 Valor de las Reacciones

Cada hipótesis de ELU dará como resultado una reacción. Se toma el valor más alto de entre todas como valor a comprobar.

Cargas permanentes y transitorias.

Tabla 6-1 Reacciones en las cimentaciones para la hipótesis 1

N	Nodo 708	Nodo 779	Total - Izquierda	Nodo 818	Nodo 889	Total - Derecha
Mx	-1.876,500	-1.489,200	-3.365,700	264,280	475,830	740,110
My	-30,98	28,3	-2,680	-140,63	-250,18	-390,810
Mz	-0,66	-0,77	-1,430	-52,59	0,91	-51,680

Tabla 6-2 Reacciones en las cimentaciones para la hipótesis 2

N	Nodo 708	Nodo 779	Total - Izquierda	Nodo 818	Nodo 889	Total - Derecha
Mx	-1.280,000	-962,980	-2.242,980	903,890	1.218,600	2.122,490
My	44841	48468	93.309,000	48278	44608	92.886,000
Mz	230,29	-285,43	-55,140	197,25	-230,11	-32,860

Tabla 6-3 Reacciones en las cimentaciones para la hipótesis 3

N	Nodo 708	Nodo 779	Total - Izquierda	Nodo 818	Nodo 889	Total - Derecha
Mx	-1.771,200	-1407,9	-3.179,100	187,070	374,280	561,350
My	-33,37	26,46	-6,910	-130,04	-256,82	-386,860
Mz	-0,69	-0,76	-1,450	-38,91	1,19	-37,720

Tabla 6-4 Reacciones en las cimentaciones para la hipótesis 4

N	Nodo 708	Nodo 779	Total - Izquierda	Nodo 818	Nodo 889	Total - Derecha
Mx	-1.174,700	-881,710	-2.056,410	826,690	1.117,100	1.943,790
My	44839	48466	93.305,000	48289	44601	92.890,000
Mz	230,26	-285,43	-55,170	210,93	-229,82	-18,890

Tabla 6-5 Reacciones en las cimentaciones para la hipótesis 5

N	Nodo 708	Nodo 779	Total - Izquierda	Nodo 818	Nodo 889	Total - Derecha
Mx	-2.156,800	-1.749,100	-3.905,900	-248,960	-133,030	-381,990
My	-35,770	22,38	-13,390	-124,40	-255,98	-380,380
Mz	-0,69	-0,71	-1,400	-15,72	1,27	-14,450

Tabla 6-6 Reacciones en las cimentaciones para la hipótesis 6

N	Nodo 708	Nodo 779	Total - Izquierda	Nodo 818	Nodo 889	Total - Derecha
Mx	-1.163,300	-872,620	-2.035,920	817,590	1.105,600	1.923,190
My	54393	58739	113.132,000	58560	54154	112.714,000
Mz	279,25	-345,95	-66,700	271,45	-278,8	-7,350

Se aprecia que el mayor valor de momento se da en el poste izquierdo bajo la hipótesis de cargas 6, donde se tiene un viento transversal predominante. Este valor es de 113.132N·m. Aplicando un coeficiente de seguridad de 1.6 se tiene:

$$113132N \cdot m \cdot 1.6 = 181011,2N \cdot m$$

Se emplea ahora la ecuación definida anteriormente para comprobar la cimentación que garantice un valor de resistencia al vuelco superior.

Para obtener fácilmente una comparación entre el valor del momento de vuelco y el resistente de la cimentación se tabulan las posibles combinaciones. Las cimentaciones posibles son:

Tabla 6-7 Momento resistente al vuelco para cada macizo

D=0,75m				D=1m			
h	Ch	tan α	M (N·m)	h	Ch	tan α	M (N·m)
2,000	6·10 ⁷	0,005	21.093,750	2,500	6·10 ⁷	0,005	66.666,667
2,100	6·10 ⁷	0,005	25.600,000	2,600	6·10 ⁷	0,005	77.175,000
2,200	6·10 ⁷	0,005	30.706,250	2,700	6·10 ⁷	0,005	88.733,333
2,300	6·10 ⁷	0,005	36.450,000	2,800	6·10 ⁷	0,005	101.391,667
2,400	6·10 ⁷	0,005	42.868,750	2,900	6·10 ⁷	0,005	115.200,000
2,500	6·10 ⁷	0,005	50.000,000	3,000	6·10 ⁷	0,005	130.208,333
2,600	6·10 ⁷	0,005	57.881,250	3,100	6·10 ⁷	0,005	146.466,667
2,700	6·10 ⁷	0,005	66.550,000	3,200	6·10 ⁷	0,005	164.025,000
2,800	6·10 ⁷	0,005	76.043,750	3,300	6·10 ⁷	0,005	182.933,333
2,900	6·10 ⁷	0,005	86.400,000	3,400	6·10 ⁷	0,005	203.241,667
3,000	6·10 ⁷	0,005	97.656,250	3,500	6·10 ⁷	0,005	225.000,000
3,100	6·10 ⁷	0,005	109.850,000	3,600	6·10 ⁷	0,005	248.258,333
3,200	6·10 ⁷	0,005	123.018,750	3,700	6·10 ⁷	0,005	273.066,667
3,300	6·10 ⁷	0,005	137.200,000	3,800	6·10 ⁷	0,005	299.475,000
3,400	6·10 ⁷	0,005	152.431,250	3,900	6·10 ⁷	0,005	327.533,333
3,500	6·10 ⁷	0,005	168.750,000	4,000	6·10 ⁷	0,005	357.291,667

Los datos de la cimentación requerida son:

-Diámetro: 1m

-Profundidad: 3.3m, de los cuales 0.5m no trabajan.

$$-C_h = 6 \frac{Kg}{cm^3} \cdot \frac{100^3 cm^3}{m^3} \cdot \frac{10N}{1Kg} = 6 \cdot 10^7 \frac{N}{m^3}$$

Por lo tanto:

$$M_1 = \frac{D \cdot C_h \cdot \tan \alpha \cdot h^3}{36} = \frac{1(m) \cdot 6 \cdot 10^7 \left(\frac{N}{m^3}\right) \cdot 0.005 \cdot 2,8^3(m^3)}{36} = 182.933,33 N \cdot m \quad (6.43)$$

De modo que se cumple:

$$M_f < M_1 \quad 181.011,2N \cdot m < 182.933,33 N \cdot m \quad (6.44)$$

Situaciones accidentales.

Tabla 6-8 Reacciones en las cimentaciones para las hipótesis 1 y 2

N	Nodo 708	Nodo 779	Total - Izquierda	Nodo 818	Nodo 889	Total - Derecha
Mx	-796,920	-595,730	-1.392,650	556,750	755,830	1.312,580
My	89835	97808	187.643,000	66717	58380	125.097,000
Mz	528,19	-707,11	-178,920	452,49	-307	145,420

Tabla 6-9 Reacciones en las cimentaciones para las hipótesis 3 y 4

N	Nodo 708	Nodo 779	Total - Izquierda	Nodo 818	Nodo 889	Total - Derecha
Mx	-768,350	-573,660	-1.342,010	535,770	728,250	1.264,020
My	89834	97807	187.641,000	66719	58379	125.098,000
Mz	528,19	-707,11	-178,920	456,13	-307	149,130

Tabla 6-10 Reacciones en las cimentaciones para la hipótesis 5

N	Nodo 708	Nodo 779	Total - Izquierda	Nodo 818	Nodo 889	Total - Derecha
Mx	-898,120	-688,390	-1.586,510	391,410	560,390	951,800
My	89834	97806	187.640,000	66721	58379	125.100,000
Mz	528,19	-707,09	-178,900	463,86	-306,97	156,890

Tabla 6-11 Reacciones en las cimentaciones para la hipótesis 6

N	Nodo 708	Nodo 779	Total - Izquierda	Nodo 818	Nodo 889	Total - Derecha
Mx	-765,570	-571,450	-1.337,020	533,550	725,460	1.259,010
My	99805	108570	208.375,000	77481	68347	145.828,000
Mz	579,51	-770,35	-190,840	519,38	-358,31	161,070

En esta ocasión, el valor máximo es de 208.375N·m, muy superior a los 113.132N·m obtenidos al no considerar las acciones accidentales. Aplicando un coeficiente de seguridad de 1.6:

$$1,6 \cdot 208.375 = 333.400N \cdot m$$

Para cumplir esta solicitud de cargas sería necesaria la instalación de un macizo de 1m de diámetro y 4 metros de profundidad.

$$M_1 = \frac{D \cdot C_h \cdot \tan \alpha \cdot h^3}{36} = \frac{1(m) \cdot 6 \cdot 10^7 \left(\frac{N}{m^3}\right) \cdot 0.005 \cdot 3.5^3(m^3)}{36} = 357.291,667 N \cdot m \quad (6.45)$$

$$1,6 * 208.375 < 357.291,667 N \cdot m$$

6.2 Método O.R.E.

6.2.1 Introducción

A continuación, se procederá a repetir el cálculo anterior, pero mediante el método ORE, que ha sido desarrollado por la U.I.C a través de l'Office de Recherches et Essais (ORE). Con este sistema se obtiene el momento que es capaz de soportar un macizo de dimensiones determinadas, tanto prismático como cilíndrico, dependiendo de su localización y del sentido del momento aplicado.

Este método es válido para todos los suelos con cohesión normal excepto para casos extremos como roca, yeso, turba o arenas movedizas. A partir de este proceso es posible obtener el momento que es capaz de resistir un macizo de dimensiones conocidas.

El método ORE está basado en el método IRSIA, que consiste en la realización de ensayos sobre modelos reducidos para distintos tipos de cimentación sometidos a esfuerzos de vuelco, obteniéndose la forma empírica del momento resistente al vuelco al nivel de suelo.

La diferencia entre ORE e IRSIA reside en la aplicación de ciertos coeficientes de corrección para paliar diferencias y exactitudes en este segundo método que no tiene en cuenta ciertos factores reales.

6.2.2 Parámetros de cálculo

M_{rp}	Momento resistente obtenido a partir de las características del terreno y macizo
$(1 - E_p)$	Coefficiente de corrección de la parte superficial del terreno no resistente
K_1	Coefficiente ligado a las cargas verticales
K_2	Coefficiente ligado a la profundidad del macizo
$A(N/m^3)$	Peso específico del terreno. Toma un valor de $15000N/m^3$
$h(mm)$	Altura del macizo
$h^1(mm)$	Altura del terreno que no trabaja. Toma un valor de 0.5m
$N(N)$	Carga vertical total (macizo, poste, etc.)
$a(mm)$	Dimensión menor entre b y e.
$b(mm)$	Dimensión paralela a la vía. Su valor es 0.8 veces el diámetro
$e(mm)$	Dimensión perpendicular a la vía. Su valor es 0.8 veces el diámetro
M_{max}	Momento límite ORE o máximo momento de vuelco que resiste el macizo
K	Coefficiente corrector de la configuración del terreno y sentido del momento
M_b	Momento límite obtenido según el método IRSIA

6.2.3 Cálculo de macizos cilíndricos

El cálculo consiste en obtener un momento resistente en base al método IRSIA, que después se corregirá con coeficientes obtenidos en base a ensayos. Por lo tanto:

$$M_B = (1 - E_p) \cdot M_{rp} \quad (6.46)$$

Con:

$$M_{rp} = K_1 \cdot e \cdot N + K_2 \cdot A \cdot b \cdot h^3 \quad (6.47)$$

Siendo:

$$(1 - E_p) = 3,44 \cdot \left[1 + \left(\frac{h^1}{h} \right)^3 \right] - 2,44 \cdot \sqrt{\left[1 + \left(\frac{h^1}{h} \right)^3 \right]} \quad (6.48)$$

$$K_1 = 0,5136 - \frac{0,175}{0,54 + \frac{b}{e}} \quad (6.49)$$

$$K_2 = 2,8 - \frac{96,5}{68,5 + 3375 \cdot \left(\frac{N}{10 \cdot A \cdot b \cdot e \cdot a} \right)^3} \cdot \left(1 + 0,45 \cdot \frac{e}{b} \right) \quad (6.50)$$

Los ensayos de la ORE se realizaron sobre casos reales, en macizos aislados, solicitados principalmente por momentos de vuelco y su objetivo era estudiar el comportamiento al vuelco de las cimentaciones destinadas a soportar las líneas aéreas de contacto.

En base a los resultados obtenidos en ensayos pudo concluirse que:

$$M_{max} = K \cdot 27,45 \cdot M_b^{2/3} \quad (6.51)$$

K presenta un valor de 1.3 al tratarse de macizos en terraplén y 1 en caso de desmonte. Por otro lado, se emplea un coeficiente de seguridad de 4.5, ya que el valor recomendado por la ORE para este tipo de cálculos ha de ser superior a 3.

Teniendo en cuenta que para cada macizo el valor de N varía, la mejor forma para dimensionar la cimentación adecuada para la situación de cargas será tabular los resultados con todas las posibilidades que puedan darse.

Por lo tanto, se establecen una serie de diámetros estandarizados para los cuales se evaluarán diferentes configuraciones de profundidad de cimentación. Esto resulta en un valor de N diferente para cada caso (resultado de la suma del peso de la cimentación más la mitad del peso del pórtico. Este peso puede obtenerse del Anexo 1, el cual analiza las reacciones totales soportadas en la base del pórtico).

En cuanto a los diámetros estandarizados se suele emplear 0.75m y 1m, con rangos de profundidad que van desde los 2m a 3.2m para diámetro 0.75m y de 2.5m a 4m para diámetro 1 metro. Como resultado se tiene 29 macizos de entre los cuales se elige aquel que satisfaga los requerimientos.

El valor del momento de vuelco obtenido tiene unidades N·m.

Tabla 6-12 Familia de Macizos de d=0,75m

h	a=b=e	N	K ₁	K ₂	1-E _p	M _b	Coef. Seg.	M _{adm} desmonte	M _{adm} terraplén
2,000	0,600	3.211,430	0,400	2,111	0,821	13.117,567	4,500	44.107	33.929
2,100	0,600	3.260,027	0,400	2,115	0,836	15.391,399	4,500	49.067	37.744
2,200	0,600	3.308,623	0,400	2,119	0,849	17.913,813	4,500	54.292	41.763
2,300	0,600	3.357,220	0,400	2,123	0,860	20.698,250	4,500	59.781	45.985
2,400	0,600	3.405,816	0,400	2,128	0,871	23.758,295	4,500	65.537	50.413
2,500	0,600	3.454,413	0,400	2,132	0,880	27.107,681	4,500	71.560	55.046
2,600	0,600	3.503,009	0,400	2,137	0,888	30.760,307	4,500	77.851	59.886
2,700	0,600	3.551,606	0,400	2,142	0,895	34.730,240	4,500	84.413	64.933
2,800	0,600	3.600,202	0,400	2,147	0,902	39.031,725	4,500	91.247	70.190
2,900	0,600	3.648,799	0,400	2,152	0,908	43.679,196	4,500	98.353	75.657
3,000	0,600	3.697,395	0,400	2,157	0,914	48.687,278	4,500	105.735	81.334
3,100	0,600	3.745,992	0,400	2,162	0,919	54.070,796	4,500	113.392	87.224
3,200	0,600	3.794,588	0,400	2,167	0,923	59.844,782	4,500	121.327	93.328

Tabla 6-13 Familia de Macizos de d=1m

h	a=b=e	N	K ₁	K ₂	1-Ep	M _b	Coef. Seg.	M _{adm} desmonte	M _{adm} terraplén
2,500	0,600	4.399,345	0,400	2,036	0,880	34.820,335	4,500	84.559	65.046
2,600	0,600	4.485,739	0,400	2,037	0,888	39.422,645	4,500	91.855	70.658
2,700	0,600	4.572,133	0,400	2,038	0,895	44.411,519	4,500	99.450	76.500
2,800	0,600	4.658,526	0,400	2,040	0,902	49.802,717	4,500	107.343	82.572
2,900	0,600	4.744,920	0,400	2,041	0,908	55.612,075	4,500	115.537	88.874
3,000	0,600	4.831,314	0,400	2,042	0,914	61.855,514	4,500	124.030	95.407
3,100	0,600	4.917,708	0,400	2,043	0,919	68.549,043	4,500	132.823	102.172
3,200	0,600	5.004,102	0,400	2,045	0,923	75.708,768	4,500	141.918	109.168
3,300	0,600	5.090,495	0,400	2,046	0,927	83.350,898	4,500	151.314	116.396
3,400	0,600	5.176,889	0,400	2,048	0,931	91.491,747	4,500	161.013	123.856
3,500	0,600	5.263,283	0,400	2,049	0,935	100.147,744	4,500	171.015	131.550
3,600	0,600	5.349,677	0,400	2,051	0,938	109.335,435	4,500	181.321	139.477
3,700	0,600	5.436,071	0,400	2,052	0,941	119.071,491	4,500	191.931	147.639
3,800	0,600	5.522,464	0,400	2,054	0,944	129.372,710	4,500	202.847	156.036
3,900	0,600	5.608,858	0,400	2,056	0,947	140.256,027	4,500	214.069	164.669
4,000	0,600	5.695,252	0,400	2,058	0,949	151.738,514	4,500	225.599	173.538

6.2.4 Dimensionamiento de las Cimentaciones:

De igual modo que para el método anterior, se buscará un macizo que cumpla las condiciones de vuelco ante la situación más desfavorable entre las simulaciones.

Para las situaciones persistentes o transitorias el valor máximo de momento en la base del poste es de 113.132N·m. Se requeriría cimentación de 0.75m de diámetro y 3.1m de profundidad o cimentación de 1m de diámetro y 2.9m de profundidad.

$$113.132N \cdot m \leq 113.392N \cdot m$$

$$113.132N \cdot m \leq 115.537N \cdot m$$

En cuanto a las situaciones accidentales, el mayor momento es de 208.375N·m, lo cual implica recurrir a un macizo de un metro de diámetro y 3.9m de profundidad.

$$208.375N \cdot m \leq 214.069N \cdot m$$

7 RESULTADOS

7.1 Resumen y análisis de los resultados

7.1.1 Análisis Estático. ELU

De los cálculos del Estado Límite Último se pueden extraer los siguientes porcentajes de aprovechamiento por secciones:

Tabla 7-1 Comparativa de porcentajes de aprovechamiento ELU

Sección	Permanentes y Transitorias			Accidentales		
	Resistencia	Estabilidad	% Apr.	Resistencia	Estabilidad	% Apr.
1 Cordones Poste	85,71%	53,66%	85,71%	115,79%	29,96%	115,79%
2 Pletinas Poste	76,89%	52,96%	76,89%	38,49%	26,57%	38,49%
3 Cordones Dintel	88,04%	84,58%	88,04%	254,07%	238,58%	254,07%
4 Angulares Dintel	11,98%	30,01%	30,01%	35,82%	102,01%	102,01%
6 Silletas cuadradas	51,87%	2,17%	51,87%	43,65%	7,89%	43,65%
7 Jabalcones cilíndricos	30,05%	24,03%	30,05%	29,51%	26,26%	29,51%
8 Soporte de ménsulas	22,59%	0,08%	22,59%	15,14%	3,61%	15,14%

Analizando en primer lugar los valores obtenidos para la Situación de cargas Permanentes y Transitorias, se puede concluir que, como era de esperar, todos los componentes de la estructura cumplen con los requisitos de resistencia y estabilidad.

Como estos cálculos se han basado en las envolventes de cargas para cada tipo de sección, aplicadas sobre un pórtico especialmente solicitado, se puede asegurar que cualquier pórtico de catenaria de 26m como el empleado en este análisis, podrá resistir todas las solicitudes de cargas, ante cualquier hipótesis y configuración.

En los resultados destaca un aprovechamiento alto de los cordones del poste y los montantes del dintel, que resultan ser los elementos más solicitados.

La hipótesis de viento transversal es la que mayores esfuerzos genera en los postes por efecto del momento flector en la base de los mismos, ya que este viento incide sobre los laterales de 4 cordones de poste y sobre una cara completa del dintel, resultando en una superficie notable sobre la que ejercer la presión. En cuanto al dintel, las mayores tensiones las sufre bajo la acción de la carga de hielo, que aumenta el peso que soporta la estructura.

El resto de componentes, tales como silletas, jabalcones y soportes de giro de ménsulas, presentan requerimientos bastante bajos, ya que son ellos los que reciben las acciones de las ménsulas de forma más directa sin que se generen grandes momentos. En concreto, el soporte de ménsulas prácticamente no sufre axial, por lo que su aprovechamiento para pandeo es casi 0.

En la figura 7.1 se muestra un ejemplo de las tensiones axiales máximas, tanto positivos como negativos, generados bajo la hipótesis 6 de cargas. Estos máximos los sufren los cordones de los postes, aunque también hay presentes valores altos en algunos puntos de los cordones del dintel.

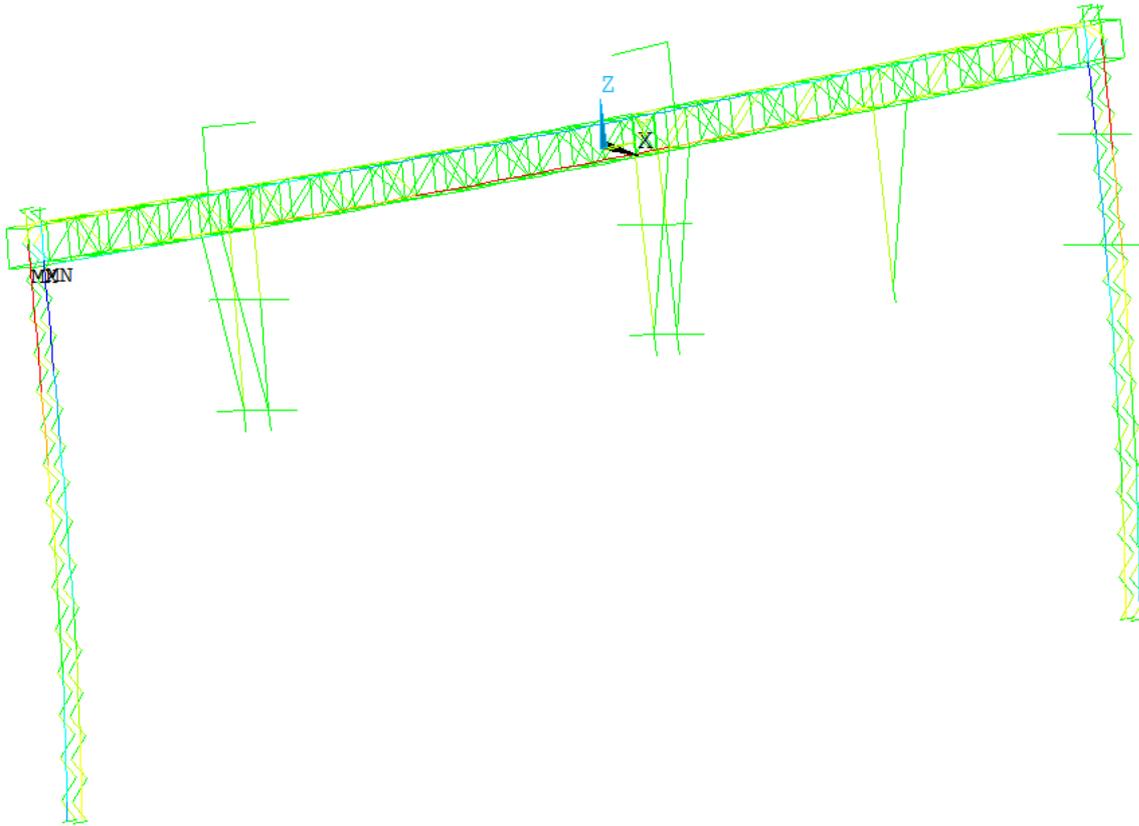


Figura 7-1 Esfuerzos axiales en la hipótesis 6 de situaciones Permanentes y Transitorias.

En cuanto a las situaciones accidentales, se puede concluir de la tabla que ni los cordones del poste y del dintel (elementos principales) ni los LPN-45x5 resistirían estas condiciones. Esto es más evidente en el supuesto de “Viento Transversal + Accidentales”, cuando la rotura del conductor se aplica en la misma dirección que el viento.

A pesar de que elementos como el soporte de giro de dos ménsulas o las silletas soportarían todo el esfuerzo derivado del tense del conductor roto, estos no sufrirían un fallo. Lo cual significa que este esfuerzo pasaría al dintel, desencadenando un colapso generalizado. Este resultado confirma que la rotura de los conductores sería desastroso para el pórtico, provocando que los elementos principales superen sus tensiones admisibles máximas.

Los cordones de poste y dintel fallan por resistencia, a causa de la flexión principalmente, mientras que las pletinas del dintel pandean, ya que el axial en este punto es muy elevado.

Analizando la hipótesis de “Viento Transversal + Accidentales”, se aprecia en la figura 7-3 que el axial máximo lo sufre el dintel, ya que ahí se recogen estas fuerzas derivadas de la rotura del conductor. También se obtienen valores altos en los cordones de los postes y algunas pletinas del dintel.

En cuanto a los momentos flectores, el valor máximo lo sufren de nuevo los postes, siendo en este caso momentos superiores a la resistencia de los mismos. El más solicitado es el izquierdo, a pesar de que el viento es uniforme. Esto ocurre porque las roturas de conductores se producen en las ménsulas de las silletas 1 y 2, y ambas están más próxima a este poste.

Por lo tanto se puede concluir que la estructura cumple con los requisitos del ELU para situaciones normales, pero que se superarían los límites de resistencia en varios componentes bajo la acción accidental derivada de la rotura de un conductor.

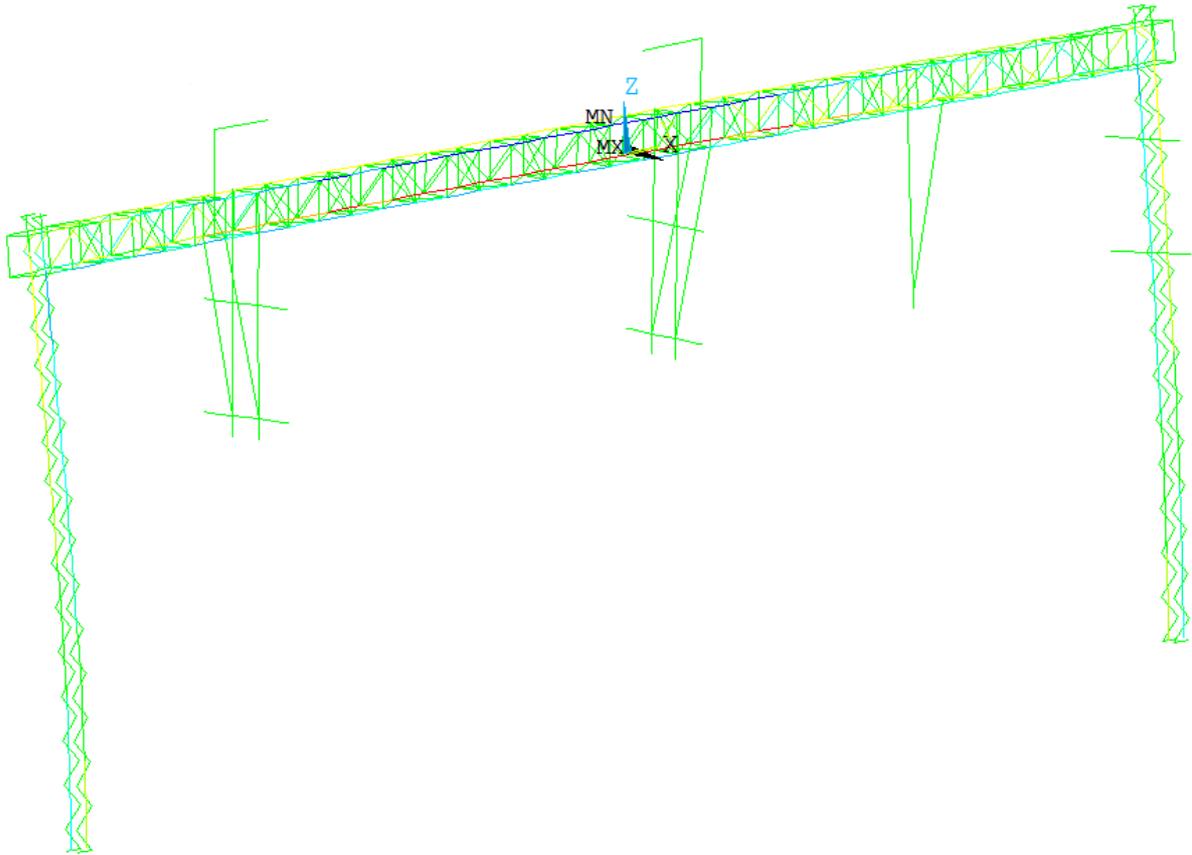


Figura 7-2 Esfuerzos axiales en la hipótesis 6 de situaciones Accidentales

Al demostrar que este efecto es muy perjudicial, se describirá un criterio que pueda evitarlo, ya que la opción de sobredimensionar los elementos ante un evento muy poco frecuente no es una solución válida.

El punto de la línea en el que se produciría la rotura, así como la temperatura ambiente, no pueden preverse. Por otro lado, modificar la longitud de regulación tampoco es una opción, ya que implicaría modificar muchos parámetros, como la longitud de los postes y de las guías de contrapesas. También implicaría recalcular el semicantón máximo apto para la nueva longitud de regulación.

La única solución pasa por controlar la longitud de las ménsulas. Su longitud debería incrementarse en:

$$2025mm - 1918mm = 107mm \quad \text{Ménsula 2}$$

$$2025mm - 1973mm = 52mm \quad \text{Ménsula 4}$$

Donde 2025mm es la longitud mínima de la ménsula para que el giro de la misma no sea completo.

Son 2 los factores principales que determinan la longitud. El primero es el descentramiento. Cuando el valor es positivo significa que el hilo se acerca al poste, en este caso 800mm con respecto al eje de vía. Este descentramiento no puede cambiarse ya que una de las condiciones de diseño de las agujas tangenciales es precisamente garantizar ese valor.

El segundo factor es el gálibo, que es la distancia entre el poste (silleta en este caso) y el eje de vía. En condiciones normales es otro parámetro invariable, ya que depende del punto en el que se haya colocado el poste, y una vez colocado no se puede cambiar. Pero al tratarse de una silleta, esta puede desplazarse ajustando los contratacones. A mayor gálibo mayor será la longitud de ménsula.

Como medida de seguridad se aumentará el gálibo en 120mm para ménsula 2 (pasando de 2655 a 2775) y en 70 para la ménsula 4 (pasando de 2412 a 2482). Conocido este nuevo gálibo se calcula una ménsula que siga ubicando el hilo en el mismo punto pero que sus tacones estén ligeramente más lejos.

En la siguiente figura se compara el efecto del aumento de gálibo, la ménsula izquierda (corregida) es 120mm más larga que la derecha (original).

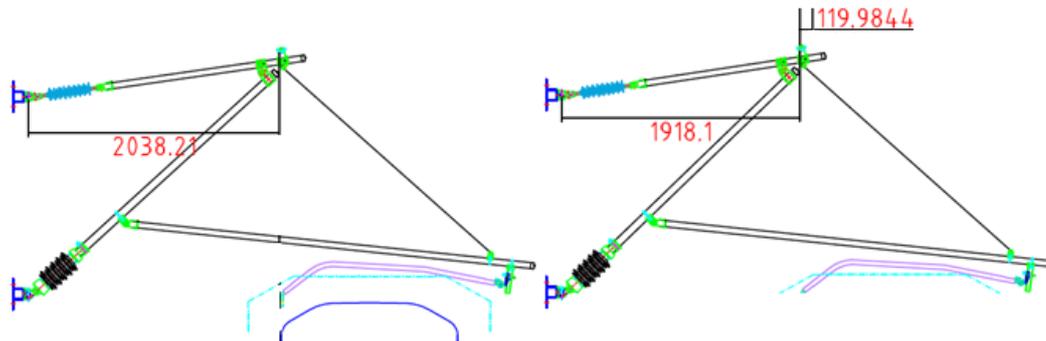


Figura 7-3 Aumento de Gálibo

Esta solución presenta limitaciones, ya que modificar los gálibos tiene consecuencias. La silleta 1 se desplazará una cierta longitud hacia la izquierda y la silleta 2 a la derecha, por lo que surge el peligro de invasión del gálibo cinemático de las vías contiguas.

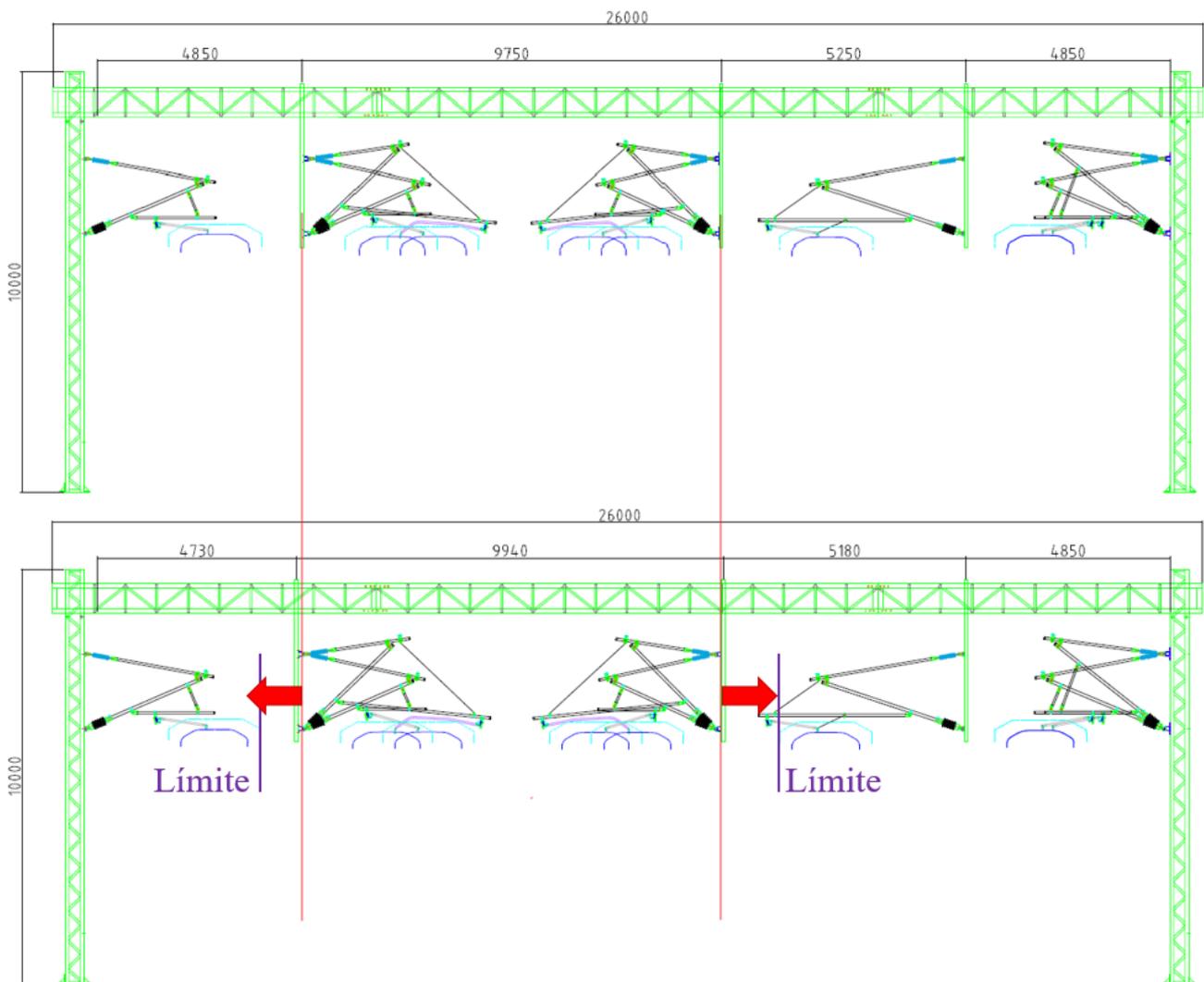


Figura 7-4 Desplazamiento de Silletas

En este caso, la modificación es lo suficientemente pequeña como para no sobrepasar el límite a partir del cual la silleta desplazada invadiría el gálibo cinemático del pantógrafo de la vía contigua. Esta comprobación se haría de forma gráfica, asegurando que la geometría de la estructura permite acomodar la solución.

De esta manera se garantiza que, ante la rotura de un conductor, las contrapesas siempre alcanzarán el suelo antes de completar el giro de las ménsulas, evitando así la rotura de elementos y vuelco de los postes.

7.1.2 Análisis Estático. ELS

Comprobando el Estado Límite de Servicio se ha demostrado que bajo ninguna de las hipótesis se supera la flecha máxima permitida en el dintel (5cm) o en los postes (4cm). La hipótesis que más influencia ha tendido en el dintel ha sido la de Viento Transversal Predominante, y en los postes la hipótesis de Viento Transversal Predominante.

Tabla 7-2 Comparativa de porcentajes de aprovechamiento ELS

Combinación poco probable	Dintel	Postes
Hipótesis 1 (Hielo predominante con Viento Longitudinal)	4,76	2.37
Hipótesis 2 (Hielo predominante con Viento Transversal)	4,7	2.21
Hipótesis 3 (Mantenimiento predominante con Viento Longitudinal)	4,27	2.28
Hipótesis 4 (Mantenimiento predominante con Viento Transversal)	4,44	1.88
Hipótesis 5 (Viento Longitudinal Predominante)	4,35	2.78
Hipótesis 6 (Viento Transversal Predominante)	4,87	2.02

Combinación frecuente	Dintel	Postes
Hipótesis 1/2 (Hielo predominante con viento indiferente)	4,07	2.13
Hipótesis 3/4 (Mantenimiento predominante con viento indiferente)	3,87	1.84
Hipótesis 5 (Viento longitudinal predominante)	3,91	2.66
Hipótesis 6 (Viento transversal predominante)	3,86	1.92

Comparando ambas situaciones, las combinaciones frecuentes dan como resultado flechas menores tanto en el dintel como en los postes. Esto obedece a los coeficientes empleados para las hipótesis, ya que la comprobación poco probable analiza los efectos de unas cargas variables mayores.

Como resumen, se puede concluir que el Estado Límite de Servicio del pórtico no se ve sobrepasado en ninguno de sus elementos principales (postes y dintel) bajo ninguna de las hipótesis de cargas a las que puede estar sometido.

7.1.3 Análisis Dinámico

En el primer punto de este análisis se han obtenidos los modos de vibración y las frecuencias naturales del pórtico empleando dos modelos distintos. El primero incluía todos los elementos principales del pórtico pero no se tenía en cuenta las ménsulas ni los conductores. El segundo, más preciso, simulaba estos elementos por medio de su masa equivalente aplicada de forma puntual.

Comparando ambos modelos se aprecia que presentan modos de vibración similares aunque difieren en las frecuencias naturales, siendo menores las del modelo más preciso, ya que añadir masa a una estructura reduce la frecuencia natural de la misma. En base a esto se puede señalar la importancia que tiene sobre los resultados el modelizar la estructura con precisión.

Como el Modelo 2 es el más detallado, se empleará su rango de frecuencias naturales para determinar si las acciones externas a las que se ve sometido el pórtico son susceptibles de entrar en resonancia con el mismo. Su rango de frecuencias es:

0.5Hz - 4Hz

Vibraciones producidas por las ruedas

Como conclusión más evidente, las vibraciones a las que se ve sometida la vía bajo el paso de un tren de Alta Velocidad presenta un rango de frecuencias de 5Hz a 25Hz. Este rango está por encima de las frecuencias del pórtico por lo que no podría generarse resonancia en el la estructura aunque las ondas llegasen hasta ella.

Además, el diseño de las vías y condiciones de circulación impiden que se alcance la velocidad crítica, ya que esto generaría excesivas vibraciones en la vía e inmediaciones, lo que implica un riesgo de descarrilamiento. De modo que al tomar medidas para evitar este suceso, todas las vibraciones serán absorbidas íntegramente por el balasto, impidiendo que lleguen al pórtico en ningún caso.

Por lo tanto, las ondas generadas no alcanzarán nunca los elementos adyacentes a la vía, y aunque esto ocurriese, lo haría con un rango de valores que no sería coincidente con la frecuencia del pórtico.

Presión-succión

Este fenómeno presenta, en el caso más desfavorable, una frecuencia de 0.017Hz ya que está directamente relacionado con la frecuencia de paso de los trenes, la cual está limitada a un tren cada 3 minutos. El valor obtenido es muy bajo, fuera del rango de frecuencias del pórtico, por lo que es una acción que tampoco podrá generar resonancia.

Como conclusión, a la vista de este análisis, se puede asegurar que el pórtico de catenaria analizado (a pesar de que sus frecuencias naturales son relativamente bajas), así como el resto de estructuras utilizadas en la electrificación de líneas de alta velocidad, no son susceptibles de entrar en resonancia bajo ninguna acción derivada del paso del tren por sus vías.

7.1.4 Análisis de la Cimentación.

Este pórtico requiere un cálculo detallado de la cimentación, ya que dimensionarla en base del valor de rotura de los postes resultaría en cimentaciones muy grandes.

Se han comparado dos métodos empleados para este fin con resultados similares. Ambos son usados para el dimensionamiento de macizos de electrificación, aunque el método Sultzberger está adaptado del cálculo empleado en líneas de alta tensión, mientras que el ORE es específico para plataforma ferroviaria ya que ha sido desarrollado por la UIC.

La principal diferencia entre ellos es que el ORE está basado en datos experimentales y pruebas realizadas sobre terreno ferroviario (esto hace que sea el método más usado), mientras que Sultzberger se basa en coeficientes del terreno y distribución triangular de las tensiones. En cuanto a los resultados:

Tabla 7-3 Comparación de resultados

	Situaciones Permanentes y Transitorias		Situaciones Accidentales	
	Diámetro	Profundidad	Diámetro	Profundidad
SULTZBERGER	1,00	3,30	1,00	4,00
O.R.E	1,00	2,90	1,00	3,90

Se observan ligeras diferencias entre los métodos, obteniéndose valores más conservadores con el método Sultzberger debido principalmente a los coeficientes de seguridad. Aun así, la diferencia en términos de volumen de macizo entre un método y otro no supera el 15%.

Como ya se ha demostrado en el estudio del ELU, las cargas accidentales provocarían el fallo de algunos componentes, pero analizando los cálculos de las cimentaciones se concluye además que la acción accidental provocaría el vuelco de la cimentación dimensionada en las situaciones Permanentes y Transitorias.

7.2 Conclusiones

En la introducción de este trabajo se definía el objetivo del mismo, que consiste en la realización de un cálculo detallado de la estructura, para posteriormente analizar los resultados y comprobar el grado de sobredimensionamiento.

Los resultados del Estado Límite Último para las situaciones Permanentes o Transitorias arrojan aprovechamientos del 85% y 88% en sus elementos principales (cordones de los postes y del dintel respectivamente), y en torno al 50% para el resto de componentes.

Estos valores en ambos tipos de cordones son relativamente altos, aunque presentan cierto margen. Hay que tener en cuenta que se trata de un pórtico especialmente solicitado, soportando el peso de 20 conductores. Se diseñó una configuración de estas características con el objetivo de englobar bajo un mismo cálculo todas las situaciones posibles, y poder extrapolar los resultados a todos los pórticos de 26m como este.

En condiciones normales este tipo de pórtico se usa para dar cobertura a 4 vías o 5 como máximo. Puntualmente podría usarse también para situaciones de 3 vías, aunque generalmente para estos casos se recurre a pórticos más pequeños. Por lo que el número de conductores a soportar varía entre 12 y 20 conductores.

De este modo, el resto de pórticos que compartan diseño y componentes, sometidos a cualquier otra distribución, soportarán unas cargas que serán menores o iguales. En base a esto se puede concluir que, en la mayoría de las situaciones, los pórticos presentarán sobredimensionamientos apreciables.

Una posible mejora sería implementar un estudio individualizado de los pórticos, analizando las situaciones particulares. Tras esto se podría dimensionar los elementos con precisión para cada situación. Así se conseguiría reducir los costes del acero y del montaje, pero conllevaría ciertas desventajas que hace que este cálculo individualizado no se realice.

- Aumentaría el coste de ingeniería, ya que calcular en detalle todos los pórticos de un proyecto implica un elevado número de horas de trabajo.
- Por otro lado se obtendría una gran cantidad de pórticos diferentes, adaptados a las necesidades en cada caso, derivando en familias extensas con distintos tipos de componentes. Este último punto impediría el estandarizado de los elementos, que a su vez dificulta los pedidos a proveedores.

En vista de todo lo anterior, se resumen las principales conclusiones que se pueden extraer de este trabajo:

- Los cálculos han podido determinar que existe un cierto grado de sobredimensionamiento en estas estructuras, pero no lo suficientemente concluyente como para justificar los costes derivados de un cálculo individual. Conocer hasta qué punto y de qué forma podría llegar a ser beneficioso implicaría un estudio económico detallado donde entrarían en juego factores de mercado.
- Cuantificar los efectos derivados de la rotura de un conductor ha permitido demostrar que el resultado sería devastador para el pórtico. En base a esto, se podría realizar una corrección con el fin de impedir este suceso.
- Se ha podido concluir que el pórtico, así como cualquier elemento portante presente en los proyectos de electrificación, no podrá verse sometido a resonancia por el efecto de succión del tren o las vibraciones transmitidas por sus ruedas.

8 Anexos

8.1 Anexo 1. Validación del modelizado.

El modelizado de los elementos del pórtico, debido a su alto número de elementos, es susceptible de fallos, derivados de omisiones de elementos, asignación incorrecta de secciones, longitudes inadecuadas, etc.

Una forma de comprobar que este punto es correcto antes de proceder con los cálculos, consiste en comparar el valor de las reacciones verticales totales en el pórtico, con la suma del peso de todos los elementos.

Como resultado de las reacciones se tiene:

$$44.341N$$

Para la obtención de los pesos de **elementos del dintel** se tiene en cuenta que:

- En cuanto a las coordenadas X y Z, se reducen sus valores en 28mm ya que se toma como referencia el eje de masas y no las cotas de las piezas. Respecto a la coordenada Y, puede emplearse los 750mm de longitud de los segmentos sin reducir.
- Las diagonales del dintel presentan distinta longitud dependiendo de la cara a la que pertenecen, ya que las caras frontal y trasera miden 0.7m y las superior e inferior miden 0.5m.

$$Ld_{0.7} = \sqrt{0.75^2 + (0.75 - 2 \cdot 0.028)^2} = 0.988552477m \quad (8.1)$$

$$Ld_{0.5} = \sqrt{0.5^2 + (0.5 - 2 \cdot 0.028)^2} = 0.871570992m \quad (8.2)$$

- Lo mismo ocurre con los elementos verticales.

$$Lv_{0.7} = 0.7 - 2 \cdot 0.028 = 0.644m$$

$$Lv_{0.5} = 0.5 - 2 \cdot 0.028 = 0.444m$$

- Las barras antitorsión son todas iguales.

$$La = \sqrt{(0.5 - 2 \cdot 0.028)^2 + (0.7 - 2 \cdot 0.028)^2} = 0.782222475m \quad (8.3)$$

- En cuanto a los montantes, sus longitudes siguen la coordenada Y por lo que no presentan reducción. Se hace distinción entre la pieza central de 12m y las extremas de 7m.

$$Lmc = 12m$$

$$Lmf = 7m$$

- Los elementos como silleas, jabalcones y soportes de giro para dos ménsulas tienen una longitud fija por lo que es fácil obtener su masa.

Para obtener la longitud total se analiza el número de piezas principales (pieza central de 12m, y dos piezas extremas de 7m), el número de barras de cada tipo por pieza, y el número de caras en las que aparece cada barra. De esta forma se tiene:

Tabla 8-1 Segmento de 12m (Dintel)

Tipo barra	Nº Segmentos	Nº Barras	Nº de caras	L por pieza	L total (m)
Diagonales 0,7	1	16	2	0,988	31,633
Diagonales 0,5	1	16	2	0,871	27,890
Verticales 0,7	1	17	2	0,644	21,896
Verticales 0,5	1	17	2	0,444	15,096
Antitorsión	1	2	8	0,782	12,51
Montantes	1	4	1	12	48

Sumando las longitudes totales por cada tipo de perfil, y conociendo su peso lineal, se llega a:

Tabla 8-2 Peso del segmento de 12m (Dintel)

	Metros	Peso N/m	N	KG
LPN 45x5	109,03	33,2	3619,84	369,12
LPN 100x8	48	120	5760	587,35

Del mismo modo se procede con las piezas extremas.

Tabla 8-3 Segmentos de 7m (Dintel)

Tipo barra	Nº Segmentos	Nº Barras	Nº de caras	L por pieza	L total (m)
Diagonales 0,7	2	8	2	0,988	31,633
Diagonales 0,5	2	8	2	0,871	27,890
Verticales 0,7	2	9	2	0,444	15,984
Verticales 0,5	2	9	2	0,644	23,184
Antitorsión	2	2	8	0,782	25,031
Montantes	2	4	1	7	56

Tabla 8-4 Peso segmentos de 7m (Dintel)

	Metros	Peso N/m	N	KG
LPN 45x5	123,72	33,2	4107,60	418,85
LPN 100x8	56	120	6720	685,01

Con los **postes** se dan situaciones similares. Se tiene en cuenta que:

- La coordenada Y es la que ahora sufre variaciones, ya que el ala de los UPN presenta una longitud de 90mm. Esto afecta a las diagonales por partida doble, recortando su longitud. Por otro lado, no todas las diagonales tienen la misma longitud, hay 3 tipos.

$$Ld_1 = \sqrt{0.35^2 + (0.45 - 2 \cdot 0.09)^2} = 0.442040722m \quad (8.4)$$

$$Ld_2 = \sqrt{0.3^2 + (0.45 - 2 \cdot 0.09)^2} = 0.403608721m \quad (8.5)$$

$$Ld_3 = \sqrt{0.25^2 + (0.45 - 2 \cdot 0.09)^2} = 0.36796739m \quad (8.6)$$

- Existen 2 diagonales, las extremas, que cierran el poste de forma horizontal:

$$Ld_f = 0,45 - 2 \cdot 0,09 = 0,27m$$

- En cuanto a los cordones de los postes, no ven afectada su longitud sobre la coordenada Z.

$$Lc = 10m$$

Tabla 8-5 Postes

Tipo barra	Nº Postes	Nº Barras	Nº de caras	L por pieza	L total (m)
Montante	2	2	1	10	40
Diag. Tipo 1	2	14	2	0,442	24,75
Diag. Tipo 2	2	15	2	0,403	24,21
Diag. Tipo 3	2	1	2	0,367	1,471
D. Extrema	2	2	2	0,27	2,16

Tabla 8-6 Peso de postes

	Metros	Peso N/m	N	KG
UPN-260	40	374	14960	1524,97
ch-50x20	52,60	77	4050,40	412,88

Por último, se analizan las piezas que conforman las silletas.

Tabla 8-7 Tubos de silletas jabalcones y soportes

Tipo barra	Nº Piezas	Nº Barras	L por pieza	L total (m)
Silleta de ménsulas	5	1	4	20
Tuvo vertical Feeder	2	1	1,975	3,95
Tuvo horizontal Feeder	2	1	1,33	2,66

Tipo barra	Nº Piezas	Nº Barras	L por pieza	L total (m)
Tubo cilíndrico	5	1	4	20

Tipo barra	Nº Piezas	Nº Barras	L por pieza	L total (m)
Tubo Rectangular	6	1	1,7	10,2

Tabla 8-8 Peso de silletas, jabalcones y soportes

	Metros	Peso N/m	N	KG
Tubo 80x4	26,61	89,4	2378,934	242,5009

	Metros	Peso N/m	N	KG
Tubo 54x2.6	20	33,1	662	67,48216

	Metros	Peso N/m	N	KG
Tubo 100x6	10,2	165	1683	171,5596

Finalmente, sumando todos los valores, se llega a:

43.941,79

Haciendo un comparativo, se aprecia que la diferencia es menor del 1%, lo que implica una coincidencia muy elevada en el peso, distando únicamente 40kg en una estructura de casi 4000Kg.

Tabla 8-9 Comparativo

	Peso Total	Reacciones	Diferencia %
TOTAL	43.941,79	44.341	0,90849%

Como conclusión, el proceso de modelizado de la estructura se da por válido.

8.2 Anexo 2. Sismos.

8.2.1 Clasificación de las construcciones

En el apartado 1.2.2 de la norma NCSE-02 se clasifican las construcciones, según el uso al que se destinan y los daños que puede causar su destrucción, en los siguientes tipos:

1. *De importancia moderada*: Aquellas con probabilidad despreciable de que su destrucción por el terremoto pueda ocasionar víctimas, interrumpir un servicio primario, o producir daños económicos significativos a terceros.
2. *De importancia normal*: Aquellas cuya destrucción por el terremoto pueda ocasionar víctimas, interrumpir un servicio para la colectividad, o producir importantes pérdidas económicas, sin que en ningún caso se trate de un servicio imprescindible ni pueda dar lugar a efectos catastróficos.
3. *De importancia especial*: Aquellas cuya destrucción por el terremoto puede interrumpir un servicio imprescindible o dar lugar a efectos catastróficos.

Dentro de la última categoría, se incluyen entre otras, “Edificios e instalaciones vitales de los medios de transporte en las estaciones de ferrocarril, aeropuertos y puertos”.

Por lo tanto y a los efectos de determinar los criterios a seguir en el proyecto en lo referente a las acciones sísmicas, se considera que la obra se encuadra dentro de la categoría 3 (construcciones de importancia especial).

8.2.2 Criterios de Aplicación de la Norma

De acuerdo con el apartado 1.2.3 de la norma de construcción sismorresistente NCSE-02, no es obligatoria la aplicación de la misma Norma en los siguientes casos:

- En las construcciones de importancia moderada.
- En las edificaciones de importancia normal o especial cuando la aceleración sísmica básica a_b sea inferior a $0.04g$, siendo g la aceleración de la gravedad.
- En las edificaciones de importancia normal con pórticos bien arriostrados entre sí en todas las direcciones cuando la aceleración sísmica básica a_b sea inferior a $0.08g$, siendo g la aceleración de la gravedad.

La aplicación de la Norma es, por lo tanto, obligatoria en las construcciones de importancia normal o especial cuando la aceleración sísmica básica “ a_b ” es igual o superior a $0.04g$.

8.2.3 Mapa de Peligrosidad Sísmica. Aceleración sísmica básica

La peligrosidad sísmica del territorio nacional se define por medio del mapa de peligrosidad sísmica de la figura adjunta, incluido en el apartado 2.1 de la citada norma NCSE-02. De dicho mapa se extrae (expresada en relación al valor de la gravedad) g , la aceleración sísmica básica, a_b (un valor característico de la aceleración horizontal de la superficie del terreno) y el coeficiente de contribución K (que tiene en cuenta la influencia de los distintos tipos de terremotos esperados en la peligrosidad sísmica de cada punto).



Figura 8-1 Peligrosidad sísmica

8.2.4 Clasificación del Terreno

Los terrenos se clasifican en los siguientes tipos:

- *Terreno tipo I:* Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $V_s > 750$ m/s.
- *Terreno tipo II:* Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $750 \text{ m/s} > V_s > 400$ m/s.
- *Terreno tipo III:* Suelo granular de compactación media, o suelo cohesivo de consistencia firme. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $400 \text{ m/s} > V_s > 200$ m/s.
- *Terreno tipo IV:* Suelo granular suelto, o suelo cohesivo blando. Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla, $V_s < 200$ m/s.

A cada uno de estos tipos de terreno se le asigna el valor del coeficiente C indicado en la siguiente tabla que se incluye dentro de la norma NCSR-02.

Tabla 8-10 Coeficiente C en función del tipo de terreno

TIPO DE TERRENO	COEFICIENTE C
I	1,0
II	1,3
III	1,6
IV	2,0

Según la información geotécnica recogida en los proyectos de plataforma se obtiene lo siguiente:

Tabla 8-11 Valor del coeficiente C

SUBTRAMO	TIPO DE TERRENO	C
ZAMORA	III	1,6
VALLADOLID	IV	2

En el anejo 1 de la citada norma, se incluye un listado que detalla por municipios los valores de la aceleración sísmica básica iguales o superiores a 0,04 junto con el coeficiente de contribución K.

Teniendo en cuenta que el presente proyecto discurre en su totalidad por las provincias de Valladolid y Zamora, se obtienen los valores siguientes:

Tabla 8-12 Obtención de coeficientes

PROVINCIA O CIUDAD	a_b / g	K
ZAMORA	<0,04	1
VALLADOLID	<0,04	1

8.2.5 Aceleración Sísmica de Cálculo

La aceleración sísmica de cálculo a_c se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_0 \quad (8.7)$$

Siendo:

a_0 Aceleración sísmica básica

ρ Coeficiente adimensional de riesgo, función de la probabilidad aceptable de que se exceda a_c en el periodo de vida en el que se proyecta la contricción.

Para construcciones de importancia especial $\rho = 1,3$

S Coeficiente de amplificación del terreno

$$\text{Para } \rho \cdot a_0 \leq 0,1g \quad S = \frac{c}{1.25}$$

$$\text{Para } 0,1g \leq \rho \cdot a_0 \leq 0,4g \quad S = \frac{c}{1.25} + 3.33 \cdot \left(\frac{\rho \cdot a_0}{g - 0.1} \right) \left(\frac{1-C}{1.25} \right)$$

$$\text{Para } 0,4g \leq \rho \cdot a_0 \quad S = 1.0$$

C Coeficiente del terreno.

Así pues, se calcula la aceleración sísmica de cálculo en función de la importancia de la construcción para cada caso, de manera que se tiene lo siguiente:

ZAMORA / VALLADOLID

Esta zona tiene un valor de $a_b / g < 0,04$ por tanto están exentas de estudio de acciones sísmicas.

8.2.6 Conclusiones

Según la NCSE-02, en el apartado 1.2.3 en las edificaciones de importancia normal o especial cuando la aceleración sísmica básica sea inferior a 0,04 g, siendo g la aceleración de la gravedad, **no es necesario tener en cuenta los efectos sísmicos.**

8.3 Anexo 3. Tabla de coordenadas y Relaciones.

Se adjunta la tabla donde se recogen las coordenadas de cada Keypoint, así como la relación entre ellos para dar lugar a las líneas.

Tabla 8-13 Coordenadas de los Keypoints (en mm)

KP	X	Y	Z	KP	X	Y	Z	KP	X	Y	Z	KP	X	Y	Z
1	222	0	322	93	-222	-8250	322	185	120	-12402	-8020	277	120	12402	-3270
2	222	0	-322	94	-222	-9000	322	186	120	-12748	-8370	278	120	12748	-3570
3	222	-750	322	95	-222	-9750	322	187	120	-12402	-8720	279	120	12402	-3870
4	222	-750	-322	96	-222	-10500	322	188	120	-12748	-9070	280	120	12748	-4170
5	222	-1500	322	97	-222	-11250	322	189	120	-12402	-9420	281	120	12402	-4500
6	222	-1500	-322	98	-222	-12000	322	190	120	-12748	-9420	282	120	12748	-4870
7	222	-2250	322	99	-222	-12258	322	191	-120	-12402	580	283	120	12402	-5220
8	222	-2250	-322	100	-222	-12748	322	192	-120	-12748	580	284	120	12748	-5570
9	222	-3000	322	101	-222	-13000	322	193	-120	-12402	330	285	120	12402	-5920
10	222	-3000	-322	102	-222	-6750	-322	194	-120	-12748	30	286	120	12748	-6270
11	222	-3750	322	103	-222	-7500	-322	195	-120	-12402	-270	287	120	12402	-6620
12	222	-3750	-322	104	-222	-8250	-322	196	-120	-12748	-570	288	120	12748	-6970
13	222	-4500	322	105	-222	-9000	-322	197	-120	-12402	-870	289	120	12402	-7320
14	222	-4500	-322	106	-222	-9750	-322	198	-120	-12748	-1170	290	120	12748	-7670
15	222	-5250	322	107	-222	-10500	-322	199	-120	-12402	-1470	291	120	12402	-8020
16	222	-5250	-322	108	-222	-11250	-322	200	-120	-12748	-1770	292	120	12748	-8370
17	222	-6000	322	109	-222	-12000	-322	201	-120	-12402	-2070	293	120	12402	-8720
18	222	-6000	-322	110	-222	-12258	-322	202	-120	-12748	-2370	294	120	12748	-9070
19	-222	0	322	111	-222	-12748	-322	203	-120	-12402	-2670	295	120	12402	-9420
20	-222	-750	322	112	-222	-13000	-322	204	-120	-12748	-2970	296	120	12748	-9420
21	-222	-1500	322	113	222	6750	322	205	-120	-12402	-3270	297	-120	12402	580
22	-222	-2250	322	114	222	6750	-322	206	-120	-12748	-3570	298	-120	12748	580
23	-222	-3000	322	115	222	7500	322	207	-120	-12402	-3870	299	-120	12402	330
24	-222	-3750	322	116	222	7500	-322	208	-120	-12748	-4170	300	-120	12748	30
25	-222	-4500	322	117	222	8250	322	209	-120	-12402	-4500	301	-120	12402	-270
26	-222	-5250	322	118	222	8250	-322	210	-120	-12748	-4870	302	-120	12748	-570
27	-222	-6000	322	119	222	9000	322	211	-120	-12402	-5220	303	-120	12402	-870
28	-222	0	-322	120	222	9000	-322	212	-120	-12748	-5570	304	-120	12748	-1170
29	-222	-750	-322	121	222	9750	322	213	-120	-12402	-5920	305	-120	12402	-1470
30	-222	-1500	-322	122	222	9750	-322	214	-120	-12748	-6270	306	-120	12748	-1770
31	-222	-2250	-322	123	222	10500	322	215	-120	-12402	-6620	307	-120	12402	-2070
32	-222	-3000	-322	124	222	10500	-322	216	-120	-12748	-6970	308	-120	12748	-2370
33	-222	-3750	-322	125	222	11250	322	217	-120	-12402	-7320	309	-120	12402	-2670
34	-222	-4500	-322	126	222	11250	-322	218	-120	-12748	-7670	310	-120	12748	-2970
35	-222	-5250	-322	127	222	12000	322	219	-120	-12402	-8020	311	-120	12402	-3270
36	-222	-6000	-322	128	222	12000	-322	220	-120	-12748	-8370	312	-120	12748	-3570
37	222	750	322	129	222	12258	322	221	-120	-12402	-8720	313	-120	12402	-3870
38	222	750	-322	130	222	12258	-322	222	-120	-12748	-9070	314	-120	12748	-4170
39	222	1500	322	131	222	12748	322	223	-120	-12402	-9420	315	-120	12402	-4500
40	222	1500	-322	132	222	12748	-322	224	-120	-12748	-9420	316	-120	12748	-4870

KP	X	Y	Z
41	222	2250	322
42	222	2250	-322
43	222	3000	322
44	222	3000	-322
45	222	3750	322
46	222	3750	-322
47	222	4500	322
48	222	4500	-322
49	222	5250	322
50	222	5250	-322
51	222	6000	322
52	222	6000	-322
53	-222	750	322
54	-222	1500	322
55	-222	2250	322
56	-222	3000	322
57	-222	3750	322
58	-222	4500	322
59	-222	5250	322
60	-222	6000	322
61	-222	750	-322
62	-222	1500	-322
63	-222	2250	-322
64	-222	3000	-322
65	-222	3750	-322
66	-222	4500	-322
67	-222	5250	-322
68	-222	6000	-322
69	222	-6750	322
70	222	-6750	-322
71	222	-7500	322
72	222	-7500	-322
73	222	-8250	322
74	222	-8250	-322
75	222	-9000	322
76	222	-9000	-322
77	222	-9750	322
78	222	-9750	-322
79	222	-10500	322
80	222	-10500	-322
81	222	-11250	322
82	222	-11250	-322
83	222	-12000	322
84	222	-12000	-322

KP	X	Y	Z
133	222	13000	322
134	222	13000	-322
135	-222	6750	322
136	-222	7500	322
137	-222	8250	322
138	-222	9000	322
139	-222	9750	322
140	-222	10500	322
141	-222	11250	322
142	-222	12000	322
143	-222	12258	322
144	-222	12748	322
145	-222	13000	322
146	-222	6750	-322
147	-222	7500	-322
148	-222	8250	-322
149	-222	9000	-322
150	-222	9750	-322
151	-222	10500	-322
152	-222	11250	-322
153	-222	12000	-322
154	-222	12258	-322
155	-222	12748	-322
156	-222	13000	-322
157	120	-12402	580
158	120	-12748	580
159	120	-12402	330
160	120	-12748	30
161	120	-12402	-270
162	120	-12748	-570
163	120	-12402	-870
164	120	-12748	-1170
165	120	-12402	-1470
166	120	-12748	-1770
167	120	-12402	-2070
168	120	-12748	-2370
169	120	-12402	-2670
170	120	-12748	-2970
171	120	-12402	-3270
172	120	-12748	-3570
173	120	-12402	-3870
174	120	-12748	-4170
175	120	-12402	-4500
176	120	-12748	-4870

KP	X	Y	Z
225	0	-12748	580
226	0	-12748	322
227	0	-12748	30
228	0	-12748	-322
229	0	-12748	-570
230	0	-12748	-1170
231	0	-12748	-1770
232	0	-12748	-2370
233	0	-12748	-2970
234	0	-12748	-3570
235	0	-12748	-4170
236	0	-12748	-4870
237	0	-12748	-5570
238	0	-12748	-6270
239	0	-12748	-6970
240	0	-12748	-7670
241	0	-12748	-8370
242	0	-12748	-9070
243	0	-12748	-9420
244	0	-12402	580
245	0	-12402	330
246	0	-12402	322
247	0	-12402	-270
248	0	-12402	-322
249	0	-12402	-870
250	0	-12402	-1470
251	0	-12402	-2070
252	0	-12402	-2670
253	0	-12402	-3270
254	0	-12402	-3870
255	0	-12402	-4500
256	0	-12402	-5220
257	0	-12402	-5920
258	0	-12402	-6620
259	0	-12402	-7320
260	0	-12402	-8020
261	0	-12402	-8720
262	0	-12402	-9420
263	120	12402	580
264	120	12748	580
265	120	12402	330
266	120	12748	30
267	120	12402	-270
268	120	12748	-570

KP	X	Y	Z
317	-120	12402	-5220
318	-120	12748	-5570
319	-120	12402	-5920
320	-120	12748	-6270
321	-120	12402	-6620
322	-120	12748	-6970
323	-120	12402	-7320
324	-120	12748	-7670
325	-120	12402	-8020
326	-120	12748	-8370
327	-120	12402	-8720
328	-120	12748	-9070
329	-120	12402	-9420
330	-120	12748	-9420
331	0	12402	580
332	0	12402	330
333	0	12402	322
334	0	12402	-270
335	0	12402	-322
336	0	12402	-870
337	0	12402	-1470
338	0	12402	-2070
339	0	12402	-2670
340	0	12402	-3270
341	0	12402	-3870
342	0	12402	-4500
343	0	12402	-5220
344	0	12402	-5920
345	0	12402	-6620
346	0	12402	-7320
347	0	12402	-8020
348	0	12402	-8720
349	0	12402	-9420
350	0	12748	580
351	0	12748	322
352	0	12748	30
353	0	12748	-322
354	0	12748	-570
355	0	12748	-1170
356	0	12748	-1770
357	0	12748	-2370
358	0	12748	-2970
359	0	12748	-3570
360	0	12748	-4170

KP	X	Y	Z
85	222	-12258	322
86	222	-12258	-322
87	222	-12748	322
88	222	-12748	-322
89	222	-13000	322
90	222	-13000	-322
91	-222	-6750	322
92	-222	-7500	322

KP	X	Y	Z
177	120	-12402	-5220
178	120	-12748	-5570
179	120	-12402	-5920
180	120	-12748	-6270
181	120	-12402	-6620
182	120	-12748	-6970
183	120	-12402	-7320
184	120	-12748	-7670

KP	X	Y	Z
269	120	12402	-870
270	120	12748	-1170
271	120	12402	-1470
272	120	12748	-1770
273	120	12402	-2070
274	120	12748	-2370
275	120	12402	-2670
276	120	12748	-2970

KP	X	Y	Z
361	0	12748	-4870
362	0	12748	-5570
363	0	12748	-6270
364	0	12748	-6970
365	0	12748	-7670
366	0	12748	-8370
367	0	12748	-9070
368	0	12748	-9420

Tabla 8-14 Nodos inicial y final de las líneas

Línea	KP i	KP f
1	1	4
2	4	5
3	5	8
4	8	9
5	9	12
6	12	13
7	13	16
8	16	17
9	1	2
10	3	4
11	5	6
12	7	8
13	9	10
14	11	12
15	13	14
16	15	16
17	17	18
18	20	4
19	3	29
20	22	8
21	7	31
22	24	12
23	11	33
24	26	16
25	15	35
26	19	3
27	3	21
28	21	7
29	7	23
30	23	11
31	11	25
32	25	15
33	15	27
34	19	1

Línea	KP i	KP f
165	18	16
166	16	14
167	14	12
168	12	10
169	10	8
170	8	6
171	6	4
172	4	2
173	2	38
174	38	40
175	40	42
176	42	44
177	44	46
178	46	48
179	48	50
180	50	52
181	27	26
182	26	25
183	25	24
184	24	23
185	23	22
186	22	21
187	21	20
188	20	19
189	19	53
190	53	54
191	54	55
192	55	56
193	56	57
194	57	58
195	58	59
196	59	60
197	36	35
198	35	34

Línea	KP i	KP f
329	105	104
330	104	103
331	103	102
332	102	36
333	51	114
334	114	115
335	115	118
336	118	119
337	119	122
338	122	123
339	123	126
340	126	127
341	113	114
342	115	116
343	117	118
344	119	120
345	121	122
346	123	124
347	125	126
348	127	128
349	133	134
350	135	114
351	113	146
352	137	118
353	117	148
354	139	122
355	121	150
356	141	126
357	125	152
358	60	113
359	113	136
360	136	117
361	117	138
362	138	121

Línea	KP i	KP f
493	198	199
494	199	200
495	200	201
496	201	202
497	202	203
498	203	204
499	204	205
500	205	206
501	206	207
502	207	208
503	208	209
504	209	210
505	210	211
506	211	212
507	212	213
508	213	214
509	214	215
510	215	216
511	216	217
512	217	218
513	218	219
514	219	220
515	220	221
516	221	222
517	222	223
518	223	224
519	225	226
520	226	227
521	227	228
522	228	229
523	229	230
524	230	231
525	231	232
526	232	233

Línea	KP i	KP f
35	20	3
36	21	5
37	22	7
38	23	9
39	24	11
40	25	13
41	26	15
42	27	17
43	28	20
44	20	30
45	30	22
46	22	32
47	32	24
48	24	34
49	34	26
50	26	36
51	19	28
52	20	29
53	21	30
54	22	31
55	23	32
56	24	33
57	25	34
58	26	35
59	27	36
60	2	29
61	29	6
62	6	31
63	31	10
64	10	33
65	33	14
66	14	35
67	35	18
68	28	2
69	29	4
70	30	6
71	31	8
72	32	10
73	33	12
74	34	14
75	35	16
76	36	18
77	1	38
78	38	39

Línea	KP i	KP f
199	34	33
200	33	32
201	32	31
202	31	30
203	30	29
204	29	28
205	28	61
206	61	62
207	62	63
208	63	64
209	64	65
210	65	66
211	66	67
212	67	68
213	17	70
214	70	71
215	71	74
216	74	75
217	75	78
218	78	79
219	79	82
220	82	83
221	69	70
222	71	72
223	73	74
224	75	76
225	77	78
226	79	80
227	81	82
228	83	84
229	89	90
230	91	70
231	69	102
232	93	74
233	73	104
234	95	78
235	77	106
236	97	82
237	81	108
238	27	69
239	69	92
240	92	73
241	73	94
242	94	77

Línea	KP i	KP f
363	121	140
364	140	125
365	125	142
366	135	113
367	136	115
368	137	117
369	138	119
370	139	121
371	140	123
372	141	125
373	142	127
374	145	133
375	68	135
376	135	147
377	147	137
378	137	149
379	149	139
380	139	151
381	151	141
382	141	153
383	135	146
384	136	147
385	137	148
386	138	149
387	139	150
388	140	151
389	141	152
390	142	153
391	145	156
392	52	146
393	146	116
394	116	148
395	148	120
396	120	150
397	150	124
398	124	152
399	152	128
400	146	114
401	147	116
402	148	118
403	149	120
404	150	122
405	151	124
406	152	126

Línea	KP i	KP f
527	233	234
528	234	235
529	235	236
530	236	237
531	237	238
532	238	239
533	239	240
534	240	241
535	241	242
536	242	243
537	244	245
538	245	246
539	246	247
540	247	248
541	248	249
542	249	250
543	250	251
544	251	252
545	252	253
546	253	254
547	254	255
548	255	256
549	256	257
550	257	258
551	258	259
552	259	260
553	260	261
554	261	262
555	263	264
556	264	265
557	265	266
558	266	267
559	267	268
560	268	269
561	269	270
562	270	271
563	271	272
564	272	273
565	273	274
566	274	275
567	275	276
568	276	277
569	277	278
570	278	279

Línea	KP i	KP f
79	39	42
80	42	43
81	43	46
82	46	47
83	47	50
84	50	51
85	37	38
86	39	40
87	41	42
88	43	44
89	45	46
90	47	48
91	49	50
92	51	52
93	53	38
94	37	61
95	55	42
96	41	63
97	57	46
98	45	65
99	59	50
100	49	67
101	19	37
102	37	54
103	54	41
104	41	56
105	56	45
106	45	58
107	58	49
108	49	60
109	53	37
110	54	39
111	55	41
112	56	43
113	57	45
114	58	47
115	59	49
116	60	51
117	28	53
118	53	62
119	62	55
120	55	64
121	64	57
122	57	66
123	66	59

Línea	KP i	KP f
243	77	96
244	96	81
245	81	98
246	91	69
247	92	71
248	93	73
249	94	75
250	95	77
251	96	79
252	97	81
253	98	83
254	101	89
255	36	91
256	91	103
257	103	93
258	93	105
259	105	95
260	95	107
261	107	97
262	97	109
263	91	102
264	92	103
265	93	104
266	94	105
267	95	106
268	96	107
269	97	108
270	98	109
271	101	112
272	18	102
273	102	72
274	72	104
275	104	76
276	76	106
277	106	80
278	80	108
279	108	84
280	102	70
281	103	72
282	104	74
283	105	76
284	106	78
285	107	80
286	108	82
287	109	84

Línea	KP i	KP f
407	153	128
408	156	134
409	51	113
410	113	115
411	115	117
412	117	119
413	119	121
414	121	123
415	123	125
416	125	127
417	127	129
418	129	131
419	131	133
420	52	114
421	114	116
422	116	118
423	118	120
424	120	122
425	122	124
426	124	126
427	126	128
428	128	130
429	130	132
430	132	134
431	60	135
432	135	136
433	136	137
434	137	138
435	138	139
436	139	140
437	140	141
438	141	142
439	142	143
440	143	144
441	144	145
442	68	146
443	146	147
444	147	148
445	148	149
446	149	150
447	150	151
448	151	152
449	152	153
450	153	154
451	154	155

Línea	KP i	KP f
571	279	280
572	280	281
573	281	282
574	282	283
575	283	284
576	284	285
577	285	286
578	286	287
579	287	288
580	288	289
581	289	290
582	290	291
583	291	292
584	292	293
585	293	294
586	294	295
587	295	296
588	297	298
589	298	299
590	299	300
591	300	301
592	301	302
593	302	303
594	303	304
595	304	305
596	305	306
597	306	307
598	307	308
599	308	309
600	309	310
601	310	311
602	311	312
603	312	313
604	313	314
605	314	315
606	315	316
607	316	317
608	317	318
609	318	319
610	319	320
611	320	321
612	321	322
613	322	323
614	323	324
615	324	325

Línea	KP i	KP f
124	59	68
125	53	61
126	54	62
127	55	63
128	56	64
129	57	65
130	58	66
131	59	67
132	60	68
133	2	61
134	61	40
135	40	63
136	63	44
137	44	65
138	65	48
139	48	67
140	67	52
141	61	38
142	62	40
143	63	42
144	64	44
145	65	46
146	66	48
147	67	50
148	68	52
149	17	15
150	15	13
151	13	11
152	11	9
153	9	7
154	7	5
155	5	3
156	3	1
157	1	37
158	37	39
159	39	41
160	41	43
161	43	45
162	45	47
163	47	49
164	49	51

Línea	KP i	KP f
288	112	90
289	89	87
290	87	85
291	85	83
292	83	81
293	81	79
294	79	77
295	77	75
296	75	73
297	73	71
298	71	69
299	69	17
300	90	88
301	88	86
302	86	84
303	84	82
304	82	80
305	80	78
306	78	76
307	76	74
308	74	72
309	72	70
310	70	18
311	101	100
312	100	99
313	99	98
314	98	97
315	97	96
316	96	95
317	95	94
318	94	93
319	93	92
320	92	91
321	91	27
322	112	111
323	111	110
324	110	109
325	109	108
326	108	107
327	107	106
328	106	105

Línea	KP i	KP f
452	155	156
453	157	158
454	158	159
455	159	160
456	160	161
457	161	162
458	162	163
459	163	164
460	164	165
461	165	166
462	166	167
463	167	168
464	168	169
465	169	170
466	170	171
467	171	172
468	172	173
469	173	174
470	174	175
471	175	176
472	176	177
473	177	178
474	178	179
475	179	180
476	180	181
477	181	182
478	182	183
479	183	184
480	184	185
481	185	186
482	186	187
483	187	188
484	188	189
485	189	190
486	191	192
487	192	193
488	193	194
489	194	195
490	195	196
491	196	197
492	197	198

Línea	KP i	KP f
616	325	326
617	326	327
618	327	328
619	328	329
620	329	330
621	331	332
622	332	333
623	333	334
624	334	335
625	335	336
626	336	337
627	337	338
628	338	339
629	339	340
630	340	341
631	341	342
632	342	343
633	343	344
634	344	345
635	345	346
636	346	347
637	347	348
638	348	349
639	350	351
640	351	352
641	352	353
642	353	354
643	354	355
644	355	356
645	356	357
646	357	358
647	358	359
648	359	360
649	360	361
650	361	362
651	362	363
652	363	364
653	364	365
654	365	366
655	366	367
656	367	368

BIBLIOGRAFÍA

- EAE - Instrucción de Acero Estructural. Capítulos III y V.
- EN50119-2017 - Railway applications - Fixed installations - Electric traction overhead contact lines.
- DBSE - Documento Básico de Seguridad Estructural.
- IAPF - Instrucción de acciones a considerar en puentes de ferrocarril
- UNE-EN 1991:3 – Bases de Proyecto y acciones en Estructuras. Parte 3: Acciones del tráfico en Puentes.
- ET - Especificaciones Técnicas de ADIF
- ETI - Especificación técnica de interoperabilidad del subsistema de energía del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad.
- NCSE-02 – Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación.
- GC/GN5612 - Guidance on Loading Requirements for the Design of Railway Structures
- Esveld, C. (2001). Modern Railway Track. Second Edition. MRT – Productions.
- Galvín, P. (2007). Análisis Numérico y Experimental de las Vibraciones Ocasionadas por el Paso de Trenes de Alta Velocidad en el Suelo y en Estructuras Cercanas a la Vía.
- Arcelor – Catálogo de perfiles. Clasificación de las secciones