



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

DISEÑO Y CÁLCULO DE UNA ESTRUCTURA DISCO PARABÓLICA DE UNA CENTRAL SOLAR EN XÀTIVA. (VALENCIA)

AUTOR: VILAR LLORENS, CRISTIAN

TUTOR: MOLINES CANO, JOSE MIGUEL

COTUTOR: JIMÉNEZ MOCHOLÍ, ANTONIO JOSÉ

Curso Académico: 2019-2020

AGRADECIMIENTOS

Después de un largo período de trabajo, en este apartado me gustaría escribir unos agradecimientos.

Para empezar, decir que ha sido un período de aprendizaje intenso, no solo en el ámbito académico, sino también en el ámbito personal. La realización de este trabajo ha supuesto un gran impacto en mí y es por eso que me gustaría agradecer a todas aquellas personas que me han ayudado y apoyado durante este proceso.

En primer lugar, quiero aprovechar esta ocasión para agradecer el apoyo de mis tutores, Antonio José Jiménez Mocholí y Jose Miguel Molines Cano, los cuales siempre han estado ahí para ayudarme cuando lo necesitaba y me han brindado todas las herramientas necesarias para completar mi trabajo de fin de grado satisfactoriamente

En segundo lugar, no puedo olvidar en este momento a mi familia. Sobretudo agradecer a mis padres su comprensión y sus sabios consejos, gracias a ellos soy la persona que soy hoy en día.

Finalmente, también me gustaría acordarme de mis compañeros y compañeras del grado. Son personas maravillosas y sin ellos estos años universitarios no habrían sido lo mismo.

RESUMEN

El objetivo de este proyecto se centra en el dimensionado de una estructura soporte de un disco parabólico de una central solar en Xàtiva. El diseño de la estructura permite el seguimiento de los rayos solares a partir de dos ejes. Además, el análisis incluye el soporte de la superficie reflectora y del elemento de transformación de potencia.

El proyecto se completa, tras el cálculo de la estructura propuesta, por una definición concreta de la solución a adoptar. Dentro de la cual, se incorpora aquella documentación gráfica que define la estructura, y un análisis económico y de viabilidad del proyecto propuesto. Todo ello, con la finalidad de confeccionar un trabajo completo y equiparable a la realidad, para el diseño, proyecto y ejecución de una estructura soporte real.

Palabras clave: disco parabólico, estructura soporte, dimensionado, cálculo.

RESUM

L'objectiu d'aquest projecte es centra en el dimensionat d'una estructura suport d'un disc parabòlic d'una central solar a Xàtiva. El disseny de l'estructura permet el seguiment dels rajos solars a partir de dos eixos. A més, l'anàlisi inclou el suport de la superfície i de l'element de transformació de potència.

El projecte es completa, després del càlcul de l'estructura proposada, per una definició concreta de la solució a adoptar. Dins de la qual, s'incorpora aquella documentació gràfica que defineix l'estructura, i una anàlisi econòmic i de viabilitat del projecte proposat. Tot això, amb la finalitat de confeccionar un treball complet i equiparable a la realitat, per al disseny, projecte i execució d'una estructura suport real.

Paraules clau: disc parabòlic, estructura suport, dimensionat, càlcul.

ABSTRACT

The aim of this project is to design a support structure for a parabolic dish in a solar power plant in Xàtiva. The design of the structure allows the tracking of the sun's rays from two axes. In addition, the analysis includes the support of the reflective surface and the power transformation element.

The project is completed, after the calculation of the proposed structure, by a concrete definition of the solution to be adopted. This includes the graphic documentation that defines the structure and an economic and viability analysis of the proposed project. All of this is done with the aim of preparing a complete job that is comparable to reality, for the design, project and execution of a real support structure.

Keywords: parabolic dish, support structure, calculation.

Índice de la Memoria

MEMORIA	26
1. Introducción	27
1.1. Objetivo del proyecto	27
1.2. Justificación del proyecto	27
1.3. Motivaciones del proyecto	27
1.4. Contexto histórico. Evolución	28
1.5. Elementos a considerar en los discos parabólicos	32
1.5.1. Concentrador	34
1.5.2. Receptor	34
1.5.3. Sistema de generación	34
1.5.4. Estructura soporte y mecanismos	35
1.6. Ubicación del proyecto	35
2. Cálculo estructural	36
2.1. Materiales empleados	36
2.2. Perfiles utilizados	37
2.3. Acciones	37
2.4. Combinaciones	74
2.5. Comprobaciones	77
2.5.1. Estados Límite Últimos	78
2.5.1.1. Estado Límite Último de Resistencia	79
2.5.1.2. Estado Límite Último de Pandeo	84
2.5.1.3. Aumento de perfiles	94

2.5.1.3.1 Segunda comprobación del Estado Límite Último de Resistencia	95
2.5.1.3.2. Segunda comprobación del Estado Límite Último de Pandeo	98
2.5.2. Estados Límite de Servicio	103
2.5.2.1. Criterio de Apariencia	103
2.5.2.1.1. Aumento de perfiles para el cumplimiento del C. Apariencia	106
2.5.2.1.2. Segunda comprobación Criterio de Apariencia	107
2.5.2.2. Criterio de Integridad	109
2.6. Cimentación.....	109
2.6.1. Estados Límites Últimos (ELU)	110
2.6.1.1. Comprobación ELU de Vuelco	110
2.6.1.2. Verificación de la Resistencia	114
2.6.1.2.1. Comprobación del ELU de Deslizamiento	114
2.6.1.2.2. Comprobación del ELU de Hundimiento	116
2.7. Placa de anclaje	117
2.7.1. Apoyo de la placa	117
2.7.2. Determinación del modelo mecánico	118
2.7.3. Comprobaciones Estados Límite Últimos	120
2.7.3.1. ELU de Agotamiento del Apoyo	120
2.7.3.2. ELU de Agotamiento a flexión de la placa	123
2.7.3.3. ELU de Agotamiento de los Pernos	125
2.7.3.4. ELU de Anclaje de los pernos	128
2.8. Arreglo de Armado de la cimentación	130

3. Resumen y Conclusiones	135
PRESUPUESTO	136
4. Presupuestos parciales	137
4.1. Resumen del presupuesto	144
BIBLIOGRAFÍA	145
5. Bibliografía utilizada	145
SOFTWARE	145
6. Software utilizado	145
PLANOS	146

Índice de Tablas

Tabla 1. Características del acero S275JR	36
Tabla 2. Peso propio de la estructura	37
Tabla 3. Valores característicos de las Sobrecargas de Uso	38
Tabla 4. Valores recomendados de c_e para diferentes topografías	39
Tabla 5. Coeficientes de la forma de la carga de nieve	41
Tabla 6. Categorías de terreno y parámetros de terreno	45
Tabla 7. Valores del factor de rugosidad para cada tramo en la posición horizontal	46
Tabla 8. Valores obtenidos para la velocidad media del viento en cada tramo en la posición horizontal	46
Tabla 9. Valores del factor de rugosidad para cada tramo en la posición vertical	47
Tabla 10. Valores obtenidos para la velocidad media del viento en cada tramo en la posición vertical	48
Tabla 11. Valores del factor de rugosidad para cada tramo en la posición inclinada 37º	49
Tabla 12. Valores obtenidos para la velocidad media del viento en cada tramo en la posición inclinada 37º	49
Tabla 13. Valores del factor exposición $C_e(z)$ para cada tramo en la posición horizontal ..	51
Tabla 14. Valores del factor exposición $C_e(z)$ para cada tramo en la posición vertical	51
Tabla 15. Valores del factor exposición $C_e(z)$ para cada tramo en la posición inclinada 37º	52
Tabla 16. Valores de la presión $q_p(z)$ correspondiente a la velocidad de pico para cada tramo de la posición horizontal	52
Tabla 17. Valores de la presión $q_p(z)$ correspondiente a la velocidad de pico para cada tramo de la posición vertical	52
Tabla 18. Valores de la presión $q_p(z)$ correspondiente a la velocidad de pico para cada tramo de la posición inclinada 37º	53
Tabla 19. Valores $c_{p,net}$ y c_f para marquesinas a dos aguas	54

Tabla 20. Valores de $c_{p,net}$ y c_f para la posición horizontal del sistema	54
Tabla 21. Valores de w_e para el valor de $c_{p,net}$ de la posición horizontal	55
Tabla 22. Valores recomendados para los coeficientes de presión externa en muros verticales de edificios de planta rectangular	57
Tabla 23. Valores recomendados de λ para cilindros, secciones poligonales, secciones rectangulares, secciones estructurales con bordes vivos y estructuras de celosía ..	59
Tabla 24. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 1 de altura de referencia en la posición vertical ..	61
Tabla 25. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 2 de altura de referencia en la posición vertical ..	62
Tabla 26. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 3 de altura de referencia en la posición vertical ..	62
Tabla 27. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 4 de altura de referencia en la posición vertical ..	62
Tabla 28. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 5 de altura de referencia en la posición vertical ..	63
Tabla 29. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 6 de altura de referencia en la posición vertical ..	63
Tabla 30. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 7 de altura de referencia en la posición vertical ..	64
Tabla 31. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 8 de altura de referencia en la posición vertical ..	64
Tabla 32. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 9 de altura de referencia en la posición vertical ..	65
Tabla 33. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 10 de altura de referencia en la posición vertical .	65
Tabla 34. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 11 de altura de referencia en la posición vertical .	66
Tabla 35. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 1 de altura de referencia en la posición inclinada 37°	70
Tabla 36. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 2 de altura de referencia en la posición inclinada 37°	70
Tabla 37. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 3 de altura de referencia en la posición inclinada 37°	70
Tabla 38. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 4 de altura de referencia en la posición inclinada 37°	71

Tabla 39. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 5 de altura de referencia en la posición inclinada 37°	71
Tabla 40. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 6 de altura de referencia en la posición inclinada 37°	72
Tabla 41. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 7 de altura de referencia en la posición inclinada 37°	72
Tabla 42. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 8 de altura de referencia en la posición inclinada 37°	73
Tabla 43. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 9 de altura de referencia en la posición inclinada 37°	73
Tabla 44. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 10 de altura de referencia en la posición inclinada 37°	74
Tabla 45. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 11 de altura de referencia en la posición inclinada 37°	74
Tabla 46. Coeficientes parciales de seguridad para las acciones	76
Tabla 47. Combinaciones realizadas para la posición horizontal	77
Tabla 48. Combinaciones realizadas para la posición vertical e inclinada 37°	77
Tabla 49. Clasificación de secciones transversales solicitadas por momentos flectores	78
Tabla 50. Perfiles de las barras según la posición de la estructura	79
Tabla 51. Perfiles utilizados	80
Tabla 52. Cálculo de la tensión equivalente de Von Mises en la posición horizontal	82
Tabla 53. Cálculo de la tensión equivalente de Von Mises en la posición vertical	82
Tabla 54. Cálculo de la tensión equivalente de Von Mises en la posición inclinada 37°	82
Tabla 55. Localización del máximo valor de tensión equivalente de Von Mises σ_{eq} y por consiguiente del elemento más desfavorable en la posición horizontal	83
Tabla 56. Localización del máximo valor de tensión equivalente de Von Mises σ_{eq} y por consiguiente del elemento más desfavorable en la posición vertical	83

Tabla 57. Localización del máximo valor de tensión equivalente de Von Mises σ_{eq} y por consiguiente del elemento más desfavorable en la posición inclinada 37º	83
Tabla 58. Valores obtenidos de SAP2000 para cada barra para la posición horizontal	83
Tabla 59. Valores obtenidos de SAP2000 para cada barra para la posición vertical	84
Tabla 60. Valores obtenidos de SAP2000 para cada barra para la posición inclinada 37º ...	84
Tabla 61. Barras de cada familia de la posición horizontal a comprobar su ELU de Pandeo .	85
Tabla 62. Barras de cada familia de la posición vertical a comprobar su ELU de Pandeo	85
Tabla 63. Barras de cada familia de la posición inclinada 37º a comprobar su ELU de Pandeo	85
Tabla 64. Términos de comprobación de pandeo, según peor clase de sección en la pieza .	87
Tabla 65. Curva de pandeo en función de la sección transversal	88
Tabla 66. Valores de α dependiendo de la curva de pandeo	88
Tabla 67. Coeficientes de interacción según peor clase de sección en la pieza	89
Tabla 68. Coeficientes del momento equivalente	90
Tabla 69. Relación de tensiones en los bordes del elemento	90
Tabla 70. Valores de esbeltez y de esbeltez reducida para las barras más desfavorables de cada familia en la posición horizontal	91
Tabla 71. Valores de esbeltez y de esbeltez reducida para las barras más desfavorables de cada familia en la posición vertical	91
Tabla 72. Valores de esbeltez y de esbeltez reducida para las barras más desfavorables de cada familia en la posición inclinada 37º	91
Tabla 73. Valores del coeficiente de pandeo para las diferentes barras estudiadas en la posición horizontal	92
Tabla 74. Valores del coeficiente de pandeo para las diferentes barras estudiadas en la posición vertical	92
Tabla 75. Valores del coeficiente de pandeo para las diferentes barras estudiadas en la posición inclinada 37º	92

Tabla 76. Valores de los factores de momento flector uniforme equivalente $c_{m,y}$ y $c_{m,z}$, de los coeficientes k_y, k_z y de α_y, α_z de la posición horizontal	93
Tabla 77. Valores de los factores de momento flector uniforme equivalente $c_{m,y}$ y $c_{m,z}$, de los coeficientes k_y, k_z y de α_y, α_z de la posición vertical	93
Tabla 78. Valores de los factores de momento flector uniforme equivalente $c_{m,y}$ y $c_{m,z}$, de los coeficientes k_y, k_z y de α_y, α_z de la posición inclinada 37°	93
Tabla 79. Comprobaciones del ELU de Pandeo posición horizontal	93
Tabla 80. Comprobaciones del ELU de Pandeo posición vertical	94
Tabla 81. Comprobaciones del ELU de Pandeo posición inclinada 37°	94
Tabla 82. Perfiles utilizados tras aumento de los mismos para el cumplimiento del ELU de Pandeo	95
Tabla 83. Cálculo de la tensión equivalente de Von Mises en la posición horizontal tras el aumento de perfiles	95
Tabla 84. Cálculo de la tensión equivalente de Von Mises en la posición vertical tras el aumento de perfiles	96
Tabla 85. Cálculo de la tensión equivalente de Von Mises en la posición inclinada 37° tras el aumento de perfiles.....	96
Tabla 86. Localización del máximo valor de tensión equivalente de Von Mises σ_{eq} y por consiguiente del elemento más desfavorable en la posición horizontal tras el aumento de perfiles	96
Tabla 87. Localización del máximo valor de tensión equivalente de Von Mises σ_{eq} y por consiguiente del elemento más desfavorable en la posición vertical tras el aumento de perfiles	97
Tabla 88. Localización del máximo valor de tensión equivalente de Von Mises σ_{eq} y por consiguiente del elemento más desfavorable en la posición inclinada 37° tras el aumento de perfiles	97
Tabla 89. Valores obtenidos de SAP2000 para cada barra para la posición horizontal tras el aumento de perfiles	97
Tabla 90. Valores obtenidos de SAP2000 para cada barra para la posición vertical tras el aumento de perfiles	98

Tabla 91. Valores obtenidos de SAP2000 para cada barra para la posición inclinada 37º tras el aumento de perfiles	98
Tabla 92. Valores de esbeltez y de esbeltez reducida para las barras más desfavorables de cada familia en la posición horizontal tras el aumento de perfiles	99
Tabla 93. Valores de esbeltez y de esbeltez reducida para las barras desfavorables de cada familia en la posición vertical tras el aumento de perfiles	99
Tabla 94. Valores de esbeltez y de esbeltez reducida para las barras desfavorables de cada familia en la posición inclinada 37º tras el aumento de perfiles	99
Tabla 95. Valores del coeficiente de pandeo para las diferentes barras estudiadas en la posición horizontal tras el aumento de perfiles	100
Tabla 96. Valores del coeficiente de pandeo para las diferentes barras estudiadas en la posición vertical tras el aumento de perfiles	100
Tabla 97. Valores del coeficiente de pandeo para las diferentes barras estudiadas en la posición inclinada 37º tras el aumento de perfiles	100
Tabla 98. Valores de los factores de momento flector uniforme equivalente $c_{m,y}$ y $c_{m,z}$, de los coeficientes k_y , k_z y de α_y , α_z de la posición horizontal tras el aumento de perfiles	101
Tabla 99. Valores de los factores de momento flector uniforme equivalente $c_{m,y}$ y $c_{m,z}$, de los coeficientes k_y , k_z y de α_y , α_z de la posición vertical tras el aumento de perfiles	101
Tabla 100. Valores de los factores de momento flector uniforme equivalente $c_{m,y}$ y $c_{m,z}$, de los coeficientes k_y , k_z y de α_y , α_z de la posición inclinada 37º tras el aumento de perfiles	101
Tabla 101. Comprobaciones del ELU de Pandeo posición horizontal tras el aumento de los perfiles	102
Tabla 102. Comprobaciones del ELU de Pandeo posición vertical tras el aumento de los perfiles	102
Tabla 103. Comprobaciones del ELU de Pandeo posición inclinada 37º tras el aumento de los perfiles	102
Tabla 104. Valores de los desplazamientos relativos en los nudos más desfavorables de cada familia de barras en la posición horizontal	104

Tabla 105. Valores de los desplazamientos relativos en los nudos más desfavorables de cada familia de barras en la posición vertical	104
Tabla 106. Valores de los desplazamientos relativos en los nudos más desfavorables de cada familia de barras en la posición inclinada	104
Tabla 107. Comprobación ELS de Deformación según el Criterio de Apariencia en la posición horizontal	105
Tabla 108. Comprobación ELS de Deformación según el Criterio de Apariencia en la posición vertical	105
Tabla 109. Comprobación ELS de Deformación según el Criterio de Apariencia en la posición inclinada	105
Tabla 110. Perfiles utilizados tras aumento de los mismos para el cumplimiento del criterio de Apariencia	106
Tabla 111. Valores de los desplazamientos relativos en los nudos más desfavorables de cada familia de barras en la posición horizontal tras aumento de perfil	107
Tabla 112. Valores de los desplazamientos relativos en los nudos más desfavorables de cada familia de barras en la posición vertical tras aumento de perfil	107
Tabla 113. Valores de los desplazamientos relativos en los nudos más desfavorables de cada familia de barras en la posición inclinada tras aumento de perfil	107
Tabla 114. Comprobación ELS de Deformación según el Criterio de Apariencia en la posición horizontal tras el aumento de perfil	108
Tabla 115. Comprobación ELS de Deformación según el Criterio de Apariencia en la posición vertical tras el aumento de perfil	108
Tabla 116. Comprobación ELS de Deformación según el Criterio de Apariencia en la posición inclinada tras el aumento de perfil	108
Tabla 117. Coeficientes de seguridad parciales	111
Tabla 118. Dimensiones de la zapata	112
Tabla 119. Valor de las reacciones obtenidas directamente de SAP2000 para cada posición de estudio	112
Tabla 120. Valores de momento resultante, momento torsor y axil en el centro de gravedad diferenciando el origen de estos para cada posición de estudio	113

Tabla 121. Acciones según eje de actuación en el centro de gravedad de la zapata para cada posición de estudio	113
Tabla 122. Esfuerzos en la parte inferior de la zapata para cada posición de estudio	113
Tabla 123. Comprobación ELU Vuelco para cada posición de estudio	113
Tabla 124. Ángulo de rozamiento interno del terreno	115
Tabla 125. Comprobación ELU Deslizamiento para cada posición de estudio	115
Tabla 126. Comprobación ELU Hundimiento para cada posición de estudio	117
Tabla 127. Determinación del modelo de cálculo	120
Tabla 128. Comprobación del ELU de Agotamiento del Apoyo	122
Tabla 129. Valores de la fuerza en los pernos T_d	122
Tabla 130. Momentos en las secciones	124
Tabla 131. Momento máximo	125
Tabla 132. Comprobación ELU de Agotamiento a flexión de la placa	125
Tabla 133. Valores de x y ε_s	126
Tabla 134. Valor de la tensión de los pernos σ_s	126
Tabla 135. Dimensionado y Nº de pernos	127
Tabla 136. Dimensionado y Nº de pernos tras aumento de diámetro	127
Tabla 137. Comprobación ELU de Agotamiento de los pernos	127
Tabla 138. Solicitación máxima del perno	128
Tabla 139. Determinación del parámetro "m"	129
Tabla 140. Determinación del factor de reducción	129

Índice de Figuras

Fig. 1 Motor solar de Augustin Mouchot	29
Fig. 2 Sistema Vanguard	30
Fig. 3 Sistema de membrana sbp	30
Fig. 4 Concentrador Solar de McDonell Corporation	31
Fig. 5 Concentradores sbp en la PSA	31
Fig. 6 Generador Solar Cummins	32
Fig. 7 Partes de un sistema Disco - Parabólico	33
Fig. 8 Emplazamiento en el Polígono Industrial C. de Xàtiva	36
Fig. 9 Península Ibérica: Carga de nieve a nivel del mar	40
Fig. 10 Esquema de las distintas posiciones de estudio	42
Fig. 11 Mapa de isotacas de la velocidad básica fundamental del viento	43
Fig. 12 Esquema explicativo de la posición horizontal	46
Fig. 13 Esquema explicativo de la posición vertical	47
Fig. 14 Esquema explicativo de la posición inclinada 37°	48
Fig. 15 Coef. de exposición $C_e(z)$, para $C_o(z)=1$	51
Fig. 16 Altura de referencia, z_e en función de h y b, y perfil de velocidades y presión correspondiente	56
Fig. 17 Alturas de referencia para la posición vertical	56
Fig. 18 Coef. de fuerza para secciones rectangulares con esquinas vivas y sin considerar el flujo libre de cola	57
Fig. 19 Factor de reducción para secciones transversales cuadradas con equinas redondeadas	58
Fig. 20 Definición de la relación de solidez ϕ	59

Fig. 21 Valores indicativos del factor del efecto cola Ψ_λ en función de la relación de solidez φ y la esbeltez λ	60
Fig. 22 Ejemplos de la distribución de nudos en la posición vertical	61
Fig. 23 Alturas de referencia para la posición inclinada	67
Fig. 24 Ejemplos de la distribución de nudos en la posición inclinada	69
Fig. 25 Perfiles utilizados	80
Fig. 26 Placa de anclaje	121

MEMORIA

1. Introducción:

1.1. Objetivos del proyecto

El objetivo de este proyecto es el diseño y cálculo estructural de una estructura disco parabólica de una central solar. Se ha decidido proyectar una estructura de este estilo debido a las propiedades estructurales que ofrece.

El cálculo se ha realizado de forma que la estructura cumpla con la normativa vigente relativa. Además, el presente proyecto incluye el presupuesto y los planos que resulten necesarios para la total definición del mismo.

1.2. Justificación del proyecto

El desarrollo del Trabajo Final de Grado pone en práctica las diferentes aptitudes adquiridas durante la realización del grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales.

Concretamente en este proyecto son de utilidad los conocimientos adquiridos en asignaturas relacionadas con la construcción (Elasticidad y Resistencia de los Materiales, Estructuras y Tecnología de la Construcción), así como asignaturas sobre elaboraciones de proyectos y presupuestos (Proyectos) y finalmente en asignaturas relacionadas con elaboración de planos (Ingeniería Gráfica y Expresión Gráfica).

Por un lado, el diseño de la estructura se ha realizado mediante el software AutoCAD de Autodesk. Por otro lado, el cálculo resistente de la estructura se ha llevado a cabo mediante el software SAP2000.

1.3. Motivaciones del proyecto

La necesidad de encontrar una alternativa a la generación de energía mediante energía no renovables (petróleo, carbón, gas natural, energía nuclear...), ha provocado que cada vez se estudien más métodos de generación de la misma que presenten una fuente de energía renovable, inagotable y no contaminante.

La energía solar fotovoltaica es aquella que se obtiene al convertir la luz solar en electricidad empleando una tecnología basada en el efecto fotoeléctrico, como es el caso del sistema de estudio del presente proyecto. Se trata de un tipo de energía que puede producirse en instalaciones que van desde los pequeños generadores para autoconsumo hasta las grandes plantas fotovoltaicas.

La simplicidad de esta tecnología la convierte en idónea para su uso en puntos aislados de red, zonas rurales o de difícil acceso.

Además se puede decir que su implantación en un país disminuye la dependencia energética de otros países. Aunque es cierto que la energía solar es intermitente debido a que es directamente dependiente de la meteorología o de los ciclos día-noche, el rápido avance experimentado por las tecnologías de almacenamiento eléctrico va a minimizar cada vez más esta circunstancia e incrementar la participación de este tipo de energías en el sistema energético.

1.4. Contexto histórico. Evolución

La tecnología de los discos parabólicos, también llamados sistemas disco-motor o disco-Stirling, es la más antigua de las tecnologías solares. Se trata de unos sistemas que han evolucionado de forma notoria desde que Robert Stirling inventó el motor homónimo en el año 1816, y se demostrara, gracias a varias empresas, la posibilidad de desarrollar sistemas solares basados en los ciclos de Rankine y de Stirling. Esto fue debido a que los motores Stirling permitían, y permiten, utilizar la radiación solar como fuente de calor para hacer que el motor funcione, ya que se trata de un motor de combustión externa. (Woodhead Publishing, 2012, p. 316)

Por otra parte, durante el siglo XIX y la primera mitad del XX, se produjeron nuevos descubrimientos de yacimientos de recursos fósiles que produjeron un aumento del consumo de estos recursos. Un hecho que favoreció la disminución de los precios, y causó una merma en el interés de desarrollo de la industria de fuentes de energía renovables, y consecuentemente de los discos Stirling.

En 1866, tras varios años de trabajo, el investigador Augustin Mouchot produjo unas de las primeras implementaciones reales de un sistema disco-parabólico. Estas implementaciones se basaban en la concentración de los rayos de sol mediante un conjunto de espejos parabólicos en un tubo de metal, o caldera que contenía agua. El agua hervía y el vapor generado accionaba un motor a vapor.

Con el paso de los años, Augustin Mouchot, fue mejorando su invención hasta que presentó un generador solar de vapor en la Exposición Universal de 1878 en París.

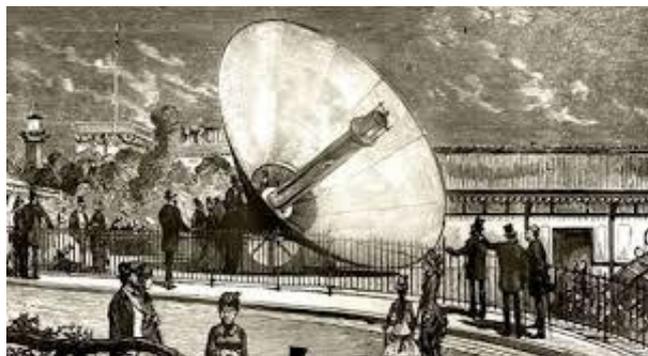


Fig. 1 Motor solar de Augustin Mouchot. (Fuente: ecointeligencia.com)

No fue hasta la década de 1970 y principios de 1980, debido a la crisis del petróleo, cuando varias compañías americanas como United Stirling AB, Advanco Corporation, McDonnell Douglas Aerospace Corporation (MDA), NASA's Jet Propulsion Laboratory, y DOE, ligadas al campo aeroespacial desarrollaron la tecnología moderna. Una tecnología que se basaba en la utilización de tubos de iluminación directa, aunque presentaban un alto coste y unas estructuras pesadas. Por ese motivo, no se produjo una producción en masa de los motores Stirling. Pero no solo eso, además el disco Stirling exigía una precisión óptica que hizo que los discos parabólicos no fuesen competitivos en comparación con los sistemas fotovoltaicos o eólicos. No obstante, lo que sí que se logró durante estas décadas fue resolver gran parte de los retos técnicos que presenta esta tecnología.

En las últimas décadas, se ha evolucionado hacia los sistemas disco parabólico conectado a motores Stirling situados en el foco, con potencia de 7-25 kW. Estas unidades autónomas presentan la capacidad de convertir la radiación solar en energía eléctrica con una alta eficiencia, entre un 25-30%. Además, alcanzan una relación de concentración media superior a 2000, unas temperaturas de operación de hasta 800°C y unos rendimientos anuales en torno al 24.6%.

El desarrollo operacional experimentado por las diferentes empresas y plataformas de estudio a lo largo de estas últimas décadas ha consistido en el ensayo de diferentes unidades. La primera generación de discos estuvo formada por configuraciones de vidrio/metal de alta concentración, un receptor de insolación directa, y un motor Stirling cinemático de doble acción. Estos prototipos, llamados sistemas Vanguard de 25 kW, fueron construidos por ADVANCO en el sur de California. (Woodhead Publishing, 2012, p. 317)



Fig. 2 Sistema Vanguard (Fuente: docplayer.es)

En 1984 se construyeron e instalaron en Riad, Arabia Saudita, dos sistemas disco - Stirling de 50 kW por Schlaich Bergermann und partner (sbp) de Stuttgart, Alemania. Al mismo tiempo se instaló en el Centro Aeroespacial Alemán un sistema similar. Los discos parabólicos eran concentradores de membrana estirada de acero y delgadas. La superficie óptica del disco se hizo uniendo azulejos delgados de vidrio a la membrana frontal. Mientras que los receptores para los discos sbp eran receptores de tubo con iluminación directa y los motores eran motores Stirling cinemáticos United Stirling 4-275.



Fig. 3 Sistema de membrana sbp. (Fuente: idus.us.es)

Posteriormente McDonnell Douglas, McDonnell Douglas Aerospace Corporation (MDAC), construyó un sistema Stirling a mediados de la década de 1980 y, cuando MDAC suspendió el desarrollo de la tecnología, Southern California Edison (SCE) adquirió los derechos del sistema. El disco parabólico MDAC / SCE fue el primer sistema Stirling diseñado para ser un producto comercial. Fue construido sobre el diseño del sistema Vanguard dish Stirling, utilizando el mismo receptor de insolación

directa y el motor USAB 4-95 Mark II. SCE operó el sistema de 1985 a 1988. Stirling Energy Systems (SES) de Phoenix, Arizona, adquirió los derechos tecnológicos y el hardware del sistema en 1996 y ha continuado el desarrollo del sistema. (Woodhead Publishing, 2012, p. 318)



Fig. 4 Concentrador Solar de McDonnell Corporation. (Fuente: www.stirlingenergy.com)

En 1989, Schlaich Bergermann und partner construyó el primero de sus pequeños concentradores de membrana estirada de 7,5 y 8,5 m equipados con un motor Stirling V160 SOLO de 10 kW. Fue el primero en presentar una configuración de seguimiento polar y una configuración de seguimiento de elevación de acimut, seis de los sistemas han funcionado en la Plataforma Solar de Almería, España.



Fig. 5 Concentradores sbp en la PSA. (Fuente: idus.us.es)

En 1991, Cummins Power Generation, trabajando bajo acuerdos de costos compartidos con el Departamento de Energía de EE. UU. y Sandia National Laboratories, comenzó el desarrollo de dos sistemas disco-Stirling: un sistema de 7 kW para aplicaciones remotas y un sistema de 25 kW para generación de energía conectada a la red (Gallup y Mancini, 1994; Bean y Diver, 1995). Estos sistemas fueron

muy innovadores ya que incorporaban tecnologías avanzadas como un concentrador solar con un motor de eje polar, facetas de membrana estirada, receptores de tubo de calor y motores Stirling de pistón libre.



Fig. 6 Generador Solar Cummins. (Fuente: eoi.es)

Los dos programas de Cummins avanzaron, pero terminaron en 1996 cuando Cummins Engine Company volvió a centrar el negocio al desarrollo de motores diesel. En ese año vendieron sus activos de las operaciones solares a Kombassan, una compañía en Alanya, Turquía.

En estos primeros proyectos, los sistemas disco - Stirling han demostrado su capacidad de producir electricidad para la red y para aplicaciones remotas de energía con alta eficiencia solar a eléctrica. Todos los sistemas hasta ahora se construyeron en una sola pieza y, por lo tanto, tienen un alto nivel de coste de inversión. Además, los motores Stirling aún requieren un mantenimiento regular. Por lo tanto, los objetivos para futuros desarrollos son un aumento en la fiabilidad del sistema y una mayor reducción de costes. En un enfoque paralelo, se están desarrollando y probando componentes avanzados, como controles del sistema y superficies ópticas mejoradas, que prometen mayores eficiencias y fiabilidades a un coste menor. Además, se está implementando la producción industrial de componentes en serie. (Woodhead Publishing, 2012, p. 319)

1.5. Elementos a considerar en los sistemas disco parabólicos:

Los componentes que se deben considerar a la hora de realizar el diseño y los cálculos de un sistema disco parabólico son:

- Concentrador o dispositivo óptico: componente que presenta una forma de paraboloide de revolución, el cual es la parte del sistema que dirige la radiación hacia el receptor.

- Receptor: es el elemento del sistema donde la radiaci3n solar reflejada por el concentrador es absorbida y transferida al fluido de trabajo del motor Stirling.
- Absorbedor: forma parte del receptor, su funci3n consiste en absorber la energía solar dependiendo de su material, cubierta y aislante.
- Sistema de generaci3n: transforma la energía en forma de calor del receptor en energía mecánica.
- Estructura soporte y mecanismos

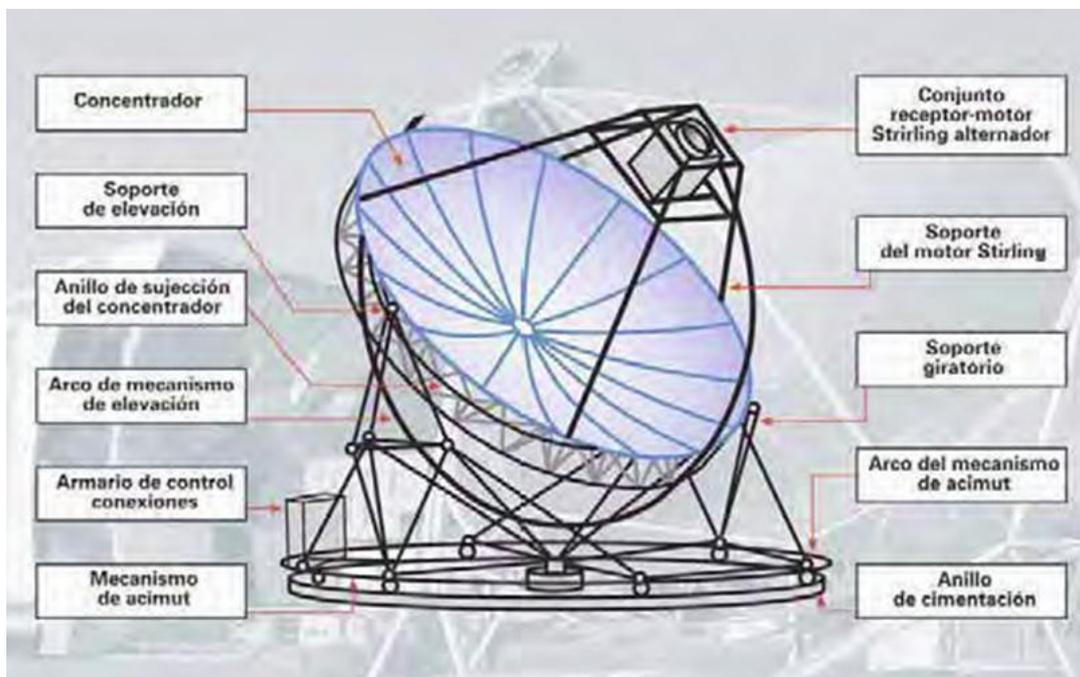


Fig. 7 Partes de un sistema Disco - Parab3lico. (Fuente: docplayer.es)

Por lo general, en los sistemas disco parab3licos, receptor y sistema de generaci3n suelen formar parte de un mismo conjunto.

El principio de funcionamiento de estos sistemas consiste en la incidencia sobre el receptor de la radiaci3n concentrada por el paraboloide, y la posterior conversi3n de la energía tÈrmica para la generaci3n de electricidad.

Hasta ahora, el desarrollo industrial de los discos parabólicos ha estado obstaculizado por su falta de fiabilidad y su elevado coste. Por tanto, el uso de este tipo de sistemas para generar electricidad se encuentra en fase de desarrollo en algunas plantas experimentales como la de Planta Solar de Almería. Aunque es común encontrar, a nivel particular, cocinas solares con un tipo de tecnología muy similar.

1.5.1 Concentrador

Superficie reflectante que debe ser semejante a un paraboloide de revolución. Su tamaño dependerá de la potencia nominal y de la energía que se pretende generar en unas condiciones de rendimiento asociados a los elementos que conforman el sistema y de radiación solar durante un periodo de tiempo.

La superficie reflectante está constituida por películas reflectantes o por espejos de vidrio. La geometría deseada se consigue mediante membranas tensionadas de metal que se aproximan de forma continua a la geometría paraboloide o con facetas que se aproximan de forma discreta a la geometría buscada.

1.5.2 Receptor

Los receptores normalmente utilizados en los discos parabólicos son los de cavidad, en los cuales la radiación concentrada en el concentrador entra por una apertura en el foco del paraboloide e incide sobre el absorbedor, de manera que se disminuyen las pérdidas por radiación y convección.

Algunos de los tipos de receptores que podemos encontrar en los sistemas de disco parabólicos son los receptores de tubos directamente irradiados, los volumétricos presurizados y los de reflujos.

1.5.3 Sistema de generación

El sistema generador consiste en una máquina térmica o ciclo termodinámico de potencia y el generador, el cual transforma la energía mecánica en electricidad. En los sistemas disco parabólico se trata de los motores Stirling, aunque también se comienzan a utilizar ciclos de turbinas de gas gracias a su actual tamaño reducido y alto rendimiento.

En la actualidad existen varios tipos de motores Stirling clasificados según su geometría. Por lo general, los motores Stirling, presentan un pistón que transmite la energía mecánica al cigüeñal, y un desplazador, cuya función consiste en desplazar el fluido de trabajo entre las zonas caliente y fría. Aunque también podemos encontrar motores que presentan dos pistones, en los que uno de ellos realiza la función de desplazador.

1.5.4 Estructura soporte y mecanismos

Componentes mediante los cuales los discos parabólicos puede seguir la posición del sol y permiten su orientación en dos ejes. Podemos encontrar dos tipos de seguimientos:

1. Acimutal - elevación: se trata del seguimiento más fácil de montar y su movimiento se produce sobre los ejes vertical y horizontal.
2. Polar: consiste en el seguimiento más fácil de controlar. Un eje sigue el giro de la Tierra mientras que el otro sigue las variaciones estacionales.

1.6. Ubicación del proyecto

Tras la realización del reconocimiento geotécnico, necesario para poder empezar cualquier proyecto u obra y así conocer las características del terreno, se ha decidido que la implantación del sistema disco - parabólico va a tener lugar en la parcela de número catastral 3491501YJ1139S0001SM, en la calle R-6 Pereres, 10 7 Suelo, del polígono industrial C. de Xàtiva.



Fig. 8 Emplazamiento en el Polígono Industrial C. de Xàtiva (Fuente: Catastro)

2. CÁLCULO ESTRUCTURAL

En este apartado se procede a la realización del Cálculo de Seguridad Estructural del sistema disco parabólico. Por una parte, se exponen los diferentes perfiles elegidos y el material utilizado para su construcción. Por otra parte, se plantea el cálculo de los diferentes Estados Límites Últimos (ELU). Al abordar dicho cálculo se analizan los diferentes criterios aplicados en la estructura para garantizar la seguridad de la misma en una futura construcción.

2.1. Materiales empleados.

En la siguiente tabla (Tabla 1) se encuentran las características que posee el acero S275JR, elemento utilizado para la construcción de los diferentes elementos de la estructura:

PROPIEDADES DEL ACERO S275JR	
Módulo de Elasticidad (E)	210000 N/mm ²
Módulo de Rigidez (G)	81000 N/mm ²
Coefficiente de Poisson (γ)	0,3
Coefficiente de Dilatación Térmica (α)	1,2*10 ⁻⁵ (°C) ⁻¹
Densidad (ρ)	7850 kg/m ³
Límite Elástico (f _y)	275 N/mm ²

Tabla 1. Características del acero S275JR

2.2. Perfiles utilizados

Para el sistema disco parabólico, los perfiles huecos circulares son los perfiles seleccionados para los diferentes elementos estructurales del sistema. En total se han utilizado 4 perfiles diferentes. Éstos se determinarán posteriormente, indicando sus características, una vez se haya realizado el dimensionado de la estructura.

2.3. Acciones

- **Cargas permanentes (G):**

Según lo indicado en el CTE DB SE-AE las acciones permanentes son aquellas que actúan en todo momento sobre el sistema con una posición constante. Sus magnitudes pueden ser constantes (como el peso propio de los elementos constructivos y equipo fijo) o no (como el pretensado), pero con variación despreciable. Se adopta, normalmente, su valor medio. Para la estructura diseñada en este proyecto se considera el peso propio de todo el equipo fijo como, por ejemplo, el motor Stirling.

En la tabla siguiente se observan los pesos propios considerados para la implementación del sistema disco parabólico (Tabla 3):

PESO PROPIO DE LA INSTALACIÓN	
Peso de los espejos reflectores (kg/m^2)	2,98
Peso Aparamenta Eléctrica (kg)	20
Peso Motor Stirling (kg)	430

Tabla 2. Peso propio de la estructura.

- **Sobrecarga de uso:**

Según lo establecido en el CTE DB SE-AE, la sobrecarga de uso se define como "el peso de todo lo que puede gravitar sobre el edificio por razón de su uso. La sobrecarga debida a equipos pesados, o a la acumulación de materiales, no está recogida en el CTE. Sus efectos pueden simularse por la aplicación de una carga distribuida uniformemente".

En lo que concierne al sistema estudiado en el presente proyecto, se ha considerado que únicamente el mantenimiento es el que constituye una sobrecarga de uso, por lo que se ha procedido a simular una carga repartida sobre los nudos de la estructura mallada. Mediante la utilización de la Tabla 3.1 del CTE DB SE-AE se ha realizado una estimación del valor característico de la Sobrecarga de Uso del disco parabólico:

Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m ²]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 ⁽¹⁾
F	Cubiertas transitables accesibles ⁽²⁾			4	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación ⁽³⁾	G1 ⁽⁷⁾	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 ⁽⁴⁾⁽⁶⁾	2
			Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado)	0,4 ⁽⁵⁾	1
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

Tabla 3. Valores característicos de las Sobrecargas de Uso (Fuente: CTE DB SE-AE)

En el caso del sistema de estudio, la estructura presenta únicamente sobrecarga de uso debida a las labores de conservación y mantenimiento, puesto que solo será accesible por personal cualificado para su mantenimiento. Esto es debido a que el sistema está destinado a un uso autónomo. Además, se supone que las operaciones de mantenimiento y conservación se realizan cuando el disco parabólico se encuentra en la posición de estudio horizontal (inclinación inferior a 20°). Por tanto, se adopta un valor de 1 kN/m².

- **Carga de nieve:**

El cálculo de la carga de nieve se ha realizado según lo establecido en la norma UNE-EN 1991-1-3 del Eurocódigo 1 “Acciones en Estructuras”, más concretamente, en la Parte 1-3 “Acciones Generales”. Esta norma define las acciones y da indicaciones de diseños relativos a las cargas de nieve para el diseño estructural de edificios y obras de ingeniería civil.

En el caso de estudio del sistema de este proyecto, el efecto de la carga de nieve solo tiene efecto cuando el disco parabólico se encuentra en la posición de estudio horizontal.

En este caso, la carga es considerada una carga de nieve sobre una cubierta con acumulaciones. Para situaciones de proyecto accidentales en donde la carga excepcional de nieve es la acción accidental de determina mediante la siguiente fórmula:

$$S = \mu_i \cdot c_e \cdot c_t \cdot S_{Ad} \quad (1)$$

donde los distintos parámetros se corresponden a:

μ_i : coeficiente de forma de la carga de nieve.

c_e : coeficiente de exposición.

c_t : coeficiente térmico.

S_{Ad} : valor de cálculo de la carga excepcional de nieve a nivel del terreno.

En primer lugar, siguiendo las indicaciones del Eurocódigo 1, el punto (8) de la página 23 determina que el valor de $c_t = 1$, mientras que con la ayuda de la tabla 5.1 de la misma página se obtiene el valor del coeficiente de exposición dando un valor de $c_e = 0,8$.

Topografía	C_e
Expuesta al viento ^a	0,8
Normal ^b	1,0
Protegida ^c	1,2

a *Topografía expuesta al viento*: áreas llanas, sin obstáculos, expuestas en todos sus frentes o poco protegidas por el terreno, por construcciones más altas o por árboles.

b *Topografía normal*: áreas en las que no es previsible redistribución de la nieve debido al terreno, a otras construcciones o a árboles.

c *Topografía protegida*: áreas en las que la obra en cuestión es considerablemente más baja que el terreno circundante o que está rodeada de árboles altos y/o construcciones más altas.

Tabla 4. Valores recomendados de c_e para diferentes topografías.

En segundo lugar, el valor de cálculo de la carga excepcional de nieve a nivel del terreno, se obtiene siguiendo la tabla C.1 del Eurocódigo 1 (pág. 41) de donde sacamos la fórmula referida a la Península Ibérica, necesaria para la obtención de dicho valor:

$$s_k = (0,19 \cdot z - 0,095) \left(1 + \left(\frac{A}{524} \right)^2 \right) \quad (2)$$

donde los distintos términos se corresponden a:

z : número de la zona dado en el mapa (pág. 45 del Eurocódigo 1).

A : altitud del emplazamiento sobre el nivel del mar (m).

Por un lado, como el sistema disco parabólico se encuentra situado en la ciudad de Xàtiva, el valor de $A = 115 \text{ m}$. Mientras tanto, el valor de z se obtiene del mapa "Península Ibérica: Carga de nieve a nivel del mar" (Eurocódigo 1, pág. 45):

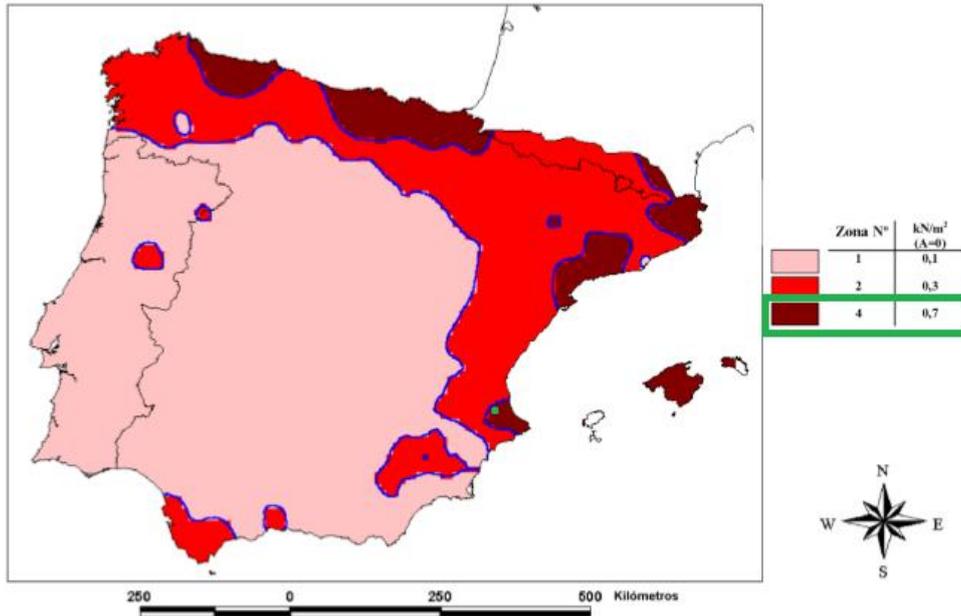


Fig. 9 Península Ibérica: Carga de nieve a nivel del mar.

Por tanto, conocidos los valores de los distintos parámetros, el valor de cálculo de la carga excepcional de nieve a nivel del terreno será:

$$\begin{aligned}
 s_k &= (0,19 \cdot z - 0,095) \left(1 + \left(\frac{A}{524} \right)^2 \right) = (0,19 \cdot 0,7 - 0,095) \left(1 + \left(\frac{115}{524} \right)^2 \right) = \\
 &= 0,0398 \text{ KN/m}^2
 \end{aligned} \tag{3}$$

Por último, el valor del coeficiente de forma de la carga de nieve se determina con la ayuda de la Tabla 5.2 (Eurocódigo, pág. 24), sabiendo que el sistema de estudio se asemeja a una cubierta a dos aguas en donde los ángulos de inclinación presentan un valor de $\alpha = 8,359^\circ$ y por tanto valor tomado será el de $\mu_2 = 0,8$.

Ángulo de inclinación de la cubierta α	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
$\mu_1(\alpha)$	$\mu_1(0^\circ) \geq 0,8$	$\mu_1(0^\circ) \frac{(60^\circ - \alpha)}{30^\circ}$	0,0
$\mu_2(\alpha)$	0,8	$0,8 \frac{(60^\circ - \alpha)}{30^\circ}$	0,0
$\mu_3(\alpha)$	$0,8 + 0,8 \alpha/30$	1,6	-

Tabla 5. Coeficientes de forma de la carga de nieve.

Con la obtención del valor de este último término, ya disponemos de todos los datos necesarios para el cálculo de la carga de nieve, dando como resultado:

$$s = \mu_i \cdot c_e \cdot c_t \cdot s_{Ad} = 0,8 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 0,0398 = 0,255 \text{ KN/m}^2$$

- **Carga de viento:**

Siguiendo las indicaciones establecidas en la norma UNE-EN 1991-1-4 del Eurocódigo 1: "Acciones en Estructuras", Parte 1-4: "Acciones generales", "Acciones de viento", se ha procedido al cálculo de la carga de viento, posiblemente la carga actuante más importante de todas.

Esta norma proporciona indicaciones para la determinación de las acciones naturales del viento para el diseño estructural en las obras de edificación e ingeniería civil en cada una de las áreas cargadas.

Los valores de las acciones de viento, calculados utilizando la norma anteriormente nombrada, son valores característicos cuya representación es debida a un conjunto simplificado de presiones o fuerzas cuyos efectos equivalen a efectos extremos del viento turbulento. Estos valores se determinan mediante los valores básicos de la velocidad del viento o de la presión del viento, y además tienen una probabilidad de ser excedidos de 0.02 (equivalente a un periodo de 50 años).

Seguidamente, se procede a realizar el cálculo de la presión del viento actuante en el sistema de estudio. Para proceder con dicho cálculo, se va a realizar una presentación del fundamento teórico y a continuación su aplicación sobre el disco parabólico.

Remarcar que en el presente proyecto, la estructura se va a estudiar en tres posiciones distintas, las cuales se representan en la siguiente figura:

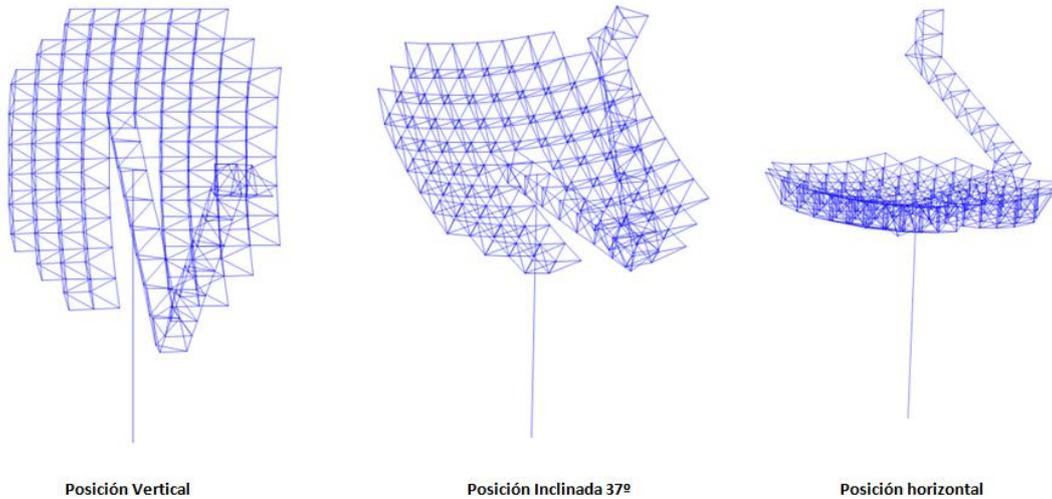


Fig. 10 Esquema de las distintas posiciones de estudio.

Basándonos en la explicación empleada por el Eurocódigo 1, para el cálculo de la presión ejercida por el viento sobre la estructura se va a determinar la componente media y variable de las cuales está compuesta dicha presión. En particular, estos valores dependerán según la posición estudiada en el sistema presentado en este proyecto.

En primer lugar, y siguiendo el punto 4.3 y el punto 4.3.1 del Eurocódigo 1, se procede al cálculo de la Velocidad Media del viento (V_m), el cual se realiza teniendo en cuenta la siguiente expresión:

$$V_m = C_r(z) \cdot C_0(z) \cdot V_b \quad (4)$$

donde los términos corresponden a:

$C_r(z)$: factor de rugosidad.

$C_0(z)$: coeficiente topográfico.

V_b : velocidad básica del viento.

determinándose esta última mediante la expresión:

$$V_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{b,0} \quad (5)$$

cuyos términos hacen referencia a:

$V_{b,0}$: velocidad básica fundamental del viento.

C_{dir} : factor direccional.

C_{season} : factor estacional.

En el caso del sistema estudiado en este proyecto, siguiendo las indicaciones de la Figura AN.1 del Anexo Nacional del Eurocódigo 1, y como el disco parabólico se sitúa en la ciudad de Xátiva, se determina que el sistema se encuentra situado en la Zona A y, por tanto, $V_{b,0} = 26$ m/s.



Fig. 11 Mapa de isotacas de la velocidad básica fundamental del viento.

Por otro lado, siguiendo las recomendaciones descritas en el punto 4.2, tanto en la nota 2 (pág. 25), como en la nota 3 (pág. 26), del Eurocódigo 1, se determina que:

$$C_{dir} = 1,0$$

$$C_{season} = 1,0$$

Por consiguiente, el valor de velocidad básica del viento resulta ser:

$$V_b = 1 \cdot 1 \cdot 26 = 26 \text{ m/s}$$

Continuando con el cálculo de la velocidad media, una vez determinado el valor de la velocidad básica del viento se procede al cálculo del coeficiente topográfico y el factor de rugosidad ($C_0(z)$ y $C_r(z)$).

De acuerdo con el punto 4.3.1; nota 1, del Eurocódigo 1, el cual dice que se toma como valor recomendado del coeficiente topográfico $C_0(z) = 1.0$, valor válido si se ha tenido en cuenta la orografía del terreno en el cálculo de la velocidad básica del viento. Como en el caso de estudio del presente proyecto se ha tenido en cuenta la orografía del terreno para el valor de la velocidad básica fundamental del viento ($V_{b,0}$), se adopta el valor 1 para el coeficiente topográfico.

En cuanto a la determinación del factor de rugosidad ($C_r(z)$), según lo establecido en el Eurocódigo 1, este factor tienen en cuenta la variabilidad de la velocidad media del viento en la localización concreta de la estructura. Su procedimiento de cálculo de basa en un perfil logarítmico de velocidades y viene dado por la siguiente expresión:

$$C_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{para } z_{\text{mín.}} \leq z \leq z_{\text{máx.}} \quad (6)$$

$$C_r(z) = C_r(z_{\text{mín.}}) \quad \text{para } z \leq z_{\text{mín.}} \quad (7)$$

donde los términos corresponden a:

z_0 : longitud de rugosidad.

k_r : factor del terreno, obtenido según la siguiente expresión:

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,u}}\right)^{0,07} \quad (8)$$

cuyos términos hacen referencia a:

$z_{\text{máx.}}$: altura máxima, su valor es igual a 200 m.

$z_{0,u}$: = 0,05, valor recomendado en el punto 4.3.2 del Eurocódigo 1 (pág. 27).

z_0 y $z_{\text{mín.}}$: longitud de la rugosidad y altura mínima, respectivamente. Sus valores dependen de la categoría del terreno y están representados en la tabla 4.1 el Eurocódigo 1:

Categoría de terreno		z_0 m	z_{min} m
0	Mar abierto o zona costera expuesta al mar abierto	0,003	1
I	Lagos o áreas planas y horizontales con vegetación despreciable y sin obstáculos	0,01	1
II	Áreas con vegetación baja, como hierba, y obstáculos aislados (árboles, edificaciones) con separaciones de al menos 20 veces la altura de los obstáculos	0,05	2
III	Áreas con una cobertura de vegetación uniforme o edificaciones o con obstáculos aislados con una separación máxima de 20 veces la altura de los obstáculos (villas, terreno suburbano, bosques permanentes)	0,3	5
IV	Áreas en las que al menos un 15% de la superficie está cubierta por edificios cuya altura media supera los 15 m	1,0	10
NOTA Las categorías de terrenos se ilustran en el capítulo A.1.			

Tabla 6. Categorías de terreno y parámetros de terreno (Fuente: Eurocódigo 1)

En lo que concierne al caso de estudio del proyecto, el sistema disco parabólico se encuentra situado en un terreno de Categoría II, por lo que los distintos términos presentan los siguientes valores:

$$z_0 = 0.05 \text{ m.}$$

$$z_{min.} = 2 \text{ m.}$$

Sustituyendo los distintos valores en la ecuación, el factor del terreno queda definido:

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{0,05}{0,05}\right)^{0,07} = 0,19$$

En el caso del sistema de este proyecto, el factor de rugosidad va a resultar diferente según la posición de estudio en la que se encuentre el disco parabólico.

En primer lugar, se define la estructura en la posición horizontal mediante la figura 10, y posteriormente, se obtiene el factor de rugosidad del sistema en esta posición:

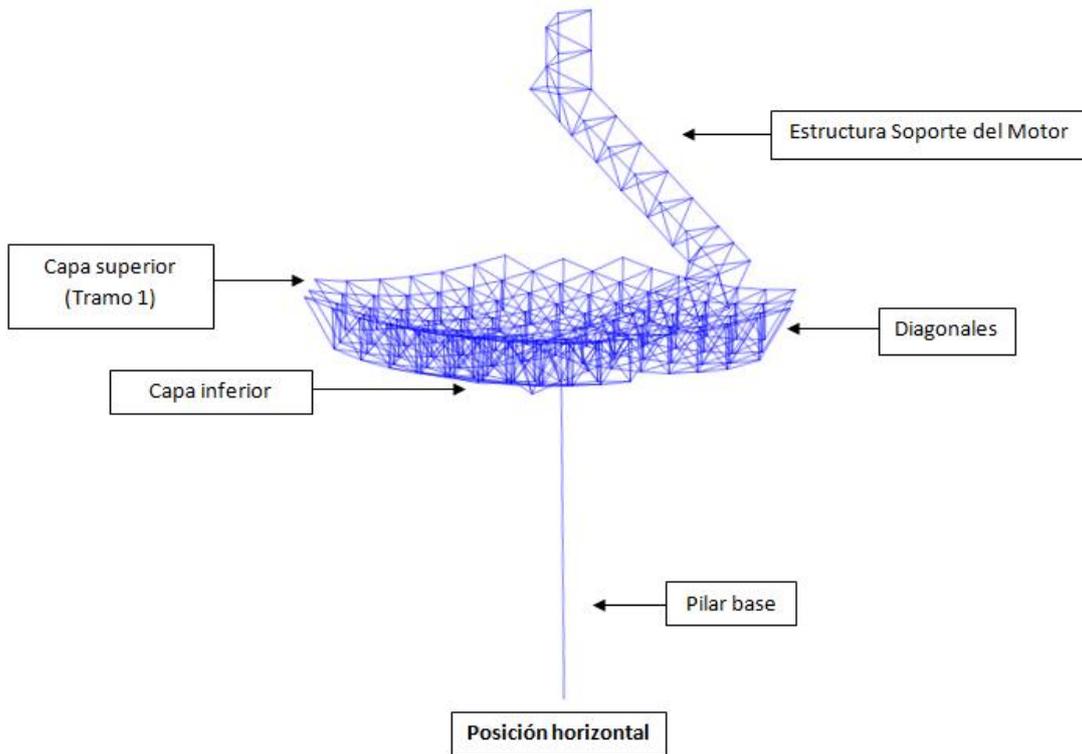


Fig. 12 Esquema explicativo de la posición horizontal.

TRAMOS	$z(m)$	$C_r(z)$
1	6,16	0,9146

Tabla 7. Valores del factor de rugosidad para cada tramo en la posición horizontal.

Y, por consiguiente, una vez determinados los coeficientes necesarios para dicha posición, la velocidad media del viento en el tramo del sistema queda de la siguiente manera:

TRAMOS	$V_m(z)$
1	23,7802

Tabla 8. Valores obtenidos para la velocidad media del viento en cada tramo en la posición horizontal.

En segundo lugar, se define la estructura en la posición vertical mediante la figura 11, y posteriormente, se obtiene el factor de rugosidad del sistema en esta posición:

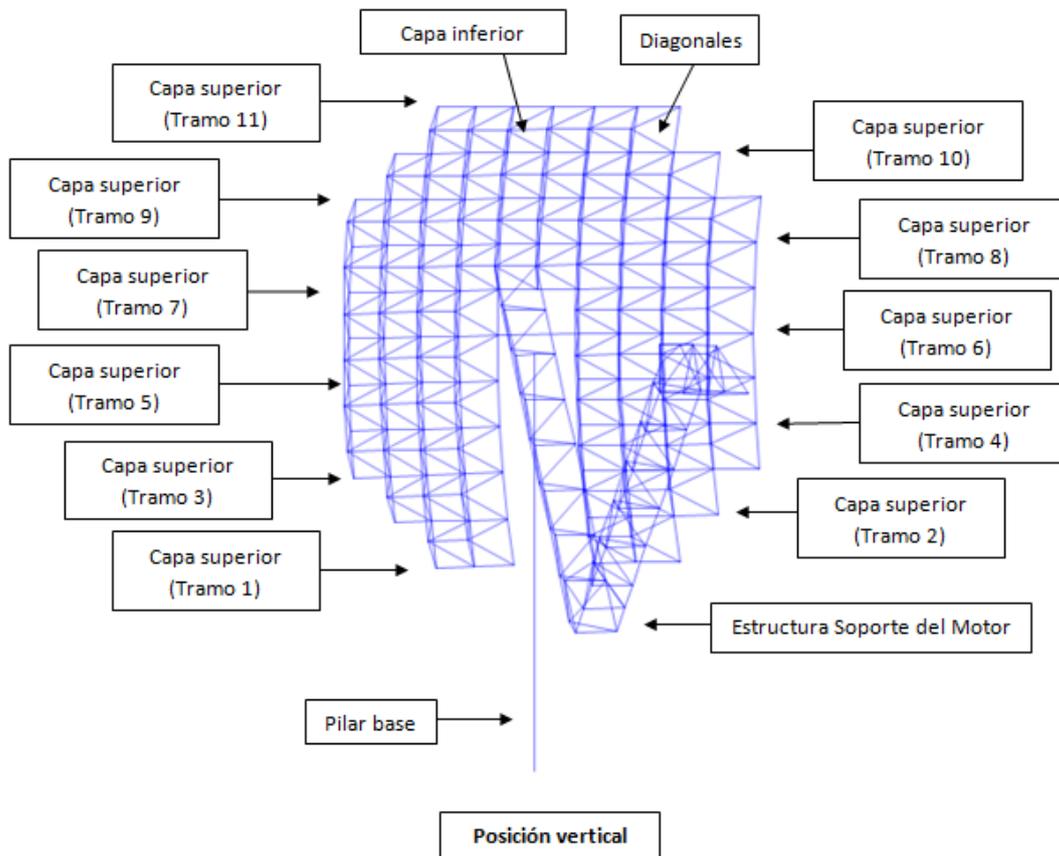


Fig. 13 Esquema explicativo de la posición vertical.

TRAMOS	$z(m)$	$C_r(z)$
1	2,7628	0,7623
2	3,3628	0,7996
3	3,9628	0,8308
4	4,5628	0,8576
5	5,1628	0,8811
6	5,7628	0,9019
7	6,3628	0,9208
8	6,9628	0,9379
9	7,5628	0,9536
10	8,1628	0,9681
11	8,7628	0,9816

Tabla 9. Valores del factor de rugosidad para cada tramo en la posición vertical.

Una vez determinados los diferentes factores de rugosidad y con el resto de parámetros determinados, la velocidad media del viento para cada tramo del disco parabólico resulta:

TRAMOS	$V_m(z)$
1	19,8192
2	20,7900
3	21,6011
4	22,2975
5	22,9078
6	23,4509
7	23,9402
8	24,3854
9	24,7937
10	25,1709
11	25,5213

Tabla 10. Valores obtenidos para la velocidad media del viento en cada tramo en la posición vertical.

En tercer lugar, se define la estructura en la posición inclinada 37° mediante la figura 12, y posteriormente, se obtiene el factor de rugosidad del sistema en esta posición:

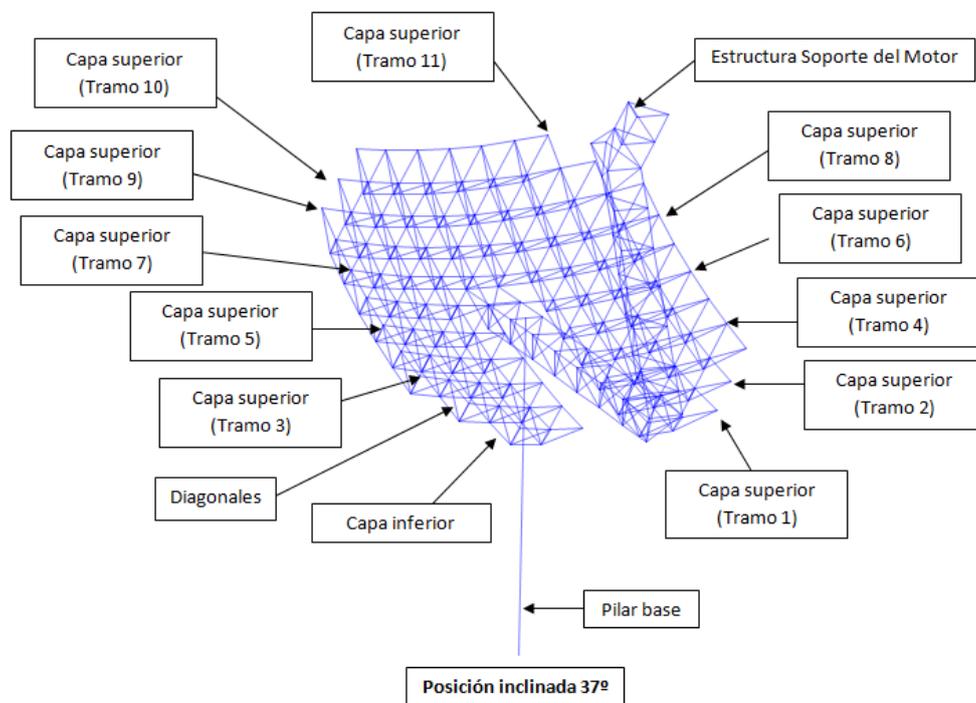


Fig. 14 Esquema explicativo de la posición inclinada 37°.

TRAMOS	z(m)	$C_r(z)$
1	4,3792	0,8498
2	4,7212	0,8641
3	5,1014	0,8788
4	5,3921	0,8893
5	5,7109	0,9002
6	6,0579	0,9114
7	6,4331	0,9229
8	6,8364	0,9344
9	7,2679	0,9460
10	7,6008	0,9546
11	7,9901	0,9640

Tabla 11. Valores del factor de rugosidad para cada tramo en la posición inclinada 37°.

Con el cálculo de estos valores ya disponemos de todos los parámetros para calcular la velocidad media del viento en cada tramo del sistema, la cual resulta:

TRAMOS	$V_m(z)$
1	22,0946
2	22,4661
3	22,8487
4	23,1225
5	23,4063
6	23,6977
7	23,9945
8	24,2949
9	24,5972
10	24,8185
11	25,0652

Tabla 12. Valores obtenidos para la velocidad media del viento en cada tramo en la posición inclinada 37°.

A continuación, se procede a determinar la presión correspondiente a la velocidad de pico $q_p(z)$. Para su cálculo se siguen las directrices explicadas en el punto 4.5 del Eurocódigo 1 (pág. 30):

$$q_p(z) = q_b \cdot c_e(z) \quad (9)$$

donde cada parámetro corresponde a:

$c_e(z)$: es el factor de exposición.

q_b : presión correspondiente a la velocidad media de referencia del viento, la cual se calcula mediante la siguiente expresión:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2 \quad (10)$$

cuyos términos corresponden a:

ρ : densidad del aire, cuyo valor viene definido en el Anexo Nacional del Eurocódigo 1. El valor recomendado es $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$.

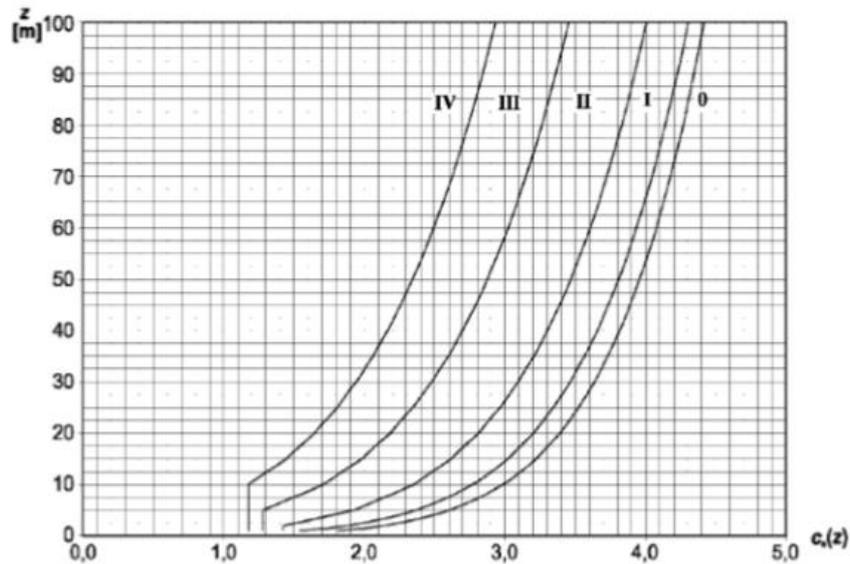
V_b : velocidad básica del viento.

Anteriormente ya se ha determinado la velocidad básica del viento, por tanto, como se dispone de todos los parámetros, se procede a calcular la presión correspondiente a la velocidad media de referencia del viento, resultando un valor de:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 26^2 = 422,5 \text{ kg/m} \cdot \text{s}^2 = 422,5 \text{ N/m}^2$$

Con la obtención de q_b , se procede a la determinación del factor de exposición para así obtener $q_p(z)$, factor que depende de la altura respecto del suelo del tramo estudiado.

Siguiendo las recomendaciones del Eurocódigo 1, el factor de exposición se determina con la ayuda de la figura 4.2 (pág. 30), la cual es válida si el terreno es llano y por tanto el coeficiente topográfico $C_0(z) = 1,0$. En esta figura el factor de exposición se encuentra representado en función de la altura sobre el terreno y la categoría del mismo. Como se cumplen las condiciones se hace uso de esta gráfica para la determinación de $c_e(z)$:



Gráfica 1 Coeficiente de exposición $C_e(z)$, para $C_0(z)=1$ (Fuente: Eurocódigo 1, figura 4.2, pag.30)

Fig. 15 Coef. de exposición $C_e(z)$, para $C_0(z)=1$.

De esta forma quedan determinados en las siguientes tablas los diferentes $c_e(z)$ dependientes de la altura para cada tramo y cada posición del sistema disco parabólico:

POSICIÓN HORIZONTAL		
TRAMOS	$z(m)$	$C_e(z)$
1	6,16	1,5452

Tabla 13. Valores del factor de exposición $C_e(z)$ para cada tramo en la posición horizontal.

POSICIÓN VERTICAL		
TRAMOS	$z(m)$	$C_e(z)$
1	2,7628	1,4837
2	3,3628	1,5019
3	3,9628	1,5112
4	4,5628	1,5205
5	5,1628	1,5298
6	5,7628	1,5390
7	6,3628	1,5483
8	6,9628	1,6711
9	7,5628	1,8193
10	8,1628	1,9586
11	8,7628	2,1159

Tabla 14. Valores del factor de exposición $C_e(z)$ para cada tramo en la posición vertical.

POSICIÓN INCLINADA 37 °		
TRAMOS	z(m)	$C_e(z)$
1	4,3792	1,5176
2	4,7212	1,5229
3	5,1014	1,5288
4	5,3921	1,5333
5	5,7109	1,5382
6	6,0579	1,5436
7	6,4331	1,5494
8	6,8364	1,6398
9	7,2679	1,7465
10	7,6008	1,8287
11	7,9901	1,9249

Tabla 15. Valores del factor de exposición $C_e(z)$ para cada tramo en la posición inclinada 37°.

Por consiguiente, los valores de la presión correspondientes a la velocidad de pico para cada posición y cada tramo del disco parabólico quedan representados en las siguientes tablas:

POSICIÓN HORIZONTAL	
TRAMOS	$q_p(z)$
1	652,8317

Tabla 16. Valores de la presión $q_p(z)$ correspondiente a la velocidad de pico para cada tramo de la posición horizontal.

POSICIÓN VERTICAL	
TRAMOS	$q_p(z)$
1	626,8462
2	634,5712
3	638,4881
4	642,4050
5	646,3219
6	650,2387
7	654,1556
8	706,0188
9	768,6694
10	827,5193
11	893,9706

Tabla 17. Valores de la presión $q_p(z)$ correspondiente a la velocidad de pico para cada tramo de la posición vertical.

POSICIÓN INCLINADA 37º	
TRAMOS	$q_p(z)$
1	641,2064
2	643,4390
3	645,9210
4	647,8188
5	649,8999
6	652,1652
7	654,6145
8	692,8204
9	737,8766
10	772,6373
11	813,2870

Tabla 18. Valores de la presión $q_p(z)$ correspondiente a la velocidad de pico para cada tramo de la posición inclinada 37º.

Una vez determinada la presión correspondiente a la velocidad de pico, utilizando la ecuación presentada en el punto 5.2 (pág. 31) del Eurocódigo 1, se obtiene la presión del viento sobre la estructura (w_e).

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (11)$$

donde cada término corresponde a:

$q_p(z_e)$: presión correspondiente a la velocidad de pico.

z_e : altura de referencia para la presión.

c_{pe} : coeficiente de presión para la presión exterior.

Para empezar, se procede a la determinación del coeficiente de presión. El cálculo de dicho coeficiente se realiza de distinta forma dependiendo del tipo de estructura según se indica en el Eurocódigo 1. Para el caso de estudio del presente proyecto, el cálculo varía según la posición en la que se encuentre el sistema disco parabólico, puesto que, según ésta, se asemeja a un tipo de estructura o a otra.

En primer lugar, se realiza el cálculo del coeficiente de presión para la posición horizontal del disco parabólico. Cuando el sistema se encuentra en esta posición se asemeja a una marquesina libre ($\varphi=0$) a dos aguas, por tanto, se siguen los pasos indicados en el punto 7.3 del Eurocódigo 1. Por una parte, el sistema presenta un ángulo de inclinación de la cubierta de $-8,3588^\circ$, por lo que con la ayuda de la Tabla 7.7 (pág. 63, Eurocódigo 1) se obtienen los valores de $c_{p,net}$ y c_f .

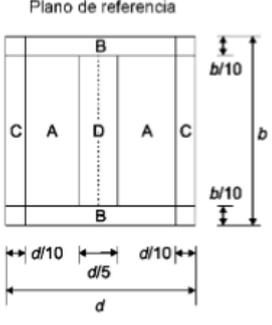
			Coeficientes de presión neta $c_{p,net}$			
						
Ángulo de la cubierta α [°]	Bloqueo φ	Coefficiente global de fuerza c_f	Zona A	Zona B	Zona C	Zona D
-20	Valor máximo para cualquier φ	+ 0,7	+ 0,8	+ 1,6	+ 0,6	+ 1,7
	Valor mínimo para $\varphi = 0$	- 0,7	- 0,9	- 1,3	- 1,6	- 0,6
	Valor mínimo para $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,5	- 2,4	- 2,4	- 0,6
-15	Valor máximo para cualquier φ	+ 0,5	+ 0,6	+ 1,5	+ 0,7	+ 1,4
	Valor mínimo para $\varphi = 0$	- 0,6	- 0,8	- 1,3	- 1,6	- 0,6
	Valor mínimo para $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,7	- 2,6	- 0,6
-10	Valor máximo para cualquier φ	+ 0,4	+ 0,6	+ 1,4	+ 0,8	+ 1,1
	Valor mínimo para $\varphi = 0$	- 0,6	- 0,8	- 1,3	- 1,5	- 0,6
	Valor mínimo para $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,7	- 2,6	- 0,6
-5	Valor máximo para cualquier φ	+ 0,3	+ 0,5	+ 1,5	+ 0,8	+ 0,8
	Valor mínimo para $\varphi = 0$	- 0,5	- 0,7	- 1,3	- 1,6	- 0,6
	Valor mínimo para $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,5	- 2,4	- 2,4	- 0,6
+5	Valor máximo para cualquier φ	+ 0,3	+ 0,6	+ 1,8	+ 1,3	+ 0,4
	Valor mínimo para $\varphi = 0$	- 0,6	- 0,6	- 1,4	- 1,4	- 1,1
	Valor mínimo para $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,3	- 2,0	- 1,8	- 1,5

Tabla 19. Valores $c_{p,net}$ y c_f para marquesinas a dos aguas.

Interpolación para $\varphi=0$ (Valor mínimo)					
Ángulo	C_f	ZONA A ($c_{p,net}$)	ZONA B ($c_{p,net}$)	ZONA C ($c_{p,net}$)	ZONA D ($c_{p,net}$)
-10	-0,6	-0,8	-1,3	-1,5	-0,6
-8,3588	-0,5672	-0,7672	-1,3	-1,5328	-0,6
-5	-0,5	-0,7	-1,3	-1,6	-0,6

Tabla 20. Valores de $c_{p,net}$ y c_f para la posición horizontal del sistema.

Por otra parte, mediante la ayuda del punto 7.3 (8) y de la figura 7.17 del Eurocódigo 1, se sabe que el valor de la altura de referencia $z_e = 6,16$ m, por lo que $q_p(z_e) = 652,8317 \text{ N/m}^2$.

Una vez obtenidos los valores de todos los términos, la presión del viento sobre la estructura en cada una de sus zonas resulta:

w_e para el valor de $c_{p,net}$	
ZONA	$w_e (N/m^2)$
A	-500,8374
B	-848,6812
C	-1000,6755
D	-391,6990

Tabla 21. Valores de w_e para el valor de $c_{p,net}$ de la posición horizontal.

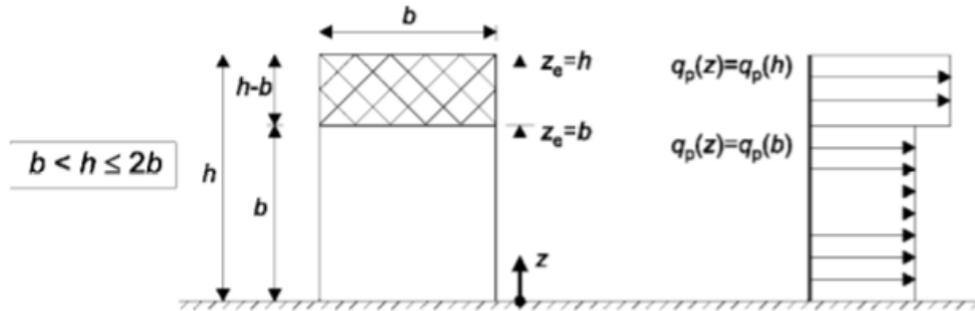
Por otra parte, en esta posición se debe determinar la acción del viento sobre el pilar base de la estructura. Para este elemento se simula una carga repartida sobre dicho pilar que sigue la ecuación $q_{z_{e1}} = d \cdot q_p(z_e)$, donde $q_p(z_e) = 652,8317 \text{ N/m}^2$ y $d = 0,273 \text{ m}$ (diámetro del pilar base), dando como valor $q = 178.2231 \text{ N/m}$.

En segundo lugar, se realiza el cálculo del coeficiente de presión para la posición totalmente vertical del disco parabólico. Cuando el sistema se encuentra en esta posición se asemeja a un muro vertical (fachada), por tanto, se procede al cálculo de este coeficiente siguiendo las indicaciones del punto 7.2.2 del Eurocódigo 1.

Por un lado, la altura de referencia z_e depende de la relación h/b , que será siempre la altura superior de las diferentes partes de los muros. Los parámetros h , b y d se corresponden con los valores: $8,7628 \text{ m}$, 6 m y $0,6 \text{ m}$ respectivamente, y por tanto la estructura presenta dos alturas debido a que $b < h \leq 2b$.

Como bien se indica en la figura 7.4 del Eurocódigo 1 (pág. 42), los valores de z_{e1} y z_{e2} se corresponderían a $z_{e1} = b = 6 \text{ m}$ y $z_{e2} = h = 8,7628 \text{ m}$, pero en el caso de estudio del disco parabólico se considerará que $z_{e1} = \text{distancia tramo 1} = 2,7628 \text{ m}$ (altura en la cual el viento solo afecta al poste de sujeción del concentrador solar). Este tramo se estudiará con una carga repartida sobre el mismo. Mientras que para $z_{e2} = \text{altura concentrador} = 8,7628 \text{ m}$ (altura en que el viento afecta al concentrador solar), que se estudiará como se hace en los elementos estructurales de sección rectangular (punto 7.6 del Eurocódigo 1).

A continuación se dispone de una figuras explicativas que nos dicen como se debería de determinar las distintas alturas de referencia según el Eurocódigo (Figura 7.4) y una figura explicativa de como se han determinado en el presente proyecto (Figura 17).



NOTA La presi3n dinàmica deberìa suponerse como uniforme sobre cada banda horizontal considerada.

Fig. 16 Altura de referencia, z_e en funci3n de h y b , y perfil de velocidades y presi3n correspondiente.

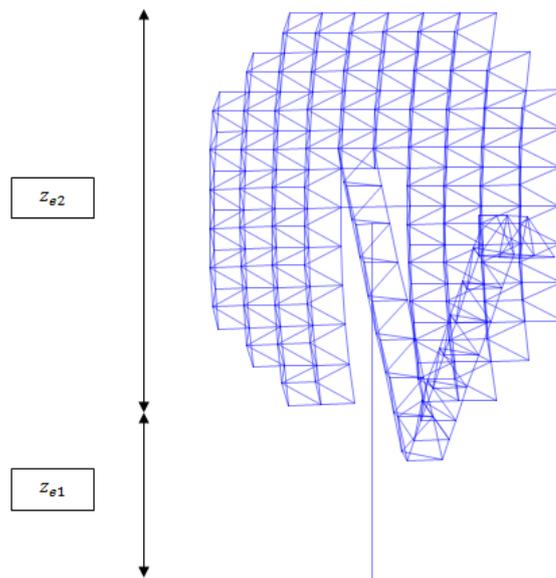


Fig. 17 Alturas de referencia para la posici3n vertical.

Para empezar, como se ha dicho anteriormente, en el tramo de $z_{e1} = 2.7628 \text{ m}$, debido a que se trata de la altura en la cual el viento solo afecta al pilar base de sujeci3n del concentrador solar, se simula una carga repartida sobre dicho elemento que sigue la ecuaci3n $q_{z_{e1}} = d \cdot q_p(z_e)$. Esta carga repartida afecta a todo el pilar y presentarà un valor de $q = 178,2231 \text{ N/m}$. (el mismo que en el caso de la posici3n horizontal).

Por otro lado, los coeficientes de presi3n externa $c_{pe,10}$ y $c_{pe,1}$ se definen en la tabla 7.1 del Euroc3digo 1 (pàg. 44). En el caso del sistema disco parab3lico $h/d = 14.6047$ valor superior a 5, por tanto, no sirve para el càlculo de dichos coeficientes, por

consiguiente se sigue la indicación de la nota 2 que determina que la acción total del viento se calculará con la ayuda del punto 7.6, como habíamos dicho anteriormente.

Zona	A		B		C		D		E	
h/d	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$								
5	- 1,2	- 1,4	- 0,8	- 1,1	- 0,5		+ 0,8	+ 1,0	- 0,7	
1	- 1,2	- 1,4	- 0,8	- 1,1	- 0,5		+ 0,8	+ 1,0	- 0,5	
$\leq 0,25$	- 1,2	- 1,4	- 0,8	- 1,1	- 0,5		+ 0,7	+ 1,0	- 0,3	

NOTA 2 En edificios en los que $h/d > 5$, la acción total del viento se puede determinar de acuerdo con lo especificado en los apartados 7.6 a 7.8 y 7.9.2.

Tabla 22. Valores recomendados para los coeficientes de presión externa en muros verticales de edificios de planta rectangular.

Siguiendo las indicaciones del punto 7.6, se procede a la determinación de la acción total del viento sobre el concentrador de rayos. En primer lugar, se utiliza la siguiente fórmula para el cálculo del coeficiente de fuerza con la acción del viento perpendicular a la cara frontal del concentrador:

$$C_f = C_{f,0} \cdot \Psi_r \cdot \Psi_\lambda \quad (12)$$

donde cada término se corresponde a:

Ψ_r : factor de reducción para secciones rectangulares con esquinas redondeadas que depende del número de Reynolds.

Ψ_λ : factor de efecto cola para elementos con flujo libre de cola.

$C_{f,0}$: coeficiente de fuerza para secciones rectangulares con esquinas vivas y sin considerar el flujo libre de cola de la sección. Se indica en la figura 7.23 del Eurocódigo 1.

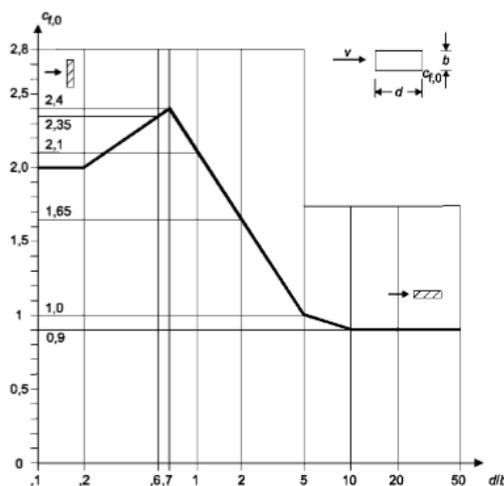


Fig. 18 Coef. de fuerza para secciones rectangulares con esquinas vivas y sin considerar el flujo libre de cola.

En el caso de estudio de este proyecto, para obtener $c_{f,0}$, se sabe que los valores para $d = 0,6$ m y $b = 6$ m, dando un valor de $d/b = 0.1$ y por tanto, entrando en la gráfica de la figura 7.23, se obtiene un valor de $c_{f,0} = 2$.

Así mismo se procede a la obtención del factor de reducción Ψ_r , el cual, conocido que $r=0$, presenta un valor de 1, cosa que se sabe al utilizar la figura 7.24 del Eurocódigo 1 (pág. 72):

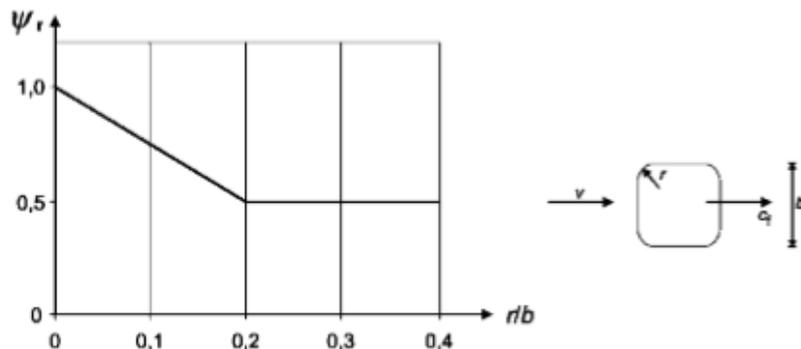


Fig. 19 Factor de reducción para secciones transversales cuadradas con equinas redondeadas.

Al mismo tiempo, mediante la utilización del punto 7.13 se procede al cálculo del factor del efecto cola para elementos de flujo libre de cola, Ψ_λ . Este apartado recomienda obtener dicho parámetro por medio de la gráfica de la figura 7.36 del Eurocódigo 1 (pág. 87). En donde el factor de cola se presenta en función de la relación de solidez y de la esbeltez efectiva.

Por una parte, la relación de solidez (φ) representa el porcentaje de huecos que hay por tramo estudiado en el sistema disco parabólico. Siguiendo las indicaciones del Eurocódigo 1, para la obtención del parámetro se utiliza la siguiente fórmula:

$$\varphi = \frac{A}{A_c} \quad (13)$$

correspondiéndose cada término a:

A: suma de las áreas proyectadas de los elementos de la estructura.

A_c : área global, la cual se calcula con la ayuda de la figura 7.37 del Eurocódigo 1 (pág. 87).

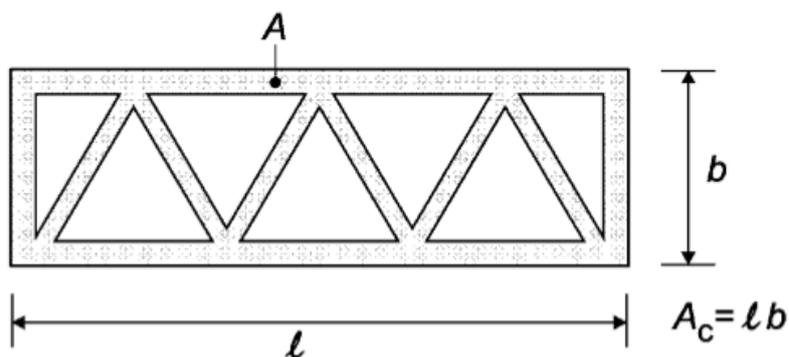


Fig. 20 Definición de la relación de solidez φ

En el caso del sistema de estudio del presente proyecto, el viento incide con el concentrador de rayos, el cual no dispone de huecos y por tanto, el valor del área global resulta ser igual al valor de las áreas proyectadas de los elementos de la estructura, $A_c = A$. Por lo que el valor de la relación de solidez es $\varphi = 1$.

Por otra parte, la esbeltez efectiva λ se define dependiendo de la posición de la estructura y de sus dimensiones. Con la ayuda de la tabla 7.16 (Tabla 24) del Eurocódigo 1 y sabiendo que $l = 6 \text{ m} < 15$ y que $b = 0,6 \text{ m}$, el valor de la esbeltez es $\lambda = 2 \cdot \frac{6}{0,6} = 20$

No.	Posición de la estructura Dirección del viento normal al plano de la hoja	Esbeltez efectiva λ
1		<p>En secciones poligonales, rectangulares, con bordes vivos y estructuras de celosía:</p> <p>si $l \geq 50 \text{ m}$, el menor valor de $\lambda = 1,4 \ell/b$ o $\lambda = 70$</p>
2		<p>si $l < 15 \text{ m}$, el menor valor de $\lambda = 2 \ell/b$ o $\lambda = 70$</p> <p>En cilindros circulares:</p> <p>si $l \geq 50$, el menor valor de $\lambda = 0,7 \ell/b$ o $\lambda = 70$,</p> <p>si $l < 15 \text{ m}$, el menor valor de $\lambda = \ell/b$ o $\lambda = 70$,</p>

Tabla 23. Valores recomendados de λ para cilindros, secciones poligonales, secciones rectangulares, secciones estructurales con bordes vivos y estructuras de celosía.

Dado que ya disponemos de los valores de la esbeltez ($\lambda = 20$) y de la relación de solidez ($\varphi = 1$), se procede a obtener el valor del factor del efecto cola (Ψ_λ) mediante la utilización de la figura 7.36 del Eurocódigo 1 (pág. 87):

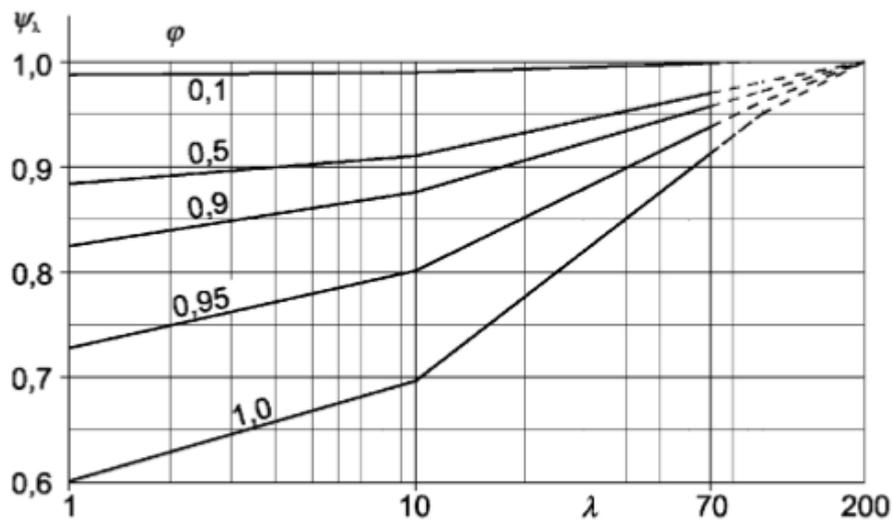


Fig. 21 Valores indicativos del factor del efecto cola Ψ_λ en función de la relación de solidez φ y la esbeltez λ .

Observando la figura, para el factor del efecto cola se obtiene un valor de $\Psi_\lambda = 0,75$.

En consecuencia, como ya se dispone del valor de todos los términos de los cuales depende el coeficiente de fuerza, éste presenta un valor de:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \Psi_r \cdot \Psi_\lambda = 2 \cdot 1 \cdot 0,75 = 1,5$$

A continuación se procede al cálculo de las fuerzas del viento con la ayuda de las indicaciones del punto 5.3 del Eurocódigo 1 (pág. 32). Este apartado determina que la fuerza del viento F_w que actúa sobre la estructura o elemento estructural, se puede obtener por medio de los coeficientes de fuerza y la siguiente expresión:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (14)$$

donde los distintos parámetros se corresponden a:

$c_s c_d$: factor estructural.

c_f : coeficiente de fuerza para la estructura o elemento estructural.

$q_p(z_e)$: presión de la velocidad de pico a la altura de referencia z_e .

A_{ref} : área de referencia para el elemento estructural.

Con la ayuda del apartado 6.2 b) del Eurocódigo 1 se obtiene el factor estructural, que para fachadas y elementos de cubierta cuya frecuencia natural sea superior a 5 Hz,

presenta un valor de $c_s c_d = 1$. Mientras que el valor del área de referencia dependerá del tramo estudiado y del nudo de la estructura al que afecta, estos valores de A_{ref} se corresponden a: $A_{ref1} = 0,3 \cdot 0,3 = 0,09 \text{ m}^2$, $A_{ref2} = 0,3 \cdot 0,6 = 0,18 \text{ m}^2$, $A_{ref3} = (0,3 \cdot 0,6) + (0,3 \cdot 0,3) = 0,27 \text{ m}^2$ ó $A_{ref4} = 0,6 \cdot 0,6 = 0,36 \text{ m}^2$.

Los valores de las fuerzas del viento para la posición vertical del disco parabólico, se presentan en las tablas siguientes siguiendo el patrón de $F_{w(j)}$, en donde la "j" representa el nudo de izquierda a derecha presente en cada uno de los tramos (Figura explicativa nº 22). Cada tabla representa el tramo del concentrador referido a la altura de referencia:

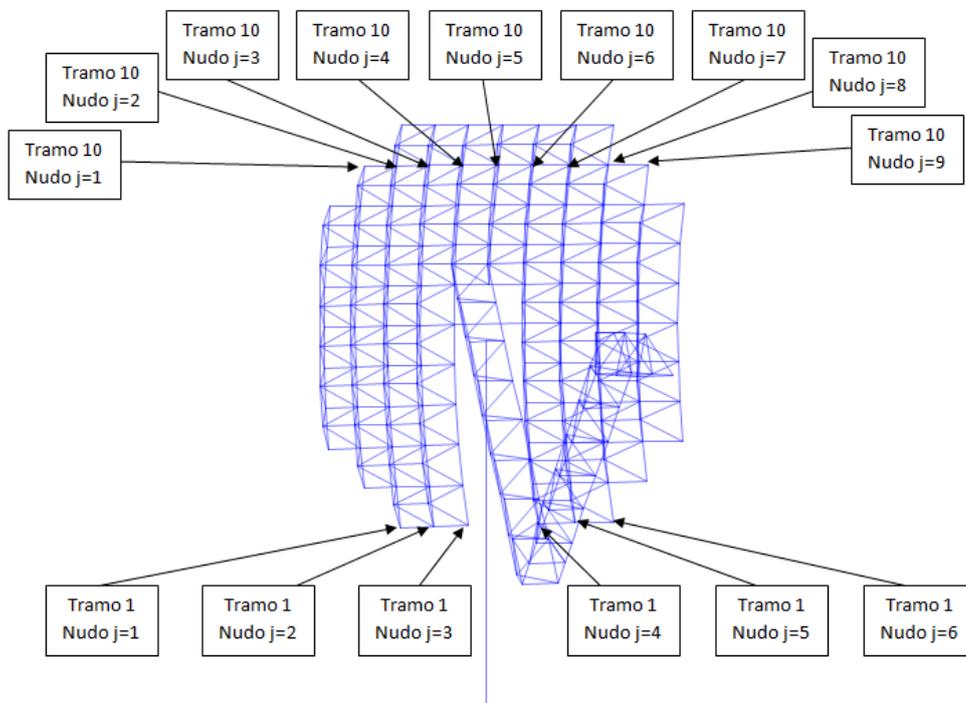


Fig. 22 Ejemplos de la distribución de nudos en la posición vertical.

- TRAMO 1:

NUDO	$c_s c_d$	c_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)
j=1	1	1,5	626,8462	0,09	0,0846
j=2	1	1,5	626,8462	0,18	0,1692
j=3	1	1,5	626,8462	0,09	0,0846
j=4	1	1,5	626,8462	0,09	0,0846
j=5	1	1,5	626,8462	0,18	0,1692
j=6	1	1,5	626,8462	0,09	0,0846

Tabla 24. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 1 de altura de referencia en la posición vertical.

- TRAMO 2:

NUDO	$C_s C_d$	C_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (kN)
j=1	1	1,5	634,5712	0,09	0,0857
j=2	1	1,5	634,5712	0,27	0,2570
j=3	1	1,5	634,5712	0,36	0,3427
j=4	1	1,5	634,5712	0,18	0,1713
j=5	1	1,5	634,5712	0,18	0,1713
j=6	1	1,5	634,5712	0,36	0,3427
j=7	1	1,5	634,5712	0,27	0,2570
j=8	1	1,5	634,5712	0,09	0,0857

Tabla 25. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 2 de altura de referencia en la posición vertical.

- TRAMO 3:

NUDO	$C_s C_d$	C_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (kN)
j=1	1	1,5	638,4881	0,09	0,0862
j=2	1	1,5	638,4881	0,27	0,2586
j=3	1	1,5	638,4881	0,36	0,3448
j=4	1	1,5	638,4881	0,36	0,3448
j=5	1	1,5	638,4881	0,18	0,1724
j=6	1	1,5	638,4881	0,18	0,1724
j=7	1	1,5	638,4881	0,36	0,3448
j=8	1	1,5	638,4881	0,36	0,3448
j=9	1	1,5	638,4881	0,27	0,2586
j=10	1	1,5	638,4881	0,09	0,0862

Tabla 26. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 3 de altura de referencia en la posición vertical.

- TRAMO 4:

NUDO	$C_s C_d$	C_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (kN)
j=1	1	1,5	642,4050	0,18	0,17345
j=2	1	1,5	642,4050	0,36	0,3469
j=3	1	1,5	642,4050	0,36	0,3469
j=4	1	1,5	642,4050	0,36	0,3469
j=5	1	1,5	642,4050	0,18	0,1734
j=6	1	1,5	642,4050	0,18	0,1734
j=7	1	1,5	642,4050	0,36	0,3469
j=8	1	1,5	642,4050	0,36	0,3469
j=9	1	1,5	642,4050	0,36	0,3469
j=10	1	1,5	642,4050	0,18	0,1734

Tabla 27. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 4 de altura de referencia en la posición vertical.

- TRAMO 5:

NUDO	$C_s C_d$	C_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)
j=1	1	1,5	646,3219	0,18	0,1745
j=2	1	1,5	646,3219	0,36	0,3490
j=3	1	1,5	646,3219	0,36	0,3490
j=4	1	1,5	646,3219	0,36	0,3490
j=5	1	1,5	646,3219	0,18	0,1745
j=6	1	1,5	646,3219	0,18	0,1745
j=7	1	1,5	646,3219	0,36	0,3490
j=8	1	1,5	646,3219	0,36	0,3490
j=9	1	1,5	646,3219	0,36	0,3490
j=10	1	1,5	646,3219	0,18	0,1745

Tabla 28. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 5 de altura de referencia en la posición vertical.

- TRAMO 6:

NUDO	$C_s C_d$	C_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)
j=1	1	1,5	650,2387	0,18	0,1756
j=2	1	1,5	650,2387	0,36	0,3511
j=3	1	1,5	650,2387	0,36	0,3511
j=4	1	1,5	650,2387	0,36	0,3511
j=5	1	1,5	650,2387	0,18	0,1756
j=6	1	1,5	650,2387	0,18	0,1756
j=7	1	1,5	650,2387	0,36	0,3511
j=8	1	1,5	650,2387	0,36	0,3511
j=9	1	1,5	650,2387	0,36	0,3511
j=10	1	1,5	650,2387	0,18	0,1756

Tabla 29. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 6 de altura de referencia en la posición vertical.

- TRAMO 7:

NUDO	$C_s C_d$	C_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)
j=1	1	1,5	654,1556	0,18	0,1766
j=2	1	1,5	654,1556	0,36	0,3532
j=3	1	1,5	654,1556	0,36	0,3532
j=4	1	1,5	654,1556	0,36	0,3532
j=5	1	1,5	654,1556	0,27	0,2649
j=6	1	1,5	654,1556	0,18	0,1766
j=7	1	1,5	654,1556	0,27	0,2649
j=8	1	1,5	654,1556	0,36	0,3532
j=9	1	1,5	654,1556	0,36	0,3532
j=10	1	1,5	654,1556	0,36	0,3532
j=11	1	1,5	654,1556	0,18	0,1766

Tabla 30. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 7 de altura de referencia en la posición vertical.

- TRAMO 8:

NUDO	$C_s C_d$	C_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)
j=1	1	1,5	706,0188	0,18	0,1906
j=2	1	1,5	706,0188	0,36	0,3813
j=3	1	1,5	706,0188	0,36	0,3813
j=4	1	1,5	706,0188	0,36	0,3813
j=5	1	1,5	706,0188	0,36	0,3813
j=6	1	1,5	706,0188	0,36	0,3813
j=7	1	1,5	706,0188	0,36	0,3813
j=8	1	1,5	706,0188	0,36	0,3813
j=9	1	1,5	706,0188	0,36	0,3813
j=10	1	1,5	706,0188	0,36	0,3813
j=11	1	1,5	706,0188	0,18	0,1906

Tabla 31. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 8 de altura de referencia en la posición vertical.

- TRAMO 9:

NUDO	$C_s C_d$	C_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)
j=1	1	1,5	768,6694	0,09	0,1038
j=2	1	1,5	768,6694	0,27	0,3113
j=3	1	1,5	768,6694	0,36	0,4151
j=4	1	1,5	768,6694	0,36	0,4151
j=5	1	1,5	768,6694	0,36	0,4151
j=6	1	1,5	768,6694	0,36	0,4151
j=7	1	1,5	768,6694	0,36	0,4151
j=8	1	1,5	768,6694	0,36	0,4151
j=9	1	1,5	768,6694	0,36	0,4151
j=10	1	1,5	768,6694	0,27	0,3113
j=11	1	1,5	768,6694	0,09	0,1038

Tabla 32. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 9 de altura de referencia en la posición vertical.

- TRAMO 10:

NUDO	$C_s C_d$	C_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)
j=1	1	1,5	827,5193	0,09	0,1117
j=2	1	1,5	827,5193	0,27	0,3351
j=3	1	1,5	827,5193	0,36	0,4469
j=4	1	1,5	827,5193	0,36	0,4469
j=5	1	1,5	827,5193	0,36	0,4469
j=6	1	1,5	827,5193	0,36	0,4469
j=7	1	1,5	827,5193	0,36	0,4469
j=8	1	1,5	827,5193	0,27	0,3351
j=9	1	1,5	827,5193	0,09	0,1117

Tabla 33. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 10 de altura de referencia en la posición vertical.

- TRAMO 11:

NUDO	$c_s c_d$	c_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)
j=1	1	1,5	893,9706	0,09	0,1207
j=2	1	1,5	893,9706	0,18	0,2414
j=3	1	1,5	893,9706	0,18	0,2414
j=4	1	1,5	893,9706	0,18	0,2414
j=5	1	1,5	893,9706	0,18	0,2414
j=6	1	1,5	893,9706	0,18	0,2414
j=7	1	1,5	893,9706	0,09	0,1207

Tabla 34. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 11 de altura de referencia en la posición vertical.

De la misma forma, ahora se procede a la obtención de las fuerzas del viento sobre el sistema disco parabólico cuando éste se encuentra en la posición inclinada 37° . El procedimiento a seguir va a ser el mismo que el utilizado para la determinación de las mismas en el caso en que el sistema se encuentra en la posición totalmente vertical.

En primer lugar, se realiza el cálculo del coeficiente de presión. Cuando el sistema se encuentra en la posición inclinada 37° se asemeja a un muro vertical (fachada), por tanto, se procede al cálculo de este coeficiente siguiendo las indicaciones del punto 7.2.2 del Eurocódigo 1.

En esta posición del sistema, los parámetros h , b y d se corresponden con los valores: 7,9901 m, 6 m y 0,6 m respectivamente, por tanto, nos encontramos en la misma situación que en la posición totalmente vertical, $b < h \leq 2b$. Siguiendo las indicaciones de la figura 7.4 del Eurocódigo 1 (pág. 42), los valores deberían ser $z_{e1} = b = 6 \text{ m}$ y $z_{e2} = h = 7,9901 \text{ m}$. Aunque actuando del mismo modo que en el caso estudiado para la posición vertical, se procede a considerar que $z_{e1} = \text{distancia tramo 1} = 4,3792 \text{ m}$ (altura en la cual el viento solo afecta al poste de sujeción del concentrador solar), y $z_{e2} = \text{altura concentrador} = 7,9901 \text{ m}$ (altura en que el viento afecta al concentrador solar).

A continuación, se dispone de una figura explicativa que nos indica cómo se han determinado las alturas de referencia en el presente proyecto para la posición inclinada (Figura 23).

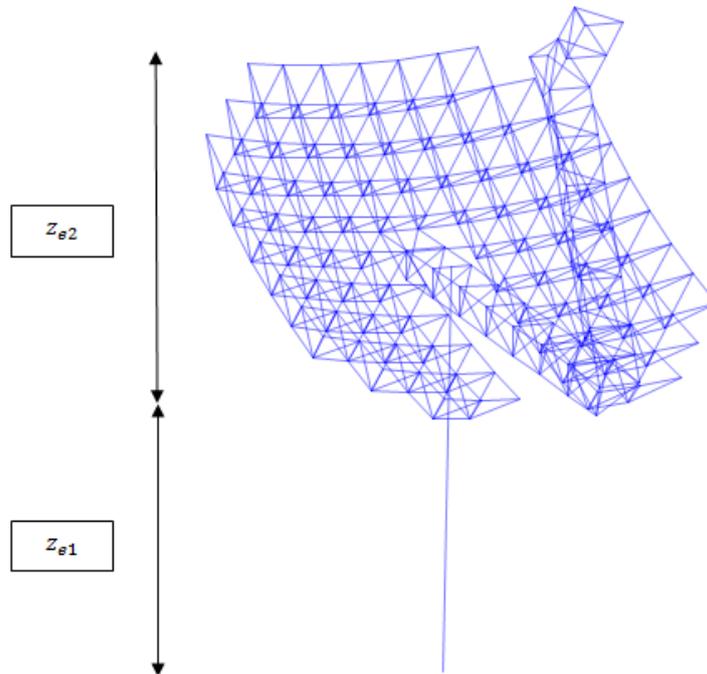


Fig. 23 Alturas de referencia para la posición inclinada.

Para empezar, en el tramo en que el viento solo afecta al pilar base de sujeción del concentrador solar, se simula una carga repartida sobre dicho elemento que sigue la ecuación $q_{z_{e1}} = d \cdot q_p(z_e)$. Esta carga repartida afecta a todo el pilar y presentará un valor de $q = 178,2231 \text{ N/m}$. (el mismo que en el caso de la posición horizontal).

Cabe destacar que en el caso de la posición inclinada ocurre lo mismo que en el de la posición vertical, $h/d = 13,3168$ valor superior a 5, y por tanto, no se puede utilizar la tabla 7.1 del Eurocódigo 1 (pág. 44) que define los coeficientes de presión externa $c_{pe,10}$ y $c_{pe,1}$, por lo que para la obtención de la acción total del viento se utiliza el punto 7.6 otra vez.

Siguiendo las indicaciones del punto 7.6, se procede a la determinación de la acción total del viento sobre el concentrador de rayos. En primer lugar, se determina coeficiente de fuerza con la acción del viento perpendicular a la cara frontal del concentrador, mediante la expresión:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \Psi_r \cdot \Psi_\lambda \quad (12)$$

En la posición inclinada, para obtener $c_{f,0}$, se sabe que los valores para $d = 0,6$ m y $b = 6$ m, dando un valor de $d/b = 0.1$, valor con el cual se entra en la gráfica de la figura 7.23 del Eurocódigo 1 (pág. 71), y se obtiene un valor de $c_{f,0} = 2$.

Así mismo, el factor de reducción $\Psi_r = 1$, cosa que se sabe al utilizar la figura 7.24 del Eurocódigo 1 (pág. 72) y sabiendo que $r=0$.

Paralelamente, se utiliza el punto 7.13 para el cálculo del factor del efecto cola para elementos de flujo libre de cola, Ψ_λ . Por medio de la gráfica de la figura 7.36 del Eurocódigo 1 (pág. 87), dicho factor de cola se presenta en función de la relación de solidez y de la esbeltez efectiva.

Por una parte, la relación de solidez (φ), se calcula siguiendo las indicaciones del Eurocódigo 1, mediante la utilización de la siguiente fórmula, en donde $A = A_c$, debido a que el viento incide con el concentrador de rayos que no dispone de huecos y por tanto, el valor del área global resulta ser igual al valor de las áreas proyectadas de los elementos de la estructura:

$$\varphi = \frac{A}{A_c} = 1 \quad (13)$$

Por otra parte, con la ayuda de la tabla 7.16 del Eurocódigo 1 y sabiendo que $l = 6$ m < 15 y que $b = 0,6$ m, el valor de la esbeltez es $\lambda = 2 \cdot \frac{6}{0,6} = 20$.

Una vez obtenidos los valores de la esbeltez ($\lambda = 20$) y de la relación de solidez ($\varphi = 1$), mediante la utilización de la figura 7.36 del Eurocódigo 1 (pág. 87) se obtiene un valor del factor del efecto cola $\Psi_\lambda = 0,75$.

En consecuencia, de la obtención de todos los parámetros de los que depende el coeficiente de fuerza, éste presenta un valor de:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \Psi_r \cdot \Psi_\lambda = 2 \cdot 1 \cdot 0,75 = 1,5$$

Por último, con las indicaciones del punto 5.3 del Eurocódigo 1 (pág. 32) se calculan las fuerzas del viento F_w que actúan sobre la estructura o elemento estructural mediante la expresión:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (14)$$

De esta expresión se conocen los valores de los distintos parámetros: $q_p(z_e)$ depende del tramo estudiado, A_{ref} depende del tramo estudiado y del nudo de la estructura al que afecta (valores iguales a los de la posición vertical), y por último, los valores $c_s c_d = 1$ y $c_f = 1,5$.

En las tablas siguientes se recogen los valores de las fuerzas del viento para la posición inclinada 37°. Cada tabla presenta los distintos nudos de izquierda a derecha en cada uno de los tramos referidos a la altura de referencia (Figura explicativa nº 24):

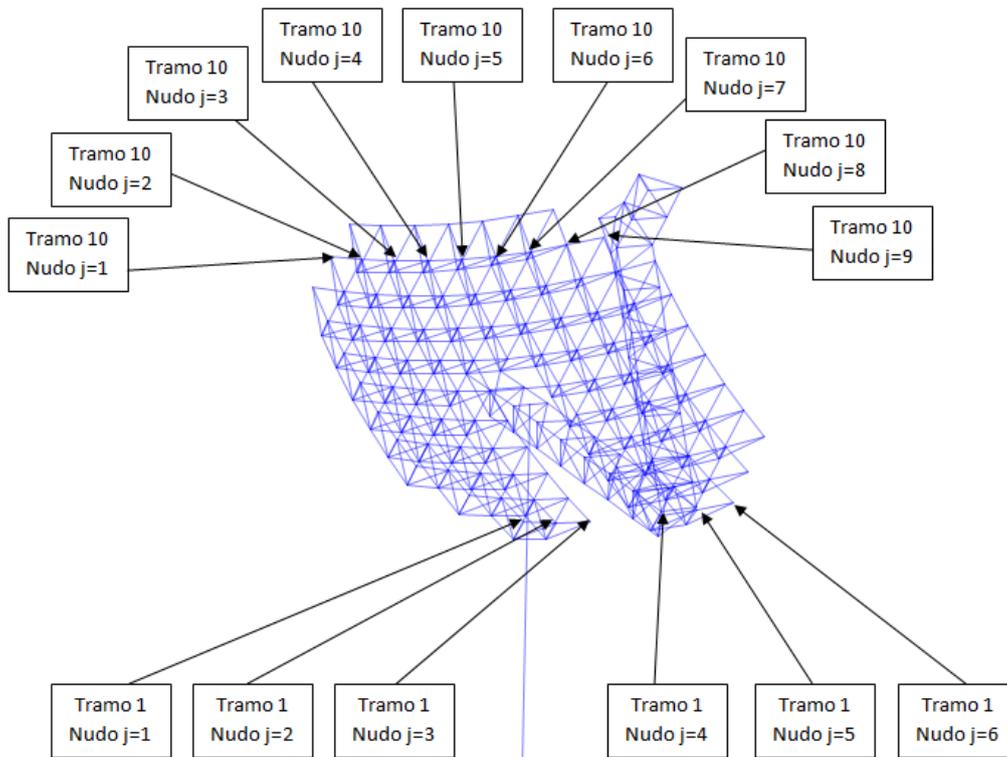


Fig. 24 Ejemplos de la distribución de nudos en la posición inclinada.

- TRAMO 1:

NUDO	$C_s C_d$	C_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)	$F_{w(j)}$ (KN) en X	$F_{w(j)}$ (KN) en Z
j=1	1	1,5	641,2064	0,09	0,0866	0,0521	-0,0691
j=2	1	1,5	641,2064	0,18	0,1731	0,1042	-0,1383
j=3	1	1,5	641,2064	0,09	0,0866	0,0521	-0,0691
j=4	1	1,5	641,2064	0,09	0,0866	0,0521	-0,0691
j=5	1	1,5	641,2064	0,18	0,1731	0,1042	-0,1383
j=6	1	1,5	641,2064	0,09	0,0866	0,0521	-0,0691

Tabla 35. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 1 de altura de referencia en la posición inclinada 37º.

- TRAMO 2:

NUDO	$C_s C_d$	C_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)	$F_{w(j)}$ (KN) en X	$F_{w(j)}$ (KN) en Z
j=1	1	1,5	643,4390	0,09	0,0869	0,0523	-0,0694
j=2	1	1,5	643,4390	0,27	0,2606	0,1568	-0,2081
j=3	1	1,5	643,4390	0,36	0,3475	0,2091	-0,2775
j=4	1	1,5	643,4390	0,18	0,1737	0,1046	-0,1387
j=5	1	1,5	643,4390	0,18	0,1737	0,1046	-0,1387
j=6	1	1,5	643,4390	0,36	0,3475	0,2091	-0,2775
j=7	1	1,5	643,4390	0,27	0,2606	0,1568	-0,2081
j=8	1	1,5	643,4390	0,09	0,0869	0,0523	-0,0694

Tabla 36. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 2 de altura de referencia en la posición inclinada 37º.

- TRAMO 3:

NUDO	$C_s C_d$	C_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)	$F_{w(j)}$ (KN) en X	$F_{w(j)}$ (KN) en Z
j=1	1	1,5	645,9210	0,09	0,0872	0,0525	-0,0696
j=2	1	1,5	645,9210	0,27	0,2616	0,1574	-0,2089
j=3	1	1,5	645,9210	0,36	0,3488	0,2099	-0,2786
j=4	1	1,5	645,9210	0,36	0,3488	0,2099	-0,2786
j=5	1	1,5	645,9210	0,18	0,1744	0,1050	-0,1393
j=6	1	1,5	645,9210	0,18	0,1744	0,1050	-0,1393
j=7	1	1,5	645,9210	0,36	0,3488	0,2099	-0,2786
j=8	1	1,5	645,9210	0,36	0,3488	0,2099	-0,2786
j=9	1	1,5	645,9210	0,27	0,2616	0,1574	-0,2089
j=10	1	1,5	645,9210	0,09	0,0872	0,0525	-0,0696

Tabla 37. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 3 de altura de referencia en la posición inclinada 37º.

- TRAMO 4:

NUDO	$C_s C_d$	C_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)	$F_{w(j)}$ (KN) en X	$F_{w(j)}$ (KN) en Z
j=1	1	1,5	647,8188	0,18	0,1749	0,1053	-0,1397
j=2	1	1,5	647,8188	0,36	0,3498	0,2105	-0,2794
j=3	1	1,5	647,8188	0,36	0,3498	0,2105	-0,2794
j=4	1	1,5	647,8188	0,36	0,3498	0,2105	-0,2794
j=5	1	1,5	647,8188	0,18	0,1749	0,1053	-0,1397
j=6	1	1,5	647,8188	0,18	0,1749	0,1053	-0,1397
j=7	1	1,5	647,8188	0,36	0,3498	0,2105	-0,2794
j=8	1	1,5	647,8188	0,36	0,3498	0,2105	-0,2794
j=9	1	1,5	647,8188	0,36	0,3498	0,2105	-0,2794
j=10	1	1,5	647,8188	0,18	0,1749	0,1053	-0,1397

Tabla 38. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 4 de altura de referencia en la posición inclinada 37º.

- TRAMO 5:

NUDO	$C_s C_d$	C_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)	$F_{w(j)}$ (KN) en X	$F_{w(j)}$ (KN) en Z
j=1	1	1,5	649,8999	0,18	0,1755	0,1056	-0,1401
j=2	1	1,5	649,8999	0,36	0,3510	0,2112	-0,2803
j=3	1	1,5	649,8999	0,36	0,3510	0,2112	-0,2803
j=4	1	1,5	649,8999	0,36	0,3510	0,2112	-0,2803
j=5	1	1,5	649,8999	0,18	0,1755	0,1056	-0,1401
j=6	1	1,5	649,8999	0,18	0,1755	0,1056	-0,1401
j=7	1	1,5	649,8999	0,36	0,3510	0,2112	-0,2803
j=8	1	1,5	649,8999	0,36	0,3510	0,2112	-0,2803
j=9	1	1,5	649,8999	0,36	0,3510	0,2112	-0,2803
j=10	1	1,5	649,8999	0,18	0,1755	0,1056	-0,1401

Tabla 39. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 5 de altura de referencia en la posición inclinada 37º.

- TRAMO 6:

NUDO	$C_s C_d$	C_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)	$F_{w(j)}$ (KN) en X	$F_{w(j)}$ (KN) en Z
j=1	1	1,5	652,1652	0,18	0,1761	0,1060	-0,1406
j=2	1	1,5	652,1652	0,36	0,3522	0,2119	-0,2813
j=3	1	1,5	652,1652	0,36	0,3522	0,2119	-0,2813
j=4	1	1,5	652,1652	0,36	0,3522	0,2119	-0,2813
j=5	1	1,5	652,1652	0,18	0,1761	0,1060	-0,1406
j=6	1	1,5	652,1652	0,18	0,1761	0,1060	-0,1406
j=7	1	1,5	652,1652	0,36	0,3522	0,2119	-0,2813
j=8	1	1,5	652,1652	0,36	0,3522	0,2119	-0,2813
j=9	1	1,5	652,1652	0,36	0,3522	0,2119	-0,2813
j=10	1	1,5	652,1652	0,18	0,1761	0,1060	-0,1406

Tabla 40. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 6 de altura de referencia en la posición inclinada 37º.

- TRAMO 7:

NUDO	$C_s C_d$	C_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)	$F_{w(j)}$ (KN) en X	$F_{w(j)}$ (KN) en Z
j=1	1	1,5	654,6145	0,18	0,1767	0,1064	-0,1412
j=2	1	1,5	654,6145	0,36	0,3535	0,2127	-0,2823
j=3	1	1,5	654,6145	0,36	0,3535	0,2127	-0,2823
j=4	1	1,5	654,6145	0,36	0,3535	0,2127	-0,2823
j=5	1	1,5	654,6145	0,27	0,2651	0,1596	-0,2117
j=6	1	1,5	654,6145	0,18	0,1767	0,1064	-0,1412
j=7	1	1,5	654,6145	0,27	0,2651	0,1596	-0,2117
j=8	1	1,5	654,6145	0,36	0,3535	0,2127	-0,2823
j=9	1	1,5	654,6145	0,36	0,3535	0,2127	-0,2823
j=10	1	1,5	654,6145	0,36	0,3535	0,2127	-0,2823
j=11	1	1,5	654,6145	0,18	0,1767	0,1064	-0,1412

Tabla 41. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 7 de altura de referencia en la posición inclinada 37º.

- TRAMO 8:

NUDO	$c_s c_d$	c_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)	$F_{w(j)}$ (KN) en X	$F_{w(j)}$ (KN) en Z
j=1	1	1,5	692,8204	0,18	0,1871	0,1126	-0,1494
j=2	1	1,5	692,8204	0,36	0,3741	0,2252	-0,2988
j=3	1	1,5	692,8204	0,36	0,3741	0,2252	-0,2988
j=4	1	1,5	692,8204	0,36	0,3741	0,2252	-0,2988
j=5	1	1,5	692,8204	0,36	0,3741	0,2252	-0,2988
j=6	1	1,5	692,8204	0,36	0,3741	0,2252	-0,2988
j=7	1	1,5	692,8204	0,36	0,3741	0,2252	-0,2988
j=8	1	1,5	692,8204	0,36	0,3741	0,2252	-0,2988
j=9	1	1,5	692,8204	0,36	0,3741	0,2252	-0,2988
j=10	1	1,5	692,8204	0,36	0,3741	0,2252	-0,2988
j=11	1	1,5	692,8204	0,18	0,1871	0,1126	-0,1494

Tabla 42. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 8 de altura de referencia en la posición inclinada 37º.

- TRAMO 9:

NUDO	$c_s c_d$	c_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)	$F_{w(j)}$ (KN) en X	$F_{w(j)}$ (KN) en Z
j=1	1	1,5	737,8766	0,09	0,0996	0,0599	-0,0796
j=2	1	1,5	737,8766	0,27	0,2988	0,1798	-0,2387
j=3	1	1,5	737,8766	0,36	0,3985	0,2398	-0,3182
j=4	1	1,5	737,8766	0,36	0,3985	0,2398	-0,3182
j=5	1	1,5	737,8766	0,36	0,3985	0,2398	-0,3182
j=6	1	1,5	737,8766	0,36	0,3985	0,2398	-0,3182
j=7	1	1,5	737,8766	0,36	0,3985	0,2398	-0,3182
j=8	1	1,5	737,8766	0,36	0,3985	0,2398	-0,3182
j=9	1	1,5	737,8766	0,36	0,3985	0,23987	-0,3182
j=10	1	1,5	737,8766	0,27	0,2988	0,1798	-0,2387
j=11	1	1,5	737,8766	0,09	0,0996	0,0599	-0,0796

Tabla 43. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 9 de altura de referencia en la posición inclinada 37º.

- TRAMO 10:

NUDO	$C_s C_d$	C_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)	$F_{w(j)}$ (KN) en X	$F_{w(j)}$ (KN) en Z
j=1	1	1,5	772,6373	0,09	0,1043	0,0628	-0,0833
j=2	1	1,5	772,6373	0,27	0,3129	0,1883	-0,2499
j=3	1	1,5	772,6373	0,36	0,4172	0,2511	-0,3332
j=4	1	1,5	772,6373	0,36	0,4172	0,2511	-0,3332
j=5	1	1,5	772,6373	0,36	0,4172	0,2511	-0,3332
j=6	1	1,5	772,6373	0,36	0,4172	0,2511	-0,3332
j=7	1	1,5	772,6373	0,36	0,4172	0,2511	-0,3332
j=8	1	1,5	772,6373	0,27	0,3129	0,1883	-0,2499
j=9	1	1,5	772,6373	0,09	0,1043	0,0628	-0,0833

Tabla 44. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 10 de altura de referencia en la posición inclinada 37º.

- TRAMO 11:

NUDO	$C_s C_d$	C_f	$q_p(z_e)$	A_{ref}	$F_{w(j)}$ (KN)	$F_{w(j)}$ (KN) en X	$F_{w(j)}$ (KN) en Z
j=1	1	1,5	813,2870	0,09	0,1098	0,0661	-0,0877
j=2	1	1,5	813,2870	0,18	0,2196	0,1322	-0,1754
j=3	1	1,5	813,2870	0,18	0,2196	0,1322	-0,1754
j=4	1	1,5	813,2870	0,18	0,2196	0,1322	-0,1754
j=5	1	1,5	813,2870	0,18	0,2196	0,1322	-0,1754
j=6	1	1,5	813,2870	0,18	0,2196	0,1322	-0,1754
j=7	1	1,5	813,2870	0,09	0,1098	0,0661	-0,0877

Tabla 45. Valores de $F_{w(j)}$ para el tramo 11 de altura de referencia en la posición inclinada 37º.

2.4. Combinaciones

En el siguiente apartado, se realizan las distintas combinaciones de carga de acuerdo con el CTE. Para cada uno de los criterios se pueden observar distintas combinaciones según la posición en la que se encuentre el sistema.

Por una parte, para los Estados Límite Últimos, las distintas combinaciones de acciones de las que dispone el sistema para determinar el valor de los efectos de las acciones correspondientes a una situación persistente se obtienen a partir de la fórmula siguiente:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,j} \cdot G_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (15)$$

donde los distintos parámetros se corresponden a:

$\gamma_G \cdot G_k$: todas las acciones permanentes.

$\gamma_Q \cdot G_k$: acción variable cualquiera.

$\gamma_Q \cdot \Psi_0 \cdot Q_k$: resto de las acciones variables.

Por otra parte, para los Estados Límite de Servicio, las combinaciones de acciones, denominadas del tipo característica, para situaciones en donde los efectos provocados por las acciones de corta duración que pueden ser irreversibles (ELS Integridad), parten de la expresión:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + G_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (16)$$

cuyos términos hacen referencia a:

G_k : todas las acciones permanentes.

G_k : acción variable cualquiera.

$\Psi_0 \cdot Q_k$: resto de las acciones variables.

En el presente proyecto los E.L.S. de Integridad no se van a tener en cuenta debido a que el disco parabólico no es un sistema que se asemeje a un edificio/vivienda, así como tampoco presenta ningún componente que se puede asemejar a un tabique que llegue hasta el suelo. Por lo que estas combinaciones no se van a tener en cuenta debido a que no tiene ningún sentido aplicarlas en el sistema de estudio.

Por último, para los Estados Límite de Servicio, las combinaciones de acciones, denominadas del tipo casi permanente, para situaciones de larga duración (ELS Apariencia), se determinan a partir de la expresión:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (17)$$

donde cada parámetro se refiera a:

G_k : todas las acciones permanentes.

$\Psi_2 \cdot Q_k$: todas las acciones variables.

Los distintos coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones y los distintos coeficientes de simultaneidad (Ψ) se determinan a partir de las tablas 4.1 y 4.2 del "Documento Básico SE Seguridad Estructural":

Tabla 4.1 Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones

Tipo de verificación ⁽¹⁾	Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
		desfavorable	favorable
Resistencia	Permanente	1,35	0,80
	Peso propio, peso del terreno		
	Empuje del terreno		
	Presión del agua		
	Variable	1,50	0

Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad (ψ)

	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Sobrecarga superficial de uso (Categorías según DB-SE-AE)			
• Zonas residenciales (Categoría A)	0,7	0,5	0,3
• Zonas administrativas (Categoría B)	0,7	0,5	0,3
• Zonas destinadas al público (Categoría C)	0,7	0,7	0,6
• Zonas comerciales (Categoría D)	0,7	0,7	0,6
• Zonas de tráfico y de aparcamiento de vehículos ligeros con un peso total inferior a 30 kN (Categoría E)	0,7	0,7	0,6
• Cubiertas transitables (Categoría F)		⁽¹⁾	
• Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (Categoría G)	0	0	0
Nieve			
• para altitudes > 1000 m	0,7	0,5	0,2
• para altitudes ≤ 1000 m	0,5	0,2	0
Viento	0,6	0,5	0
Temperatura	0,6	0,5	0
Acciones variables del terreno	0,7	0,7	0,7

Tabla 46. Coeficientes parciales de seguridad para las acciones.

Una vez explicada la forma de obtener las distintas combinaciones, se procede a realizar las tablas correspondientes a las combinaciones según la posición en la que se encuentra el sistema disco parabólico:

- Posición horizontal:

	Criterio de comprobación	Combinación	Nomenclatura en cálculos
ELU	Resistencia y Pandeo	1,35G	ELU1h
		1,35G + 1,5Q	ELU2h
		1,35G + 1,5V	ELU3h
		1,35G + 1,5N	ELU4h
		1,35G + 1,5Q + 1,5·0,6V	ELU5h
		1,35G + 1,5Q + 1,5·0,5N	ELU6h
		1,35G + 1,5V + 1,5·0,5N	ELU7h
		1,35G + 1,5N + 1,5·0,6V	ELU8h
		1,35G + 1,5Q + 1,5·0,6V + 1,5·0,5N	ELU9h
ELS	Apariencia	G	ELS1Apah

Tabla 47. Combinaciones realizadas para la posición horizontal.

- Posición vertical e inclinada 37º

	Criterio de comprobación	Combinación	Nomenclatura en cálculos
ELU	Resistencia y Pandeo	1,35G	ELU1v
		1,35G + 1,5V	ELU2v
ELS	Apariencia	G	ELS1ApaV

Tabla 48. Combinaciones realizadas para la posición vertical e inclinada 37º.

donde G hace referencia al peso propio de la estructura, U a las sobrecargas de uso, V a la acción del viento sobre la estructura y N a la acción de la nieve sobre la estructura.

Una vez aplicadas todas las cargas sobre la estructura y definidas las combinaciones en el software de cálculo (SAP2000), se realiza el cálculo estructural para la obtención de las reacciones en los apoyos, los movimientos en los nudos y los diagramas de los esfuerzos.

2.5. Comprobaciones

En el siguiente apartado se procede a explicar las distintas comprobaciones realizadas para garantizar la seguridad estructural del sistema disco parabólico. La realización de estas comprobaciones va a tener lugar, en cada una de las posiciones de estudio de la estructura, siguiendo las recomendaciones recogidas en el Código Técnico de la Edificación.

Dentro de este apartado, se diferenciarán por un lado, los Estados Límite Últimos de Resistencia y, por otro lado, los Estados Límite Últimos de Pandeo.

El CTE define los estados límite como: “Aquellas situaciones para las que, de ser alcanzadas, puede considerarse que el edificio no cumple alguno de los requisitos estructurales para los que ha sido concebido.”

2.5.1. Estados Límite Últimos (ELU)

Los Estado Límite Último se definen como: “El estado asociado al colapso o a otra forma similar de fallo estructural.”

Además, en el Código Técnico de Edificación también se los define como: “Aquellos estados que, de ser superados, constituyen un riesgo para las personas, ya sea porque producen una puesta fuera de servicio del edificio o el colapso total o parcial del mismo.”

Se deben considerar los ELU producidos por:

- a) Pérdida del equilibrio del edificio, o de una parte estructuralmente independiente, considerado como un cuerpo rígido.
- b) Fallo por deformación excesiva, transformación de la estructura o de parte de ella en un mecanismo, rotura de sus elementos estructurales o de sus uniones, o inestabilidad de elementos estructurales.

Las comprobaciones del Estado Límite Último de Resistencia están basadas en distribuciones elásticas de tensiones, por lo tanto, de acuerdo con la tabla adjunta del Código Técnico de la Edificación, se tiene una sección de Clase 3.

Clase 1: Plástica	Permiten la formación de la rótula plástica con la capacidad de rotación suficiente para la redistribución de momentos.
Clase 2: Compacta	Permiten el desarrollo del momento plástico con una capacidad de rotación limitada.
Clase 3: Semicompacta o Elástica	En la fibra más comprimida se puede alcanzar el límite elástico del acero pero la abolladura impide el desarrollo del momento plástico
Clase 4: Esbelta	Los elementos total o parcialmente comprimidos de las secciones esbeltas se abollan antes de alcanzar el límite elástico en la fibra más comprimida.

Tabla 49. Clasificación de secciones transversales solicitadas por momentos flectores (Fuente: CTE, tabla 5.1, pág. 17)

En lo que concierne al acero S275JR, material utilizado en la estructura de estudio, se sabe que el valor de la resistencia de cálculo para los dos ELU estudiados es:

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{275}{1,05} = 261,9 \frac{N}{mm^2} \quad (18)$$

donde los distintos términos se corresponden a:

f_y : límite elástico del acero.

γ_{M1} : coeficiente parcial de seguridad aplicado a los Estados Límite Últimos.

2.5.1.1. Estado Límite Último de Resistencia

A continuación, se procede a estudiar la resistencia de la estructura frente a las acciones que actúan sobre ella. Para proseguir con este análisis se han diferenciado cinco familias de barras: Capa Superior, Diagonales, Capa Inferior, Estructura Soporte Motor y Pilar Base.

En primer lugar, se obtienen, mediante la utilización del software de cálculo (SAP2000), las fuerzas a las cuales están sometidos todos los elementos de la estructura (axiles, cortantes y momentos). El software proporciona estos resultados para diferentes secciones dentro de la misma barra.

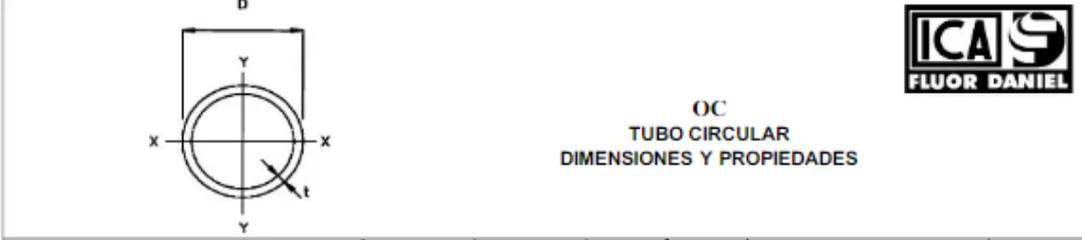
Para los diferentes elementos de la estructura se han empleado perfiles huecos circulares. Estos perfiles han sido seleccionados mediante un estudio de dimensionado de las barras en las distintas posiciones del sistema disco parabólico. En la siguiente tabla se observan los perfiles necesarios para cada posición:

	Posición vertical	Posición inclinada	Posición horizontal
Capa superior	Ø33,7x3	Ø33,7x4	Ø33,7x4
Capa inferior	Ø33,7x4	Ø33,7x4	Ø33,7x4
Diagonales	Ø33,7x3	Ø33,7x3	Ø33,7x3
Estructura soporte motor	Ø33,7x7,1	Ø33,7x3	Ø33,7x4,5
Pilar base	Ø273x21,44	Ø219x22,23	Ø155.6

Tabla 50. Perfiles de las barras según la posición de la estructura.

Observando la tabla anterior, los perfiles utilizados para el sistema van a ser los de la posición que necesita el perfil de mayor diámetro y espesor, esto se aplicará en cada una de las distintas familias de barras.

En cuanto a las características de los distintos perfiles empleados en la estructura del disco parabólico, quedan recogidas y señaladas en las siguientes figuras y tablas:



OC
TUBO CIRCULAR
DIMENSIONES Y PROPIEDADES

Designación D x t		Diametro nominal	Diametro interior	Peso	Area	Ejes X-X y Y-Y			Denominación
mm x mm	in. x in.	in.	mm	kg/m	cm ²	I	S	r	
273 x 3.35	10.75 x 0.250	10	260.4	41.77	53.21	4735.77	346.82	9.43	20
x 7.8	x 0.307		257.5	51.03	65.01	5724.55	419.23	9.38	30
x 9.27	x 0.365		254.56	60.31	76.83	6693.37	490.18	9.33	40 E
x 12.7	x 0.500		247.7	81.56	103.89	8827.05	646.43	9.22	60
x 15.09	x 0.594		242.92	96.02	122.31	10212.70	747.91	9.14	80 XE
x 18.28	x 0.719		236.58	114.76	146.19	11928.50	873.56	9.03	100
x 21.44	x 0.844		230.22	133.06	169.51	13516.60	989.86	8.93	120

Ø ext.	Espesor en mm.																			
mm.	3	4	4.5	5.0	5.6	6-6.8	7.1	8.0	8.8	10.0	11.0	12-12.5	14.2	16.0	17.5	20.0	22.2	25.0	28.0	
33.7																				
38.0-42.4																				
44.5																				
48.3																				
51.0																				

Fig. 25 Perfiles utilizados.

Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Área (cm ²)	W (cm ³)	I (cm ⁴)
33,7	3	1,5174	1,1697	1,9709
33,7	4	1,9918	1,4907	2,5120
33,7	7,1	3,3630	2,2990	3,8737

Tabla 51. Perfiles utilizados.

En segundo lugar, se calcula el momento resultante en cada sección circular de todas las barras que conforman la estructura mediante la ecuación siguiente:

$$M_R = \sqrt{M_y^2 + M_z^2} \quad (19)$$

Una vez se dispone del momento resultante, se procede a la obtención de la tensión normal en cada sección mediante la siguiente ecuación:

$$|\sigma_x| = \left| \frac{N}{A} \right| + \left| \frac{M_R}{w} \right| \quad (20)$$

A continuación, se calculan las diferentes tensiones tangentes. Concretamente, se obtienen las tensiones tangentes debidas al cortante en y, al cortante en z y al momento torsor. Estas tensiones se determinan mediante las siguientes fórmulas:

$$|\tau_{xy}| = \left| \frac{V_y}{A} \right| \quad (21)$$

$$|\tau_{xz}| = \left| \frac{V_z}{A} \right| \quad (22)$$

$$|\tau_{x\theta}| = \left| \frac{M_T}{I_p} \cdot R \right| \quad (23)$$

Una vez determinados todos los parámetros anteriores, ya es posible realizar el cálculo de la tensión equivalente de Von Mises (σ_{eq}) mediante la fórmula:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 \cdot (\tau_{x\theta} + \tau_{xy} + \tau_{xz})^2} \quad (24)$$

Finalmente, con la obtención de la tensión equivalente de Von Mises se procede a comprobar los ELU de Resistencia de las distintas secciones.

En primer lugar, se localiza para que elemento, en que sección y para cual de las combinaciones se produce la máxima tensión equivalente de Von Mises.

Y en segundo lugar, se comprueba que los ELU de Resistencia de las secciones cumple:

$$\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_e} \leq 1 \quad (25)$$

donde

$\sigma_e = f_{yd}$: valor de la tensión de la resistencia de cálculo del acero utilizado en la construcción de la estructura.

A continuación, siguiendo el procedimiento explicado en este punto, se muestra el cálculo del elemento más desfavorable de cada familia en cada una de las posiciones de estudio del sistema disco parabólico:

POSICIÓN HORIZONTAL							
FAMILIA ESTUDIADA	Frame	M_R	Tensión normal (σ_x)	Tensión tg cortante (τ_{xy})	Tensión tg cortante (τ_{xz})	Tensión tg torsor ($\tau_{x\theta}$)	Von Mises (σ_{eq})
Capa Superior	47	0	2369,5812	0	0	1,1586	2369,5821
Diagonales	205	0	1776,0717	0	0	4,6965	1776,0903
Capa Inferior	1481	0	2600,8907	0	0	1,5287	2600,8920
Estructura Soporte Motor	186	0	1520,1018	0	0	315,2286	1615,1831
Pilar Base	180	22,9110	262,7485	4,4770E-12	9,2140E-12	1,3369E-10	262,7485

Tabla 52. Cálculo de la tensión equivalente de Von Mises en la posición horizontal.

POSICIÓN VERTICAL							
FAMILIA ESTUDIADA	Frame	M_R	Tensión normal (σ_x)	Tensión tg cortante (τ_{xy})	Tensión tg cortante (τ_{xz})	Tensión tg torsor ($\tau_{x\theta}$)	Von Mises (σ_{eq})
Capa Superior	1	0	1991,6369	0	0	0,4938	1991,6371
Diagonales	1263	0	1345,4905	0	0	0,2118	1345,4905
Capa Inferior	1733	0	2181,8298	0	0	0,4381	2181,8300
Estructura Soporte Motor	17	0	2321,6089	0	0	268,8032	2367,8331
Pilar Base	82	244,8740	2477,8244	25,8437	6,0680E-12	1,9214E-10	2478,2287

Tabla 53. Cálculo de la tensión equivalente de Von Mises en la posición vertical.

POSICIÓN INCLINADA							
FAMILIA ESTUDIADA	Frame	M_R	Tensión normal (σ_x)	Tensión tg cortante (τ_{xy})	Tensión tg cortante (τ_{xz})	Tensión tg torsor ($\tau_{x\theta}$)	Von Mises (σ_{eq})
Capa Superior	225	0	2023,3622	0	0	0,4666	2023,3624
Diagonales	1	0	1449,1959	0	0	1,8914	1449,1996
Capa Inferior	1607	0	2191,4559	0	0	0,6156	2191,4561
Estructura Soporte Motor	2367	0	893,9382	0	0	41,6138	896,8392
Pilar Base	57	147,6860	1516,2295	15,3132	0,0296	0,3613	1516,4734

Tabla 54. Cálculo de la tensión equivalente de Von Mises en la posición inclinada 37°.

POSICIÓN HORIZONTAL					
FAMILIA ESTUDIADA	MAX σ_{eq}	σ_{eq}/f_{yd}	BARRA	Sección	COMBINACIÓN
Capa Superior	2369,5820	0,9050	47	0	ELU6h
Diagonales	1776,0900	0,6780	205	0	ELU6h
Capa Inferior	2600,8920	0,9930	1481	0	ELU6h
Estructura Soporte Motor	1615,1830	0,6170	186	0	ELU6h
Pilar Base	262,7480	0,1000	180	0	ELU6h

Tabla 55. Localización del máximo valor de tensión equivalente de Von Mises σ_{eq} y por consiguiente del elemento más desfavorable en la posición horizontal.

POSICIÓN VERTICAL					
FAMILIA ESTUDIADA	MAX σ_{eq}	σ_{eq}/f_{yd}	BARRA	Sección	COMBINACIÓN
Capa Superior	1991,6370	0,7600	1	0	ELU2v
Diagonales	1345,4910	0,5140	1263	0	ELU2v
Capa Inferior	2181,8300	0,8330	1733	0	ELU2v
Estructura Soporte Motor	2367,8330	0,9040	17	0	ELU1v
Pilar Base	2478,2290	0,9460	82	5,225	ELU2v

Tabla 56. Localización del máximo valor de tensión equivalente de Von Mises σ_{eq} y por consiguiente del elemento más desfavorable en la posición vertical.

POSICIÓN INCLINADA					
FAMILIA ESTUDIADA	MAX σ_{eq}	σ_{eq}/f_{yd}	BARRA	Sección	COMBINACIÓN
Capa Superior	2023,3620	0,7730	225	0	ELU2v
Diagonales	1449,2000	0,5530	1	0	ELU2v
Capa Inferior	2191,4560	0,8370	1607	0	ELU2v
Estructura Soporte Motor	896,8360	0,3420	2367	0	ELU2v
Pilar Base	1516,4730	0,5790	57	5,225	ELU2v

Tabla 57. Localización del máximo valor de tensión equivalente de Von Mises σ_{eq} y por consiguiente del elemento más desfavorable en la posición inclinada 37°.

POSICIÓN HORIZONTAL									
FAMILIA ESTUDIADA	Frame	Output Case	P	V2	V3	T	M2	M3	Sección
Capa Superior	47	ELU6h	47,1966	0	0	0,0009	0	0	0
Diagonales	205	ELU6h	-26,9501	0	0	-0,0035	0	0	0
Capa Inferior	1481	ELU6h	-51,8038	0	0	0,0011	0	0	0
Estructura Soporte Motor	186	ELU6h	-51,1210	0	0	0,2369	0	0	0
Pilar Base	180	ELU6h	-53,0450	7,589E-12	-1,562E-11	5,341E-11	7,397E-11	22,9108	0

Tabla 58. Valores obtenidos de SAP2000 para cada barra para la posición horizontal.

POSICIÓN VERTICAL									
FAMILIA ESTUDIADA	Frame	Output Case	P	V2	V3	T	M2	M3	Sección
Capa Superior	1	ELU2v	39,6688	0	0	0,0004	0	0	0
Diagonales	1263	ELU2v	20,4165	0	0	0,0002	0	0	0
Capa Inferior	1733	ELU2v	-43,4570	0	0	0,0003	0	0	0
Estructura Soporte Motor	17	ELU1v	-78,0757	0	0	-0,2020	0	0	0
Pilar Base	82	ELU2v	-6,7723	-43,8076	1,029E-11	-7,676E-11	2,325E-06	244,8745	5,225

Tabla 59. Valores obtenidos de SAP2000 para cada barra para la posición vertical.

POSICIÓN INCLINADA									
FAMILIA ESTUDIADA	Frame	Output Case	P	V2	V3	T	M2	M3	Sección
Capa Superior	225	ELU2v	40,3007	0	0	0,0004	0	0	0
Diagonales	1	ELU2v	-21,9901	0	0	-0,0014	0	0	0
Capa Inferior	1607	ELU2v	-43,6488	0	0	0,0005	0	0	0
Estructura Soporte Motor	2367	ELU2v	30,0631	0	0	-0,0313	0	0	0
Pilar Base	57	ELU2v	-41,0851	-25,9574	0,0502	-0,1444	-0,2147	147,6862	5,225

Tabla 60. Valores obtenidos de SAP2000 para cada barra para la posición inclinada 37°.

En las tablas anteriores se observa que, según la posición de estudio del disco parabólico, la combinación de cálculo que presenta los elementos que se encuentran en la peor situación varía. En el caso de la posición horizontal, dicha combinación es la ELU6h (1,35G + 1,5Q + 1,5·0,5N), mientras que en el resto de posiciones es la ELU2v (1,35G+1,5V), excepto en la estructura soporte del motor de la posición vertical donde la combinación es la ELU1v (1,35G).

Cabe remarcar que se cumple el ELU de Resistencia porque en todas las posiciones y en todas las familias de barras se cumple que $\sigma_{eq}/f_{yd} \leq 1$.

2.5.1.2. Estado Límite Último de Pandeo.

En el siguiente apartado se procede a comprobar el ELU de Pandeo para las barras más desfavorables de cada una de las familias en cada una de las posiciones.

En las tablas siguientes se presentan dichas barras según la posición de estudio y la familia a la que pertenecen:

POSICIÓN HORIZONTAL		
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES
Capa Superior	47	0,000
Diagonales	205	0,000
Capa Inferior	1481	0,000
Estructura Soporte Motor	186	0,000
Pilar Base	180	0,000

Tabla 61. Barras de cada familia de la posición horizontal a comprobar su ELU de Pandeo.

POSICIÓN VERTICAL		
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES
Capa Superior	1	0,000
Diagonales	1263	0,000
Capa Inferior	1733	0,000
Estructura Soporte Motor	17	0,000
Pilar Base	82	5,225

Tabla 62. Barras de cada familia de la posición vertical a comprobar su ELU de Pandeo.

POSICIÓN INCLINADA		
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES
Capa Superior	225	0,000
Diagonales	1	0,000
Capa Inferior	1607	0,000
Estructura Soporte Motor	2367	0,000
Pilar Base	57	5,225

Tabla 63. Barras de cada familia de la posición inclinada 37º a comprobar su ELU de Pandeo.

Siguiendo las indicaciones del Código Técnico de la Edificación, concretamente el punto 6.3.4.2, se efectúa la comprobación para elementos comprimidos y flectados. Además, se deben tener en cuenta las especificaciones, recogidas en el CTE, necesarias para proceder con el cálculo de las distintas variables que intervienen en las comprobaciones.

En el caso del presente proyecto, se comprobarán dos tipos de barras. Por un lado, las propias del interior del concentrador solar, barras que únicamente trabajarán a esfuerzo axil. Y por otro lado, la barra del soporte vertical (Pilar Base) que trabajará a esfuerzo axil y a momento variable en su longitud.

Las comprobaciones que se deben realizar de acuerdo con el CTE son:

1) Para toda pieza:

$$\frac{N_{Ed}}{X_y \cdot A^* \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{C_{m,y} \cdot M_{y,Ed} + e_{N,y} \cdot N_{Ed}}{X_{LT} \cdot W_y \cdot f_{yd}} + \alpha_z \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed} + e_{N,z} \cdot N_{Ed}}{W_z \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad (26)$$

2) En piezas no susceptibles de pandeo por torsión:

$$\frac{N_{Ed}}{X_z \cdot A^* \cdot f_{yd}} + \alpha_y \cdot k_y \cdot \frac{C_{m,y} \cdot M_{y,Ed} + e_{N,y} \cdot N_{Ed}}{W_y \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed} + e_{N,z} \cdot N_{Ed}}{W_z \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad (27)$$

donde los distintos términos se corresponden a:

N_{Ed} , $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$: valores de la fuerza axial y los momentos de cálculo de mayor valor absoluto del elemento estudiado.

A^* , W_y , W_z , α_y , α_z , $e_{N,y}$, $e_{N,z}$: indicados en la Tabla 64.

X_y , X_z : coeficientes de pandeo en cada dirección.

X_{LT} : coeficiente de pandeo lateral, se tomará como 1 en piezas no susceptibles de pandeo (Punto 6.3.3 del CTE).

$e_{N,y}$, $e_{N,z}$: desplazamientos del centro de gravedad de la sección transversal efectiva con respecto a la posición del centro de gravedad de la sección transversal bruta.

k_{yLT} , k_y , k_z : coeficientes de interacción. (Tabla 6.9, CTE, pág. 50)

En el caso de estudio del presente proyecto, se trabaja con una sección de Clase 3, por tanto, los valores útiles para poder realizar la comprobación de pandeo son los que se encuentran definidos en la siguiente tabla:

Clase	A	W_y	W_z	α_y	α_z	$e_{N,y}$	$e_{N,z}$
1	A	$W_{pl,y}$	$W_{pl,z}$	0,6	0,6	0	0
2	A	$W_{pl,y}$	$W_{pl,z}$	0,6	0,6	0	0
3	A	$W_{el,y}$	$W_{el,z}$	0,8	1	0	0
4	A_{eff}	$W_{eff,y}$	$W_{eff,z}$	0,8	1	Según pieza y tensiones	Según pieza y tensiones

Tabla 64. Términos de comprobación de pandeo, según peor clase de sección en la pieza (Fuente: CTE, Tabla 6.8, pág. 49)

A continuación, se procede a explicar a partir de donde se determinarán los distintos términos necesarios para poder realizar las diferentes comprobaciones para elementos comprimidos y flectados.

En lo que concierne a la obtención de los distintos coeficientes de pandeo en cada dirección crítica (X_y, X_z), el CTE indica que se deben utilizar las siguientes fórmulas:

$$X_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} \text{ para } 0,2 \leq \bar{\lambda}_y \quad (28)$$

$$X_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} \text{ para } 0,2 \leq \bar{\lambda}_z \quad (29)$$

en caso contrario los coef. toman el valor 1

donde los términos ϕ_y, ϕ_z , se obtienen mediante:

$$\phi_y = 0.5 \cdot \left(1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2 \right) \quad (30)$$

$$\phi_z = 0.5 \cdot \left(1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2 \right) \quad (31)$$

siendo

α : coeficiente de imperfección elástica. Adopta los valores de la tabla 6.3 del CTE en función de la curva de pandeo y del tipo de sección (tabla 6.2 del CTE):

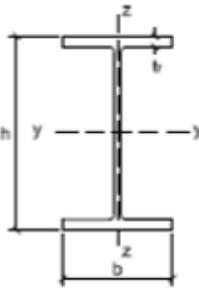
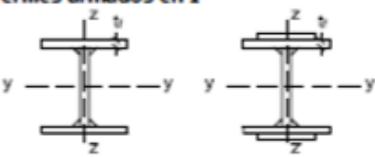
Tipo de sección	Tipo de acero	Eje de pandeo ⁽¹⁾			
		S235	S355	S450	
		y	z	y	z
Perfiles laminados en I 	h/b > 1,2 t ≤ 40 mm	a	b	a ₀	a ₀
	40 mm < t ≤ 100 mm	b	c	a	a
	h/b ≤ 1,2 t ≤ 100 mm	b	c	a	a
	t > 100 mm	d	d	c	c
Perfiles armados en I 	t ≤ 40 mm	b	c	b	c
	t > 40 mm	c	d	c	d
Agrupación de perfiles laminados soldados 		c	c	c	c
Tubos de chapa simples o agrupados 	laminados en caliente	a	a	a ₀	a ₀
	conformados en frío	c	c	c	c

Tabla 65. Curva de pandeo en función de la sección transversal (Fuente: CTE, Tabla 6.2, pág. 35)

Esbeltez reducida	Curva de pandeo				
	a ₀	a	b	c	d
Coefficiente (α) de imperfección	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Tabla 66. Valores de α dependiendo de la curva de pandeo (Fuente: CTE, tabla 6.3, pág. 37)

Respecto a las esbelteces reducidas para los distintos ejes ($\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z$), se procederá a su cálculo mediante la utilización de las fórmulas siguientes:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{\lambda_{lim}} \quad (32)$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{\lambda_z}{\lambda_{lim}} \quad (33)$$

donde los distintos parámetros se corresponden a:

λ_{lim} : esbeltez límite que para el acero S275JR. La cual se corresponde a:

$$\lambda_{lim} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{f_y}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 2100000}{2750}} = 86,8121 \quad (34)$$

λ_y, λ_z : esbelteces mecánicas para cada plano de pandeo. Obtenidas mediante:

$$\lambda_y = \frac{\beta_y \cdot L}{i_y} \quad (35)$$

$$\lambda_z = \frac{\beta_z \cdot L}{i_z} \quad (36)$$

siendo en este caso:

β_y, β_z : coeficientes que son dependientes de las condiciones de apoyo que tenga el elemento, es decir, de las restricciones de los extremos de la pieza estudiada en cada plano de pandeo.

L : longitud entre apoyos del elemento al que se le realiza la comprobación de pandeo.

i_y, i_z : radios de giro de la sección respecto a los ejes principales.

Por otro lado, los coeficientes de interacción (k_{yLT}, k_y, k_z) se determinarán mediante la siguiente tabla:

Clase	Tipo de sección	k_y	k_z	k_{yLT}
1 y 2	I, H, abiertas	$1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{C,Rd}}$	$1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$	el menor de $1 - \frac{0,1 \cdot \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$
	Hueca delgada		$1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$	$0,6 + \bar{\lambda}_z$
3 y 4	Todas	$1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_y \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{C,Rd}}$	$1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_z \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$	$1 - \frac{0,05 \cdot \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{C,Rd}}$

siendo
 $\bar{\lambda}_y$ y $\bar{\lambda}_z$ valores de las esbelteces reducidas para los ejes y - y y z - z, no mayores que 1,00.
 $N_{C,Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$

Tabla 67. Coeficientes de interacción según peor clase de sección en la pieza
(Fuente: CTE, tabla 6.9, pág. 50)

Por último, los términos de $C_{m,y}$, $C_{m,z}$, $C_{m,LT}$ se obtendrán a partir de la siguiente tabla sacada del CTE para las barras que presentan momento flector (Pilar Base), mientras que para el resto de barras el valor de $C_{m,y} = C_{m,z} = 0,9$, pág. 51:

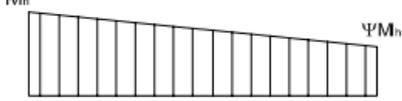
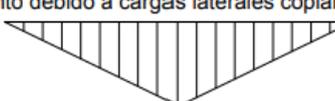
Factor de momento flector	Eje de flexión	Puntos arriostrados en dirección
$C_{m,y}$	y-y	z-z
$C_{m,z}$	z-z	y-y
$C_{m,LT}$	y-y	y-y
Diagrama de Flectores	Factor de momento uniforme equivalente $C_{m,y} = C_{m,i} (i=y)$ $C_{m,z} = C_{m,i} (i=z)$ $C_{m,LT} = C_{m,i} (i=LT)$	
Momentos de extremo $-1 \leq \psi \leq 1$ 	$C_{m,i} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi \geq 0,4$	
Momento debido a cargas laterales coplanarias 	$C_{m,i} = 0,9$	

Tabla 68. Coeficientes del momento equivalente.

Donde el valor de ψ , relación de las tensiones en los bordes del elemento, se obtiene mediante las indicaciones de la tabla 5.6 del CTE pág. 24, de las cuales se determina que:

$$\psi = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad (37)$$

	Relación de tensiones (ψ)			
	σ_1	σ_2	ψ	C_m
P. Vertical	-6,77231185	-6,77231185	1	1
P. Inclínada	-41,0851211	-41,0851211	1	1
P. Horizontal	-53,0449699	-53,0449699	1	1

Tabla 69. Relación de tensiones en los bordes del elemento.

Para empezar, se determinan los valores de la esbeltez y de la esbeltez reducida según el plano de pandeo en cada una de las posiciones del disco parabólico, estos valores se estudiarán a partir de cada una de las barras más desfavorables en las distintas familias. En el caso del sistema de estudio se utilizan perfiles tubulares con lo que el pandeo será igual en ambos ejes:

POSICIÓN HORIZONTAL				
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	Esbeltez	Esbeltez reducida
Capa Superior	47	0,000	49,4629	0,5698
Diagonales	205	0,000	74,5823	0,8591
Capa Inferior	1481	0,000	49,4629	0,5698
Estructura Soporte Motor	186	0,000	66,3405	0,7642
Pilar Base	180	0,000	20,6236	0,3528

Tabla 70. Valores de esbeltez y de esbeltez reducida para las barras más desfavorables de cada familia en la posición horizontal.

POSICIÓN VERTICAL				
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	Esbeltez	Esbeltez reducida
Capa Superior	1	0,000	49,4629	0,5698
Diagonales	1263	0,000	74,5823	0,8591
Capa Inferior	1733	0,000	49,4629	0,5698
Estructura Soporte Motor	17	0,000	66,3405	0,7642
Pilar Base	82	5,225	20,6236	0,3528

Tabla 71. Valores de esbeltez y de esbeltez reducida para las barras más desfavorables de cada familia en la posición vertical.

POSICIÓN INCLINADA				
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	Esbeltez	Esbeltez reducida
Capa Superior	225	0,000	49,4629	0,5698
Diagonales	1	0,000	74,5823	0,8591
Capa Inferior	1607	0,000	49,4629	0,5698
Estructura Soporte Motor	2367	0,000	66,3405	0,7642
Pilar Base	57	5,225	20,6236	0,3528

Tabla 72. Valores de esbeltez y de esbeltez reducida para las barras más desfavorables de cada familia en la posición inclinada 37°.

Una vez obtenidas las esbelteces reducidas se procede a realizar la primera comprobación parcial de pandeo. Esta comprobación consiste en que para barras solicitadas a compresión, el valor de la esbeltez reducida debe presentar un valor menor a 2. Observando las tablas anteriores (Tablas 70, 71 y 72), queda demostrado que la comprobación se cumple en todas las barras estudiadas de cada familia y en todas las posiciones del sistema disco parabólico.

Seguidamente se procede a calcular los coeficientes de pandeo (X_y , X_z):

POSICIÓN HORIZONTAL					
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	α	$\phi_y = \phi_z$	$X_y = X_z$
Capa Superior	47	0,000	0,21	0,7011	0,9011
Diagonales	205	0,000	0,21	0,9383	0,7602
Capa Inferior	1481	0,000	0,21	0,7011	0,9011
Estructura Soporte Motor	186	0,000	0,21	0,8512	0,8155
Pilar Base	180	0,000	0,21	0,5783	0,9648

Tabla 73. Valores del coeficiente de pandeo para las diferentes barras estudiadas en la posición horizontal.

POSICIÓN VERTICAL					
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	α	$\phi_y = \phi_z$	$X_y = X_z$
Capa Superior	1	0,000	0,21	0,7011	0,9011
Diagonales	1263	0,000	0,21	0,9383	0,7602
Capa Inferior	1733	0,000	0,21	0,7011	0,9011
Estructura Soporte Motor	17	0,000	0,21	0,8512	0,8155
Pilar Base	82	5,225	0,21	0,5783	0,9648

Tabla 74. Valores del coeficiente de pandeo para las diferentes barras estudiadas en la posición vertical.

POSICIÓN INCLINADA					
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	α	$\phi_y = \phi_z$	$X_y = X_z$
Capa Superior	225	0,000	0,21	0,7011	0,9011
Diagonales	1	0,000	0,21	0,9383	0,7602
Capa Inferior	1607	0,000	0,21	0,7011	0,9011
Estructura Soporte Motor	2367	0,000	0,21	0,8512	0,8155
Pilar Base	57	5,225	0,21	0,5783	0,9648

Tabla 75. Valores del coeficiente de pandeo para las diferentes barras estudiadas en la posición inclinada 37°.

Ahora que ya se han determinado los coeficientes de pandeo, para poder proseguir con la comprobación del ELU de Pandeo, se calculan los parámetros de $k_y, k_z, \alpha_y, \alpha_z, C_{m,y}$ y $C_{m,z}$, los cuales quedan recogidos en la siguiente tabla:

POSICIÓN HORIZONTAL						
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	α_y	α_z	$c_{m,y} = c_{m,z}$	$k_y = k_z$
Capa Superior	47	0,000	0,8	1	0,9	1,3432
Diagonales	205	0,000	0,8	1	0,9	1,4598
Capa Inferior	1481	0,000	0,8	1	0,9	1,3772
Estructura Soporte Motor	186	0,000	0,8	1	0,9	1,3263
Pilar Base	180	0,000	0,8	1	1	1,0026

Tabla 76. Valores de los factores de momento flector uniforme equivalente $c_{m,y}$ y $c_{m,z}$ de los coeficientes k_y , k_z y de α_y , α_z de la posición horizontal.

POSICIÓN VERTICAL						
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	α_y	α_z	$c_{m,y} = c_{m,z}$	$k_y = k_z$
Capa Superior	1	0,000	0,8	1	0,9	1,2885
Diagonales	1263	0,000	0,8	1	0,9	1,3483
Capa Inferior	1733	0,000	0,8	1	0,9	1,3161
Estructura Soporte Motor	17	0,000	0,8	1	0,9	1,4984
Pilar Base	82	5,225	0,8	1	1	1,0003

Tabla 77. Valores de los factores de momento flector uniforme equivalente $c_{m,y}$ y $c_{m,z}$ de los coeficientes k_y , k_z y de α_y , α_z de la posición vertical.

POSICIÓN INCLINADA						
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	α_y	α_z	$c_{m,y} = c_{m,z}$	$k_y = k_z$
Capa Superior	225	0,000	0,8	1	0,9	1,2931
Diagonales	1	0,000	0,8	1	0,9	1,3752
Capa Inferior	1607	0,000	0,8	1	0,9	1,3174
Estructura Soporte Motor	2367	0,000	0,8	1	0,9	1,1919
Pilar Base	57	5,225	0,8	1	1	1,0020

Tabla 78. Valores de los factores de momento flector uniforme equivalente $c_{m,y}$ y $c_{m,z}$ de los coeficientes k_y , k_z y de α_y , α_z de la posición inclinada 37°.

Finalmente, como ya se dispone de todos los parámetros necesarios, se realizan las comprobaciones del ELU de pandeo, las cuales quedan detalladas en la tabla siguiente:

POSICIÓN HORIZONTAL				
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	COMPROBACIÓN	CUMPLE / NO CUMPLE
Capa Superior	47	0,000	1,0041	NO CUMPLE
Diagonales	205	0,000	0,8920	CUMPLE
Capa Inferior	1481	0,000	1,1035	NO CUMPLE
Estructura Soporte Motor	186	0,000	0,7117	CUMPLE
Pilar Base	180	0,000	0,1010	CUMPLE

Tabla 79. Comprobaciones del ELU de Pandeo posición horizontal.

POSICIÓN VERTICAL				
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	COMPROBACIÓN	CUMPLE / NO CUMPLE
Capa Superior	1	0,000	0,8439	CUMPLE
Diagonales	1263	0,000	0,6758	CUMPLE
Capa Inferior	1733	0,000	0,9245	CUMPLE
Estructura Soporte Motor	17	0,000	1,0870	NO CUMPLE
Pilar Base	82	5,225	0,9465	CUMPLE

Tabla 80. Comprobaciones del ELU de Pandeo posición vertical.

POSICIÓN INCLINADA				
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	COMPROBACIÓN	CUMPLE / NO CUMPLE
Capa Superior	225	0,000	0,8574	CUMPLE
Diagonales	1	0,000	0,7278	CUMPLE
Capa Inferior	1607	0,000	0,9286	CUMPLE
Estructura Soporte Motor	2367	0,000	0,4185	CUMPLE
Pilar Base	57	5,225	0,5812	CUMPLE

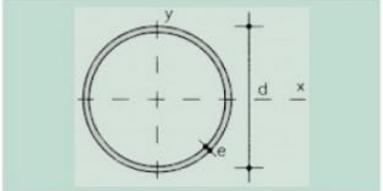
Tabla 81. Comprobaciones del ELU de Pandeo posición inclinada 37º.

Como se puede observar en las tablas anteriores, las familias de barras de la capa superior, capa inferior y de la estructura soporte del motor no cumplen el ELU de Pandeo con los perfiles seleccionados. Por tanto, se procede a aumentar dichos perfiles y a comprobar otra vez el ELU de Resistencia y el de Pandeo.

2.5.1.3. Aumento de perfiles

Atendiendo a los resultados obtenidos en las comprobaciones realizadas hasta este punto, se decide realizarle un aumento de los perfiles de las familias de barras: Capa superior, capa inferior y estructura soporte del motor. Este cambio es necesario para poder cumplir el ELU de Pandeo, por lo que estos perfiles pasarán de $\varnothing 33,7 \times 4$ a $\varnothing 40,2$, de $\varnothing 33,7 \times 4$ a $\varnothing 40,2$ y de $\varnothing 33,7 \times 7,1$ a $\varnothing 40,3$ respectivamente.

Donde dichos perfiles presentan las siguientes características:



u = Perímetro
 A = Área de la sección
 S = Momento estático de media sección, respecto a un eje baricéntrico
 I = Momento de inercia de la sección, respecto a un eje baricéntrico
 W = 2I : d. Módulo resistente de la sección, respecto a un eje baricéntrico
 i = $\sqrt{I:A}$. Radio de giro de la sección, respecto a un eje baricéntrico
 I_t = Módulo de torsión de la sección

Perfil	Dimensiones			Términos de sección						Peso
	d mm	e mm	u mm	A cm ²	S cm ³	I cm ⁴	W cm ³	i cm	I _t cm ⁴	p kp/m
∅ 40.2	40	2	126	2,39	1,44	4,33	2,16	1,35	8,66	1,88 P
∅ 40.3	40	3	126	3,49	2,05	6,01	3,00	1,31	12,00	2,74 P
∅ 40.4	40	4	126	4,52	2,60	7,42	3,71	1,28	14,80	3,55 C
∅ 45.2	45	2	141	2,70	1,85	6,26	2,78	1,52	12,50	2,12 P
∅ 45.3	45	3	141	3,96	2,65	8,77	3,90	1,49	17,50	3,11 P

Tabla 82. Perfiles utilizados tras aumento de los mismos para el cumplimiento del ELU de Pandeo.

A continuación, se vuelve a comprobar que se cumple ELU de Resistencia y el de Pandeo.

2.5.1.3.1 Segunda comprobación del Estado Límite Último de Resistencia

En primer lugar, volviendo a seguir las indicaciones del punto 2.5.1.1. del presente proyecto, se muestra el cálculo del elemento más desfavorable de cada familia en cada una de las posiciones de estudio del sistema disco parabólico:

POSICIÓN HORIZONTAL							
FAMILIA ESTUDIADA	Frame	M _R	Tensión normal (σ _x)	Tensión tg cortante (τ _{xy})	Tensión tg cortante (τ _{xz})	Tensión tg torsor (τ _{xθ})	Von Mises (σ _{eq})
Capa Superior	47	0	1974,7535	0	0	0,6929	1974,7538
Diagonales	205	0	1776,0717	0	0	4,6965	1776,0903
Capa Inferior	1481	0	2167,5213	0	0	0,9142	2167,5219
Estructura Soporte Motor	186	0	1464,7858	0	0	188,5104	1500,7351
Pilar Base	180	22,9110	262,7485	4,4769E-12	9,2138E-12	1,3369E-10	262,7485

Tabla 83. Cálculo de la tensión equivalente de Von Mises en la posición horizontal tras el aumento de perfiles.

POSICIÓN VERTICAL							
FAMILIA ESTUDIADA	Frame	M_R	Tensión normal (σ_x)	Tensión tg cortante (τ_{xy})	Tensión tg cortante (τ_{xz})	Tensión tg torsor ($\tau_{x\theta}$)	Von Mises (σ_{eq})
Capa Superior	1	0	1659,7835	0	0	0,2953	1659,7836
Diagonales	1263	0	1345,4905	0	0	0,2118	1345,4905
Capa Inferior	1733	0	1818,2859	0	0	0,2620	1818,2859
Estructura Soporte Motor	17	0	2237,1263	0	0	160,7474	2254,3854
Pilar Base	82	244,8740	2477,8244	25,8437	6,0677E-12	1,9214E-10	2478,2287

Tabla 84. Cálculo de la tensión equivalente de Von Mises en la posición vertical tras el aumento de perfiles.

POSICIÓN INCLINADA							
FAMILIA ESTUDIADA	Frame	M_R	Tensión normal (σ_x)	Tensión tg cortante (τ_{xy})	Tensión tg cortante (τ_{xz})	Tensión tg torsor ($\tau_{x\theta}$)	Von Mises (σ_{eq})
Capa Superior	225	0	1686,2227	0	0	0,2790	1686,2227
Diagonales	1	0	1449,1959	0	0	1,8914	1449,1996
Capa Inferior	1607	0	1826,3080	0	0	0,3682	1826,3081
Estructura Soporte Motor	2367	0	861,4080	0	0	24,8855	862,4858
Pilar Base	57	147,6860	1516,2295	15,3132	0,0296	0,3613	1516,4734

Tabla 85. Cálculo de la tensión equivalente de Von Mises en la posición inclinada 37º tras el aumento de perfiles.

POSICIÓN HORIZONTAL					
FAMILIA ESTUDIADA	MAX σ_{eq}	σ_{eq}/f_{yd}	BARRA	Sección	COMBINACIÓN
Capa Superior	1974,7540	0,754	47	0,000	ELU6h
Diagonales	1776,0900	0,678	205	0,000	ELU6h
Capa Inferior	2167,5220	0,828	1481	0,000	ELU6h
Estructura Soporte Motor	1500,7350	0,573	186	0,000	ELU6h
Pilar Base	262,7480	0,100	180	0,000	ELU6h

Tabla 86. Localización del máximo valor de tensión equivalente de Von Mises σ_{eq} y por consiguiente del elemento más desfavorable en la posición horizontal tras el aumento de perfiles.

POSICIÓN VERTICAL					
FAMILIA ESTUDIADA	MAX σ_{eq}	σ_{eq}/f_{yd}	BARRA	Sección	COMBINACIÓN
Capa Superior	1659,7840	0,634	1	0,000	ELU2v
Diagonales	1345,4910	0,514	1263	0,000	ELU2v
Capa Inferior	1818,2860	0,694	1733	0,000	ELU2v
Estructura Soporte Motor	2254,3850	0,861	17	0,000	ELU1v
Pilar Base	2478,2290	0,946	82	5,225	ELU2v

Tabla 87. Localización del máximo valor de tensión equivalente de Von Mises σ_{eq} y por consiguiente del elemento más desfavorable en la posición vertical tras el aumento de perfiles.

POSICIÓN INCLINADA					
FAMILIA ESTUDIADA	MAX σ_{eq}	σ_{eq}/f_{yd}	BARRA	Sección	COMBINACIÓN
Capa Superior	1686,2230	0,644	225	0,000	ELU2v
Diagonales	1449,2000	0,553	1	0,000	ELU2v
Capa Inferior	1826,3080	0,697	1607	0,000	ELU2v
Estructura Soporte Motor	862,4860	0,329	2367	0,000	ELU2v
Pilar Base	1516,4730	0,579	57	5,225	ELU2v

Tabla 88. Localización del máximo valor de tensión equivalente de Von Mises σ_{eq} y por consiguiente del elemento más desfavorable en la posición inclinada 37° tras el aumento de perfiles.

POSICIÓN HORIZONTAL									
FAMILIA ESTUDIADA	Frame	Output Case	P	V2	V3	T	M2	M3	Sección
Capa Superior	47	ELU6h	47,1966	0	0	0,0009	0	0	0
Diagonales	205	ELU6h	-26,9501	0	0	-0,0035	0	0	0
Capa Inferior	1481	ELU6h	-51,8038	0	0	0,0011	0	0	0
Estructura Soporte Motor	186	ELU6h	-51,1210	0	0	0,2369	0	0	0
Pilar Base	180	ELU6h	-53,0450	7,589E-12	-1,562E-11	5,341E-11	7,397E-11	22,9108	0

Tabla 89. Valores obtenidos de SAP2000 para cada barra para la posición horizontal tras el aumento de perfiles.

POSICIÓN VERTICAL									
FAMILIA ESTUDIADA	Frame	Output Case	P	V2	V3	T	M2	M3	Sección
Capa Superior	1	ELU2v	39,6688	0	0	0,0004	0	0	0
Diagonales	1263	ELU2v	20,4165	0	0	0,0002	0	0	0
Capa Inferior	1733	ELU2v	-43,4570	0	0	0,0003	0	0	0
Estructura Soporte Motor	17	ELU1v	-78,0757	0	0	-0,2020	0	0	0
Pilar Base	82	ELU2v	-6,7723	-43,8076	1,029E-11	-7,676E-11	2,325E-06	244,8745	5,225

Tabla 90. Valores obtenidos de SAP2000 para cada barra para la posición vertical tras el aumento de perfiles.

POSICIÓN INCLINADA									
FAMILIA ESTUDIADA	Frame	Output Case	P	V2	V3	T	M2	M3	Sección
Capa Superior	225	ELU2v	40,3007	0	0	0,0004	0	0	0
Diagonales	1	ELU2v	-21,9901	0	0	-0,0014	0	0	0
Capa Inferior	1607	ELU2v	-43,6488	0	0	0,0005	0	0	0
Estructura Soporte Motor	2367	ELU2v	30,0631	0	0	-0,0313	0	0	0
Pilar Base	57	ELU2v	-41,0851	-25,9574	0,0502	-0,1444	-0,2147	147,6862	5,225

Tabla 91. Valores obtenidos de SAP2000 para cada barra para la posición inclinada 37° tras el aumento de perfiles.

Como se puede observar, tras el aumento de perfiles se cumple el ELU de Resistencia porque en todas las posiciones y en todas las familias de barras se cumple que $\sigma_{eq}/f_{yd} \leq 1$.

2.5.1.3.2. Segunda comprobación del Estado Límite Último de Pandeo

Tal y como se ha explicado en el apartado 2.5.1.2 del presente proyecto, se obtienen todos los parámetros necesarios para realizar la comprobación del ELU de Pandeo tras el aumento de perfiles de las familias de barras de la capa inferior y de las diagonales.

En primer lugar, se obtiene los valores de la esbeltez y de la esbeltez reducida para las barras más desfavorables de cada familia:

POSICIÓN HORIZONTAL				
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	Esbeltez	Esbeltez reducida
Capa Superior	47	0,000	44,4444	0,5120
Diagonales	205	0,000	74,5823	0,8591
Capa Inferior	1481	0,000	44,4444	0,5120
Estructura Soporte Motor	186	0,000	54,3511	0,6261
Pilar Base	180	0,000	30,6236	0,3528

Tabla 92. Valores de esbeltez y de esbeltez reducida para las barras más desfavorables de cada familia en la posición horizontal tras el aumento de perfiles.

POSICIÓN VERTICAL				
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	Esbeltez	Esbeltez reducida
Capa Superior	1	0,000	44,4444	0,5120
Diagonales	1263	0,000	74,5823	0,8591
Capa Inferior	1733	0,000	44,4444	0,5120
Estructura Soporte Motor	17	0,000	54,3511	0,6261
Pilar Base	82	5,225	30,6236	0,3528

Tabla 93. Valores de esbeltez y de esbeltez reducida para las barras desfavorables de cada familia en la posición vertical tras el aumento de perfiles.

POSICIÓN INCLINADA				
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	Esbeltez	Esbeltez reducida
Capa Superior	225	0,000	44,4444	0,5120
Diagonales	1	0,000	74,5823	0,8591
Capa Inferior	1607	0,000	44,4444	0,5120
Estructura Soporte Motor	2367	0,000	54,3511	0,6261
Pilar Base	57	5,225	30,6236	0,3528

Tabla 94. Valores de esbeltez y de esbeltez reducida para las barras desfavorables de cada familia en la posición inclinada 37º tras el aumento de perfiles.

Una vez obtenidas las esbelteces reducidas se puede observar en las tablas anteriores que todas son menores que 1. Por tanto, se cumple la primera comprobación parcial de pandeo.

Seguidamente se procede a calcular los coeficientes de pandeo (X_y , X_z):

POSICIÓN HORIZONTAL					
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	α	$\phi_y = \phi_z$	$X_y = X_z$
Capa Superior	47	0,000	0,21	0,6638	0,9205
Diagonales	205	0,000	0,21	0,9383	0,7602
Capa Inferior	1481	0,000	0,21	0,6638	0,9205
Estructura Soporte Motor	186	0,000	0,21	0,7407	0,8798
Pilar Base	180	0,000	0,21	0,5783	0,9648

Tabla 95. Valores del coeficiente de pandeo para las diferentes barras estudiadas en la posición horizontal tras el aumento de perfiles.

POSICIÓN VERTICAL					
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	α	$\phi_y = \phi_z$	$X_y = X_z$
Capa Superior	1	0,000	0,21	0,6638	0,9205
Diagonales	1263	0,000	0,21	0,9383	0,7602
Capa Inferior	1733	0,000	0,21	0,6638	0,9205
Estructura Soporte Motor	17	0,000	0,21	0,7407	0,8798
Pilar Base	82	5,225	0,21	0,5783	0,9648

Tabla 96. Valores del coeficiente de pandeo para las diferentes barras estudiadas en la posición vertical tras el aumento de perfiles.

POSICIÓN INCLINADA					
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	α	$\phi_y = \phi_z$	$X_y = X_z$
Capa Superior	225	0,000	0,21	0,6638	0,9205
Diagonales	1	0,000	0,21	0,9383	0,7602
Capa Inferior	1607	0,000	0,21	0,6638	0,9205
Estructura Soporte Motor	2367	0,000	0,21	0,7407	0,8798
Pilar Base	57	5,225	0,21	0,5783	0,9648

Tabla 97. Valores del coeficiente de pandeo para las diferentes barras estudiadas en la posición inclinada 37º tras el aumento de perfiles.

A continuación se calculan los parámetros de $k_y, k_z, \alpha_y, \alpha_z, C_{m,y}$ y $C_{m,z}$, los cuales quedan recogidos en la siguiente tabla:

POSICIÓN HORIZONTAL						
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	α_y	α_z	$C_{m,y} = C_{m,z}$	$k_y = k_z$
Capa Superior	47	0,000	0,8	1	0,9	1,2516
Diagonales	205	0,000	0,8	1	0,9	1,4598
Capa Inferior	1481	0,000	0,8	1	0,9	1,2765
Estructura Soporte Motor	186	0,000	0,8	1	0,9	1,2388
Pilar Base	180	0,000	0,8	1	1	1,0026

Tabla 98. Valores de los factores de momento flector uniforme equivalente $C_{m,y}$ y $C_{m,z}$, de los coeficientes k_y, k_z y de α_y, α_z de la posición horizontal tras el aumento de perfiles.

POSICIÓN VERTICAL						
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	α_y	α_z	$C_{m,y} = C_{m,z}$	$k_y = k_z$
Capa Superior	1	0,000	0,8	1	0,9	1,2115
Diagonales	1263	0,000	0,8	1	0,9	1,3483
Capa Inferior	1733	0,000	0,8	1	0,9	1,2317
Estructura Soporte Motor	17	0,000	0,8	1	0,9	1,3647
Pilar Base	82	5,225	0,8	1	1	1,0003

Tabla 99. Valores de los factores de momento flector uniforme equivalente $C_{m,y}$ y $C_{m,z}$, de los coeficientes k_y, k_z y de α_y, α_z de la posición vertical tras el aumento de perfiles.

POSICIÓN INCLINADA						
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	α_y	α_z	$C_{m,y} = C_{m,z}$	$k_y = k_z$
Capa Superior	225	0,000	0,8	1	0,9	1,2148
Diagonales	1	0,000	0,8	1	0,9	1,3752
Capa Inferior	1607	0,000	0,8	1	0,9	1,2327
Estructura Soporte Motor	2367	0,000	0,8	1	0,9	1,1404
Pilar Base	57	5,225	0,8	1	1	1,0020

Tabla 100. Valores de los factores de momento flector uniforme equivalente $C_{m,y}$ y $C_{m,z}$, de los coeficientes k_y, k_z y de α_y, α_z de la posición inclinada 37° tras el aumento de perfiles.

Finalmente, como ya se dispone de todos los parámetros necesarios, se realizan las comprobaciones del ELU de pandeo, las cuales quedan detalladas en la tabla siguiente:

POSICIÓN HORIZONTAL				
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	COMPROBACIÓN	CUMPLE / NO CUMPLE
Capa Superior	47	0,000	0,8191	CUMPLE
Diagonales	205	0,000	0,8920	CUMPLE
Capa Inferior	1481	0,000	0,9002	CUMPLE
Estructura Soporte Motor	186	0,000	0,6357	CUMPLE
Pilar Base	180	0,000	0,1010	CUMPLE

Tabla 101. Comprobaciones del ELU de Pandeo posición horizontal tras el aumento de los perfiles.

POSICIÓN VERTICAL				
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	COMPROBACIÓN	CUMPLE / NO CUMPLE
Capa Superior	1	0,000	0,6885	CUMPLE
Diagonales	1263	0,000	0,6758	CUMPLE
Capa Inferior	1733	0,000	0,7542	CUMPLE
Estructura Soporte Motor	17	0,000	0,9708	CUMPLE
Pilar Base	82	5,225	0,9465	CUMPLE

Tabla 102. Comprobaciones del ELU de Pandeo posición vertical tras el aumento de los perfiles.

POSICIÓN INCLINADA				
FAMILIA ESTUDIADA	BARRAS	SECCIONES	COMPROBACIÓN	CUMPLE / NO CUMPLE
Capa Superior	225	0,000	0,6994	CUMPLE
Diagonales	1	0,000	0,7278	CUMPLE
Capa Inferior	1607	0,000	0,7575	CUMPLE
Estructura Soporte Motor	2367	0,000	0,3738	CUMPLE
Pilar Base	57	5,225	0,5812	CUMPLE

Tabla 103. Comprobaciones del ELU de Pandeo posición inclinada 37° tras el aumento de los perfiles.

Como se puede observar en las tablas anteriores, ahora todas las familias de barras cumplen el ELU de Pandeo con los perfiles seleccionados.

2.5.2. Estados Límite de Servicio

"Los estados límite de servicio son los que, de ser superados, afectan al confort y al bienestar de los usuarios o de terceras personas, al correcto funcionamiento del edificio o a la apariencia de la construcción.

Los ELS pueden ser reversibles e irreversibles. La reversibilidad se refiere a las consecuencias que excedan los límites especificados como admisibles, una vez desaparecidas las acciones que las han producido.

Como estados límite de servicio deben considerarse los relativos a:

- Deformaciones (flechas, asientos o desplomes) que afecten a la apariencia de la obra, al confort de los usuarios, o al funcionamiento de equipos e instalaciones.
- Vibraciones que causen una falta de confort de las personas, o que afecten a la funcionalidad de la obra.
- Daños o deterioro que pueden afectar desfavorablemente a la apariencia, a la durabilidad o a la funcionalidad de la obra."

2.5.2.1. Criterio de apariencia

De acuerdo con el CTE: "para la comprobación del Criterio de Apariencia se admite que la estructura tiene suficiente rigidez lateral si ante cualquier combinación de acciones casi permanente, el desplome relativo local es menor que 1/250."

En este apartado se ha realizado la comprobación del cumplimiento del criterio de apariencia directamente sobre los nudos más desfavorables de cada tramo de la estructura, los cuales, han sido obtenidos a partir del software de cálculo estructural SAP2000. En concreto, se ha tenido en cuenta el movimiento en el eje z (movimiento vertical de los nudos). Este parámetro es el desplazamiento relativo ($\delta_{rel,z}$).

El valor del desplazamiento relativo para cada una de las posiciones del sistema disco parabólico, en cada uno de sus nudos más desfavorables de cada familia de barras, resulta ser:

POSICIÓN HORIZONTAL					
FAMILIA ESTUDIADA	NUDO	OutputCase	$\delta_{rel,x}$	$\delta_{rel,y}$	$\delta_{rel,z}$
Capa superior	103	ELS1Apah	0,0012	1,31E-05	-0,0014
Diagonales	103	ELS1Apah	0,0012	1,31E-05	-0,0014
Capa inferior	380	ELS1Apah	0,0009	1,68E-05	-0,0001
Estructura soporte	694	ELS1Apah	0,0217	0,0004	-0,0108
Pilar	718	ELS1Apah	0,0010	-2,15E-09	-9,51E-06

Tabla 104. Valores de los desplazamientos relativos en los nudos más desfavorables de cada familia de barras en la posición horizontal.

POSICIÓN VERTICAL					
FAMILIA ESTUDIADA	NUDO	OutputCase	$\delta_{rel,x}$	$\delta_{rel,y}$	$\delta_{rel,z}$
Capa superior	309	ELS1ApaV	-0,0323	2,16E-05	-0,0043
Diagonales	309	ELS1ApaV	-0,0323	2,16E-05	-0,0043
Capa inferior	523	ELS1ApaV	-0,0303	1,12E-05	0,0010
Estructura soporte	805	ELS1ApaV	-0,0209	-0,0005	-0,0463
Pilar	826	ELS1ApaV	-0,0092	2,20E-08	-1,80E-05

Tabla 105. Valores de los desplazamientos relativos en los nudos más desfavorables de cada familia de barras en la posición vertical.

POSICIÓN INCLINADA					
FAMILIA ESTUDIADA	NUDO	OutputCase	$\delta_{rel,x}$	$\delta_{rel,y}$	$\delta_{rel,z}$
Capa superior	206	ELS1ApaV	-0,1056	0,0084	-0,0533
Diagonales	206	ELS1ApaV	-0,1056	0,0084	-0,0533
Capa inferior	447	ELS1ApaV	-0,0865	0,0065	0,0580
Estructura soporte	751	ELS1ApaV	-0,0965	0,0632	-0,0814
Pilar	772	ELS1ApaV	-0,0471	0,0034	-8,05E-05

Tabla 106. Valores de los desplazamientos relativos en los nudos más desfavorables de cada familia de barras en la posición inclinada.

Para realizar la comprobación del ELS de Deformación para el Criterio de apariencia se hace uso de la fórmula indicada en el CTE:

$$f_r = \frac{\delta_{rel,z}}{L_{barra}} \quad (38)$$

Los resultados obtenidos para dicha comprobación quedan detallados en las siguientes tablas:

POSICIÓN HORIZONTAL						
FAMILIA ESTUDIADA	NUDO	L_{barra}	δ_{rel}	OutputCase	f_r	COMPROBACIÓN
Capa superior	103	6,1592	0,0012	ELS1Apah	0,0002	CUMPLE
Diagonales	103	6,1592	0,0012	ELS1Apah	0,0002	CUMPLE
Capa inferior	380	5,3858	0,0009	ELS1Apah	0,0002	CUMPLE
Estructura soporte	694	10,5015	0,0217	ELS1Apah	0,0021	CUMPLE
Pilar	718	5,5000	0,0010	ELS1ApaVh	1,79E-04	CUMPLE

Tabla 107. Comprobación ELS de Deformación según el Criterio de Apariencia en la posición horizontal.

POSICIÓN VERTICAL						
FAMILIA ESTUDIADA	NUDO	L_{barra}	δ_{rel}	OutputCase	f_r	COMPROBACIÓN
Capa superior	309	8,7628	-0,0323	ELS1ApaV	0,0037	CUMPLE
Diagonales	309	8,7628	-0,0323	ELS1ApaV	0,0037	CUMPLE
Capa inferior	523	8,4628	-0,0303	ELS1ApaV	0,0036	CUMPLE
Estructura soporte	805	5,7628	-0,0209	ELS1ApaV	0,0036	CUMPLE
Pilar	826	5,5000	-0,0092	ELS1ApaV	1,68E-03	CUMPLE

Tabla 108. Comprobación ELS de Deformación según el Criterio de Apariencia en la posición vertical.

POSICIÓN INCLINADA						
FAMILIA ESTUDIADA	NUDO	L_{barra}	δ_{rel}	OutputCase	f_r	COMPROBACIÓN
Capa superior	206	7,9901	-0,1056	ELS1ApaV	0,0132	NO CUMPLE
Diagonales	206	7,9901	-0,1056	ELS1ApaV	0,0132	NO CUMPLE
Capa inferior	447	7,1919	-0,0865	ELS1ApaV	0,0120	NO CUMPLE
Estructura soporte	751	9,4130	-0,0965	ELS1ApaV	0,0102	NO CUMPLE
Pilar	772	5,5000	-0,0471	ELS1ApaV	8,56E-03	NO CUMPLE

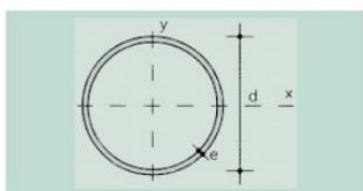
Tabla 109. Comprobación ELS de Deformación según el Criterio de Apariencia en la posición inclinada.

Como puede observarse en las tablas anteriores, los nudos más desfavorables de cada familia de barras no cumplen el ELS de Deformación de acuerdo con el Criterio de Apariencia en la posición inclinada 37º del presente sistema disco parabólico. Por tanto, se procede a aumentar los perfiles de las familias de barras en dicha posición. Una vez se cumpla el criterio de Apariencia en la misma, se continuará cumpliendo en el resto de posiciones también.

2.5.2.1.1. Aumento de perfiles para el cumplimiento del C. Apariencia

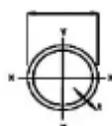
Atendiendo a los resultados obtenidos en las comprobaciones realizadas hasta este punto, se decide realizar un aumento de los perfiles de las familias de barras: Estructura soporte del motor y Pilar. Este cambio es necesario para poder cumplir el ELS de Apariencia, por lo que estos perfiles pasarán de $\varnothing 40.3$ a $\varnothing 55.4$ y de $\varnothing 273 \times 21,44$ a $\varnothing 508 \times 20,6$ respectivamente.

Donde dichos perfiles presentan las siguientes características:



u = Perímetro
A = Área de la sección
S = Momento estático de media sección, respecto a un eje baricéntrico
I = Momento de inercia de la sección, respecto a un eje baricéntrico
W = 2I : d. Módulo resistente de la sección, respecto a un eje baricéntrico
i = $\sqrt{I/A}$. Radio de giro de la sección, respecto a un eje baricéntrico
I_t = Módulo de torsión de la sección

Perfil	Dimensiones			Términos de sección						Peso	
	d mm	e mm	u mm	A cm ²	S cm ³	I cm ⁴	W cm ³	i cm	I _t cm ⁴	p kp/m	
∅ 40.2	40	2	126	2,39	1,44	4,33	2,16	1,35	8,66	1,88	P
∅ 40.3	40	3	126	3,49	2,05	6,01	3,00	1,31	12,00	2,74	P
∅ 40.4	40	4	126	4,52	2,60	7,42	3,71	1,28	14,80	3,55	C
∅ 45.2	45	2	141	2,70	1,85	6,26	2,78	1,52	12,50	2,12	P
∅ 45.3	45	3	141	3,96	2,65	8,77	3,90	1,49	17,50	3,11	P
∅ 45.4	45	4	141	5,15	3,37	10,90	4,84	1,45	21,80	4,04	C
∅ 50.2	50	2	157	3,02	2,30	8,70	3,48	1,69	17,40	2,37	P
∅ 50.3	50	3	157	4,43	3,31	12,20	4,91	1,66	24,50	3,47	P
∅ 50.4	50	4	157	5,78	4,23	15,40	6,16	1,63	30,80	4,53	P
∅ 55.2	55	2	173	3,33	2,81	11,70	4,25	1,87	23,40	2,61	C
∅ 55.3	55	3	173	4,90	4,06	16,60	6,04	1,84	33,20	3,85	C
∅ 55.4	55	4	173	6,41	5,21	21,00	7,64	2,01	42,00	5,03	C
∅ 60.2	60	2	188	3,64	3,36	15,30	5,11	2,05	30,60	2,86	P



OC
TUBO CIRCULAR
DIMENSIONES Y PROPIEDADES



Designación D x t		Diámetro nominal	Diámetro interior	Peso	Area	Ejes X-X y Y-Y			Denomina ción
						I	S	r	
mm x mm	in. x in.	in.	mm	kg/m	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm	
508 x 6.35 x 9.53 x 12.7 x 15.09 x 20.62	20 x 0.250	20	495.3	78.56	100.07	31485.0	1239.6	17.7	10
	x 0.375		488.94	117.15	149.24	46369.3	1825.6	17.6	20
	x 0.500		482.6	155.13	197.62	60639.4	2387.4	17.5	30 XE
	x 0.594		477.82	183.43	233.67	71032.8	2796.6	17.4	40
	x 0.812		466.76	247.84	315.72	93913.6	3697.4	17.3	60
610 x 6.35 x 9.53	24 x 0.250	24	597.3	94.53	120.42	54857.4	1798.6	21.3	10
	x 0.375		590.04	144.12	170.77	84045.4	2657.2	21.2	20 E

Tabla 110. Perfiles utilizados tras aumento de los mismos para el cumplimiento del criterio de Apariencia.

A continuación, se vuelve a comprobar que se cumple ELS de Deformación para el Criterio de Apariencia.

DISEÑO Y CÁLCULO DE UNA ESTRUCTURA DISCO PARABÓLICA DE UNA CENTRAL SOLAR EN XÀTIVA. (VALENCIA)

2.5.2.1.2. Segunda comprobación Criterio de Apariencia

En primer lugar, volviendo a seguir las indicaciones del punto 2.5.2.1. del presente proyecto, se muestra el valor del desplazamiento relativo para cada una de las posiciones del sistema disco parabólico, en cada uno de sus nudos más desfavorables de cada familia de barras:

POSICIÓN HORIZONTAL					
FAMILIA ESTUDIADA	NUDO	OutputCase	$\delta_{rel,x}$	$\delta_{rel,y}$	$\delta_{rel,z}$
Capa superior	49	ELS1Apah	0,0001	-0,0003	-0,0003
Diagonales	49	ELS1Apah	0,0001	-0,0003	-0,0003
Capa inferior	382	ELS1Apah	0,0002	7,51E-06	-0,0004
Estructura soporte	694	ELS1Apah	0,0108	0,0002	-0,0059
Pilar	718	ELS1Apah	0,0001	-2,32E-09	-5,11E-06

Tabla 111. Valores de los desplazamientos relativos en los nudos más desfavorables de cada familia de barras en la posición horizontal tras aumento de perfil.

POSICIÓN VERTICAL					
FAMILIA ESTUDIADA	NUDO	OutputCase	$\delta_{rel,x}$	$\delta_{rel,y}$	$\delta_{rel,z}$
Capa superior	309	ELS1ApaV	-0,0099	2,75E-05	-0,0015
Diagonales	309	ELS1ApaV	-0,0099	2,75E-05	-0,0015
Capa inferior	523	ELS1ApaV	-0,0092	1,55E-05	0,0004
Estructura soporte	805	ELS1ApaV	-0,0074	-0,0002	-0,0194
Pilar	826	ELS1ApaV	-0,0013	2,65E-08	-9,62E-06

Tabla 112. Valores de los desplazamientos relativos en los nudos más desfavorables de cada familia de barras en la posición vertical tras aumento de perfil.

POSICIÓN INCLINADA					
FAMILIA ESTUDIADA	NUDO	OutputCase	$\delta_{rel,x}$	$\delta_{rel,y}$	$\delta_{rel,z}$
Capa superior	206	ELS1ApaV	-0,0234	0,0021	0,0142
Diagonales	206	ELS1ApaV	-0,0234	0,0021	0,0142
Capa inferior	447	ELS1ApaV	-0,0177	0,0013	0,0155
Estructura soporte	747	ELS1ApaV	-0,0081	0,0318	-0,0298
Pilar	772	ELS1ApaV	-0,0068	0,0005	-4,32E-05

Tabla 113. Valores de los desplazamientos relativos en los nudos más desfavorables de cada familia de barras en la posición inclinada tras aumento de perfil.

Los resultados obtenidos para la comprobación del ELS de deformación para el criterio de Apariencia quedan detallados en las siguientes tablas:

POSICIÓN HORIZONTAL						
FAMILIA ESTUDIADA	NUDO	L_{barra}	δ_{rel}	OutputCase	f_r	COMPROBACIÓN
Capa superior	49	6,1592	-0,0003	ELS1Apah	0,00004	CUMPLE
Diagonales	49	6,1592	-0,0003	ELS1Apah	0,00004	CUMPLE
Capa inferior	382	5,2800	0,0002	ELS1Apah	0,00003	CUMPLE
Estructura soporte	694	10,5015	0,0108	ELS1Apah	0,0010	CUMPLE
Pilar	718	5,5000	1,42E-04	ELS1Apah	2,58E-05	CUMPLE

Tabla 114. Comprobación ELS de Deformación según el Criterio de Apariencia en la posición horizontal tras el aumento de perfil.

POSICIÓN VERTICAL						
FAMILIA ESTUDIADA	NUDO	L_{barra}	δ_{rel}	OutputCase	f_r	COMPROBACIÓN
Capa superior	309	8,7628	-0,0099	ELS1ApaV	0,0011	CUMPLE
Diagonales	309	8,7628	-0,0099	ELS1ApaV	0,0011	CUMPLE
Capa inferior	523	8,4628	-0,0092	ELS1ApaV	0,0011	CUMPLE
Estructura soporte	805	5,7628	-0,0074	ELS1ApaV	0,0013	CUMPLE
Pilar	826	5,5000	-0,0013	ELS1ApaV	2,43E-04	CUMPLE

Tabla 115. Comprobación ELS de Deformación según el Criterio de Apariencia en la posición vertical tras el aumento de perfil.

POSICIÓN INCLINADA						
FAMILIA ESTUDIADA	NUDO	L_{barra}	δ_{rel}	OutputCase	f_r	COMPROBACIÓN
Capa superior	206	7,9901	-0,0234	ELS1ApaV	0,0029	CUMPLE
Diagonales	206	7,9901	-0,0234	ELS1ApaV	0,0029	CUMPLE
Capa inferior	447	7,1919	-0,0177	ELS1ApaV	0,0025	CUMPLE
Estructura soporte	747	9,2915	0,0318	ELS1ApaV	0,0034	CUMPLE
Pilar	772	5,5000	-6,82E-03	ELS1ApaV	1,24E-03	CUMPLE

Tabla 116. Comprobación ELS de Deformación según el Criterio de Apariencia en la posición inclinada tras el aumento de perfil.

Como se puede observar, tras el aumento de perfiles se cumple el ELS de Deformación para el criterio de Apariencia porque en todas las posiciones y en todas las familias de barras se cumple que:

$$f_r = \frac{\delta_{rel,z}}{L_{barra}} \leq 0,004 = \frac{1}{250}$$

2.5.2.2. Criterio de Integridad

Como bien se ha dicho anteriormente en el apartado 2.4 del presente proyecto, los ELS de Integridad no se van a tener en cuenta debido a que el disco parabólico no es un sistema que se asemeje a un edificio, así como tampoco presenta ningún componente que se puede asemejar a un tabique que llegue hasta el suelo. Por lo que no tiene ningún sentido comprobar dicho criterio en el sistema de estudio.

2.6. Cimentación

Para el siguiente apartado se van a seguir las indicaciones establecidas en el CTE SE-C, es decir, la parte del Código Técnico de la Edificación dedicada al cálculo de los cimientos.

De acuerdo con el CTE: “El ámbito de aplicación de este DB-C es el de la seguridad estructural, capacidad portante y aptitud al servicio, de los elementos de cimentación y, en su caso, de contención de todo tipo de edificios, en relación con el terreno, independientemente de lo que afecta al elemento propiamente dicho, que se regula en los Documentos Básicos relativos a la seguridad estructural de los diferentes materiales o la instrucción EHE.”

De otra forma, se podría decir que la cimentación es la parte de la estructura encargada de transmitir los esfuerzos al terreno donde se ubica la estructura. Por tanto, el dimensionado de la cimentación se realiza en función de dichos esfuerzos, puesto que, ésta resultará útil o estará bien dimensionada cuando los esfuerzos que transmite al terreno no superen la presión admisible del mismo.

En los siguientes subapartados, tendrá lugar el dimensionado de la cimentación mediante el método de los Estados Límite, en concreto, se utilizarán los Estados Límite Últimos de donde se diferenciarán tres ELU: de Vuelco, de Deslizamiento y de Hundimiento.

“Estados Límite Últimos: asociados con el colapso total o parcial del terreno o con el fallo estructural de la cimentación.”

2.6.1. Estados Límite Últimos

Siguiendo las indicaciones del CTE se consideran estados límite últimos todos aquellos que son debidos a:

- a) "Pérdida de la capacidad portante del terreno de apoyo de la cimentación por hundimiento, deslizamiento o vuelco.
- b) Pérdida de la estabilidad global del terreno en el entorno próximo a la cimentación.
- c) Pérdida de la capacidad resistente de la cimentación por fallo estructural.
- d) Fallos originados por efectos que dependen del tiempo (durabilidad del material de la cimentación, fatiga del terreno sometido a cargas variables repetidas)."

2.6.1.1. Comprobación Estados Límite Últimos de Vuelco

Según el CTE: “Este modo de rotura se podrá producir en cimentaciones que hayan de soportar cargas horizontales y momentos importantes cuando, siendo pequeño el ancho equivalente de la cimentación, el movimiento predominante sea el giro de la cimentación.”

La estabilidad al vuelco de la cimentación quedará verificada, si para las situaciones de dimensionado pertinentes se cumple la condición:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stab} \quad (39)$$

donde cada parámetro se corresponde a:

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

$E_{d,stab}$: valor de cálculo del efecto de las acciones estabilizadoras.

A priori solo se tiene la certeza de que el efecto del peso propio será estabilizante, puesto que el resto de las acciones, respecto de la posible arista de vuelco (parte de la zapata donde es más probable que se produzca el vuelco), pueden manifestar un efecto estabilizante o desestabilizante. Dado que los efectos producidos por las

acciones en relación al vuelco de la cimentación son momentos, en la posible arista de giro, la condición de equilibrio puede expresarse en términos de momentos como:

$$\gamma_{E,dst} \cdot M_{dst} \leq \gamma_{E,stb} \cdot M_{stb} \quad (40)$$

correspondiéndose cada término a:

$\gamma_{E,dst}$: coeficiente parcial para el efecto de las acciones desestabilizadoras.

$\gamma_{E,stb}$: coeficiente parcial para el efecto de las acciones estabilizadoras.

M_{dst} : momentos en la arista de vuelco que producen desestabilidad.

M_{stb} : momentos en la arista de vuelco que producen estabilidad.

A partir de la siguiente tabla se obtienen los distintos coeficientes parciales para el efecto de las acciones desestabilizadoras y estabilizadoras:

Situación de dimensionado	Tipo	Materiales		Acciones	
		γ_R	γ_M	γ_E	γ_F
Hundimiento		3,0 ⁽¹⁾	1,0	1,0	1,0
Deslizamiento		1,5 ⁽²⁾	1,0	1,0	1,0
Vuelco ⁽²⁾					
	Acciones estabilizadoras	1,0	1,0	0,9 ⁽³⁾	1,0
	Acciones desestabilizadoras	1,0	1,0	1,8	1,0
Estabilidad global		1,0	1,8	1,0	1,0
Capacidad estructural		- ⁽⁴⁾	- ⁽⁴⁾	1,6 ⁽⁵⁾	1,0

Tabla 117. Coeficientes de seguridad parciales (Fuente: CTE DB-C, tabla 2.1, pág. 7)

En el caso del sistema de estudio del presente proyecto, la condición de estado límite puede comprobarse mediante:

$$0,9 \cdot \left(\frac{a^2}{2} \cdot b \cdot h \cdot \gamma_h \right) \geq 1,8 \cdot \left[M_d^h + h \cdot V_d^h - N_d^h \cdot \left(\frac{a}{2} + e_g \right) \right] \quad (41)$$

siendo cada parámetro:

a : ancho de la zapata.

b : largo de la zapata.

h : canto de la zapata.

γ_h : es el peso específico del hormigón, que en este proyecto se utiliza un hormigón HA-25, es decir, $\gamma_h = 25\text{kN}/\text{m}^3$.

e_g : excentricidad de las acciones resultantes.

En lo que concierne al dimensionamiento de la zapata del sistema disco parabólico estudiado, se ha decidido implementar una cimentación de forma cuadrada. Siendo sus dimensiones según la posición en la que se encuentre el disco parabólico:

POSICIÓN	a (m)	b (m)	h(m)	e_g (m)
Horizontal	2,70	2,70	0,8	0
Vertical	3,90	3,90	1,0	0
Inclinada	3,55	3,55	1,0	0

Tabla 118. Dimensiones de la zapata.

Cabe remarcar que como la posición vertical es la que ejerce/traslada mayores reacciones sobre el suelo, la zapata utilizada para la estructura presenta las dimensiones de dicha posición con la finalidad de garantizar la viabilidad de la estructura en todas sus posiciones. ($a=b=3,90$ m, $h=1,0$ m y $e_g = 0$ m).

A continuación, se procede a determinar los esfuerzos resultantes en la base de la zapata. En primer lugar, con la ayuda de la herramienta de cálculo SAP2000, se obtienen las reacciones en los apoyos de la estructura sobre el terreno:

Joint	Output Case	F1	F2	F3	M1	M2	M3	POSICIÓN
827	ELU6h	-5,57E-14	2,58E-14	53,0450	-2,30E-12	-22,9108	2,92E-12	Horizontal
829	ELU2v	-43,8077	1,46E-12	6,7723	-2,32E-06	-244,8745	1,96E-11	Vertical
828	ELU2v	-26,3911	-3,26E-12	40,3650	0,8539	-153,7814	1,47E-11	Inclinada

Tabla 119. Valor de las reacciones obtenidas directamente de SAP2000 para cada posición de estudio.

A partir del valor de las reacciones se determina el valor de las acciones en la parte superior de la zapata y el valor del axil resultante, cortante resultante y momento resultante. Previamente, se obtiene la posición de cada apoyo y se consigue obtener la resultante de las fuerzas en el centro de gravedad de la zapata mediante un producto vectorial:

POSICIÓN	NUDOS	M_R	M_T	N
Horizontal	827	22,9108	2,61E-12	53,0450
Vertical	829	244,8745	1,96E-11	6,7723
Inclinada	828	153,7838	1,47E-11	40,3650

Tabla 120. Valores de momento resultante, momento torsor y axil en el centro de gravedad diferenciando el origen de estos para cada posición de estudio.

Resultando de este modo unas acciones en el centro de gravedad de la zapata de:

POSICIÓN	Centro de Gravedad	M_x (kN·m)	M_y (kN·m)	M_z (kN·m)	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)
Horizontal	$x=0,y=0,z=0$	-2,30E-12	-22,9108	2,92E-12	-5,57E-14	2,58E-14	53,0450
Vertical	$x=0,y=0,z=0$	-2,32E-06	-244,8745	1,96E-11	-43,8077	1,46E-12	6,7723
Inclinada	$x=0,y=0,z=0$	0,8539	-153,7814	1,47E-11	-26,3911	-3,26E-12	40,3650

Tabla 121. Acciones según eje de actuación en el centro de gravedad de la zapata para cada posición de estudio.

Y, por consiguiente, los esfuerzos en la base de la zapata resultan ser:

POSICIÓN	CDG base de la zapata	M_x (kN·m)	M_y (kN·m)	M_z (kN·m)	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)
Horizontal	$x=0,y=0,z=-h$	2,30E-12	22,9108	-2,92E-12	5,57E-14	-2,58E-14	-53,0450
Vertical	$x=0,y=0,z=-h$	2,32E-06	288,6821	-1,96E-11	43,8077	-1,46E-12	-6,7723
Inclinada	$x=0,y=0,z=-h$	-0,8539	180,1725	-2,92E-12	26,3911	3,26E-12	-40,3650

Tabla 122. Esfuerzos en la parte inferior de la zapata para cada posición de estudio.

Por último, al disponer de todas las variables necesarias, se realiza la comprobación del ELU de Vuelco, dando lugar a:

POSICIÓN	ELU-VUELCO		$M_{d, stb} \geq M_{d, dst}$
	ESTABILIZADORAS ($M_{d, stb}$)	DESESTABILIZADORAS ($M_{d, dst}$)	
Horizontal	ESTABILIZADORAS ($M_{d, stb}$)	641,9995	Cumple
	DESESTABILIZADORAS ($M_{d, dst}$)	225,040	
Vertical	ESTABILIZADORAS ($M_{d, stb}$)	641,9995	Cumple
	DESESTABILIZADORAS ($M_{d, dst}$)	621,948	
Inclinada	ESTABILIZADORAS ($M_{d, stb}$)	641,9995	Cumple
	DESESTABILIZADORAS ($M_{d, dst}$)	511,679	

Tabla 123. Comprobación ELU Vuelco para cada posición de estudio.

2.6.1.2. Verificación de la Resistencia

Siguiendo las pautas del CTE se determinan los siguientes puntos:

1. “Para el estudio de la resistencia del terreno en cada situación de dimensionado se distinguirá entre resistencia local y resistencia global.
2. Los cálculos relativos a la resistencia local del terreno tienen como objetivo último asegurar la estabilidad de la cimentación frente a los fenómenos de hundimiento y deslizamiento.
3. Los cálculos relativos a la resistencia global del terreno, también llamada estabilidad global, tienen como objetivo último asegurar la estabilidad de la cimentación frente a posibles deslizamientos a lo largo de superficies pésimas posibles que la engloben.
4. La resistencia local o global del terreno quedará verificada si se cumple, para las situaciones de dimensionado pertinentes, la condición:

$$E_d \leq R_d \quad (42)$$

donde cada término se corresponde a:

E_d : valor de cálculo del efecto de las acciones.

R_d : valor de cálculo de la resistencia del terreno.”

Por tanto, se debe comprobar el ELU de Deslizamiento y el ELU de Hundimiento y así poder verificar la resistencia del terreno, tanto la global como la local.

2.6.1.2.1. Comprobación del Estado Límite Último de Deslizamiento

“Este modo de rotura se podrá producir cuando, en elementos que hayan de soportar cargas horizontales, las tensiones de corte en el contacto de la cimentación con el terreno superen la resistencia de ese contacto.”

Mediante las indicaciones determinadas por el CTE, la seguridad frente al deslizamiento puede comprobarse mediante:

$$E_d \leq R_d$$
$$V_T \leq \frac{N_T}{\gamma_R} \cdot \tan \phi_d \quad (43)$$

donde cada parámetro consiste en:

V_T : cortante total en la base de la zapata.

N_T : esfuerzo normal total en la base de la zapata.

γ_R : coeficiente parcial de resistencia, cuyo valor se puede observar en la tabla 117 del presente proyecto.

ϕ_d : ángulo de rozamiento interno de cálculo entre cemento y terreno, este valor deriva del ángulo de rozamiento entre cemento y terreno ϕ , pero afectado de un coeficiente de minoración $\phi_d = \frac{2}{3} \cdot \phi$.

Su valor varía en función del tipo de terreno sobre el que se instale la cimentación, y su valor se obtiene de la tabla posterior:

	Muy suelto	Suelto	Medio- denso	Denso	Muy denso
Ángulo de rozamiento interno del terreno	30°	32°	34° 36°	38° 40°	42°

Tabla 124. Ángulo de rozamiento interno del terreno.

con lo que:

$$\phi = 30^\circ, \phi_d = \frac{2}{3} \cdot 30^\circ = 20^\circ \quad (44)$$

Así pues, al comparar el valor de cálculo del efecto de las acciones con el valor de cálculo de la resistencia del terreno, se verifica el cumplimiento de la comprobación del ELU de Deslizamiento quedando:

POSICIÓN	ELU-DESLIZAMIENTO		$R_d \geq E_d$
Horizontal	FUERZAS ANTIDESLIZANTES (Rd)	77,045	Cumple
	FUERZAS DESLIZANTES(Ed)	0,000	
Vertical	FUERZAS ANTIDESLIZANTES (Rd)	88,273	Cumple
	FUERZAS DESLIZANTES(Ed)	43,808	
Inclinada	FUERZAS ANTIDESLIZANTES (Rd)	80,121	Cumple
	FUERZAS DESLIZANTES(Ed)	26,391	

Tabla 125. Comprobación ELU Deslizamiento para cada posición de estudio.

2.6.1.2.2. Comprobación del Estado Límite Último de Hundimiento

La comprobación de este ELU es la segunda condición a realizar con la finalidad de cumplir la verificación de la resistencia del terreno.

Siguiendo las instrucciones del CTE, para verificar el ELU de Hundimiento se remarca que: “el hundimiento se alcanzará cuando la presión actuante (total bruta) sobre el terreno bajo la cimentación supere la resistencia característica del terreno frente a este modo de rotura.”

La condición para evitar el ELU de Hundimiento se expresa como:

$$E_d \leq R_d$$

condición para la que los términos hacen referencia a:

E_d : valor de cálculo del efecto de las acciones.

R_d : valor de cálculo de la resistencia del terreno.

La expresión general que permite obtener la presión de contacto para la comprobación del ELU de Hundimiento es:

$$q_b \equiv \sigma = \frac{N_T}{(a - 2|e|) \cdot b} \leq \sigma_{adm} \equiv q_s \quad (45)$$

correspondiéndose cada parámetro a:

a : dimensión total del apoyo.

e : excentricidad del apoyo.

N_T : resultante de las fuerzas verticales.

Con todo lo anteriormente explicado y obtenido, la comprobación del ELU de Hundimiento queda detallado en la siguiente tabla:

POSICIÓN	ELU-HUNDIMIENTO		$R_d \geq E_d$
Horizontal	Resistencia característica del terreno (R_d)	200	Cumple
	Presión actuante total bruta (E_d)	28,579	
Vertical	Resistencia característica del terreno (R_d)	200	Cumple
	Presión actuante total bruta (E_d)	25,457	
Inclinada	Resistencia característica del terreno (R_d)	200	Cumple
	Presión actuante total bruta (E_d)	27,723	

Tabla 126. Comprobación ELU Hundimiento para cada posición de estudio.

2.7. Placa de anclaje

Las placas de anclaje se definen como el nexo de unión de la estructura superficial con los elementos de cimentación. Es decir, son los elementos de unión a través de los cuales los soportes transmiten los esfuerzos al cimiento de manera que éste pueda resistirlos y transmitirlos al terreno.

Al tratarse de una unión, su cálculo queda recogido en el punto 8.8.1 del CTE DB SE-A, que nombra a las placas de anclaje como basas de soportes. En dicho punto del CTE se dice que:

“La comprobación de la unión de un elemento metálico a otro de hormigón, como son las basas de soportes, requiere verificar la existencia de resistencia suficiente frente a los esfuerzos transmitidos en la región de contacto, considerando, tanto la resistencia del hormigón de dicha región, como la de los elementos metálicos que materializan el contacto.”

Por todo ello, en el presente apartado se describen las diferentes comprobaciones realizadas para que las placas de anclaje sean capaces de desempeñar sus funciones principales. Se considerará tanto el agotamiento del hormigón como el agotamiento de la sección de acero.

2.7.1. Apoyo de la placa

En el caso del sistema disco parabólico, la placa de anclaje no apoya sobre la cimentación, sino que tiene una capa de mortero intermedia. Por tanto, se debe de hablar de la resistencia portante o resistencia de cálculo de unión f_{jd} , la cual adopta un valor:

$$f_{jd} = \beta_j \cdot k_j \cdot f_{cd} \quad (46)$$

donde los distintos parámetros se corresponden a:

β_j : coeficiente de la junta.

k_j : factor de concentración, el cual tiene en cuenta la mejora de la resistencia por el efecto de confinamiento del hormigón bajo la placa.

f_{cd} : resistencia de cálculo del hormigón. Ésta se determina mediante:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{25}{1,5} = 16,667 \frac{N}{mm^2} \quad (47)$$

Con todo ello, considerando el caso más desfavorable:

$$f_{jd} = \beta_j \cdot k_j \cdot f_{cd} = f_{cd} = 16,667 \text{ N/mm}^2$$

2.7.2. Determinación del modelo mecánico

En el sistema disco parabólico el soporte se considera empotrado en la cimentación, lo que hace que la base deba prepararse para resistir:

- Esfuerzo axial (N_{Ed}) de compresión o de tracción.
- Momento (M_{Ed}), según el eje principal de inercial del perfil.
- Esfuerzo cortante (V_{Ed}), según uno o los dos ejes.
- Mas raramente, momento torsor.

En primer lugar, se procede a obtener la superficie portante o área eficaz, la cual queda definida en el CTE DB SE-A y EC3 (Anexo L) como:

"Suma de la superficie de la sección de la pieza del soporte (en el sistema disco parabólico el "Pilar Base") que se suelda a la placa de base más la que aporta la anchura suplementaria de apoyo (c) alrededor del perímetro de la sección del soporte siempre y cuando ésta no exceda las dimensiones de la placa."

Para ello, se determina la anchura suplementaria de apoyo c, la cual consiste en el máximo voladizo de la placa que puede aguantar la resistencia de cálculo del apoyo y queda definida por la expresión:

$$c = e \cdot \left(\frac{f_{yd}}{3 \cdot f_{jd}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (48)$$

correspondiéndose cada parámetro a:

e : espesor de la placa base. Se toma como $e = 22\text{mm}$

f_{yd} : resistencia de cálculo de la placa ($\gamma_{M0} = 1,05$):

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{275}{1,05} = 261,9 \text{ N/mm}^2 \quad (49)$$

f_{jd} : resistencia portante, $f_{jd} = 16,667 \text{ N/mm}^2$

Con lo que la anchura suplementaria de apoyo resulta:

$$c = 22 \cdot \left(\frac{261,9}{3 \cdot 16,667} \right)^{\frac{1}{2}} = 50,351\text{mm}$$

Una vez obtenido el valor de la anchura suplementaria del apoyo, el área portante se debe calcular de la siguiente forma:

$$A_p = \pi \cdot (R_{ext} + c)^2 = \pi \cdot (508/2 + 50.351)^2 = 291004,2547 \text{ mm}^2 \quad (50)$$

Para finalizar, se realiza la comprobación del modelo mecánico mediante la siguiente comparación:

$$e_d = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} \leq \frac{W_p}{A_p} \quad \text{MODELO 1} \quad (51)$$

$$e_d = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} \geq \frac{W_p}{A_p} \quad \text{MODELO 2} \quad (52)$$

donde cada término hace referencia a:

M_{Ed} : momento de cálculo.

N_{Ed} : axil de cálculo.

W_p : modulo resistente.

A continuación, se procede a determinar en modelo de cálculo que presenta el sistema disco parabólico para la determinación de la placa base necesaria. Esto se puede observar en la tabla siguiente:

Comprobación: Compresión Simple o Flexión Compuesta.							
POSICIÓN	$N_{Ed}(N)$	$M_{Ed}(N \cdot mm)$	$A_p(mm^2)$	$W_p(mm^3)$	M_{ed}/N_{ed}	W_p/A_p	$e_d > W_p/A_p$
Horizontal	53045	22911000	291004,255	17089202,2	431,9163	58,7249	MODELO 2
Vertical	6772	244874000	291004,255	17089202,2	36159,7756	58,7249	MODELO 2
Inclinada	40365	153781000	291004,255	17089202,2	3809,7609	58,7249	MODELO 2

Tabla 127. Determinación del modelo de cálculo.

Observando la tabla anterior queda determinado que el modelo de cálculo que presenta el sistema del presente proyecto, para la determinación del dimensionado de la placa de anclaje, es el MODELO 2, es decir, la placa de anclaje recibe más Flexión que Axil, tratándose de este modo de Placas a Flexión Compuesta (N, M).

2.7.3. Comprobaciones

Para calcular correctamente la placa de anclaje se deben verificar los siguientes Estados Límite:

- ELU de Agotamiento del apoyo.
- ELU de Agotamiento de la placa a flexión.
- ELU de Agotamiento de los pernos.
- ELU de Anclaje de los pernos en el hormigón.

2.7.3.1. Estado Límite Último de Agotamiento del apoyo

El sistema disco parabólico presenta un modelo mecánico tipo "MODELO 2", con lo que la placa presenta CARTELAS.

En primer lugar, se procede a realizar un predimensionado de la placa. Ésta estará constituida con acero S275JR y, como ya se ha dicho anteriormente, se considera un espesor de 22 mm. Por tanto, la placa presenta unas dimensiones iniciales (en mm):

$$a = 100 + a_p + 100 \quad (53)$$

$$b = 100 + e_c + b_p + e_c + 100 \quad (54)$$

$$d' = 50$$

Donde para las cartelas, inicialmente: $\neq b.150.10$

Para el disco parabólico, como el "Pilar Base" presenta un perfil de $\varnothing 508 \times 20,6$ con $a_p = b_p = 508 \text{ mm}$, las dimensiones de la placa son:

$$a = 708 \text{ mm}$$

$$b = 728 \text{ mm}$$

$$d' = 50 \text{ mm}$$

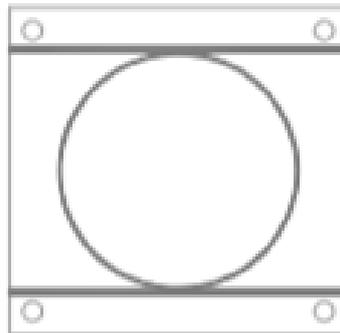


Fig. 26 Placa de anclaje.

siendo cada término:

a : ancho de la placa.

b : largo de la placa.

e_c : espesor cartelas.

d' : distancia de los pernos al borde de la placa de anclaje.

En el caso de flexión con cartelas, el ancho portante (b') debe prevenir que se produzca solape entre dos zonas, desborde por resalto corto y ambas cosas a la vez, por tanto:

$$b' = 2 \cdot e_c + (2c \leq b_p) + (2c \leq (b - b_p - 2e_c)) \quad (55)$$

Conocidos todos los parámetros, la anterior ecuación quedaría:

$$\begin{aligned} b' &= 2 \cdot 10 + (2 \cdot 50,351 \leq 508) + (2 \cdot 50,351 \leq (728 - 508 - 2 \cdot 10)) \\ &= 20 + 100,702 + 200 = 320,702 \text{ mm} \end{aligned}$$

Una vez determinado el ancho portante, se procede a comprobar, en cada una de las posiciones, la condición de ductilidad y por tanto el ELU de Agotamiento del Apoyo:

$$y \leq \frac{a}{4} \quad (56)$$

A partir del estudio del equilibrio de la placa, se determina el valor de T_d e y :

$$N_{Ed} + T_d = b' \cdot y \cdot f_{jd} \quad (57)$$

$$M_{Ed} + N_{Ed} \cdot \left(\frac{a}{2} - d'\right) = b' \cdot y \cdot f_{jd} \cdot \left(a - d' - \frac{y}{2}\right) \quad (58)$$

siendo:

M_{Ed} : momento de cálculo.

N_{Ed} : axil de cálculo.

b' : ancho portante.

a : ancho de la placa.

d' : distancia de los pernos al borde de la placa de anclaje.

f_{jd} : resistencia portante.

Con lo que la comprobación de este ELU resulta ser:

Comprobación ELU Agotamiento del apoyo								
POSICIÓN	M_{Ed} (N·mm)	N_{Ed} (N)	f_{jd} (N/mm ²)	a (mm)	d' (mm)	b' (mm)	y (mm)	$y < a/4$
Horizontal	22911000	53045	16,667	708	50	320,702	11,1943	CUMPLE
Vertical	244874000	6772	16,667	708	50	320,702	74,4173	CUMPLE
Inclinada	153781000	40365	16,667	708	50	320,702	49,0402	CUMPLE

Tabla 128. Comprobación del ELU de Agotamiento del Apoyo.

Y por tanto el valor de la fuerza en los pernos (T_d), resulta:

POSICIÓN	T_d (N)
Horizontal	6790,10332
Vertical	390998,9040
Inclinada	221761,7460

Tabla 129. Valores de la fuerza en los pernos T_d .

2.7.3.2. Estado Límite Último de Agotamiento a flexión de la placa

Antes de proceder con el cálculo de este apartado, hace falta indicar que en el caso del presente proyecto se va a suponer que la placa de anclaje dispone de 2 cartelas.

En primer lugar, se debe calcular el nuevo centro de gravedad:

$$y_G = \frac{\sum_{\forall i} A_i \cdot y_i}{\sum_{\forall i} A_i} = \frac{2 \cdot A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2}{2 \cdot A_1 + A_2} \quad (59)$$

donde:

$$A_1: \text{área de las cartelas. } A_1 = 150 \cdot 10 = 1500 \text{ mm}^2$$

$$y_1: \text{centro de gravedad cartelas. } y_1 = 22 + \frac{150}{2} = 97 \text{ mm}$$

$$A_2: \text{área de la placa. } A_2 = 728 \cdot 22 = 16016 \text{ mm}^2$$

$$y_2: \text{centro de gravedad placa. } y_2 = \frac{22}{2} = 11 \text{ mm}$$

Una vez conocidos todos los parámetros, el nuevo centro de gravedad presenta el valor:

$$y_G = \frac{2 \cdot A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2}{2 \cdot A_1 + A_2} = \frac{2 \cdot 1500 \cdot 97 + 16016 \cdot 11}{2 \cdot 1500 + 16016} = 24,5675 \text{ mm}$$

En segundo lugar, se determina el nuevo momento de Inercia mediante:

$$I_G = \sum_{\forall i} I_i + \sum_{\forall i} A_i \cdot (y_i - y_G)^2 =$$

$$= 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot h \cdot e_c^3 + 2 \cdot A_1 \cdot (y_1 - y_G)^2 + \frac{1}{12} \cdot e_p \cdot b^3 + A_2 \cdot (y_2 - y_G)^2 \quad (60)$$

donde:

h: altura cartela.

e_c : espesor cartela.

e_p : espesor placa.

b: ancho de la placa.

Conocidos los valores de los distintos valores, el nuevo momento de inercia queda:

$$\begin{aligned}
 I_G &= 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot h \cdot e_c^3 + 2 \cdot A_1 \cdot (y_1 - y_G)^2 + \frac{1}{12} \cdot e_p \cdot b^3 + A_2 \cdot (y_2 - y_G)^2 = \\
 &= 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 150 \cdot 10^3 + 2 \cdot 1500 \cdot (97 - 24,5675)^2 + \frac{1}{12} \cdot 22 \cdot 728^3 + \\
 &\quad + 16016 \cdot (11 - 24,5675)^2 = 726064558 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

Una vez determinados el nuevo centro de gravedad y el nuevo momento de inercia, se procede a determinar el módulo resistente " W_{el} " a partir de:

$$W_{el} = \min(W_s, W_i) = \min\left(\frac{I_G}{h - y_G}, \frac{I_G}{y_G}\right) \quad (61)$$

Determinados todos los valores de las distintas variables, el módulo resistente resulta:

$$\begin{aligned}
 W_{el} &= \min\left(\frac{I_G}{h - y_G}, \frac{I_G}{y_G}\right) = \min\left(\frac{726064558}{172 - 24,5675}, \frac{726064558}{24,5675}\right) = \\
 &= 4924725,267 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

A continuación, se determinan los momentos en las secciones:

$$M_{A,Ed} \begin{cases} y \leq v & M_{A,Ed} = f_{jd} \cdot b' \cdot y \cdot \left(v - \frac{y}{2}\right) \\ y > v & M_{A,Ed} = f_{jd} \cdot b' \cdot \frac{v^2}{2} \end{cases} \quad (62)$$

$$M_{B,Ed} = T_d \cdot (v - d') \quad (63)$$

Momentos en las secciones								
POSICIÓN	y	v	f_{jd} (N/mm ²)	T_d (N)	b'	d'	$M_{A,Ed}$	$M_{B,Ed}$
Horizontal	11,1943	100	16,667	6790,10332	320,702	50	5648604,28	339505,166
Vertical	74,4173	100	16,667	390998,904	320,702	50	24976572,1	19549945,2
Inclinada	49,0402	100	16,667	221761,746	320,702	50	19785300,6	11088087,3

Tabla 130. Momentos en las secciones.

obteniéndose a partir de los mismos:

$$M = \max(M_{A,Ed}, M_{B,Ed}) \quad (64)$$

POSICIÓN	M (N·mm)
Horizontal	5648604,28
Vertical	24976572,1
Inclinada	19785300,6

Tabla 131. Momento máximo.

Una vez se han obtenido todos los parámetros, se realiza la comprobación del ELU de Agotamiento de la placa con cartelas a flexión mediante la expresión:

$$\frac{M}{W_{el} \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad (65)$$

Comprobación ELU Agotamiento a flexión de la placa					
POSICIÓN	M (N·mm)	W_{el} (mm ³)	f_{yd} (N/mm ²)	M / ($W_{el} \cdot f_{yd}$)	COMPROBACIÓN
Horizontal	5648604,28	4924725,27	261,9	0,004	CUMPLE
Vertical	24976572,1	4924725,27	261,9	0,019	CUMPLE
Inclinada	19785300,6	4924725,27	261,9	0,0153	CUMPLE

Tabla 132. Comprobación ELU de Agotamiento a flexión de la placa.

Como se puede observar, en la tabla anterior queda garantizado el cumplimiento del ELU del presente apartado y, por tanto, que no se produce el agotamiento a flexión de la placa.

2.7.3.3. Estado Límite Último de Agotamiento de los pernos

Como se ha dicho en el apartado anterior, el sistema de estudio del presente proyecto presenta un caso de carga de modelo 2, con lo que el CTE indica:

“Modelo 2: Placas a flexión compuesta (N, M)

- Los pernos de anclaje se dimensionarán para que resistan los efectos de las cargas de cálculo. Deberán proporcionar la resistencia a tracción necesaria para soportar las reacciones de apoyo negativas (esfuerzos de arrancamiento) y los momentos flectores susceptibles de producirse.”

A continuación, se procede a comprobar el ELU de Agotamiento de los pernos. En primer lugar, se realiza la comprobación de la tensión en el acero del anclaje donde:

$$x = \frac{y}{0,8} \quad (66)$$

$$\varepsilon_s = \left(\frac{d - x}{x} \right) \cdot \varepsilon_c \quad (67)$$

POSICIÓN	X	d	ϵ_c	ϵ_s
Horizontal	13,9929	658	0,0035	0,1611
Vertical	93,0216	658	0,0035	0,0213
Inclinada	61,3003	658	0,0035	0,0341

 Tabla 133. Valores de x y ϵ_s .

Seguidamente, se determina el valor de la tensión de los pernos mediante:

$$\sigma_s = E_s \cdot \epsilon_s \neq \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = f_{yd} \quad (68)$$

POSICIÓN	ϵ_s	E_s (N/mm ²)	$E_s \cdot \epsilon_s$	f_{yd} (N/mm ²)	σ_s
Horizontal	0,1611	210000	33827,5899	261,9048	261,9048
Vertical	0,0213	210000	4464,1137	261,9048	261,9048
Inclinada	0,0341	210000	7154,5274	261,9048	261,9048

 Tabla 134. Valor de la tensión de los pernos σ_s .

Una vez determinado el valor de la tensión de los pernos σ_s y conocido el valor de la fuerza en los pernos (T_d), en el apartado 2.7.3.1. del presente proyecto. Se procede a determinar las dimensiones y número de los pernos para posteriormente comprobar que se cumple el ELU de Agotamiento de los pernos.

En el CTE se nos indica que el número de pernos necesarios en la placa y las dimensiones de los mismos varían en los siguientes rangos:

$$2 \leq n_\emptyset \leq 4 \quad \emptyset \in \{20, 25, 32\}$$

y que deben satisfacer la siguiente comprobación para el cumplimiento del ELU del presente apartado:

$$A_s = n_\emptyset \cdot A_{r\emptyset} \geq \frac{T_d}{\sigma_s} \quad (69)$$

donde:

n_\emptyset : número de pernos que están traccionados.

T_d : fuerza de los pernos.

σ_s : tensión de los pernos.

\emptyset : diámetro de los pernos.

A_{ϕ} : área nominal de un perno.

$$A_{r\phi}: \text{área perno roscados. } A_{r\phi} = 0,8 \cdot A_{\phi} = 0,8 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (70)$$

Dimensionado y N° de pernos								
POSICIÓN	ϕ	$A_{r\phi}$	T_d (N)	σ_s	T_d (N) / σ_s	$(T_d / \sigma_s) / A_{r\phi}$	n_{ϕ}	$2 \leq n_{\phi} \leq 4$
Horizontal	20	251,3274	6790,1033	261,9048	25,9258	0,1032	1	NO CUMPLE
Vertical	20	251,3274	390998,9040	261,9048	1492,9049	5,9401	6	NO CUMPLE
Inclinada	20	251,3274	221761,7460	261,9048	846,7267	3,3690	4	CUMPLE

Tabla 135. Dimensionado y N° de pernos.

Como se puede observar, con pernos de $\phi = 20 \text{ mm}$, no se cumple la condición de que el número necesario de los mismos se encuentre dentro del rango $2 \leq n_{\phi} \leq 4$. Con la tabla anterior queda claro que la posición más desfavorable y que por tanto va a determinar el número de pernos de la placa, es la posición vertical, por lo que, se aumenta el diámetro de los pernos a $\phi = 25 \text{ mm}$, se vuelve a dimensionar y a determinar el n° de pernos:

Dimensionado y N° de pernos								
POSICIÓN	ϕ	$A_{r\phi}$	T_d (N)	σ_s	T_d (N) / σ_s	$(T_d / \sigma_s) / A_{r\phi}$	n_{ϕ}	$2 \leq n_{\phi} \leq 4$
Horizontal	25	392,6991	6790,1033	261,9048	25,9258	0,0660	1	NO CUMPLE
Vertical	25	392,6991	390998,9040	261,9048	1492,9049	3,8016	4	CUMPLE
Inclinada	25	392,6991	221761,7460	261,9048	846,7267	2,1562	3	CUMPLE

Tabla 136. Dimensionado y N° de pernos tras aumento de diámetro.

Observando la tabla anterior, la posición horizontal determina que serían necesarios menos pernos de los mínimos que determina el CTE, por lo que en dicha posición se colocarían el número mínimo de pernos (2) y ya se cumpliría en todas las posiciones.

Se procede a comprobar si se cumple el ELU de Agotamiento de los pernos:

Comprobación ELU Agotamiento de los pernos					
POSICIÓN	n_{ϕ}	$A_{r\phi}$	T_d (N)	σ_s	$n_{\phi} \cdot A_{r\phi} \geq \frac{T_d}{\sigma_s}$
Horizontal	4	392,6991	6790,1033	261,9048	CUMPLE
Vertical	4	392,6991	390998,9040	261,9048	CUMPLE
Inclinada	4	392,6991	221761,7460	261,9048	CUMPLE

Tabla 137. Comprobación ELU de Agotamiento de los pernos.

En la tabla anterior queda garantizado el cumplimiento del ELU del presente apartado, y por tanto, que no se produce el agotamiento de los pernos.

2.7.3.4. Estado Límite Último de Anclaje de los pernos

En último lugar, solo queda comprobar el cumplimiento del ELU de Anclaje de los pernos. Este ELU, según el CTE, presenta como objetivo determinar la longitud que el perno debe de tener embebida en el hormigón, l_a (longitud de anclaje), deberá ser la suficiente para impedir la pérdida de adherencia antes de alcanzarse la sollicitación máxima del perno T_ϕ , es decir, cada perno debe ser capaz de soportar una tracción equivalente a T_ϕ , siendo esta:

$$T_\phi = \frac{T_d}{n_\phi} \quad (71)$$

POSICIÓN	T_d (N)	n_ϕ	T_ϕ
Horizontal	6790,1033	4	1697,5258
Vertical	390998,9043	4	97749,7261
Inclinada	221761,7461	4	55440,4365

Tabla 138. Sollicitación máxima del perno.

La longitud básica de anclaje (l_b), es la longitud necesaria para que la barra pueda agotarse antes de arrancarse.

En el caso del sistema disco parabólico, para el amarre de la placa de anclaje a la cimentación se utilizan 4 pernos corrugados en prolongación recta. Con lo que, siguiendo el CTE, basándose en la experimentación de las características adherentes de las barras, se establece la siguiente formulación simplificada:

$$l_b = \text{máx} \left(m \cdot \phi^2, \frac{f_{yk}}{20} \cdot \phi \right) \text{ (mm)} \quad (72)$$

donde los distintos términos hacen referencia a:

ϕ : diámetro de la barra (mm).

f_{yk} : resistencia característica del acero.

m : coeficiente de unión que depende del hormigón utilizado en la cimentación y del acero de los pernos. Su valor se obtiene de la siguiente tabla sacada del EHE:

f_{ck} (N/mm ²)	m	
	B 400 S (SD)	B 500 S (SD)
HA-25	1,2	1,5
HA-30	1,0	1,3
HA-35	0,9	1,2
HA-40	0,8	1,1

Tabla 139. Determinación del parámetro "m" (Fuente: EHE, tabla 66.5.1.2.a)

Una vez establecidos los valores de los distintos parámetros, la longitud básica de anclaje quedaría:

$$l_b = \text{máx} \left(1,5 \cdot 25^2, \frac{500}{20} \cdot 25 \right) = \text{máx}(600; 625) = 625 \text{ mm}$$

Ya establecida la longitud básica de anclaje, se procede a determinar la longitud básica neta o longitud de anclaje, la cual se determina mediante:

$$l_a = l_{b, \text{neto}} = l_b \cdot \beta \cdot \frac{A_s}{A_{s, \text{real}}} \quad (73)$$

siendo cada parámetro:

A_s : área nominal resistente de los pernos a tracción.

$A_{s, \text{real}}$: área real resistente a tracción de los pernos a tracción.

β : factor de reducción, cuyo valor se obtiene de la siguiente tabla recomendada por el EHE:

TIPO DE ANCLAJE	Tracción	Compresión
Prolongación recta	1,0	1,0
Patilla, gancho y gancho en U	0,7	1,0
Barra transversal soldada	0,7	0,7

Tabla 140. Determinación del factor de reducción.

Por otro lado, la EHE proporciona una serie de valores mínimos de forma que quede garantizado el ELU de Anclaje de los Pernos. Dichos valores mínimos se expresan de la siguiente forma:

$$l_a = l_{b,meta} = 625 \cdot 1 \cdot \frac{1492,9049}{3 \cdot \frac{25^2 \cdot \pi}{4}} = 633,6085 \text{ mm} > \max \begin{cases} 10 \cdot \phi = 250 \text{ mm} \\ 150 \text{ mm} \\ \frac{l_b}{3} = 208,333 \text{ mm} \end{cases}$$

Como se cumple que l_a , es mayor que los tres valores mínimos que recomienda el EHE, longitud de anclaje presenta un valor de:

$$l_a = l_{b,meta} = 633,6085 \text{ mm}$$

En conclusión, el cumplimiento del ELU de Anclaje de los pernos tiene lugar para una $l_a = 633,6085 \text{ mm}$, resultando de este modo una placa de anclaje con las siguientes características:

- Dimensiones de la placa: $\neq 708.728.22$
- Dimensiones de los pernos de anclaje: $\phi = 25 \text{ mm}$ y $l_a = 633,6085 \text{ mm}$.

2.8. Arreglo de Armado de la cimentación

El cálculo del arreglo de armado consiste en la decisión de:

- Seleccionar un diámetro de la barra de la serie: 12-14-15-20-25 mm
- Calcular el número de barras en cada dirección de armado (n)
- Determinar la separación (s) de los ejes de barras (entre 10 y 30 cm)
- Diseñar el dispositivo de anclaje:
 - Prolongación recta (PR)
 - Patilla normalizada (PN)
 - Patilla normalizada con prolongación vertical (PN-L)

En el caso del sistema disco parabólico del presente proyecto de estudio, se procede a la obtención del número de barras en cada dirección de armado mediante la fórmula:

$$n = 1 + \text{int} \left(\frac{A_s}{A_\phi} \right) \quad (74)$$

donde

$$A_{\emptyset}: \text{armadura de las barras. } A_{\emptyset} = (\pi \cdot \emptyset^2) / 4 \quad (75)$$

$$A_s: \text{armadura necesaria. } A_s = \max \left((\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}) / f_{yd}; \rho \cdot b \cdot h \right) \quad (76)$$

correspondiéndose cada parámetro:

b: ancho de la cimentación. En este caso: 3,9 m.

h: profundidad. En este sistema: 1,0 m.

ρ : para acero B500S toma el valor de 0.0009

f_{cd} : resistencia de cálculo del hormigón. $f_{cd} = 25 / 1,5$

f_{yd} : resistencia de cálculo del acero. $f_{yd} = 500 / 1,05$

d: menor canto útil de la zapata. Se supone un diámetro de armado de 20 mm

$$d = h - r_{nom} - \frac{3}{2} \emptyset_{max} = 1000 - 35 - 30 = 935 \text{ mm} \quad (77)$$

ω : cuantía.

De todos los parámetros anteriores solo falta por determinar el valor de la cuantía (ω), el cual se determina mediante:

$$\omega = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu} \quad (78)$$

$$\omega_{corregido} = \omega \cdot (1,5 - 12,5 \cdot \omega) \quad (79)$$

siendo

$$\mu = \frac{M_d}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad (80)$$

$$M_d = \sigma_d \cdot \frac{b \cdot y^2}{2} \quad (81)$$

correspondiéndose cada parámetro:

$$\sigma_d = \frac{N_d}{a \cdot b} = \frac{6,7723}{(3,9 \cdot 3,9)} = 0,4453 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^2 \quad (82)$$

N_d : reacción del pilar. Presenta un valor de: 6,7723 kN.

$$y = v - \frac{v_p}{2} = 1,671 - \frac{0,11}{2} = 1,616 \text{ m (pilares metálicos)} \quad (83)$$

v : distancia del canto de la cimentación hasta el pilar.

v_p : distancia del pilar hasta el canto de la placa de anclaje.

Determinados σ_d e y , se procede a calcular M_d y con ello, μ , que nos permite determinar el valor de cuantía (ω):

$$M_d = \sigma_d \cdot \frac{b \cdot y^2}{2} = 0,4453 \cdot \frac{3,9 \cdot 1,616^2}{2} = 2,2674 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$\mu = \frac{M_d}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{2,2674 \cdot 10^6}{3900 \cdot 935^2 \cdot \frac{25}{1,5}} = 39,9017 \cdot 10^{-6}$$

$$\omega = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu} = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 39,9017 \cdot 10^{-6}} = 39,9025 \cdot 10^{-6}$$

$$\begin{aligned} \omega_{\text{corregido}} &= \omega \cdot (1,5 - 12,5 \cdot \omega) = 39,9025 \cdot 10^{-6} \cdot (1,5 - 12,5 \cdot 39,9025 \cdot 10^{-6}) = \\ &= 59,8339 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

Una vez conocidos el valor de los distintos parámetros, se procede a determinar la armadura necesaria (A_s):

$$\begin{aligned} A_s &= \max \left(\frac{(\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd})}{f_{yd}}; \rho \cdot b \cdot h \right) = \\ &= \max \left(\frac{\left(59,8339 \cdot 10^{-6} \cdot 3900 \cdot 935 \cdot \frac{25}{1,5} \right)}{\left(\frac{500}{1,15} \right)}; 0,0009 \cdot 3900 \cdot 1000 \right) = \end{aligned}$$

$$= \max(8,3637 \text{ mm}^2 ; 3510 \text{ mm}^2) = 3510 \text{ mm}^2$$

A continuación, se procede a determinar en cada dirección de armado (n) y la separación entre ellas (s) según el diámetro de la barra y la fórmula:

$$n = 1 + \text{int} \left(\frac{A_s}{A_\emptyset} \right)$$

$$s = \frac{a - 2 \cdot r_{lateral} - \emptyset}{n - 1} \quad (84)$$

$$\emptyset = 12 \text{ mm}$$

$$A_\emptyset = 113,0974 \text{ mm}^2, \quad n = 1 + \text{int} \left(\frac{3510}{113,0974} \right) = 32,$$

$$s = \frac{3900 - 2 \cdot 80 - 12}{32 - 1} = 120,2581 \text{ mm} \in [100; 300] \text{ mm}$$

$$\emptyset = 16 \text{ mm}$$

$$A_\emptyset = 201,0619 \text{ mm}^2, \quad n = 1 + \text{int} \left(\frac{3510}{201,0619} \right) = 18,$$

$$s = \frac{3900 - 2 \cdot 80 - 16}{18 - 1} = 219,0588 \text{ mm} \in [100; 300] \text{ mm}$$

$$\emptyset = 20 \text{ mm}$$

$$A_\emptyset = 314,1593 \text{ mm}^2, \quad n = 1 + \text{int} \left(\frac{3510}{314,1593} \right) = 12,$$

$$s = \frac{3900 - 2 \cdot 80 - 20}{12 - 1} = 338,1889 \text{ mm} \notin [100; 300] \text{ mm}$$

El CTE indica que se debe seleccionar el diámetro máximo que cumpla las condiciones, porque de este modo se obtiene una menor superficie específica y por tanto se disminuye el riesgo de corrosión y presenta un menor coste de fabricación. Por todo ello, para el sistema de estudio del presente proyecto se selecciona un arreglo de armado con:

- Diámetro de las barras: 16 mm.
- Nº de barras: 18 barras.
- Separación de los ejes de barras: 219,0588 mm.

Cabe destacar que al consistir en un sistema en que la cimentación es cuadrada ($a=b$), el arreglo de armado es igual en cada dirección del mismo.

3. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En el presente proyecto se realiza el dimensionado y cálculo de una estructura disco parabólica de una central solar en Xàtiva (Valencia). Todo el proyecto se ha realizado siguiendo la normativa vigente.

Para empezar, mediante una documentación de sistemas discos parabólicos reales, se fijan las medidas características de la estructura: longitud de las barras, longitud del pilar base, altura que presentará el sistema de estudio...

Una vez obtenidas todas estas medidas, se diseña la estructura en AutoCAD. Este paso resulta imprescindible en la realización del proyecto, tiene lugar para la introducción de la estructura en el software de cálculo, el SAP2000.

Seguidamente, se procede al cálculo de la presión que ejerce el viento sobre la estructura. Para la realización de dicho cálculo se han seguido las directrices del Eurocódigo 1.4: Acciones en Estructuras. Acciones de Viento.

Las cargas calculadas se introducen en el punto de aplicación de la estructura en función de la posición en la que se encuentre el sistema disco parabólico. Una vez introducidas las cargas, se comprueban las condiciones necesarias para garantizar la seguridad de las personas (ELU, ELS, Cimentación y Placa de Anclaje). Dichas comprobaciones se realizan mediante las combinaciones pertinentes en el programa de cálculo y con ayuda de Excel y de la normativa vigente en cuanto a comprobaciones estructurales en España (CTE, EHE, EAE).

Además, se elabora el presupuesto del proyecto con ayuda del software Arquímedes de CYPE, cuyo valor asciende a la cantidad de 15.255,98 €

Finalmente, para la completa definición del proyecto, se elaboran los planos de la estructura, detallando los aspectos técnicos más importantes, como las articulaciones de la base, la cimentación o la placa de anclaje.

PRESUPUESTO

4. Presupuestos parciales

Presupuesto parcial nº1 MOVIMIENTO DE TIERRAS

Num.	Código	Ud	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
1.1	ADL010	m ²	Desbroce y limpieza del terreno, profundidad mínima de 25 cm, con medios manuales, retirada de los materiales excavados y carga a camión, sin incluir transporte a vertedero autorizado.	100,000	4,97	497
1.2	ADE010	m ³	Excavación en zanjas para cimentaciones en cualquier tipo de terreno, con medios mecánicos, retirada de los materiales excavados y carga a camión.	7,700	27,83	214,291
Total presupuesto parcial nº1 MOVIMIENTO DE TIERRAS:						711,29

Presupuesto parcial nº2 CIMENTACIONES

Num.	Código	Ud	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
2.1	CSZ010	m ³	Zapata de cimentación de hormigón armado HA-25/B/20/IIa fabricado en central y vertido desde camión, acero UNE-EN 10080 B 500 S, cuantía 50 kg/m ³ .	3,850	142,34	548,01
2.2	CSZ015	m ³	Hormigón de limpieza HM-10/B/20/I fabricado en central y vertido desde camión.	2,695	79,34	213,82
2.3	EAS006b	Ud	Placa de anclaje de acero S275JR en perfil plano, de 728x708 mm y espesor 20 mm, con 4 pernos de acero corrugado UNE-EN 10080 B 500 S de 25 mm de diámetro y 63 cm de longitud total, atornillados con arandelas, tuerca y contratuerca.	1,000	259,37	259,37
Total presupuesto parcial nº2 CIMENTACIONES:						1.021,20

Presupuesto parcial nº3 ESTRUCTURA

Num.	Código	Ud	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
3.1	EAV010	kg	Perfiles redondos de acero S275JR laminados en caliente con uniones soldadas i.i parte proporcional de soldaduras y montaje	1.608,865	2,50	4.022,16
Total presupuesto parcial nº3 ESTRUCTURA:						4.022,16

Presupuesto parcial nº4 CALIDAD Y ENSAYOS

Num.	Código	Ud	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
4.1	XMP010	Ud	Ensayo destructivo sobre una muestra de perfil laminado, con determinación de: límite elástico aparente, resistencia a tracción, módulo de elasticidad, alargamiento y estricción.	1,000	194,36	194,36
4.2	XMP020	Ud	Ensayo de aptitud al soldeo sobre una muestra soldada de perfil laminado, con determinación de: disminución de la carga total de rotura.	2,000	194,36	388,72
4.3	XMS010	Ud	Inspección visual sobre una unión soldada.	5,000	65,64	328,20
4.4	XEB010	Ud	Ensayo sobre una muestra de barras de acero corrugado de un mismo lote, con determinación de: sección media equivalente, características geométricas del corrugado, doblado/desdoblado.	1,000	86,92	86,92
4.5	XEH010	Ud	Ensayo sobre una muestra de hormigón con determinación de: consistencia del hormigón fresco mediante el método de asentamiento del cono de Abrams y resistencia característica a compresión del hormigón endurecido mediante control estadístico con fabricación de seis probetas, curado, refrentado y rotura a compresión.	1,000	94,55	94,55
Total presupuesto parcial nº4 CALIDAD Y ENSAYOS:						1.092,75

Presupuesto parcial nº5 GESTIÓN DE RESIDUOS

Num.	Código	Ud	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
5.1	GTA010	m ³	Transporte de tierras con camión a vertedero específico, instalación de tratamiento de residuos de construcción y demolición externa a la obra o centro de valorización o eliminación de residuos, situado a una distancia máxima de 10 km.	1,000	5,44	5,44
5.2	GRA010	Ud	Transporte de residuos inertes metálicos producidos en obras de construcción y/o demolición, con contenedor de 7 m ³ , a vertedero específico, instalación de tratamiento de residuos de construcción y demolición externa a la obra o centro de valorización o eliminación de residuos.	1,000	212,07	212,07
5.3	GRA010b	Ud	Transporte de residuos inertes de hormigón producidos en obras de construcción y/o demolición, con contenedor de 1,5 m ³ , a vertedero específico, instalación de tratamiento de residuos de construcción y demolición externa a la obra o centro de valorización o eliminación de residuos.	1,000	65,25	65,25
Total presupuesto parcial nº5 GESTIÓN DE RESIDUOS:						282,76

Presupuesto parcial nº6 SEGURIDAD Y SALUD

Num.	Código	Ud	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
6.1	F01	Ud	Partida alzada en materia de seguridad y salud.	1,000	375,00	375,00
Total presupuesto parcial nº6 SEGURIDAD Y SALUD:						375,00

Presupuesto parcial nº7 REDACCIÓN DE PROYECTO Y TRABAJO DE INGENIERÍA

Num.	Código	Ud	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
7.1	C01	Ud	Partida alzada que incluye todos los trabajos de ingeniería incluidos en el proyecto: Estudio de viabilidad, Redacción de proyecto, Dirección de obra.	1,000	3.090,00	3.090,00
Total presupuesto parcial nº7 REDACCIÓN DE PROYECTO Y TRABAJO DE INGENIERÍA:						3.090,00

4.1. Resumen del presupuesto

P. parcial nº1	Movimiento de tierras	711,29 €
P. parcial nº2	Cimentaciones	1.021,20 €
P. parcial nº3	Estructura	4.022,16 €
P. parcial nº4	Calidad y ensayos	1.092,75 €
P. parcial nº5	Gestión de residuos	282,76 €
P. parcial nº6	Seguridad y salud	375,00 €
P. parcial nº7	Redacción de proyecto y trabajo de ingeniería	3.090,00 €
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)		10.595,16 €
	Gastos generales (13% PEM)	1.377,37 €
	Beneficio industrial (6% PEM)	635,71 €
PRESUPUESTO BRUTO		12.608,24 €
	IVA (21%)	2.647,73 €
TOTAL PRESUPUESTO CONTRATA		15.255,98 €

El presupuesto de ejecución por contrata asciende a la expresada cantidad de **QUINCE MIL DOSCIENTOS CINCUENTA Y CINCO EUROS CON NOVENTA Y OCHO CÉNTIMOS.**

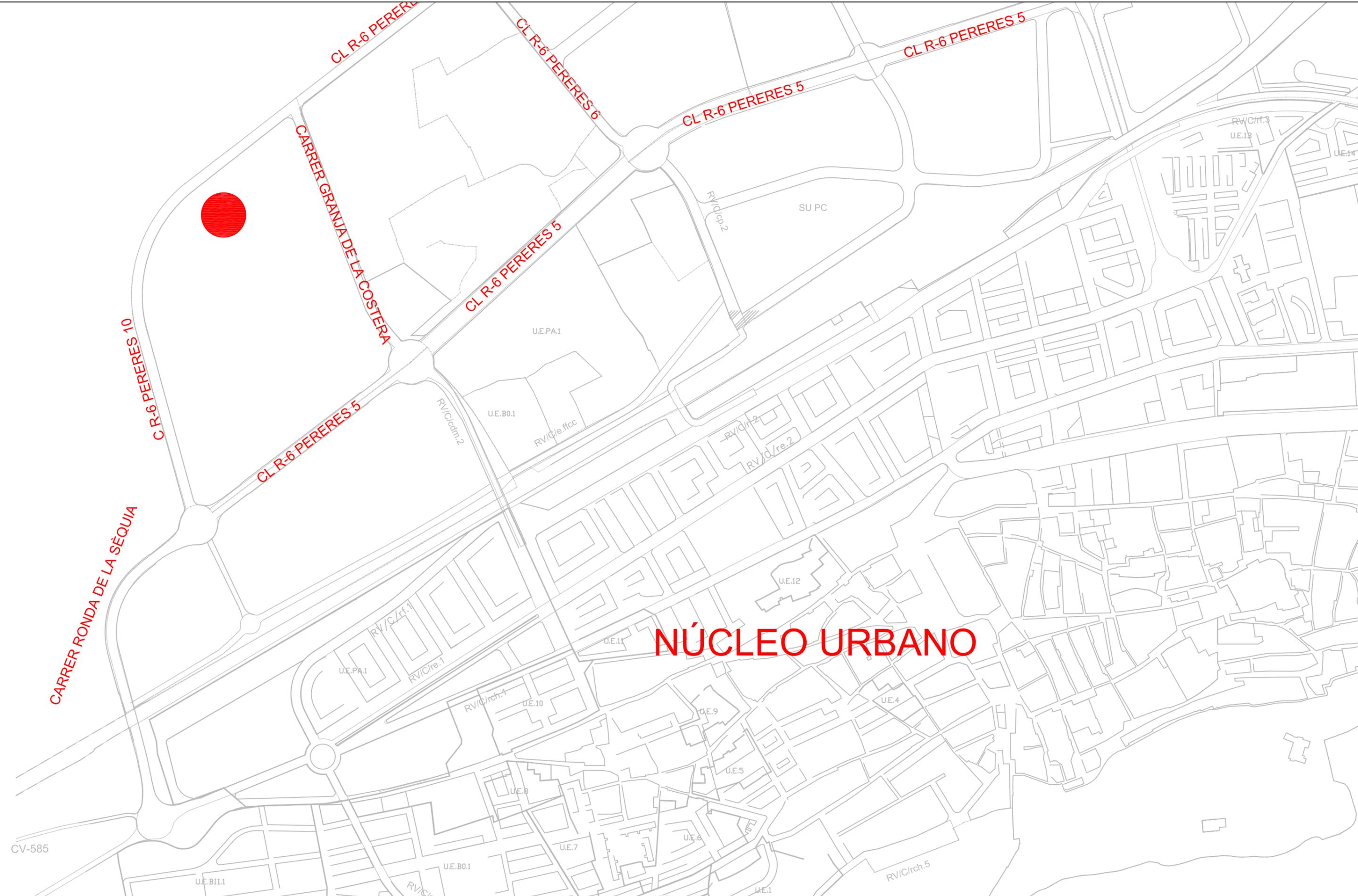
5. Bibliografía

- Libro: Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments and Applications.
- laenergiasolar.org
- Apuntes de PoliformaT de Tecnología Energética.
- Código Técnico de la Edificación y sus documentos básicos (DB-SE, DB-AE, DB-SE A, DB-SE C).
- Eurocódigo 1.1: Acciones en Estructuras. Acciones generales. Pesos específicos, pesos propios y sobrecargas de uso.
- Eurocódigo 1.3: Acciones en Estructuras. Acciones generales. Cargas de nieve.
- Eurocódigo 1.4: Acciones en Estructuras. Acciones generales. Cargas de viento.
- Repositorio Institucional UPV (RiuNet).
- Apuntes de PoliformaT de Tecnología de la Construcción.
- EAE Instrucción de Acero Estructural.
- EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural.
- PGOU Xàtiva.

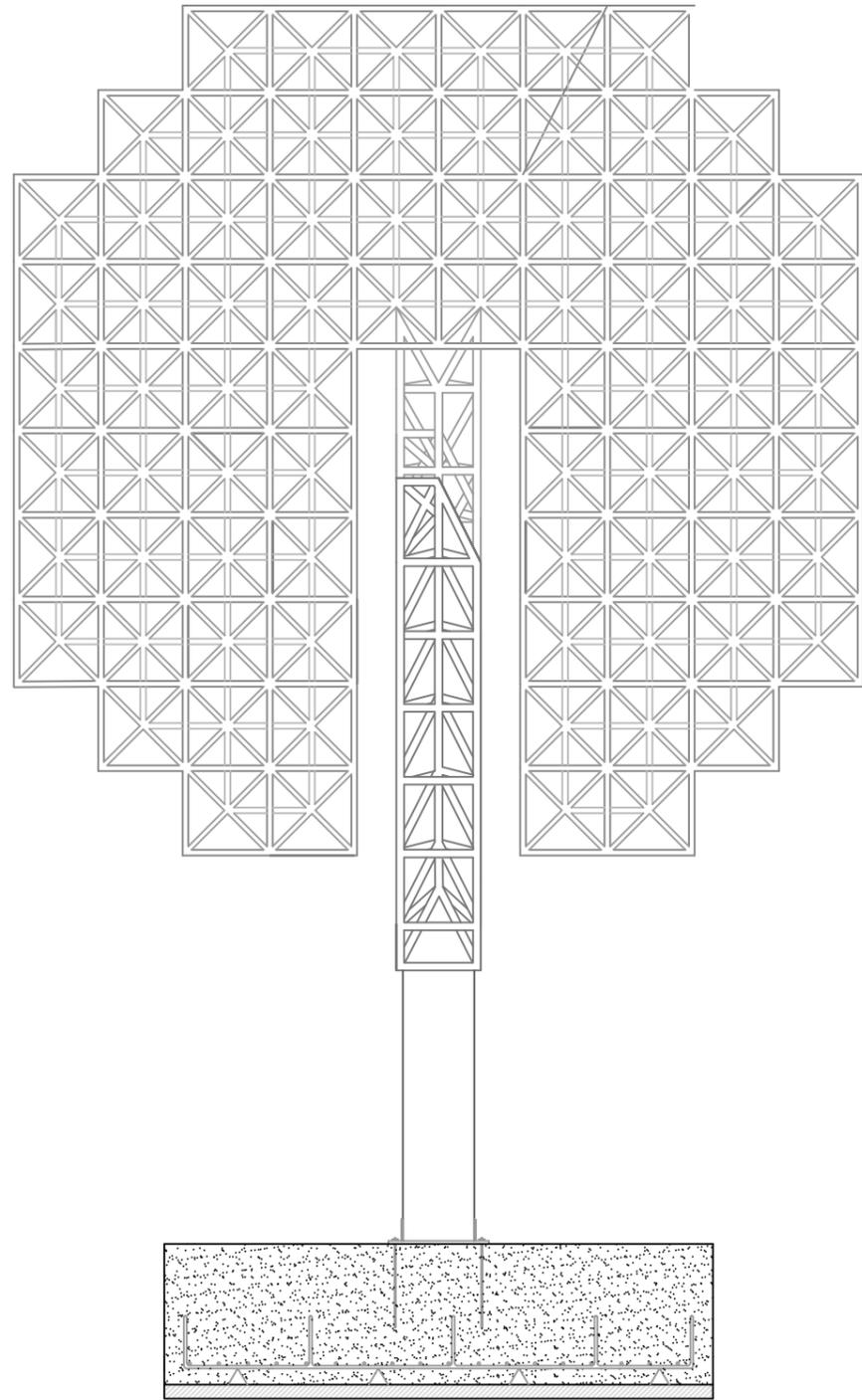
6. Software

- SAP2000 v16. CSI América.
- AutoCAD2014. Autodesk.
- Microsoft Office (Word, Excel, Powerpoint, Access).
- Arquimedes. CYPE.

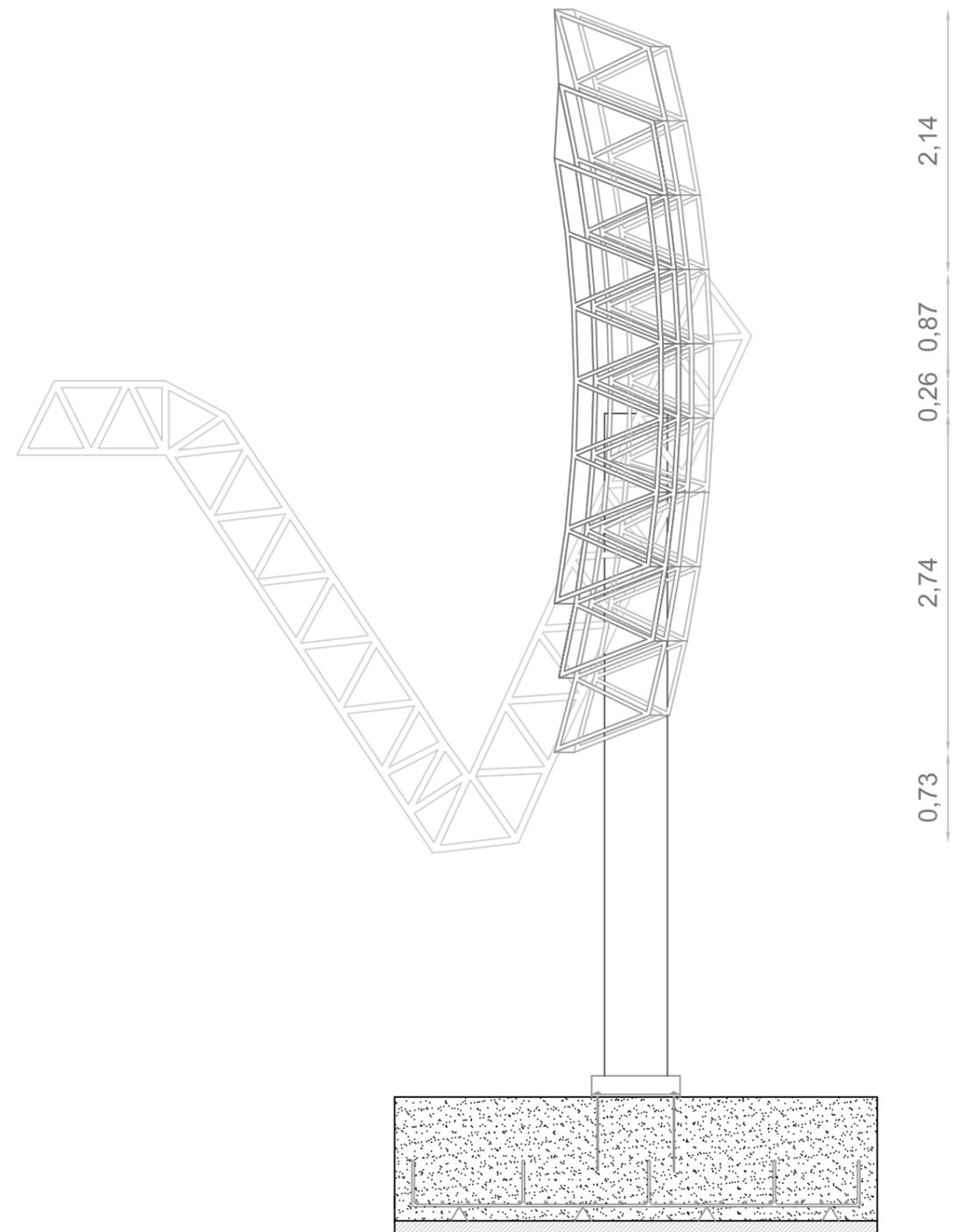
PLANOS



NÚCLEO URBANO

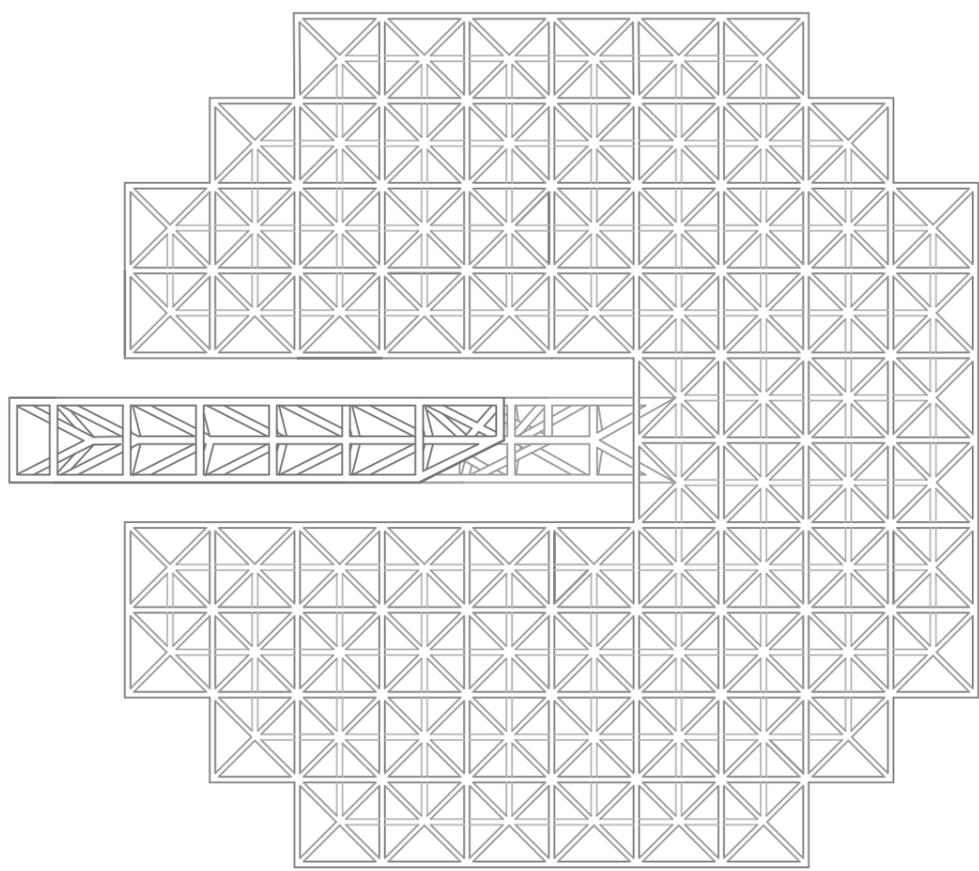


ALZADO



PERFIL

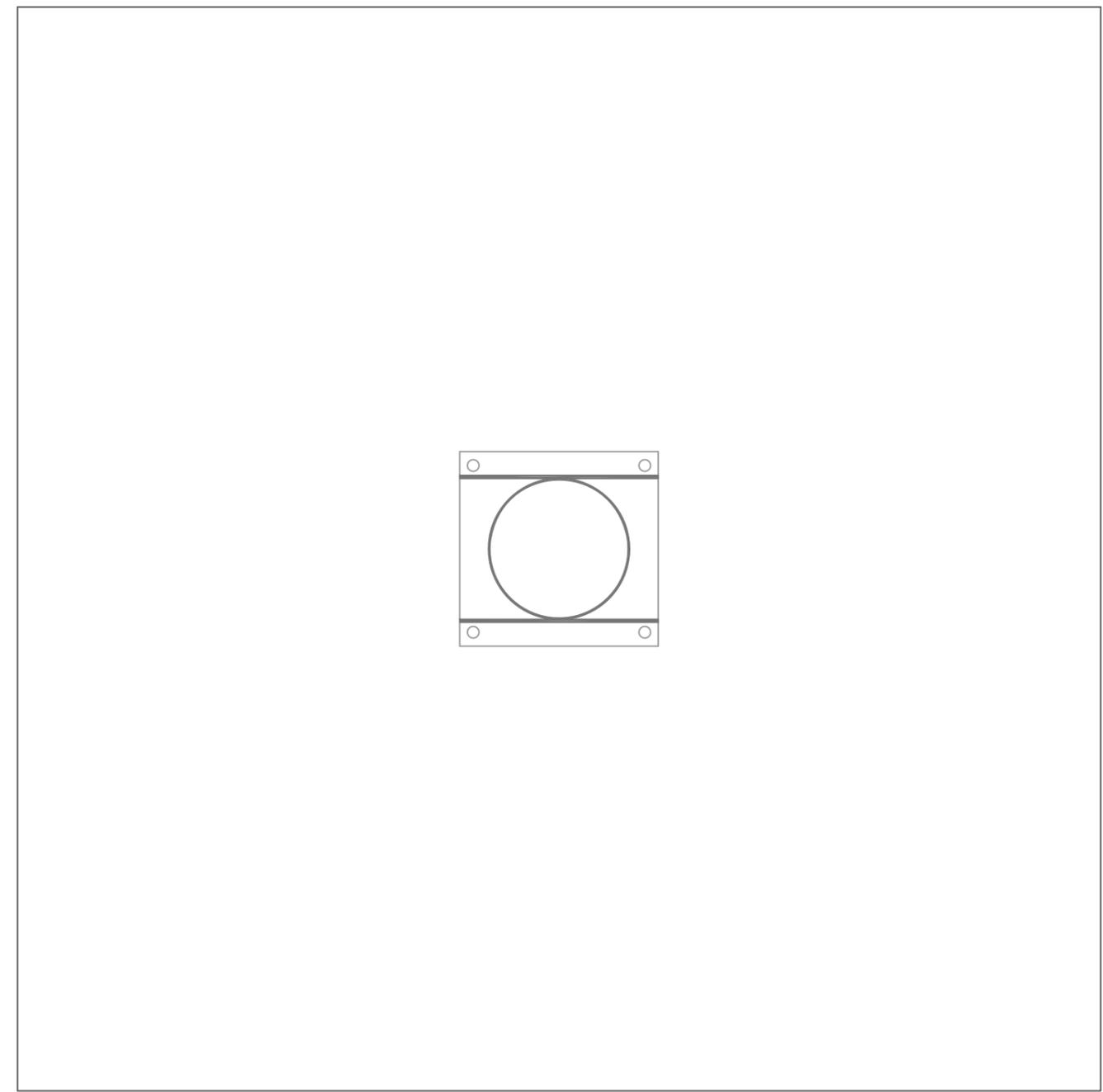
0,83 0,6 0,6 3,6 0,6 0,6



PLANTA

6,04

1,6 0,05 0,6 0,05 1,6



DETALLE

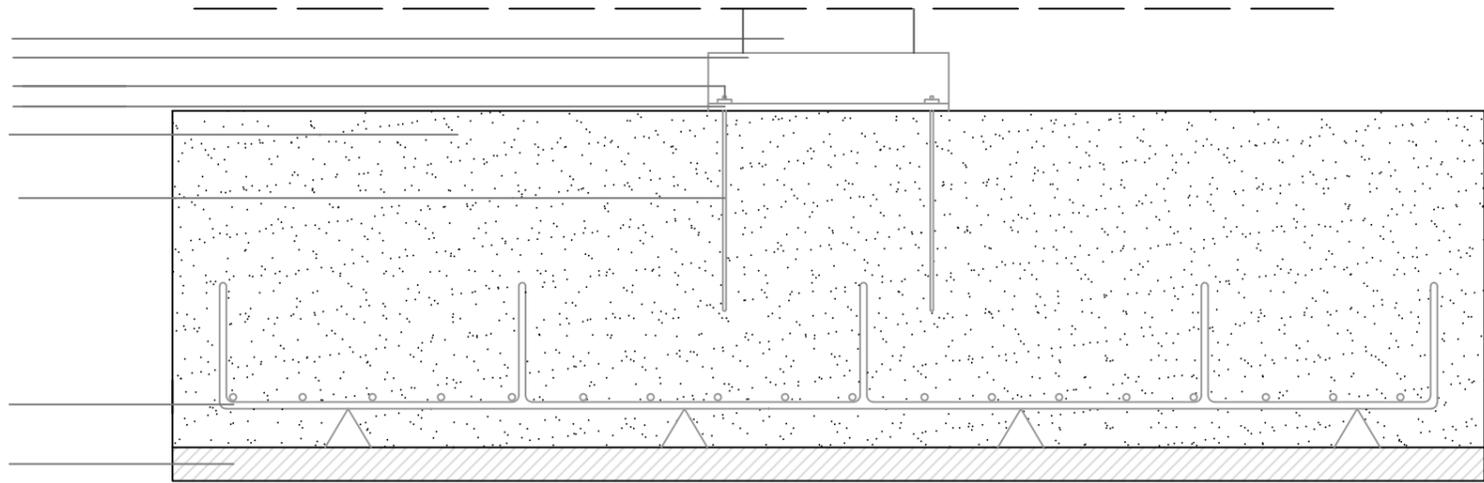
E: 1/20

- SOPORTE METÁLICO CIRCULAR Ø 508
- CARTELA 728X150X10 mm
- PERNOS ROSCADOS M25
- PLACA DE ANCLAJE 708X728X22 mm
- ZAPTA DE HORMIGÓN ARMADO H25

PERNOS Ø25

Ø16/22 cm

HORMIGÓN DE LIMPIEZA



0,17 1 0,1