



GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

2014 / 2015

*GRÚA PORTUARIA PARA ELEVACIÓN DE
EMBARCACIONES*

DOCUMENTO 3. ANEXOS

DATOS DE LA ALUMNA O DEL ALUMNO

NOMBRE: ADRIANA

APELLIDOS: BARATO GONZÁLEZ

FDO.:

FECHA:

DATOS DEL DIRECTOR O DE LA DIRECTORA

NOMBRE: ERIK

APELLIDOS: MACHO MIER

DEPARTAMENTO: INGENIERÍA MECÁNICA

FDO.:

FECHA:

ÍNDICE ANEXOS

ANEXO 1: Documentación de partida	20
3.1. Resumen de las dimensiones y características principales de la grúa.....	20
ANEXO 2: Cálculo de la estructura de la grúa	23
3.2. Dimensionamiento de la estructura.....	23
3.2.1. Introducción	23
3.2.2. Determinación de solicitaciones.....	24
3.2.2.1. Clasificación del aparato en función del servicio	24
<i>Vida del mecanismo</i>	<i>24</i>
<i>Estado de carga</i>	<i>25</i>
<i>Clasificación del aparato</i>	<i>25</i>
3.2.2.2. Descripción y evaluación de solicitaciones sobre la estructura	26
<i>Solicitaciones principales</i>	<i>27</i>
<i>Solicitaciones debidas a movimientos verticales.....</i>	<i>27</i>
<i>Solicitaciones debidas a movimientos horizontales</i>	<i>29</i>
<i>Solicitaciones debidas a efectos climáticos</i>	<i>29</i>
<i>Determinación de combinaciones de solicitaciones</i>	<i>36</i>
<i>Método empleado en el cálculo</i>	<i>38</i>
3.2.2.3. Resolución de cálculos solicitaciones	41
3.2.3. Esfuerzos producidos en la grúa.....	55
3.2.3.1. Reacciones producidas en la estructura	55

3.2.3.2. Resolución de cálculos reacciones	57
3.2.4. Dimensionamiento del contrapeso	61
3.2.5. Dimensionamiento y cálculo de la pluma	66
3.2.5.1. Consideraciones generales	66
3.2.5.2. Planteamiento de la pluma	72
3.2.5.3. Determinación de solicitaciones en la pluma	75
3.2.5.4. Casos de combinación de solicitaciones	75
3.2.5.5. Resolución de cálculos pluma	81
3.2.6. Dimensionamiento y cálculo de la columna	95
3.2.6.1. Consideraciones generales	95
3.2.6.2. Planteamiento de la columna	99
3.2.6.3. Determinación de solicitaciones en la columna	100
3.2.6.4. Casos de combinación de solicitaciones	101
3.2.6.5. Resolución de cálculos columna	103
3.2.6.6. Resolución de cálculos redimensionamiento columna	116
3.2.7. Dimensionamiento y cálculo de la cimentación y el anclaje	140
3.2.7.1. Dimensionamiento de la zapata	140
<i>Consideraciones generales</i>	140
<i>Planteamiento de la cimentación</i>	142
<i>Presión máxima sobre el terreno en función de las dimensiones de la zapata</i>	146
<i>Momento flector por la acción del viento respecto de la base de la zapata</i>	146
<i>Determinación de combinaciones de solicitaciones</i>	148

<i>Acciones sobre la zapata</i>	149
<i>Consideraciones del vuelo máximo</i>	151
<i>Verificación de la estabilidad del cimiento</i>	151
<i>Comprobación de la seguridad frente al hundimiento</i>	153
<i>Comprobación de la seguridad frente al deslizamiento</i>	155
<i>Comprobación de la seguridad frente al vuelco</i>	156
<i>Resolución de cálculos dimensionamiento zapata</i>	157
3.2.7.2. Anclaje de la columna de la grúa	169
<i>Placa de anclaje</i>	170
<i>Consideraciones generales</i>	170
<i>Acciones sobre la placa de anclaje</i>	171
<i>Cálculo de las dimensiones de la placa</i>	171
<i>Cálculo del espesor de la placa de anclaje</i>	174
<i>Pernos de anclaje</i>	176
<i>Resolución de cálculos sistema de anclaje</i>	183
3.2.7.3. Armadura de la zapata	189
<i>Comprobaciones a realizar para el cálculo de zapata rígida</i>	189
<i>Cálculo a flexión</i>	189
<i>Determinación de la armadura</i>	193
<i>Disposición y distribución de las barras de la armadura</i>	197
<i>Anclaje de las armaduras</i>	198
<i>Comprobación a esfuerzo cortante</i>	200

<i>Comprobación a fisuración</i>	201
<i>Resolución de cálculos armadura zapata</i>	203
3.2.7.4. Resumen de la cimentación	212
3.2.8. Elección grúa con contrapeso frente a grúa sin contrapeso	214
ANEXO 3: Cálculo de los elementos de la grúa	216
3.3. Dimensionado de los elementos	216
3.3.1. Elección del rodamiento de gran diámetro	216
3.3.1.1. Introducción	216
3.3.1.2. Diseño constructivo del rodamiento	216
3.3.1.3. Cargas sobre el rodamiento	217
3.3.1.4. Factores de carga para la selección del rodamiento	223
3.3.1.5. Características de la selección	225
3.3.1.4. Selección del rodamiento	226
3.3.1.6. Especificaciones del rodamiento	228
3.3.1.7. Tornillos de fijación	231
3.3.1.8. Resolución de cálculos rodamiento de giro	234
3.3.2. Conjunto motor-reductor	242
3.3.2.1. Solicitaciones sobre la corona	242
3.3.2.2. Elección del reductor	243
3.3.2.3. Dimensiones del reductor	248
3.3.2.4. Elección del motor	249
3.3.2.5. Resolución de cálculos motor-reductor	255

3.3.3. Acoplamiento flexible	259
3.3.4. Cálculo del piñón de giro	261
3.3.4.1. Introducción	261
3.3.4.2. Dimensionamiento geométrico del piñón de giro	262
3.3.4.3. Comprobaciones	265
3.3.4.4. Resolución de cálculos piñón de giro	285
3.3.5. Mecanismo de elevación y traslación.....	289
3.3.5.1. Introducción	289
3.3.5.2. Elección del polipasto	290
3.3.5.3. Especificaciones del polipasto	294
3.3.5.4. Topes final de carrera	295
3.3.5.5. Selección del carril de rodadura	295
ANEXO 4: Hojas especificaciones fabricantes	297
3.4. Prontuario de perfiles metálicos, APTA.....	297
3.4.1. Perfiles IPE - Medidas, masas y datos de sección	297
3.5. Grandes Rodamientos, <i>Rothe Erde</i>	298
3.6. Reductores, <i>Bonfiglioli</i>	298
3.7. Motores, <i>Bonfiglioli</i>	298
3.8. Acoplamientos flexibles, <i>Escogear</i>	298
3.9. Polipastos de cable, <i>DEMAG</i>.....	298
3.10. Rodamientos de bolas, <i>SKF</i>.....	298

ANEXO 5: Dimensionamiento final	300
3.11. Redimensionamiento del contrapeso	300
3.12. Uniones	305
3.12.1. Criterios de comprobación	305
3.12.2. Uniones soldadas	306
3.12.2.1. Introducción	306
3.12.2.2. Soldadura por arco eléctrico	308
3.12.2.3. Manantiales de corriente	312
3.12.2.4. El cordón de soldadura	312
3.12.2.5. Clasificación de los cordones de soldadura	313
3.12.2.6. Tensiones residuales	321
3.12.2.7. Defectos de las soldaduras	324
3.12.2.8. Supervisión e inspección	325
3.12.2.9. Clases de calidad	327
3.12.2.10. Dimensiones fundamentales del cordón de soldadura	327
3.12.2.11. Cálculo de soldaduras	328
<i>Soldaduras a tope</i>	329
<i>Resistencia de cálculo de las soldaduras a tope con penetración parcial</i> ...	330
<i>Soldaduras en ángulo</i>	331
<i>Resistencia de cálculo de las soldaduras en ángulo</i>	333
<i>Determinación de esfuerzos que solicitan a los cordones y condiciones que deben cumplir</i>	337
<i>Dimensionado del espesor de garganta del cordón de soldadura</i>	338

<i>Dimensionado de la longitud del cordón de soldadura</i>	340
<i>Obtención de la longitud del cordón de soldadura necesaria para transmitir un esfuerzo F_{Ed}</i>	340
<i>Obtención de la resistencia de un cordón de soldadura determinado</i>	340
3.12.2.12. Disposiciones constructivas	341
3.12.2.13. Cálculo de las soldaduras presentes	344
<i>Cálculo de la unión del alma con las platabandas</i>	345
<i>Cálculo de la soldadura entre la pluma y la placa superior</i>	346
<i>Cálculo a compresión</i>	347
<i>Cálculo a flexión</i>	348
<i>Cálculo a torsión</i>	351
3.12.2.14. Resolución de cálculos uniones soldadas	353
3.12.2.15. Redimensionamiento de la estructura debido a la soldadura pluma-placa superior	356
3.12.2.16. Resolución de cálculos redimensionamiento soldadura pluma-placa superior	357
3.12.3. Uniones atornilladas	360
3.12.3.1. Introducción	360
3.12.3.2. Características de los tornillos	361
<i>Características mecánicas del material</i>	361
<i>Tornillos no pretensados</i>	362
<i>Tornillos pretensados</i>	364
3.12.3.3. Modos de fallo	367
3.12.3.4. Categorías de uniones atornilladas	368

<i>3.12.3.5. Expresiones para el cálculo de resistencias de uniones atornilladas sin pretensar</i>	369
<i>3.12.3.6. Disposiciones constructivas</i>	370
<i>3.12.3.7. Cálculo de las uniones atornilladas presentes</i>	372
<i>3.12.3.8. Resolución de cálculos uniones atornilladas</i>	374
3.13. Diseño final	376

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Dimensiones principales para el caso de grúa sin contrapeso</i>	21
<i>Figura 2. Dimensiones principales para el caso de grúa con contrapeso</i>	22
<i>Figura 3. Parámetros del coeficiente de sombra</i>	33
<i>Figura 4. Proceso de diseño de la grúa</i>	40
<i>Figura 5. Solicitaciones que actúan sobre la estructura para el caso de grúa sin contrapeso</i>	45
<i>Figura 6. Fuerzas debidas al viento sobre la estructura para el caso de grúa sin contrapeso</i>	45
<i>Figura 7. Solicitaciones que actúan sobre la estructura para el caso de grúa con contrapeso</i>	53
<i>Figura 8. Fuerzas debidas al viento sobre la estructura para el caso de grúa con contrapeso</i>	53
<i>Figura 9. Fuerzas debidas al peso propio y reacciones para el caso de grúa sin contrapeso</i>	58
<i>Figura 10. Fuerzas debidas al peso propio y reacciones para el caso de grúa con contrapeso</i>	60
<i>Figura 11. Momentos flectores en la pluma debidos al peso propio del contrapeso y de la carga</i>	61
<i>Figura 12. Esquema de momentos flectores en la pluma debidos al peso propio del</i>	

<i>contrapeso y de la carga</i>	62
<i>Figura 13. Vista superior del contrapeso y parte de la contrapluma</i>	63
<i>Figura 14. Dimensiones del contrapeso</i>	63
<i>Figura 15. Configuración 1 del contrapeso</i>	64
<i>Figura 16. Configuración 2 del contrapeso</i>	64
<i>Figura 17. Configuración final del contrapeso</i>	65
<i>Figura 18. Momentos flectores en la pluma debidos al peso propio del contrapeso y de la carga para la configuración final del contrapeso</i>	65
<i>Figura 19. Perfil rectangular hueco no normalizado</i>	68
<i>Figura 20. Centro de gravedad del conjunto</i>	69
<i>Figura 21. Momento de inercia respecto al eje y'</i>	70
<i>Figura 22. Esfuerzos en la sección más crítica de la pluma para el caso de grúa sin contrapeso</i>	74
<i>Figura 23. Esfuerzos en la sección más crítica de la pluma para el caso de grúa con contrapeso</i>	74
<i>Figura 24. Fuerzas debidas al peso propio y reacciones en la pluma para el caso de grúa sin contrapeso</i>	87
<i>Figura 25. Fuerzas debidas al peso propio y reacciones en la pluma para el caso de grúa con contrapeso</i>	94
<i>Figura 26. Perfil de la columna para el caso de grúa sin contrapeso</i>	96
<i>Figura 27. Perfil de la columna para el caso de grúa con contrapeso</i>	97
<i>Figura 28. Esfuerzos en la sección más crítica de la columna</i>	100
<i>Figura 29. Fuerzas debidas al peso propio y reacciones en la columna para el caso de grúa sin contrapeso</i>	108
<i>Figura 30. Fuerzas debidas al peso propio y reacciones en la columna para el caso de grúa con contrapeso</i>	115

<i>Figura 31. Cimentación directa</i>	140
<i>Figura 32. Zapata aislada</i>	141
<i>Figura 33. Macizo de anclaje</i>	143
<i>Figura 34. Posibles posiciones de la pluma</i>	144
<i>Figura 35. Zapata rígida/flexible</i>	151
<i>Figura 36. Comprobación de la estabilidad estructural</i>	152
<i>Figura 37. Casos de distribuciones de tensiones bajo una zapata</i>	153
<i>Figura 38. Distribución trapecial de tensiones</i>	154
<i>Figura 39. Distribución triangular de tensiones</i>	155
<i>Figura 40. Estabilidad al vuelco</i>	156
<i>Figura 41. Placa anclada al hormigón mediante redondos</i>	169
<i>Figura 42. Unión mediante pernos de anclaje</i>	170
<i>Figura 43. Ley de repartición uniforme en una zona de la placa</i>	173
<i>Figura 44. Aproximación viga apoyada sobre cartelas</i>	175
<i>Figura 45. Momento máximo en el vano</i>	175
<i>Figura 46. Momento máximo en el voladizo</i>	175
<i>Figura 47. Longitud de anclaje perno</i>	180
<i>Figura 48. Distribución de tensiones en la zapata</i>	190
<i>Figura 49. Cálculo a flexión en zapatas aisladas</i>	190
<i>Figura 50. Vuelo de cálculo en una zapata con pilar metálico</i>	191
<i>Figura 51. Red de isostáticas de una zapata aislada</i>	191
<i>Figura 52. Modelización de una zapata rígida según el método de bielas y tirantes</i>	192

<i>Figura 53. Hormigón de limpieza (solera de asiento)</i>	<i>196</i>
<i>Figura 54. Obtención de σ_d.....</i>	<i>200</i>
<i>Figura 55. Sección de referencia en la comprobación a esfuerzo cortante</i>	<i>201</i>
<i>Figura 56. Rodamiento de gran diámetro serie KD 600 Rothe Erde</i>	<i>217</i>
<i>Figura 57. Transmisión de esfuerzos rodamiento</i>	<i>218</i>
<i>Figura 58. Ejemplo de las solicitaciones a considerar para la selección de un rodamiento.....</i>	<i>219</i>
<i>Figura 59. Fuerzas a considerar para la selección del rodamiento para el caso de grúa sin contrapeso</i>	<i>222</i>
<i>Figura 60. Fuerzas a considerar para la selección del rodamiento para el caso de grúa con contrapeso</i>	<i>222</i>
<i>Figura 61. Sección característica de la serie KD 600 para el caso de grúa sin contrapeso</i>	<i>229</i>
<i>Figura 62. Sección característica de la serie KD 600 para el caso de grúa con contrapeso</i>	<i>231</i>
<i>Figura 63. Carga axial “asentada”</i>	<i>232</i>
<i>Figura 64. Carga axial “suspendida”</i>	<i>232</i>
<i>Figura 65. Acoplamiento</i>	<i>249</i>
<i>Figura 66. Entrada reductor</i>	<i>249</i>
<i>Figura 67. Nomenclatura engranajes de dientes rectos.....</i>	<i>265</i>
<i>Figura 68. Carro birraíl EZDR, DEMAG.....</i>	<i>289</i>
<i>Figura 69. Tipo de solicitud, DEMAG</i>	<i>290</i>
<i>Figura 70. Disposición del cable de 4/1</i>	<i>291</i>
<i>Figura 71. Perfil tipo Llanton</i>	<i>295</i>
<i>Figura 72. Bloque de hormigón 1</i>	<i>300</i>

<i>Figura 73. Bloque de hormigón 2</i>	300
<i>Figura 74. Bloque de hormigón 3</i>	301
<i>Figura 75. Bloques de hormigón 4</i>	301
<i>Figura 76. Bloque de hormigón 5</i>	301
<i>Figura 77. Bloques de hormigón 6</i>	302
<i>Figura 78. Bloques de hormigón 7</i>	302
<i>Figura 79. Bloque de hormigón 8</i>	302
<i>Figura 80. Bloques de hormigón 9</i>	303
<i>Figura 81. Bloque de hormigón 10</i>	303
<i>Figura 82. Bloque de hormigón 11</i>	303
<i>Figura 83. Bloque de hormigón 12</i>	304
<i>Figura 84. Soldadura autógena</i>	308
<i>Figura 85. Soldadura por arco eléctrico</i>	308
<i>Figura 86. Soldadura por arco manual con electrodos revestidos</i>	310
<i>Figura 87. Partes del cordón de soldadura</i>	313
<i>Figura 88. Soldaduras a tope de penetración completa de chapas situadas en un mismo plano</i>	314
<i>Figura 89. Penetración total de soldaduras a tope</i>	315
<i>Figura 90. Penetración parcial de soldaduras a tope</i>	315
<i>Figura 91. Disposiciones correctas e incorrectas de cordones de soldadura en ángulo a tope de penetración parcial</i>	316
<i>Figura 92. Tipos de cordones de soldadura</i>	317
<i>Figura 93. Cordones de ángulo</i>	318

<i>Figura 94. Prolongación en las esquinas de los cordones de ángulo.....</i>	<i>318</i>
<i>Figura 95. Clasificación del cordón de soldadura por la posición de este respecto al esfuerzo.....</i>	<i>320</i>
<i>Figura 96. Clasificación del cordón de soldadura por la posición de este durante la operación a soldar.....</i>	<i>321</i>
<i>Figura 97. Tensiones residuales de una soldadura a tope.....</i>	<i>322</i>
<i>Figura 98. Cruces de cordones de soldadura.....</i>	<i>323</i>
<i>Figura 99. Cordón paralelo a las tensiones.....</i>	<i>323</i>
<i>Figura 100. Cordón transversal a las tensiones.....</i>	<i>324</i>
<i>Figura 101. Defectos de las soldaduras.....</i>	<i>325</i>
<i>Figura 102. Longitud eficaz cordón de soldadura.....</i>	<i>328</i>
<i>Figura 103. Plano de garganta de un cordón de soldadura.....</i>	<i>328</i>
<i>Figura 104. Ejecución de soldaduras a tope.....</i>	<i>329</i>
<i>Figura 105. Soldadura a tope en T.....</i>	<i>331</i>
<i>Figura 106. Triángulo isósceles que define el cordón de soldadura.....</i>	<i>331</i>
<i>Figura 107. Plano definido por la altura a.....</i>	<i>331</i>
<i>Figura 108. Abatimiento de la sección de garganta.....</i>	<i>332</i>
<i>Figura 109. Tensiones abatidas en el cordón de soldadura.....</i>	<i>333</i>
<i>Figura 110. Descomposición de los esfuerzos transmitidos por unidad de longitud.....</i>	<i>338</i>
<i>Figura 111. Espesor nominal en e_n un perfil de borde redondeado.....</i>	<i>339</i>
<i>Figura 112. Dimensiones relevantes en los cordones de soldadura para comprobar los requisitos relativos a las disposiciones constructivas.....</i>	<i>344</i>
<i>Figura 113. Unión del alma con platabandas.....</i>	<i>346</i>
<i>Figura 114. Cordones de soldadura unión pluma-placa superior.....</i>	<i>347</i>

<i>Figura 115. Calculo de un cordón frontal</i>	<i>348</i>
<i>Figura 116. Unión soldada resistiendo a flexión con cordones frontales transversales</i>	<i>348</i>
<i>Figura 117. Criterio de signos para las tensiones en un cordón de soldadura</i>	<i>350</i>
<i>Figura 118. Unión con sólo cordones laterales</i>	<i>352</i>
<i>Figura 119. Cordones de soldadura unión pluma-placa superior (redimensionamiento).....</i>	<i>356</i>
<i>Figura 120. Tornillo</i>	<i>360</i>
<i>Figura 121. Tornillo ordinario.....</i>	<i>362</i>
<i>Figura 122. Longitud de apretadura</i>	<i>362</i>
<i>Figura 123. Rosca ISO</i>	<i>363</i>
<i>Figura 124. Tornillos pretensados</i>	<i>365</i>
<i>Figura 125. Unión atornillada pretensada</i>	<i>365</i>
<i>Figura 126. Distribución de tensiones en tornillos</i>	<i>366</i>
<i>Figura 127. Tornillo de alta resistencia (pretensado)</i>	<i>366</i>
<i>Figura 128. Nomenclatura de cada disposición de tornillos</i>	<i>372</i>
<i>Figura 129. Grúa portuaria para elevación de embarcaciones (isométrica).....</i>	<i>376</i>

ÍNDICE DE GRÁFICAS

<i>Gráfica 1. Representación de los valores de ξ.....</i>	<i>28</i>
<i>Gráfica 2. Determinación del coeficiente η.....</i>	<i>32</i>
<i>Gráfica 3. Curva de carga límite estática para el caso de grúa sin contrapeso.....</i>	<i>236</i>
<i>Gráfica 4. Curva de vida útil a 30000 giros para el caso de grúa sin contrapeso.....</i>	<i>237</i>
<i>Gráfica 5. Curva de carga límite estática para el caso de grúa con contrapeso.....</i>	<i>240</i>
<i>Gráfica 6. Curva de vida útil a 30000 giros para el caso de grúa con contrapeso.....</i>	<i>241</i>
<i>Gráfica 7. Factores de servicio.....</i>	<i>246</i>
<i>Gráfica 8. Factor de forma Y_F.....</i>	<i>267</i>
<i>Gráfica 9. Factor de velocidad K_V.....</i>	<i>269</i>
<i>Gráfica 10. Factor de distribución de carga $K_{F\beta}$.....</i>	<i>269</i>
<i>Gráfica 11. Factor Y_{NT}.....</i>	<i>273</i>
<i>Gráfica 12. Factor de concentración de tensiones $Y_{\delta_{relT}}$.....</i>	<i>274</i>
<i>Gráfica 13. Factor Y_{RelT}.....</i>	<i>275</i>
<i>Gráfica 14. Factor de tamaño Y_X.....</i>	<i>276</i>
<i>Gráfica 15. Obtención del factor Z_{NT}.....</i>	<i>282</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Dimensiones principales de la grúa.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 2. Definición de la vida del mecanismo</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3. Definición del estado de carga.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 4. Clasificación del aparato</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 5. Clasificación del aparato (FEM/DIN)</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 7. Valores de velocidades y presiones de viento</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 8. Determinación del coeficiente η</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 9. Valores de C para distintos tipos de estructuras</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 10. Valores de M en función del grupo</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 11. Resumen de las fuerzas debidas al viento para el caso de grúa sin contrapeso</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 12. Resumen de las fuerzas debidas al viento para el caso de grúa con contrapeso</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 13. Características y dimensiones perfil rectangular hueco no normalizado</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 14. Características y dimensiones perfil IPE 600.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 15. Características y dimensiones perfil tubular hueco normalizado para el caso de grúa sin contrapeso</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 16. Características y dimensiones perfil tubular hueco no normalizado para el caso de grúa sin contrapeso.</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 17. Características y dimensiones perfil tubular hueco normalizado para el caso de grúa con contrapeso</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 18. Características y dimensiones perfil tubular hueco no normalizado para el caso de grúa con contrapeso</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 19. Resumen del proceso de redimensionamiento de la columna impuesto por el rodamiento de giro de gran tamaño.....</i>	<i>117</i>

<i>Tabla 20. Coeficientes parciales de seguridad para las acciones, aplicables para la evaluación de los ELU.....</i>	142
<i>Tabla 21. Coeficientes parciales de seguridad de los materiales para ELU</i>	142
<i>Tabla 22. Presiones admisibles en el terreno en kg/cm² según DIN 1054.....</i>	145
<i>Tabla 23. Características medias de los suelos</i>	123
<i>Tabla 24. Diámetros y áreas de roscas métricas de paso grueso y fino</i>	178
<i>Tabla 25. Tipos de acero corrugado</i>	179
<i>Tabla 26. Coeficientes m</i>	181
<i>Tabla 27. Valores de β</i>	181
<i>Tabla 28. Cuantías geométricas mínimas, en tanto por 1000, referidas a la sección total de hormigón</i>	194
<i>Tabla 29. Determinación del número de barras en función del diámetro</i>	195
<i>Tabla 30. Determinación del número de barras en función del diámetro (continuación).....</i>	196
<i>Tabla 31. Clase de exposición.....</i>	202
<i>Tabla 32. Resumen cimentación para el caso de grúa sin contrapeso</i>	212
<i>Tabla 33. Resumen cimentación para el caso de grúa con contrapeso</i>	213
<i>Tabla 34. Ventajas/Desventajas configuraciones grúa.....</i>	214
<i>Tabla 35. Factores de carga para la selección de rodamientos (con excepción de los tipos 13 y 21 de la serie KD 210)</i>	224
<i>Tabla 36. Características y dimensiones del rodamiento para el caso de grúa sin contrapeso</i>	228
<i>Tabla 37. Características y dimensiones del rodamiento para el caso de grúa con contrapeso</i>	230
<i>Tabla 38. Fuerzas de tensado y momentos de apriete para tornillos con rosca normal métrica DIN 13, para $\mu_G = \mu_K = 0,14$</i>	233

Tabla 39. Clasificación según factor de marcha.....	245
Tabla 40. Reductor epicicloidal 306 L Bonfiglioli.....	248
Tabla 41. Factor de corrección según el tipo de servicio.....	252
Tabla 42. Características del motor Bonfiglioli.....	253
Tabla 43. Factor de servicio acoplamiento.....	260
Tabla 44. Tensión flectora admisible piñón acoplado.....	261
Tabla 45. Formulario de engranajes cilíndricos rectos.....	264
Tabla 46. Factor de aplicación K_A	268
Tabla 47. Tipo de curva según la calidad ISO.....	268
Tabla 48. Materiales más usuales en el diseño de engranajes.....	271
Tabla 49. Criterios de selección del polipasto.....	292
Tabla 50. Tabla de selección del polipasto DEMAG.....	293
Tabla 51. Especificaciones polipasto DEMAG.....	294
Tabla 52. Dimensiones y pesos de carril tipo Llanton.....	295
Tabla 53. Principales tipos de revestimiento de los electrodos.....	311
Tabla 54. Tipos de uniones soldadas.....	319
Tabla 55. Clasificación de las soldaduras por rayos X.....	326
Tabla 56. Coeficiente de correlación, β_w	335
Tabla 57. Valores habituales de $f_{vw,d}$	335
Tabla 58. Expresiones para el cálculo de resistencias en uniones soldadas.....	336
Tabla 59. Valores límite de la garganta de cordones de soldadura, en mm, en uniones de fuerza.....	339
Tabla 60. Disposiciones constructivas de los cordones de soldadura.....	342

<i>Tabla 61. Uniones soldadas</i>	<i>345</i>
<i>Tabla 62. Calidades de acero de los tornillos.....</i>	<i>362</i>
<i>Tabla 63. Características geométricas de los tornillos ordinarios.....</i>	<i>363</i>
<i>Tabla 64. Longitudes del vástago de los tornillos ordinarios y calibrados</i>	<i>364</i>
<i>Tabla 65. Categorías de uniones atornilladas</i>	<i>369</i>
<i>Tabla 66. Expresiones para el cálculo de resistencias en uniones atornilladas.....</i>	<i>369</i>
<i>Tabla 67. Reglas generales de disposición de tornillos</i>	<i>371</i>
<i>Tabla 68. Uniones atornilladas</i>	<i>372</i>

ANEXO 1: Documentación de partida

3.1. Resumen de las dimensiones y características principales de la grúa

Las dimensiones y características principales de la grúa, para un primer dimensionamiento aproximado, tanto para el diseño sin contrapeso como con contrapeso se resumen en la siguiente tabla:

DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA GRÚA	
Capacidad de carga (Tn)	8
Alcance máx. (m)	8
Alcance mín. (m)	2,5
Ángulo cubierto (°)	360°
Estructura	Metálica
Sistema de elevación y traslación	Polipasto eléctrico
Sistema de giro	Eléctrico por botonera
Corriente de alimentación (V)	Alternativa trifásica 220/380 V a 50 Hz
Mando	Por botonera a pie de columna
Peso polipasto (kg)	700
Peso contrapeso (kg) - Grúa CON CONTRAPESO	7000
Peso estructura (kg) - Pluma + Columna	Prontuario
Grupo FEM	M6
Velocidad de elevación (m/min)	0,7/4
Velocidad de traslación (m/min)	5/20
Velocidad de giro (rpm)	0,6
Potencia motor de elevación (kW)	0,53/3,6
Potencia motor de traslación (kW)	0,09/0,34
Potencia motor de giro (kW)	0,75/1,25
Altura total (m)	7,5
Altura bajo viga = Longitud columna (m)	6,5
Altura bajo gancho (m)	8
Cota de polipasto (m)	0,5
Longitud pluma (m)	8,5
Longitud contrapluma (m) - Grúa CON CONTRAPESO	5,5
Longitud contrapeso (m) - Grúa CON CONTRAPESO	3
Recorrido gancho (m)	10
Altura zapata (m)	3
Ancho zapata (m)	5
Dimensiones cimentación (m)	5x5x3

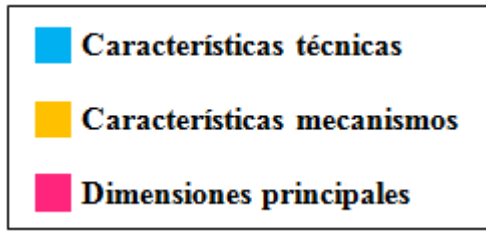


Tabla 1. Dimensiones principales de la grúa.

Configuración 1: Grúa sin contrapeso

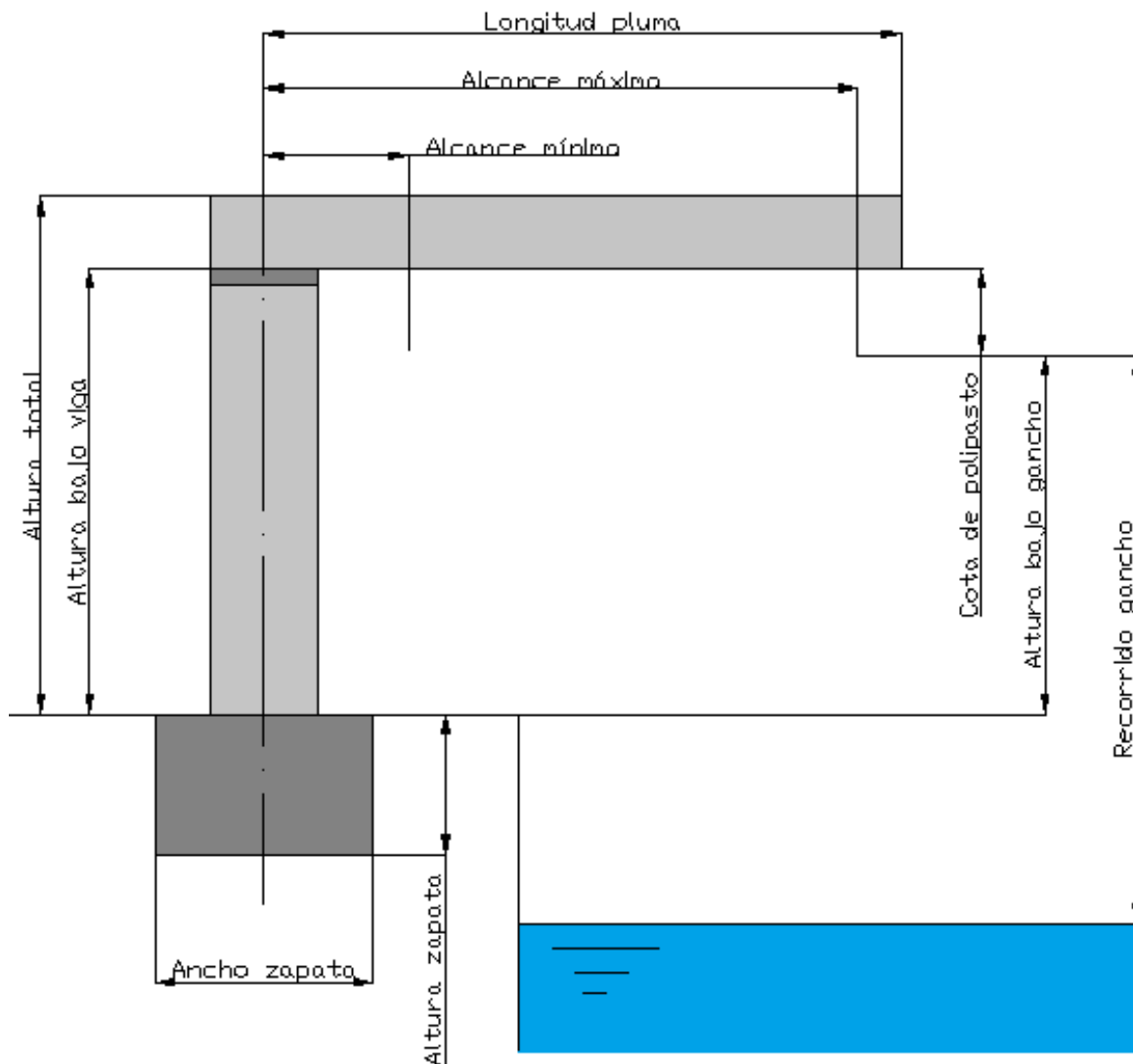


Figura 1. Dimensiones principales para el caso de grúa sin contrapeso.

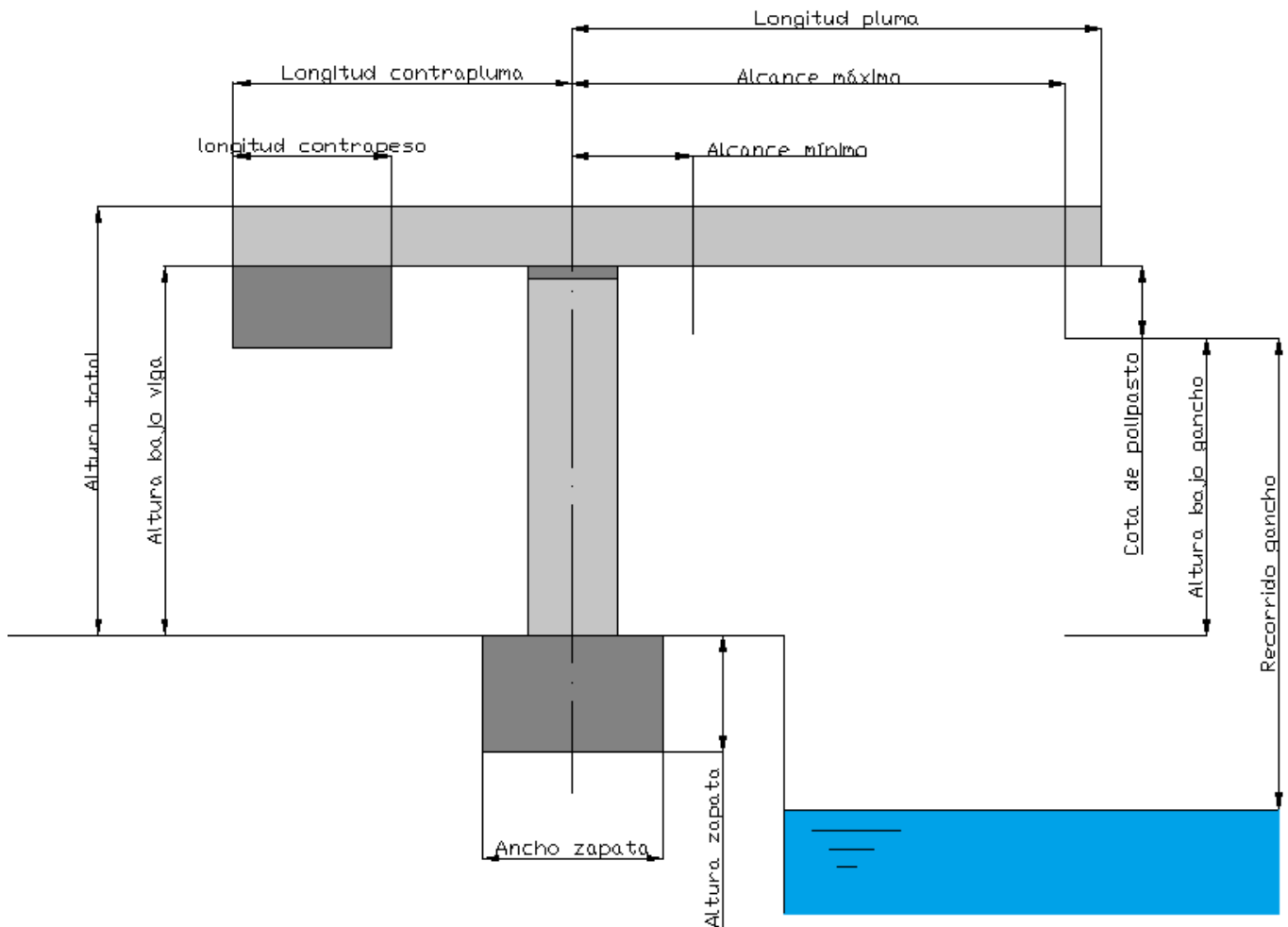
Configuración 2: Grúa con contrapeso

Figura 2. Dimensiones principales para el caso de grúa con contrapeso.

ANEXO 2: Cálculo de la estructura de la grúa

3.2. Dimensionamiento de la estructura

3.2.1. Introducción

Para realizar el cálculo de la estructura, se han seguido las reglas descritas en el libro *Grúas* de Emilio Larrodé y Antonio Miravete el cual sigue la normativa FEM.

Se entiende por estructura de un aparato de elevación el conjunto de elementos resistentes del mismo, que tienen por objeto absorber los esfuerzos generados por las diferentes sollicitaciones y transmitirlos a la estructura fija.

En el caso particular de la grúa de columna fija, existen distintos elementos resistentes, de cálculo independiente, dentro del marco global del aparato. Se distinguen dos elementos principales:

- la pluma
- la columna

La técnica de cálculo de la estructura de la grúa de columna fija se compone de varias fases:

- 1) Determinación de sollicitaciones y combinaciones de ellas que actúan sobre la estructura.
- 2) Obtención de desplazamientos, esfuerzos, tensiones y reacciones existentes en cada uno de los elementos resistentes mediante el proceso de cálculo correspondiente.
- 3) Comprobación de los valores obtenidos con los valores admisibles de elasticidad, resistencia y estabilidad.

Para el diseño desde cero de una estructura de grúa, se ha de partir de una primera hipótesis de la forma de la grúa, lo que proporciona una aproximación del peso y las distancias necesarias

para el cálculo. Con esta primera aproximación, se obtiene un dimensionamiento de la estructura que permite prediseñar los perfiles y secciones a emplear.

Una vez predimensionados los perfiles, se pueden comprobar numéricamente o realizar un análisis mediante EF (elementos finitos); en este caso, se ha optado por comprobarlos numéricamente y, de esta manera, realizar el correspondiente redimensionamiento final que asegure el correcto funcionamiento de la instalación.

3.2.2. Determinación de solicitaciones

Las solicitaciones existentes sobre una estructura de un aparato de elevación se van a calcular mediante la normativa FEM, la cual tiene su norma española UNE equivalente.

La obtención de las solicitaciones se realiza aplicando el método que se explica en la sección I de la FEM, al cual pertenece la grúa giratoria de columna fija.

3.2.2.1. Clasificación del aparato en función del servicio

Para la aplicación de la norma, los aparatos están clasificados en diferentes grupos en función del tipo de servicio.

Los dos factores que se consideran para determinar el grupo son la vida del mecanismo y el estado de carga.

Vida del mecanismo

La vida del mecanismo representa el número de horas de funcionamiento real que se estima que va a tener el mecanismo a lo largo de su servicio. Al ser desconocido este número de horas, se ha convenido definir siete grupos.

Grupo	A	B	C	D	E	F	G
Vida en horas	800	1600	3200	6300	12500	25000	50000

Tabla 2. Definición de la vida del mecanismo.

Se ha estimado una vida de 10 años, con un uso de 200 días por año y 3 horas por día, donde se ha tenido en cuenta los días en que no se usa la grúa por inutilización o avería. Esto da un total de 6000 horas, con lo que le corresponde el grupo D (6300 horas).

Estado de carga

El estado de carga representa en qué medida el aparato levanta la carga máxima o solamente una carga reducida.

Esta idea está caracterizada por un espectro de cargas elevadas, indicando el número de ciclos para los cuales el aparato es capaz de levantar una cierta fracción de la carga máxima. Se consideran en la práctica, cuatro estados convencionales de carga, caracterizados por el valor k (ver tabla 3), representando la frecuencia de la carga máxima, durante el servicio en un número de ciclos determinado.

$$k = \frac{\text{N}^\circ \text{ de veces de elevación de la carga máxima}}{\text{N}^\circ \text{ de veces de elevación de cargas pequeñas, medianas y máximas}}$$

Estado de carga	Servicio	Factor k
1	Frecuencia muy reducida de la carga máxima	0.125
2	Frecuencia reducida de la carga máxima	0.250
3	Frecuencia aproximada igual de cargas pequeñas, medianas y máximas.	0.500
4	Frecuencia elevada de la carga máxima.	1.000

Tabla 3. Definición del estado de carga.

En cuanto al estado de carga, se considerará que la grúa levantará aproximadamente con la misma frecuencia cargas pequeñas, medianas y máximas, con lo que el estado de carga de la grúa será el 3, al cual le corresponde un factor k de 0,500.

Clasificación del aparato

A partir de la vida del mecanismo y del estado de carga, los aparatos se clasifican en seis grupos según la FEM siguiendo la siguiente tabla:

		Vida del Mecanismo						
		A	B	C	D	E	F	G
Estado de Carga	1			M3	M4	M5	M6	M7
	2		M3	M4	M5	M6	M7	M8
	3	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M8
	4	M4	M5	M6	M7	M8	M8	M8

Tabla 4. Clasificación del aparato.

Por tanto, según la vida del mecanismo y el estado de carga, la clasificación de la grúa será el M6.

La equivalencia entre la clasificación que se establece para diferentes normativas se puede ver en la tabla siguiente:

ESTADO DE CARGA		VIDA EN HORAS DE FUNCIONAMIENTO REAL DEL MECANISMO													
Factor K	SERVICIO	800		1600		3200		6300		12500		25000		50000	
0,125	Frecuencia muy reducida de la carga máxima					M3	1 Bm	M4	1 Am	M5	2m	M6	3m	M7	4m
0,250	Frecuencia reducida de la carga máxima			M3	1 Bm	M4	1 Am	M5	2m	M6	3m	M7	4m	M8	5m
0,500	Frecuencia aproximada igual de cargas pequeñas, medianas y máximas.	M3	1 Bm	M4	1 Am	M5	2m	M6	3m	M7	4m	M8	5m	M8	5m
1,000	Frecuencia elevada de la carga máxima	M4	1 Am	M5	2m	M6	3m	M7	4m	M8	5m	M8	5m	M8	5m

Tabla 5. Clasificación del aparato (FEM/DIN).

3.2.2.2. Descripción y evaluación de solicitaciones sobre la estructura

Para comenzar a calcular la estructura, se han de determinar las solicitaciones que actúan sobre la grúa en funcionamiento, teniendo en cuenta los factores de seguridad que les afectan a cada una de ellas.

Los tipos de solicitudes que intervienen en el cálculo de la estructura de la grúa son:

- Solicitaciones principales que se ejercen sobre la estructura del aparato inmóvil, en el estado de carga más desfavorable.
- Solicitaciones debidas a movimientos verticales.
- Solicitaciones debidas a movimientos horizontales.
- Solicitaciones debidas a efectos climáticos.
- Solicitaciones diversas.

Solicitaciones principales

Las solicitudes principales son las siguientes:

- a) **Solicitaciones debidas a la carga de servicio más el peso de los elementos accesorios:** eslingas, palonier, etc.
- b) **Solicitaciones debidas al peso propio** o peso de todos los elementos que componen la grúa, a excepción de la carga de servicio. En principio, se tomarán unos valores orientativos para poder realizar los primeros cálculos, después, al ir cambiando los perfiles según los cálculos, estos pesos irán cambiando. Ésta primera estimación se realizará teniendo en cuenta la longitud que han de tener la pluma y la columna para satisfacer las prestaciones de la grúa.

Solicitaciones debidas a movimientos verticales

Estas solicitudes provienen de la manipulación de la carga de servicio, aceleraciones o deceleraciones sobre el movimiento de elevación y choques verticales debidos al rodamiento sobre las vías.

- 1) **Solicitaciones debidas a la manipulación de la carga de servicio.** Se tienen en cuenta multiplicando la carga de servicio por un factor denominado *coeficiente dinámico*, Ψ .

$$Q_{LC} = Q_L \cdot \Psi$$

El coeficiente Ψ está definido por la expresión:

$$\Psi = 1 + \xi \cdot V_L$$

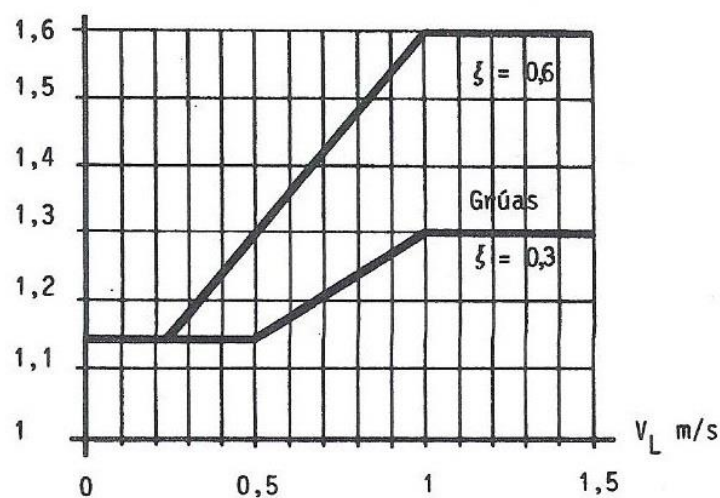
Donde:

V_L = velocidad de elevación (m/s).

ξ = coeficiente experimental.

- 0,6 para puentes-grúa y pórticos.
- **0,3** para grúas (este caso).

Los valores están representados en la gráfica:



Gráfica 1. Representación de los valores de ξ

- 2) **Solicitud debida a la aceleración o deceleración de la carga.** Las solicitudes debidas a la aceleración o deceleración en el movimiento de elevación se despreciarán debido a que el coeficiente Ψ ya tiene en cuenta la manipulación de la carga de servicio.

Solicitaciones debidas a movimientos horizontales

Se trata de las solicitudes siguientes:

- 1) **Efectos de la fuerza centrífuga.** Se tiene en cuenta el efecto que genera la aceleración debida al movimiento de giro de la grúa.

La fuerza de inercia será:

$$F_{in} = m \cdot a_G$$

- 2) **Efectos de choque de topes.** Este tipo de solicitudes sólo se considera cuando el choque se produce sobre la estructura, o cuando se produce sobre la carga suspendida.

Para el caso de la carga suspendida, éste se tiene en consideración cuando la velocidad de desplazamiento es superior a 0,7 m/s. Los esfuerzos resultantes sobre la estructura se calculan en función de la deceleración que el tope impone al aparato. Se admite que el tope es capaz de absorber la energía cinética del aparato correspondiente a 0,7 m/s de la velocidad de traslación.

Para el caso de choque de la carga suspendida, se consideran las solicitudes debidas al choque de carga, cuando ésta está rígidamente guiada.

En el caso del presente proyecto, la carga no está guiada, sino que va suspendida. Por tanto, no se tendrá en cuenta esta solicitud.

Solicitaciones debidas a efectos climáticos

Las solicitudes debidas a los efectos climáticos son las resultantes de la acción del viento, sobrecarga de nieve y variaciones de temperatura.

- 1) **Acción del viento.** Se debe resaltar que todos los cálculos relacionados con el viento son aproximados, debido a su propia naturaleza. Sin embargo, es necesario tenerlos en cuenta y si se les da un tratamiento matemático adecuado, los resultados que se obtienen serán mucho más aproximados y útiles.

El contacto del viento con la superficie de la tierra ejerce un efecto de arrastre similar al rozamiento. Es evidente que este efecto de arrastre es diferente en zonas abiertas, como llanuras, que en zonas cerradas o en obstáculos, como zonas de bosques, o concentrados núcleos urbanos. Esta variación en el arrastre causa que la velocidad del viento varíe en función de la altura y del tipo de terreno. Además, accidentes topográficos como colinas o valles producen variaciones en la dirección del viento.

El aire a nivel del mar ejerce una presión uniforme de 101,4 kPa. Cuando el aire está en movimiento, sin embargo, esta presión se modifica. La fuerza del viento ejerce sobre una superficie en su camino una presión y una fuerza negativa o succión en la superficie opuesta debido a los cambios de presión locales.

La presión estática equivalente inducida por el viento es función de la densidad del aire, que varía con la temperatura, altura y presión barométrica. Estas variaciones son pequeñas, y son normalmente ignoradas a la hora de realizar cálculos prácticos de viento.

La relación de la presión estática viene dada por:

$$q = \frac{1}{2} \rho v_w$$

Donde ρ es la densidad del aire. Si la velocidad se expresa en m/s y la presión en Pa, la expresión queda:

$$q = \frac{5}{8} v_w$$

En la tabla 6 se representan diferentes valores de velocidad y presión del viento.

Cuando la velocidad del viento es máxima, se considera que la grúa está fuera de servicio.

Para el caso de grúa del presente proyecto, las velocidades del viento según la altura de la estructura serán (el aparato se situará en el puerto, con lo cual estará a nivel del mar):

Velocidad del viento con la grúa en servicio (caso A): **20 m/s = 72 km/h**

Velocidad del viento con la grúa fuera de servicio (caso B): **36 m/s = 130 km/h**

Altura del elemento por encima del suelo		Viento límite de servicio					Viento máximo				
m	ft	Velocidad V_W			Presión aerodinámica		Velocidad V_W			Presión aerodinámica	
		m/s	km/h	miles p h	kgf/m ² ó daN/m ²	lbs/sq.ft	m/s	km/h	miles p h	kgf/m ² ó daN/m ²	lbs/sq.ft
0 a 20	0 a 65	20	72	45	25	5	36	130	80	80	16
20 a 100	65 a 325						42	150	95	110	22
más de 100	más de 325						46	165	105	130	26

Tabla 6. Valores de velocidades y presiones de viento.

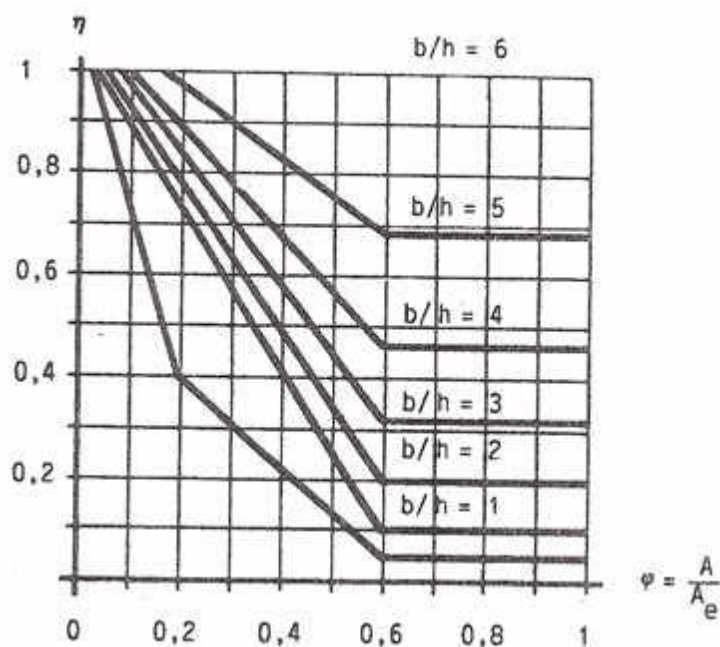
Presión del viento sobre objetos

Las expresiones anteriores de la presión del viento son para objetos de formas indefinidas. Evidentemente, un objeto cortante originará menores perturbaciones o cambios de presión en la corriente de viento que la que ocasionará una gran superficie plana. A través de ensayos e investigaciones, se han obtenido datos que relacionan la forma de los objetos con la resistencia que ellos inducen. En la tabla 9 se dan valores de coeficientes para estas fuerzas de oposición para una serie de formas típicas utilizadas en construcciones de grúas.

Cuando un objeto está enfrente de otro idéntico al primero, se debe considerar el efecto “sombra”. Este parámetro está relacionado con la forma y la distancia entre los objetos. La gráfica da valores del coeficiente de sombra, η , el cual representa qué parte del

viento sobre el primero de los dos objetos actúa sobre el segundo. El coeficiente puede ser aplicado sucesivamente a cuerpos adicionales.

En la gráfica se obtienen así mismo los valores del coeficiente reductor η .



Gráfica 2. Determinación del coeficiente η .

El coeficiente de forma se tendrá en cuenta para la configuración de grúa con contrapeso, ya que habrá dos vigas y a la segunda de ellas no le llega el mismo valor de viento que a la primera debido al efecto “sombra” comentado anteriormente.

A la hora de calcular el coeficiente de sombra, habrá que tener en cuenta las medidas de las vigas. En este caso, las vigas son idénticas, por lo que la superficie expuesta al viento es la misma.

La fuerza que ejerce el viento sobre un objeto se expresa como:

$$F_v = q \cdot A \cdot C \cdot \eta$$

Donde:

q = presión estática a la altura h del objeto.

A = área del objeto sobre la que actúa el viento.

C = coeficiente de forma.

η = coeficiente de sombra, viene dado en la tabla 8.

Donde η depende de $\varphi = A/A_e$ y b/h , con

A = superficie expuesta al viento.

A_e = superficie expuesta al viento mayorada con superficies de posibles agujeros interiores. Para el caso de grúas aligeradas, estructuras de celosía $A_e > A$. Para el resto, $A = A_e$.

h = altura de la viga.

b = distancia que separa las caras enfrentadas entre el perfil de cálculo y el intermedio (se ha supuesto una separación entre vigas de 0,9 m).

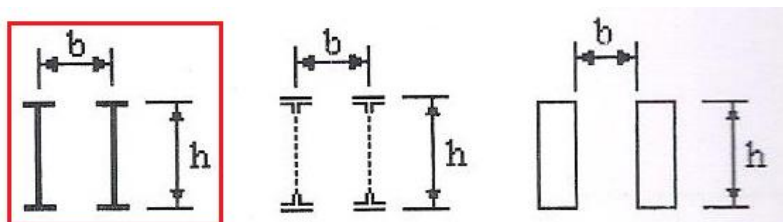


Figura 3. Parámetros del coeficiente de sombra.

$\varphi = \frac{A}{A_e}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1
$\frac{b}{h} = 0,5$	0,75	0,4	0,32	0,21	0,15	0,05	0,05	0,05
$\frac{b}{h} = 1$	0,92	0,75	0,59	0,43	0,25	0,1	0,1	0,1
$\frac{b}{h} = 2$	0,95	0,8	0,63	0,5	0,33	0,2	0,2	0,2
$\frac{b}{h} = 4$	1	0,88	0,76	0,66	0,55	0,45	0,45	0,45
$\frac{b}{h} = 5$	1	0,95	0,88	0,81	0,75	0,68	0,68	0,68

Tabla 8. Determinación del coeficiente η .

La **acción del viento sobre la carga** se calcula teniendo en cuenta la mayor superficie posible de exposición al viento y tomando como valor del coeficiente aerodinámico $C = 1$.

Para cargas inferiores a 25.000 daN, en las que el cálculo de la superficie expuesta al viento es de difícil resolución, se pueden tomar a título orientativo los siguientes valores:

1 m²/1000 daN para cargas hasta 5000 daN.

0,5 m²/1000 daN para cargas desde 5000 daN a 25000 daN.

Evidentemente, para una grúa fuera de servicio, no hay carga que evaluar bajo la acción del viento.

La **acción del viento sobre el contrapeso** se calculará como si éste fuera una carga. El contrapeso estará colocado en el lado contrario de la carga y la fuerza que el viento ejerza sobre este servirá para contrarrestar el momento torsor que el viento ejercerá sobre la columna.

Por consiguiente, los elementos geométricos de la grúa que sufrirán la presión del viento serán: la pluma, la columna, la carga en servicio, la contrapluma y el contrapeso (estos dos últimos para la configuración de grúa con contrapeso).

Para el cálculo de la fuerza que ejerce el viento sobre cada elemento, se tendrán en cuenta las dimensiones necesarias para satisfacer las prestaciones de la grúa.

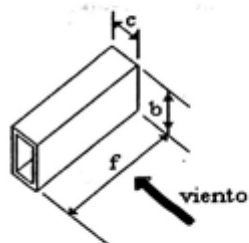
A continuación, se muestran varias tablas con los valores de C_f para vigas (pluma) y tubos (columna):

vigas cajón grandes

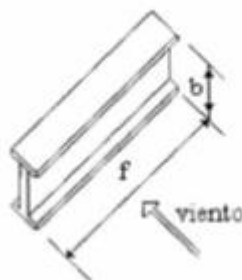
sobre

35 mm
cuadradas

ó

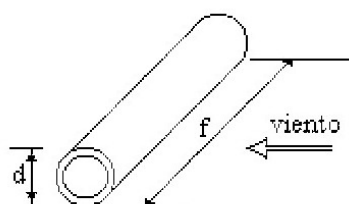
25 x 45 mm
rectangulares

	f/b	C _r
$\frac{b}{c} \geq 2$	40	2,20
	30	2,10
	20	1,95
	10	1,75
	5	1,55
$\frac{b}{c} = 1$	40	1,90
	30	1,85
	20	1,75
	10	1,55
	5	1,40
$\frac{b}{c} = \frac{1}{2}$	40	1,40
	30	1,35
	20	1,30
	10	1,20
	5	1,00
$\frac{b}{c} = \frac{1}{4}$	40	1,00
	30	1,00
	20	0,90
	10	0,90
	5	0,80

Perfiles, angulares,
vigas cajón
(pequeños)

	f/b	C _r
	50	1,90
	40	1,70
	30	1,65
	20	1,60
	10	1,35
	5	1,30

Tubos



	f/d	C _r
$d \cdot v_w < 4,5 \text{ m/s}^2$ $v_w = \text{velocidad del viento (m/s}^2)$ $d = \text{diámetro (m)}$	50	1,10
	40	1,00
	30	0,95
	20	0,90
	10	0,80
	5	0,75
$d \cdot v_w \geq 4,5 \text{ m/s}^2$	50	0,80
	40	0,75
	30	0,70
	20	0,70
	10	0,65
	5	0,60

Tabla 9. Valores de C para distintos tipos de estructuras.

- 2) **Sobrecarga de nieve.** No se tiene en cuenta la sobrecarga de nieve en el cálculo de puentes-grúa, pórticos o grúas. La grúa no se pondrá en servicio con carga de nieve.
- 3) **Variaciones de temperatura.** Las solicitaciones debidas a variaciones de temperatura no se consideran excepto en casos particulares, por ejemplo, que los elementos no puedan dilatarse libremente. No es preciso considerarla puesto que sus elementos se podrán dilatar libremente.

Determinación de combinaciones de solicitaciones

Según la metodología descrita por Larrodé-Miravete, después de realizar el análisis de las tensiones producidas por las solicitaciones, hay que aplicar los coeficientes de seguridad según cada caso y calcular la tensión equivalente.

Cuando se han obtenido las tensiones equivalentes para cada caso, se dimensiona el perfil de la estructura para aguantar la tensión equivalente en el caso más desfavorable.

La fórmula general de cálculo es:

$$[M \cdot (S_G + \Psi \cdot S_L + S_H) + S_W] \cdot C_s$$

Donde:

M o γ_s = coeficiente según el tipo de grúa.

S_G = solicitaciones verticales debidas al peso propio de la estructura.

Ψ o C_d = coeficiente dinámico.

S_L = solicitaciones verticales debidas a la carga y accesorios.

S_H = solicitaciones horizontales debidas a la aceleración de la carga.

S_W = solicitaciones debidas a la acción del viento.

C_s = coeficiente de seguridad, según el caso.

Los casos posibles de combinación de solicitaciones son varios:

- **Caso I: Aparato en servicio sin viento**

Para este caso, la solicitación toma el siguiente valor:

$$[\gamma_s \cdot (S_G + \Psi \cdot S_L + S_H)] \cdot C_s$$

Donde:

C_s = coeficiente de seguridad: 1,5

γ_s o M = coeficiente variable con el grupo al que pertenece el aparato. Se muestra en la tabla 10.

Grupo (Tabla 10.3)	M3	M4	M5	M6	M7	M8
M	1	1	1	1,06	1,12	1,2

Tabla 10. Valores de M en función del grupo.

- **Caso II: Aparato en servicio con viento**

Para este caso, la solicitación toma el siguiente valor:

$$[\gamma_s \cdot (S_G + \Psi \cdot S_L + S_H) + S_w] \cdot C_s$$

En este caso, $C_s = 1,33$

- **Caso III: Aparato sometido a solicitaciones excepcionales**

Se adoptan como solicitaciones:

a) **Viento en tempestad**

$$(S_G + S_{W_{\text{máx}}}) \cdot C_s$$

b) Efecto de choque con los topes fin de carrera

No se considera.

$$(S_G + S_L + S_T) \cdot C_s$$

c) Ensayos estático y dinámico

$$(S_G + \rho_2 \cdot S_L) \cdot C_s$$

$$(S_G + \Psi \cdot \rho_1 \cdot S_L) \cdot C_s$$

En este caso, $C_s = 1,1$

Donde:

$S_{W_{\text{máx}}}$ = solicitación debido al viento máximo.

S_T = solicitación de choque en los topes de fin de carrera.

ρ_1 = coeficiente de mayoración de la carga nominal prevista en los ensayos dinámicos: 1,2

ρ_2 = coeficiente de mayoración de la carga nominal prevista en los ensayos estáticos: 1,4

Método empleado en el cálculo

Para el cálculo de la estructura, tanto para la elección de los perfiles de la pluma como de la columna, se utilizará la teoría de tensión equivalente de Von-Mises o también llamada teoría de la máxima distorsión.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2)} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

En primer lugar, se calcularán las fuerzas y momentos que producen las diferentes sollicitaciones en las secciones críticas de la pluma y de la columna. Después, a cada sollicitación se le aplicarán los diferentes coeficientes FEM que le correspondan y, por último, se calculará la tensión equivalente de Von Mises, la cual se comparará con el límite elástico del perfil elegido. En caso de que la tensión equivalente sea menor, este perfil será válido; en caso contrario, se tendrá que sustituir por otro perfil mayor.

El proceso que se seguirá para el cálculo de los elementos de la estructura (pluma y columna) es el que se indica a continuación:

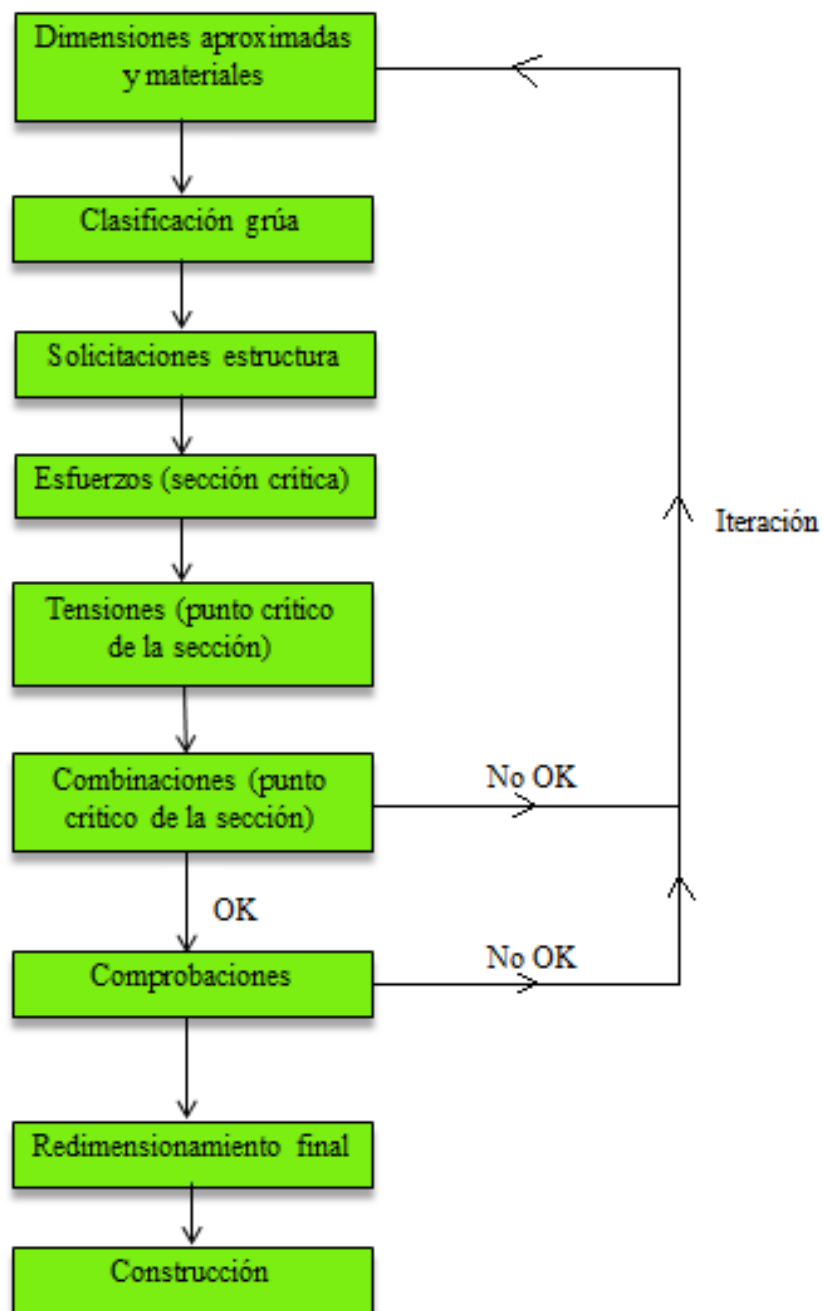


Figura 4. Proceso de diseño de la grúa.

3.2.2.4. Resolución de cálculos solicitaciones

Configuración 1: Grúa sin contrapeso**SOLICITACIONES PRINCIPALES****Carga de servicio (SL)**

	kg	N
Carga a elevar (capacidad de carga grúa) = Carga útil	8000,00	78480,00
Peso accesorios - Eslingas + Palonier	250,00	2452,50
QL = Carga útil+Peso accesorios	8250,00	80932,50

Peso propio elementos (SG)

	kg	N
Pluma (Q _{plu})	2066,86	20275,90
Columna (Q _{col})	1891,50	18555,62
Mecanismo de elevación y traslación - Polipasto (Q _{met})	700,00	6867,00
Mecanismo de giro (Q _{mg}) - Rodamiento de giro + Accesorios (motor-reductor)	830,00	8142,30
QG = Q_{plu}+Q_{col}+Q_{met}+Q_{mg}	5488,36	53840,81

SOLICITACIONES DEBIDAS A MOVIMIENTOS VERTICALES (Sv)**Levantamiento de la carga de servicio (SLC)**

Coef. experimental para grúas (ξ)	0,30	
Velocidad de elevación (V _L) - Polipasto	0,08	m/s
$\Psi = 1 + \xi \cdot V_L$	1,02	
QLC = QL · Ψ	82874,88	N

Aceleración o deceleración de la carga

Despreciables, ya que el coeficiente dinámico (Ψ) ya tiene en cuenta la elevación de la carga

SOLICITACIONES DEBIDAS A MOVIMIENTOS HORIZONTALES (SH)**Efecto de la fuerza centrífuga**

Velocidad de giro máxima ($\omega_{\text{máx}}$)	0,06	rad/s
--	-------------	-------

Tiempo mínimo (t_{\min})	2,50	s
Aceleración angular (α) = ω/t	0,03	rad/s ²

Sobre la PLUMA**Fuerza de inercia (F_{inplu})**

$r_{G\text{plu}} = L'_{\text{plu}}/2$	4,25	m
Aceleración (a_{plu}) = $\alpha \cdot r_{G\text{plu}}$	0,11	m/s ²
Masa pluma (m_{plu})	2066,86	kg
$F_{\text{inplu}} = m_{\text{plu}} \cdot a_{\text{plu}}$	220,77	N

Sobre la CARGA**Fuerza de inercia (F_{inc})**

$r_{Gc} = L_{\text{plu}}$	8,00	m
Aceleración (a_{plu}) = $\alpha \cdot r_{Gc}$	0,20	m/s ²
Masa carga+accesorios+polipasto (m_c)	8950,00	kg
$F_{\text{inc}} = m_c \cdot a_c$	1799,50	N

Efecto de choque de topes

Solo se considera cuando choque sobre la estructura o sobre la **carga suspendida**

Solo solicitaciones debidas a choque de carga rígidamente guiada. No es el caso

No se considera

SOLICITACIONES DEBIDAS A EFECTOS CLIMÁTICOS**Acción del viento**

La normativa indica velocidades máximas del viento según la altura del aparato (TABLA)

Altura por encima del suelo (0-20 m)

Viento límite de servicio = **20 m/s**

Viento máximo con grúa fuera de servicio = **36 m/s**

Presión aerodinámica, grúa en servicio (q_A)

Velocidad del viento (V_v)	20,00	m/s
q_A (TABLA) =	25,00	daN/m² = kgf/m²

Presión aerodinámica, grúa fuera de servicio (q_B)

Velocidad del viento (V_v)	36,00	m/s
q_B (TABLA) =	80,00	daN/m² = kgf/m²

Sobre la PLUMA**Coef. de forma para viento actuando normal a la superficie (C_f) - Perfil: Rectangular hueco**

Longitud (f)	8,50	m
Altura (b)	0,60	m
Ancho (c)	0,40	m
b/c	1,50	
f/b	14,17	

 C_f (TABLA interpolando doblemente) =**1,73****Fuerza del viento en servicio (F_{vpluA})**

Área (A) = f·b	5,10	m ²
Presión estática (q_A)	25,00	daN/m ²
Coeficiente de forma (C_f)	1,73	
$F_{vpluA} = q_A \cdot A \cdot C_f$	220,96	daN

Fuerza del viento fuera de servicio (F_{vpluB})

Área (A) = f·b	5,10	m ²
Presión estática (q_B)	80,00	daN/m ²
Coeficiente de forma (C_f)	1,73	
$F_{vpluB} = q_B \cdot A \cdot C_f$	707,06	daN

Sobre la COLUMNA**Coef. de forma para viento actuando normal a la superficie (C_f) - Perfil: Tubo circular hueco**

Longitud (f)	6,50	m
Diámetro (d)	0,61	m
f/d	10,66	
En servicio ($d \cdot v_v$)	12,20	m ² /s
Fuera de servicio ($d \cdot v_v$)	21,96	m ² /s

Ambos > 4,5 m/s² **C_f (TABLA interpolando) =****0,65****Fuerza del viento en servicio (F_{vcolA})**

Área (A) = f·d	3,97	m ²
Presión estática (q_A)	25,00	daN/m ²
Coeficiente de forma (C_f)	0,65	

$F_{vcolA} = q_A \cdot A \cdot C_f$	64,73	daN
Fuerza del viento fuera de servicio (F_{vcolB})		
Área (A) = f · d	3,97	m ²
Presión estática (q_B)	80,00	daN/m ²
Coefficiente de forma (C_f)	0,65	
$F_{vcolB} = q_B \cdot A \cdot C_f$	207,13	daN

Sobre la CARGA (embarcación)

Se calcula teniendo en cuenta la mayor superficie posible de exposición al viento y tomando como coeficiente aerodinámico $C = 1$

Para cargas inferiores a 25000 daN

1 m²/1000 daN para cargas hasta 5000 daN

0,5 m²/1000 daN para cargas desde 5000 daN a 25000 daN

Área (A)		
Área	0,50	m ²
Carga unitaria	1000,00	daN/m ²
Carga útil	7848,00	daN
$A = (\text{Área/Carga unitaria}) \cdot \text{Carga útil}$	3,92	m²

Fuerza del viento en servicio (F_{vcA})		
Área (A)	3,92	m ²
Presión estática (q_A)	25,00	daN/m ²
Coefficiente aerodinámico (C)	1,00	
$F_{vcA} = q_A \cdot A \cdot C$	98,10	daN

Fuerza del viento fuera de servicio (F_{vcB})		
NO HAY CARGA	0,00	
$F_{vcB} =$	0,00	daN

Sobrecarga de nieve

Se considera que no se usa la grúa con carga de nieve

Variaciones de temperatura

No se consideran, solo se tiene en cuenta cuando los elementos no pueden dilatarse libremente

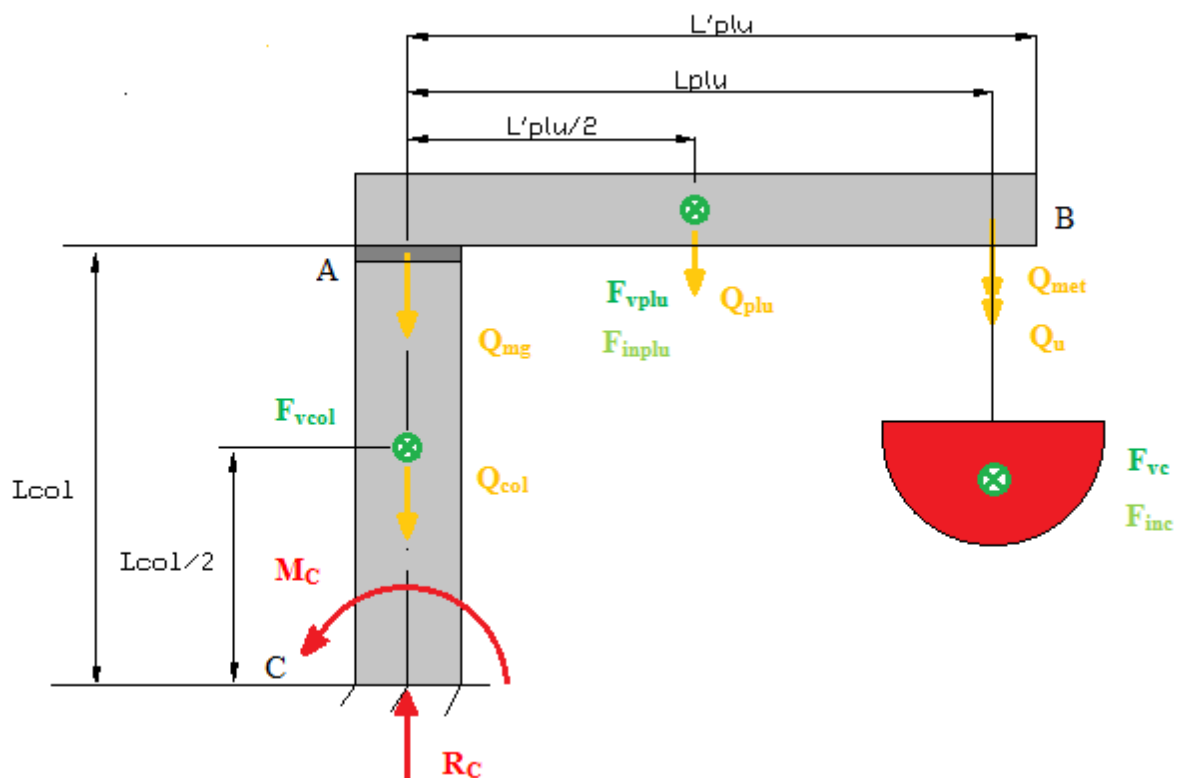


Figura 5. Solicitaciones que actúan sobre la estructura para el caso de grúa sin contrapeso.

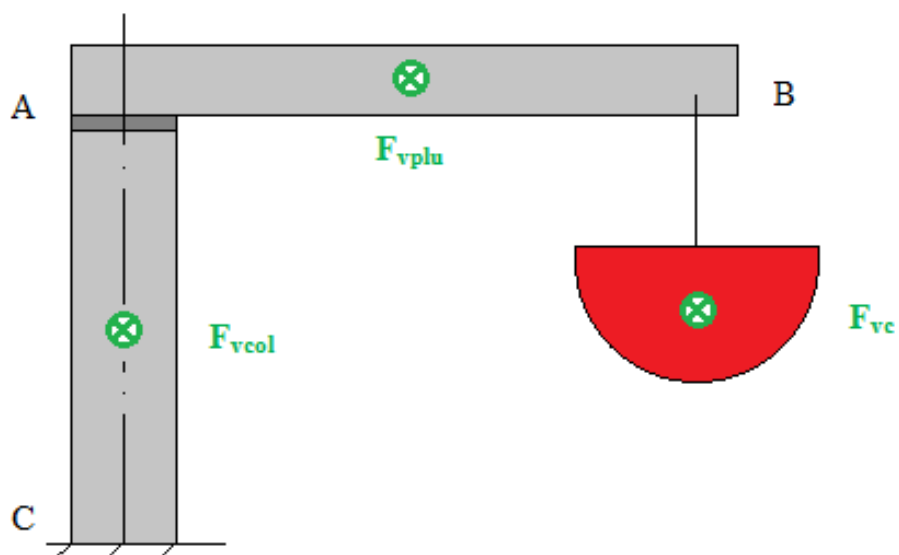


Figura 6. Fuerzas debidas al viento sobre la estructura para el caso de grúa sin contrapeso.

Elementos	Caso A: Viento con grúa en servicio ($v = 20$ m/s)	Caso B: Viento con grúa fuera de servicio ($v = 36$ m/s)
Pluma	2209,58	7070,64
Columna	647,29	2071,32
Carga	981	0

Tabla 11. Resumen de las fuerzas debidas al viento para el caso de grúa sin contrapeso.

Configuración 2: Grúa con contrapeso**SOLICITACIONES PRINCIPALES****Carga de servicio (S_L)**

	kg	N
Carga a elevar (capacidad de carga grúa) = Carga útil	8000,00	78480,00
Peso accesorios - Eslingas + Palonier	250,00	2452,50
Q_c = Carga útil+Peso accesorios	8250,00	80932,50

Peso propio elementos (S_G)

	kg	N
Pluma (Q _{plu})	1037,00	10172,97
Contrapluma (Q _{plu'})	671,00	6582,51
Columna (Q _{col})	962,00	9437,22
Mecanismo de elevación y traslación - Polipasto (Q _{met})	700,00	6867,00
Mecanismo de giro (Q _{mg}) - Rodamiento de giro + Accesorios (motor-reductor)	830,00	8142,30
Contrapeso (Q _{con})	7000,00	68670,00
Q_G = 2·Q_{plu}+2·Q_{plu'}+Q_{col}+Q_{met}+Q_{mg}+Q_{con}	12908,00	126627,48

SOLICITACIONES DEBIDAS A MOVIMIENTOS VERTICALES (S_V)**Levantamiento de la carga de servicio (S_L)**

Coef. experimental para grúas (ξ)	0,30	
Velocidad de elevación (V _L) - GRÁFICO	0,07	m/s
$\Psi = 1 + \xi \cdot V_L$	1,02	
Q_{LC} = Q_c·Ψ	82551,15	N

Aceleración o deceleración de la carga

Despreciables, ya que el coeficiente dinámico (Ψ) ya tiene en cuenta la elevación de la carga

SOLICITACIONES DEBIDAS A MOVIMIENTOS HORIZONTALES (S_H)**Efecto de la fuerza centrífuga**

Velocidad de giro máxima (ω _{máx})	0,06	rad/s
Tiempo mínimo (t _{mín})	2,50	s

Aceleración angular (α) = ω/t 0,03 rad/s²

Sobre el CONJUNTO DE GRÚA

Fuerza de inercia (F_{inconj})

r_{Gconj}	2,19	m
Aceleración (a_{conj}) = $\alpha \cdot r_{Gconj}$	0,06	m/s ²
Masas pluma (m_{plu})	3416,00	kg
Masa carga (m_c)	8950,00	kg
Masa contrapeso (m_{con})	7000,00	kg
$F_{inconj} = (m_{plu} + m_c + m_{con}) \cdot a_{conj}$	1065,92	N

Efecto de choque de topes

Solo se considera cuando choque sobre la estructura o sobre la **carga suspendida**

Solo solicitaciones debidas a choque de carga rígidamente guiada. No es el caso

No se considera

SOLICITACIONES DEBIDAS A EFECTOS CLIMÁTICOS

Acción del viento

La normativa indica velocidades máximas del viento según la altura del aparato (TABLA)

Altura por encima del suelo (0-20 m)

Viento límite de servicio = **20 m/s**

Viento máximo con grúa fuera de servicio = **36 m/s**

Presión aerodinámica, grúa en servicio (q_A)

Velocidad del viento (V_v)	20,00	m/s
q_A (TABLA) =	25,00	daN/m² = kgf/m²

Presión aerodinámica, grúa fuera de servicio (q_B)

Velocidad del viento (V_v)	36,00	m/s
q_B (TABLA) =	80,00	daN/m² = kgf/m²

Sobre la PLUMA

Coef. de forma para viento actuando normal a la superficie (C_f) - Perfil: IPE600

Longitud (f)	8,50	m
Altura (b)	0,60	m
f/b	14,17	

C_f (TABLA interpolando) =	1,45	
Coef. de sombra (η)		
Dist. que separa las caras enfrentadas entre el perfil de cálculo y el intermedio (b)	0,90	m
Altura (h)	0,60	m
b/h	1,50	
Sup. expuesta al viento (A)	1,00	m ²
Sup. expuesta al viento mayorada con sup. de posibles agujeros int.(A _e)	1,00	m ²
$\varphi = A/A_e$	1,00	
η (TABLA o GRÁFICA) =	0,15	
Fuerza del viento en servicio (F_{vpluA})		
Área (A) = f·b	5,10	m ²
Presión estática (q _A)	25,00	daN/m ²
Coeficiente de forma (C_f)	1,45	
Coeficiente de sombra (η)	0,15	
Sobre la 1ª VIGA		
$F_{vpluA} = q_A \cdot A \cdot C_f$	185,39	daN
Sobre la 2ª VIGA		
$F_{vpluA} = q_A \cdot A \cdot C_f \cdot \eta$	27,81	daN
Fuerza del viento fuera de servicio (F_{vpluB})		
Área (A) = f·b	5,10	m ²
Presión estática (q _B)	80,00	daN/m ²
Coeficiente de forma (C_f)	1,45	
Coeficiente de sombra (η)	0,15	
Sobre la 1ª VIGA		
$F_{vpluB} = q_B \cdot A \cdot C_f$	593,23	daN
Sobre la 2ª VIGA		
$F_{vpluB} = q_B \cdot A \cdot C_f \cdot \eta$	88,98	daN
Sobre la CONTRAPLUMA		
Coef. de forma para viento actuando normal a la superficie (C_f) - Perfil: IPE600		
Longitud (f)	5,50	m
Altura (b)	0,60	m
f/b	9,17	
C_f (TABLA interpolando) =	1,34	
Coef. de sombra (η)		

Dist. que separa las caras enfrentadas entre el perfil de cálculo y el intermedio (b)	0,90	m
Altura (h)	0,60	m
b/h	1,50	
Sup. expuesta al viento (A)	1,00	m ²
Sup. expuesta al viento mayorada con sup. de posibles agujeros int.(A _e)	1,00	m ²
$\varphi = A/A_e$	1,00	
η (TABLA o GRÁFICA) =	0,15	

Fuerza del viento en servicio (F_{vplu'A})

Área (A) = f·b	3,30	m ²
Presión estática (q _A)	25,00	daN/m ²
Coefficiente de forma (C _f)	1,34	
Coefficiente de sombra (η)	0,15	

Sobre la 1ª VIGA

F_{vplu'A} = q_A·A·C_f	110,72	daN
---	---------------	------------

Sobre la 2ª VIGA

F_{vplu'A} = q_A·A·C_f·η	16,61	daN
---	--------------	------------

Fuerza del viento fuera de servicio (F_{vplu'B})

Área (A) = f·b	3,30	m ²
Presión estática (q _B)	80,00	daN/m ²
Coefficiente de forma (C _f)	1,34	
Coefficiente de sombra (η)	0,15	

Sobre la 1ª VIGA

F_{vplu'B} = q_B·A·C_f	354,29	daN
---	---------------	------------

Sobre la 2ª VIGA

F_{vplu'B} = q_B·A·C_f·η	53,14	daN
---	--------------	------------

Sobre la COLUMNA**Coef. de forma para viento actuando normal a la superficie (C_f) - Perfil: Tubo circular hueco**

Longitud (f)	6,50	m
Diámetro (d)	0,61	m
f/d	10,66	
En servicio (d·v _v)	12,20	m ² /s
Fuera de servicio (d·v _v)	21,96	m ² /s

Ambos > 4,5 m/s²

C_f (TABLA interpolando) =	0,65	
------------------------------	-------------	--

Fuerza del viento en servicio (F_{vcolA})

Área (A) = f·d	3,97	m ²
Presión estática (q_A)	25,00	daN/m ²
Coefficiente de forma (C_f)	0,65	
$F_{vcolA} = q_A \cdot A \cdot C_f$	64,73	daN

Fuerza del viento fuera de servicio (F_{vcolB})

Área (A) = f·d	3,97	m ²
Presión estática (q_B)	80,00	daN/m ²
Coefficiente de forma (C_f)	0,65	
$F_{vcolB} = q_B \cdot A \cdot C_f$	207,13	daN

Sobre la CARGA (embarcación)

Se calcula teniendo en cuenta la mayor superficie posible de exposición al viento y tomando como coeficiente aerodinámico $C = 1$

Para cargas inferiores a 25000 daN

1 m²/1000 daN para cargas hasta 5000 daN

0,5 m²/1000 daN para cargas desde 5000 daN a 25000 daN

Área (A)

Área	0,50	m ²
Carga unitaria	1000,00	daN/m ²
Carga útil	7848,00	daN
$A = (\text{Área/Carga unitaria}) \cdot \text{Carga útil}$	3,92	m²

Fuerza del viento en servicio (F_{vcA})

Área (A)	3,92	m ²
Presión estática (q_A)	25,00	daN/m ²
Coefficiente aerodinámico (C)	1,00	
$F_{vcA} = q_A \cdot A \cdot C$	98,10	daN

Fuerza del viento fuera de servicio (F_{vcB})

NO HAY CARGA	0,00	
$F_{vcB} =$	0,00	daN

Sobre el CONTRAPESO

Se evaluará como si fuera una carga
Para cargas inferiores a 25000 daN

1 m²/1000 daN para cargas hasta 5000 daN

0,5 m²/1000 daN para cargas desde 5000 daN a 25000 daN

Área (A)		
Área	0,50	m ²
Carga unitaria	1000,00	daN/m ²
Carga contrapeso	6867,00	daN
A = (Área/Carga uniataria)·Carga contrapeso	3,43	m²

Fuerza del viento en servicio (F_{vconA})		
Área (A)	3,43	m ²
Presión estática (q _A)	25,00	daN/m ²
Coefficiente aerodinámico (C)	1,00	
F_{vconA} = q_A·A·C	85,84	daN

Fuerza del viento fuera de servicio (F_{vconB})		
Área (A)	3,43	m ²
Presión estática (q _B)	80,00	daN/m ²
Coefficiente aerodinámico (C)	1,00	
F_{vconB} = q_B·A·C	274,68	daN

Sobrecarga de nieve

Se considera que no se usa la grúa con carga de nieve

Variaciones de temperatura

No se consideran, solo se tiene en cuenta cuando los elementos no pueden dilatarse libremente

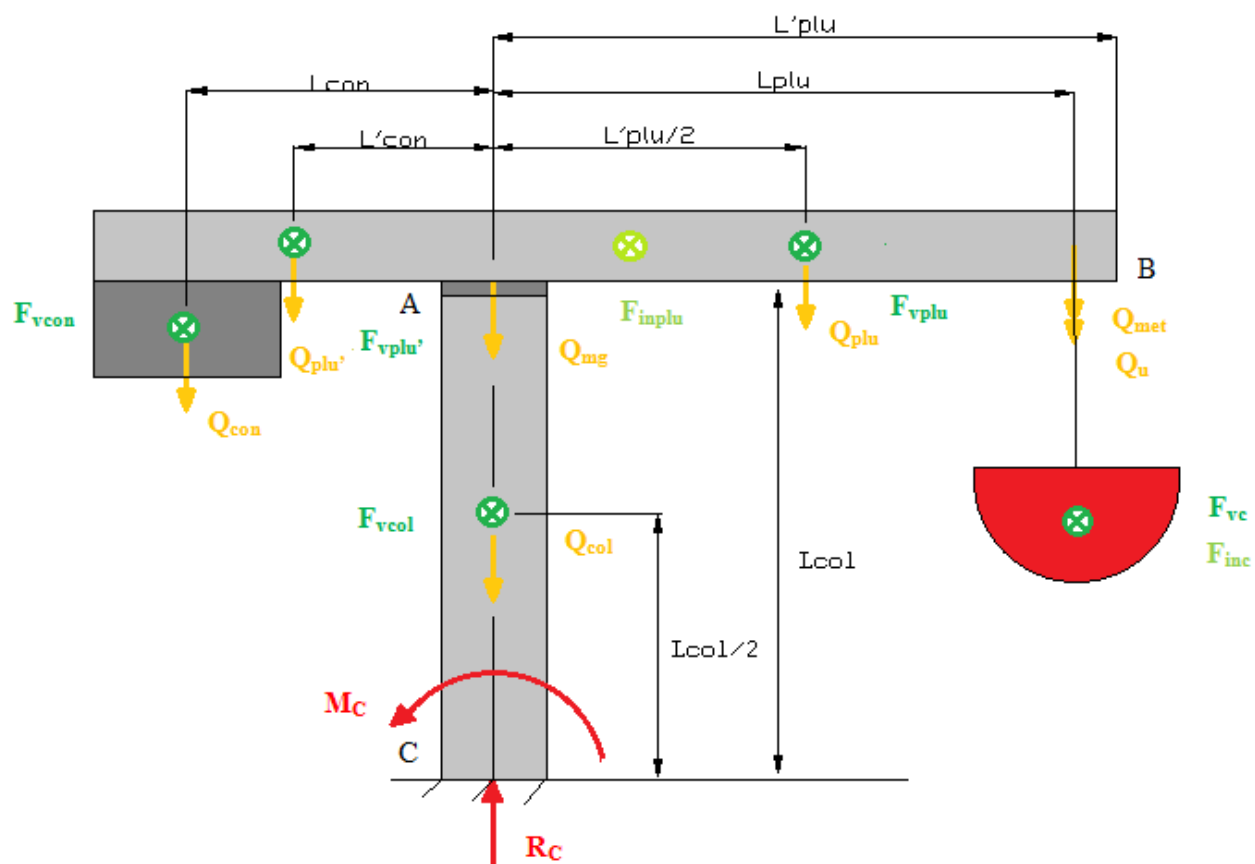


Figura 7. Solicitaciones que actúan sobre la estructura para el caso de grúa con contrapeso.

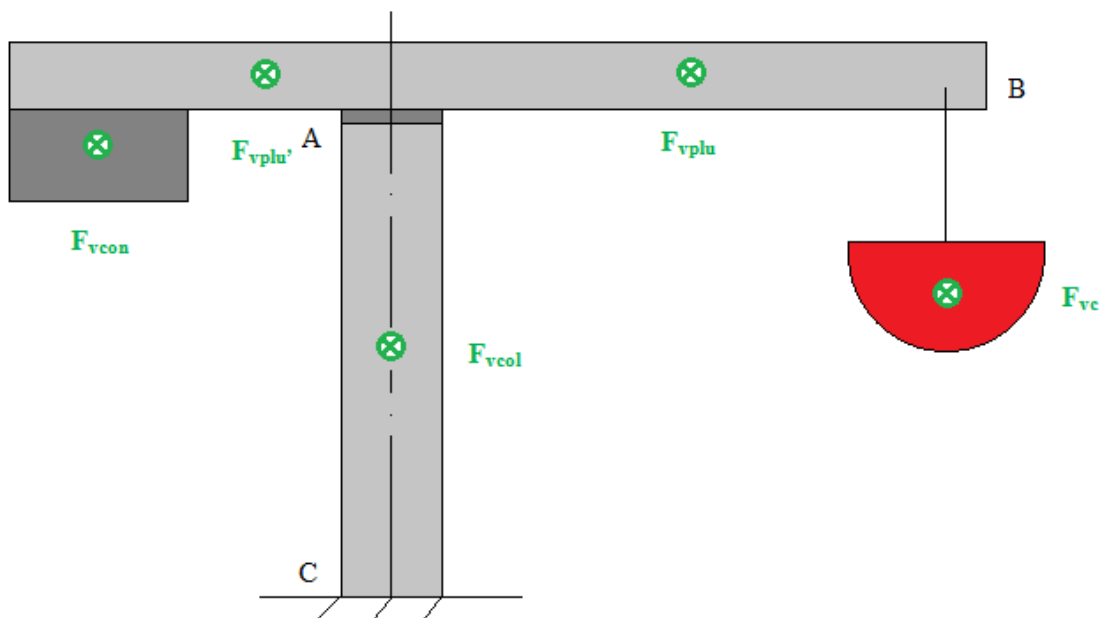


Figura 8. Fuerzas debidas al viento sobre la estructura para el caso de grúa con contrapeso.

Elementos		Caso A: Viento con grúa en servicio ($v = 20$ m/s)	Caso B: Viento con grúa fuera de servicio ($v = 36$ m/s)
Pluma	1ª viga	1853,85	5932,32
	2ª viga	278,08	889,85
	Total	2131,93	6822,17
Contrapluma	1ª viga	1107,15	3542,88
	2ª viga	166,07	531,43
	Total	1273,22	4074,31
Columna		647,29	2071,32
Carga		981	0
Contrapeso		858,38	2746,80

Tabla 12. Resumen de las fuerzas debidas al viento para el caso de grúa con contrapeso.

3.2.3. Esfuerzos producidos en la grúa

3.2.3.1. Reacciones producidas en la estructura

El peso propio de los elementos de la grúa y de la carga genera una fuerza y un momento en la base de la grúa. Estas solicitaciones están mayoradas según los supuestos de cargas y pesos ya comentados. Se aplicará el coeficiente de seguridad en el caso más desfavorable para cada elemento de la estructura al llevar a cabo el dimensionamiento. De esta forma, se sabrá cuál es la sección crítica en la pluma para poder dimensionar la misma.

Por lo tanto, en la base de la columna deberán aparecer unas reacciones exteriores para equilibrar las fuerzas y los momentos de vuelco producidos por los elementos anteriormente mencionados que se calcularán de la siguiente manera:

Para el caso de grúa sin contrapeso:

$$R_C = C_d \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{col} + Q_{plu} + Q_{mg}$$

$$M_C = C_d \cdot L_{plu} \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{plu} \cdot (L'_{plu}/2)$$

Para el caso de grúa con contrapeso:

$$R_C = C_d \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{con} + Q_{mg} + Q_{col} + 2 \cdot Q_{plu} + 2 \cdot Q_{plu}'$$

$$M_C = [C_d \cdot L_{plu} \cdot (Q_u + Q_{met}) + 2 \cdot Q_{plu} \cdot (L'_{plu}/2)] - [Q_{con} \cdot L_{con} + 2 \cdot Q_{plu}' \cdot L'_{con}]$$

Donde:

M_C = momento en C (base de la columna).

R_C = reacción vertical en C (base de la columna).

$C_d = \Psi$ = coeficiente dinámico (calculado anteriormente).

Q_u = Peso de la carga útil más accesorios.

Q_{met} = Peso del mecanismo de elevación y traslación (polipasto).

Q_{col} = Peso propio de la columna.

Q_{plu} = Peso propio de la pluma.

Q_{mg} = Peso del mecanismo de giro.

Q_{con} = Peso del contrapeso.

$Q_{plu'}$ = Peso propio de la contrapluma.

L_{plu} = Distancia desde el eje de giro hasta el punto de aplicación de la carga.

L'_{plu} = Distancia desde el eje de giro hasta el final de la pluma.

L_{con} = Distancia desde el eje de giro hasta el centro de gravedad del contrapeso.

L'_{con} = Distancia desde el eje de giro hasta el centro de gravedad de la contrapluma.

3.2.3.2. Resolución de cálculos reacciones

Configuración 1: Grúa sin contrapeso**REACCIÓN Y MOMENTO EN LA BASE DE LA GRÚA****Reacción vertical (R_C)**

	kg		
Q _{plu} (peso propio de la pluma)	2066,86	20275,90	N
Q _{col} (peso propio de la columna)	1891,50	18555,62	N
Q _u (carga útil + accesorios)	8250,00	80932,50	N
Q _{mg} (peso del mecanismo de giro)	830,00	8142,30	N
Q _{met} (peso del polipasto)	700,00	6867,00	N
C _d = Ψ (coeficiente dinámico)		1,02	
ΣF_v = 0 => R_C = C_d·(Q_u+Q_{met})+Q_{col}+Q_{plu}+Q_{mg}	13953,16	136880,50	N

Momento (M_C)

		d (distancia en m)		
Q _{plu} (peso propio de la pluma)	L' _{plu} /2	4,25	20275,90	N
Q _u (carga útil + accesorios)	L _{plu}	8,00	80932,50	N
Q _{met} (peso del polipasto)	L _{plu}	8,00	6867,00	N
C _d = Ψ (coeficiente dinámico)			1,02	
ΣM_C = 0 => M_C =				
C_d·L_{plu}·(Q_u+Q_{met})+Q_{plu}·(L'_{plu}/2)			805426,06	N·m

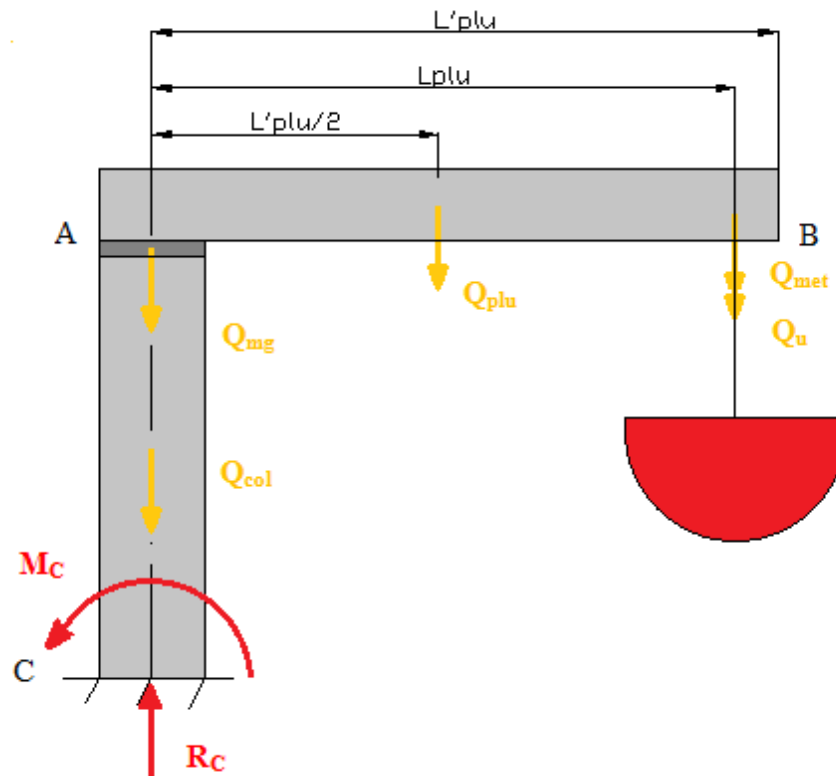


Figura 9. Fuerzas debidas al peso propio y reacciones para el caso de grúa sin contrapeso.

Configuración 2: Grúa con contrapeso**REACCIÓN Y MOMENTO EN LA BASE DE LA GRÚA****Reacción vertical (R_C)**

	kg		
Q _{plu} (peso propio de la pluma)	1037,00	10172,97	N
Q _{plu'} (peso propio de la contrapluma)	671,00	6582,51	N
Q _{col} (peso propio de la columna)	962,00	9437,22	N
Q _u (carga útil + accesorios)	8250,00	80932,50	N
Q _{mg} (peso del mecanismo de giro)	830,00	8142,30	N
Q _{met} (peso del polipasto)	700,00	6867,00	N
Q _{con} (peso del contrapeso)	7000,00	68670,00	N
C _d = Ψ (coeficiente dinámico)		1,02	
ΣR_C = 0 => R_C =			
C_d · (Q_u + Q_{met}) + Q_{con} + Q_{mg} + Q_{col} + 2 · Q_{plu} + 2 ·			
Q_{plu'}	21372,80	209667,17	N

Momento (M_C)

		d (distancia en m)		
Q _{plu} (peso propio de la pluma)	L' _{plu} /2	4,25	10172,97	N
Q _{plu'} (peso propio de la contrapluma)	L' _{con}	2,75	6582,51	N
Q _u (carga útil + accesorios)	L _{plu}	8,00	80932,50	N
Q _{met} (peso del polipasto)	L _{plu}	8,00	6867,00	N
Q _{con} (peso del contrapeso)	L _{con}	4,90	68670,00	N
C _d = Ψ (coeficiente dinámico)			1,02	N
ΣM_C = 0 => M_C =				
[C_d · L_{plu} · (Q_u + Q_{met}) + 2 · Q_{plu} · (L'_{plu}/2)] -				
[Q_{con} · L_{con} + 2 · Q_{plu'} · L'_{con}]				
			433036,94	N·m

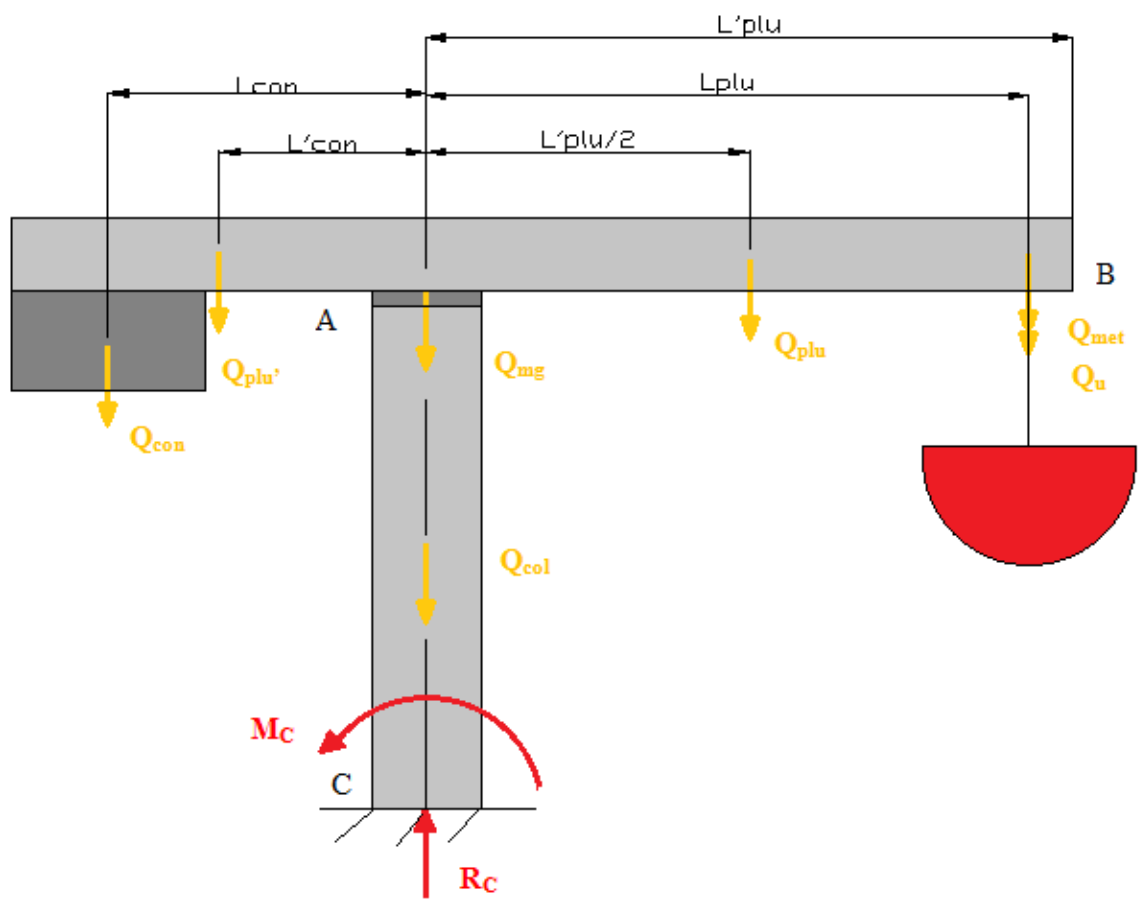


Figura 10. Fuerzas debidas al peso propio y reacciones para el caso de grúa con contrapeso.

3.2.4. Dimensionamiento del contrapeso

Para que la grúa esté equilibrada en la situación más desfavorable, que es cuando el barco se encuentra en la parte más alejada de la pluma, se tomará un peso de contrapeso de valor igual a la carga a elevar más peso de accesorios y polipasto.

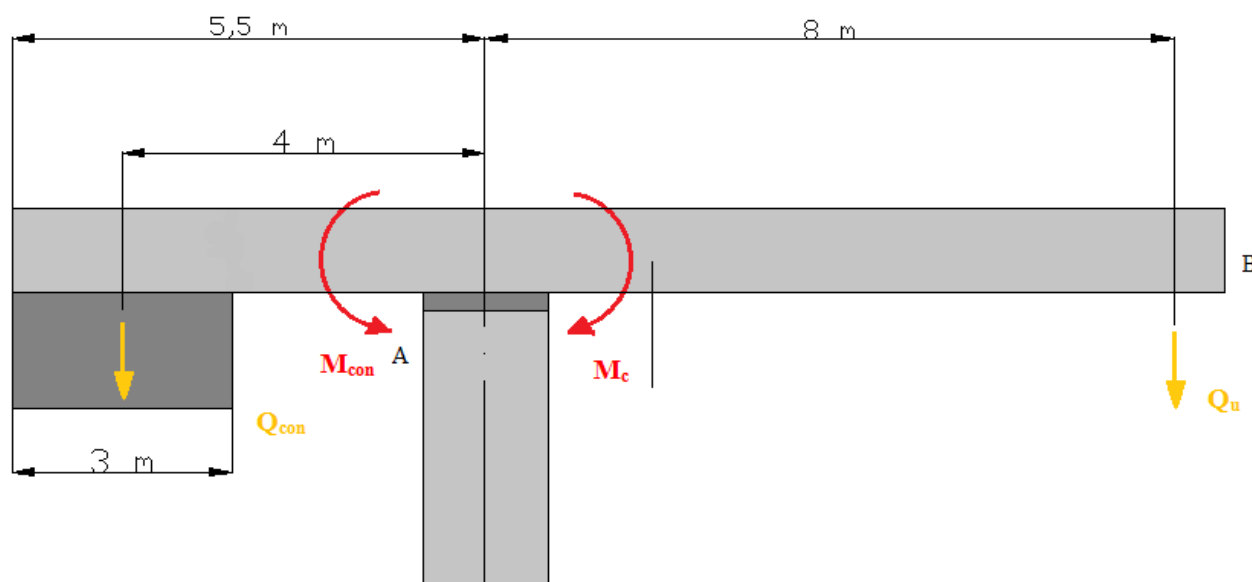


Figura 11. Momentos flectores en la pluma debidos al peso propio del contrapeso y de la carga.

Los momentos producidos por la fuerza debido al peso propio de la carga y el contrapeso serán, respectivamente:

$$M_c = Q_u \cdot L_{plu}$$

$$M_{con} = Q_{con} \cdot L_{con}$$

Donde:

$$Q_u = \text{peso del barco} + \text{accesorios} + \text{polipasto} = 8000 + 250 + 700 = 8950 \text{ kg} \sim 9 \text{ Tn}$$

$$L_{plu} = \text{distancia desde el eje de giro hasta la carga} = 8 \text{ m}$$

$$Q_{con} = \text{peso del contrapeso} \sim 9 \text{ Tn}$$

L_{con} = distancia desde el eje de giro hasta el centro de gravedad del contrapeso = 4 m

Por lo tanto:

$$M_c = Q_u \cdot L_{plu} = 9 \text{ Tn} \cdot 8 \text{ m} = 72 \text{ Tn} \cdot \text{m}$$

$$M_{con} = Q_{con} \cdot L_{con} = 9 \text{ Tn} \cdot 4 \text{ m} = 36 \text{ Tn} \cdot \text{m}$$

Cuando la grúa no eleva ningún barco:

Cuando la grúa eleva un barco:

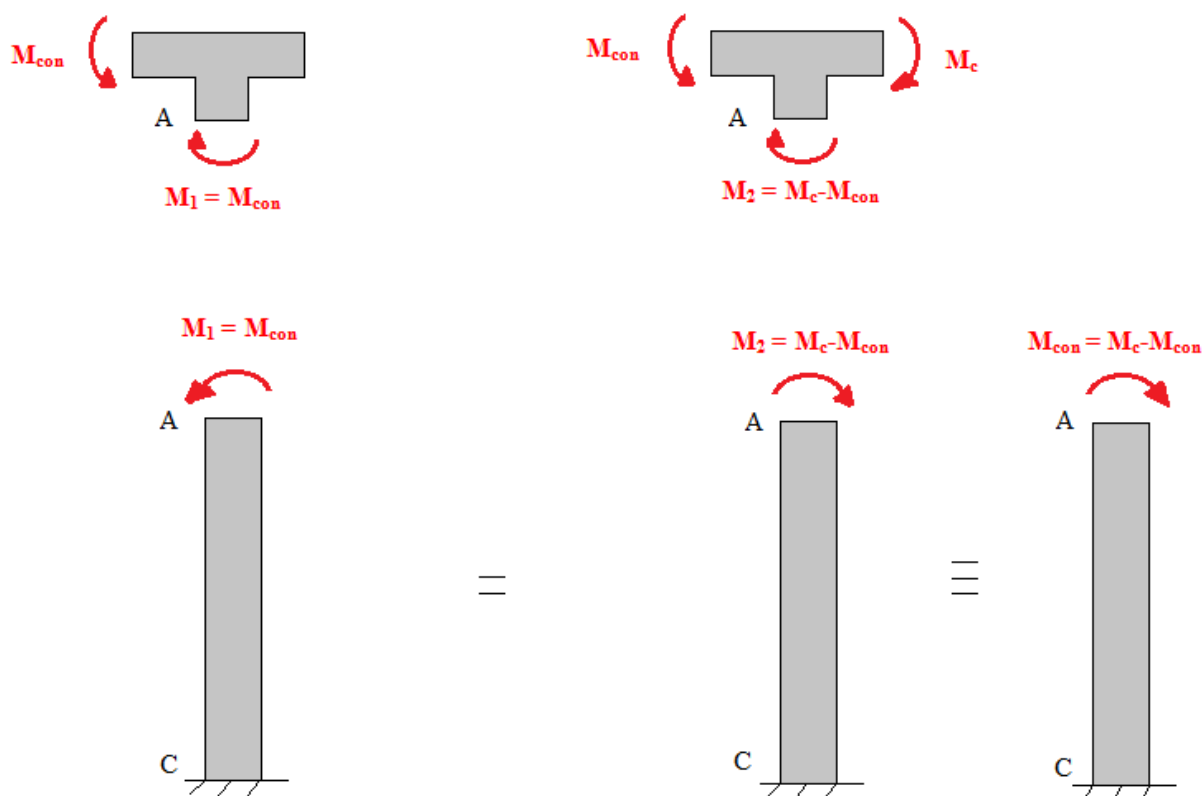


Figura 12. Esquema de momentos flectores en la pluma debidos al peso propio del contrapeso y de la carga.

Por consiguiente:

$$M_{con} = M_c - M_{con} \Rightarrow M_c = 2 \cdot M_{con} \Rightarrow M_{con} = M_c / 2 = (Q_u \cdot L_{plu}) / 2$$

Es decir, que para que la grúa esté en equilibrio, el momento del contrapeso tiene que ser la mitad del momento producido por la carga.

Respecto al dimensionamiento del contrapeso:

Se va a suponer un peso de 9 Tn, como se ha mencionado anteriormente, y unas dimensiones de 3 m de longitud y una anchura de 1 m.

Lo que se pretende a continuación es hallar la altura que debería tener el contrapeso para que pese 9 Tn.



Figura 13. Vista superior del contrapeso y parte de la contrapluma.

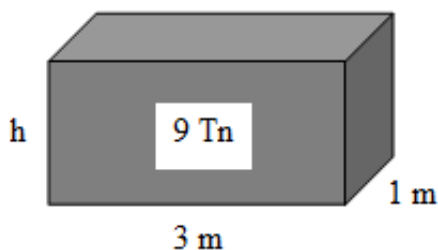


Figura 14. Dimensiones del contrapeso.

La densidad de un cuerpo es igual a:

$$\rho = m/\text{Vol}$$

Donde:

m = masa.

Vol = volumen del cuerpo.

Despejando de la expresión anterior el volumen:

$$\text{Vol} = m/\rho$$

El contrapeso se construirá de hormigón, siendo la densidad del hormigón $\rho_H = 2,5 \text{ Tn/m}^3$

Por lo tanto,

$$\text{Vol} = 9/2,5 = 3,6 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol} = 3,6 \text{ m}^3 = 3 \cdot 1 \cdot h \Rightarrow h = 3,6/3 = 1,2 \text{ m}$$

Es decir, si se quiere un contrapeso de 9 Tn, tiene que tener las siguientes dimensiones:

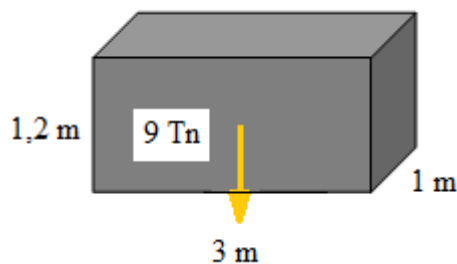


Figura 15. Configuración 1 del contrapeso.

El contrapeso se podría girar para que de esta forma ocupara menos espacio, quedando de la siguiente manera:

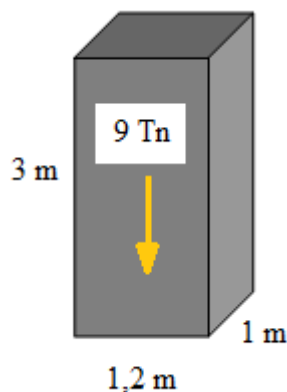


Figura 16. Configuración 2 del contrapeso.

Al haberlo girado, el espacio ocupado es menor pudiendo moverlo más hacia la izquierda de la contrapluma para que produzca un momento parecido al del principio y reduciendo de esta forma su peso.

Siguiendo el mismo procedimiento de cálculo que antes, para un peso propio de 7 Tn, la longitud del contrapeso es de 1,2 m, la anchura de 1 m, al igual que antes, y la nueva altura de 2,3 m.

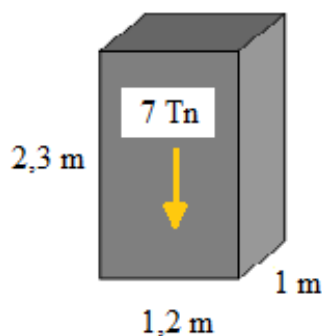


Figura 17. Configuración final del contrapeso.

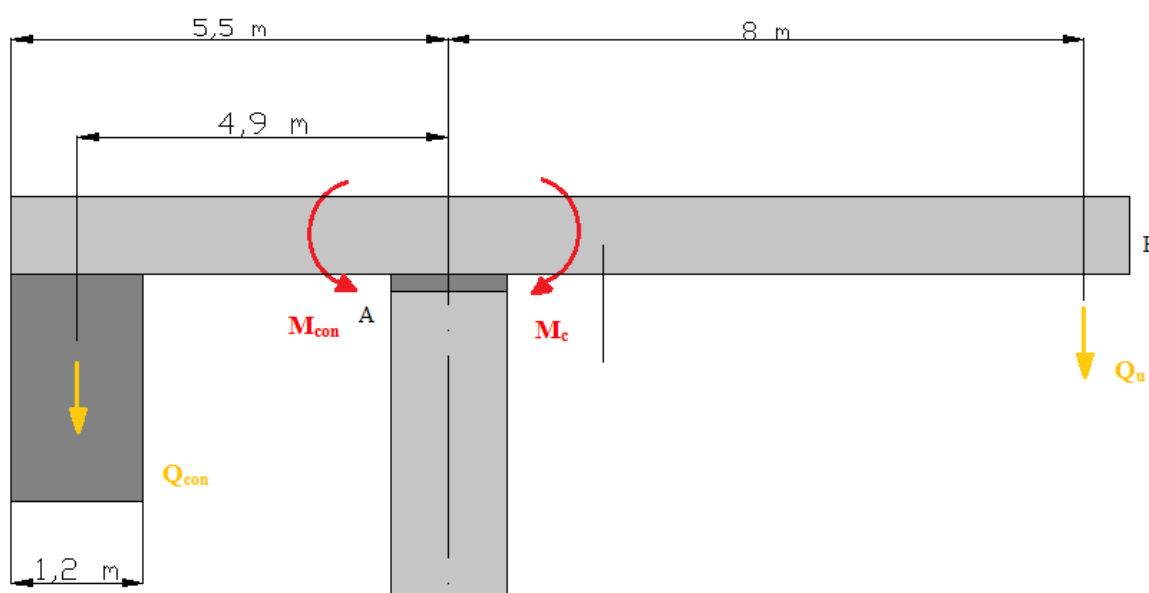


Figura 18. Momentos flectores en la pluma debidos al peso propio del contrapeso y de la carga para la configuración final del contrapeso.

Al igual que al principio de este apartado:

$$M_c = Q_u \cdot L_{plu} = 9 \text{ Tn} \cdot 8 \text{ m} = 72 \text{ Tn} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{con}} = Q_{\text{con}} \cdot L_{\text{con}} = 7 \text{ Tn} \cdot 4,9 \text{ m} \sim 35 \text{ m}$$

En conclusión, se ha conseguido reducir el peso del contrapeso aumentando la distancia al centro de gravedad del mismo para que produzca un momento parecido al que se obtenía con un contrapeso de mayor peso.

3.2.5. Dimensionamiento y cálculo de la pluma

3.2.5.1. Consideraciones generales

- Tipo de sección

Según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección solicitada por un momento flector, ésta se clasifica en cuatro clases: clase 1, 2, 3 y 4.

En este caso, se tomará una **sección de clase 3**, semicompacta o elástica, es decir, en la fibra más comprimida se puede alcanzar el límite elástico del acero pero la abolladura impide el desarrollo del momento plástico.

Configuración 1: Grúa sin contrapeso

- Fuerza de inercia

Para poder obtener la fuerza de inercia de la pluma y de la carga se han fijado los siguientes parámetros de diseño:

$\omega_{\text{máx}}$ = velocidad de giro de la pluma (0,6 rpm).

$t_{\text{mín}}$ = tiempo que tarda la pluma en alcanzar la velocidad de giro (2,5 s).

La aceleración angular será:

$$\alpha = \omega/t = (2 \cdot \pi \cdot n)/60 \cdot t = 0,03 \text{ rad/s}^2$$

Y la aceleración lineal de un objeto:

$$a_G = \alpha \cdot r_G$$

Siendo r_G = distancia desde el centro de giro hasta el centro de gravedad del objeto considerado.

Por tanto,

$$a_{plu} = \alpha \cdot r_{Gplu}$$

$$a_c = \alpha \cdot r_{Gc}$$

Donde:

a_{Gplu} = aceleración de la pluma.

r_{Gplu} = distancia desde el centro de giro hasta el centro de gravedad de la pluma.

a_{Gc} = aceleración de la carga.

r_{Gc} = distancia desde el centro de giro hasta el centro de gravedad de la carga.

- Tipo de perfil

Antes de mostrar los cálculos de la estructura, cabe destacar que en un principio se había seleccionado un perfil IPE para la pluma pero el punto más solicitado de la sección crítica de la pluma no aguantaba los esfuerzos a los que estaba sometido. Después se optó por un perfil rectangular hueco normalizado pero, al igual que antes, tampoco aguantaba. Finalmente, se ha elegido un perfil rectangular hueco a medida de 600 mm de altura y 400 mm de base con un espesor de 16 mm, el cual cumple con todas las restricciones impuestas por el dimensionamiento de la pluma.

- Momento de inercia

Dado que el perfil de la pluma se trata de un perfil rectangular hueco no normalizado, hay que hallar el área, momentos de inercia, módulos resistentes, etc. de este.

Finalmente, las características y dimensiones del perfil de la pluma son las siguientes:

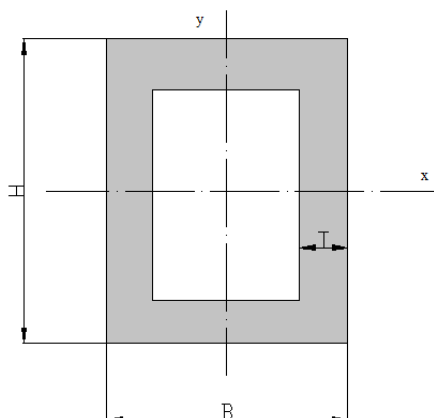


Figura 19. Perfil rectangular hueco no normalizado.

Características	
m (kg/m)	243,16
A (mm ²)	30.976
I _x (mm ⁴)	1.580.320.085,33
I _y (mm ⁴)	841.094.485,33
W _x (mm ³)	5.267.733,62
W _y (mm ³)	4.205.472,43
Dimensiones	
H (mm)	600
B (mm)	400
T (mm)	16

Tabla 13. Características y dimensiones perfil rectangular hueco no normalizado.

Para hallar la masa por unidad de longitud del perfil:

$$m = A \cdot \rho_{ac}$$

Donde:

A = área del perfil.

ρ_{ac} = densidad del acero (7850 kg/m^3).

Configuración 2: Grúa con contrapeso

- Cálculo del centro de gravedad del conjunto de la grúa

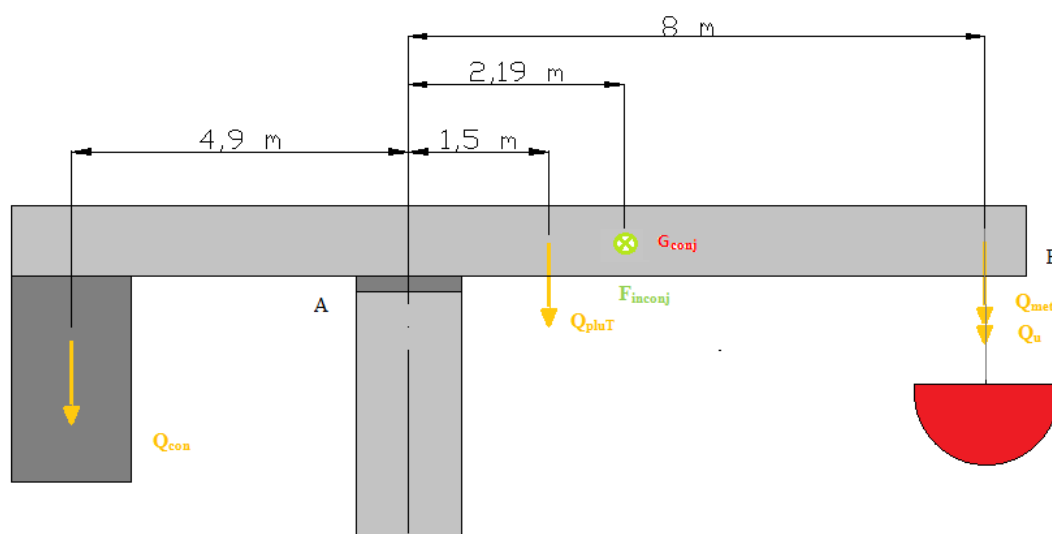


Figura 20. Centro de gravedad del conjunto.

El centro de gravedad del conjunto de la grúa será:

$$x_T = \frac{\sum m_i \cdot x_i}{\sum m_i} = \frac{2 \cdot 1708 \text{ kg} \cdot 1,5 \text{ m} - 7000 \text{ kg} \cdot 4,9 \text{ m} + 8950 \text{ kg} \cdot 8 \text{ m}}{2 \cdot 1708 \text{ kg} + 7000 \text{ kg} + 8950 \text{ kg}} = 2,19 \text{ m}$$

Por lo tanto, la fuerza de inercia del conjunto de la grúa se considerará aplicada en este punto. Además, a esa distancia también se podrían considerar aplicados el peso propio de las dos vigas, el peso de la carga, accesorios y polipasto y el peso del contrapeso.

- Tipo de perfil

Al igual que para el caso de grúa sin contrapeso, primeramente se ha optado por un perfil IPE para la pluma y, a diferencia del caso anterior, el punto más solicitado de la sección crítica de la pluma aguanta los esfuerzos a los que se encuentra sometido.

- Momento de inercia

Al haber dos perfiles, el momento de inercia respecto del eje x (eje horizontal) coincide para ambos, pero el momento de inercia respecto del eje y (eje vertical) no. Es por ello que hay que calcularlo mediante el teorema de Steiner o de los ejes paralelos.

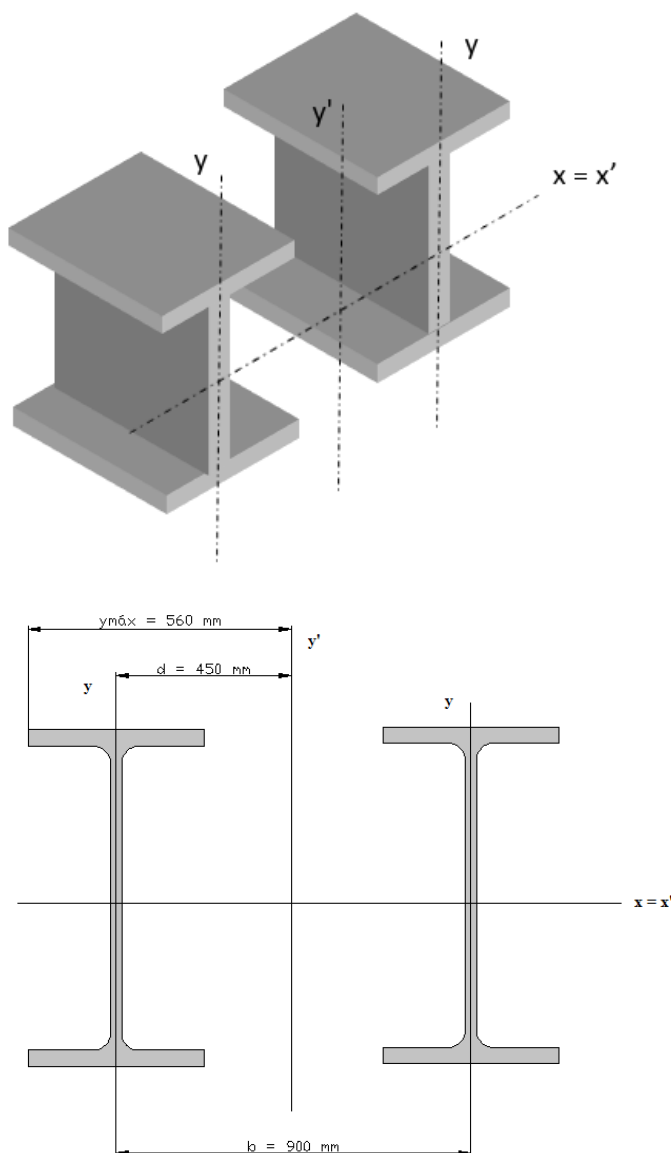


Figura 21. Momento de inercia respecto al eje y' .

Características	
m (kg/m)	122
A (mm ²)	15.600
I _x (mm ⁴)	920.800.000
I _y (mm ⁴)	33.870.000
W _x (mm ³)	3.070.000
W _y (mm ³)	308.000
Dimensiones	
h (mm)	600
b (mm)	220
s (mm)	12
t (mm)	19
r (mm)	24

Tabla 14. Características y dimensiones perfil IPE 600.

Según el teorema de Steiner:

$$I_{y'} = I_y + A \cdot d^2$$

Donde:

$I_{y'}$ = Momento de inercia del conjunto.

I_y = Momento de inercia respecto al eje y.

A = área del perfil.

d = distancia desde el eje y hasta al eje y'.

Con las características y dimensiones obtenidas del prontuario para un perfil IPE 600 se obtiene:

$$I_{y'} = 2 \cdot (33.870.000 + 15.600 \cdot 450^2) = 6.385.740.000 \text{ mm}^4$$

$$W_{y'} = I_{y'}/y_{\text{máx}} = 6.385.740.000 \text{ mm}^4/560 \text{ mm} = 11.403.107,14 \text{ mm}^3$$

3.2.5.2. Planteamiento de la pluma

1) **Reacciones producidas por la pluma.** En este punto, se van a calcular las reacciones soportadas por la unión de la pluma con la columna. Los esfuerzos que debe soportar la pluma son:

- Esfuerzos producidos por el peso propio de la pluma.
- Esfuerzos producidos por la carga en el extremo más alejado de la pluma.
- Esfuerzos producidos por el viento con la grúa en servicio sobre la pluma y la carga (y sobre la contrapluma y contrapeso en el caso de grúa con contrapeso).

Las ecuaciones para el cálculo de estas reacciones serán:

Para el caso de grúa sin contrapeso:

$$R_A = C_d \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + Q_{\text{plu}}$$

$$M_A = M_C = C_d \cdot L_{\text{plu}} \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + Q_{\text{plu}} \cdot (L'_{\text{plu}}/2)$$

Para el caso de grúa con contrapeso:

$$R_A = C_d \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + 2 \cdot Q_{\text{plu}}$$

$$M_A = M_C = C_d \cdot L_{\text{plu}} \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + 2 \cdot Q_{\text{plu}} \cdot (L'_{\text{plu}}/2)$$

2) **Planteamiento del perfil de la pluma.** Para calcular los esfuerzos en la pluma, primero hay que conocer las dimensiones del perfil de la pluma en la sección más crítica y, de esta forma, poder conocer los momentos de inercia y los momentos resistentes. La sección crítica de la pluma se encuentra en la unión pluma-columna. Una vez conocida la sección crítica, se debe buscar el punto más solicitado o punto crítico de la misma

para hallar las tensiones generadas por los esfuerzos a los que está sometido y de esta forma dimensionar la pluma para el caso más desfavorable.

En este caso, el punto crítico de la misma es el A, como se puede apreciar en la figuras de más abajo. Este punto está sometido a los siguientes esfuerzos:

Para el caso de grúa sin contrapeso:

$$\mathbf{A} \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \mathbf{M}_3, \mathbf{M}_4, \mathbf{M}_5, \mathbf{M}_6 \text{ o } \mathbf{M}_7 \\ \mathbf{V} = \mathbf{0} \end{array} \right.$$

Para el caso de grúa con contrapeso:

$$\mathbf{A} \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \mathbf{M}_3, \mathbf{M}_4, \mathbf{M}_5 \text{ o } \mathbf{M}_6 \\ \mathbf{V} = \mathbf{0} \end{array} \right.$$

Como se ha mencionado anteriormente, para el caso de grúa sin contrapeso, la pluma estará formada por un perfil rectangular hueco no normalizado de 600x400 mm y de 16 mm de espesor. Para el caso de grúa con contrapeso, se utilizarán dos perfiles IPE 600. Para ambos casos, la pluma se fabricará de acero St-42 (aceros para placas de aparatos de elevación y transporte), cuyo límite elástico es de 260 MPa.

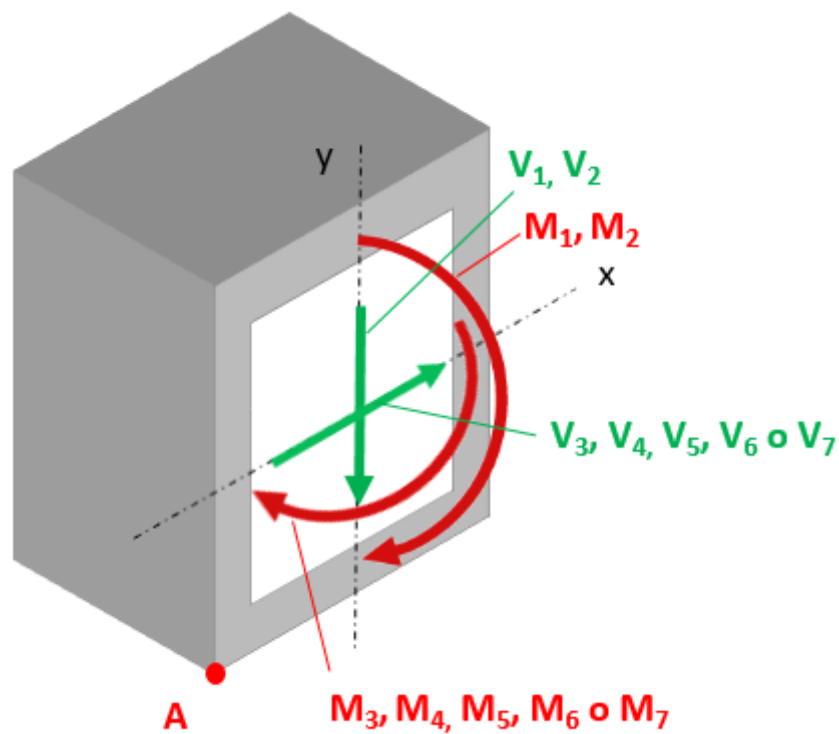


Figura 22. Esfuerzos en la sección más crítica de la pluma para el caso de grúa sin contrapeso.

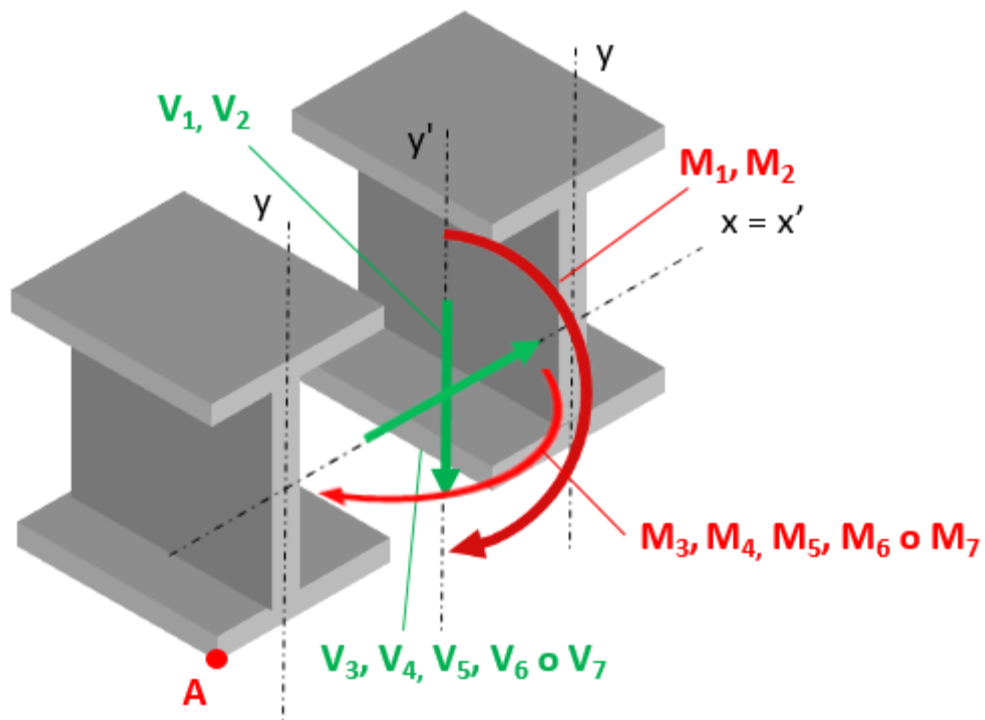


Figura 23. Esfuerzos en la sección más crítica de la pluma para el caso de grúa con contrapeso.

3.2.5.3. Determinación de solicitaciones en la pluma

El cálculo de las tensiones por solicitaciones en la pluma se calculará según los esfuerzos que debe soportar:

- Debido al peso propio de la pluma.
- Debido al peso de la carga en servicio más accesorios.
- Debido a la acción del viento en toda la pluma con esta en servicio.
- Debido a la acción del viento en la carga en el extremo de la pluma con esta en servicio.
- Debida a la acción del viento con la grúa fuera de servicio.

En todos estos casos, se calculará el momento flector máximo y el esfuerzo cortante máximo. Todos estos cálculos se realizarán considerando las solicitaciones verticales y las solicitaciones horizontales por separado.

3.2.5.4. Casos de combinación de solicitaciones

Se aplican los coeficientes FEM a cada uno de los tres casos de carga y se realizan las combinaciones para el punto más solicitado de la sección, en este caso, el punto A.

Configuración 1: Grúa sin contrapeso

1) Aparato en servicio sin viento

La fórmula general a aplicar será:

$$[\gamma_S \cdot (\sigma_1 + C_d \cdot \sigma_2 + (\sigma_3 + \sigma_4))] \cdot C_S$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 \cdot \gamma_S \cdot C_S$$

$$\sigma'_2 = \sigma_2 \cdot \gamma_S \cdot C_S \cdot C_d$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 \cdot \gamma_S \cdot C_S$$

$$\sigma'_4 = \sigma_4 \cdot \gamma_S \cdot C_S$$

$$\tau = 0$$

En este caso, $C_S = 1,5$.

Y la tensión equivalente será:

$$\sigma_{\text{equivalente}} = \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3 + \sigma'_4$$

2) Aparato en servicio con viento

La fórmula general a aplicar será:

$$[\gamma_S \cdot (\sigma_1 + C_d \cdot \sigma_2 + (\sigma_3 + \sigma_4)) + (\sigma_5 + \sigma_6)] \cdot C_S$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 \cdot \gamma_S \cdot C_S$$

$$\sigma'_2 = \sigma_2 \cdot \gamma_S \cdot C_S \cdot C_d$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 \cdot \gamma_S \cdot C_S$$

$$\sigma'_4 = \sigma_4 \cdot \gamma_S \cdot C_S$$

$$\sigma'_5 = \sigma_5 \cdot C_S$$

$$\sigma'_6 = \sigma_6 \cdot C_S$$

$$\tau = 0$$

En este caso, $C_S = 1,33$ por normativa.

La tensión equivalente será:

$$\sigma_{\text{equivalente}} = \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3 + \sigma'_4 + \sigma'_5 + \sigma'_6$$

3) Aparato sometido a solicitaciones excepcionales

Para este tipo de solicitaciones, $C_S = 1,1$.

a) Viento en tempestad

$$(\sigma'_1 + \sigma'_7) \cdot C_s$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 \cdot C_s$$

$$\sigma'_7 = \sigma_7 \cdot C_s$$

$$\tau = 0$$

Por lo tanto,

$$\sigma_{\text{equivalente}} = \sigma'_1 + \sigma'_7$$

b) Ensayo estático

$$(\sigma'_1 + \rho_2 \cdot \sigma'_2) \cdot C_s$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 \cdot C_s$$

$$\sigma'_2 = \sigma_2 \cdot \rho_2 \cdot C_s$$

$$\tau = 0$$

$\rho_2 = 1,4$, es el coeficiente de mayoración de la carga nominal prevista en los ensayos estáticos.

Por lo tanto,

$$\sigma_{\text{equivalente}} = \sigma'_1 + \sigma'_2$$

c) Ensayo dinámico

$$(\sigma'_1 + C_d \cdot \rho_1 \cdot \sigma'_2) \cdot C_s$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 \cdot C_s$$

$$\sigma'_2 = \sigma_2 \cdot C_d \cdot \rho_1 \cdot C_s$$

$$\tau = 0$$

C_d es el coeficiente dinámico calculado con anterioridad.

$\rho_1 = 1,2$, es el coeficiente de mayoración de la carga nominal prevista en los ensayos dinámicos.

Por lo tanto,

$$\sigma_{\text{equivalente}} = \sigma'_1 + \sigma'_2$$

Configuración 2: Grúa con contrapeso

1) Aparato en servicio sin viento

La fórmula general a aplicar será:

$$[\gamma_S \cdot (\sigma_1 + C_d \cdot \sigma_2 + \sigma_3)] \cdot C_S$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 \cdot \gamma_S \cdot C_S$$

$$\sigma'_2 = \sigma_2 \cdot \gamma_S \cdot C_S \cdot C_d$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 \cdot \gamma_S \cdot C_S$$

$$\tau = 0$$

En este caso, $C_S = 1,5$.

Y la tensión equivalente será:

$$\sigma_{\text{equivalente}} = \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3$$

2) Aparato en servicio con viento

La fórmula general a aplicar será:

$$[\gamma_S \cdot (\sigma_1 + C_d \cdot \sigma_2 + \sigma_3) + \sigma_4] \cdot C_S$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 \cdot \gamma_S \cdot C_S$$

$$\sigma'_2 = \sigma_2 \cdot \gamma_S \cdot C_S \cdot C_d$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 \cdot \gamma_S \cdot C_S$$

$$\sigma'_4 = \sigma_4 \cdot C_S$$

$$\tau = 0$$

En este caso, $C_S = 1,33$ por normativa.

La tensión equivalente será:

$$\sigma_{\text{equivalente}} = \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3 + \sigma'_4$$

3) Aparato sometido a sollicitaciones excepcionales

Para este tipo de sollicitaciones, $C_S = 1,1$.

d) Viento en tempestad

$$(\sigma'_1 + \sigma'_5) \cdot C_S$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 \cdot C_S$$

$$\sigma'_5 = \sigma_5 \cdot C_S$$

$$\tau = 0$$

Por lo tanto,

$$\sigma_{\text{equivalente}} = \sigma'_1 + \sigma'_5$$

e) Ensayo estático

$$(\sigma'_1 + \rho_2 \cdot \sigma'_2) \cdot C_S$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 \cdot C_s$$

$$\sigma'_2 = \sigma_2 \cdot \rho_2 \cdot C_s$$

$$\tau = 0$$

$\rho_2 = 1,4$, es el coeficiente de mayoración de la carga nominal prevista en los ensayos estáticos.

Por lo tanto,

$$\sigma_{\text{equivalente}} = \sigma'_1 + \sigma'_2$$

f) Ensayo dinámico

$$(\sigma'_1 + C_d \cdot \rho_1 \cdot \sigma'_2) \cdot C_s$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 \cdot C_s$$

$$\sigma'_2 = \sigma_2 \cdot C_d \cdot \rho_1 \cdot C_s$$

$$\tau = 0$$

C_d es el coeficiente dinámico calculado con anterioridad.

$\rho_1 = 1,2$, es el coeficiente de mayoración de la carga nominal prevista en los ensayos dinámicos.

Por lo tanto,

$$\sigma_{\text{equivalente}} = \sigma'_1 + \sigma'_2$$

3.2.5.5. Resolución de cálculos pluma

Configuración 1: Grúa sin contrapeso**REACCIONES SOPORTADAS EN LA UNIÓN DE LA PLUMA CON LA COLUMNA****Reacción vertical (R_A)**

	kg		
Q_{plu} (peso propio de la pluma)	2066,86	20275,90	N
Q_u (carga útil + accesorios)	8250,00	80932,50	N
Q_{met} (peso del polipasto)	700,00	6867,00	N
$C_d = \Psi$ (coeficiente dinámico)		1,02	
$\Sigma F_V = 0 \Rightarrow R_A = C_d \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{plu}$	11231,66	110182,58	N

Momento (M_A)

	d (distancia en m)		
Q_{plu} (peso propio de la pluma)	$L'_{plu}/2$	4,25	20275,90 N
Q_u (carga útil + accesorios)	L_{plu}	8,00	80932,50 N
Q_{met} (peso del polipasto)	L_{plu}	8,00	6867,00 N
$C_d = \Psi$ (coeficiente dinámico)		1,02	
$\Sigma M_A = 0 \Rightarrow M_A = M_C =$ $C_d \cdot L_{plu} \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{plu} \cdot (L'_{plu}/2)$		805426,06	N·m

DIMENSIONES DEL PERFIL EN LA SECCIÓN CRÍTICA**Prontuario de perfiles de acero (Perfil: Rectangular hueco a medida)**

A	30.976,00	mm ²
I_x	1.580.320.085,00	mm ⁴
I_y	841.094.485,33	mm ⁴
W_x	5.267.733,62	mm ³
W_y	4.205.472,43	mm ²
Q_{plu} por unidad de long.	2385,40	N/m
L_{plu}	8,50	m
Q_{plu}	20275,90	N

Punto crítico de la sección: A

TENSIONES POR ESFUERZOS VERTICALES EN LA PLUMA**Debido al peso propio de la pluma (Q_{plu})**

$L = L'_{plu}$	8,50	m
$q = M_{plu}$	2385,40	N/m
$M_{f\text{máx}}$ (M_f máx. en A) = $q \cdot L^2/2$	86172,56	N·m
$V_{\text{máx}}$ (Cortante máx. en A) = $q \cdot L$	20275,90	N

$\sigma_1 = M_{f\text{máx}}/W_x$	16,36	N/mm²
$\tau_1 =$	0,00	N/mm²

Debido al peso de la carga en servicio (peso útil) + accesorios (incluido el polipasto) (Q_u+Q_{met})

$L = L_{plu}$	8,00	m
$q = Q_u+Q_{met}$	87799,50	N
$M_{f\text{máx}}$ (M_f máx. en A) = $q \cdot L$	702396,00	N·m
$V_{\text{máx}}$ (Cortante máx. en A) = q	87799,50	N

$\sigma_2 = M_{f\text{máx}}/W_x$	133,34	N/mm²
$\tau_2 =$	0,00	N/mm²

TENSIONES POR ESFUERZOS HORIZONTALES EN LA PLUMA**Fuerzas debidas a la aceleración para el peso propio de la pluma (Q_{plu})**

$q = F_{inplu}$	220,77	N
$L = L'_{plu}/2$	4,25	m
$M_{f\text{máx}}$ (M_f máx. en A) = $q \cdot L$	938,27	N·m
$V_{\text{máx}}$ (Cortante máx. en A) = q	220,77	N

$\sigma_3 = M_{f\text{m}\acute{a}\text{x}}/W_y$	0,22	N/mm²
$\tau_3 =$	0,00	N/mm²

Fuerzas debidas a la aceleración para el peso de la carga en servicio (peso útil) + accesorios (incluido el polipasto) (Q_u+Q_{met})

$q = F_{\text{inc}}$	1799,50	N
$L = L_{\text{plu}}$	8,00	m
$M_{f\text{m}\acute{a}\text{x}} (M_f \text{ máx. en A}) = q \cdot L$	14396,00	N·m
$V_{\text{m}\acute{a}\text{x}} (\text{Cortante máx. en A}) = q$	1799,50	N

$\sigma_4 = M_{f\text{m}\acute{a}\text{x}}/W_y$	3,42	N/mm²
$\tau_4 =$	0,00	N/mm²

TENSIONES DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL VIENTO EN LA PLUMA

Fuerzas debidas a la acción del viento en servicio en toda la pluma ($F_{v\text{pluA}}$)

$F_{v\text{pluA}}$	2209,58	N
$L = L'_{\text{plu}}$	8,50	m
$q = F_{v\text{pluA}}/L$	259,95	N/m
$M_{f\text{m}\acute{a}\text{x}} = q \cdot L^2/2$	9390,72	N·m
$V_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = q \cdot L$	2209,58	N

$\sigma_5 = M_{f\text{m}\acute{a}\text{x}}/W_y$	2,23	N/mm²
$\tau_5 =$	0,00	N/mm²

Fuerzas debidas a la acción del viento en servicio en la carga en el extremo de la pluma (F_{vcA})

$F_{vcA} = q$	981,00	N
$L = L_{\text{plu}}$	8,00	m
$M_{f\text{m}\acute{a}\text{x}} = q \cdot L$	7848,00	N·m

$V_{\text{máx}} = q$	981,00	N
----------------------	--------	---

$\sigma_6 = M_{\text{fímáx}}/W_y$	1,87	N/mm ²
-----------------------------------	------	-------------------

$\tau_6 =$	0,00	N/mm ²
------------	------	-------------------

Fuerzas debidas a la acción del viento fuera de servicio en toda la pluma (F_{vpluB})

F_{vpluB}	7070,64	N
--------------------	---------	---

$L = L'_{\text{plu}}$	8,50	m
-----------------------	------	---

$q = F_{\text{vpluB}}/L$	831,84	N/m
--------------------------	--------	-----

$M_{\text{fímáx}} = q \cdot L^2/2$	30050,22	N·m
------------------------------------	----------	-----

$V_{\text{máx}} = q \cdot L$	7070,64	N
------------------------------	---------	---

$\sigma_7 = M_{\text{fímáx}}/W_y$	7,15	N/mm ²
-----------------------------------	------	-------------------

$\tau_7 =$	0,00	N/mm ²
------------	------	-------------------

ESTUDIO DE LAS DIFERENTES POSIBILIDADES EN LA PLUMA (COMBINACIONES)

Se aplican los coefs. FEM en cada uno

En servicio sin viento

γ_s (TABLA)

1,06

C_d (Coeficiente dinámico)

1,02

C_s (Coeficiente de seguridad)

1,50

Por normativa

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	16,36	26,01	0,00	0,00
2	133,34	217,10	0,00	0,00
3	0,22	0,35	0,00	0,00
4	3,42	5,44	0,00	0,00

$\sigma_{\text{equivalente}}$	248,91	MPa
-------------------------------	--------	-----

En servicio con viento

γ_s (TABLA)	1,06	
C_d (Coeficiente dinámico)	1,02	
C_s (Coeficiente de seguridad)	1,33	Por normativa

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	16,36	23,06	0,00	0,00
2	133,34	192,49	0,00	0,00
3	0,22	0,31	0,00	0,00
4	3,42	4,83	0,00	0,00
5	2,23	2,97	0,00	0,00
6	1,87	2,48	0,00	0,00

$\sigma_{equivalente}$ 226,15 MPa

Fuera de servicio con viento

C_s (Coeficiente de seguridad)	1,10	Por normativa
----------------------------------	-------------	---------------

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	16,36	17,99	0,00	0,00
7	7,15	7,86	0,00	0,00

$\sigma_{equivalente}$ 25,85 MPa

Ensayo estático

C_s (Coeficiente de seguridad)	1,10	Por normativa
ρ_2 (Coeficiente de mayoración para ensayos estáticos)	1,40	Por normativa

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	16,36	17,99	0,00	0,00
2	133,34	205,34	0,00	0,00

$\sigma_{equivalente}$ 223,34 MPa

Ensayo dinámico

C_d (Coeficiente dinámico)	1,02	
C_s (Coeficiente de seguridad)	1,10	Por normativa
ρ_1 (Coeficiente de mayoración para ensayos dinámicos)	1,20	Por normativa

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	16,36	17,99	0,00	0,00
2	133,34	180,23	0,00	0,00
$\sigma_{equivalente}$	198,23		MPa	

Comprobación de validez de la sección crítica

	$\sigma_{equivalente}$	
Sin viento en servicio	248,91	MPa
Con viento en servicio	226,15	MPa
Con viento sin servicio	25,85	MPa
Ensayo estático	223,34	MPa
Ensayo dinámico	198,23	MPa

La pluma está construida en acero St-42 => σ_{adm} **260,00** **MPa**

$\sigma_{equivalente}$ (CASO MÁS DESFAVORABLE) = **248,91** **MPa**

Como $\sigma_{equivalente} < \sigma_{adm}$ El perfil elegido en la sección crítica es válido

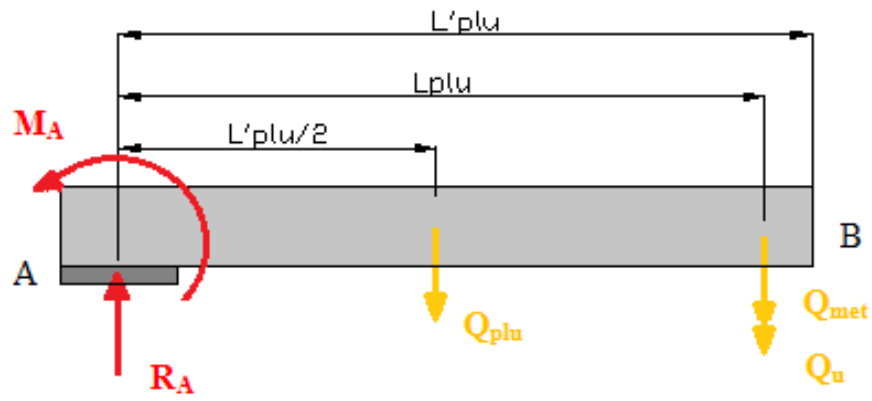


Figura 24. Fuerzas debidas al peso propio y reacciones en la pluma para el caso de grúa sin contrapeso.

Configuración 2: Grúa con contrapeso**REACCIONES SOPORTADAS EN LA UNIÓN DE LA PLUMA CON LA COLUMNA****Reacción vertical (R_A)**

	kg		
Q_{plu} (peso propio de la pluma)	1037,00	10172,97	N
$Q_{plu'}$ (peso propio de la contrapluma)	671,00	6582,51	N
Q_u (carga útil + accesorios)	8250,00	80932,50	N
Q_{met} (peso del polipasto)	700,00	6867,00	N
Q_{con} (peso contrapeso)	7000,00	68670,00	N
$C_d = \Psi$ (coeficiente dinámico)		1,02	
$\Sigma F_v = 0 \Rightarrow R_A =$			
$C_d \cdot (Q_u + Q_{met}) + 2 \cdot Q_{plu} + 2 \cdot Q_{plu'} + Q_{con}$	19545,00	191736,45	

Momento (M_A)

		d (distancia en m)		
Q_{plu} (peso propio de la pluma)	$L'_{plu}/2$	4,25	10172,97	N
$Q_{plu'}$ (peso propio de la contrapluma)	L'_{con}	2,75	6582,51	N
Q_u (carga útil + accesorios)	L_{plu}	8,00	80932,50	N
Q_{met} (peso del polipasto)	L_{plu}	8,00	6867,00	N
Q_{con} (peso contrapeso)	L_{con}	4,90	68670,00	N
$C_d = \Psi$ (coeficiente dinámico)			1,02	
$\Sigma M_A = M_C = 0 \Rightarrow M_A =$				
$[C_d \cdot L_{plu} \cdot (Q_u + Q_{met}) + 2 \cdot Q_{plu} \cdot (L'_{plu}/2)] - [Q_{con} \cdot L_{con} + 2 \cdot Q_{plu'} \cdot L'_{con}]$			431956,76	N·m

Punto más solicitado de la sección de la sección: A

DIMENSIONES DEL PERFIL EN LA SECCIÓN CRÍTICA**Prontuario de perfiles de acero (Perfil: IPE600)**

A	15.600,00	mm ²
I_x	920.800.000,00	mm ⁴
I_y	6.385.740.000,00	mm ⁴
W_x	3.070.000,00	mm ³
W_y	11.403.107,14	mm ³
Q_{plu} por unidad de long.	1196,82	N/m
L_{plu}	14,00	m

Q_{plu}	16755,48	N
-----------	----------	---

TENSIONES POR ESFUERZOS VERTICALES EN LA PLUMA

Debido al peso propio de la pluma (Q_{plu})

L'_{plu}	2,19	m
$q = M_{plu}$	2393,64	N/m
L	14,00	m
$M_{f\text{máx}}$ (M_f máx. en A) = $q \cdot L$	73389,00	N·m
$V_{\text{máx}}$ (Esfuerzo cortante máx. en A) = $q \cdot L$	33510,96	N

$\sigma_1 = M_{f\text{máx}}/W_x$	23,91	N/mm ²
$\tau_1 =$	0,00	N/mm ²

Debido al peso de la carga en servicio (peso útil) + accesorios (incluido el polipasto) ($Q_u + Q_{met}$)

$q = Q_u + Q_{met}/2$ (porque la carga se reparte entre las 2 vigas)	43899,75	N
$L = L_{plu}$	8,00	N/m
$M_{f\text{máx}}$ (M_f máx. en A) = $q \cdot L$	351198,00	N·m
$V_{\text{máx}}$ (Cortante máx. en A) = q	43899,75	N

$\sigma_2 = M_{f\text{máx}}/W_x$	114,40	N/mm ²
$\tau_2 =$	0,00	N/mm ²

TENSIONES POR ESFUERZOS HORIZONTALES EN LA PLUMA

Fuerzas debidas a la aceleración para el conjunto de la grúa

$q = F_{inconj}$	1065,92	N
$L = r_{Gconj}$	2,19	m
$M_{f\text{máx}}$ (M_f máx. en A) = $q \cdot L$	2334,36	N·m

$V_{\text{máx}}$ (Cortante máx. en A) = q	1065,92	N
---	---------	---

$\sigma_3 = M_{\text{fmáx}}/W_y$	0,20	N/mm ²
----------------------------------	------	-------------------

$\tau_3 =$	0,00	N/mm ²
------------	------	-------------------

TENSIONES DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL VIENTO EN LA PLUMA

Fuerzas debidas a la acción del viento en servicio en toda la pluma, carga y el contrapeso (F_{vA})

F_{vpluA} (1ª viga)	1853,85	N
F_{vpluA} (2ª viga)	278,08	N
$F_{vpluA} = F_{vpluA}$ (1ª viga)+ F_{vpluA} (2ª viga)	2131,93	N
F_{vcA}	981,00	N
$F_{vplu'A}$ (1ª viga)	1107,15	N
$F_{vplu'A}$ (2ª viga)	166,07	N
$F_{vplu'A} = F_{vplu'A}$ (1ª viga)+ $F_{vplu'A}$ (2ª viga)	1273,22	N
F_{vconA}	858,38	N
$F_{vA} = F_{vpluA}+F_{vcA}+F_{vplu'A}+F_{vconA} = q$	5244,53	N
$M_{FvpluA} = F_{vpluA} \cdot (L'_{plu}/2)$	9060,70	N·m
$M_{FvcA} = F_{vcA} \cdot L_{plu}$	7848,00	N·m
$M_{FvdchaA} = M_{FvpluA}+M_{FvcA}$	16908,70	N·m
$M_{Fvplu'A} = F_{vplu'A} \cdot L'_{con}$	3501,36	N·m
$M_{FvconA} = F_{vconA} \cdot L_{con}$	4206,06	N·m
$M_{FvizdaA} = M_{Fvplu'A}+M_{FvconA}$	7707,42	N·m
$M_{\text{fmáx}}$	16908,70	N·m
$V_{\text{máx}} = q$	5244,53	N

$\sigma_4 = M_{\text{fmáx}}/W_y$	1,48	N/mm ²
----------------------------------	------	-------------------

$\tau_4 =$	0,00	N/mm ²
------------	------	-------------------

Fuerzas debidas a la acción del viento fuera de servicio en toda la pluma, carga y el contrapeso (F_{vB})

F_{vpluB} (1ª viga)	5932,32	N
F_{vpluB} (2ª viga)	889,85	N
$F_{vpluB} = F_{vpluB}$ (1ª viga)+ F_{vpluB} (2ª viga)	6822,17	N
F_{vcB}	0,00	N
$F_{vplu'B}$ (1ª viga)	3542,88	N
$F_{vplu'B}$ (2ª viga)	531,43	N
$F_{vplu'B} = F_{vplu'B}$ (1ª viga)+ $F_{vplu'B}$ (2ª viga)	4074,31	N
F_{vconB}	2746,80	N
$F_{vB} = F_{vpluB}+F_{vcB}+F_{vplu'B}+F_{vconB} = q$	13643,28	N
$M_{FvpluB} = F_{vpluB} \cdot (L'_{plu}/2)$	28994,22	N·m
$M_{FvcB} = F_{vcB} \cdot L_{plu}$	0,00	N·m
$M_{FvdchaB} = M_{FvpluB}+M_{FvcB}$	28994,22	N·m
$M_{Fvplu'B} = F_{vplu'B} \cdot L'_{con}$	11204,35	N·m
$M_{FvconB} = F_{vconB} \cdot L_{con}$	13459,32	N·m
$M_{FvizdaB} = M_{Fvplu'B}+M_{FvconB}$	24663,67	N·m
M_{fmax}	28994,22	N·m
$V_{max} = q$	13643,28	N

$\sigma_s = M_{fmax}/W_y$	2,54	N/mm ²
$\tau_s =$	0,00	N/mm ²

ESTUDIO DE LAS DIFERENTES POSIBILIDADES EN LA PLUMA (COMBINACIONES)

Se aplican los coefs. FEM en cada uno

En servicio sin viento

γ_s (TABLA)	1,06	
C_d (Coeficiente dinámico)	1,02	
C_s (Coeficiente de seguridad)	1,50	Por normativa

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	23,91	38,01	0,00	0,00
2	114,40	185,53	0,00	0,00
3	0,20	0,33	0,00	0,00

$\sigma_{\text{equivalente}}$	223,86	MPa
-------------------------------	---------------	------------

En servicio con viento

γ_s (TABLA)	1,06	
C_d (Coeficiente dinámico)	1,02	
C_s (Coeficiente de seguridad)	1,33	Por normativa

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	23,91	33,70	0,00	0,00
2	114,40	164,50	0,00	0,00
3	0,20	0,29	0,00	0,00
4	1,48	1,97	0,00	0,00

$\sigma_{\text{equivalente}}$	200,46	MPa
-------------------------------	---------------	------------

Fuera de servicio con viento

C_s (Coeficiente de seguridad)	1,10	Por normativa
----------------------------------	-------------	---------------

	σ_i	σ'_i (MPa)	τ_i (MPa)	τ'_i
1	23,91	26,30	0,00	0,00
5	2,54	2,80	0,00	0,00

$\sigma_{\text{equivalente}}$	29,09	MPa
-------------------------------	--------------	------------

Ensayo estático

C_s (Coeficiente de seguridad)	1,10	Por normativa
p_2 (Coeficiente de mayoración para ensayos estáticos)	1,40	Por normativa

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	23,91	26,30	0,00	0,00
2	114,40	176,17	0,00	0,00

$\sigma_{equivalente}$	202,47	MPa
------------------------	---------------	------------

Ensayo dinámico

C_d (Coeficiente dinámico)	1,02	
C_s (Coeficiente de seguridad)	1,10	Por normativa
ρ_1 (Coeficiente de mayoración para ensayos dinámicos)	1,20	Por normativa

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	23,91	26,30	0,00	0,00
2	114,40	154,02	0,00	0,00

$\sigma_{equivalente}$	180,32	MPa
------------------------	---------------	------------

Comprobación de validez de la sección crítica

	$\sigma_{equivalente}$	
Sin viento en servicio	223,86	MPa
Con viento en servicio	200,46	MPa
Con viento sin servicio	29,09	MPa
Ensayo estático	202,47	MPa
Ensayo dinámico	180,32	MPa

La pluma está construida en acero St-42 =>		
σ_{adm}	260,00	MPa

$\sigma_{equivalente}$ (CASO MÁS DESFAVORABLE) =	223,86	MPa
--	---------------	------------

Como $\sigma_{equivalente} < \sigma_{adm}$	El perfil elegido en la sección crítica es válido
--	--

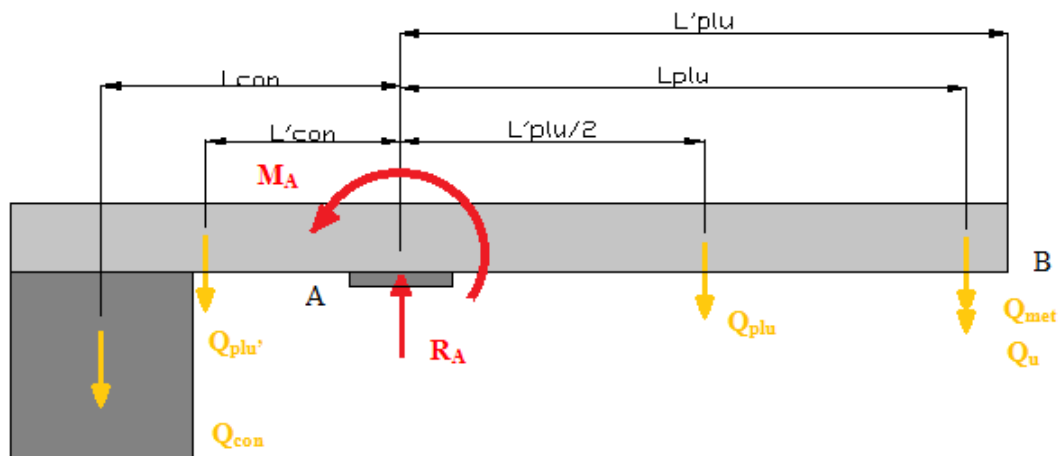


Figura 25. Fuerzas debidas al peso propio y reacciones en la pluma para el caso de grúa con contrapeso.

3.2.6. Dimensionamiento y cálculo de la columna

3.2.6.1. Consideraciones generales

- Tipo de sección

Al igual que para el caso de la pluma, se tomará una sección de clase 3, semicompacta o elástica, es decir, en la fibra más comprimida se puede alcanzar el límite elástico del acero pero la abolladura impide el desarrollo del momento plástico.

- Hipótesis de viento más desfavorable

Se han estudiado dos hipótesis de viento para ver cuál de las dos es más crítica:

Hipótesis de viento 1: Viento paralelo a la pluma.

Hipótesis de viento 2: Viento perpendicular a la pluma.

Tras los cálculos pertinentes, se ha comprobado que no hay una hipótesis de viento más desfavorable que la otra, ya que la peor combinación de cargas para el dimensionamiento de la columna es cuando la grúa está en funcionamiento sin viento debido a que la norma considera un coeficiente de seguridad mayor. Esto es, el viento no influye en la peor combinación, por lo que da igual con qué hipótesis de viento hacer los cálculos.

Para los cálculos más adelante mostrados se considerará la hipótesis de viento 2.

Configuración 1: Grúa sin contrapeso

- Tipo de perfil

Para la columna, se ha elegido un perfil tubular circular hueco con un diámetro exterior de 610 mm y un espesor de 20 mm.

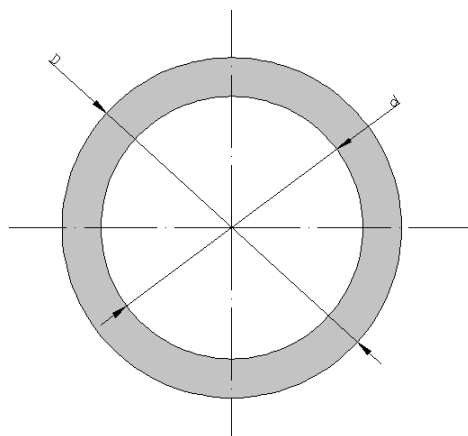


Figura 26. Perfil de la columna para el caso de grúa sin contrapeso.

Características	
m (kg/m)	291
A (mm ²)	37.100
I _{flex} (mm ⁴)	1.614.900.000
I _{tor} (mm ⁴)	3.229.790.000
W _{flex} (mm ³)	5.295.000
W _{tor} (mm ³)	10.589.000
Dimensiones	
D (mm)	610
e (mm)	20

Tabla 15. Características y dimensiones perfil tubular hueco normalizado para el caso de grúa sin contrapeso.

Como el rodamiento de gran diámetro irá situado en la parte superior de la columna, este deberá encajar perfectamente. Es por ello que el diámetro exterior de la columna deberá coincidir con el diámetro interior del rodamiento.

Por lo tanto, la columna deberá hacerse a medida. Las características de la nueva columna seleccionada, en función del rodamiento que mejor se adapta, son las siguientes:

Características	
m (kg/m)	310,34
A (mm ²)	39.533,80
I _{flex} (mm ⁴)	1.958.369.343,14
I _{tor} (mm ⁴)	3.916.738.686,28
W _{flex} (mm ³)	6.033.177,27
W _{tor} (mm ³)	12.066.354,55
Dimensiones	
D (mm)	649,2
e (mm)	20

Tabla 16. Características y dimensiones perfil tubular hueco no normalizado para el caso de grúa sin contrapeso.

Configuración 2: Grúa con contrapeso

- Tipo de perfil

Para la columna, al igual que para la configuración 1, se ha elegido un perfil tubular circular hueco con un diámetro exterior de 610 mm pero, en este caso, un espesor de 10 mm.

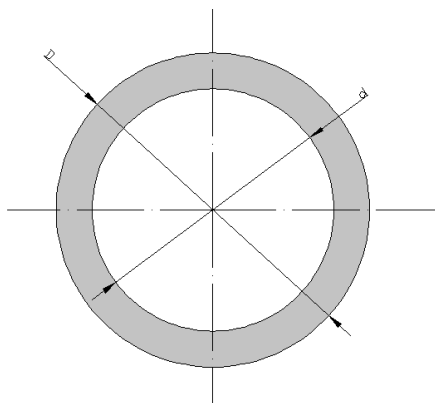


Figura 27. Perfil de la columna para el caso de grúa con contrapeso.

Características	
m (kg/m)	148
A (mm ²)	18.800
I _{flex} (mm ⁴)	848.470.000
I _{tor} (mm ⁴)	1.696.930.000
W _{flex} (mm ³)	2.782.000
W _{tor} (mm ³)	5.564.000
Dimensiones	
D (mm)	610
e (mm)	10

Tabla 17. Características y dimensiones perfil tubular hueco normalizado para el caso de grúa con contrapeso.

Al igual que para el caso de grúa sin contrapeso, como el rodamiento de gran diámetro irá situado en la parte superior de la columna, este deberá encajar perfectamente. Es por ello que el diámetro exterior de la columna deberá coincidir con el diámetro interior del rodamiento.

Por lo tanto, la columna deberá hacerse a medida. Las características de la nueva columna seleccionada, en función del rodamiento que mejor se adapta, son las siguientes:

Características	
m (kg/m)	157,64
A (mm ²)	20.081,06
I _{flex} (mm ⁴)	1.025.832.528,40
I _{tor} (mm ⁴)	2.051.665.056,81
W _{flex} (mm ³)	3.160.297,38
W _{tor} (mm ³)	6.320.594,75
Dimensiones	
D (mm)	649,2
e (mm)	10

Tabla 18. Características y dimensiones perfil tubular hueco no normalizado para el caso de grúa con contrapeso.

3.2.6.2. Planteamiento de la columna

- 1) **Reacciones en la columna.** La columna de la grúa está solicitada a compresión y a flexión debido al peso de toda la estructura, a la carga y a los aparatos de accionamiento.

El momento máximo que se da en la parte superior de la columna se extiende por toda ella y a la carga vertical que proviene de la pluma se le suma el propio peso de la columna y del mecanismo de giro.

Aunque la unión entre la pluma y la columna sea una articulación, en el caso de un frenazo brusco en la pluma debido a la inercia de la misma y del viento en la pluma, se producirán unos momentos torsores los cuales habrá que tener en cuenta la hora de dimensionar la columna.

Por lo tanto, los esfuerzos que debe soportar la columna son:

- Esfuerzos producidos por el peso propio de la pluma.
 - Esfuerzos producidos por la carga en el extremo más alejado de la pluma.
 - Esfuerzos producidos por el viento con la grúa en servicio sobre la pluma, la carga y columna (y sobre la contrapluma y contrapeso en el caso de grúa con contrapeso).
- 2) **Planteamiento del perfil de la columna.** Como se ha explicado en la memoria, el perfil a utilizar en la estructura de la columna viene determinado por la forma y el tamaño del gran rodamiento de giro, ya que sus dimensiones determinan el perfil.

La sección C, en la base de la columna, es la sección crítica de esta y el punto más solicitado de esta sección es el A, como se observa en las figura de más abajo. Este punto está sometido a los siguientes esfuerzos:

$$A \left\{ \begin{array}{l} N, M_y \\ V, T \end{array} \right.$$

Como se ha mencionado anteriormente, para el caso de grúa sin contrapeso, la columna estará formada por un perfil tubular hueco no normalizado de 649,2 mm de diámetro exterior y 10 mm de espesor. Para las dos configuraciones, la columna, al igual que la pluma, se fabricará de acero St-42 (aceros para placas de aparatos de elevación y transporte), cuyo límite elástico es de 260 MPa.

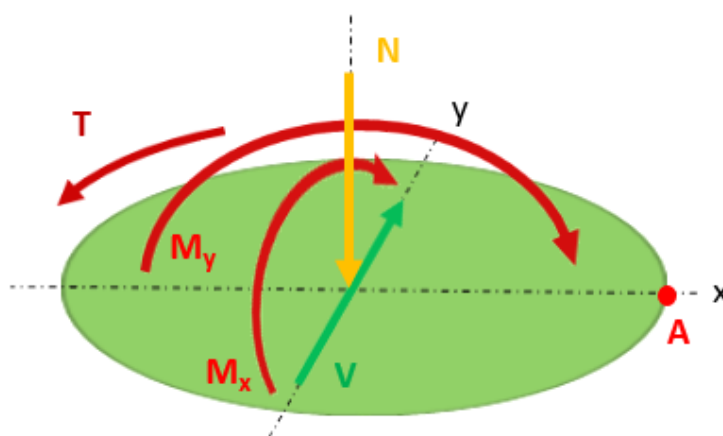


Figura 28. Esfuerzos en la sección más crítica de la columna.

3.2.6.3. Determinación de solicitaciones en la columna

El cálculo de las tensiones por solicitaciones en la columna se calculará según los esfuerzos que debe de soportar:

- Debido al peso propio de la columna, la pluma y sus accesorios.
- Debido al momento flector que transmite la pluma sobre la columna.
- Debido a la acción del viento en toda la columna con esta en servicio.
- Debido a las fuerzas horizontales debidas al viento con la grúa fuera de servicio.
- Debido a la acción del viento en la parte superior de la columna con la grúa en servicio.

- Debida a la acción del viento en la parte superior de la columna con la grúa fuera de servicio.

En todos estos casos, se calculará el momento flector máximo, el esfuerzo normal máximo y el cortante máximo, según cada situación. Se considerarán las solicitaciones verticales y las solicitaciones horizontales por separado.

3.2.6.4. Casos de combinación de solicitaciones

Al igual que en el caso de la pluma, se aplican los coeficientes FEM a cada uno de los tres casos de carga:

1) Aparato en servicio sin viento

La fórmula general a aplicar será:

$$[\gamma_S \cdot (\sigma_1 + C_d \cdot \sigma_2)] \cdot C_S$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 \cdot \gamma_S \cdot C_S$$

$$\sigma'_2 = \sigma_2 \cdot \gamma_S \cdot C_d \cdot C_S$$

$$[\gamma_S \cdot \tau_3] \cdot C_S$$

$$\tau'_3 = \tau_3 \cdot \gamma_S \cdot C_S$$

En este caso, $C_S = 1,5$.

Y la tensión equivalente será:

$$\sigma_{\text{equivalente}} = \sqrt{(\sigma'_1 + \sigma'_2)^2 + 3(\tau'_3)^2}$$

2) Aparato en servicio con viento

La fórmula general a aplicar será:

$$[\gamma_S \cdot (\sigma_1 + C_d \cdot \sigma_2)] \cdot C_S$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 \cdot \gamma_S \cdot C_S$$

$$\sigma'_2 = \sigma_2 \cdot \gamma_S \cdot C_d \cdot C_S$$

$$[\gamma_S \cdot \tau_3 + (\tau_4 + \tau_5)] \cdot C_S$$

$$\tau'_3 = \tau_3 \cdot \gamma_S \cdot C_S$$

$$\tau'_4 = \tau_4 \cdot C_S$$

$$\tau'_5 = \tau_5 \cdot C_S$$

En este caso, $C_S = 1,33$ por normativa.

La tensión equivalente será:

$$\sigma_{\text{equivalente}} = \sqrt{(\sigma'_1 + \sigma'_2)^2 + 3(\tau'_3 + \tau'_4 + \tau'_5)^2}$$

3) Aparato sometido a solicitaciones excepcionales

Para este tipo de solicitaciones, $C_S = 1,1$.

a) Viento en tempestad

$$(\sigma'_1 + \sigma'_7) \cdot C_S$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 \cdot C_S$$

$$(\tau'_6 + \tau'_7) \cdot C_S$$

$$\tau'_6 = \tau_6 \cdot C_S$$

$$\tau'_7 = \tau_7 \cdot C_S$$

La tensión equivalente será:

$$\sigma_{\text{equivalente}} = \sqrt{(\sigma'_1)^2 + 3(\tau'_6 + \tau'_7)^2}$$

3.2.6.5. Resolución de cálculos columna

Configuración 1: Grúa sin contrapeso**REACCIONES SOPORTADAS EN LA UNIÓN DE LA COLUMNA CON EL SUELO****Reacción vertical (R_C)**

	kg		
Q _{plu} (peso propio de la pluma)	2066,86	20275,90	N
Q _{col} (peso propio de la columna)	1891,50	18555,62	N
Q _u (carga útil + accesorios)	8250,00	80932,50	N
Q _{mg} (peso del mecanismo de giro)	830,00	8142,30	N
Q _{met} (peso del polipasto)	700,00	6867,00	N
C _d = Ψ (coeficiente dinámico)		1,02	
ΣF_v = 0 => R_C =			
C_d·(Q_u+Q_{met})+Q_{col}+Q_{plu}+Q_{mg}	13953,16	136880,50	N

Momento (M_C)

		d (distancia en m)		
Q _{plu} (peso propio de la pluma)	L' _{plu} /2	4,25	20275,90	N
Q _u (carga útil + accesorios)	L _{plu}	8,00	80932,50	N
Q _{met} (peso del polipasto)	L _{plu}	8,00	6867,00	N
C _d = Ψ (coeficiente dinámico)			1,02	
ΣM_C = 0 => M_C = M_A =				
C_d·L_{plu}·(Q_u+Q_{met})+Q_{plu}·(L'_{plu}/2)			805426,06	N·m

DIMENSIONES DEL PERFIL EN LA SECCIÓN CRÍTICA

El perfil viene determinado por el rodamiento de giro

Prontuario de perfiles de acero (Perfil: Tubo circular hueco)

A	37.100,00	mm ²
I _{flex}	1.614.900.000,00	mm ⁴
I _{tor}	3.229.790.000,00	mm ⁴
W _{flex}	5.295.000,00	mm ³
W _{tor}	10.589.000,00	mm ³
Q _{col}	2854,71	N/m
L _{col}	6,50	m
Q _{col}	18555,62	N

D	610,00	mm
e	20,00	mm

Punto crítico de la sección: A

TENSIONES POR ESFUERZOS VERTICALES EN LA COLUMNA

Debido al peso propio de la pluma, columna y mecanismo de giro

$N_{\text{máx}}$ (esfuerzo normal máximo)	46973,81	N
$M_{\text{fmáx}}$ (momento flector máximo)	86172,56	N·m

$\sigma^{N1} = N_{\text{máx}}/A$	1,27	N/mm ²
$\sigma^{M1} = M_{\text{fmáx}}/W_{\text{flex}}$	16,27	N/mm ³

$\sigma_1 = \sigma^{N1} + \sigma^{M1}$	17,54	N/mm ⁴
τ_1	0,00	N/mm ²

Debido al peso propio de la carga útil y accesorios

$N_{\text{máx}}$ (esfuerzo normal máximo)	87799,50	N
$M_{\text{fmáx}}$ (momento flector máximo)	702396,00	N·m

$\sigma^{N2} = N_{\text{máx}}/A$	2,37	N/mm ²
$\sigma^{M2} = M_{\text{fmáx}}/W_{\text{flex}}$	132,65	N/mm ²

$\sigma_2 = \sigma^{N2} + \sigma^{M2}$	135,02	N/mm ⁴
τ_2	0,00	N/mm ²

TENSIONES POR ESFUERZOS HORIZONTALES EN LA COLUMNA

Fuerzas debidas a la aceleración para el peso propio de la pluma (Q_{plu})

F_{inplu}	220,77	N
$L'_{plu}/2$	4,25	m

Fuerzas debidas a la aceleración para la carga en servicio (peso útil) + accesorios (incluido el polipasto) (Q_u+Q_{met})

F_{inc}	1799,50	N
L_{plu}	8,00	m

$T = F_{inplu} \cdot (L'_{plu}/2) - F_{inc} \cdot L_{plu}$	15334,27	N·m
--	----------	-----

$\sigma_3 = 0$	0,00	N/mm ²
----------------	------	-------------------

$\tau_3 = (T_{m\acute{a}x} \cdot r_{m\acute{a}x})/I_o$	1,45	N/mm ²
--	------	-------------------

TENSIONES DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL VIENTO EN LA COLUMNA

Fuerzas debidas a la acción del viento en servicio en la parte superior de la columna (F_{vpluA} , F_{vcA})

F_{vpluA}	2209,58	N
F_{vcA}	981,00	N
$L'_{plu}/2$	4,25	m
L_{plu}	8,00	m
$T_{m\acute{a}x} = F_{vpluA} \cdot (L'_{plu}/2) + F_{vcA} \cdot L_{plu}$	17238,72	N·m

σ_4	0,00	N/mm ²
------------	------	-------------------

$\tau_4 = (T_{m\acute{a}x} \cdot r_{m\acute{a}x})/I_o$	1,63	N/mm ²
--	------	-------------------

Fuerzas debidas a la acción del viento en servicio en toda columna (F_{vcolA})

$q = F_{vcolA}$	647,29	N
$V_{m\acute{a}x}$	647,29	N

$\sigma_5 = 0$	0,00	N/mm ²
$\tau_5 = 4V_{\text{máx}}/3A$	0,02	N/mm ²

Fuerzas debidas a la acción del viento fuera de servicio en la parte superior de la columna (F_{vpluB})

F_{vpluB}	7070,64	N
$L'_{\text{plu}}/2$	4,25	m
$T_{\text{máx}} = F_{\text{vpluB}} \cdot (L'_{\text{plu}}/2)$	30050,22	N·m

σ_6	0,00	N/mm ²
$\tau_6 = (T_{\text{máx}} \cdot r_{\text{máx}})/I_0$	2,84	N/mm ²

Fuerzas debidas a la acción del viento fuera de servicio en toda la columna (F_{vcolB})

$q = F_{\text{vcolB}}$	2071,32	N
$V_{\text{máx}} = q$	2071,32	N

$\sigma_7 = 0$	0,00	N/mm ²
$\tau_7 = 4V_{\text{máx}}/3A$	0,07	N/mm ²

ESTUDIO DE LAS DIFERENTES POSIBILIDADES EN LA COLUMNA (COMBINACIONES)

Se aplican los coefs. FEM en cada uno

En servicio sin viento

γ_s (TABLA)	1,06	
C_d (Coeficiente dinámico)	1,02	
C_s (Coeficiente de seguridad)	1,50	Por normativa

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	17,54	27,89	0,00	0,00

2	135,02	219,83	0,00	0,00
3	0,00	0,00	1,45	2,30

$\sigma_{equivalente}$ **247,75** **MPa**

En servicio con viento

γ_s (TABLA)	1,06	
C_d (Coeficiente dinámico)	1,02	
C_s (Coeficiente de seguridad)	1,33	Por normativa

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	17,54	24,73	0,00	0,00
2	135,02	194,92	0,00	0,00
3	0,00	0,00	1,45	2,04
4	0,00	0,00	1,63	2,17
5	0,00	0,00	0,02	0,03

$\sigma_{equivalente}$ **219,77** **MPa**

Fuera de servicio con viento

C_s (Coeficiente de seguridad)	1,10	Por normativa
----------------------------------	-------------	---------------

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	17,54	19,29	0,00	0,00
6	0,00	0,00	2,84	3,12
7	0,00	0,00	0,07	0,08

$\sigma_{equivalente}$ **20,08** **MPa**

Comprobación de validez de la sección crítica

	$\sigma_{equivalente}$	
Sin viento en servicio	247,75	MPa
Con viento en servicio	219,77	MPa
Con viento sin servicio	20,08	MPa

La columna está construida en acero St-42 => σ_{adm} **260,00** **MPa**

$\sigma_{\text{equivalente}}$ (CASO MÁS
DESFAVORABLE) =

247,75

MPa

Como $\sigma_{\text{equivalente}} < \sigma_{\text{adm}}$

El perfil elegido en la sección crítica es válido

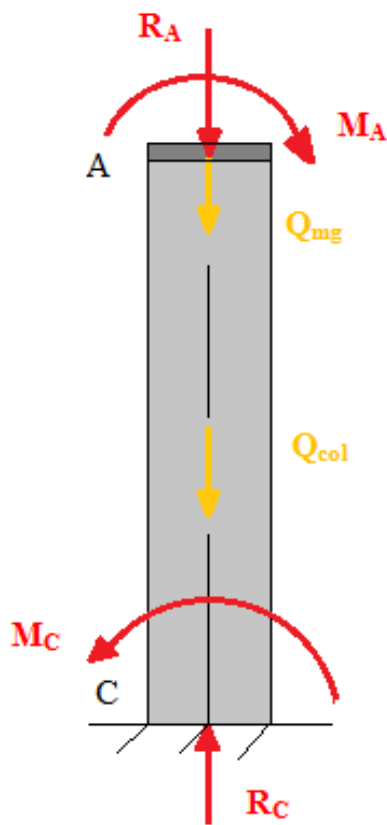


Figura 29. Fuerzas debidas al peso propio y reacciones en la columna para el caso de grúa sin contrapeso.

Configuración 2: Grúa con contrapeso**REACCIONES SOPORTADAS EN LA UNIÓN DE LA COLUMNA CON EL SUELO****Reacción vertical (R_C)**

	kg		
Q _{plu} (peso propio de la pluma)	1037,00	10172,97	N
Q _{plu'} (peso propio de la contrapluma)	671,00	6582,51	N
Q _{col} (peso propio de la columna)	962,00	9437,22	N
Q _u (carga útil + accesorios)	8250,00	80932,50	N
Q _{mg} (peso del mecanismo de giro)	830,00	8142,30	N
Q _{met} (peso del polipasto)	700,00	6867,00	N
Q _{con} (peso contrapeso)	7000,00	68670,00	N
C _d = Ψ (coeficiente dinámico)		1,02	
ΣF_v = 0 => R_C =			
C_d·(Q_u+Q_{met})+Q_{con}+Q_{mg}+Q_{col}+2·Q_{plu}+2·Q_{plu'}	21372,80	209667,17	N

Momento (M_C)

		d (distancia en metros)		
Q _{plu} (peso propio de la pluma)	L' _{plu} /2	4,25	10172,97	N
Q _{plu'} (peso propio de la contrapluma)	L' _{con}	2,75	6582,51	N
Q _u (carga útil + accesorios)	L _{plu}	8,00	80932,50	N
Q _{met} (peso del polipasto)	L _{plu}	8,00	6867,00	N
Q _{con} (peso contrapeso)	L _{con}	4,90	68670,00	N
C _d = Ψ (coeficiente dinámico)			1,02	
ΣM_C = 0 => M_C = M_A =				
[C_d·L_{plu}·(Q_u+Q_{met})+2·Q_{plu}·(L'_{plu}/2)]-			433036,94	N·m
[Q_{con}·L_{con}+2·Q_{plu'}·L'_{con}]				

DIMENSIONES DEL PERFIL EN LA SECCIÓN CRÍTICA

El perfil viene determinado por el rodamiento de giro

Prontuario de perfiles de acero (Perfil: Tubo circular hueco)

A	18.800,00	mm ²
I _{flex}	848.470.000,00	mm ⁴
I _{tor}	1.696.930.000,00	mm ⁴
W _{flex}	2.782.000,00	mm ³
W _{tor}	5.564.000,00	mm ³

Q_{col}	1451,88	N/m
L_{col}	6,50	m
Q_{col}	9437,22	N
D	610,00	mm
e	10,00	mm

Punto crítico de la sección: A

TENSIONES POR ESFUERZOS VERTICALES EN LA COLUMNA

Debido al peso propio de la pluma, columna, mecanismo de giro y contrapeso

$N_{m\acute{a}x}$ (esfuerzo normal máximo)	119760,48	N
$M_{fm\acute{a}x}$ (momento flector máximo)	-286216,56	N·m

$\sigma^{N1} = N_{m\acute{a}x}/A$	-6,37	N/mm ²
$\sigma^{M1} = M_{fm\acute{a}x}/W_{flex}$	-102,88	N/mm ²

$\sigma_1 = \sigma^{N1} + \sigma^{M1}$	-109,25	N/mm²
τ_1	0,00	N/mm²

Debido al peso propio de la carga útil y accesorios

$N_{m\acute{a}x}$ (esfuerzo normal máximo)	87799,50	N
$M_{fm\acute{a}x}$ (momento flector máximo)	702396,00	N·m

$\sigma^{N2} = N_{m\acute{a}x}/A$	4,67	N/mm ²
$\sigma^{M2} = M_{fm\acute{a}x}/W_{flex}$	252,48	N/mm ²

$\sigma_2 = \sigma^{N2} + \sigma^{M2}$	257,15	N/mm²
τ_2	0,00	N/mm²

TENSIONES POR ESFUERZOS HORIZONTALES EN LA COLUMNA**Fuerzas debidas a la aceleración para el peso propio del conjunto ($Q_{plu}+Q_u+Q_{met}+Q_{con}$)**

F_{inconj}	1065,92	N
$L = r_{Gconj}$	2,19	m
$T = F_{inconj} \cdot L$	2334,36	N·m
$\sigma_3 = 0$	0,00	N/mm ²
$\tau_3 = (T_{m\acute{a}x} \cdot r_{m\acute{a}x})/I_{tor}$	0,42	N/mm ²

TENSIONES DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL VIENTO EN LA COLUMNA**Fuerzas debidas a la acción del viento en servicio en la parte superior de la columna**

F_{vpluA} (1ª viga)	1853,85	N
F_{vpluA} (2ª viga)	278,08	N
$F_{vpluA} = F_{vpluA}$ (1ª viga)+ F_{vpluA} (2ª viga)	2131,93	N
F_{vcA}	981,00	N
$F_{vplu'A}$ (1ª viga)	1107,15	N
$F_{vplu'A}$ (2ª viga)	166,07	N
$F_{vplu'A} = F_{vplu'A}$ (1ª viga)+ $F_{vplu'A}$ (2ª viga)	1273,22	N
F_{vconA}	858,38	N
$F_{vA} = F_{vpluA}+F_{vcA}+F_{vplu'A}+F_{vconA} = q$	5244,53	N
$T_{FvpluA} = F_{vpluA} \cdot (L'_{plu}/2)$	9060,70	N·m
$T_{FvcA} = F_{vcA} \cdot L_{plu}$	7848,00	N·m
$T_{FvdchaA} = T_{FvpluA}+T_{FvcA}$	16908,70	N·m
$T_{Fvplu'A} = F_{vplu'A} \cdot L'_{con}$	3501,36	N·m
$T_{FvconA} = F_{vconA} \cdot L_{con}$	4206,06	N·m
$T_{FvizdaA} = T_{Fvplu'A}+T_{FvconA}$	7707,42	N·m
$T_{m\acute{a}x} = T_{FvdchaA}-T_{FvizdaA}$	9201,29	N·m

σ_4	0,00	N/mm ²
$\tau_4 = (T_{m\acute{a}x} \cdot r_{m\acute{a}x})/I_{tor}$	1,65	N/mm ²

Fuerzas debidas a la acción del viento en servicio en toda la columna

$q = F_{vcolA}$	647,29	N
$V_{m\acute{a}x} = q$	647,29	N

$\sigma_5 =$	0,00	N/mm ²
$\tau_5 = 4V_{m\acute{a}x}/3A$	0,046	N/mm ²

Fuerzas debidas a la acción del viento fuera de servicio en la parte superior de la columna

F_{vpluB} (1ª viga)	5932,32	N
F_{vpluB} (2ª viga)	889,85	N
$F_{vpluB} = F_{vpluB}$ (1ª viga)+ F_{vpluB} (2ª viga)	6822,17	N
F_{vcB}	0,00	N
$F_{vplu'B}$ (1ª viga)	3542,88	N
$F_{vplu'B}$ (2ª viga)	531,43	N
$F_{vplu'B} = F_{vplu'B}$ (1ª viga)+ $F_{vplu'B}$ (2ª viga)	4074,31	N
F_{vconB}	2746,80	N
$F_{vB} = F_{vpluB}+F_{vcB}+F_{vplu'B}+F_{vconB} = q$	13643,28	N
$T_{FvpluB} = F_{vpluB} \cdot (L'_{plu}/2)$	28994,22	N·m
$T_{FvcB} = F_{vcB} \cdot L_{plu}$	0,00	N·m
$T_{FvdchaB} = T_{FvpluB}+T_{FvcB}$	28994,22	N·m
$T_{Fvplu'B} = F_{vplu'B} \cdot L'_{con}$	11204,35	N·m
$T_{FvconB} = F_{vconB} \cdot L_{con}$	13459,32	N·m
$T_{FvizdaB} = T_{Fvplu'B}+T_{FvconB}$	24663,67	N·m
$T_{m\acute{a}x} = T_{FvdchaB}-T_{FvizdaB}$	4330,55	N·m

σ_6	0,00	N/mm ²
$\tau_6 = (T_{m\acute{a}x} \cdot r_{m\acute{a}x})/I_{tor}$	0,778	N/mm ²

Fuerzas debidas a la acción del viento fuera de servicio en toda la columna

$q = F_{vcolB}$	2071,32	N
-----------------	---------	---

$V_{\text{máx}} = q$	2071,32	N
----------------------	---------	---

$\sigma_7 = 0$	0,00	N/mm ²
$\tau_7 = 4V_{\text{máx}}/3A$	0,147	N/mm ²

ESTUDIO DE LAS DIFERENTES POSIBILIDADES EN LA COLUMNA (COMBINACIONES)

Se aplican los coefs. FEM en cada uno

En servicio sin viento

γ_s (TABLA)	1,06	
C_d (Coeficiente dinámico)	1,02	
C_s (Coeficiente de seguridad)	1,50	Por normativa

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	-109,25	-173,71	0,00	0,00
2	257,15	418,68	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,420	0,667
$\sigma_{\text{equivalente}}$	244,97		MPa	

En servicio con viento

γ_s (TABLA)	1,06	
C_d (Coeficiente dinámico)	1,02	
C_s (Coeficiente de seguridad)	1,33	Por normativa

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	-109,25	-154,02	0,00	0,00
2	257,15	371,23	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,420	0,558
4	0,00	0,00	1,654	2,200
5	0,00	0,00	0,046	0,061
$\sigma_{\text{equivalente}}$	217,24		MPa	

Fuera de servicio con viento

C_s (Coeficiente de seguridad)	1,10	Por normativa
----------------------------------	-------------	---------------

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	-109,25	-120,18	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,78	0,86
7	0,00	0,00	0,15	0,16

$\sigma_{equivalente}$	120,19	MPa
------------------------	---------------	------------

Comprobación de validez de la sección crítica

	$\sigma_{equivalente}$	
Sin viento en servicio	244,97	MPa
Con viento en servicio	217,24	MPa
Con viento sin servicio	120,19	MPa

La pluma está construida en acero St-42 $\Rightarrow \sigma_{adm}$	260,00	MPa
---	---------------	------------

$\sigma_{equivalente}$ (CASO MÁS DESFAVORABLE) =	244,97	MPa
--	---------------	------------

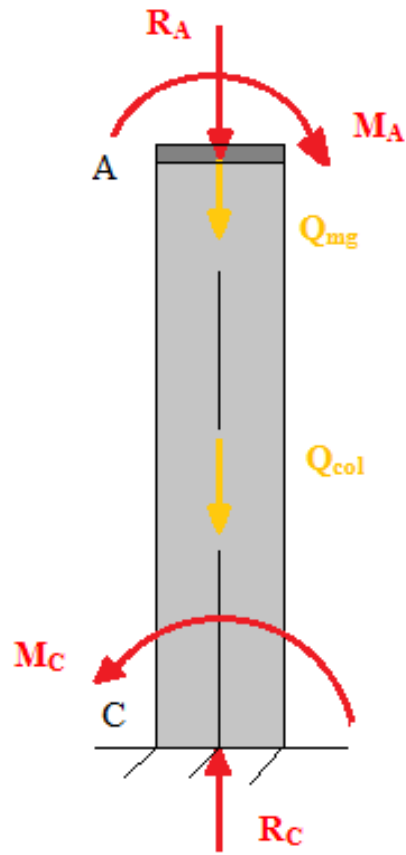


Figura 30. Fuerzas debidas al peso propio y reacciones en la columna para el caso de grúa con contrapeso.

3.2.6.6. Resolución de cálculos redimensionamiento columna

Debido a que en la parte superior de la columna irá situado el rodamiento de gran diámetro, esta deberá tener el mismo diámetro exterior que el diámetro interior de dicho rodamiento.

Es por ello que se ha seleccionado del catálogo de rodamientos uno cuyo diámetro interior es superior al diámetro exterior de la columna obtenido (610 mm). En este caso, de 649,2 mm. Y se han realizado de nuevo los cálculos para el dimensionamiento de la columna con este nuevo diámetro exterior.

Por otro lado, el rodamiento además de encajar en un espacio determinado, deberá ser capaz de soportar las cargas a las que está sometido. Se ha comprobado que el rodamiento de 649,2 mm de diámetro seleccionado del catálogo del fabricante (062.20.0744.500.01.1503), que era el más adecuado en relación con el diámetro de la columna, no es capaz de soportar las cargas a las que está sometido. Debido a ello, se ha de seleccionar otro rodamiento que sea capaz de soportar las solicitudes.

El siguiente rodamiento de la misma gama y más adecuado al diámetro de la columna es un rodamiento con dentado interior de 710 mm (062.25.0855.500.11.1503). Tras los cálculos pertinentes, se ha comprobado nuevamente que el rodamiento no es capaz de soportar las cargas, tanto para el caso de grúa sin contrapeso como con contrapeso. Nuevamente, se ha de seleccionar otro rodamiento.

Para el caso de grúa sin contrapeso, el próximo rodamiento más ajustado al diámetro de la columna es aquel con un diámetro interior de 960 mm (062.30.1120.000.11.1504). Tras los cálculos pertinentes, se ha comprobado que este tampoco es capaz de soportar las cargas a las que está sometido.

Finalmente, y tras los cálculos pertinentes, se ha seleccionado un rodamiento de diámetro interior de 1428 mm válido para la configuración de grúa sin contrapeso.

Para el caso de grúa con contrapeso, en cambio, se ha seleccionado un rodamiento con diámetro interior de 1110 mm (062.25.1255.500.11.1503) siendo este capaz de soportar las cargas a las que está sometido.

Se observa que la columna queda algo sobredimensionada debido a las restricciones impuestas por el rodamiento de giro (mismo diámetro interior que el diámetro exterior de la columna y ser capaz de soportar las solicitaciones a las que está sometido) al ir este situado en la parte superior de la misma, ya que la columna pasa a tener un diámetro de 610 mm a uno de 1428 mm (configuración 1) y 1110 mm (configuración 2). Aun así, se ha disminuido el espesor de la columna reduciendo en gran medida este margen.

En la siguiente tabla se observa el proceso de dimensionamiento llevado a cabo para la columna en relación con las restricciones impuestas por el rodamiento de giro situado en la parte superior de esta.

RESUMEN DEL PROCESO DE DIMENSIONAMIENTO DE LA COLUMNA				
Configuración 1: GRÚA SIN CONTRAPESO				
Dimensionamiento aproximado	Redimensionamiento restricción diámetro del rodamiento	1^{er} Redimensionamiento restricción cargas soportadas por el rodamiento	2^o Redimensionamiento restricción cargas soportadas por el rodamiento	3^{er} Redimensionamiento restricción cargas soportadas por el rodamiento
Perfil tubular hueco D 610 mm (t = 20 mm)	Perfil tubular hueco D 649,2 mm (t = 20 mm)	Perfil tubular hueco D 710 mm (t = 16 mm)	Perfil tubular hueco D 960 mm (t = 8 mm)	Perfil tubular hueco D 1428 mm (t = 6 mm)
	062.20.0744.50 0.01.1503 (Curva 4)	062.25.0855.500 .11.1503 (Curva 1)	062.30.1120.000 .11.1504 (Curva 32)	062.30.1600.000.11.1504 (Curva 35)
	Dimensionado estático	Dimensionado estático	Dimensionado estático	Dimensionado estático
	$F_a' = 213,43 \text{ kN}$ $M_k' = 1419,62 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$F_a' = 213,43 \text{ kN}$ $M_k' = 1419,62 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$F_a' = 213,43 \text{ kN}$ $M_k' = 1419,62 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$F_a' = 213,43 \text{ kN}$ $M_k' = 1419,62 \text{ kN}\cdot\text{m}$
	Vida útil	Vida útil	Vida útil	Vida útil
	$F_a' = 168,95 \text{ kN}$ $M_k' = 1086,86 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$F_a' = 168,95 \text{ kN}$ $M_k' = 1086,86 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$F_a' = 168,95 \text{ kN}$ $M_k' = 1086,86 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$F_a' = 168,95 \text{ kN}$ $M_k' = 1086,86 \text{ kN}\cdot\text{m}$
	Tornillos	Tornillos	Tornillos	Tornillos
	$F_a = 170,74 \text{ kN}$ $M_k = 1135,7 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$F_a = 170,74 \text{ kN}$ $M_k = 1135,7 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$F_a = 170,74 \text{ kN}$ $M_k = 1135,7 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$F_a = 170,74 \text{ kN}$ $M_k = 1135,7 \text{ kN}\cdot\text{m}$
Configuración 2: GRÚA CON CONTRAPESO				
Dimensionamiento aproximado	Redimensionamiento restricción	Redimensionamiento restricción cargas	2^o Redimensionamiento restricción	

	diámetro del rodamiento	soportadas por el rodamiento	cargas soportadas por el rodamiento	
Perfil tubular hueco D 610 mm (t = 10 mm)	Perfil tubular hueco D 649,2 mm (t = 10 mm)	Perfil tubular hueco D 710 mm (t = 8 mm)	Perfil tubular hueco D 1110 mm (t = 6 mm)	
	062.20.0744.50 0.01.1503 (Curva 4)	062.25.0855.500 .11.1503 (Curva 1)	062.25.1255.500 .11.1503 (Curva 5)	
	Dimensionado estático	Dimensionado estático	Dimensionado estático	
	$F_a' = 339,49 \text{ kN}$ $M_k' = 878,63 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$F_a' = 339,49 \text{ kN}$ $M_k' = 878,63 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$F_a' = 339,49 \text{ kN}$ $M_k' = 878,63 \text{ kN}\cdot\text{m}$	
	Vida útil	Vida útil	Vida útil	
	$F_a' = 284,93 \text{ kN}$ $M_k' = 589,15 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$F_a' = 284,93 \text{ kN}$ $M_k' = 589,15 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$F_a' = 284,93 \text{ kN}$ $M_k' = 589,15 \text{ kN}\cdot\text{m}$	

Tabla 19. Resumen del proceso de redimensionamiento de la columna impuesto por el rodamiento de giro de gran tamaño.

Los cálculos para la selección del rodamiento están detallados en el apartado correspondiente al rodamiento de giro.

A continuación se muestran de nuevo los cálculos obtenidos para el diámetro final de la columna determinado por el rodamiento.

Configuración 1: Grúa sin contrapeso**SOLICITACIONES PRINCIPALES****Carga de servicio (S_L)**

	kg	N
Carga a elevar (capacidad de carga grúa) = Carga útil	8000,00	78480,00
Peso accesorios - Eslingas + Palonier	250,00	2452,50
$Q_L = \text{Carga útil} + \text{Peso accesorios}$	8250,00	80932,50

Peso propio elementos (S_G)

	kg	N
Pluma (Q_{plu})	2066,86	20275,90
Columna (Q_{col})	1367,67	13416,79
Mecanismo de elevación y traslación - Polipasto (Q_{met})	700,00	6867,00
Mecanismo de giro (Q_{mg}) - Rodamiento de giro + Accesorios (motor-reductor)	830,00	8142,30
$Q_G = Q_{plu} + Q_{col} + Q_{met} + Q_{mg}$	4964,53	48701,99

SOLICITACIONES DEBIDAS A MOVIMIENTOS VERTICALES (S_V)**Levantamiento de la carga de servicio (S_{LC})**

Coef. experimental para grúas (ξ)	0,30	
Velocidad de elevación (V_L) - Polipasto	0,08	m/s
$\Psi = 1 + \xi \cdot V_L$	1,02	
$Q_{LC} = Q_L \cdot \Psi$	82874,88	N

Aceleración o deceleración de la carga

Despreciables, ya que el coeficiente dinámico (Ψ) ya tiene en cuenta la elevación de la carga

SOLICITACIONES DEBIDAS A MOVIMIENTOS HORIZONTALES (S_H)**Efecto de la fuerza centrífuga**

Velocidad de giro máxima ($\omega_{m\acute{a}x}$)	0,06	rad/s
Tiempo mínimo ($t_{m\acute{i}n}$)	2,50	s
Aceleración angular (α) = ω/t	0,03	rad/s ²

Sobre la PLUMA**Fuerza de inercia (F_{inplu})**

$r_{Gplu} = L_{plu}/2$	4,25	m
Aceleración (a_{plu}) = $\alpha \cdot r_{Gplu}$	0,11	m/s ²
Masa pluma (m_{plu})	2066,86	kg
$F_{inplu} = m_{plu} \cdot a_{plu}$	220,77	N

Sobre la CARGA**Fuerza de inercia (F_{inc})**

$r_{Gc} = L_{plu}$	8,00	m
Aceleración (a_{plu}) = $\alpha \cdot r_{Gc}$	0,20	m/s ²
Masa carga+accesorios+polipasto (m_c)	8950,00	kg
$F_{inc} = m_c \cdot a_c$	1799,50	N

Efecto de choque de topes

Solo se considera cuando choque sobre la estructura o sobre la **carga suspendida**

Solo solicitaciones debidas a choque de carga rígidamente guiada. No es el caso

No se considera

SOLICITACIONES DEBIDAS A EFECTOS CLIMÁTICOS**Acción del viento**

La normativa indica velocidades máximas del viento según la altura del aparato (TABLA)

Altura por encima del suelo (0-20 m)

Viento límite de servicio = **20 m/s**

Viento máximo con grúa fuera de servicio
= **36 m/s**

Presión aerodinámica, grúa en servicio (q_A)

Velocidad del viento (V_v)	20,00	m/s
q_A (TABLA) =	25,00	daN/m² = kgf/m²

Presión aerodinámica, grúa fuera de servicio (q_B)

Velocidad del viento (V_v)	36,00	m/s
q_B (TABLA) =	80,00	daN/m² = kgf/m²

Sobre la PLUMA

Coef. de forma para viento actuando normal a la superficie (C_f) - Perfil: **Rectangular hueco**

Longitud (f)	8,50	m
Altura (b)	0,60	m
Ancho (c)	0,40	m
b/c	1,50	
f/b	14,17	
C_f (TABLA interpolando doblemente) =	1,73	

Fuerza del viento en servicio (F_{vpluA})

Área (A) = f·b	5,10	m ²
Presión estática (q _A)	25,00	daN/m ²
Coeficiente de forma (C _f)	1,73	
F_{vpluA} = q_A·A·C_f	220,96	daN

Fuerza del viento fuera de servicio (F_{vpluB})

Área (A) = f·b	5,10	m ²
Presión estática (q _B)	80,00	daN/m ²
Coeficiente de forma (C _f)	1,73	
F_{vpluB} = q_B·A·C_f	707,06	daN

Sobre la COLUMNA**Coef. de forma para viento actuando normal a la superficie (C_f) - Perfil: Tubo circular hueco**

Longitud (f)	6,50	m
Diámetro (d)	1,43	m
f/d	4,55	
En servicio (d·v _v)	28,56	m ² /s
Fuera de servicio (d·v _v)	51,41	m ² /s

Ambos > 4,5 m/s²**C_f (TABLA interpolando) = 0,60****Fuerza del viento en servicio (F_{vcolA})**

Área (A) = f·d	9,28	m ²
Presión estática (q _A)	25,00	daN/m ²
Coeficiente de forma (C _f)	0,60	
F_{vcolA} = q_A·A·C_f	139,23	daN

Fuerza del viento fuera de servicio (F_{vcolB})

Área (A) = f·d	9,28	m ²
Presión estática (q _B)	80,00	daN/m ²
Coeficiente de forma (C _f)	0,60	
F_{vc0B} = q_B·A·C_f	445,54	daN

Sobre la CARGA (embarcación)

Se calcula teniendo en cuenta la mayor superficie posible de exposición al viento y tomando como coeficiente aerodinámico **C = 1**

Para **cargas inferiores a 25000 daN**

1 m²/1000 daN para cargas hasta 5000 daN

0,5 m²/1000 daN para cargas desde 5000 daN a 25000 daN

Área (A)

Área	0,50	m ²
Carga unitaria	1000,00	daN/m ²
Carga útil	7848,00	daN
A = (Área/Carga unitaria)·Carga útil	3,92	m²

Fuerza del viento en servicio (F_{vcA})

Área (A)	3,92	m ²
Presión estática (q _A)	25,00	daN/m ²
Coeficiente aerodinámico (C)	1,00	
F_{vcA} = q_A·A·C	98,10	daN

Fuerza del viento fuera de servicio (F_{vcB})

NO HAY CARGA	0,00	
F_{vcB} =	0,00	daN

Sobrecarga de nieve

Se considera que no se usa la grúa con carga de nieve

Variaciones de temperatura

No se consideran, solo se tiene en cuenta cuando los elementos no pueden dilatarse libremente

REACCIONES SOPORTADAS EN LA UNIÓN DE LA COLUMNA CON EL SUELO**Reacción vertical (R_C)**

	kg		
Q _{plu} (peso propio de la pluma)	2066,86	20275,90	N
Q _{col} (peso propio de la columna)	1367,67	13416,79	N
Q _u (carga útil + accesorios)	8250,00	80932,50	N
Q _{mg} (peso del mecanismo de giro)	830,00	8142,30	N
Q _{met} (peso del polipasto)	700,00	6867,00	N
C _d = Ψ (coeficiente dinámico)		1,02	
ΣF_v = 0 => R_C =			
C_d · (Q_u + Q_{met}) + Q_{col} + Q_{plu} + Q_{mg}	13429,33	131741,68	N

Momento (M_C)

		d (distancia en m)		
Q _{plu} (peso propio de la pluma)	L' _{plu} /2	4,25	20275,90	N
Q _u (carga útil + accesorios)	L _{plu}	8,00	80932,50	N
Q _{met} (peso del polipasto)	L _{plu}	8,00	6867,00	N
C _d = Ψ (coeficiente dinámico)			1,02	
ΣM_C = 0 => M_C = M_A =				
C_d · L_{plu} · (Q_u + Q_{met}) + Q_{plu} · (L'_{plu}/2)			805426,06	N·m

DIMENSIONES DEL PERFIL EN LA SECCIÓN CRÍTICA

El perfil viene determinado por el rodamiento de giro

Prontuario de perfiles de acero (Perfil: **Tubo circular hueco)**

A	26.804,07	mm ²
I _{flex}	6.775.130.379,57	mm ⁴
I _{tor}	13.550.260.759,13	mm ⁴
W _{flex}	9.488.978,12	mm ³
W _{tor}	18.977.956,25	mm ³
Q _{col}	2064,12	N/m
L _{col}	6,50	m
Q _{col}	13416,79	N
D	1428,00	mm
e	6,00	mm

Punto crítico de la sección: A

TENSIONES POR ESFUERZOS VERTICALES EN LA COLUMNA**Debido al peso propio de la pluma, columna y mecanismo de giro**

$N_{\text{máx}}$ (esfuerzo normal máximo)	41834,99	N
$M_{\text{fmáx}}$ (momento flector máximo)	86172,56	N·m

$\sigma^{N1} = N_{\text{máx}}/A$	1,56	N/mm ²
$\sigma^{M1} = M_{\text{fmáx}}/W_{\text{flex}}$	9,08	N/mm ³

$\sigma_1 = \sigma^{N1} + \sigma^{M1}$	10,64	N/mm⁴
τ_1	0,00	N/mm²

Debido al peso propio de la carga útil y accesorios

$N_{\text{máx}}$ (esfuerzo normal máximo)	87799,50	N
$M_{\text{fmáx}}$ (momento flector máximo)	702396,00	N·m

$\sigma^{N2} = N_{\text{máx}}/A$	3,28	N/mm ²
$\sigma^{M2} = M_{\text{fmáx}}/W_{\text{flex}}$	74,02	N/mm ²

$\sigma_2 = \sigma^{N2} + \sigma^{M2}$	77,30	N/mm⁴
τ_2	0,00	N/mm²

TENSIONES POR ESFUERZOS HORIZONTALES EN LA COLUMNA**Fuerzas debidas a la aceleración para el peso propio de la pluma (Q_{plu})**

F_{inplu}	220,77	N
$L'_{\text{plu}}/2$	4,25	m

Fuerzas debidas a la aceleración para la carga en servicio (peso útil) + accesorios (incluido el polipasto) (Q_u+Q_{met})

F_{inc}	1799,50	N
L_{plu}	8,00	m
$T = F_{inplu} \cdot (L'_{plu}/2) - F_{inc} \cdot L_{plu}$	15334,27	N·m
$\sigma_3 = 0$	0,00	N/mm ²
$\tau_3 = (T_{m\acute{a}x} \cdot r_{m\acute{a}x})/I_o$	0,81	N/mm ²

TENSIONES DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL VIENTO EN LA COLUMNA**Fuerzas debidas a la acción del viento en servicio en la parte superior de la columna (F_{vpluA} , F_{vcA})**

F_{vpluA}	2209,58	N
F_{vcA}	981,00	N
$L'_{plu}/2$	4,25	m
L_{plu}	8,00	m
$T_{m\acute{a}x} = F_{vpluA} \cdot (L'_{plu}/2) + F_{vcA} \cdot L_{plu}$	17238,72	N·m

σ_4	0,00	N/mm ²
$\tau_4 = (T_{m\acute{a}x} \cdot r_{m\acute{a}x})/I_o$	0,91	N/mm ²

Fuerzas debidas a la acción del viento en servicio en toda columna (F_{vcolA})

$q = F_{vcolA}$	1392,30	N
$V_{m\acute{a}x}$	1392,30	N

$\sigma_5 = 0$	0,00	N/mm ²
$\tau_5 = 4V_{m\acute{a}x}/3A$	0,07	N/mm ²

Fuerzas debidas a la acción del viento fuera de servicio en la parte superior de la columna (F_{vpluB})

F_{vpluB}	4455,36	N
$L'_{plu}/2$	4,25	m
$T_{m\acute{a}x} = F_{vpluB} \cdot (L'_{plu}/2)$	18935,28	N·m

σ_6	0,00	N/mm ²
$\tau_6 = (T_{m\acute{a}x} \cdot r_{m\acute{a}x})/I_o$	1,00	N/mm ²

Fuerzas debidas a la acción del viento fuera de servicio en toda la columna (F_{vcolB})

$q = F_{vcolB}$	3085,06	N
$V_{m\acute{a}x} = q$	3085,06	N

$\sigma_7 = 0$	0,00	N/mm ²
$\tau_7 = 4V_{m\acute{a}x}/3A$	0,15	N/mm ²

ESTUDIO DE LAS DIFERENTES POSIBILIDADES EN LA COLUMNA (COMBINACIONES)

Se aplican los coefs. FEM en cada uno

En servicio sin viento

γ_s (TABLA)	1,06	
C_d (Coeficiente dinámico)	1,02	
C_s (Coeficiente de seguridad)	1,50	Por normativa

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	10,64	16,92	0,00	0,00
2	77,30	125,85	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,81	1,28

$\sigma_{equivalente}$	142,79	MPa
------------------------	--------	-----

En servicio con viento

γ_s (TABLA)	1,06	
C_d (Coeficiente dinámico)	1,02	
C_s (Coeficiente de seguridad)	1,33	Por normativa

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	10,64	15,00	0,00	0,00
2	77,30	111,59	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,81	1,14
4	0,00	0,00	0,91	1,21
5	0,00	0,00	0,07	0,09
$\sigma_{equivalente}$	126,66		MPa	

Fuera de servicio con viento

C_s (Coeficiente de seguridad)	1,10	Por normativa
----------------------------------	-------------	---------------

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	10,64	11,71	0,00	0,00
6	0,00	0,00	1,00	1,10
7	0,00	0,00	0,15	0,17
$\sigma_{equivalente}$	11,91		MPa	

Comprobación de validez de la sección crítica

	$\sigma_{equivalente}$	
Sin viento en servicio	142,79	MPa
Con viento en servicio	126,66	MPa
Con viento sin servicio	11,91	MPa

La columna está construida en acero St-42 => σ_{adm}	260,00	MPa
---	---------------	------------

$\sigma_{equivalente}$ (CASO MÁS DESFAVORABLE) =	142,79	MPa
--	---------------	------------

Como $\sigma_{equivalente} < \sigma_{adm}$ El perfil elegido en la sección crítica es válido

Configuración 2: Grúa con contrapeso**SOLICITACIONES PRINCIPALES****Carga de servicio (S_L)**

	kg	N
Carga a elevar (capacidad de carga grúa) = Carga útil	8000,00	78480,00
Peso accesorios - Eslingas + Palonier	250,00	2452,50
$Q_c = \text{Carga útil} + \text{Peso accesorios}$	8250,00	80932,50

Peso propio elementos (S_G)

	kg	N
Pluma (Q_{plu})	1037,00	10172,97
Contrapluma ($Q_{plu'}$)	671,00	6582,51
Columna (Q_{col})	1061,84	10416,65
Mecanismo de elevación y traslación - Polipasto (Q_{met})	700,00	6867,00
Mecanismo de giro (Q_{mg}) - Rodamiento de giro + Accesorios (motor-reductor)	830,00	8142,30
Contrapeso (Q_{con})	7000,00	68670,00
$Q_G = 2 \cdot Q_{plu} + 2 \cdot Q_{plu'} + Q_{col} + Q_{met} + Q_{mg} + Q_{con}$	13007,84	127606,91

SOLICITACIONES DEBIDAS A MOVIMIENTOS VERTICALES (S_V)**Levantamiento de la carga de servicio (S_L)**

Coef. experimental para grúas (ξ)	0,30	
Velocidad de elevación (V_L) - GRÁFICO	0,07	m/s
$\Psi = 1 + \xi \cdot V_L$	1,02	
$Q_{LC} = Q_c \cdot \Psi$	82551,15	N

Aceleración o deceleración de la carga

Despreciables, ya que el coeficiente dinámico (Ψ) ya tiene en cuenta la elevación de la carga

SOLICITACIONES DEBIDAS A MOVIMIENTOS HORIZONTALES (S_H)**Efecto de la fuerza centrífuga**

Velocidad de giro máxima ($\omega_{m\acute{a}x}$)	0,06	rad/s
Tiempo mínimo ($t_{m\acute{i}n}$)	2,50	s

Aceleración angular (α) = ω/t 0,03 rad/s²

Sobre el CONJUNTO DE GRÚA

Fuerza de inercia (F_{inconj})

r_{Gconj}	2,19	m
Aceleración (a_{conj}) = $\alpha \cdot r_{Gconj}$	0,06	m/s ²
Masas pluma (m_{plu})	3416,00	kg
Masa carga (m_c)	8950,00	kg
Masa contrapeso (m_{con})	7000,00	kg
$F_{inconj} = (m_{plu} + m_c + m_{con}) \cdot a_{conj}$	1065,92	N

Efecto de choque de topes

Solo se considera cuando choque sobre la estructura o sobre la **carga suspendida**

Solo solicitaciones debidas a choque de carga rígidamente guiada. No es el caso

No se considera

SOLICITACIONES DEBIDAS A EFECTOS CLIMÁTICOS

Acción del viento

La normativa indica velocidades máximas del viento según la altura del aparato (TABLA)

Altura por encima del suelo (0-20 m)

Viento límite de servicio = **20 m/s**

Viento máximo con grúa fuera de servicio = **36 m/s**

Presión aerodinámica, grúa en servicio (q_A)

Velocidad del viento (V_v)	20,00	m/s
q_A (TABLA) =	25,00	daN/m ² = kgf/m ²

Presión aerodinámica, grúa fuera de servicio (q_B)

Velocidad del viento (V_v)	36,00	m/s
q_B (TABLA) =	80,00	daN/m ² = kgf/m ²

Sobre la PLUMA

Coef. de forma para viento actuando normal a la superficie (C_f) - Perfil: IPE600

Longitud (f)	8,50	m
Altura (b)	0,60	m
f/b	14,17	

C_f (TABLA interpolando) =	1,45	
Coef. de sombra (η)		
Dist. que separa las caras enfrentadas entre el perfil de cálculo y el intermedio (b)	0,90	m
Altura (h)	0,60	m
b/h	1,50	
Sup. expuesta al viento (A)	1,00	m ²
Sup. expuesta al viento mayorada con sup. de posibles agujeros int.(A _e)	1,00	m ²
$\varphi = A/A_e$	1,00	
η (TABLA o GRÁFICA) =	0,15	
Fuerza del viento en servicio (F_{vpluA})		
Área (A) = f·b	5,10	m ²
Presión estática (q _A)	25,00	daN/m ²
Coeficiente de forma (C_f)	1,45	
Coeficiente de sombra (η)	0,15	
Sobre la 1ª VIGA		
$F_{vpluA} = q_A \cdot A \cdot C_f$	185,39	daN
Sobre la 2ª VIGA		
$F_{vpluA} = q_A \cdot A \cdot C_f \cdot \eta$	27,81	daN
Fuerza del viento fuera de servicio (F_{vpluB})		
Área (A) = f·b	5,10	m ²
Presión estática (q _B)	80,00	daN/m ²
Coeficiente de forma (C_f)	1,45	
Coeficiente de sombra (η)	0,15	
Sobre la 1ª VIGA		
$F_{vpluB} = q_B \cdot A \cdot C_f$	593,23	daN
Sobre la 2ª VIGA		
$F_{vpluB} = q_B \cdot A \cdot C_f \cdot \eta$	88,98	daN
Sobre la CONTRAPLUMA		
Coef. de forma para viento actuando normal a la superficie (C_f) - Perfil: IPE600		
Longitud (f)	5,50	m
Altura (b)	0,60	m
f/b	9,17	
C_f (TABLA interpolando) =	1,34	
Coef. de sombra (η)		

Dist. que separa las caras enfrentadas entre el perfil de cálculo y el intermedio (b)	0,90	m
Altura (h)	0,60	m
b/h	1,50	
Sup. expuesta al viento (A)	1,00	m ²
Sup. expuesta al viento mayorada con sup. de posibles agujeros int.(A _e)	1,00	m ²
$\varphi = A/A_e$	1,00	
η (TABLA o GRÁFICA) =	0,15	

Fuerza del viento en servicio (F_{vplu'A})

Área (A) = f·b	3,30	m ²
Presión estática (q _A)	25,00	daN/m ²
Coefficiente de forma (C _f)	1,34	
Coefficiente de sombra (η)	0,15	

Sobre la 1ª VIGA

F_{vplu'A} = q_A·A·C_f	110,72	daN
---	---------------	------------

Sobre la 2ª VIGA

F_{vplu'A} = q_A·A·C_f·η	16,61	daN
---	--------------	------------

Fuerza del viento fuera de servicio (F_{vplu'B})

Área (A) = f·b	3,30	m ²
Presión estática (q _B)	80,00	daN/m ²
Coefficiente de forma (C _f)	1,34	
Coefficiente de sombra (η)	0,15	

Sobre la 1ª VIGA

F_{vplu'B} = q_B·A·C_f	354,29	daN
---	---------------	------------

Sobre la 2ª VIGA

F_{vplu'B} = q_B·A·C_f·η	53,14	daN
---	--------------	------------

Sobre la COLUMNA**Coef. de forma para viento actuando normal a la superficie (C_f) - Perfil: Tubo circular hueco**

Longitud (f)	6,50	m
Diámetro (d)	1,11	m
f/d	5,86	
En servicio (d·v _v)	22,20	m ² /s
Fuera de servicio (d·v _v)	39,96	m ² /s

Ambos > 4,5 m/s²

C_f (TABLA interpolando) =	0,61	
Fuerza del viento en servicio (F_{vcolA})		
Área (A) = $f \cdot d$	7,22	m^2
Presión estática (q_A)	25,00	daN/m^2
Coefficiente de forma (C_f)	0,61	
$F_{vcolA} = q_A \cdot A \cdot C_f$	109,85	daN

Fuerza del viento fuera de servicio (F_{vcolB})		
Área (A) = $f \cdot d$	7,22	m^2
Presión estática (q_B)	80,00	daN/m^2
Coefficiente de forma (C_f)	0,61	
$F_{vcolB} = q_B \cdot A \cdot C_f$	351,51	daN

Sobre la CARGA (embarcación)

Se calcula teniendo en cuenta la mayor superficie posible de exposición al viento y tomando como coeficiente aerodinámico $C = 1$

Para cargas inferiores a 25000 daN

1 $m^2/1000$ daN para cargas hasta 5000 daN

0,5 $m^2/1000$ daN para cargas desde 5000 daN a 25000 daN

Área (A)		
Área	0,50	m^2
Carga unitaria	1000,00	daN/m^2
Carga útil	7848,00	daN
$A = (\text{Área/Carga unitaria}) \cdot \text{Carga útil}$	3,92	m^2

Fuerza del viento en servicio (F_{vcA})		
Área (A)	3,92	m^2
Presión estática (q_A)	25,00	daN/m^2
Coefficiente aerodinámico (C)	1,00	
$F_{vcA} = q_A \cdot A \cdot C$	98,10	daN

Fuerza del viento fuera de servicio (F_{vcB})		
NO HAY CARGA	0,00	
$F_{vcB} =$	0,00	daN

Sobre el CONTRAPESO

Se evaluará como si fuera una carga
Para cargas inferiores a 25000 daN

1 m²/1000 daN para cargas hasta 5000 daN

0,5 m²/1000 daN para cargas desde 5000 daN a 25000 daN

Área (A)		
Área	0,50	m ²
Carga unitaria	1000,00	daN/m ²
Carga contrapeso	6867,00	daN
A = (Área/Carga uniataria)·Carga contrapeso	3,43	m²

Fuerza del viento en servicio (F_{vconA})		
Área (A)	3,43	m ²
Presión estática (q _A)	25,00	daN/m ²
Coefficiente aerodinámico (C)	1,00	
F_{vconA} = q_A·A·C	85,84	daN

Fuerza del viento fuera de servicio (F_{vconB})		
Área (A)	3,43	m ²
Presión estática (q _B)	80,00	daN/m ²
Coefficiente aerodinámico (C)	1,00	
F_{vconB} = q_B·A·C	274,68	daN

Sobrecarga de nieve

Se considera que no se usa la grúa con carga de nieve

Variaciones de temperatura

No se consideran, solo se tiene en cuenta cuando los elementos no pueden dilatarse libremente

REACCIONES SOPORTADAS EN LA UNIÓN DE LA COLUMNA CON EL SUELO

Reacción vertical (R_C)

	kg		
Q_{plu} (peso propio de la pluma)	1037,00	10172,97	N
$Q_{plu'}$ (peso propio de la contrapluma)	671,00	6582,51	N
Q_{col} (peso propio de la columna)	1061,84	10416,65	N
Q_u (carga útil + accesorios)	8250,00	80932,50	N
Q_{mg} (peso del mecanismo de giro)	830,00	8142,30	N
Q_{met} (peso del polipasto)	700,00	6867,00	N
Q_{con} (peso contrapeso)	7000,00	68670,00	N
$C_d = \Psi$ (coeficiente dinámico)		1,02	
$\Sigma F_V = 0 \Rightarrow R_C =$			
$C_d \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{con} + Q_{mg} + Q_{col} + 2 \cdot Q_{plu} + 2 \cdot Q_{plu'}$	21472,64	210646,60	N

Momento (M_C)

		d (distancia en metros)		
Q_{plu} (peso propio de la pluma)	$L'_{plu}/2$	4,25	10172,97	N
$Q_{plu'}$ (peso propio de la contrapluma)	L'_{con}	2,75	6582,51	N
Q_u (carga útil + accesorios)	L_{plu}	8,00	80932,50	N
Q_{met} (peso del polipasto)	L_{plu}	8,00	6867,00	N
Q_{con} (peso contrapeso)	L_{con}	4,90	68670,00	N
$C_d = \Psi$ (coeficiente dinámico)		1,02		
$\Sigma M_C = 0 \Rightarrow M_C = M_A =$				
$[C_d \cdot L_{plu} \cdot (Q_u + Q_{met}) + 2 \cdot Q_{plu} \cdot (L'_{plu}/2)] - [Q_{con} \cdot L_{con} + 2 \cdot Q_{plu'} \cdot L'_{con}]$				
			433036,94	N·m

DIMENSIONES DEL PERFIL EN LA SECCIÓN CRÍTICA

El perfil viene determinado por el rodamiento de giro

Prontuario de perfiles de acero (Perfil: **Tubo circular hueco**)

A	20.809,91	mm ²
I_{flex}	3.170.525.012,90	mm ⁴
I_{tor}	6.341.050.025,81	mm ⁴
W_{flex}	5.712.657,68	mm ³
W_{tor}	11.425.315,36	mm ³
Q_{col}	1602,56	N/m
L_{col}	6,50	m

Q_{col}	10416,65	N
D	1110,00	mm
e	6,00	mm

Punto crítico de la sección: A

TENSIONES POR ESFUERZOS VERTICALES EN LA COLUMNA

Debido al peso propio de la pluma, columna, mecanismo de giro y contrapeso

$N_{m\acute{a}x}$ (esfuerzo normal máximo)	120739,91	N
$M_{fm\acute{a}x}$ (momento flector máximo)	-286216,56	N·m

$\sigma^{N1} = N_{m\acute{a}x}/A$	-5,80	N/mm ²
$\sigma^{M1} = M_{fm\acute{a}x}/W_{flex}$	-50,10	N/mm ²

$\sigma_1 = \sigma^{N1} + \sigma^{M1}$	-55,90	N/mm²
τ_1	0,00	N/mm²

Debido al peso propio de la carga útil y accesorios

$N_{m\acute{a}x}$ (esfuerzo normal máximo)	87799,50	N
$M_{fm\acute{a}x}$ (momento flector máximo)	702396,00	N·m

$\sigma^{N2} = N_{m\acute{a}x}/A$	4,22	N/mm ²
$\sigma^{M2} = M_{fm\acute{a}x}/W_{flex}$	122,95	N/mm ²

$\sigma_2 = \sigma^{N2} + \sigma^{M2}$	127,17	N/mm²
τ_2	0,00	N/mm²

TENSIONES POR ESFUERZOS HORIZONTALES EN LA COLUMNA

Fuerzas debidas a la aceleración para el peso propio del conjunto ($Q_{plu} + Q_u + Q_{met} + Q_{con}$)

F_{inconj}	1065,92	N
$L = r_{Gconj}$	2,19	m
$T = F_{inconj} \cdot L$	2334,36	N·m
$\sigma_3 = 0$	0,00	N/mm ²
$\tau_3 = (T_{m\acute{a}x} \cdot r_{m\acute{a}x})/I_{tor}$	0,20	N/mm ²

TENSIONES DEBIDAS A LA ACCIÓN DEL VIENTO EN LA COLUMNA

Fuerzas debidas a la acción del viento en servicio en la parte superior de la columna

F_{vpluA} (1ª viga)	1853,85	N
F_{vpluA} (2ª viga)	278,08	N
$F_{vpluA} = F_{vpluA}$ (1ª viga)+ F_{vpluA} (2ª viga)	2131,93	N
F_{vcA}	981,00	N
$F_{vplu'A}$ (1ª viga)	1107,15	N
$F_{vplu'A}$ (2ª viga)	166,07	N
$F_{vplu'A} = F_{vplu'A}$ (1ª viga)+ $F_{vplu'A}$ (2ª viga)	1273,22	N
F_{vconA}	858,38	N
$F_{vA} = F_{vpluA} + F_{vcA} + F_{vplu'A} + F_{vconA} = q$	5244,53	N
$T_{FvpluA} = F_{vpluA} \cdot (L'_{plu}/2)$	9060,70	N·m
$T_{FvcA} = F_{vcA} \cdot L_{plu}$	7848,00	N·m
$T_{FvdchaA} = T_{FvpluA} + T_{FvcA}$	16908,70	N·m
$T_{Fvplu'A} = F_{vplu'A} \cdot L'_{con}$	3501,36	N·m
$T_{FvconA} = F_{vconA} \cdot L_{con}$	4206,06	N·m
$T_{FvizdaA} = T_{Fvplu'A} + T_{FvconA}$	7707,42	N·m
$T_{m\acute{a}x} = T_{FvdchaA} - T_{FvizdaA}$	9201,29	N·m

σ_4	0,00	N/mm ²
$\tau_4 = (T_{m\acute{a}x} \cdot r_{m\acute{a}x})/I_{tor}$	0,81	N/mm ²

Fuerzas debidas a la acción del viento en servicio en toda la columna

$q = F_{vcolA}$	1098,48	N
$V_{m\acute{a}x} = q$	1098,48	N
$\sigma_5 =$		
	0,00	N/mm²
$\tau_5 = 4V_{m\acute{a}x}/3A$	0,070	N/mm²

Fuerzas debidas a la acción del viento fuera de servicio en la parte superior de la columna

F_{vpluB} (1ª viga)	5932,32	N
F_{vpluB} (2ª viga)	889,85	N
$F_{vpluB} = F_{vpluB}$ (1ª viga)+ F_{vpluB} (2ª viga)	6822,17	N
F_{vcB}	0,00	N
$F_{vplu'B}$ (1ª viga)	3542,88	N
$F_{vplu'B}$ (2ª viga)	531,43	N
$F_{vplu'B} = F_{vplu'B}$ (1ª viga)+ $F_{vplu'B}$ (2ª viga)	4074,31	N
F_{vconB}	2746,80	N
$F_{vB} = F_{vpluB}+F_{vcB}+F_{vplu'B}+F_{vconB} = q$	13643,28	N
$T_{FvpluB} = F_{vpluB} \cdot (L'_{plu}/2)$	28994,22	N·m
$T_{FvcB} = F_{vcB} \cdot L_{plu}$	0,00	N·m
$T_{FvdchaB} = T_{FvpluB}+T_{FvcB}$	28994,22	N·m
$T_{Fvplu'B} = F_{vplu'B} \cdot L'_{con}$	11204,35	N·m
$T_{FvconB} = F_{vconB} \cdot L_{con}$	13459,32	N·m
$T_{FvizdaB} = T_{Fvplu'B}+T_{FvconB}$	24663,67	N·m
$T_{m\acute{a}x} = T_{FvdchaB}-T_{FvizdaB}$	4330,55	N·m

σ_6	0,00	N/mm²
$\tau_6 = (T_{m\acute{a}x} \cdot r_{m\acute{a}x})/I_{tor}$	0,379	N/mm²

Fuerzas debidas a la acción del viento fuera de servicio en toda la columna

$q = F_{vcolB}$	3515,15	N
$V_{m\acute{a}x} = q$	3515,15	N

$\sigma_7 = 0$	0,00	N/mm²
$\tau_7 = 4V_{\text{máx}}/3A$	0,225	N/mm²

ESTUDIO DE LAS DIFERENTES POSIBILIDADES EN LA COLUMNA (COMBINACIONES)

Se aplican los coefs. FEM en cada uno

En servicio sin viento

γ_s (TABLA)	1,06	
C_d (Coeficiente dinámico)	1,02	
C_s (Coeficiente de seguridad)	1,50	Por normativa

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	-55,90	-88,89	0,00	0,00
2	127,17	207,06	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,204	0,325
$\sigma_{\text{equivalente}}$	118,17		MPa	

En servicio con viento

γ_s (TABLA)	1,06	
C_d (Coeficiente dinámico)	1,02	
C_s (Coeficiente de seguridad)	1,33	Por normativa

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	-55,90	-78,81	0,00	0,00
2	127,17	183,59	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,204	0,272
4	0,00	0,00	0,805	1,071
5	0,00	0,00	0,070	0,094
$\sigma_{\text{equivalente}}$	104,80		MPa	

Fuera de servicio con viento

C_s (Coeficiente de seguridad)	1,10	Por normativa
----------------------------------	-------------	---------------

	σ_i (MPa)	σ'_i	τ_i (MPa)	τ'_i
1	-55,90	-61,49	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,38	0,42
7	0,00	0,00	0,23	0,25
$\sigma_{equivalente}$	61,50		MPa	

Comprobación de validez de la sección crítica

	$\sigma_{equivalente}$	
Sin viento en servicio	118,17	MPa
Con viento en servicio	104,80	MPa
Con viento sin servicio	61,50	MPa

La pluma está construida en acero St-42

=> σ_{adm}

260,00

MPa

$\sigma_{equivalente}$ (CASO MÁS DESFAVORABLE) =

118,17

MPa

3.2.7. Dimensionamiento y cálculo de la cimentación y el anclaje

3.2.7.1. Dimensionamiento de la zapata

Consideraciones generales

La misión de la cimentación es transmitir adecuadamente las cargas de la estructura al terreno que le da soporte.

La cimentación actúa como elemento de transición entre:

- un medio conocido, homogéneo y artificial, con elevadas tensiones de trabajo (hormigón armado).
- un medio cambiante, heterogéneo y natural, con bajas tensiones de trabajo (terreno).

Para la realización de los cimientos, se ha optado por la opción de cimentación superficial o directa (son aquellas que se apoyan en las capas superficiales o poco profundas del suelo, por tener éste suficiente capacidad portante o por tratarse de construcciones de importancia secundaria y relativamente livianas, y la carga se reparte en un plano de apoyo horizontal) y, dentro de esta, se ha optado por zapata aislada.

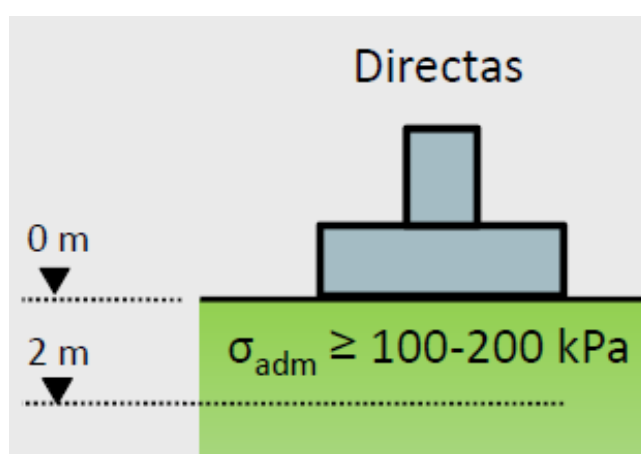


Figura 31. Cimentación directa.

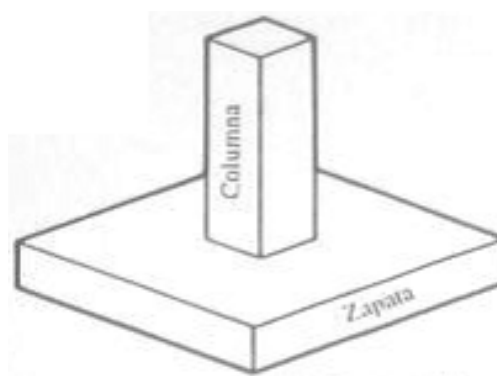


Figura 32. Zapata aislada.

A su vez, se considerará una zapata cuadrada.

La zapata se dimensionará para resistir las cargas actuantes y las reacciones inducidas. Para ello será preciso que las sollicitaciones actuantes sobre el elemento de cimentación se transmitan íntegramente al terreno.

Para la definición de las dimensiones de la cimentación y la comprobación de las tensiones del terreno se considerarán las combinaciones pésimas transmitidas por la estructura.

Para la comprobación de los distintos Estados Límites Últimos (ELU) del elemento de cimentación, se considerarán los efectos de las tensiones del terreno, obtenidos para los esfuerzos transmitidos por la estructura para las combinaciones pésimas de cálculo.

Para la verificación de la estabilidad del cimiento se considerarán el peso propio del cimiento y las acciones en valor característico, es decir, sin mayorar ($\gamma_f = 1$).

Para el diseño estructural de la cimentación no se considerará el peso propio del cimiento y se considerarán las acciones con valores de cálculo (mayorados).

El tipo de hormigón utilizado en la zapata será un hormigón de baja resistencia. La EHE impone un mínimo a emplear de HA-25, cuya resistencia característica es $f_{ck} = 25$ MPa. Se utiliza habitualmente acero B 500 S/SD en su armado. En este caso, se ha optado por un acero B 500 S, cuya resistencia característica es $f_{yk} = 500$ MPa.

Además, se considerarán los siguientes coeficientes:

$\gamma_c = 1,5$, coeficiente de minoración de la resistencia del hormigón.

$\gamma_s = 1,15$, coeficiente de minoración de la resistencia del acero.

$\gamma_f = 1,5$, coeficiente de mayoración de acciones.

Teniendo en cuenta estos coeficientes, la tensión admisible del hormigón a la compresión será:

$$\sigma_{admh} = f_{cd} = f_{ck}/\gamma_C$$

Tipo de acción	Situación persistente o transitoria		Situación accidental	
	Efecto favorable	Efecto desfavorable	Efecto favorable	Efecto desfavorable
Permanente	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,35$	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,00$
Pretensado	$\gamma_P = 1,00$	$\gamma_P = 1,00$	$\gamma_P = 1,00$	$\gamma_P = 1,00$
Permanente de valor no constante	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,50$	$\gamma_{G^*} = 1,00$	$\gamma_{G^*} = 1,00$
Variable	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,50$	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,00$
Accidental	—	—	$\gamma_A = 1,00$	$\gamma_A = 1,00$

Tabla 20. Coeficientes parciales de seguridad para las acciones, aplicables para la evaluación de los ELU.

Situación de proyecto	Hormigón γ_c	Acero pasivo y activo γ_s
Persistente o transitoria	1,5	1,15
Accidental	1,3	1,0

Tabla 21. Coeficientes parciales de seguridad de los materiales para ELU.

Planteamiento de la cimentación

Para el dimensionamiento del macizo de anclaje o zapata de la grúa se han utilizado ecuaciones propias para este tipo de grúas extraídas del libro *Grúas*, de E. Larrodé y A. Miravete, en el cual se describe el procedimiento de cálculo de la cimentación de la grúa de columna fija.

A la hora de hacer los cálculos, además de las fuerzas ejercidas por los elementos que componen la estructura de la grúa y la carga, habrá que sumar el peso de la zapata aislada que también ejercerá presión sobre el terreno. En la figura 33, se pueden apreciar las diferentes cargas que hay que tener en cuenta.

Tal como se ve en la figura, sobre la zapata de un peso propio Q_z y longitud de lado a , que se supone cuadrada, actúa la fuerza vertical N como suma de todos los pesos propios de la estructura de la grúa y la carga, así como un momento M .

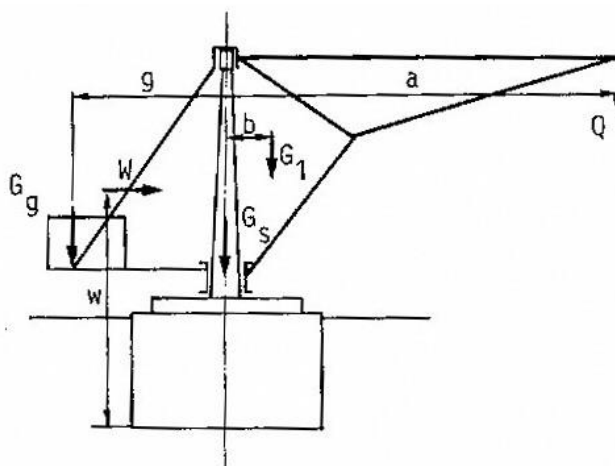


Figura 33. Macizo de anclaje.

La distancia a la que actúan las fuerzas verticales se denomina x , por tanto el momento M resultante será:

$$M = R \cdot x$$

Es decir, la excentricidad con la que actuarán las fuerzas sobre la zapata será:

$$x = M/R$$

La presión en el terreno p depende de la magnitud de la excentricidad x y de la posición del pescante o pluma, en este caso y , por tanto, las presiones producidas en el terreno cambiarán en función de estas dos variables. Se calculará para dos posiciones de la pluma, tal y como se aprecia en la siguiente figura.

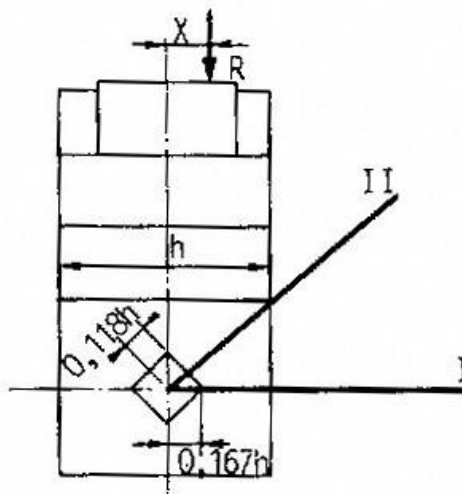


Figura 34. Posibles posiciones de la pluma.

Por tanto, se definen, en función de x y de la posición de la pluma, cuatro presiones del terreno:

- a) **Posición I.** Pluma paralela a uno de los lados del macizo, la fuerza incide dentro del núcleo de la sección ($x < 0,167 \cdot h$)

$$p_I = \frac{R}{a^2} \cdot \left(1 + 6 \cdot \frac{x}{a} \right)$$

- b) **Posición I.** Pluma paralela a uno de los lados del macizo, la fuerza incide fuera del núcleo de la sección ($x > 0,167 \cdot h$)

$$p_{II} = \frac{R}{a^2} \cdot \frac{4}{\left(3 - 6 \cdot \frac{x}{a} \right)}$$

Aquí se tiene en cuenta que la superficie de la base solo puede transmitir tensiones de compresión, pero no de tracción.

- c) **Posición II.** Pluma en diagonal, la fuerza incide dentro del núcleo de la sección ($x < 0,118 \cdot h$)

$$p_{III} = \frac{R}{a^2} \cdot \left(1 + 8,5 \cdot \frac{x}{a} \right)$$

- d) **Posición II.** Pluma en diagonal, la fuerza incide fuera del núcleo de la sección ($x > 0,118 \cdot h$), sólo fuerzas de compresión.

$$p_{IV} = \frac{R}{a^2} \cdot \frac{1}{\left(0,7 - 1,7 \cdot \frac{x}{a}\right)}$$

La presión p debe ser siempre mayor de cero, asegurando así la estabilidad de la grúa, y a su vez menor que la presión admisible del terreno.

En la tabla 22 se muestran diferentes valores de presiones admisibles en el terreno.

Clase de terreno	$p_{\text{máx}}$ en Kg/cm^2
Terraplén, terreno no apisonado artificialmente, según sus propiedades.	0 a 1
Terreno de tierra suelta, firme	
a) Arena fina y semigruesa hasta un tamaño de 1 mm.....	2
b) Arena gruesa, tamaño de grano 1 a 3 mm.....	3
c) Gravilla con 1/3 por lo menos de su volumen ocupado por grava, y con grava, hasta 70 mm de tamaño de grano.....	4
Terreno de tierra fuerte (arcilla roja y blanca y marga)	
a) blando (francamente plástico).....	0,4
b) consistente (poco plástico).....	0,8
c) semifirme.....	1,5
d) duro.....	3
Roca fuerte poco resquebrajada, en buen estado, no modificada por los agentes atmosféricos y favorablemente estratificada. Cuando el resquebrajamiento sea mayor o la estratificación desfavorable, hay que reducir los valores en más de la mitad	
a) en una sucesión apretada de capas (Gres esquistoso, piedra calcárea, mármol, marga compacta, dolomía, esquisto cristalino, arcilla esquistosa).....	
α) de menor resistencia mecánica.....	10
β) de constitución firme (más de 50 Kg/cm^2 de resistencia a la compresión).....	15
b) en formación de masa o especial (granito, sienita, diorita, pórfido, diabasa, basalto andesita, gneis).....	30

Tabla 22. Presiones admisibles en el terreno en kg/cm^2 según DIN 1054.

La presión admisible del terreno debe ser superior a 0 kg/cm^2 . En el caso de una presión admisible inferior a 0 kg/cm^2 , se considera que no es un terreno apropiado para realizar una cimentación capaz de soportar la estructura y cargas que actúan sobre la grúa. En dicho caso, se

tiene que realizar una zanja y se rellenará con una capa de cemento pobre (resistencia a la compresión de 100-150 kg/cm²).

En este caso y, según los resultados del estudio geotécnico, se sabe que la presión admisible del terreno es de 2 kg/cm², ya que se trata de arena semigruesa con un árido de un tamaño inferior a 1 mm.

Por debajo de la zapata, se echará una capa de 100 mm aproximadamente de hormigón de limpieza (HL-150/B/20) cuya única función es acondicionar el terreno para la zapata.

Presión máxima sobre el terreno en función de las dimensiones de la zapata

Para el cálculo de la presión máxima, en primer lugar, se ha de estimar la altura de la zapata. Para una primera aproximación, se ha considerado una profundidad de $h = 100$ cm. Con este valor, se halla el lado de la zapata (de longitud razonable comparada con la altura) que según las condiciones más desfavorables produzca una presión en el terreno como máximo de 2 kg/cm² y, a su vez, mayor que 0 kg/cm².

Como se ha comprobado para este caso que, en comparación con el canto, la anchura de la zapata es algo grande, se ha aumentado la altura de la misma hasta 150 cm.

El peso de la zapata Q_z varía según las dimensiones de esta. Por esta razón, los valores de R y x varían con cada valor de a (lado de la zapata). Considerando una profundidad inicial de zapata y un hormigón HA-25 ($\rho = 2500$ kg/cm³), se hallará el peso de cada zapata para diferentes valores de h y se calcularán las presiones resultantes para cada caso.

Momento flector por la acción del viento respecto de la base de la zapata

a) Caso con carga y viento de servicio

Este momento se calcula sumando los momentos provocados por el viento en cada elemento:

Para el caso de grúa sin contrapeso:

$$M_{vA} = M_{vcolA} + M_{vcA}$$

Para el caso de grúa con contrapeso:

$$M_{vA} = M_{vcolA} + M_{vcA} + M_{vconA}$$

Donde:

M_{vcolA} = Momento flector debido a la acción del viento en servicio sobre la columna.

M_{vc} = Momento flector debido a la acción del viento en servicio sobre la carga.

M_{vcon} = Momento flector debido a la acción del viento en servicio sobre el contrapeso.

b) Caso con viento fuera de servicio

En este caso, no se considera la fuerza del viento sobre la carga, ya que la grúa está fuera de servicio, es decir, no hay carga.

Para el caso de grúa sin contrapeso:

$$M_{vB} = M_{vcolB}$$

Para el caso de grúa con contrapeso:

$$M_{vB} = M_{vcolB} + M_{vconB}$$

Donde:

M_{vcol} = Momento flector debido a la acción del viento fuera de servicio sobre la columna.

M_{vcon} = Momento flector debido a la acción del viento fuera de servicio sobre el contrapeso.

Determinación de combinaciones de solicitaciones

Como se ha indicado más arriba para el dimensionamiento de la pluma y de la columna, la fórmula general de cálculo es:

$$[M \cdot (S_G + \Psi \cdot S_L + S_H) + S_W] \cdot C_s$$

Los casos posibles de combinación de solicitaciones son varios:

a) Caso I: En servicio sin viento

R y M se calcularán como:

Para el caso de grúa sin contrapeso:

$$R = [C_d \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{col} + Q_{plu} + Q_{mg}] + Q_z$$

$$M = [C_d \cdot L_{plu} \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{plu} \cdot (L'_{plu}/2)] \cdot \gamma_s \cdot C_s$$

Para el caso de grúa con contrapeso:

$$R = [C_d \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{con} + Q_{mg} + Q_{col} + 2 \cdot Q_{plu} + 2 \cdot Q_{plu}'] + Q_z$$

$$M = [(C_d \cdot L_{plu} \cdot (Q_u + Q_{met}) + 2 \cdot Q_{plu} \cdot (L'_{plu}/2)) - (Q_{con} \cdot L_{con} + 2 \cdot Q_{plu}' \cdot L'_{con})] \cdot \gamma_s \cdot C_s$$

b) Caso II: En servicio con viento

R y M se calcularán como:

Para el caso de grúa sin contrapeso:

$$R = [C_d \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{col} + Q_{plu} + Q_{mg}] + Q_z$$

$$M = [(C_d \cdot L_{plu} \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{plu} \cdot (L'_{plu}/2)) \cdot \gamma_S + M_{vA}] \cdot C_S$$

Para el caso de grúa con contrapeso:

$$R = [C_d \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{con} + Q_{mg} + Q_{col} + 2 \cdot Q_{plu} + 2 \cdot Q_{plu}'] + Q_z$$

$$M = [((C_d \cdot L_{plu} \cdot (Q_u + Q_{met}) + 2 \cdot Q_{plu} \cdot (L'_{plu}/2)) - (Q_{con} \cdot L_{con} + 2 \cdot Q_{plu}' \cdot L'_{con})) \cdot \gamma_S + M_{vA}] \cdot C_S$$

c) Caso III: Fuera de servicio con viento máximo

R y M se calcularán como:

Para el caso de grúa sin contrapeso:

$$R = (Q_{met} + Q_{col} + Q_{plu} + Q_{mg}) + Q_z$$

$$M = [(Q_{met} \cdot L_{plu} + Q_{plu} \cdot (L'_{plu}/2)) \cdot \gamma_S + M_{vB}] \cdot C_S$$

Para el caso de grúa con contrapeso:

$$R = (Q_{met} + Q_{con} + Q_{mg} + Q_{col} + 2 \cdot Q_{plu} + 2 \cdot Q_{plu}') + Q_z$$

$$M = [(Q_{met} \cdot L_{plu} + 2 \cdot Q_{plu} \cdot (L'_{plu}/2)) - (Q_{con} \cdot L_{con} + 2 \cdot Q_{plu}' \cdot L'_{con})) \cdot \gamma_S + M_{vB}] \cdot C_S$$

Acciones sobre la zapata

La sollicitación de la base de la zapata al terreno será la calculada para la situación más desfavorable, esto es, en servicio sin viento. Los valores del momento de vuelco y la suma de fuerzas verticales, teniendo en cuenta el peso de la zapata, son:

Acciones mayoradas:

Para el caso de grúa sin contrapeso:

$$\text{Esfuerzo axial, } N = R_C = [C_d \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + Q_{\text{col}} + Q_{\text{plu}} + Q_{\text{mg}}] + Q_z$$

$$\text{Momento de vuelco, } M = M_C = [C_d \cdot L_{\text{plu}} \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + Q_{\text{plu}} \cdot (L'_{\text{plu}}/2)] \cdot \gamma_S \cdot C_S$$

$$\text{Esfuerzo cortante, } V = (F_{\text{vcolA}} + F_{\text{vcA}}) \cdot C_S$$

Para el caso de grúa con contrapeso:

$$\text{Esfuerzo axial, } N = R_C = C_d \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + Q_{\text{con}} + Q_{\text{mg}} + Q_{\text{col}} + 2 \cdot Q_{\text{plu}} + 2 \cdot Q_{\text{plu}}'$$

$$\text{Momento de vuelco, } M = M_C = [(C_d \cdot L_{\text{plu}} \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + 2 \cdot Q_{\text{plu}} \cdot (L'_{\text{plu}}/2)) - (Q_{\text{con}} \cdot L_{\text{con}} + 2 \cdot Q_{\text{plu}}' \cdot L'_{\text{con}})] \cdot \gamma_S \cdot C_S$$

$$\text{Esfuerzo cortante, } V = (F_{\text{vcolA}} + F_{\text{vconA}} + F_{\text{vcA}}) \cdot C_S$$

Acciones sin mayorar:

Para el caso de grúa sin contrapeso:

$$\text{Esfuerzo axial, } N = R_C = [C_d \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + Q_{\text{col}} + Q_{\text{plu}} + Q_{\text{mg}}] + Q_z$$

$$\text{Momento de vuelco, } M = M_C = [C_d \cdot L_{\text{plu}} \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + Q_{\text{plu}} \cdot (L'_{\text{plu}}/2)]$$

$$\text{Esfuerzo cortante, } V = F_{\text{vcolA}} + F_{\text{vcA}}$$

Para el caso de grúa con contrapeso:

$$\text{Esfuerzo axial, } N = R_C = C_d \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + Q_{\text{con}} + Q_{\text{mg}} + Q_{\text{col}} + 2 \cdot Q_{\text{plu}} + 2 \cdot Q_{\text{plu}}'$$

$$\text{Momento de vuelco, } M = M_C = [(C_d \cdot L_{\text{plu}} \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + 2 \cdot Q_{\text{plu}} \cdot (L'_{\text{plu}}/2)) - (Q_{\text{con}} \cdot L_{\text{con}} + 2 \cdot Q_{\text{plu}}' \cdot L'_{\text{con}})]$$

$$\text{Esfuerzo cortante, } V = F_{\text{vcolA}} + F_{\text{vconA}} + F_{\text{vcA}}$$

Consideraciones del vuelo máximo

Según la relación entre sus dimensiones, las zapatas se clasifican en rígidas y flexibles.

Zapata rígida: $0,5 \cdot h \leq v_{m\acute{a}x} \leq 2 \cdot h$

Zapata flexible: $v_{m\acute{a}x} > 2 \cdot h$

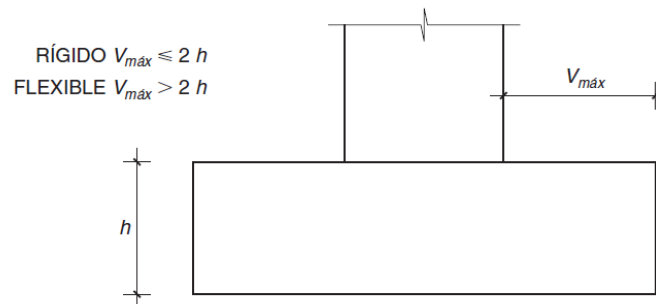


Figura 35. Zapata rígida/flexible.

En este caso, la zapata se considera rígida ya que cumple la condición anteriormente mostrada.

Verificación de la estabilidad del cimiento

Sea la zapata con las dimensiones y situación que se indica en la siguiente figura, sometida a los esfuerzos en la base de la columna N_0 , M_0 y V_0 :

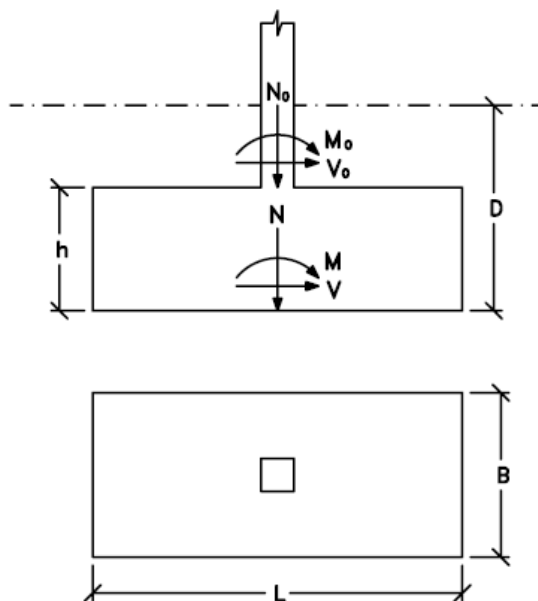


Figura 36. Comprobación de la estabilidad estructural.

Se estudia la superficie de contacto entre la zapata y el suelo. En esta superficie actúan:

$$N = N_0 + Q_z$$

$$M = M_0 + V_0 \cdot h$$

$$V = V_0$$

Siendo N_0 , Q_0 y M_0 los esfuerzos, sin mayorar, a los que está sometida la columna en su base.

Destacar que en los cálculos no se considerará el peso del terreno sobre el cimiento por ser un valor estabilizador que puede no existir accidentalmente.

Las comprobaciones de la estabilidad estructural de la zapata que se deben realizar son las siguientes:

- a) Seguridad frente al hundimiento o rotura del terreno de cimentación.
- b) Seguridad frente al deslizamiento.

c) Seguridad al vuelco.

Comprobación de la seguridad frente al hundimiento

La distribución de tensiones bajo una zapata no es uniforme ni igual según la rigidez de la zapata y la naturaleza del suelo, tal y como se puede ver en la figura siguiente.

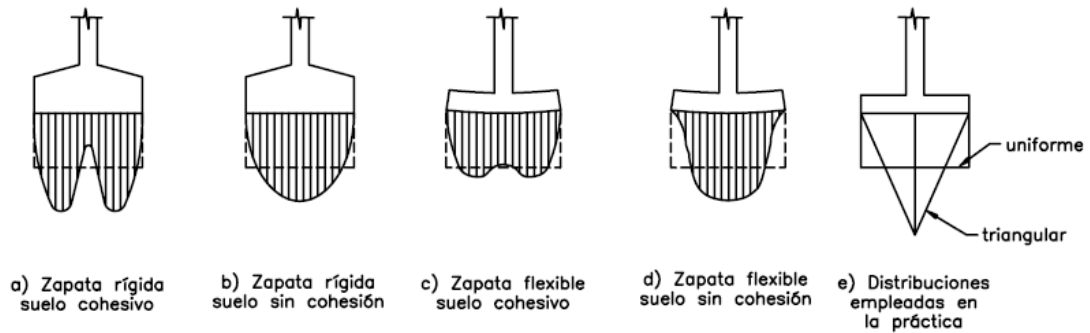


Figura 37. Casos de distribuciones de tensiones bajo una zapata.

En la práctica, para evitar cálculos complejos, se adoptan distribuciones uniformes o lineales.

Pueden presentarse los siguientes casos:

a) $e = M/N = 0$

Siendo e la excentricidad de la carga axial.

Corresponde a una distribución uniforme de tensiones con $\sigma_c = \frac{N}{L \cdot B}$

b) $e = M/N \leq L/6$

Corresponde a una distribución trapezoidal de tensiones con:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{N}{L \cdot B} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot e}{L} \right)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{N}{L \cdot B} \cdot \left(1 - \frac{6 \cdot e}{L}\right)$$

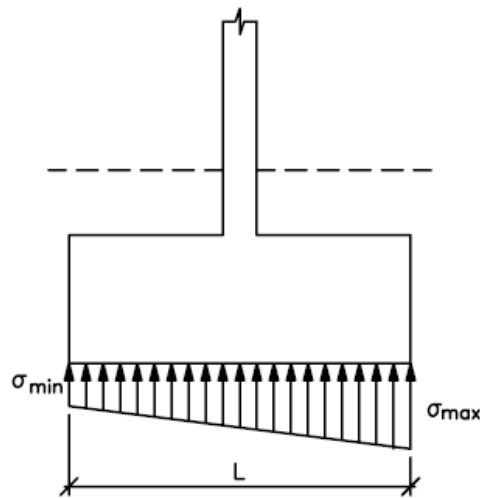


Figura 38. Distribución trapezoidal de tensiones.

c) $e = M/N > L/6$

Corresponde a una distribución triangular de tensiones con una zona comprimida y una traccionada. Como no puede haber tracción entre el hormigón y el terreno, se acepta que se produce una redistribución de tensiones de forma que se produzca un equilibrio de esfuerzos.

$$N = \frac{\sigma_{\max} \cdot \overline{AX}}{2} \cdot B$$

$$\overline{AC} = \frac{\overline{AX}}{3} = \frac{L}{2} - e$$

$$\overline{AX} = \frac{3 \cdot L}{2} - 3 \cdot e$$

$$\sigma_{\max} = \frac{4 \cdot N}{3 \cdot (L - 2 \cdot e) \cdot B}$$

Al tratarse de una zapata cuadrada, $L = B = a$.

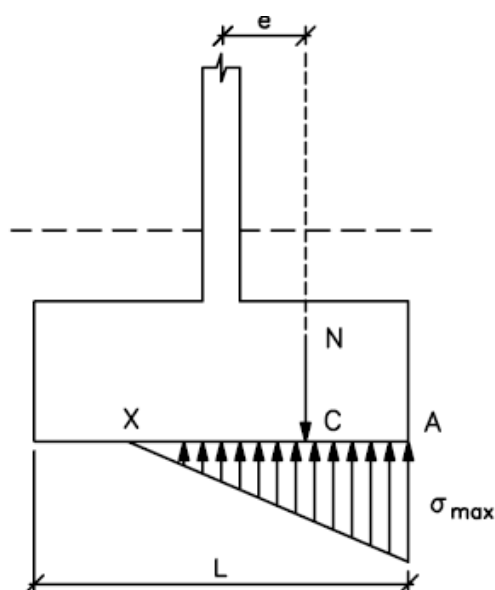


Figura 39. Distribución triangular de tensiones.

En todos estos casos deberá cumplirse $\sigma_{\text{máx}} \leq 1,25 \cdot \sigma_{\text{adm}}$ y, en el caso de distribución trapecial además, $\frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} \leq \sigma_{\text{adm}}$

Comprobación de la seguridad frente al deslizamiento

Los resultados del estudio geotécnico han determinado que el terreno es arena semigruesa.

El coeficiente de seguridad al deslizamiento se determinará mediante la siguiente expresión (caso de terrenos arenosos):

$$C_{sd} = \frac{N \cdot \text{tg} \phi}{V}$$

Siendo:

$\phi_d = 3/4 \cdot \phi$, el ángulo de rozamiento zapata-terreno.

Donde ϕ es el ángulo de rozamiento interno del terreno, parámetro que define la fricción o fuerza de rozamiento existente entre las partículas del terreno, expresado en grados (se obtiene de la tabla 23).

CARACTERÍSTICAS MEDIAS DE LOS SUELOS						
CLASE DE SUELO	PESO ESPECÍFICO		VALORES DE CÁLCULO			MODULO DE COMPRESIBILIDAD
	Emergido γ t/m ³	Sumergido γ_{sum} t/m ³	Resistencia final		Resistencia inicial	E_s t/m ²
			Angulo de rozamiento (grados) ϕ'	Cohesión c' t/m ²	Resistencia al corte sin drenaje c_u t/m ²	
<u>Suelos no cohesivos</u>						
— Arena suelta, redondeada	1,8	1,0	30	—	—	2.000- 5.000
— Arena suelta, angulosa	1,8	1,0	32,5	—	—	4.000- 8.000
— Arena semidensa redondeada	1,9	1,1	32,5	—	—	5.000-10.000
— <u>Arena semidensa angulosa</u>	1,9	1,1	<u>35</u>	—	—	8.000-15.000
— Grava sin arena	1,6	1,0	37,5	—	—	10.000-20.000
— Grava gruesa, angulosa	1,8	1,1	40	—	—	15.000-30.000

Tabla 23. Características medias de los suelos.

Comprobación de la seguridad frente al vuelco

En este apartado, habrá que tener en cuenta las acciones que favorecen el vuelco y las acciones que le hacen contra. Se plantearán las ecuaciones de equilibrio estático respecto al punto de vuelco de la zapata (A).

Por tanto, tomando momentos respecto al borde en la base de la zapata y debiendo cumplirse que el coeficiente de estabilidad:

$$C_{sv} = \frac{N \cdot L/2}{M} \geq 1,5$$

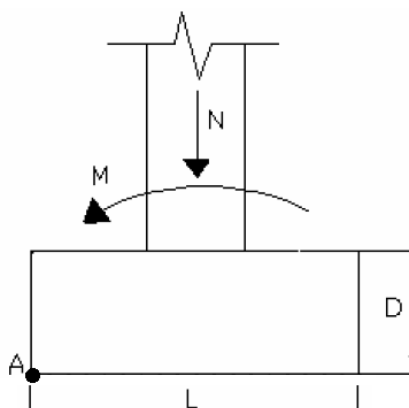


Figura 40. Estabilidad al vuelco.

Resolución de cálculos dimensionamiento zapata**Configuración 1: Grúa sin contrapeso****DIMENSIONAMIENTO DE LA ZAPATA**

h (profundidad o altura de la zapata) < 3 m (Cimentación superficial)	150,00	cm
ρ_H (densidad del hormigón armado)	2500,00	kg/m ³

Pesos propios

	kg		
Q_{plu} (peso propio de la pluma)	2066,86	20275,90	N
Q_{col} (peso propio de la columna)	1367,67	13416,84	N
Q_u (carga útil + accesorios)	8250,00	80932,50	N
Q_{mg} (peso del mecanismo de giro)	830,00	8142,30	N
Q_{met} (peso del polipasto)	700,00	6867,00	N
Q_z (peso propio zapata)	Variable (depende de a)	Variable (depende de a)	N

En servicio sin viento

		d (distancia en m)		
Q_{plu} (peso propio de la pluma)	$L'_{plu}/2$	4,25	20275,90	N
Q_u (carga útil + accesorios)	L_{plu}	8,00	80932,50	N
Q_{met} (peso del polipasto)	L_{plu}	8,00	6867,00	N

γ_s	1,06
$C_d = \Psi$ (coeficiente dinámico)	1,02
C_s	1,50

$R = N = [C_d \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{col} + Q_{plu} + Q_{mg}] + Q_z$	Variable (depende de Q_z)	N
$M = [C_d \cdot (Q_u + Q_{met}) \cdot L_{plu} + Q_{plu} \cdot (L'_{plu}/2)] \cdot \gamma_s \cdot C_s$	1.280.627,44	N·m

a (cm)	$Q_z =$ $Volz \cdot \rho_H$ (kg)	R (kg)	x = M/R (cm)	P_I (kg/cm²)	P_{II}	P_{III}	P_{IV}
450,00	75.937,50	89.689,03	145,55	1,30	1,67	1,66	2,95
455,00	77.634,38	91.385,91	142,85	1,27	1,58	1,62	2,65
460,00	79.350,00	93.101,53	140,22	1,24	1,50	1,58	2,42
465,00	81.084,38	94.835,91	137,65	1,22	1,43	1,54	2,23
470,00	82.837,50	96.589,03	135,15	1,19	1,37	1,51	2,07
475,00	84.609,38	98.360,91	132,72	1,17	1,32	1,47	1,94
480,00	86.400,00	100.151,53	130,35	1,14	1,27	1,44	1,82
485,00	88.209,38	101.960,91	128,03	1,12	1,22	1,41	1,73
490,00	90.037,50	103.789,03	125,78	1,10	1,18	1,38	1,64
495,00	91.884,38	105.635,91	123,58	1,08	1,15	1,35	1,56
$P_{\min} \leq 2$	1,94						kg/cm²
a_{mín} =	475,00						cm

En servicio con viento

		d (distancia en m)		
Q_{plu} (peso propio de la pluma)	$L'_{plu}/2$	4,25	20275,90	N
Q_u (carga útil + accesorios)	L_{plu}	8,00	80932,50	N
Q_{met} (peso del polipasto)	L_{plu}	8,00	6867,00	N

γ_s	1,06
$C_d = \Psi$ (coeficiente dinámico)	1,02
C_s	1,33

R = N =

$$[C_d \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{col} + Q_{plu} + Q_{mg}] + Q_z$$

	Variable (depende de Q_z)	
F_{vcolA}	1392,30	N
$L_{col}/2$	3,25	m
F_{vcA}	981,00	N
$L = d_{col-c}$	6,00	m
$M_{vA} =$ $F_{vcolA} \cdot (L_{col}/2) + F_{vcA} \cdot L$	10.410,98	N·m
M = $[(C_d \cdot L_{plu} \cdot (Q_u + Q_{met}) +$	1.149.336,26	N·m

$$\frac{Q_{plu} \cdot (L'_{plu}/2) \cdot \gamma_s + M_{vA}}{C_s}$$

a (cm)	Q _Z =		x = M/R (cm)	P _I (kg/cm ²)	P _{II}	P _{III}	P _{IV}
	Volz·ρ _H (kg)	R (kg)					
450,00	75.937,50	89.689,03	130,63	1,21	1,41	1,54	2,14
455,00	77.634,38	91.385,91	128,20	1,19	1,35	1,50	2,00
460,00	79.350,00	93.101,53	125,84	1,16	1,30	1,46	1,87
465,00	81.084,38	94.835,91	123,54	1,14	1,25	1,43	1,77
470,00	82.837,50	96.589,03	121,30	1,11	1,20	1,40	1,67
475,00	84.609,38	98.360,91	119,11	1,09	1,17	1,37	1,59
480,00	86.400,00	100.151,53	116,98	1,07	1,13	1,34	1,52
485,00	88.209,38	101.960,91	114,91	1,05	1,10	1,31	1,46
490,00	90.037,50	103.789,03	112,88	1,03	1,07	1,28	1,40
495,00	91.884,38	105.635,91	110,91	1,01	1,04	1,25	1,35
P_{mín} ≤ 2	2,00						kg/cm²
a_{mín} =	455,00						cm

Fuera de servicio

	L _{plu}	d (distancia en m)		
Q _{plu} (peso propio de la pluma)	L _{plu} /2	4,25	20275,90	N
Q _u (carga útil + accesorios)	L _{plu}	8,00	80932,50	N
Q _{met} (peso del polipasto)	L _{plu}	8,00	6867,00	N
γ_s	1,06			
C_d = Ψ (coeficiente dinámico)	1,02			
C_s	1,10			

$$R = N =$$

$$(Q_{met} + Q_{col} + Q_{plu} + Q_{mg}) + Q_z$$

	Variable (depende de Q _Z)	N
F _{vcolB}	4455,36	N
L _{col} /2	3,25	m
M _{vB} = F _{vcolB} · (L _{col} /2)	14.479,92	N·m

M =

$$[(Q_{met} \cdot L_{plu} + Q_{plu} \cdot (L'_{plu} / 2)) \cdot \gamma_S + M_{vB}] \cdot C_S$$

180.460,49**N·m**

a (cm)	Q_Z = Volz·ρ_H (kg)	R (kg)	x = M/R (cm)	P_I (kg/cm²)	P_{II}	P_{III}	P_{IV}
450,00	75.937,50	89.689,03	20,51	0,56	0,65	0,61	0,71
455,00	77.634,38	91.385,91	20,13	0,56	0,65	0,61	0,71
460,00	79.350,00	93.101,53	19,76	0,55	0,64	0,60	0,70
465,00	81.084,38	94.835,91	19,40	0,55	0,64	0,59	0,70
470,00	82.837,50	96.589,03	19,05	0,54	0,63	0,59	0,69
475,00	84.609,38	98.360,91	18,70	0,54	0,63	0,58	0,69
480,00	86.400,00	100.151,53	18,37	0,53	0,63	0,58	0,68
485,00	88.209,38	101.960,91	18,04	0,53	0,62	0,57	0,68
490,00	90.037,50	103.789,03	17,72	0,53	0,62	0,57	0,68
495,00	91.884,38	105.635,91	17,41	0,52	0,62	0,56	0,67
P_{mín} ≤ 2	Todas						kg/cm²
a_{mín} =	Cualquiera						cm

Dimensiones de la zapata

a (lado de la zapata) =	475,00	cm
h (profundidad o altura de la zapata) =	150,00	cm

COMPROBACIONES EN EL DISEÑO DE LA ZAPATA

Instrucción EHE sobre zapatas rígidas

Comprobación del vuelo máximo

a	475,00	cm
h	150,00	cm
D (diámetro columna)	142,80	cm

$$v_{\text{máx}} = (a-D)/2 \quad \mathbf{166,10} \quad \mathbf{cm}$$

$$0,5 \cdot h \quad 75,00 \quad \text{cm}$$

$$2 \cdot h \quad 300,00 \quad \text{cm}$$

Como $0,5 \cdot h < v_{\text{máx}} < 2 \cdot h \Rightarrow$ **Zapata rígida****Acciones**Se calcula para la situación más desfavorable \Rightarrow **En servicio sin viento**

$$Q_Z = Vol_z \cdot \rho_H \quad 830.017,97 \quad N$$

MAYORADAS

$$N = [C_d \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + Q_{\text{col}} + Q_{\text{plu}} + Q_{\text{mg}}] + Q_Z \quad \mathbf{961.759,70} \quad N$$

$$M = [C_d \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) \cdot L_{\text{plu}} + Q_{\text{plu}} \cdot (L'_{\text{plu}}/2)] \cdot \gamma_s \cdot C_s \quad \mathbf{1.280.627,44} \quad N \cdot m$$

SIN MAYORAR

$$N = [C_d \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + Q_{\text{col}} + Q_{\text{plu}} + Q_{\text{mg}}] + Q_Z \quad \mathbf{961.759,70} \quad N$$

$$M = C_d \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) \cdot L_{\text{plu}} + Q_{\text{plu}} \cdot (L'_{\text{plu}}/2) \quad \mathbf{805.426,06} \quad N \cdot m$$

Comprobación de la estabilidad estructural**Seguridad frente al hundimiento (Acciones mayoradas)**

$$e = M/N \quad 1,33 \quad m$$

$$a/6 \quad 0,79 \quad m$$

Como $e > a/6 \Rightarrow$ Distribución TRIANGULAR de tensiones

$$AX = (3 \cdot a)/2 - 3 \cdot e \quad 3,13 \quad m$$

$$\sigma = (4N)/(3 \cdot ((a-2 \cdot e) \cdot a)) \quad \mathbf{129,36} \quad \mathbf{KN/m^2}$$

$$\sigma_{\text{adm}} \quad \mathbf{300,00} \quad \mathbf{KN/m^2}$$

$$1,25 \cdot \sigma_{adm} \qquad 375,00 \quad \text{KN/m}^2$$

$$\sigma \leq 1,25 \cdot \sigma_{adm} \checkmark$$

Seguridad frente al deslizamiento (Acciones mayoradas)

ϕ (TABLA)	35,00	
$\phi_d = (2/3) \cdot \phi$	23,33	
$\text{tg}\phi_d$	0,43	
$V = (F_{vcolA} + F_{vcA}) \cdot C_S$	3156,49	N

$$C_{sd} = (N \cdot \text{tg}\phi_d) / V \qquad 131,43$$

$$C_{sd} \geq 1,5 \checkmark$$

Seguridad al vuelco (Acciones sin mayorar, estabilizadoras)

$$C_{sv} = [N \cdot (a/2)] / M \qquad 2,84$$

$$C_{sv} \geq 1,5 \checkmark$$

Por lo tanto,

Dimensiones finales de la zapata	
a (lado de la zapata) =	475,00 cm
h (profundidad o altura de la zapata) =	150,00 cm

Configuración 2: Grúa con contrapeso**DIMENSIONAMIENTO DE LA ZAPATA**

h (profundidad o altura de la zapata) < 3 m (Cimentación superficial)	150,00	cm
ρ_H (densidad del hormigón armado)	2500,00	kg/m ³

Pesos propios

	kg		
Q_{plu} (peso propio de la pluma)	1037,00	10172,97	N
$Q_{plu'}$ (peso propio de la contrapluma)	671,00	6582,51	N
Q_{col} (peso propio de la columna)	1061,84	10416,65	N
Q_u (carga útil + accesorios)	8250,00	80932,50	N
Q_{mg} (peso del mecanismo de giro)	830,00	8142,30	N
Q_{met} (peso del polipasto)	700,00	6867,00	N
Q_{con} (peso del contrapeso)	7000,00	68670,00	N
Q_z (peso propio zapata)	Variable (depende de a)	Variable (depende de a)	N

En servicio sin viento

		d (distancia en m)		
Q_{plu} (peso propio de la pluma)	$L'_{plu}/2$	4,25	10172,97	N
$Q_{plu'}$ (peso propio de la contrapluma)	L'_{con}	2,75	6582,51	N
Q_u (carga útil + accesorios)	L_{plu}	8,00	80932,50	N
Q_{met} (peso del polipasto)	L_{plu}	8,00	6867,00	N
Q_{con} (peso propio del contrapeso)	L_{con}	4,90	68670,00	N

γ_s	1,06
$C_d = \Psi$ (coeficiente dinámico)	1,02
C_s	1,50

R = N =

$$[C_d \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{con} + Q_{mg} + Q_{col} + 2 \cdot Q_{plu} + 2 \cdot Q_{plu'}] + Q_z$$

Variable (depende de Q_z)

N

$$M = [(C_d \cdot L_{plu} \cdot (Q_u + Q_{met}) + 2 \cdot Q_{plu} \cdot (L'_{plu}/2)) - (Q_{con} \cdot L_{con} + 2 \cdot Q_{plu'} \cdot L'_{con})] \cdot \gamma_s \cdot C_s$$

688.528,74

N·m

a (cm)	$Q_z = \text{Vol}_z \cdot \rho_H$ (kg)	R (kg)	x = M/R (cm)	P_I (kg/cm ²)	P_{II}	P_{III}	P_{IV}
360,00	48.600,00	60.693,64	115,64	1,37	1,75	1,75	3,04
365,00	49.959,38	62.053,02	113,11	1,33	1,63	1,69	2,69
370,00	51.337,50	63.431,14	110,65	1,29	1,54	1,64	2,42
375,00	52.734,38	64.828,02	108,27	1,26	1,45	1,59	2,20
380,00	54.150,00	66.243,64	105,95	1,23	1,38	1,55	2,03
385,00	55.584,38	67.678,02	103,71	1,19	1,32	1,50	1,89
390,00	57.037,50	69.131,14	101,53	1,16	1,26	1,46	1,77
395,00	58.509,38	70.603,02	99,41	1,14	1,21	1,42	1,66
400,00	60.000,00	72.093,64	97,35	1,11	1,17	1,38	1,57
405,00	61.509,38	73.603,02	95,36	1,08	1,13	1,35	1,50
$P_{\min} \leq 2$	1,89						kg/cm²
$a_{\min} =$	385,00						cm

En servicio con viento

		d (distancia en m)		
Q_{plu} (peso propio de la pluma)	$L'_{plu}/2$	4,25	10172,97	N
$Q_{plu'}$ (peso propio de la contrapluma)	L'_{con}	2,75	6582,51	N
Q_u (carga útil + accesorios)	L_{plu}	8,00	80932,50	N
Q_{met} (peso del polipasto)	L_{plu}	8,00	6867,00	N
Q_{con} (peso propio del contrapeso)	L_{con}	4,90	68670,00	N
γ_s	1,06			
$C_d = \Psi$ (coeficiente dinámico)	1,02			
C_s	1,33			

$R = N = [C_d \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{con} + Q_{mg} + Q_{col} + 2 \cdot Q_{plu} + 2 \cdot Q_{plu'}] + Q_z$	Variable (depende de Q_z)	N
F_{vcolA}	1098,48	N
$L_{col}/2$	3,25	m
F_{vconA}	858,38	N

$L_1 = d_{col-con}$	6,35	m
F_{vcA}	981,00	N
$L_2 = d_{col-c}$	6,00	m
$M_{vA} =$ $F_{vcolA} \cdot (L_{col}/2) + F_{vconA} \cdot L_1$ $+ F_{vcA} \cdot L_2$	14.906,77	N·m
$M =$ $[((C_d \cdot L_{plu} \cdot (Q_u + Q_{met}) + 2$ $\cdot Q_{plu} \cdot (L'_{plu}/2) -$ $(Q_{con} \cdot L_{con} + 2 \cdot Q_{plu} \cdot L'_{con}$ $)) \cdot \gamma_s + M_{vA}] \cdot C_s$	630.321,49	N·m

a (cm)	$Q_z =$		x = M/R (cm)	P_I (kg/cm ²)	P_{II}	P_{III}	P_{IV}
	$Vol_z \cdot \rho_H$ (kg)	R (kg)					
360,00	48.600,00	60.693,64	105,86	1,29	1,52	1,64	2,34
365,00	49.959,38	62.053,02	103,55	1,26	1,44	1,59	2,14
370,00	51.337,50	63.431,14	101,30	1,22	1,37	1,54	1,98
375,00	52.734,38	64.828,02	99,11	1,19	1,30	1,50	1,84
380,00	54.150,00	66.243,64	96,99	1,16	1,25	1,45	1,72
385,00	55.584,38	67.678,02	94,94	1,13	1,20	1,41	1,63
390,00	57.037,50	69.131,14	92,94	1,10	1,16	1,38	1,54
395,00	58.509,38	70.603,02	91,01	1,08	1,12	1,34	1,47
400,00	60.000,00	72.093,64	89,12	1,05	1,08	1,30	1,40
405,00	61.509,38	73.603,02	87,30	1,03	1,05	1,27	1,35
$P_{min} \leq 2$	1,98			kg/cm²			
$a_{min} =$	370,00			cm			

Fuera de servicio

		d (distancia en m)		
Q_{plu} (peso propio de la pluma)	$L_{plu}/2$	4,25	10172,97	N
$Q_{plu'}$ (peso propio de la contrapluma)	L'_{con}	2,75	6582,51	N
Q_{met} (peso del polipasto)	L_{plu}	8,00	6867,00	N
Q_{con} (peso propio del contrapeso)	L_{con}	4,90	68670,00	N
γ_s	1,06			
$C_d = \Psi$ (coeficiente dinámico)	1,02			

C_S	1,10	
R = N =		
$[Q_{met}+Q_{con}+Q_{mg}+Q_{col}+2\cdot Q_{plu}+2\cdot Q_{plu'}]+Q_z$	Variable (depende de Q_z)	N
F_{vcolB}	3515,15	N
$L_{col}/2$	3,25	m
F_{vconB}	2746,80	N
$L = d_{col-con}$	6,35	m
$M_{vB} = F_{vcolB}\cdot(L_{col}/2)+F_{vconB}\cdot L$	28.866,42	N·m
M =		
$[((Q_{met}\cdot L_{plu}+2\cdot Q_{plu'}\cdot(L'_{plu}/2))- (Q_{con}\cdot L_{con}+2\cdot Q_{plu'}\cdot L'_{con}))\cdot \gamma_S+M_{vB}]\cdot C_S$	237.920,07	N·m

a (cm)	$Q_z =$		x = M/R (cm)	P_I (kg/cm ²)	P_{II}	P_{III}	P_{IV}
	Volz· ρ_H (kg)	R (kg)					
360,00	48.600,00	60.693,64	39,96	0,78	0,80	0,91	0,92
365,00	49.959,38	62.053,02	39,08	0,77	0,79	0,89	0,90
370,00	51.337,50	63.431,14	38,23	0,75	0,78	0,87	0,88
375,00	52.734,38	64.828,02	37,41	0,74	0,77	0,85	0,87
380,00	54.150,00	66.243,64	36,61	0,72	0,76	0,83	0,86
385,00	55.584,38	67.678,02	35,84	0,71	0,75	0,82	0,84
390,00	57.037,50	69.131,14	35,08	0,70	0,74	0,80	0,83
395,00	58.509,38	70.603,02	34,35	0,69	0,73	0,79	0,82
400,00	60.000,00	72.093,64	33,64	0,68	0,72	0,77	0,81
405,00	61.509,38	73.603,02	32,95	0,67	0,71	0,76	0,80
$P_{\min} \leq 2$	Todas						kg/cm ²
a _{mín} =	Cualquiera						cm

Dimensiones de la zapata		
a (lado de la zapata) =	385,00	cm
h (profundidad o altura de la zapata) =	150,00	cm

COMPROBACIONES EN EL DISEÑO DE LA ZAPATA

Instrucción EHE sobre zapatas rígidas

Comprobación del vuelo máximo

a	385,00	cm
h	150,00	cm
D (diámetro columna)	111,00	cm

$$v_{\text{máx}} = (a-D)/2 \quad 137,00 \quad \text{cm}$$

$$0,5 \cdot h \quad 75,00 \quad \text{cm}$$

$$2 \cdot h \quad 300,00 \quad \text{cm}$$

Como $0,5 \cdot h < v_{\text{máx}} < 2 \cdot h \Rightarrow$ Zapata rígida**Acciones**Se calcula para la situación más desfavorable \Rightarrow En servicio sin viento

$$Q_Z = Vol_Z \cdot \rho_H \quad 545.282,72 \quad \text{N}$$

MAYORADAS

$$N = [C_d \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + Q_{\text{con}} + Q_{\text{mg}} + Q_{\text{col}} + 2 \cdot Q_{\text{plu}} + 2 \cdot Q_{\text{plu}'}] + Q_Z \quad 755.929,32 \quad \text{N}$$

$$M = [(C_d \cdot L_{\text{plu}} \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + 2 \cdot Q_{\text{plu}} \cdot (L'_{\text{plu}}/2)) - (Q_{\text{con}} \cdot L_{\text{con}} + 2 \cdot Q_{\text{plu}'} \cdot L'_{\text{con}})] \cdot \gamma_S \cdot C_s \quad 688.528,74 \quad \text{N} \cdot \text{m}$$

SIN MAYORAR

$$N = [C_d \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + Q_{\text{con}} + Q_{\text{mg}} + Q_{\text{col}} + 2 \cdot Q_{\text{plu}} + 2 \cdot Q_{\text{plu}'}] + Q_Z \quad 755.929,32 \quad \text{N}$$

$$M = (C_d \cdot L_{\text{plu}} \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + 2 \cdot Q_{\text{plu}} \cdot (L'_{\text{plu}}/2)) - (Q_{\text{con}} \cdot L_{\text{con}} + 2 \cdot Q_{\text{plu}'} \cdot L'_{\text{con}}) \quad 433.036,94 \quad \text{N} \cdot \text{m}$$

Comprobación de la estabilidad estructural

Seguridad frente al hundimiento (Acciones mayoradas)

$$e = M/N \quad 0,91 \quad \text{m}$$

$$a/6 \quad 0,64 \quad \text{m}$$

Como $e > a/6 \Rightarrow$ Distribución TRIANGULAR de tensiones

$$AX = (3 \cdot a)/2 - 3 \cdot e \quad 3,04 \quad \text{m}$$

$$\sigma = (4N)/(3 \cdot ((a-2 \cdot e) \cdot a)) \quad 129,07 \quad \text{KN/m}^2$$

$$\sigma_{\text{adm}} \quad 300,00 \quad \text{KN/m}^2$$

$$1,25 \cdot \sigma_{adm} \quad 375,00 \quad \text{KN/m}^2$$

$$\sigma \leq 1,25 \cdot \sigma_{adm} \quad \checkmark$$

Seguridad frente al deslizamiento (Acciones mayoradas)

ϕ (TABLA)	35,00	
$\phi_d = (2/3) \cdot \phi$	23,33	
$\text{tg}\phi_d$	0,43	
$V = (F_{vcolA} + F_{vconA} + F_{vcA}) \cdot C_S$	3907,35	N

$$C_{sd} = (N \cdot \text{tg}\phi_d) / V \quad \mathbf{83,45}$$

$$C_{sd} \geq 1,5 \quad \checkmark$$

Seguridad al vuelco (Acciones sin mayorar, estabilizadoras)

$$C_{sv} = [N \cdot (a/2)] / M \quad \mathbf{3,36}$$

$$C_{sv} \geq 1,5$$

Por lo tanto,

Dimensiones finales de la zapata		
a (lado de la zapata) =	385,00	cm
h (profundidad o altura de la zapata) =	150,00	cm

3.3.7.2. Anclaje de la columna de la grúa

El pilar o columna transmite las cargas al terreno a través de un macizo o zapata de hormigón, en este caso, armado. Como las tensiones de trabajo del hormigón de cimientos, en torno a los 50 kg/cm^2 , son muy inferiores a las del acero, alrededor de los 1400 kg/cm^2 , es necesario realizar el asiento por medio de placas, con rigidez suficiente (conseguida generalmente con cartelas) para repartir las cargas, de manera que la presión sobre el hormigón no rebase el valor admisible.

Para unir la columna con la zapata de cimentación se pueden utilizar varios sistemas:

- a) Dejar en la zapata una placa anclada al hormigón mediante redondos de acero ordinario soldados a ella. A esta placa se suelda directamente la placa de la base del pilar, con cordones de ángulo.

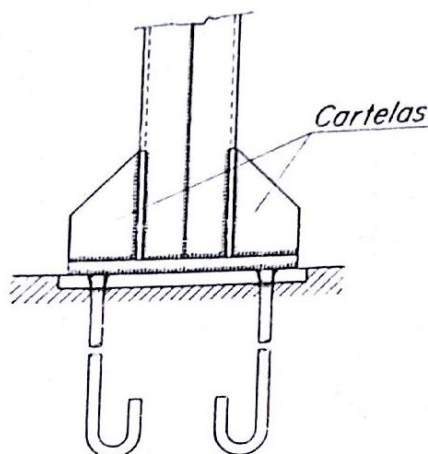


Figura 41. Placa anclada al hormigón mediante redondos.

- b) La unión con la zapata se efectúa mediante pernos de anclaje, generalmente de redondo ordinario terrajado, con sus correspondientes tuercas embebidos en el hormigón; descansando, provisionalmente, el pilar con su placa de asiento incorporada sobre las tuercas. Una vez aplomado y nivelado el pilar, desplazando adecuadamente las tuercas situadas bajo la placa de asiento, se vierte una capa de 5 a 10 cm de mortero de cemento, ejecutado con arena fina, para cuya compactación se deja en la placa de asiento taladros de unos 50 mm de diámetro. La columna se fija a la zapata apretando las tuercas de los anclajes.

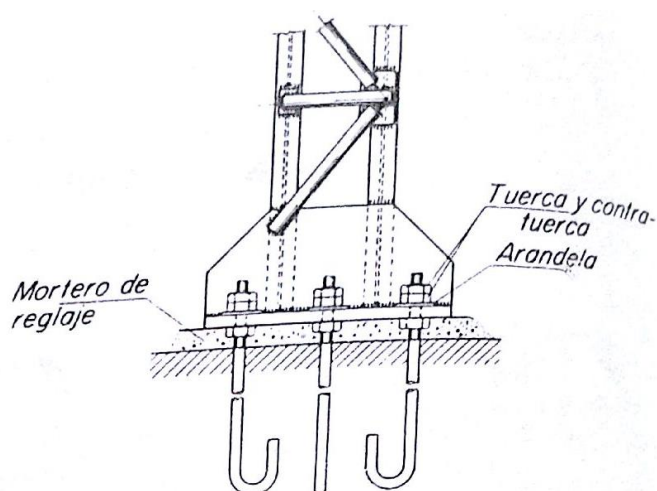


Figura 42. Unión mediante pernos de anclaje.

Una vez efectuado el montaje de la estructura, se inmovilizan los anclajes, por picado de rosca, punto de soldadura o cualquier otro sistema adecuado.

De ambos métodos, es más aconsejable el segundo, pues en éste, la chapa anclada en el hormigón es difícil que quede perfectamente nivelada y es preciso disponer entre ésta y la del pilar, calzos o cuñas complementarias. Por tanto, la unión de la columna con la zapata se llevará a cabo mediante pernos de anclaje.

Si las solicitaciones son muy importantes, o la presión admisible sobre el cimiento es pequeña, no son suficientes las cartelas para rigidizar la placa de asiento, siendo necesario algún otro tipo de refuerzo.

Para realizar estos cálculos se ha empleado el método descrito en el libro *La estructura metálica hoy*, Tomo I, Volumen I, de R. Argüelles.

Placa de anclaje

Consideraciones generales

Para el cálculo del hormigón y acero de la zapata se adoptan las solicitaciones de servicio mayoradas, y las resistencias de los mismos minoradas.

Se considerará una placa de anclaje cuadrada.

Para los pernos de anclaje, se utilizará un acero B 500 S con una resistencia característica de $f_{yd} = 500$ MPa, siendo su resistencia de cálculo:

$$\sigma_{adma} = f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s$$

Acciones sobre la placa de anclaje

Para dimensionar la placa de anclaje de la grúa se considerarán las solicitaciones de la zapata.

Las acciones para el cálculo de la placa se cogerán de la hipótesis de carga más desfavorable.

Como se ha visto anteriormente, las solicitaciones de la zapata para la situación más desfavorable (grúa en servicio sin viento) son:

Para el caso de grúa sin contrapeso:

$$\text{Esfuerzo axial, } N = R_C = [C_d \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{col} + Q_{plu} + Q_{mg}] + Q_z$$

$$\text{Momento de vuelco, } M = M_C = [C_d \cdot L_{plu} \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{plu} \cdot (L'_{plu}/2)] \cdot \gamma_s \cdot C_s$$

Para el caso de grúa con contrapeso:

$$\text{Esfuerzo axial, } N = R_C = C_d \cdot (Q_u + Q_{met}) + Q_{con} + Q_{mg} + Q_{col} + 2 \cdot Q_{plu} + 2 \cdot Q_{plu}'$$

$$\text{Momento de vuelco, } M = M_C = [(C_d \cdot L_{plu} \cdot (Q_u + Q_{met}) + 2 \cdot Q_{plu} \cdot (L'_{plu}/2)) - (Q_{con} \cdot L_{con} + 2 \cdot Q_{plu}' \cdot L'_{con})] \cdot \gamma_s \cdot C_s$$

Cálculo de las dimensiones de la placa

Las dimensiones de la placa de asiento son función de la solicitación que transmite el pilar o columna y de la tensión admisible del hormigón de la zapata.

Sobre la sección de arranque de la columna actúa un momento flector M y una fuerza axial N . La placa de asiento ha de tener unas dimensiones tales que, supuesta una hipótesis de reparto de presiones, éstas no superen la tensión admisible del hormigón.

Si la excentricidad de la carga es tal, que se sitúa dentro del núcleo central de la placa de asiento, los anclajes no soportan ninguna sollicitación de tracción, lo que hace su presencia innecesaria; no obstante, por razones constructivas, siempre se deben disponer.

Para predimensionar el lado de la placa se toma normalmente, por buena práctica constructiva, un vuelo de la placa de entre 100 y 200 mm.

En este caso, como la placa es cuadrada:

$$a = b = a' + 2 \cdot b'$$

Siendo, a' el diámetro de la columna y b' el vuelo de la placa.

A continuación, se debe comprobar que la placa no transmite a la zapata una presión o tensión mayor que la que el hormigón puede soportar.

A tal efecto, se calcula en primer lugar la excentricidad de los esfuerzos en la base del pilar. Esto dará una idea del tipo de distribución de esfuerzos que se puede asemejar el caso a estudio.

La excentricidad será entonces:

$$e = M/N$$

Como se muestra más adelante en los cálculos, $e > a/2$, significa que la resultante se sale fuera de la placa. Como el descentramiento o excentricidad es grande, se admite una ley de repartición uniforme en una zona (como se indica en la figura 43) cerca del borde comprimido, de valor σ_c^* , cuya amplitud será la cuarta parte de la placa. Esta hipótesis está permitida por la norma, pudiéndose aplicar a casos de estructuras con fuerte excentricidad.

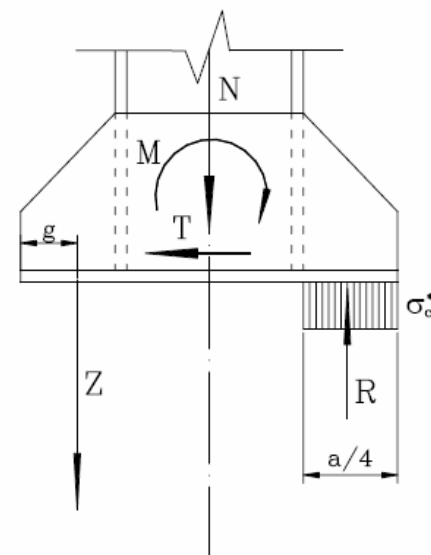


Figura 43. Ley de repartición uniforme en una zona de la placa.

Para que las medidas del predimensionamiento sean válidas, se habrá de cumplir:

$$\sigma_c^* \leq \sigma_{admh} = f_{cd}$$

Para la determinación de la tensión aplicada sobre el hormigón, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma_c^* = \frac{N^* \cdot \left(e + \frac{a}{2} - g \right)}{\frac{a}{4} \cdot b \cdot \left(7 \cdot \frac{a}{8} - g \right)}$$

Donde:

M^* = momento flector mayorado.

N^* = axial mayorado.

a = longitud mayor de la placa.

b = longitud menor de la placa (en este caso, al tratarse de una placa cuadrada, $b = a$).

g = distancia al extremo próximo de la placa de los anclajes ($g = 0,15 \cdot a$).

Las acciones mayoradas serán las siguientes (combinación más desfavorable):

Para el caso de grúa sin contrapeso:

$$\text{Esfuerzo axial, } N = R_C = [C_d \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + Q_{\text{col}} + Q_{\text{plu}} + Q_{\text{mg}}] + Q_z$$

$$\text{Momento de vuelco, } M = M_C = [C_d \cdot L_{\text{plu}} \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + Q_{\text{plu}} \cdot (L'_{\text{plu}}/2)] \cdot \gamma_s \cdot C_s$$

Para el caso de grúa con contrapeso:

$$\text{Esfuerzo axial, } N = R_C = C_d \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + Q_{\text{con}} + Q_{\text{mg}} + Q_{\text{col}} + 2 \cdot Q_{\text{plu}} + 2 \cdot Q_{\text{plu}}'$$

$$\text{Momento de vuelco, } M = M_C = [(C_d \cdot L_{\text{plu}} \cdot (Q_u + Q_{\text{met}}) + 2 \cdot Q_{\text{plu}} \cdot (L'_{\text{plu}}/2)) - (Q_{\text{con}} \cdot L_{\text{con}} + 2 \cdot Q_{\text{plu}}' \cdot L'_{\text{con}})] \cdot \gamma_s \cdot C_s$$

Cálculo del espesor de la placa de anclaje

El espesor de la placa de asiento t debe ser el necesario para resistir la presión σ_c^* , suponiendo que la placa está perfectamente apoyada en las cartelas, o elementos de rigidez que se dispongan. Así, el espesor t se fija fraccionando la placa en rebanadas de 1 cm de ancho y suponiendo que cada una de estas rebanadas se comporta como una viga cuyos apoyos coinciden con las cartelas.

Por tanto, se supondrá que la viga está apoyada sobre las cartelas y con esto, se calculará el espesor mínimo para la placa. Los cálculos se harán por trozos de 1cm y se calcularán los momentos máximos, tanto en el voladizo como en el vano.

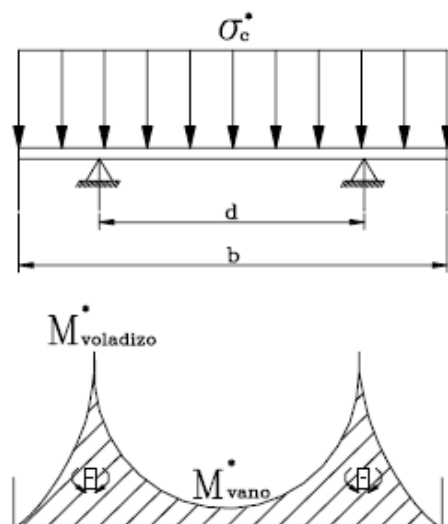


Figura 44. Aproximación viga apoyada sobre cartelas.

El momento máximo en el vano será cuando el corte se haga en el medio y tenga dos apoyos:

$$M_{\text{vano}}^* = \frac{b \cdot (2d - b)}{8} \cdot \sigma_c^*$$

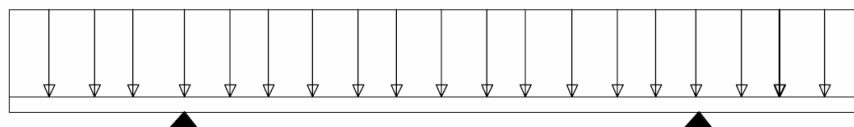


Figura 45. Momento máximo en el vano.

El momento máximo en el voladizo será cuando el corte sea tangente a la columna y solo tenga una cartela en el medio, por lo tanto, un solo apoyo:

$$M_{\text{voladizo}}^* = \frac{(b-d)^2}{8} \cdot \sigma_c^*$$

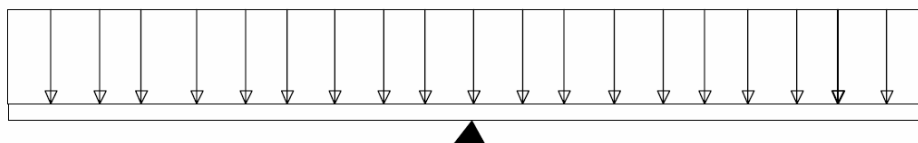


Figura 46. Momento máximo en el voladizo.

Se cogerá el mayor valor de los dos, debiendo cumplirse que la tensión de la placa debida al momento flector sea menor que el límite de fluencia del acero.

$$\sigma^* = \frac{M_{\text{voladizo}}^* \cdot y}{I_{LN}}$$

Siendo:

$y = t/2$ (distancia desde la línea neutra hasta la fibra más traccionada o comprimida).

$I_{LN} = b \cdot t^3/12 = t^3/12$ (momento de inercia respecto a la línea neutra).

Por lo que,

$$\sigma^* = \frac{6 \cdot M_{\text{voladizo}}^*}{1 \cdot t^2} \leq \sigma_f$$

siendo σ_f = tensión de fluencia del material de la placa.

Y despejando el espesor:

$$t = \sqrt{\frac{6 \cdot M_{\text{voladizo}}^*}{\sigma_f}}$$

Pernos de anclaje

1. Diámetro de los pernos

La función de los pernos es aguantar las tracciones que produce el momento de la zapata fijando la placa de anclaje al hormigón.

El esfuerzo de tracción total a resistir por los anclajes viene dado por la ecuación:

$$Z = -N^* + \frac{[M^* + N^* \cdot (0,5 \cdot a - g)]}{0,875 \cdot a - g}$$

En este caso, habrá que introducir el valor de las acciones mayoradas para la situación más desfavorable, es decir, con la grúa en servicio y sin viento.

La sollicitación a la tracción de cada perno tendrá que ser menor que dicha sollicitación, esto es:

$$Z \leq 0,8 \cdot n \cdot \sigma_t \cdot A_t$$

Donde :

n = número de pernos sollicitados a tracción.

σ_t = resistencia de cálculo del tornillo o perno.

A_t = área resistente del tornillo o perno.

Se colocarán un total de ocho pernos en la placa de anclaje, con lo cual, dependiendo del sentido de las acciones, solo cuatro de ellos podrían soportar tracciones.

Por tanto, al área resistente de cada tornillo será:

$$A_t \geq Z / (0,8 \cdot n \cdot \sigma_t)$$

Con el valor de esta área se buscará en la tabla 24 un tornillo cuyo valor de área resistente sea inmediatamente superior.

Diámetro mayor nominal d_r mm	Serie de paso grueso		Serie de paso fino			
	Paso p_r mm	Área de esfuerzo de tensión A_r , mm ²	Área del diámetro menor A_r , mm ²	Paso p_r mm	Área de esfuerzo de tensión A_r , mm ²	Área del diámetro menor A_r , mm ²
1.6	0.35	1.27	1.07			
2	0.40	2.07	1.79			
2.5	0.45	3.39	2.98			
3	0.5	5.03	4.47			
3.5	0.6	6.78	6.00			
4	0.7	8.78	7.75			
5	0.8	14.2	12.7			
6	1	20.1	17.9			
8	1.25	36.6	32.8	1	39.2	36.0
10	1.5	58.0	52.3	1.25	61.2	56.3
12	1.75	84.3	76.3	1.25	92.1	86.0
14	2	115	104	1.5	125	116
16	2	157	144	1.5	167	157
20	2.5	245	225	1.5	272	259
24	3	353	324	2	384	365
30	3.5	561	519	2	621	596
36	4	817	759	2	915	884
42	4.5	1 120	1 050	2	1 260	1 230
48	5	1 470	1 380	2	1 670	1 630
56	5.5	2 030	1 910	2	2 300	2 250
64	6	2 680	2 520	2	3 030	2 980
72	6	3 460	3 280	2	3 860	3 800
80	6	4 340	4 140	1.5	4 850	4 800
90	6	5 590	5 360	2	6 100	6 020
100	6	6 990	6 740	2	7 560	7 470
110				2	9 180	9 080

*Las ecuaciones y los datos utilizados para elaborar esta tabla se obtuvieron de la norma ANSI B1.1-1974 y B18.3.1-1978. El diámetro menor se determinó mediante la ecuación $d_s = d - 1.226 869p_r$, y el diámetro de paso a partir de $d_p = d - 0.649 519p_r$. La media del diámetro de paso y el diámetro menor se usaron para calcular el área de esfuerzo de tensión.

Tabla 24. Diámetros y áreas de roscas métricas de paso grueso y fino.

2. Longitud de anclaje del perno

Este cálculo se realizará según lo expuesto en la Instrucción EHE, en lo relativo a barras corrugadas.

Los posibles diámetros de las barras corrugadas serán los definidos en la serie siguiente, de acuerdo con la tabla 6 de la UNE-EN 10080:

6-8-10-12-14-16-20-25-32 y 40 mm

Salvo en el caso de mallas electrosoldadas o armaduras básicas electrosoldadas en celosía, se procurará evitar el empleo del diámetro de 6 mm cuando se aplique cualquier proceso de soldadura, resistente o no resistente, en la elaboración o montaje de la armadura pasiva.

Tipo de acero		Acero soldable		Acero soldable con características especiales de ductilidad	
Designación		B 400 S	B 500 S	B 400 SD	B 500 SD
Limite elástico, f_y (N/mm ²) ⁽¹⁾		≥ 400	≥ 500	≥ 400	≥ 500
Carga unitaria de rotura, f_t (N/mm ²) ⁽¹⁾		≥ 440	≥ 550	≥ 480	≥ 575
Alargamiento de rotura, $\epsilon_{u,2}$ (%)		≥ 14	≥ 12	≥ 20	≥ 18
Alargamiento total bajo carga máxima, $\epsilon_{máx}$ (%)	Acero suministrado en barra	≥ 5,0	≥ 5,0	≥ 7,5	≥ 7,5
	Acero suministrado en rollo ⁽²⁾	≥ 7,5	≥ 7,5	≥ 10,0	≥ 10,0
Relación f_t/f_y ⁽²⁾		≥ 1,05	≥ 1,05	$1,20 \leq f_t/f_y \leq 1,35$	$1,15 \leq f_t/f_y \leq 1,35$
Relación $f_{y,real}/f_{y,nominal}$		—	—	≤ 1,20	≤ 1,25

⁽¹⁾ Para el cálculo de los valores unitarios se utilizará la sección nominal.

⁽²⁾ Relación admisible entre la carga unitaria de rotura y el límite elástico obtenidos en cada ensayo.

⁽³⁾ En el caso de aceros corrugados procedentes de suministros en rollo, los resultados pueden verse afectados por el método de preparación de la muestra para su ensayo, que deberá hacerse conforme a lo indicado en el Anexo 23. Considerando la incertidumbre que puede conllevar dicho procedimiento, pueden aceptarse aceros que presenten valores característicos de $\epsilon_{máx}$ que sean inferiores en un 0,5% a los que recoge la tabla para estos casos.

Tabla 25. Tipos de acero corrugado.

Las longitudes básicas de anclaje dependen, entre otros factores, de la posición que ocupa la barra en la cimentación. En este caso en concreto, la barra ocupa una posición, de adherencia buena, para las armaduras que durante el hormigonado forman con la horizontal un ángulo comprendido entre 45° y 90° o, que en el caso de formar un ángulo inferior a 45°, están situadas en la mitad inferior de la sección o a una distancia igual o mayor a 30 cm de la cara superior de una capa de hormigonado (posición I).

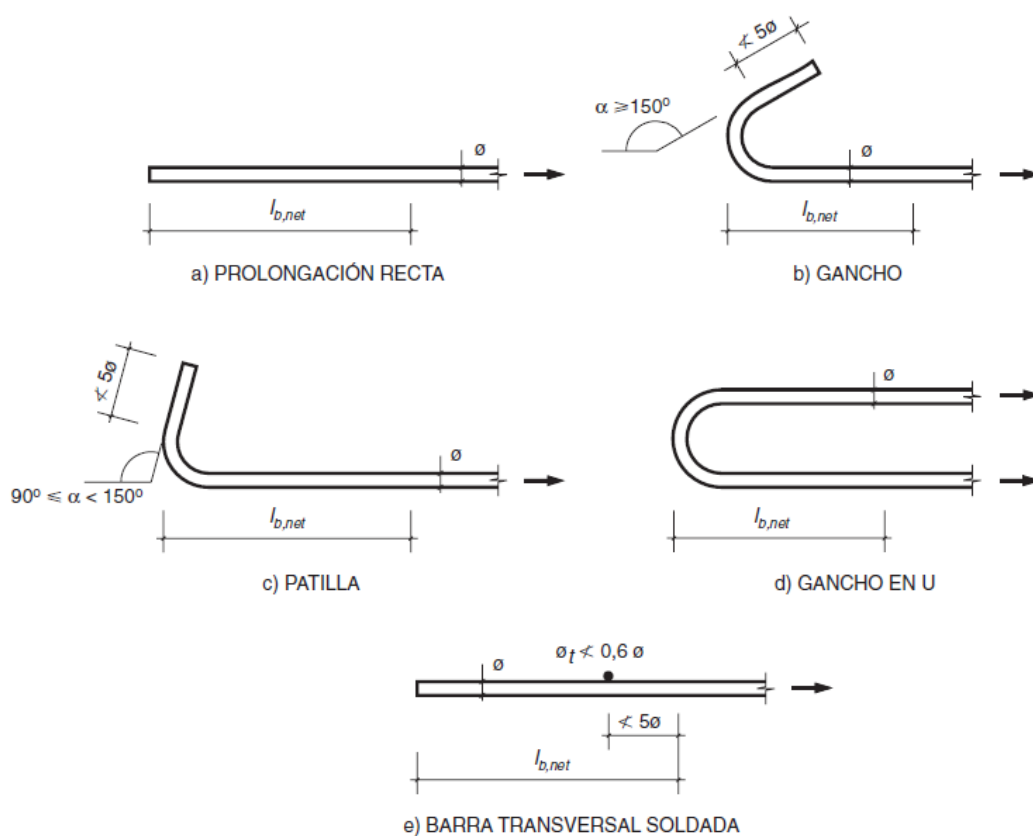


Figura 47. Longitud de anclaje perno.

Por lo tanto, la expresión de la longitud básica de anclaje es:

$$l_b = m \cdot \phi^2 \geq (f_{yk}/20) \cdot \phi$$

Donde:

Φ = diámetro de la barra en mm.

f_{yk} = límite elástico del acero en N/mm^2 .

m = coeficiente numérico dado por la tabla de la EHE (ver tabla 26). Se obtiene a partir de ensayos de adherencia de barras en hormigón. Viene ordenado en función del tipo de acero.

Resistencia característica del hormigón (N/mm ²)	m	
	B 400 S B 400 SD	B 500 S B 500 SD
25	1,2	1,5
30	1,0	1,3
35	0,9	1,2
40	0,8	1,1
45	0,7	1,0
≥ 50	0,7	1,0

Tabla 26. Coeficientes m.

La longitud neta de anclaje se define como:

$$l_{b\text{neto}} = l_b \cdot \beta \cdot (A_S / A_{S\text{real}})$$

Donde:

β = factor de reducción definido en la tabla 27.

Tipo de anclaje	Tracción	Compresión
Prolongación recta	- 1	1
Patilla, gancho y gancho en U	0,7 (*)	1
Barra transversal soldada	0,7	0,7

(*) Si el recubrimiento de hormigón perpendicular al plano de doblado es superior a 3ϕ . En caso contrario $\beta = 1$.

Tabla 27. Valores de β .

A_S = área de la sección de la armadura a tracción.

$A_{S\text{real}}$ = área real del acero.

El área de la armadura a tracción es el área resistente de todos los tornillos que están trabajando a tracción, esto es:

$$A_S = n \cdot A_t$$

La sección real del acero vendrá dada por:

$$A_{\text{sreal}} = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} \cdot n$$

Según la EHE, la longitud neta de anclaje definida no puede adoptar valores inferiores al mayor de los tres siguientes:

- a) $10 \cdot \Phi$
- b) 15 cm
- c) la tercera parte de la longitud básica de anclaje para barras traccionadas y dos tercios de dicha longitud para barras comprimidas.

*Resolución de cálculos sistema de anclaje***Configuración 1: Grúa sin contrapeso****ANCLAJE DE LA COLUMNA****Dimensionamiento placa de anclaje (cuadrada)****Acciones sobre la placa (mayoradas)**

N =	961.759,70	N
M =	1.280.627,44	N·m

Hormigón

f_{ck} (HA-25)	25,00	N/mm ²
γ_c	1,50	

$\sigma_{admh} = f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c$	16,67	N/mm ²
--	-------	-------------------

Cálculo de las dimensiones de la placa

v_{placa} (100 mm < v < 200 mm)	150,00	mm
$a' = D_{col}$	1428,00	mm
$b' = v_{placa}$	150,00	mm

$a_1 = b_1 = a' + 2 \cdot b'$	1728,00	mm
-------------------------------	---------	----

$e = M/N$ (excentricidad)	1331,55	mm
---------------------------	---------	----

$a_1/2$	864,00	mm
---------	--------	----

$$e > a_1/2$$

 γ_f (coeficiente de mayoración de acciones)

1,50

$N^* = N \cdot \gamma_f$	1.442.639,55	N
$M^* = M \cdot \gamma_f$	1.920.941,16	N·m
$g = 0,15 \cdot a_1$	259,20	mm

$\sigma_c^* = [N^* \cdot (e + 0,5 \cdot a_1 - g)] / [0,25 \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot (0,875 \cdot a_1 - g)]$	2,90	N/mm²
	29,59	kg/cm ²

$$\sigma_c^* \leq f_{cd} \quad \checkmark$$

Cálculo del espesor de la placa

$b_1 = a_1$	172,80	cm
d (diámetro columna)	142,80	cm

$M^*_{\text{voladizo}} = (b_1 - d)^2 / 8 \cdot \sigma_c^*$	3328,48	kg·cm
--	---------	-------

$M^*_{\text{voladizo}} = b_1 \cdot (2d - b_1) / 8 \cdot \sigma_c^*$	72086,90	kg·cm
---	----------	-------

MAYOR	72086,90	kg·cm
-------	----------	-------

σ_f (límite de fluencia del acero)	2600,00	kg·cm
---	----------------	-------

t (espesor)	12,90	cm
--------------------	--------------	-----------

Pernos de anclaje

Diámetro de los pernos

N^*	1.442.639,55	N
-------	--------------	---

M^*	1.920.941,16	N·m
-------	--------------	-----

a_1	1728,00	mm
-------	---------	----

g	150,00	mm
-----	--------	----

$Z = -N^* + [(M^* + N^* \cdot (0,5 \cdot a_1 - g)) / (0,875 \cdot a_1 - g)]$	724.016,69	N
--	-------------------	----------

Acero

f_{yk} (B500S)	500,00	N/mm²
------------------	---------------	-------------------------

γ_s	1,15	
------------	-------------	--

$\sigma_{adma} = f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$	434,78	N/mm²
--	---------------	-------------------------

Si se colocan 8 pernos, y suponiendo que según la posición solo 4 de ellos soportan tracción

n	4,00	pernos a tracción
-----	-------------	-------------------

$A_t \geq Z / (0,8 \cdot n \cdot \sigma_t)$	520,39	mm ²
---	--------	-----------------

Se busca un tornillo cuyo área resistente sea inmediatamente superior

A_t (TABLA)	561,00	mm^2
Tornillo M (TABLA)	30,00	mm

Longitud de anclaje

Posición I

m (TABLA)	1,50	
ϕ (diámetro de la barra)	32,00	mm
f_{yk}	500,00	N/mm^2

$l_b = m \cdot \phi^2$	1536,00	mm
------------------------	---------	----

$f_{yk} \cdot \phi / 20$	800,00	mm
--------------------------	--------	----

$$f_{yk} \cdot \phi / 20 \leq l_b \checkmark$$

n =	4,00	pernos a tracción
-----	------	-------------------

$A_t =$	5,61	cm^2
---------	------	---------------

β (TABLA)	0,70	
-----------------	------	--

$A_s = n \cdot A_t$	22,44	cm^2
---------------------	-------	---------------

$A_{sreal} = (\pi \cdot \phi^2 \cdot n) / 4$	32,17	cm^2
--	-------	---------------

$l_{bneto} = l_b \cdot \beta \cdot A_s / A_{sreal}$	75,00	cm
---	-------	----

$10 \cdot \phi$	32,00	cm
-----------------	-------	----

15,00	15,00	cm
-------	-------	----

$l_b / 3$	51,20	cm
-----------	-------	----

MAYOR	51,20	cm
-------	-------	----

$$l_{bneto} \geq 51,20 \text{ cm } \checkmark$$

Configuración 2: Grúa con contrapeso**ANCLAJE DE LA COLUMNA****Dimensionamiento placa de anclaje (cuadrada)****Acciones sobre la placa (mayoradas)**

N =	755.929,32	N
M =	688.528,74	N·m

Hormigón

f_{ck} (HA-25)	25,00	N/mm ²
γ_c	1,50	

$\sigma_{admh} = f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c$	16,67	N/mm ²
--	-------	-------------------

Cálculo de las dimensiones de la placa

v_{placa} (100 mm < v < 200 mm)	150,00	mm
$a' = D_{col}$	1110,00	mm
$b' = v_{placa}$	150,00	mm
$a_1 = b_1 = a' + 2 \cdot b'$	1410,00	mm

$e = M/N$ (excentricidad)	910,84	mm
---------------------------	--------	----

$a_1/2$	705,00	mm
---------	--------	----

$e > a_1/2$

γ_f (coeficiente de mayoración de acciones)	1,50	
--	------	--

$N^* = N \cdot \gamma_f$	1.133.893,98	N
$M^* = M \cdot \gamma_f$	1.032.793,11	N·m
$g = 0,15 \cdot a_1$	211,50	mm

$\sigma_c^* = [N^* \cdot (e + 0,5 \cdot a_1 - g)] / [0,25 \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot (0,875 \cdot a_1 - g)]$	3,09	N/mm ²
	31,45	kg/cm ²

$$\sigma_c^* \leq f_{cd} \checkmark$$

Cálculo del espesor de la placa

$b_1 = a_1$	141,00	cm
d (diámetro columna)	111,00	cm
$M^*_{voladizo} = (b_1-d)^2/8 \cdot \sigma_c^*$	3538,62	kg·cm
$M^*_{voladizo} = b_1 \cdot (2d-b_1)/8 \cdot \sigma_c^*$	44905,14	kg·cm
MAYOR	44905,14	kg·cm
σ_f (límite de fluencia del acero)	2600,00	kg·cm
t (espesor)	10,18	cm

Pernos de anclaje

Diámetro de los pernos

N^*	1.133.893,98	N
M^*	1.032.793,11	N·m
a_1	1410,00	mm
g	150,00	mm
$Z = -N^* + [(M^* + N^* \cdot (0,5 \cdot a_1 - g)) / (0,875 \cdot a_1 - g)]$	399.766,25	N

Acero

f_{yk} (B500S)	500,00	N/mm²
γ_s	1,15	
$\sigma_{adma} = f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s$	434,78	N/mm²

Si se colocan 8 pernos, y suponiendo que según la posición solo 4 de ellos soportan tracción

n	4,00	pernos a tracción
$A_t \geq Z / (0,8 \cdot n \cdot \sigma_t)$	287,33	mm ²

Se busca un tornillo cuyo área resistente sea inmediatamente superior

A_t (TABLA)	353,00	mm^2
Tornillo M (TABLA)	24,00	mm

Longitud de anclaje

Posición I

m (TABLA)	1,50	
ϕ (diámetro de la barra)	25,00	mm
f_{yk}	500,00	N/mm^2

$l_b = m \cdot \phi^2$	937,50	mm
------------------------	--------	----

$f_{yk} \cdot \phi / 20$	625,00	mm
--------------------------	--------	----

$$f_{yk} \cdot \phi / 20 \leq l_b \checkmark$$

n =	4,00	pernos a tracción
-----	------	-------------------

$A_t =$	3,53	cm^2
---------	------	---------------

β (TABLA)	0,70	
-----------------	------	--

$A_s = n \cdot A_t$	14,12	cm^2
---------------------	-------	---------------

$A_{sreal} = (\pi \cdot \phi^2 \cdot n) / 4$	19,63	cm^2
--	-------	---------------

$l_{bneto} = l_b \cdot \beta \cdot A_s / A_{sreal}$	47,19	cm
---	-------	----

$10 \cdot \phi$	25,00	cm
-----------------	-------	----

15,00	15,00	cm
-------	-------	----

$l_b / 3$	31,25	cm
-----------	-------	----

MAYOR	31,25	cm
-------	-------	----

$$l_{bneto} \geq 31,25 \text{ cm } \checkmark$$

3.3.7.3. Armadura de la zapata

Al tratarse de una zapata rígida, ya que se cumple que $v_{\text{máx}} \leq 2 \cdot h$, se calculará por el método de las bielas y los tirantes como se indica en la Instrucción EHE. En dicho método, se asemeja el objeto a estudio a una estructura de barras articuladas. En dicha estructura, las barras comprimidas son las bielas y representan la compresión del hormigón, y las barras traccionadas son los tirantes, que representan las fuerzas de tracción en las armaduras.

Comprobaciones a realizar para el cálculo de zapata rígida

Las comprobaciones que se deberán realizar para el cálculo de zapatas rígidas son tres: flexión, esfuerzo cortante y fisuración (no siendo estas dos últimas muchas veces necesarias).

Cálculo a flexión

Las tensiones que actúan sobre la zapata son las que provienen de las cargas de la estructura, sin contar el peso del cimiento ni el de las tierras o cargas uniformemente repartidas que actúan directamente sobre él.

Como en el proceso de comprobación de la estabilidad al hundimiento se ha considerado el peso de la zapata, las tensiones para el cálculo de la flexión serán las anteriormente obtenidas menos las tensiones uniformes producida por el peso propio del cimiento.

La tensión a descontar será por tanto:

$$\sigma_{\text{zapata}} = h \cdot \gamma_h$$

$$\sigma_{\text{cálculo}} = \sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{zapata}}$$

$$\frac{\sigma_1}{AX - m} = \frac{\sigma_{\text{cálculo}}}{AX}$$

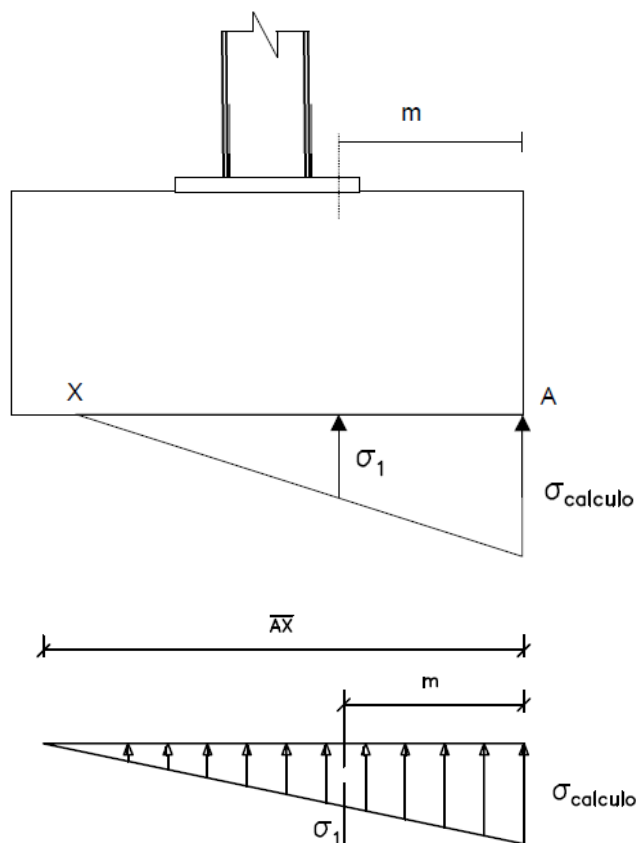


Figura 48. Distribución de tensiones en la zapata.

El cálculo a flexión se realiza en cada dirección principal respecto a una sección de referencia SI que está retrasada respecto al soporte.

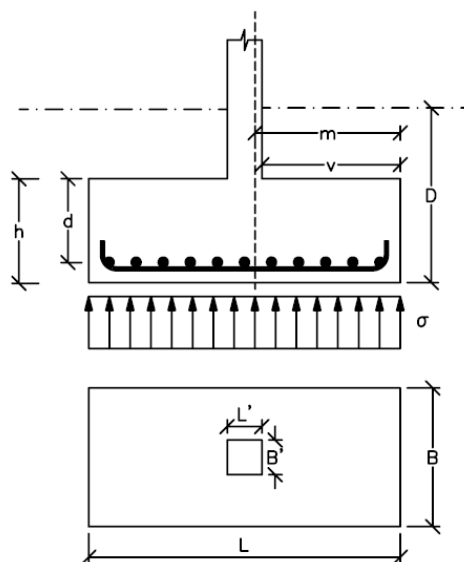


Figura 49. Cálculo a flexión en zapatas aisladas.

En el caso de pilar metálico con placa, el vuelo de cálculo será:

$$m = v + \frac{a_1 - c}{4}$$

Siendo a_1 la dimensión de la placa y c el canto del perfil.

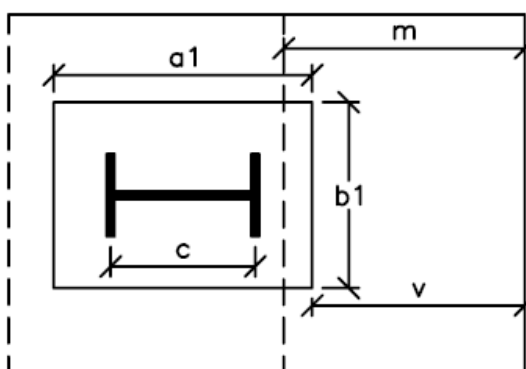


Figura 50. Vuelo de cálculo en una zapata con pilar metálico.

Como se ha comentado anteriormente, dado que se trata de una zapatas rígida, la determinación de las armaduras necesarias se deberá llevar a cabo mediante el método de las bielas y los tirantes.

Dicho método se basa en suponer bielas comprimidas de hormigón cosidas inferiormente por un tirante CD (figura 51).

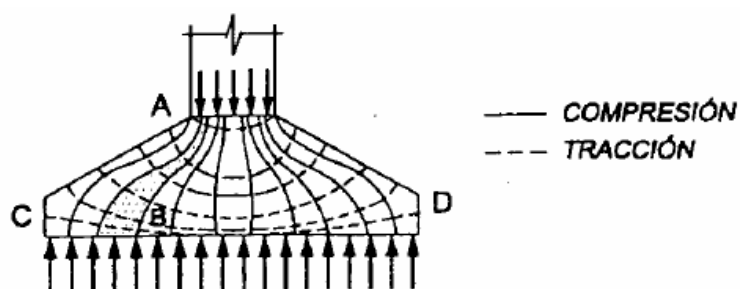


Figura 51. Red de isostáticas de una zapata aislada.

Las barras comprimidas se denominan bielas y representan la compresión del hormigón. Las barras traccionadas se denominan tirantes y representan las fuerzas de tracción de las armaduras.

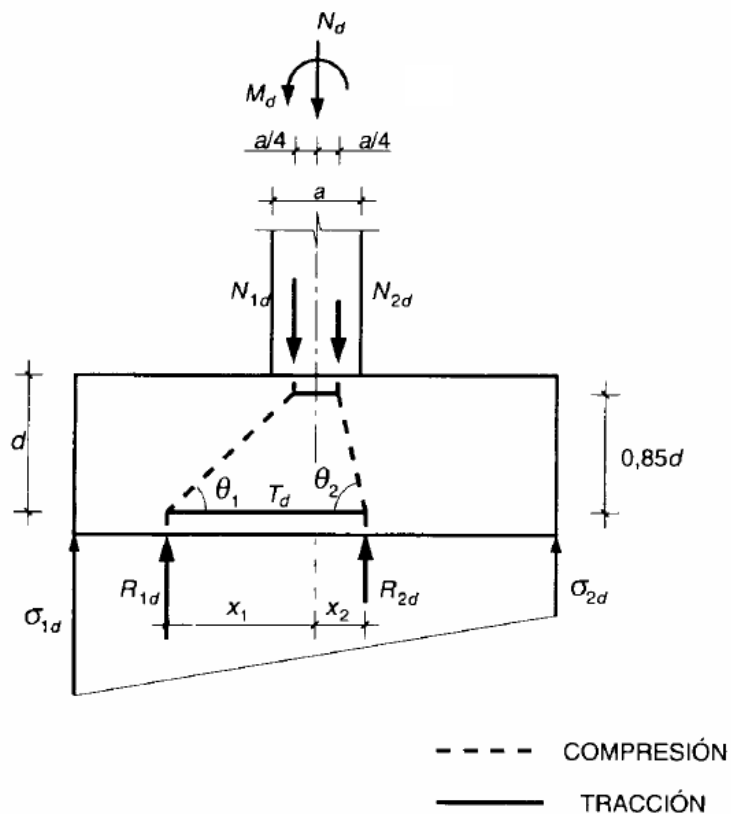


Figura 52. Modelización de una zapata rígida según el método de bielas y tirantes.

Según esta hipótesis, la armadura principal para resistir la tracción será:

$$T_d = \gamma_f \cdot \frac{R_{1d}}{0,85 \cdot d} \cdot (x_1 - 0,25 \cdot a)$$

Siendo:

$$R_{1d} = \frac{\sigma_{\text{cálculo}} + \sigma_1}{2} \cdot B \cdot \frac{L}{2}$$

$$x_1 = \frac{\left(\frac{L^2}{4} \cdot \frac{2 \cdot \sigma_c + \sigma_1}{6} \right) \cdot B}{R_{1d}}$$

Donde:

$L = B = a =$ Longitud de la zapata.

$d = h - d'$

Considerando $d' = 50$ mm

a = anchura del soporte o diámetro de la columna.

Si las tensiones de cálculo no se han mayorado previamente, será necesario mayorar el valor de T_d .

Determinación de la armadura

La armadura necesaria en la sección de referencia se hará con un cálculo hecho a flexión simple de acuerdo con los principios generales de cálculo de secciones sometidas a sollicitaciones normales.

Cuantía geométrica mínima

Una vez ya elegida la armadura, se comprobará con la instrucción EHE si cumple la norma sobre cuantías geométricas mínimas.

$$A = T_d / f_{yd}$$

Como se puede observar en la tabla que se muestra a continuación, la cuantía mínima de la instrucción, será del 1,8 por mil, ya que se está utilizando un acero B 500 S.

Tipo de elemento estructural		Tipo de acero	
		Aceros con $f_y = 400 \text{ N/mm}^2$	Aceros con $f_y = 500 \text{ N/mm}^2$
Pilares		4,0	4,0
Losas ⁽¹⁾		2,0	1,8
Forjados unidireccionales	Nervios ⁽²⁾	4,0	3,0
	Armadura de reparto perpendicular a los nervios ⁽³⁾	1,4	1,1
	Armadura de reparto paralela a los nervios ⁽³⁾	0,7	0,6
Vigas ⁽⁴⁾		3,3	2,8
Muros ⁽⁵⁾	Armadura horizontal	4,0	3,2
	Armadura vertical	1,2	0,9

⁽¹⁾ Cuantía mínima de cada una de las armaduras, longitudinal y transversal repartida en las dos caras. Para losas de cimentación y zapatas armadas, se adoptará la mitad de estos valores en cada dirección dispuestos en la cara inferior.

⁽²⁾ Cuantía mínima referida a una sección rectangular de ancho b_w y canto d del forjado de acuerdo con la Figura 42.3.5. Esta cuantía se aplica estrictamente en los nervios y no en las zonas macizadas. Todas las viguetas deben tener en la cabeza inferior, al menos, dos armaduras activas o pasivas longitudinales simétricas respecto al plano medio vertical.

⁽³⁾ Cuantía mínima referida al espesor de la capa de compresión hormigonada *in situ*.

⁽⁴⁾ Cuantía mínima correspondiente a la cara de tracción. Se recomienda disponer en la cara opuesta una armadura mínima igual al 30% de la consignada.

⁽⁵⁾ La cuantía mínima vertical es la correspondiente a la cara de tracción. Se recomienda disponer en la cara opuesta una armadura mínima igual al 30% de la consignada.

A partir de los 2,5 m de altura del fuste del muro y siempre que esta distancia no sea menor que la mitad de la altura del muro podrá reducirse la cuantía horizontal a un 2%. En el caso en que se dispongan juntas verticales de contracción a distancias no superiores a 7,5 m, con la armadura horizontal interrumpida, las cuantías geométricas horizontales mínimas pueden reducirse al 2%. La armadura mínima horizontal deberá repartirse en ambas caras. Para muros vistos por ambas caras debe disponerse el 50% en cada cara. En el caso de muros con espesores superiores a 50 cm, se considerará un área efectiva de espesor máximo 50 cm distribuidos en 25 cm a cada cara, ignorando la zona central que queda entre estas capas superficiales.

⁽⁶⁾ En el caso de elementos pretensados, la armadura activa podrá tenerse en cuenta en relación con el cumplimiento de las cuantías geométricas mínimas sólo en el caso de las armaduras pretensas que actúen antes de que se desarrolle cualquier tipo de deformación térmica o reológica.

Tabla 28. Cuantías geométricas mínimas, en tanto por 1000, referidas a la sección total de hormigón.

Siendo:

$\rho = A_s/A_c$, cuantía geométrica mínima en tanto por mil.

$A_c = a \cdot h$, área de la sección útil.

$A_s =$ área de la armadura traccionada.

Cuantía mecánica mínima

Para evitar la rotura frágil con piezas débilmente armadas, en las que el agotamiento del acero se produjera antes de la fisuración del hormigón, es necesario colocar una mínima cantidad de armadura en la zona traccionada. De esta forma, se evita la rotura frágil que podría sobrevenir. La cuantía necesaria, para $f_{ck} < 50 \text{ N/mm}^2$, es:

$$U_S = A_S \cdot f_{yd} \geq 0,04 \cdot f_{cd} \cdot a \cdot h$$

Despejando de aquí el área de la armadura traccionada, se consulta en las tablas 29 y 30 según el número de barras de acero B 500 S y, de esta manera, se determina el número de barras y el diámetro de la armadura.

Primero se escoge el diámetro y a continuación, se halla el número de barras.

Diámetro mm	NUMERO DE BARRAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	28,27	56,54	84,81	113,08	141,35	169,62	197,89	226,16	254,43	282,70
8	50,26	100,52	150,78	201,04	251,30	301,56	351,82	402,08	452,34	502,60
10	78,54	157,08	235,62	314,16	392,70	471,24	549,78	628,32	706,86	785,40
12	113,09	226,18	339,27	452,36	565,45	678,54	791,63	904,72	1017,81	1130,90
14	153,93	307,86	461,79	615,72	769,65	923,58	1077,51	1231,44	1385,37	1539,30
16	201,06	402,12	603,18	804,24	1005,30	1206,36	1407,42	1608,48	1809,54	2010,60
20	314,16	628,32	942,48	1256,64	1570,80	1884,96	2199,12	2513,28	2827,44	3141,60
25	490,87	981,74	1472,61	1963,48	2454,35	2945,22	3436,09	3926,96	4417,83	4908,70
32	804,24	1608,48	2412,72	3216,96	4021,20	4825,44	5629,68	6433,92	7238,16	8042,40
40	1256,64	2513,28	3769,92	5026,56	6283,20	7539,84	8796,48	10053,12	11309,76	12566,40

Tabla 29. Determinación del número de barras en función del diámetro.

Diámetro mm	NUMERO DE BARRAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	12,29	24,58	36,87	49,16	61,45	73,74	86,03	98,32	110,61	122,90
8	21,85	43,70	65,55	87,40	109,25	131,10	152,95	174,80	196,65	218,50
10	34,15	68,30	102,45	136,60	170,75	204,90	239,05	273,20	307,35	341,50
12	49,17	98,34	147,51	196,68	245,85	295,02	344,19	393,36	442,53	491,70
14	66,93	133,86	200,79	267,72	334,65	401,58	468,51	535,44	602,37	669,30
16	87,42	174,84	262,26	349,68	437,10	524,52	611,94	699,36	786,78	874,20
20	136,59	273,18	409,77	546,36	682,95	819,54	956,13	1092,72	1229,31	1365,90
25	213,42	426,84	640,26	853,68	1067,10	1280,52	1493,94	1707,36	1920,78	2134,20
32	349,67	699,34	1049,01	1398,68	1748,35	2098,02	2447,69	2797,36	3147,03	3496,70
40	546,36	1092,72	1639,08	2185,44	2731,80	3278,16	3824,52	4370,88	4917,24	5463,60

Tabla 30. Determinación del número de barras en función del diámetro (continuación).

Como el elemento se hormigona contra el terreno, se deberá adoptar un recubrimiento mínimo de 70 mm.

Además, en la parte inferior se suele aplicar una capa de hormigón pobre de unos 10 cm de espesor para regularizar la superficie y evitar el contacto directo de la zapata con el terreno.

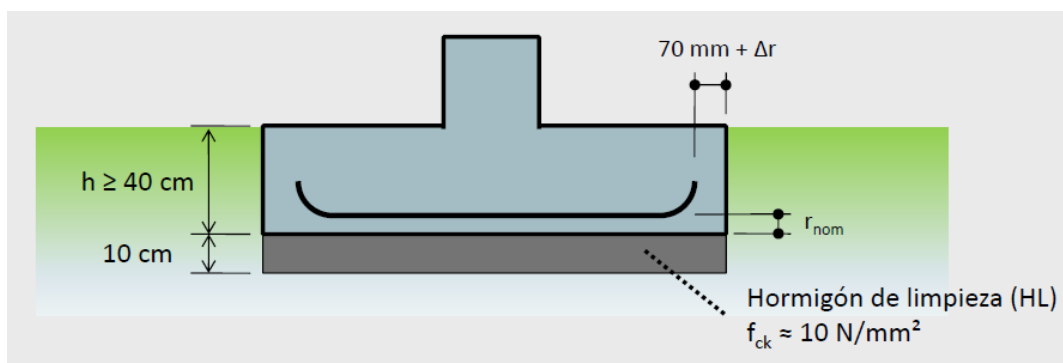


Figura 53. Hormigón de limpieza (solera de asiento).

Por lo tanto, el recubrimiento nominal será el siguiente:

$$r_{nom} = r_{mín} + \Delta r$$

Siendo:

$r_{\text{mín}}$ = recubrimiento mínimo (70 mm).

Δ_r = margen de recubrimiento según nivel de control en la ejecución. Como la zapata se hará in situ y con un nivel de ejecución normal, este será de 10 mm.

Ahora se calculará la separación entre las armaduras o distancia entre ejes de la armadura longitudinal:

$$s = \frac{B - 2 \cdot r - n \cdot \phi}{(n - 1)} + \phi$$

Donde:

$B = L = a$ = anchura de la zapata.

r = recubrimiento mínimo.

n = número de barras.

ϕ = diámetro de las barras.

Esta deberá ser:

- mayor que el diámetro de la barra.
- mayor que 2 cm.
- mayor que 1,25 veces el tamaño del árido.

Disposición y distribución de las barras de la armadura

La armadura calculada se extenderá sin reducción alguna de su sección de un lado a otro de la zapata. Los extremos de las barras deben doblarse a 90° en el borde de la zapata.

Como la base es cuadrada, la armadura se distribuirá uniformemente y paralelamente a los lados de la base de la zapata.

Si el vuelo v es inferior al canto total h de la zapata, la armadura inferior se prolongará hasta el borde de la zapata. La longitud de anclaje se contará a partir del punto donde termina la parte recta de las barras.

No deben emplearse barras lisas.

Anclaje de las armaduras

Este cálculo se realizará según lo expuesto en la Instrucción EHE, en lo relativo a barras corrugadas. La longitud básica de anclaje depende, entre otros factores, de las propiedades de adherencia de las barras y de la posición que éstas ocupan en la pieza de hormigón.

En este caso, será **la posición I** la que tenga la barra, con adherencia buena, por lo que la longitud básica de anclaje será:

$$l_b = m \cdot \phi^2 \geq (f_{yk}/20) \cdot \phi$$

Donde:

Φ = diámetro de la barra en mm.

f_{yk} = límite elástico característico del acero en MPa.

m = coeficiente numérico dado por la tabla de la EHE (ver tabla 26).

Para calcular la longitud neta de anclaje se utilizará la siguiente fórmula:

$$l_{b\text{neto}} = l_b \cdot \beta \cdot (A_s/A_{s\text{real}})$$

Donde:

β = factor de reducción definido en la tabla 27.

A_s = área de la sección de la armadura a tracción.

A_{sreal} = área real del acero.

La sección real del acero viene dada por:

$$A_{sreal} = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} \cdot n$$

Según la EHE, la longitud neta de anclaje definida no puede adoptar valores inferiores al mayor de los tres siguientes:

- a) $10 \cdot \Phi$
- b) 15 cm
- c) la tercera parte de la longitud básica de anclaje para barras traccionadas y dos tercios de dicha longitud para barras comprimidas.

En zapatas rígidas con $v \leq h$, deberán construirse de la siguiente manera si se hace por adherencia:

- Si $L/4-70 \geq l_{bneto}$, basta con prolongación recta.
- Si $0,7 \cdot l_{bneto} \leq L/4-70 \leq l_{bneto}$, basta con una terminación en patilla normalizada.
- Si $L/4-70 < 0,7 \cdot l_{bneto}$, es necesario disponer una prolongación recta hacia arriba de valor:

$$l'_1 = l_{bneto} - \frac{\frac{L}{4}-70}{0,7}$$

Siendo l_{bneto} la longitud neta de anclaje correspondiente a la posición I.

Comprobación a esfuerzo cortante

La EHE no especifica ninguna comprobación para las zapatas rígidas. No obstante, es conveniente realizar la comprobación a partir de $v > h$, tanto para los cimientos rígidos como para las zapatas flexibles.

La sección de referencia se indica en la figura 55 a una distancia d de la cara del pilar.

$$V_d = \gamma_f \cdot \sigma_d \cdot B \cdot (m-d)$$

Donde σ_d :

$$\frac{\sigma_{\max}}{A\bar{X}} = \frac{\sigma_d}{A\bar{X} - (m-d)}$$

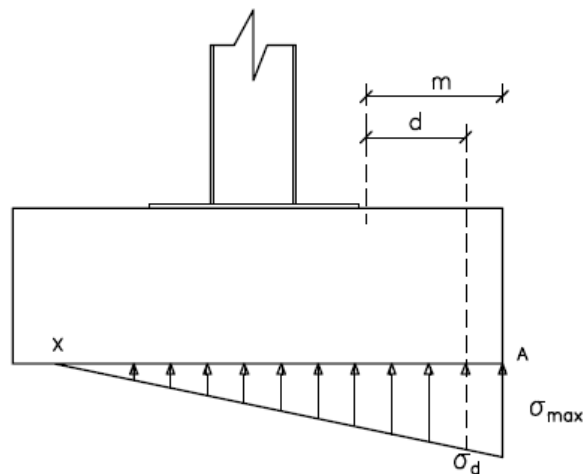


Figura 60. Obtención de σ_d .

El esfuerzo de agotamiento viene dado por la fórmula:

$$V_{cu} = 0,12 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot B \cdot d$$

Debiéndose cumplir que $V_d \leq V_{cu}$

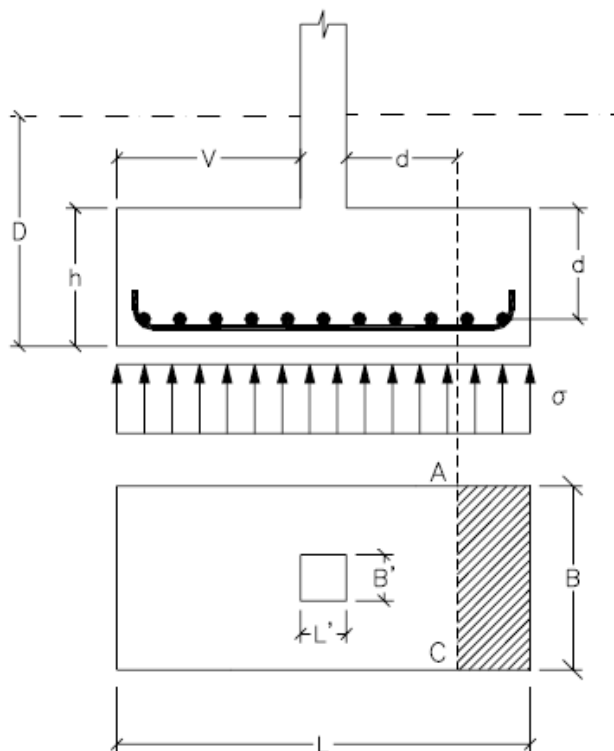


Figura 55. Sección de referencia en la comprobación a esfuerzo cortante.

En la fórmula anterior, f_{ck} viene expresado en N/mm^2 y el valor de ξ viene definido por:

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}, \text{ con } d \text{ en mm}$$

Y ρ_1 es la cuantía geométrica de la armadura de tracción, expresada en tanto por uno, que no debe superar 0,02. Para acero B 500 S, ρ_1 se multiplicará por 1,25, y el límite del 2 % se reducirá al 1,6 %.

Comprobación a fisuración

En general, la comprobación a fisuración debe realizarse en clase de exposición húmeda, es decir, clase II (no es el caso, clase III).

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso		
No agresiva		I	Ninguno	<ul style="list-style-type: none"> - Interiores de edificios, no sometidos a condensaciones. - Elementos de hormigón en masa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elementos estructurales de edificios, incluido los forjados, que estén protegidos de la intemperie.
Normal	Humedad alta	IIa	Corrosión de origen diferente de los cloruros	<ul style="list-style-type: none"> - Interiores sometidos a humedades relativas medias altas (> 65%) o a condensaciones. - Exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm. - Elementos enterrados o sumergidos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elementos estructurales en sótanos no ventilados. - Cimentaciones. - Estribos, pilas y tableros de puentes en zonas, sin impermeabilizar con precipitación media anual superior a 600 mm. - Tableros de puentes impermeabilizados, en zonas con sales de deshielo y precipitación media anual superior a 600 mm. - Elementos de hormigón, que se encuentren a la intemperie o en las cubiertas de edificios en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm. - Forjados en cámara sanitaria, o en interiores en cocinas y baños, o en cubierta no protegida.
	Humedad media	IIb	Corrosión de origen diferente de los cloruros	<ul style="list-style-type: none"> - Exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas con precipitación media anual inferior a 600 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elementos estructurales en construcciones exteriores protegidas de la lluvia. - Tableros y pilas de puentes, en zonas de precipitación media anual inferior a 600 mm.
Marina	Aérea	IIIa	Corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> - Elementos de estructuras marinas, por encima del nivel de pleamar. - Elementos exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5 km). 	<ul style="list-style-type: none"> - Elementos estructurales de edificaciones en las proximidades de la costa. - Puentes en las proximidades de la costa. - Zonas aéreas de diques, pantalanes y otras obras de defensa litoral. - Instalaciones portuarias.
	Sumergida	IIIb	Corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> - Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajamar. 	<ul style="list-style-type: none"> - Zonas sumergidas de diques, pantalanes y otras obras de defensa litoral. - Cimentaciones y zonas sumergidas de pilas de puentes en el mar.
	En zona de carrera de mareas y en zonas de salpicaduras	IIIc	Corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> - Elementos de estructuras marinas situadas en la zona de salpicaduras o en zona de carrera de mareas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Zonas situadas en el recorrido de marea de diques, pantalanes y otras obras de defensa litoral. - Zonas de pilas de puentes sobre el mar, situadas en el recorrido de mareas.
Con cloruros de origen diferente del medio marino		IV	Corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> - Instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino. - Superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Piscinas e interiores de los edificios que las albergan. - Pilas de pasos superiores o pasarelas en zonas de nieve. - Estaciones de tratamiento de agua.

Tabla 31. Clase de exposición.

Resolución de cálculos armadura zapata**Configuración 1: Grúa sin contrapeso****ARMADURA DE LA ZAPATA****Cálculo a flexión****Vuelo físico**

a	4750,00	mm
a ₁ (longitud placa de anclaje)	1728,00	mm
v = (a-a₁)/2	1511	mm

Vuelo de cálculo

c (diámetro columna)	1428	mm
m = v+(a₁-c)/4	1586,00	mm

Obtención de la tensión de cálculo

h (canto zapata)	1,50	m
γ _h (peso específico hormigón)	25000,00	N/m ³
σ _{zapata} = h·γ _h	37500,00	N/m ²
σ _{máx}	129360,00	N/m ²

σ_{cálculo} = σ_{máx} - σ_{zapata}	91860,00	N/m²
---	-----------------	------------------------

AX	3130,00	mm
σ ₁ = (σ _{cálculo} /AX)·(AX-m)	0,045	N/mm ²

Método de las bielas y tirantes (zapata rígida)

a (anchura del soporte o diámetro de la columna)	1,43	m
L (longitud zapata)	4,75	m
B = L	4,75	m
R _{1d} =	773745,33	N
x ₁ =	840,95	mm
γ _f (coeficiente de mayoración de acciones)	1,50	
d'	50,00	mm
d = h-d'	1450,00	mm

T_d =	440.536,98	N
	440,54	kN

Cuantías mínimas

f_{yk} (Acero B500S)	500,00	N/mm ²
γ_s	1,15	

$\sigma_{adma} = f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s$	434,78	N/mm ²
--	--------	-------------------

f_{ck} (Hormigón HA-25)	25,00	N/mm ²
γ_c	1,50	

$\sigma_{admh} = f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c$	16,67	N/mm ²
--	-------	-------------------

$A = T_d/f_{yd}$	1013,24	mm ²
------------------	---------	-----------------

Cuantía geométrica mínima

ρ (TABLA)	0,0018	
$\rho \cdot a \cdot h$	12.825,00	mm ²

Cuantía mecánica mínima

a	4750,00	mm
h	1500,00	mm
$A_c = a \cdot h$	7.125.000,00	mm ²
$A_s \geq 0,04 \cdot A_c \cdot (f_{cd}/f_{yd})$	10.925,00	mm ²

Se escoge un diámetro y se halla el número de barras (TABLA)

ϕ_{barra}	40,00	mm
----------------	-------	----

$n \geq (4 \cdot A_s)/\pi \cdot \phi^2$	8,69	barras
n (TABLA)	9,00	barras

Recubrimiento nominal

$\Gamma_{\text{mín}}$	70,00	mm
Δ_r	10,00	mm
Γ_{nom}	80,00	mm
Separación de las armaduras		
a	4750,00	mm
a_1	1728,00	mm
$\Gamma_{\text{mín}}$	70,00	mm
n	9,00	barras
ϕ	40,00	mm
s =	355,25	mm
	35,53	cm
s > diámetro de la barra	4,00	cm
s > 2 cm	2,00	cm
Tamaño máximo del árido	5,00	cm
s > 1,25 veces el tamaño del árido	6,25	cm
Longitud de anclaje armadura		
Armadura longitudinal		
Posición I		
m (TABLA)	1,50	
ϕ (diámetro de la barra)	40,00	mm
f_{yk}	500,00	N/mm ²
$l_b = m \cdot \phi^2$	2400,00	mm
$f_{yk} \cdot \phi / 20$	1000,00	mm
$f_{yk} \cdot \phi / 20 \leq l_b$		
$A_s =$	109,25	cm²
n	9,00	barras
ϕ	4,00	cm
$A_{s\text{real}} = (\pi \cdot \phi^2 \cdot n) / 4$	113,10	cm ²

β (TABLA)	1,00	
$l_{b\text{net}} = l_b \cdot \beta \cdot A_s / A_{s\text{real}}$	231,84	cm
	2318,36	mm
$10 \cdot \phi$	40,00	cm
15,00	15,00	cm
$1/3 l_b$	77,28	cm
MAYOR	77,28	cm
$l_{b\text{net}} \geq 40 \text{ cm} \checkmark$		
$a/4$	1187,50	mm
$a/4-70$	1117,50	mm
$0,7 \cdot l_{b\text{net}}$	1622,85	mm
$a/4-70 < 0,7 \cdot l_{b\text{net}} \Rightarrow$ Prolongación recta hacia arriba		
$l'_1 = l_{b\text{net}} - (L/4-70)/0,7$	821,93	mm
Armadura transversal		
$l_{b\text{netatransv}} = 0,6 \cdot l_{b\text{net}}$	1391,01	mm
$a/4$	1187,50	mm
$a/4-70$	1117,50	mm
$a/4-70 > l_{b\text{netatransv}} \Rightarrow$ Prolongación recta		
Comprobación a esfuerzo cortante ($v > h$)		
$\sigma_{\text{máx}}$	0,13	N/mm^2
AX	3130,00	mm
m	1586,00	mm
$d = h - d'$	1450,00	mm
$\sigma_d = (\sigma_{\text{máx}}/AX) \cdot (AX - (m-d))$	0,12	N/mm^2
γ_f	1,50	
$B = a$	4750,00	mm
$V_d = \gamma_f \cdot \sigma_d \cdot B \cdot (m-d)$	119.903,33	N
$\xi = 1 + \text{RAÍZ}(200/d)$	1,37	

A_{Sreal}	11309,73	mm ²
$\rho_1 = A_{sreal}/B \cdot d < 0,02$	0,002	tanto por mil
f_{ck}	25,00	N/mm ²
$V_{cu} = (0,12 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3}) \cdot B \cdot d$	1.551.006,31	N
$V_d < V_{cu} \checkmark$		

Comprobación a fisuración

No es necesaria la comprobación

Configuración 2: Grúa con contrapeso**ARMADURA DE LA ZAPATA****Cálculo a flexión****Vuelo físico**

a	3850,00	mm
a ₁ (longitud placa de anclaje)	1410,00	mm
$v = (a - a_1)/2$	1220	mm

Vuelo de cálculo

c (diámetro columna)	1110	mm
$m = v + (a_1 - c)/4$	1295,00	mm

Obtención de la tensión de cálculo

h (canto zapata)	1,50	m
γ_h (peso específico hormigón)	25000,00	N/m ³
$\sigma_{zapata} = h \cdot \gamma_h$	37500,00	N/m ²
$\sigma_{m\acute{a}x}$	129070,00	N/m ²

$\sigma_{c\acute{a}lculo} = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{zapata}$	91570,00	N/m ²
---	----------	------------------

AX	3040,00	mm
----	---------	----

$\sigma_1 = (\sigma_{c\acute{a}lculo}/AX) \cdot (AX - m)$	0,053	N/mm ²
---	-------	-------------------

Método de las bielas y tirantes (zapata rígida)

a (anchura del soporte o diámetro de la columna)	1,11	m
L (longitud zapata)	3,85	m
B = L	3,85	m
R _{1d} =	534100,57	N
x ₁ =	665,03	mm
γ_f (coeficiente de mayoración de acciones)	1,50	
d'	50,00	mm
d = h - d'	1450,00	mm

T _d =	243.505,63	N
	243,51	kN

Cuantías mínimas

f_{yk} (Acero B500S)	500,00	N/mm ²
γ_s	1,15	
$\sigma_{adma} = f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s$	434,78	N/mm ²
f_{ck} (Hormigón HA-25)	25,00	N/mm ²
γ_c	1,50	
$\sigma_{admh} = f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c$	16,67	N/mm ²
$A = T_d/f_{yd}$	560,06	mm ²
Cuantía geométrica mínima		
ρ (TABLA)	0,0018	
$\rho \cdot a \cdot h$	10.395,00	mm ²
Cuantía mecánica mínima		
a	3850,00	mm
h	1500,00	mm
$A_C = a \cdot h$	5.775.000,00	mm ²
$A_S \geq 0,04 \cdot A_C \cdot (f_{cd}/f_{yd})$	8.855,00	mm ²
Se escoge un diámetro y se halla el número de barras (TABLA)		
ϕ_{barra}	40,00	mm
$n \geq (4 \cdot A_S)/\pi \cdot \phi^2$	7,05	barras
n (TABLA)	8,00	barras
Recubrimiento nominal		
$r_{mín}$	70,00	mm
Δ_r	10,00	mm

Γ_{nom}	80,00	mm
Separación de las armaduras		
a	3850,00	mm
a ₁	1410,00	mm
$\Gamma_{mín}$	70,00	mm
n	8,00	barras
ϕ	40,00	mm
s =	322,86	mm
	32,29	cm
s > diámetro de la barra	4,00	cm
s > 2 cm	2,00	cm
Tamaño máximo del árido	5,00	cm
s > 1,25 veces el tamaño del árido	6,25	cm
Longitud de anclaje armadura		
Armadura longitudinal		
Posición I		
m (TABLA)	1,50	
ϕ (diámetro de la barra)	40,00	mm
f _{yk}	500,00	N/mm ²
$l_b = m \cdot \phi^2$	2400,00	mm
$f_{yk} \cdot \phi / 20$	1000,00	mm
$f_{yk} \cdot \phi / 20 \leq l_b$		
A _S =	88,55	cm ²
n	8,00	barras
ϕ	4,00	cm
A _{sreal} = $(\pi \cdot \phi^2 \cdot n) / 4$	100,53	cm ²
β (TABLA)	1,00	
$l_{b\beta} = l_b \cdot \beta \cdot A_s / A_{sreal}$	211,40	cm

	2113,98	mm
10·φ	40,00	cm
15,00	15,00	cm
1/3lb	70,47	cm
MAYOR	70,47	cm
l_{bneta} ≥ 40 cm ✓		
a/4	962,50	mm
a/4-70	892,50	mm
0,7·l_{bneta}	1479,78	mm

$a/4-70 < 0,7 \cdot l_{bneta} \Rightarrow$ Prolongación recta hacia arriba

$l'_1 = l_{bneta} - (L/4-70)/0,7$	938,98	mm
-----------------------------------	--------	----

Armadura transversal

$l_{bnetatransv} = 0,6 \cdot l_{bneta}$	1268,39	mm
a/4	962,50	mm
a/4-70	892,50	mm
0,7·l_{bnetatransv}	887,87	mm

$0,7 \cdot l_{bneta} \leq a/4-70 \leq l_{bnetatransv} \Rightarrow$ Terminación en patilla normalizada

Comprobación a esfuerzo cortante ($v < h$)

No es necesaria la comprobación

Comprobación a fisuración

No es necesaria la comprobación

3.3.7.4. Resumen de la cimentación

Configuración 1: Grúa sin contrapeso

RESUMEN CIMENTACIÓN GRÚA SIN CONTRAPESO										
ZAPATA										
Dimensiones (mm)		Material								
4750x4750x1500		Hormigón armado	HA-25/B/20/IIIa							
		Hormigón de limpieza	HL-150/B/20 (h = 100 mm)							
PLACA DE ANCLAJE										
Dimensiones (mm)		Material								
1728x1728x129		Acero	St-42							
PERNOS DE ANCLAJE										
Diámetro (mm)		Material		Nº	Longitud de anclaje (mm)					
M30		Acero	B 500 S	8	Básica: 1536	Neta: 695,70				
ARMADURA										
Diámetro (mm)		Material		Nª	Longitud de anclaje (mm)		Cuantías mínimas		r _{nom} (mm)	Separación (mm)
40		Acero	B 500 S	9	Básica: 2400	Neta: 2318,36	Geo-métrica (ρ): 0,0018	Mecánica (A _S -mm ²): 10.925	80	355,25

Tabla 32. Resumen cimentación para el caso de grúa sin contrapeso.

Configuración 2: Grúa con contrapeso

RESUMEN CIMENTACIÓN GRÚA CON CONTRAPESO									
ZAPATA									
Dimensiones (mm)	Material								
3850x3850x1500	Hormigón armado	HA-25/B/20/IIIa							
	Hormigón de limpieza	HL-150/B/20 (h = 100 mm)							
PLACA DE ANCLAJE									
Dimensiones (mm)	Material								
1410x1410x101,80	Acero	St-42							
PERNOS DE ANCLAJE									
Diámetro (mm)	Material		Nº	Longitud de anclaje (mm)					
M24	Acero	B 500 S	8	Básica: 937,50	Neta: 384,10				
ARMADURA									
Diámetro (mm)	Material		Nª	Longitud de anclaje (mm)		Cuantías mínimas		rnom (mm)	Separación (mm)
40	Acero	B 500 S	8	Básica: 2400	Neta: 2113,98	Geométrica (ρ): 0,0018	Mecánica (A _S -mm ²): 8.855	80	322,86

Tabla 33. Resumen cimentación para el caso de grúa con contrapeso.

3.2.8. Elección grúa con contrapeso frente a grúa sin contrapeso

Finalmente, y tras todos los cálculos anteriormente realizados, se ha comprobado que la mejor de las dos posibles configuraciones es la de grúa con contrapeso.

En la siguiente tabla se pueden apreciar las ventajas y desventajas de cada una de las configuraciones:

GRÚA SIN CONTRAPESO		GRÚA CON CONTRAPESO	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
No hay contrapeso => Más barato			Hay contrapeso => Más caro
No hay contrapluma => Más barato			Hay contrapluma => Más caro
	Peso de la pluma similar al de las dos plumas juntas en la configuración con contrapeso	Peso total de las dos plumas similar al de la configuración sin contrapeso	
	Mayor diámetro exterior de columna => Más caro	Menor diámetro exterior de columna => Más barato	
	Rodamiento de mayor tamaño => Más caro	Rodamiento de menor tamaño => Más barato	
	Zapata de mayor tamaño => Más caro	Zapata de menor tamaño => Más barato	
	Placa de anclaje de mayores dimensiones => Más caro	Placa de anclaje de menores dimensiones => Más barato	
	Mayor métrica de los pernos de anclaje => Más caro	Menor métrica de los pernos de anclaje => Más barato	

	Mayor cantidad de armaduras => Más caro	Menor cantidad de armaduras => Más barato	
--	---	---	--

Tabla 34. Ventajas/Desventajas configuraciones grúa.

A partir de este punto, todos los cálculos mostrados se realizarán únicamente para la configuración con contrapeso.

ANEXO 3: Cálculo de los elementos de la grúa

3.3. Dimensionado de los elementos

3.3.1. Elección del rodamiento de gran diámetro

3.3.1.1. Introducción

El rodamiento de giro de gran diámetro, que irá situado en la parte superior de la columna, se trata de un elemento de máquina compuesto por dos aros concéntricos; el aro exterior fijo a la parte móvil de la máquina, en este caso, a la pluma, y otro interior fijo a la parte fija de la máquina, en este caso, a la columna. Los aros interior y/o exterior pueden o deben ir mecanizados con un dentado, dependiendo de la necesidad de uso.

En el presente proyecto, se ha considerado como la mejor opción un dentado interior. De esta manera, el engranaje de giro queda protegido del ambiente marino, más corrosivo que en condiciones normales, en el interior de la columna.

Existen varios fabricantes de rodamientos, pero a la hora de buscar un rodamiento de grandes dimensiones y buena calidad el margen se estrecha. Los grandes rodamientos *Rothe Erde* son elementos de máquina de gran versatilidad que forman por sí mismos una unidad completa para su total integración en cualquier proyecto. Están calculados para soportar la transmisión simultánea de esfuerzos axiales, radiales y de los pares de vuelco resultantes.

Se ha optado por un rodamiento con el dentado interior mecanizado por el proveedor, en lugar de considerar la fabricación de una corona aparte y soldarla al rodamiento. Este planteamiento constituye un ahorro en tiempo y dinero. De esta forma, el proceso de diseñar el engranaje, fabricarlo y mecanizar y soldar la corona al interior del aro del rodamiento constituye un esfuerzo a ahorrar.

3.3.1.2. Diseño constructivo del rodamiento

En el catálogo de *Rothe Erde* existen varios diseños constructivos de rodamientos de gran diámetro los cuales están prediseñados para diferentes campos de aplicación.

Entre todos ellos se encuentran las series KD 320, KD 600, RD 800 y RD 900, que son adecuadas para técnicas de elevación.

Entre todos los rodamientos posibles se buscará una serie de dimensiones reducidas y ajustables de forma razonable al diámetro de la columna.

Finalmente, se ha optado por seleccionar del catálogo *Rothe Erde* un rodamiento de la serie KD 600 (uniones giratorias de una hilera de bolas con transmisión de carga por cuatro puntos de contacto). Además, y como se ha mencionado anteriormente, se ha seleccionado con dentado interior.

Los campos de aplicación de este tipo de rodamientos son: técnica de elevación y transporte de material, así como construcciones mecánicas en general.

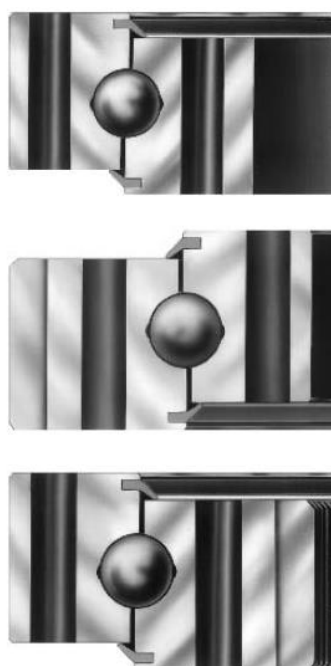


Figura 56. Rodamiento de gran diámetro serie KD 600 Rothe Erde.

3.3.1.3. Cargas sobre el rodamiento

Para la selección del rodamiento adecuado para la presente aplicación, es necesario conocer los esfuerzos en las diferentes situaciones de carga y la aplicación de factores de carga conocidos según sea la utilización del aparato.

Todos y cada uno de los rodamientos poseen una curva de carga límite y de vida útil, por tanto, se ha de elegir el que cumpla con las condiciones de carga de la grúa y con las especificaciones impuestas por el tamaño, en este caso, de la columna.

Para la selección del rodamiento se va a seguir el método de cálculo y dimensionado recomendado por el fabricante *Rothe Erde*.

Usualmente, los rodamientos de gran dimensión se montan de forma asentada.

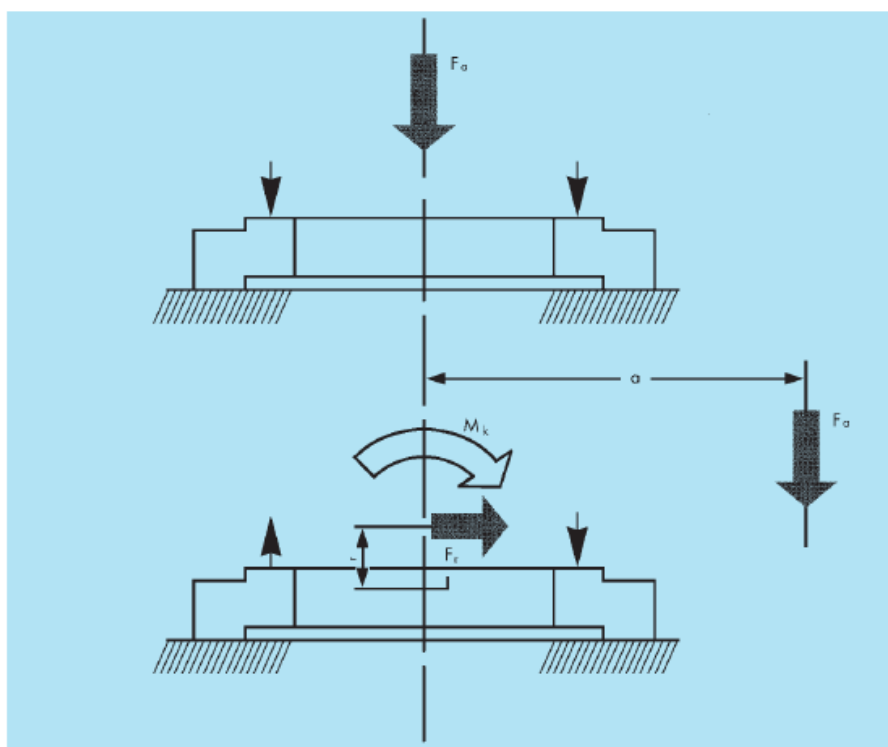


Figura 57. Transmisión de esfuerzos rodamiento.

Para las diferentes hipótesis de carga que se plantearán es necesario determinar la carga axial F_a y el par de vuelco M_k .

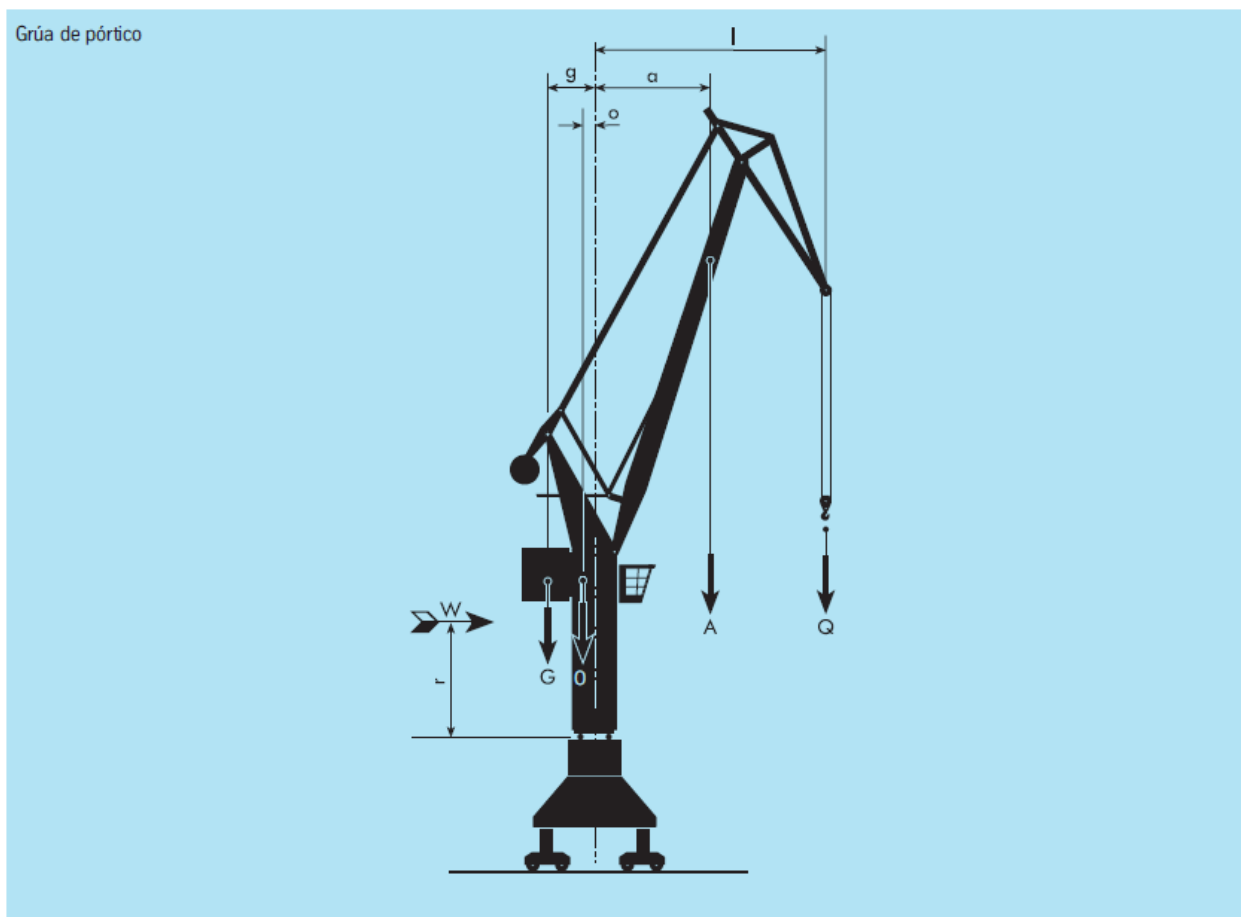


Figura 58. Ejemplo de las solicitaciones a considerar para la selección de un rodamiento.

Considerando la carga levantada a máxima distancia (situación más perjudicial), las hipótesis de carga a considerar son:

1. Carga máxima de servicio incluyendo carga por viento

Para el caso de grúa sin contrapeso:

$$\text{Carga axial: } F_a = Q + A + O$$

$$\text{Par de vuelco: } M_k = Q \cdot l_{\text{máx}} + A \cdot a_{\text{máx}} + W_1 \cdot r_1 + W_2 \cdot r_2$$

Para el caso de grúa con contrapeso:

$$\text{Carga axial: } F_a = Q + A_1 + A_2 + O + G$$

$$\text{Par de vuelco: } M_k = Q \cdot l_{\text{máx}} + A_1 \cdot a_{1\text{máx}} + W_1 \cdot r_1 + W_2 \cdot r_2 + W_3 \cdot r_3 - A_2 \cdot a_{2\text{máx}} - G \cdot g$$

2. Carga incluyendo un 25% de incremento por ensayo y sin carga por viento

Para el caso de grúa sin contrapeso:

$$\text{Carga axial: } F_a = 1,25 \cdot Q + A + O$$

$$\text{Par de vuelco: } M_k = 1,25 \cdot Q \cdot l_{\text{máx}} + A \cdot a_{\text{máx}}$$

Para el caso de grúa con contrapeso:

$$\text{Carga axial: } F_a = 1,25 \cdot Q + A_1 + A_2 + O + G$$

$$\text{Par de vuelco: } M_k = 1,25 \cdot Q \cdot l_{\text{máx}} + A_1 \cdot a_{1\text{máx}} - A_2 \cdot a_{2\text{máx}} - G \cdot g$$

3. Carga máxima de servicio sin carga por viento

Para el caso de grúa sin contrapeso:

$$\text{Carga axial: } F_a = Q + A + O$$

$$\text{Par de vuelco: } M_k = Q \cdot l_{\text{máx}} + A \cdot a_{\text{máx}}$$

Para el caso de grúa con contrapeso:

$$\text{Carga axial: } F_a = Q + A_1 + A_2 + O + G$$

$$\text{Par de vuelco: } M_k = Q \cdot l_{\text{máx}} + A_1 \cdot a_{1\text{máx}} - A_2 \cdot a_{2\text{máx}} - G \cdot g$$

Donde para todas las expresiones y siguiendo la nomenclatura del catálogo del fabricante:

$$Q = Q_u + Q_{\text{met}}$$

$$A, A_1 = Q_{\text{plu}}$$

$$A_2 = Q_{plu}$$

$$O = Q_{mg}$$

$$G = Q_{con}$$

$$W_1 = F_{vconA}$$

$$W_2 = F_{vcolA}$$

$$W_3 = F_{vcA}$$

$$l_{m\acute{a}x} = L_{plu}$$

$$a, a_{1m\acute{a}x} = L'_{plu}/2$$

$$a_{2m\acute{a}x} = L'_{con}$$

$$g = L_{con}$$

r_1 = distancia desde la base de la columna hasta el punto de aplicación de la fuerza del viento sobre el contrapeso.

$r_2 = L_{col}/2$ (distancia desde la base de la columna hasta el punto de aplicación de la fuerza del viento sobre la columna).

r_3 = distancia desde la base de la columna hasta el punto de aplicación de la fuerza del viento sobre la carga (situación más desfavorable).

Se aplicarán los coeficientes correspondientes para este tipo de grúa ya calculados en el dimensionado de la estructura.

Con esto ya se pueden calcular la carga axial y el par de vuelco máximos a emplear para la elección del rodamiento.

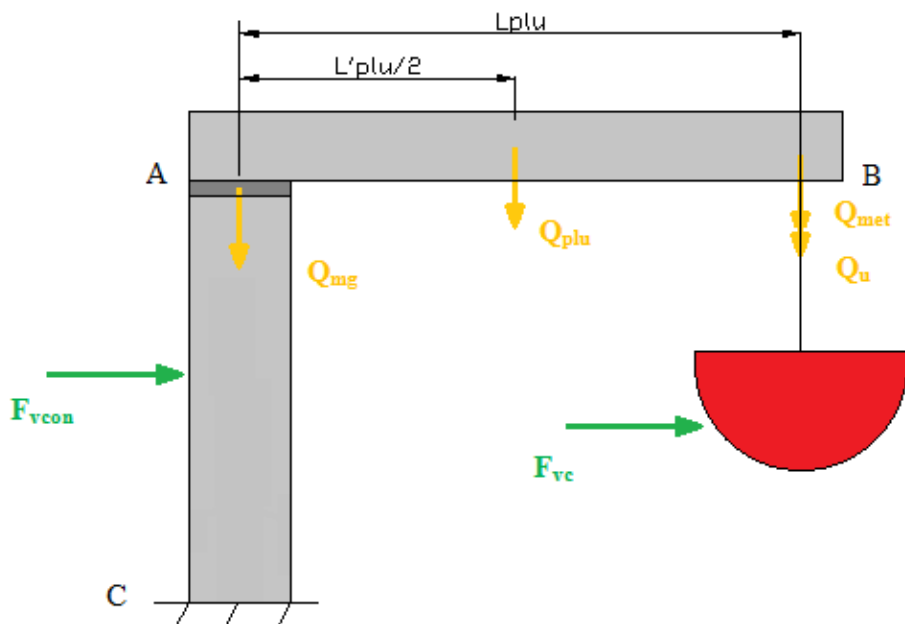


Figura 59. Fuerzas a considerar para la selección del rodamiento para el caso de grúa sin contrapeso.

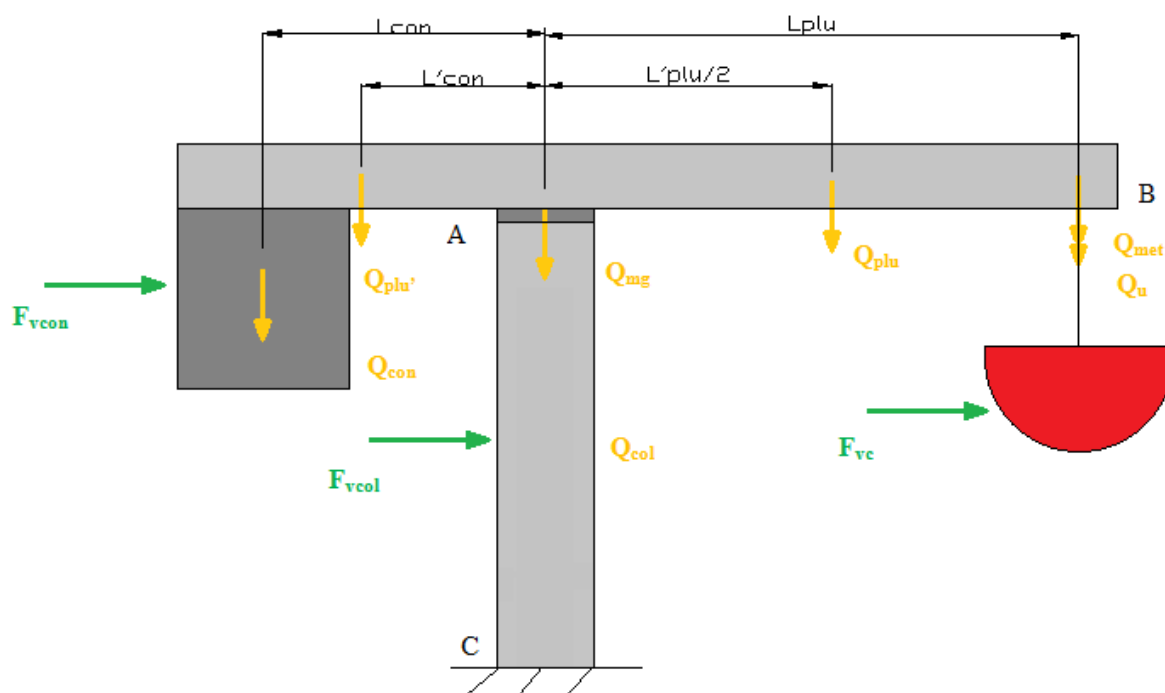


Figura 60. Fuerzas a considerar para la selección del rodamiento para el caso de grúa con contrapeso.

3.3.1.4. Factores de carga para la selección del rodamiento

Las cargas anteriormente mencionadas se han de multiplicar por los factores de carga antes de proceder a la selección del rodamiento.

1. Capacidad de carga estática

Las cargas obtenidas se multiplican con un factor f_{stat} correspondiente al caso de aplicación en cuestión. El producto F_a' o M_k' debe quedar situado por debajo de la curva de carga límite estática del rodamiento seleccionado.

En este caso en concreto, y considerando la aplicación de grúa giratoria (gancho), $f_{stat} = 1,25$.

2. Vida útil del rodamiento

La carga de servicio multiplicada por el factor f_L se pasa correspondientemente a la curva de vida útil del rodamiento.

Para una aplicación de grúa giratoria con gancho, el factor de servicio $f_L = 1,15$, correspondiente a una vida útil, giros a plena carga, de 45.000.

Casos de aplicación	f_{est}	f_i	Vida útil, giros a plena carga	
Grúa flotante (gancho)	1,10	1,0	30.000	Para el dimensionado estático siempre se deberán considerar las cargas máximas existentes, incluyendo las adicionales y las de ensayo.
Grúa sobre vehículo (gancho)				
Grúa de a bordo (cuchara)				
Mesa giratoria de soldadura				
Plato giratorio (servicio continuo)				
Grúas torre giro superior giro en base	1,25	$M_{teo} \leq 0,5 M_k$	1,0	30.000
		$0,5 M_k \leq M_{teo} \leq 0,8 M_k$	1,15	45.000
		$M_{teo} \geq 0,8 M_k$	1,25	60.000
			1,0	30.000
Grúa giratoria (gancho)				
Grúa de astillero		1,15	45.000	Para aquellos casos de aplicación que no estén reflejados en la tabla, se pueden asumir correspondientemente los valores orientativos pertenecientes a condiciones de servicio similares.
Transportador giratorio (gancho)				
Cargador/descargador de buques				
Grúa de acería	1,45**	1,5	100.000	* Para grúas torre con giro en parte superior M_{teo} = par de vuelco antagónico sin carga. M_k = par de vuelco con carga y máxima longitud de brazo.
Grúa sobre vehículo (servicio de cuchara y en general aplicaciones con gran frecuencia de movimiento de cargas)		1,7	150.000	** Para aquellos casos de aplicación que requieran un dimensionado con $f_{est} = 1,45$ se deberá dar preferencia absoluta a los modelos de rodamientos con varias hileras de elementos de rodadura, debido a que los esfuerzos medios suelen ser elevados y el servicio frecuentemente duro.
Grúa giratoria (cuchara/imán)				
Transportador giratorio (cuchara/imán)				
Puente grúa (cuchara/imán)				
Grúa flotante (cuchara/imán)				
Mecanismo principal de giro de rotopala		2,15	300.000	
Retro-cargadores				
Apiladores				
Cintas transportadoras en voladizo				
Grúa off-shore	Dimensionado según norma especial			
Grúa de ferrocarril	1,10	Para estos casos de aplicación véase la nota adjunta.		Nota:
Grúa de a bordo (gancho)	1,00			Para estos casos de aplicación varían considerablemente las condiciones de servicio, en especial los períodos de servicio del mecanismo de giro y las cargas que inciden durante el giro. Así, por ejemplo, si los movimientos de giro son poco frecuentes, como en el caso de movimientos de giro ocasionales para la colocación en posición de trabajo, se puede proceder a un dimensionado estático.
Apiladoras				Por otra parte, si se trata de giros o desplazamientos continuados, el dimensionado se deberá realizar de acuerdo con la vida útil.
Cintas transportadoras en voladizo	1,10			El dimensionado de acuerdo con la vida útil también puede llegar a ser necesario si el rodamiento tiene que llevar a cabo movimientos relativos, tales como se suelen presentar en cintas de descarga en voladizo en rotopala.
Cintas transportadoras móviles				
Excavadora de cable/ cucharas de arrastre	1,25			
Pala oscilante				
Excavadora hidráulica: con rodamiento tipo KD 320	1,25			
Con otros tipos de rodamientos				
Excavadora hidráulica hasta 1,5 m ³	1,45			
Con más de 1,5 m ³	Dimensionado según norma especial			
Carros para cucharas de colada	1,75			

Tabla 35. Factores de carga para la selección de rodamientos (con excepción de los tipos 13 y 21 de la serie KD 210).

3.3.1.5. Características de la selección

Para la selección del rodamiento es necesario hallar valores de referencia para considerar los gráficos de capacidad de carga estática y las curvas de vida útil.

1. Capacidad de carga estática

La capacidad de carga estática del rodamiento se verifica frente a la curva límite de carga estática, considerando el factor de seguridad de carga ($f_{\text{stat}} = 1,25$) que le corresponde a este tipo de grúa según el fabricante.

Para el dimensionado estático se deberán considerar las cargas máximas existentes, es decir, el supuesto de carga 2 (carga máxima incluyendo un 25% de incremento por ensayo y sin carga por viento).

2. Vida útil del rodamiento

Para una vida útil de 45000 giros a plena carga se utilizará un factor de servicio ($f_L = 1,15$), según el fabricante.

Para la selección del rodamiento se debe tomar el supuesto de carga 3 (carga máxima de servicio sin carga por viento).

Según el fabricante de rodamientos *Rothe Erde*, el límite de la vida útil se alcanza cuando se incrementa progresivamente el par resistente al giro o cuando el desgaste del rodamiento alcanza niveles en los que el rodamiento ya no cumple su función (ver anexo 3.6, apartado medición al desgaste).

Los rodamientos de grandes dimensiones se utilizan bajo las más diversas condiciones de servicio. En función del tipo de servicio se deberá tener en cuenta, no sólo la selección según criterios estáticos, sino también la vida útil esperada, que se deriva de la situación de cargas dinámicas.

La vida útil que se ha determinado por medio de las curvas solamente se debe aplicar en el caso de rodamientos que realicen movimientos de giro parcial y giros lentos.

Las curvas se basan en una vida útil de 30000 giros a plena carga.

3. Calidad y cantidad de tornillos

Tanto la calidad como la cantidad de los tornillos se determinan de acuerdo con las cargas máximas, sin aplicar ningún factor, es decir, según el supuesto de carga 2.

3.3.1.6. Selección del rodamiento

Según las cargas halladas en los supuestos, los siguientes rodamientos de giro cumplen con los requisitos de fuerza axial y momento de vuelco hallados según la metodología del fabricante:

Configuración 1: Grúa sin contrapeso

Rodamiento serie KD 600, 062.30.1600.000.11.1504

Configuración 2: Grúa con contrapeso

Rodamiento serie KD 600, 062.25.1255.500.11.1503

1. Capacidad de carga estática

En las gráficas del fabricante se muestran las curvas de carga límite estática de la serie y se puede verificar la validez de la elección.

En la gráfica, las abscisas son la carga axial (F_a) y las ordenadas el par de vuelco (M_k).

Situando los valores hallados de la carga estática, se puede comprobar que queda por debajo de la curva de límite de servicio del rodamiento escogido.

También se puede verificar si el número de tornillos y la calidad propuestos por el fabricante para este rodamiento son los apropiados. Se emplean los valores elegidos como cargas máximas y se sitúa en el gráfico.

Como se encuentra por debajo de la curva límite discontinua del rodamiento elegido, este resulta válido.

2. Vida útil del rodamiento

En la gráfica, las abscisas son la carga axial (F_a) y las ordenadas el par de vuelco (M_k).

Situando los valores calculados para vida útil, se observa que el rodamiento es correcto si el punto de intersección queda por debajo de la curva límite del rodamiento elegido.

La vida útil del rodamiento se puede hallar en esta misma gráfica. Si se prolonga la línea que une el origen de coordenadas y el punto que indica el caso concreto de carga hasta la curva del rodamiento elegido, se obtienen las cargas máximas para las que está diseñado.

Los valores de las coordenadas del nuevo punto sobre la curva son los valores de partida para el cálculo del número de giros que definirán su nueva vida útil.

Con estos nuevos valores de par de vuelco resultante y carga axial se hallará un nuevo coeficiente de vida útil.

Por tanto, la nueva vida útil será:

$$G = (f_L)^p \cdot 30000$$

Donde p viene determinado por:

Rodamiento de bolas, $p = 3$

Rodamiento de rodillos, $p = 10/3$

En este caso, el rodamiento será de bolas luego, $p = 3$.

Aun así, la vida del rodamiento será superior a este valor, ya que al realizarse el cálculo con las cargas máximas estas no siempre se llegaran a alcanzar.

3.3.1.6. Especificaciones del rodamiento

Las características y dimensiones del rodamiento son las siguientes:

Configuración 1: Grúa sin contrapeso

DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL RODAMIENTO DE GIRO			
Diámetro círculo de rodadura	D_L	062.30.1600.000.11.1504	[mm]
Peso		334	[kg]
Diámetro exterior	D_a	1712	[mm]
Diámetro interior	D_i	1428	[mm]
Altura total	H	89	[mm]
Diámetro círculo taladros exterior	L_a	1668	[mm]
Diámetro círculo taladros interior	L_i	1532	[mm]
Cantidad taladros por círculo	n	48	
Diámetro del taladro	B	22	[mm]
Medida del tornillo	M	20	[mm]
Cantidad de engrasadores	n_1	8	
Diámetro	O	1598	[mm]
Diámetro	U	1601	[mm]
Altura del aro	H_1	80	[mm]
Altura del aro	H_2	63	[mm]
Separación abajo aros exterior/interior	H_u	26	[mm]
Separación arriba aros exterior/interior	H_0	9	[mm]
Diámetro primitivo	d	1440	[mm]
Módulo	m	12	[mm]
Cantidad de dientes	z	120	
Corrección perfil signo s/DIN 3960, Octubre 1976	$x \cdot m$	-6,0	[mm]
Ajuste cabeza de diente	$k \cdot m$	-	[mm]
Altura del diente	b	80	[mm]
Fuerza tangencial admisible normal		60,30	[kN]
Fuerza tangencial máxima		120,60	[kN]
Curva		35	

Tabla 36. Características y dimensiones del rodamiento para el caso de grúa sin contrapeso.

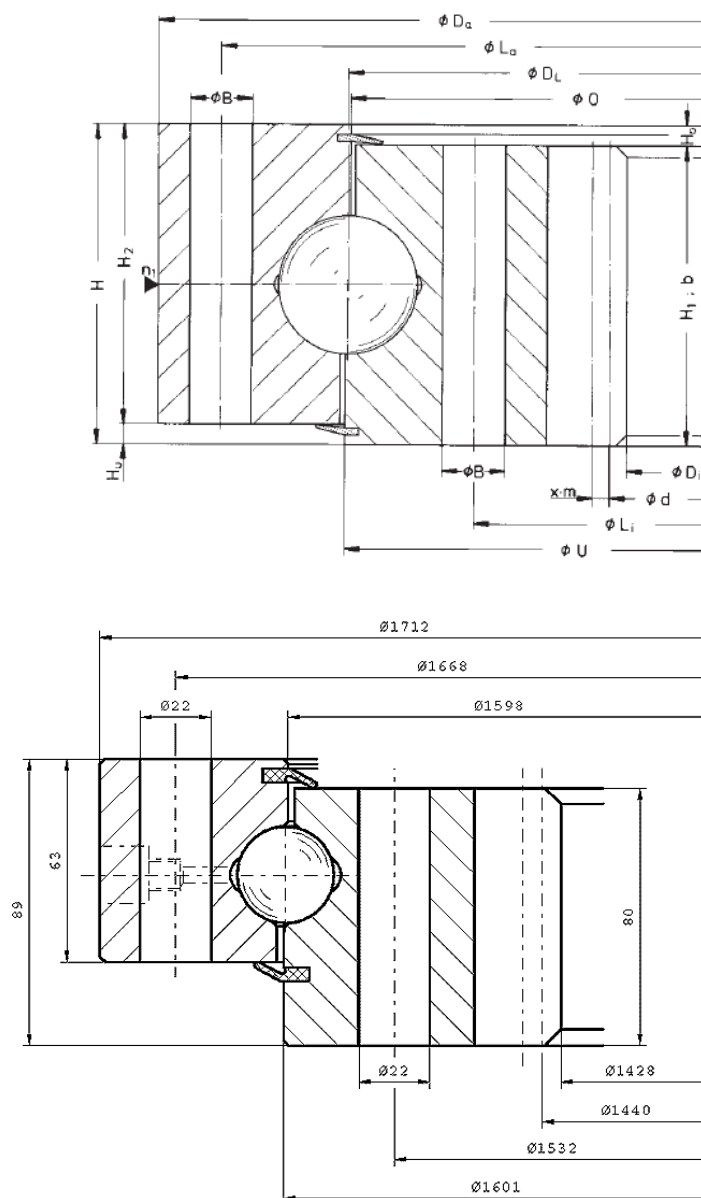


Figura 61. Sección característica de la serie KD 600 para el caso de grúa sin contrapeso.

Configuración 2: Grúa con contrapeso

DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL RODAMIENTO DE GIRO			
Diámetro círculo de rodadura	D_L	062.25.1255.500.11.1503	[mm]
Peso		198	[kg]
Diámetro exterior	D_a	1355	[mm]
Diámetro interior	D_i	1110	[mm]
Altura total	H	80	[mm]
Diámetro círculo taladros exterior	L_a	1315	[mm]
Diámetro círculo taladros interior	L_i	1194	[mm]
Cantidad taladros por círculo	n	42	
Diámetro del taladro	B	22	[mm]
Medida del tornillo (M)	M	20	[mm]
t	t	40	[mm]
Cantidad de engrasadores	n_1	6	
Diámetro	O	1254	[mm]
Diámetro	U	1256	[mm]
Altura del aro	H_1	71	[mm]
Altura del aro	H_2	54	[mm]
Separación abajo aros exterior/interior	H_u	26	[mm]
Separación arriba aros exterior/interior	H_0	9	[mm]
Diámetro primitivo	d	1130	[mm]
Módulo	m	10	[mm]
Cantidad de dientes	z	113	
Corrección perfil signo s/DIN 3960, Octubre 1976	$x \cdot m$	-	[mm]
Ajuste cabeza de diente ($k \cdot m$)	$k \cdot m$	-	[mm]
Altura del diente (b)	b	71	[mm]
Fuerza tangencial admisible normal		38,46	[kN]
Fuerza tangencial máxima		76,92	[kN]
Holguras 1	axial o de vuelco	$\leq 0,36$	[mm]
	radial	$\leq 0,3$	[mm]
Curva		5	

Tabla 37. Características y dimensiones del rodamiento para el caso de grúa con contrapeso.

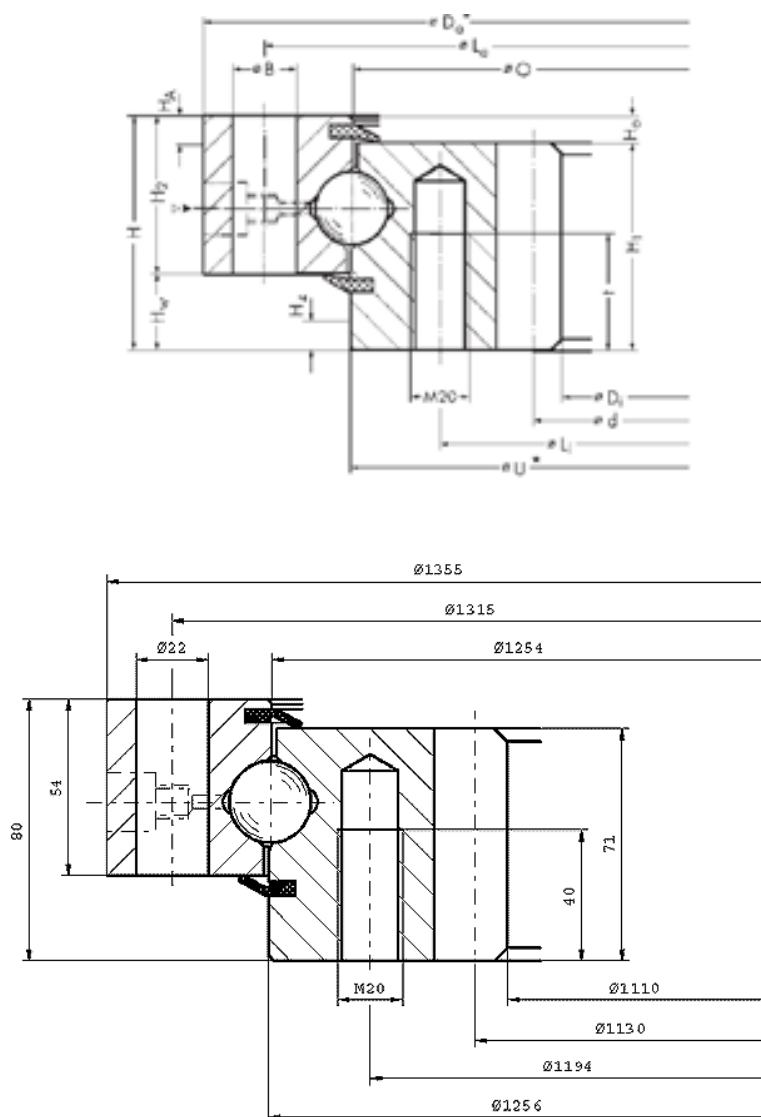


Figura 62. Sección característica de la serie KD 600 para el caso de grúa con contrapeso.

3.3.1.7. Tornillos de fijación

La unión de los tornillos tiene una influencia considerable sobre la vida útil del rodamiento de grandes dimensiones. Es por ello que se hace necesario que los tornillos de fijación se encuentren suficientemente dimensionados y cuidadosamente pretensados.

Para verificar si el número de tornillos y la calidad propuestos por el fabricante para el rodamiento seleccionado son los apropiados, se emplean los valores elegidos como cargas máximas y se sitúa en el gráfico. Si se encuentra por debajo de la curva límite discontinua del rodamiento elegido, resulta válido.

Según el fabricante del rodamiento, las curvas de carga límite para los tornillos que se representan en los diagramas estáticos en todos los casos se refieren a la categoría de resistencia 10.9. Se establece como condición previa una longitud de apriete de $5 \cdot d$ y un tensado previo correspondiente al 70% del límite elástico.

A efectos de verificación en relación a la curva de carga de los tornillos, se toma la carga máxima sin aplicación de factores.

Según el fabricante *Rothe Erde*, los tornillos deben de cumplir una serie de requisitos:

- a) La carga axial F_a actúa por asiento de la misma y no “por suspensión”, es decir, la fuerza axial de servicio F_a procedente de la carga axial no somete a los tornillos a esfuerzos de tracción.

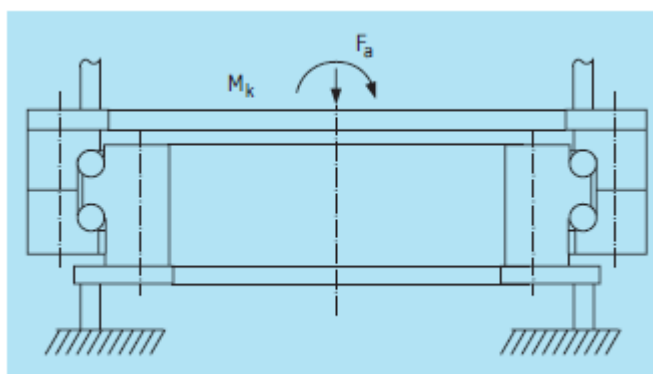


Figura 63. Carga axial “asentada”

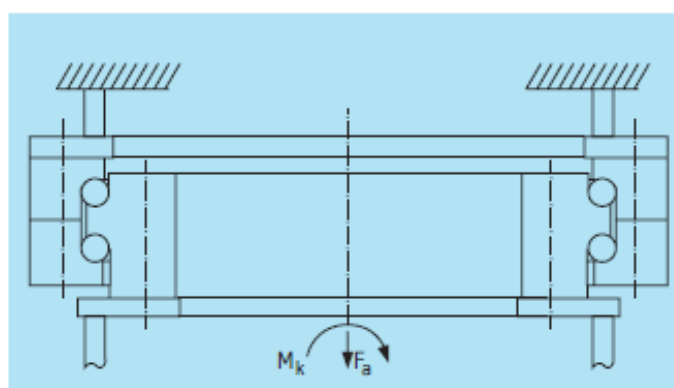


Figura 64. Carga axial “suspendida”

- b) Los tornillos están distribuidos de forma equidistante sobre los círculos de taladro.

- c) Tanto el rodamiento de grandes dimensiones como también las estructuras de apoyo son de acero.
- d) El apoyo debe realizarse sobre superficies rectificadas, nunca revestidas con resina fundida solidificada.
- e) La longitud de apriete de los tornillos l_k es como mínimo cinco veces el diámetro del tornillo en aquellos rodamientos que disponen de una sección maciza en los aros y de al menos tres veces el diámetro en los aros perfilados.
- f) En la parte de los tornillos sometida a carga debe haber al menos seis hilos de roscas libres.

Respecto al momento de apriete, este depende de muchos factores, particularmente del coeficiente de fricción en la rosca, así como en el apoyo de cabeza y tuerca.

Según las tablas de momentos de apriete de tornillos de rosca métrica del catálogo *Rothe Erde*, el par de apriete con llave dinamométrica de los tornillos de M20 y calidad 10.9, para un coeficiente de fricción medio de $\mu_G = \mu_K = 0,14$, es de 558 N·m.

Clase de sujeción según DIN/ISO 898			8.8			10.9			12.9		
Limite de elasticidad $R_{p0,2}$ N/mm ²			640 para \leq M 16 660 para $>$ M 16			940			1100		
rosca métrica ISO DIN 13	área tensionada A_S mm ²	área del núcleo A_3 mm ²	fuerza de tensado F_M N	con atomillador dinamo métrico hidráulico o eléctrico M_A Nm	con llave dinamo métrica M_A' Nm	fuerza de tensado F_M N	con atomillador dinamo métrico hidráulico o eléctrico M_A Nm	con llave dinamo métrica M_A' Nm	fuerza de tensado F_M N	con atomillador dinamo métrico hidráulico o eléctrico M_A Nm	con llave dinamo métrica M_A' Nm
M 12	84,3	76,2	38500	87	78	56000	130	117	66000	150	135
M 14	115	105	53000	140	126	77000	205	184	90000	240	216
M 16	157	144	72000	215	193	106000	310	279	124000	370	333
M 18	193	175	91000	300	270	129000	430	387	151000	510	459
M 20	245	225	117000	430	387	166000	620	558	194000	720	648
M 22	303	282	146000	580	522	208000	830	747	243000	970	873
M 24	353	324	168000	740	666	239000	1060	954	280000	1240	1116
M 27	459	427	221000	1100	990	315000	1550	1395	370000	1850	1665
M 30	561	519	270000	1500	1350	385000	2100	1890	450000	2500	2250
M 33	694	647	335000	a determinar mediante la medición del alargamiento del tornillo		480000	a determinar mediante la medición del alargamiento del tornillo		560000	a determinar mediante la medición del alargamiento del tornillo	
M 36	817	759	395000			560000			660000		
M 39	976	913	475000			670000			790000		
M 42	1120	1045	542000			772000			904000		
M 45	1300	1224	635000			905000			1059000		
M 48	1470	1377	714000			1018000			1191000		
M 52	1760	1652	857000			1221000			1429000		
M 56	2030	1905	989000			1408000			1648000		
M 60	2360	2227	1156000			1647000			1927000		

* = M_A se modifica al variar μ_G ó μ_K

Tabla 38. Fuerzas de tensado y momentos de apriete para tornillos con rosca normal métrica DIN 13, para $\mu_G = \mu_K = 0,14$.

3.3.1.8. Resolución de cálculos rodamiento de giro

Configuración 1: Grúa sin contrapeso**SELECCIÓN DEL RODAMIENTO DE GIRO****Fuerzas debidas al peso propio que actúan sobre la estructura de la grúa**

	kg		
Q_{plu} (peso propio de la pluma)	2066,86	20275,90	N
Q_{col} (peso propio de la columna)	1367,67	13416,84	N
Q_u (carga útil + accesorios)	8250,00	80932,50	N
Q_{mg} (peso del mecanismo de giro)	830,00	8142,30	N
Q_{met} (peso del polipasto)	700,00	6867,00	N

Fuerzas debidas al viento que actúan sobre la estructura de la grúa

F_{vcolA}	1392,30	N
F_{vcA}	981,00	N

Coefficientes de seguridad

γ_s (TABLA)	1,06
C_d (Coeficiente dinámico)	1,02

Fuerzas a considerar según el fabricante (a máxima distancia)

		distancias (m)		
$Q = (Q_u + Q_{met}) \cdot \gamma_s \cdot C_d$	$l_{m\acute{a}x}$	8,00	95,30	kN
$A = Q_{plu} \cdot \gamma_s$	$a_{m\acute{a}x}$	4,25	42,98	kN
$O = Q_{mg} \cdot \gamma_s$	O	0,00	8,63	kN
$W_1 = F_{vcolA}$	r_1	3,25	1,39	kN
$W_2 = F_{vcA}$	r_2	6,00	0,98	kN

Cargas sobre el rodamiento según las hipótesis de carga (carga levantada a máxima distancia)

1) Carga máxima de servicio incluyendo carga por viento

Fuerza axial	$F_a = Q + A + O$	146,92	kN
Par de vuelco	$M_k = Q \cdot l_{m\acute{a}x} + A \cdot a_{m\acute{a}x} + W_1 \cdot r_1 + W_2 \cdot r_2$	955,51	kN·m

2) Carga incluyendo un 25% de incremento por ensayo y sin carga por viento (MÁXIMAS)

Fuerza axial	$F_a = 1,25 \cdot Q + A + O$	170,74	kN
Par de vuelco	$M_k = 1,25 \cdot Q \cdot l_{m\acute{a}x} + A \cdot a_{m\acute{a}x}$	1135,70	kN·m

3) Carga máxima de servicio sin carga por viento

Fuerza axial	$F_a = Q + A + O$	146,92	kN
Par de vuelco	$M_k = Q \cdot l_{m\acute{a}x} + A \cdot a_{m\acute{a}x}$	945,09	kN·m

Factores de carga

Grúa giratoria (gancho)

Factor de carga estático	f_{stat}	1,25	Vida útil, giros a plena carga	45.000
Factor de carga dinámico	f_L	1,15		

DIMENSIONADO ESTÁTICO - Supuesto de cargas 2 (cargas máximas)

Fuerza axial	$F_a' = F_a \cdot f_{stat}$	213,43	kN
Par de vuelco	$M_k' = M_k \cdot f_{stat}$	1419,62	kN·m

VIDA ÚTIL - Supuesto de cargas 3

Fuerza axial	$F_a' = F_a \cdot f_L$	168,95	kN
Par de vuelco	$M_k' = M_k \cdot f_L$	1086,86	kN·m

F_{ao} (GRÁFICA)	210,00	kN
M_{ko} (GRÁFICA)	1350,00	kN

f_L (nuevo coeficiente de vida útil)	F_{ao}/F_a	1,24
p (exponente para rodamientos de bolas)	M_{ko}/M_k	1,24
	3,00	

Vida útil	$G = (f_L)^p \cdot 30000$	45626,25	giros
-----------	---------------------------	----------	-------

CANTIDAD Y CALIDAD DE LOS TORNILLOS - Supuesto de cargas 2

Fuerza axial	$F_a = 1,25 \cdot Q + A + O$	170,74	kN
--------------	------------------------------	--------	----

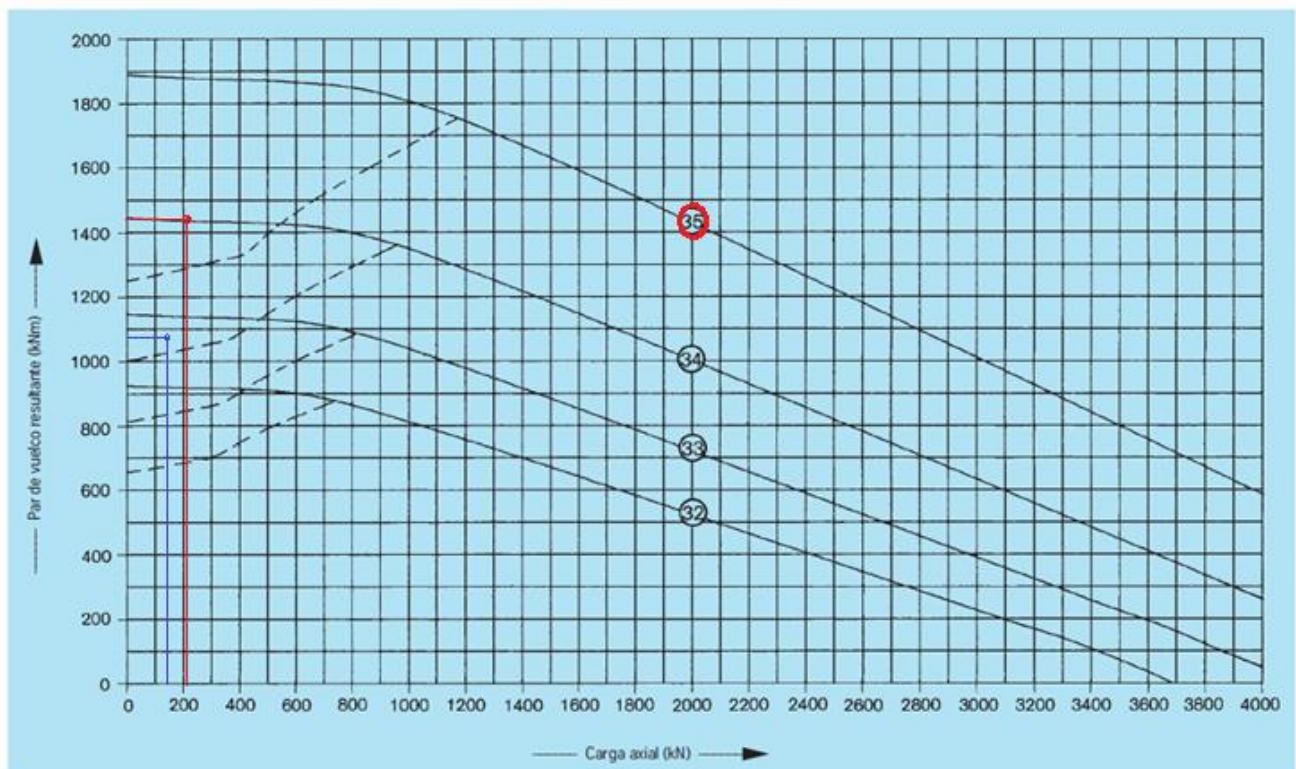
Par de vuelco

$$M_k = 1,25 \cdot Q \cdot l_{\text{máx}} + A \cdot a_{\text{máx}}$$

1135,70 kN·m

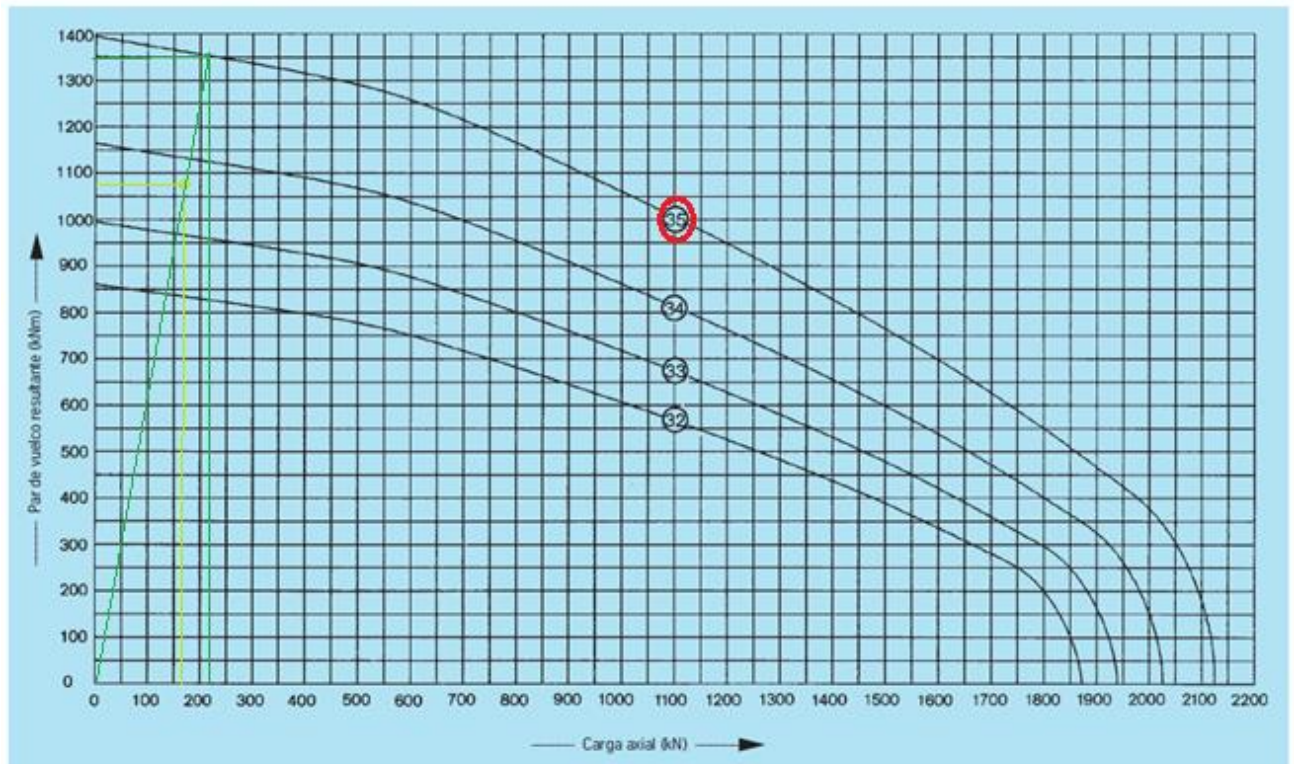
Estos son los valores a emplear en las gráficas

Curvas de carga límite estática — pista de rodadura - - - tornillos



Gráfica 3. Curva de carga límite estática para el caso de grúa sin contrapeso.

Curvas de vida útil - 30 000 giros



Gráfica 4. Curva de vida útil a 30000 giros para el caso de grúa sin contrapeso.

Configuración 2: Grúa con contrapeso**SELECCIÓN DEL RODAMIENTO DE GIRO****Fuerzas debidas al peso propio que actúan sobre la estructura de la grúa**

	kg		
Q_{plu} (peso propio de la pluma)	2074,00	20345,94	N
$Q_{plu'}$ (peso propio de la contrapluma)	1342,00	13165,02	N
Q_{col} (peso propio de la columna)	1061,84	10416,65	N
Q_u (carga útil + accesorios)	8250,00	80932,50	N
Q_{mg} (peso del mecanismo de giro)	830,00	8142,30	N
Q_{met} (peso del polipasto)	700,00	6867,00	N
Q_{con} (peso contrapeso)	7000,00	68670,00	N

Fuerzas debidas al viento que actúan sobre la estructura de la grúa

F_{vconA}	858,38	N
F_{vcolA}	1098,48	N
F_{vcA}	981,00	N

Coefficientes de seguridad

γ_s (TABLA)	1,06
C_d (Coeficiente dinámico)	1,02

Fuerzas a considerar según el fabricante (a máxima distancia)

		distancias (m)		
$Q = (Q_u + Q_{met}) \cdot \gamma_s \cdot C_d$	$l_{m\acute{a}x}$	8,00	95,30	kN
$A_1 = Q_{plu} \cdot \gamma_s$	$a_{1m\acute{a}x}$	4,25	43,13	kN
$A_2 = Q_{plu'} \cdot \gamma_s$	$a_{2m\acute{a}x}$	2,75	27,91	kN
$O = Q_{mg} \cdot \gamma_s$	O	0,00	8,63	kN
$G = Q_{con} \cdot \gamma_s$	g	4,90	72,79	kN
$W_1 = F_{vconA}$	r_1	6,35	0,86	kN
$W_2 = F_{vcolA}$	r_2	3,25	1,10	kN
$W_3 = F_{vcA}$	r_3	6,00	0,98	kN

Cargas sobre el rodamiento según las hipótesis de carga (carga levantada a máxima distancia)

1) Carga máxima de servicio incluyendo carga por viento

Fuerza axial	$F_a = Q + A_1 + A_2 + O + G$	247,77	kN
Par de vuelco	$M_k = Q \cdot l_{m\acute{a}x} + A_1 \cdot a_{1m\acute{a}x} + W_1 \cdot r_1 + W_2 \cdot r_2 + W_3 \cdot r_3 - A_2 \cdot a_{2m\acute{a}x} - G \cdot g$	527,21	kN·m

2) Carga incluyendo un 25% de incremento por ensayo y sin carga por viento (MÁXIMAS)

Fuerza axial	$F_a = 1,25 \cdot Q + A_1 + A_2 + O + G$	271,59	kN
Par de vuelco	$M_k = 1,25 \cdot Q \cdot l_{m\acute{a}x} + A_1 \cdot a_{1m\acute{a}x} - A_2 \cdot a_{2m\acute{a}x} - G \cdot g$	702,90	kN·m

3) Carga máxima de servicio sin carga por viento

Fuerza axial	$F_a = Q + A_1 + A_2 + O + G$	247,77	kN
Par de vuelco	$M_k = Q \cdot l_{m\acute{a}x} + A_1 \cdot a_{1m\acute{a}x} - A_2 \cdot a_{2m\acute{a}x} - G \cdot g$	512,30	kN·m

Factores de carga

Grúa giratoria (gancho)

Factor de carga estático	f_{stat}	1,25	Vida útil, giros a plena carga	45.000
Factor de carga dinámico	f_L	1,15		

DIMENSIONADO ESTÁTICO - Supuesto de cargas 2 (cargas máximas)

Fuerza axial	$F_a' = F_a \cdot f_{stat}$	339,49	kN
Par de vuelco	$M_k' = M_k \cdot f_{stat}$	878,63	kN·m

VIDA ÚTIL - Supuesto de cargas 3

Fuerza axial	$F_a' = F_a \cdot f_L$	284,93	kN
Par de vuelco	$M_k' = M_k \cdot f_L$	589,15	kN·m

F_{ao} (GRÁFICA)	355,00	kN
--------------------	--------	----

M_{ko} (GRÁFICA)	735,00	kN
--------------------	--------	----

f_L (nuevo coeficiente de vida útil)	F_{ao}/F_a	1,25
--	--------------	------

	M_{ko}/M_k	1,25
--	--------------	------

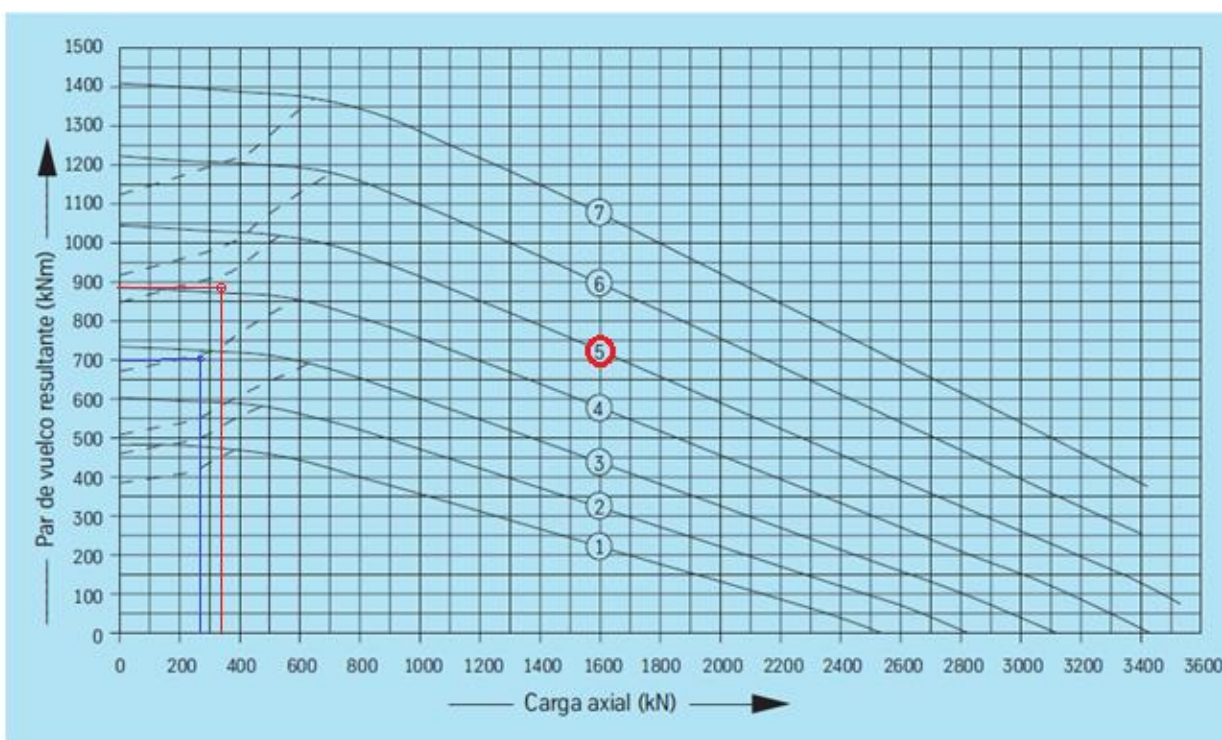
p (exponente para rodamientos de bolas)	3,00		
Vida útil	$G = (f_L)^p \cdot 30000$	58021,78	giros

CANTIDAD Y CALIDAD DE LOS TORNILLOS - Supuesto de cargas 2

Fuerza axial	$F_a = 1,25 \cdot Q + A_1 + A_2 + O + G$	271,59	kN
Par de vuelco	$M_k = 1,25 \cdot Q \cdot l_{m\acute{a}x} + A_1 \cdot a_{1m\acute{a}x} - A_2 \cdot a_{2m\acute{a}x} - G \cdot g$	702,90	kN·m

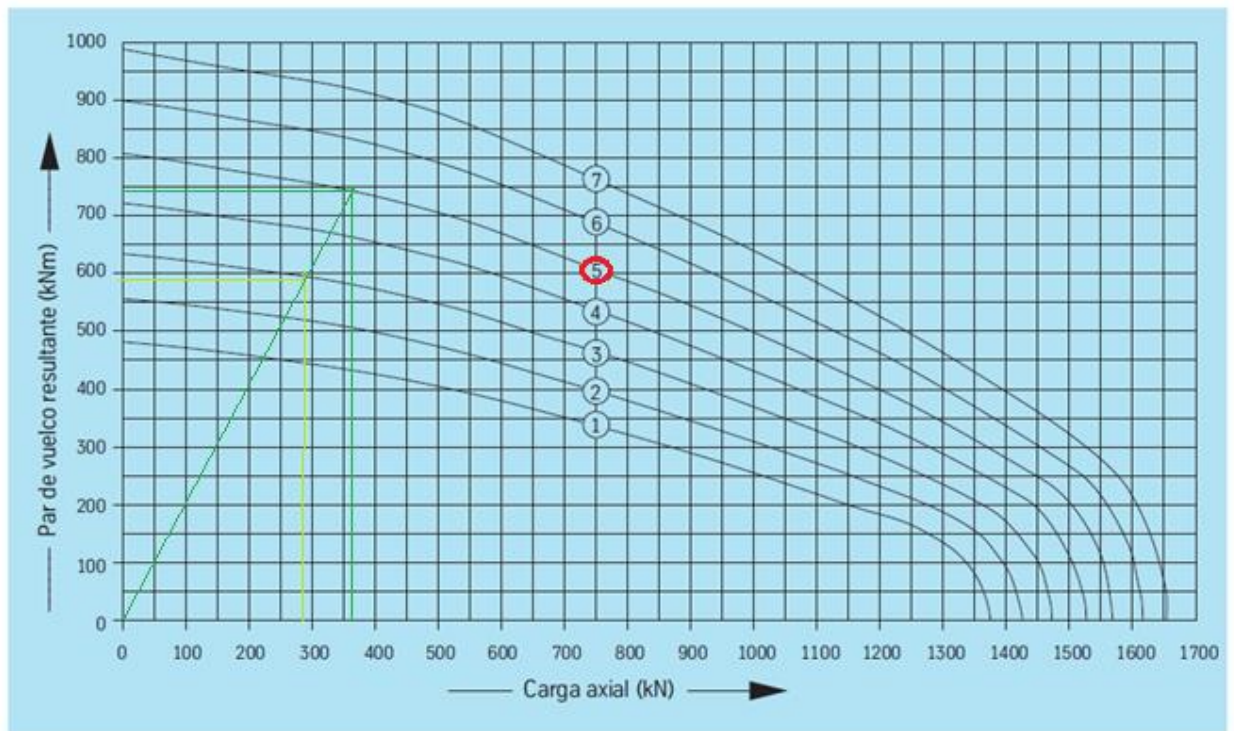
Estos son los valores a emplear en las gráficas

Curvas de carga límite estática ———— pista de rodadura - - - tornillos



Gráfica 5. Curva de carga límite estática para el caso de grúa con contrapeso.

Curvas de vida útil · 30 000 giros



Gráfica 6. Curva de vida útil a 30000 giros para el caso de grúa con contrapeso.

3.3.2. Conjunto motor-reductor

3.3.2.1. Solicitaciones sobre la corona

El par resistente que actúa sobre el motor-reductor de giro está formado por dos más: un par resistente originado por las inercias y rozamientos para iniciar el movimiento de rotación en el rodamiento de giro y otro compuesto por el momento torsor originado por el viento transversal a la pluma sobre la carga, pluma, contrapluma y el contrapeso.

El momento torsor originado por el viento transversal es:

$$M_v = T_v = F_{vpluA} \cdot (L_{plu}'/2) + F_{vcA} \cdot L_{plu} - F_{vplu'A} \cdot L'_{con} - F_{vconA} \cdot L_{con}$$

Donde todos los términos de esta fórmula fueron calculados en apartados anteriores.

El par de rozamiento de arranque se calcula a partir de la ecuación sugerida en el catálogo del fabricante del rodamiento para uniones giratorias de bolas, esto es:

$$M_r = \mu/2 \cdot (4,4 \cdot M_k + F_a \cdot D_L)$$

Donde:

M_k = par de vuelco resultante.

F_a = carga axial.

D_L = diámetro de rodadura del rodamiento.

μ = coeficiente de rozamiento para rodamientos del tipo KD 600 (0,006).

El momento de vuelco resultante M_k y la carga axial F_a ya fueron calculados en la carga máxima de selección del rodamiento.

Luego el momento torsor total a transmitir será:

$$M_r = M_v + M_r$$

3.3.2.2. Elección del reductor

La selección del reductor viene determinada por:

- Relación de reducción elevada.
- Tamaño del reductor lo más compacto y pequeño posible, debido a su situación sobre la pluma.
- Momento de salida elevado.

Se ha elegido un **reductor epicycloidal de cuatro etapas** para realizar la transmisión, debido a que consiguen grandes relaciones de reducción y mantienen un diseño compacto para el mismo servicio. Para su selección, se seguirá la metodología recomendada por el fabricante *Bonfiglioli*.

1. Cálculo de la relación de reducción

La velocidad final que se debe conseguir en la reducción es $n_3 = 0,6 \text{ min}^{-1}$. Se considerará una velocidad de entrada de $n_1 = 1400 \text{ min}^{-1}$. Por tanto, la relación de reducción quedará expresada como:

$$i_{13} = n_1/n_3$$

Los engranajes empleados son de dentado recto. Para este tipo de engranajes se recomienda una relación entre la corona y el piñón:

$$1 < i_{23} < 10$$

2. Momento de cálculo del reductor

Es necesario calcular el momento de cálculo del reductor para realizar la selección adecuada del mismo.

Para el cálculo del momento M_{C2} se tiene en cuenta el factor de marcha y el tipo de servicio de la aplicación.

- **Factor de marcha**

El factor de marcha está definido por la siguiente fórmula:

$$\% \text{ ED} = 100 \cdot \frac{\Sigma \text{ tiempo de marcha}}{\Sigma \text{ tiempo de marcha} + \Sigma \text{ tiempo de parada}}$$

Se considerará que el servicio de la grúa es del tipo de servicio de las grúas del puerto, posición 4, como se describe en la tabla siguiente.

Pos.	Tipo grúa	Mecanismos	E.D. relativo S 3 %	Frecuencia conexión c/h.
1	Grúas de almacén Grúas de taller Grúas de casas de máquinas Grúas de ferrocarriles Grúas flotantes Grúas de a bordo	Elevación Traslación carro Traslación grúa Giro	25 25 25 ó 40 25	150
2	Grúas pesadas de montaje y del taller, más de 5 toneladas de peso de elevación	Elevación Traslación carro Traslación grúa	40 25 25 ó 40	150
3	Grúas para obras y construcciones	Elevación Giro Traslación Traslación carro	40 ó 60 40 40 40	150
4	Grúas para bultos Grúas flotantes y del puerto	Elevación Giro Traslación	40 40 25	150
5	Grúas de puerto con mordazas	Elevación Cerrar Giro Traslación	40 ó 60 40 40 25 ó 40	150 hasta 300
6	Puente de carga	Elevación Cerrar Traslación carro Traslación puente Giro	60 60 60 25 ó 40 40	150
7	Grúas ligeras para empresas siderúrgicas	Elevación Traslación carro Traslación grúas	40 40	300
8	Grúas pesadas para empresas siderúrgicas Grúas para fundición Grúas mezcladas Grúas de garras	Elevación Traslación carro Traslación grúa Giro	60 40 60 40	300
9	Grúas "Stripper" (para sacar los lingotes de los moldes) Grúas para hornos de foso Grúas para hornos de pala móvil Grúas para fraguas	Elevación Giro Traslación carro Traslación grúa Elevación lingotes Tenazas	60 60 60 60 60 60	300 hasta 600

Tabla 39. Clasificación según factor de marcha.

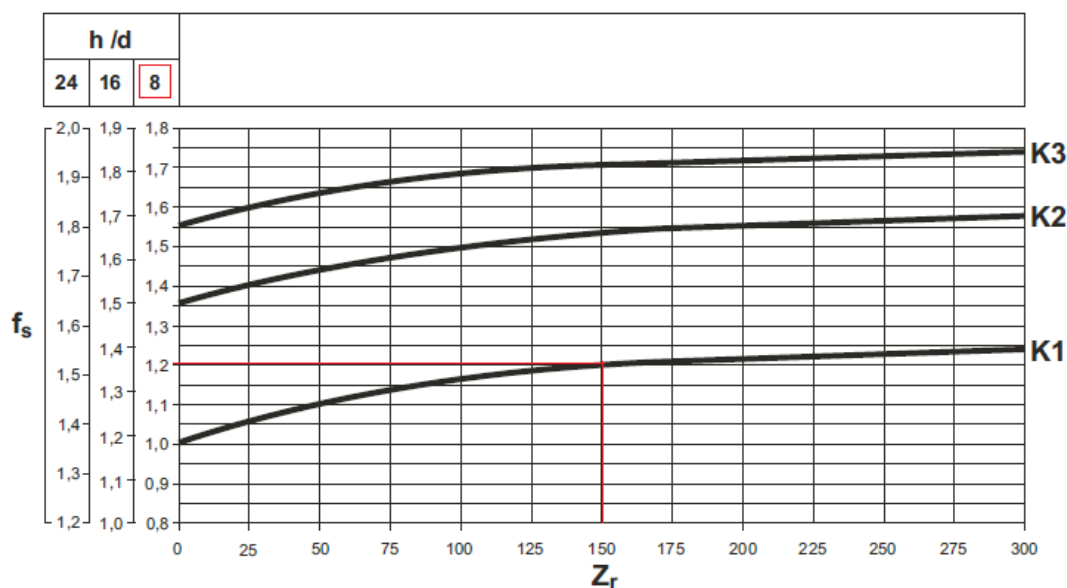
Para la presente aplicación, la frecuencia de conexiones será $Z_r = 150$ c/h.

- **Factor de servicio**

El factor de servicio a considerar depende de las horas al día que trabaja el motor y del número de arranques a la hora que se llevan a cabo.

Como se ha visto en la tabla anterior, el número de conexiones por hora es de $z_r = 150$ c/h.

Se supone que el aparato trabaja 8 h/día. Las curvas K están relacionadas con el tipo de servicio que se lleve a cabo: uniforme (K1), medio (K2) o pesado (K3). Se supondrá un servicio es uniforme, correspondiente a una curva K1. En estas condiciones, el factor de servicio es $f_s = 1,2$.



Gráfica 7. Factores de servicio.

- **Par de cálculo**

Con el valor del par requerido de salida M_{r2} , se determinará el par de cálculo mediante el catálogo del fabricante.

En el cálculo del par de salida M_{r2} , se han de tener en cuenta los rendimientos de las transmisiones intermedias. Las transmisiones de engranajes de dientes rectos de una etapa tienen un rendimiento de $\eta = 0,98$, que es el caso de la transmisión entre la corona y el piñón. En el caso del reductor, estará formado por 4 etapas, su rendimiento será por tanto de $\eta = 0,90$.

El par de salida que necesita el reductor será:

$$M_{r2} = \frac{M_3}{i_{23} \cdot \eta_{23}} = \frac{M_{\text{giro}}}{i_{23} \cdot \eta_{23}}$$

Y, por tanto, el par de cálculo:

$$M_{c2} = f_s \cdot M_{r2}$$

- **Factor de duración**

Con la duración de funcionamiento requerida h y la velocidad de salida n_2 , se calcula el factor de duración. La vida esperada de la grúa es de aproximadamente 6000 h y $n_2 = n_1/i_{12}$.

$$F_{h2} = n_2 \cdot h$$

3. Selección del reductor

Se ha de seleccionar el tamaño del reductor que con la relación más cercana a la calculada satisfaga la siguiente condición:



$$M_{c2} \leq M_{n2}$$

$$F_{h2} \leq n_2 \cdot h$$

Donde M_{n2} y F_{h2} son los valores indicados en las tablas de datos técnicos de cada tamaño de reductor.

Realizando una preselección, el reductor epicicloidal de montaje lineal de la serie 305 L4 cumple con la condición anteriormente mostrada.

305 L **M₂ = 5000 Nm**

	i	M _{n2} [Nm]						P ₁	P _t	n ₁	n _{1max}	M _b	
		n ₂ -h	n ₂ -h	n ₂ -h	n ₂ -h	n ₂ -h	n ₂ -h						
	1:	10000	25000	50000	100000	500000	1000000	[kW]	[kW]	[min ⁻¹]	[min ⁻¹]	[Nm]	
L1	3.60	4700	4450	4300	4200	3750	3050	60	13	1800	3800	1000	5K
	4.25	5800	5500	5300	5200	3700	3000	60	13	1800	3800	1000	5K
	5.33	5600	4900	4400	4400	3600	2950	60	13	1800	3800	1000	5K
	6.20	4600	3950	3600	3600	3550	2900	60	13	1800	3800	800	5G
	7.50	3800	3300	3100	3100	3000	2400	60	13	1800	3800	630	5E
L2	12.5	4700	4450	4300	4200	3250	2650	30	9	2000	4000	400	4K
	15.3	4700	4450	4300	4200	3250	2650	30	9	2000	4000	330	4H
	18.1	5800	5500	5300	5200	3650	2950	30	9	2000	4000	400	4K
	20.8	4700	4450	4300	4200	3100	2500	30	9	2000	4000	260	4F
	22.7	5600	4900	4400	4400	3600	2950	30	9	2000	4000	330	4H
	24.5	5500	5400	5300	5200	3450	2800	30	9	2000	4000	330	4H
	26.4	4600	3950	3600	3600	3550	2900	30	9	2000	4000	260	4F
	30.8	5600	4900	4400	4400	3600	2950	30	9	2000	4000	260	4F
	35.8	4600	3950	3600	3600	3550	2900	22.4	9	2000	4000	160	4D
	38.4	5600	4900	4400	4400	3600	2900	25.5	9	2000	4000	160	4D
	44.6	4600	3950	3600	3600	3550	2900	18.3	9	2000	4000	160	4D
	55.8	4100	4000	3600	3600	2900	2400	15.2	9	2000	4000	160	4D
	L3	53.4	4700	4450	4300	4200	3250	2650	18.8	7.5	2000	4000	100
63.1		5800	5350	5300	5200	3650	3000	19.4	7.5	2000	4000	160	4D
72.3		4700	4450	4300	4200	3250	2650	14.1	7.5	2000	4000	100	4B
77.2		5800	5500	5300	5200	3650	2950	16.3	7.5	2000	4000	100	4B
90.2		4700	4450	4300	4200	3250	2650	11.4	7.5	2000	4000	100	4B
105		5800	5500	5300	5200	3650	2950	12.3	7.5	2000	4000	100	4B
113		4600	3950	3600	3600	3550	2900	8.7	7.5	2000	4000	100	4B
124		4600	3950	3600	3600	3550	2900	8.0	7.5	2000	4000	50	4A
141		5500	5350	5300	5200	3450	2800	8.9	7.5	2000	4000	100	4B
152		4600	3950	3600	3600	3550	2900	6.7	7.5	2000	4000	50	4A
164		5600	4900	4400	4400	3600	2950	7.7	7.5	2000	4000	50	4A
178		5600	4900	4400	4400	3600	2950	7.2	7.5	2000	4000	50	4A
190		4600	3950	3600	3600	3550	2900	5.5	7.5	2000	4000	50	4A
220		4750	4750	4750	4750	3050	2500	4.9	7.5	2000	4000	50	4A
258		4600	3950	3600	3600	3550	2900	4.1	7.5	2000	4000	50	4A
276		5600	4900	4400	4400	3600	2900	4.6	7.5	2000	4000	50	4A
321		4600	3950	3600	3600	3550	2900	3.3	7.5	2000	4000	50	4A
389		3800	3300	3100	3100	3000	2400	2.2	7.5	2000	4000	50	4A
402		4600	3950	3600	3600	3550	2900	2.6	6	2000	4000	50	4A
L4	413	5600	4900	4400	4400	3600	2900	3.2	6	2000	4000	50	4A
	446	5800	5500	5300	5200	3650	2950	3.1	6	2000	4000	50	4A
	492	5500	5350	5300	5200	3450	2800	2.6	6	2000	4000	50	4A
	556	5800	5500	5300	5200	3650	2950	2.5	6	2000	4000	50	4A
	649	4700	4450	4300	4200	3250	2650	1.7	6	2000	4000	50	4A
	718	4600	3950	3600	3600	3550	2900	1.5	6	2000	4000	50	4A
	816	5500	5350	5300	5200	3450	2800	1.6	6	2000	4000	50	4A
	896	4600	3950	3600	3600	3550	2900	1.2	6	2000	4000	50	4A
	1018	5500	5350	5300	5200	3450	2800	1.3	6	2000	4000	50	4A
	1098	4600	3950	3600	3600	3550	2900	0.99	6	2000	4000	50	4A
	1278	5600	4900	4400	4400	3600	2950	1.0	6	2000	4000	50	4A
	1370	4600	3950	3600	3600	3550	2900	0.79	6	2000	4000	50	4A
	1586	4750	4750	4750	4750	3050	2500	0.71	6	2000	4000	50	4A
	1854	4600	3950	3600	3600	3550	2900	0.59	6	2000	4000	50	4A
	1991	5600	4900	4400	4400	3600	2900	0.67	6	2000	4000	50	4A
2243	3800	3300	3100	3100	3000	2400	0.40	6	2000	4000	50	4A	
2799	3800	3300	3100	3100	3000	2400	0.32	6	2000	4000	50	4A	

M_{2max} = 1.2 · M_{n2} (n₂ · h = 10000)

Tabla 40. Reductor epicicloidial 305 L Bonfiglioli.

3.3.2.3. Dimensiones del reductor

El motor-reductor, como se puede observar en el catálogo del fabricante, puede tener varios mecanismos de entrada y de salida. En este caso, se optará por una forma compacta y que haga que el motor-reductor trabaje verticalmente.

Como se quiere que trabaje verticalmente, se elegirá un reductor con bridas y no con patas. Por lo tanto, se elegirá la salida HC, la cual tiene los orificios para la sujeción mediante tornillos a la grúa.

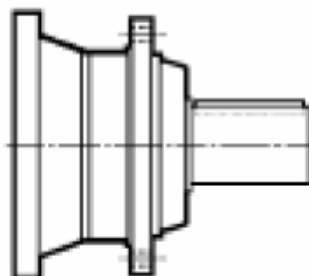


Figura 65. Acoplamiento.

La entrada, por su parte, será un acoplamiento para que el motor se pueda acoplar al reductor. La medida E variará según el tamaño del motor, que se elegirá a continuación.

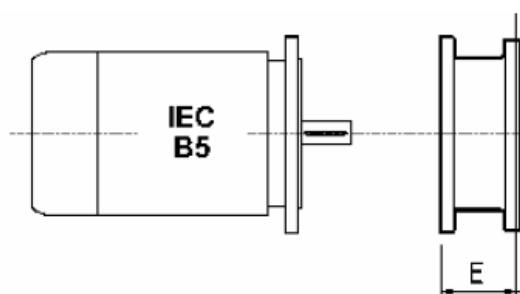


Figura 66. Entrada reductor.

3.3.2.4. Elección del motor

1. Tipo de motor

Se empleará un motor **trifásico asíncrono de anillos rozantes**, ya que son los más utilizados en los accionamientos de las grúas. Son los más baratos, compactos y fiables del mercado aunque la velocidad no se puede regular con exactitud.

El motor además debe venir con freno incorporado.

2. Tipo de servicio

El motor está sometido a un régimen de conexiones y desconexiones que influyen en su calentamiento. Cuando se calcula la potencia del motor, se ha de considerar el tipo de servicio de la máquina. Estos regímenes se agrupan en tipos de servicio según VDE 0530 y se ha de tener en cuenta en la elección del motor.

En este caso, los motores asíncronos de anillos rozantes (incluidos los del polipasto) trabajan con **servicio S3**, es decir, servicio intermitente sin influencia del arranque en la temperatura.

3. Forma constructiva

La forma constructiva escogida es la **B5, con brida sin patas**, para conseguir un conjunto lo más compacto posible con el reductor.

4. Protecciones

Como la grúa se ubicará en un puerto, el motor se protegerá en grado IP 44 y la caja de bornes en grado IP 55, como mínimo.

La primera cifra indica el grado de protección contra el polvo y la penetración de contactos extraños y la segunda indica el grado de protección contra la penetración de agua.

IP 44: Protección absoluta contra contactos y contra cuerpos extraños granulados. Protección contra salpicaduras de agua en todas las direcciones.

IP 55: Protección absoluta contra contactos y contra la acumulación de polvo. Protección contra chorros de agua.

Por otra parte, el motor, al estar situado en vertical, contará con una pequeña cubierta en la parte posterior para protegerlo de la lluvia y cuerpos sólidos.

5. Potencia térmica

En el caso de evaluar el factor de seguridad relativo a la potencia térmica, según el fabricante *Bonfiglioli*, cuando la relación de transmisión del reductor es superior a 45, como es este caso, no hace falta evaluar este término, ya que el factor de seguridad relativo a la potencia mecánica excede siempre al de la potencia térmica.

6. Cálculo de la potencia del motor

Conociendo el par M_{r2} , las revoluciones n_2 y el rendimiento dinámico η_d , se deduce la potencia de entrada:

$$P_{\text{mec}} = P_{r1} = \frac{M_{r3} \cdot n_2}{9550 \cdot \eta_{12}}$$

Siendo la velocidad de salida del motor:

$$n_2 = n_3 \cdot i_{23}$$

7. Selección del motor

Hay que seleccionar en las tablas de datos técnicos de motores un tamaño con una potencia nominal tal que satisfaga:

$$P_n \geq P_{r1}$$

El fabricante recomienda escoger preferiblemente motores de 4 o más polos.

Si no se indica lo contrario, la potencia P_n de los motores indicada en el catálogo está referida al servicio continuo S1. Para motores utilizados en condiciones distintas de S1, será necesario identificar el tipo de servicio previsto con referencia a las Normas CEI 2-3/IEC 34-1. En particular, el servicio de la presente aplicación es S3 – 25%. Por lo tanto, la condición a satisfacer será:

$$P_n \geq P_{r1}/f_m$$

El factor de incremento de la potencia f_m puede extraerse de la tabla siguiente:

	SERVICIO / DUTY / BETRIEB / SERVICE						
	S2			S3*			S4 - S8
	Duración del ciclo / Cycle duration [min] Zyklusdauer / Durée du cycle [min]			Relación de intermitencia / Cyclic duration factor (I) Relative Einschaltdauer / Rapport d'intermittence (I)			
	10	30	60	25%	40%	60%	Contactar Please contact us Rückfrage Nous contacter
f_m	1.35	1.15	1.05	1.25	1.15	1.1	

Tabla 41. Factor de corrección según el tipo de servicio.

Dentro de la columna de 4p se tomará el motor BN 90LA 4.

Además, deberá cumplirse:

$$S = P_{n1}/P_n > f_s = 1,2$$

8. Comprobación de la potencia de arranque

Hay que deducir el momento de las inercias producidas por las masas en movimiento en el eje del motor.

$$I_t = \frac{\sum G_i \cdot r_i^2}{g}$$

Donde:

$$G_1 = Q_{plu}$$

$$G_2 = Q_{plu}'$$

$$G_3 = Q_u + Q_{met}$$

$$G_4 = Q_{con}$$

r_i = distancias a cada una de las cargas.

g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²).

t_a = tiempo de aceleración (2,5 s).

n = velocidad del motor (min⁻¹).

$$\varepsilon = \frac{\pi \cdot n}{30 \cdot t_a}$$

$$P_b = \frac{I_t \cdot \varepsilon \cdot n}{716 \cdot \eta}$$

Se debe cumplir:

$$P_{mec} + P_b < P_n$$

Como el motor BN 90LA 4 no cumple esta última condición, se debe de escoger un motor de potencia superior. En este caso, el motor de potencia inmediatamente superior y que cumple con esta condición es el **BN 180M 4**.

3.3.2.5. Resolución de cálculos motor-reductor

MOTOR-REDUCTOR

Solicitud sobre la corona

F_{vpluA}	2131,95	N
$L'_{plu}/2$	4,25	m
$F_{vplu'A}$	1273,22	N
L'_{con}	2,75	m
F_{vcA}	981,00	N
L_{plu}	8,00	m
F_{vcon}	858,38	N
L_{con}	4,90	m
$M_v = T_v = F_{vpluA} \cdot (L_{plu}'/2) + F_{vcA} \cdot L_{plu} - F_{vplu'A} \cdot L'_{con} - F_{vconA} \cdot L_{con}$	9201,37	N·m

μ (coeficiente de rozamiento para rodameinto KD 600)	0,006	
M_k (par de vuelco resultante)	702900,00	N·m
F_a (carga axial)	271590,00	N
D_L (diámetro de rodadura del rodamiento)	1,26	m
$M_r = \mu/2 \cdot (4,4 \cdot M_k + F_a \cdot D_L)$	10300,82	N·m

$M_{giro} = M_v + M_r$	19.502,19	N·m
------------------------	------------------	------------

Elección del reductor

Reductor epicicloidial de 4 etapas BONFIGLIOLI

1) Cálculo de la relación de reducción

n_3	0,60	min^{-1} (rpm)
n_1	1400,00	min^{-1} (rpm)
$i_{13} = n_1/n_3$	2333,33	
z_3	113,00	
z_2 ($20 < z_2 < 21$)	20,00	
$i_{23} = z_3/z_2$ ($1 < i_{23} < 10$)	5,65	
$i_{12} = i_{13}/i_{23}$	412,98	

2) Momento de cálculo del reductor

2.1) Factor de marcha

z_r (TABLA)	150,00	c/h
---------------	---------------	-----

2.2) Factor de servicio

f_s (TABLA)	1,20	
---------------	-------------	--

2.3) Par de cálculo

η_{23}	0,98	
η_{23} (4 etapas)	0,90	
$M_{r2} = M_3/(i_{23} \cdot \eta_{23}) = M_{giro}/(i_{23} \cdot \eta_{23})$	3522,16	N·m

$M_{c2} = f_s \cdot M_{r2}$	4226,59	N·m
---	----------------	------------

2.4) Factor de duración

Vida esperada de la grúa	6000,00	h
$n_2 = n_1/i_{12}$	3,39	

$F_{h2} = n_2 \cdot h$	20.340,00	h
--	------------------	----------

3) Selección del reductor

M_{n2} (TABLA interpolando)	5117,47	N·m
i_{12} (TABLA)	413,00	

$M_{c2} \leq M_{n2} \checkmark$

Elección del motor

1) Tipo de motor

Motor trifásico asíncrono de anillos rozantes con freno incorporado

2) Tipo de servicio

Servicio S3

3) Forma constructiva

B5, con brida sin patas

4) Protecciones

Motor	IP 44
Caja de bornes	IP 55

5) Potencia térmica

Como $i > 45$, no es necesario calcularla

6) Cálculo de la potencia del motor

M_{r2}	3522,16	N·m
$n_2 = n_3 \cdot i_{23}$	3,39	
η_{12}	0,90	

$P_{mec} = P_{r1} = M_{r2} \cdot n_2 / 9550 \cdot \eta_{12}$ (potencia de arranque)	1,39	kW
---	-------------	-----------

7) Selección del motor

f_m (TABLA)	1,25	
P_{r1}/f_m	1,11	kW

$$P_n \geq P_{r1}/f_m$$

P_{n1} (TABLA) (potencia motor)	1,50	kW
-----------------------------------	-------------	-----------

$S = P_{n1}/P_n$	1,35
------------------	-------------

$$S \geq f_s = 1,2 \checkmark$$

8) Comprobación de la potencia de arranque

$G_1 = Q_{plu}$	20345,94	N
$L'_{plu}/2$	4,25	m
$G_2 = Q_{plu}'$	13165,02	N
L'_{con}	2,75	m
$G_3 = Q_u + Q_{met}$	87799,50	N
L_{plu}	8,00	m
$G_4 = Q_{con}$	68670,00	N
L_{con}	4,90	m
g	9,81	m/s ²

$I_t =$	788.480,50
---------	------------

t_a	2,50	s
n_3	0,60	min ⁻¹
$\varepsilon = \pi \cdot n / 30 \cdot t_a$	0,03	

η (TABLA)	0,88	
$P_b = I_t \cdot \epsilon \cdot n / 716 \cdot \eta$ (potencia necesaria)	18,87	CV
	13,88	kW
$P_{mec} + P_b$	15,27	kW
$P_{motor} \geq P_{mec} + P_b$ ✗		
P_{n1} (TABLA) (potencia motor)	18,50	kW
$S = P_{n1} / P_n$	16,65	
$S \geq f_s = 1,2$ ✓		
$P_{motor} \geq P_{mec} + P_b$ ✓		

3.3.3. Acoplamiento flexible

Se ha dispuesto un acoplamiento flexible entre el motor-reductor y el piñón de giro. La función del acoplamiento es amortiguar los choques de arranques y frenazos del motor, garantizar la posición relativa de los extremos del árbol en cualquier condición y dilataciones en los bastidores a causa de diferencias de temperatura.

Se ha escogido un acoplamiento flexible dentado o de dientes abombados con unas dimensiones bastante reducidas.

Es capaz de compensar desalineaciones de hasta 1,5°.

Se compone básicamente de cuatro elementos: aros exteriores, cubos, retenes y anillos elásticos.

Para seleccionar el tamaño más idóneo, se procede de la siguiente manera, según catálogo del fabricante *Escogear*:

- a) Determinar el tipo de *Escogear* cuyo mecanizado máximo sea igual o superior al diámetro del mayor eje que se vaya a acoplar.
- b) Verificar la selección en función del par a transmitir y según la fórmula:

$$T \text{ (N}\cdot\text{m)} = \frac{9550 \cdot P \cdot F_u}{n}$$

Siendo:

P = potencia (kW).

n = velocidad de giro (rpm).

F_u = factor de servicio determinado por el tipo de accionamiento (ver tabla 43).

APLICACIONES		MÁQUINA MOTRIZ		
		Motores eléctricos, Turbinas	Motores hidráulicos Arrastre por engranajes	Mot. de explosión Mot. eléctricos con arranques frecuentes
MÁQUINA RECEPTORA	CARGAS UNIFORMES	0,8 hasta 1,25	1 hasta 1,5	1,25 hasta 1,75
	CHOQUES MODERADOS	1,25 hasta 1,5	1,5 hasta 1,75	1,75 hasta 2
	CHOQUES IMPORTANTES	1,5 hasta 2	1,75 hasta 2,25	2 hasta 2,5

Tabla 43. Factor de servicio acoplamiento.

Por lo tanto:

$$T \text{ (N}\cdot\text{m)} = \frac{9550 \cdot 18,5 \cdot 2}{0,6} = 588.916,67 \text{ N}\cdot\text{m}$$

3.3.4. Cálculo del piñón de giro

3.3.4.1. Introducción

La transmisión del engranaje es del tipo ejes paralelos con una relación entre 1 y 8. Se trata de un engranaje simple interior.

El uso de servicio de la transmisión se puede definir como engranaje para mecanismo general, de choques moderados y factor de seguridad normal. El número de dientes del piñón z_1 será de valor 20 en vistas de conseguir una reducción lo más elevada posible.

El proveedor del rodamiento proporciona una corona con un módulo de valor:

$$m_0 = 10$$

En la misma línea, también se ha escogido un ancho de diente igual al de la corona. De esta manera, se asegura un recubrimiento correcto y se minimizan los esfuerzos en la base del diente.

La mecanización de la corona se realizará con un desplazamiento x según DIN 3960:

$$x = -0,5 \cdot m$$

Según el catálogo del proveedor del rodamiento, para materiales normalizados y tratados térmicamente, como en el caso del aro dentado, se toman los siguientes valores de tensión admisible:

Tensión flectora admisible material	
Carga normal	130 N/mm ²
Carga máxima	260 N/mm ²

Tabla 44. Tensión flectora admisible piñón acoplado.

El engranaje de giro se fabricará en acero de cementación F-1516 (de dureza 217 HB y resistencia a la tracción 720 MPa). Esto le permite soportar solicitaciones de choques moderadas y factor de seguridad normal. La precisión ISO será como mínimo de 6.

3.3.4.2. Dimensionamiento geométrico del piñón de giro

La geometría del piñón de ataque viene determinada por las características de los dientes de la corona inferior del rodamiento de giro, con los siguientes valores:

$$\alpha_0 = 20^\circ$$

$$m_0 = 10$$

Como el engranaje va a ser de dientes rectos, la relación entre la corona y el piñón de ataque ha de estar entre:

$$1 < i_{23} < 10$$

El número de dientes de la corona es de 113. Por el tipo de engranaje, el número de dientes del piñón tiene que estar entre 20 y 21. En este caso, se toma 20 para conseguir una relación de reducción lo más alta posible. Por tanto, la relación de transmisión entre el piñón y la corona será:

$$i_{23} = z_3/z_2$$

Los conceptos y relaciones geométricas referidos a engranajes rectos cilíndricos exteriores son enteramente válidos para los interiores. Solo se tienen que tener en cuenta dos cosas:

- El número de dientes de la corona se debe de considerar negativo. Por este motivo, la distancia entre ejes y los diámetros de la corona son negativos.
- El desplazamiento de la herramienta durante la construcción de la corona hacia la cabeza se considera de sentido positivo.

En cuanto a las interferencias, los engranajes cilíndricos interiores presentan diferencias:

- Interferencia primaria: La zona del pie del diente de la rueda ha de tener suficiente flanco de envolvente para engranar con la cabeza de la otra. Es una condición crítica en engranajes cilíndricos interiores.
- Interferencia secundaria: Sucede al engranar un piñón de diámetro próximo al de la corona y consiste en la interferencia de las cabezas de las dos ruedas en la zona alejada del engrane. Para evitarlo, se recomienda que la diferencia de dientes entre la corona y el piñón sea superior al valor dado por la expresión:

$$z_3 - z_2 \geq [z_3 - z_2]_{\text{lím}} = \frac{h_a}{m_0} (64,5 - 3 \cdot \alpha + 0,054 \cdot \alpha^2)$$

$$z_3 - z_2 = 113 - 20 = 93$$

$$[z_3 - z_2]_{\text{lím}} = \frac{h_a}{m_0} \cdot (64,5 - 3 \cdot \alpha + 0,054 \cdot \alpha^2) = \frac{h_a}{m_0} = \frac{15}{10} \cdot (64,5 - 3 \cdot 20 + 0,054 \cdot 20^2) = 39,15 \text{ mm}$$

Como se cumple la condición anterior, no se dará interferencia secundaria.

Se considerará un desplazamiento de la corona de $x_2 = -0,5$ y, por consiguiente, el desplazamiento del piñón será $x_1 = 0$.

Como ya se comentó antes, el desplazamiento positivo de los engranajes interiores es hacia el centro de la rueda, al revés que en los engranajes exteriores. De esta forma, se han de considerar de sentido opuesto para poder emplear la formulación de engranajes cilíndricos de dientes rectos.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros geométricos y de funcionamiento de la transmisión mediante engranajes cilíndricos rectos:

Parámetros	Piñón (1)	Rueda (2)
De generación		
Relación de transmisión	$i = z_2/z_1 = d_2/d_1 = d_{b2}/d_{b1} = d_2'/d_1'$	
Ángulo de presión	$\alpha_n = \alpha_0$ (normal); $\text{tg}\alpha_t = \text{tg}\alpha_0/\cos\beta$ (transversal)	
Ángulo de inclinación	β	
Número de dientes	z_1	z_2
Diámetro primitivo	$d_1 = z_1 \cdot m_0$	$d_2 = z_2 \cdot m_0$
Desplazamiento	$x_1 \cdot m_0$	$x_2 \cdot m_0$
De definición		
Diámetro de base	$d_{b1} = z_1 \cdot m_0 \cdot \cos\alpha_0$	$d_{b2} = z_2 \cdot m_0 \cdot \cos\alpha_0$
Paso de base (transversal)	$p_{bt} = \pi \cdot m_0 \cdot \cos\alpha_0$	$p_{bt} = \pi \cdot m_0 \cdot \cos\alpha_0$
Espesor de base (transversal)	$s_{b1} = (\pi \cdot m_0)/2 + 2 \cdot x_1 \cdot m_0 \cdot \text{tg}\alpha_0$	$s_{b2} = (\pi \cdot m_0)/2 + 2 \cdot x_2 \cdot m_0 \cdot \text{tg}\alpha_0$
Altura de cabeza	$h_{a1} = m_0 \cdot (1 + x_1)$	$h_{a2} = m_0 \cdot (1 + x_2)$
Juego circunferencial	$j = 0,25 \cdot m_0$	$j = 0,25 \cdot m_0$
Altura de pie	$h_{f1} = m_0 \cdot (1,25 - x_1)$	$h_{f2} = m_0 \cdot (1,25 - x_2)$
Altura total	$h_1 = h_{a1} + h_{f1}$	$h_2 = h_{a2} + h_{f2}$
Diámetro de cabeza	$d_{a1} = d_1 + 2 \cdot h_{a1}$	$d_{a2} = d_2 + 2 \cdot h_{a2}$
Diámetro de pie	$d_{f1} = d_1 - 2,5 \cdot m_0$	$d_{f2} = d_2 - 2,5 \cdot m_0$
Distancia nominal	$d_0 = m \cdot (z_1 + z_2)$	
Distancia de tallado	$d_c = d_0 \cdot (1 + B)$	
	$B = 2 \cdot (x_1 + x_2) / (z_1 + z_2)$	
De funcionamiento		
Ángulo de funcionamiento	$\arccos\alpha_v = \cos\alpha_0 / (B_v + 1)$	
	$B_v = B / (1 + 13 \cdot B)^{1/4}$	
Distancia de funcionamiento	$a' = (d_{b1} + d_{b2}) / (2 \cdot \cos\alpha_v)$	
Radio polar	$R' = (d \cdot \cos\alpha_0) / (2 \cdot \cos\alpha_v)$	
Recubrimiento frontal	$\epsilon_a = \frac{z_1}{2\pi} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{d_{a1}}{d_{b1}}\right)^2 - 1} - \text{tg}\alpha_v \right] + \frac{z_2}{2\pi} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{d_{a2}}{d_{b2}}\right)^2 - 1} - \text{tg}\alpha_v \right]$	
Diámetro de funcionamiento	$d_1' = d_{b1} / \cos\alpha_v$	$d_2' = d_{b2} / \cos\alpha_v$
Juego de pie	$c_1 = a' - (d_{a1} + d_{f2}) / 2 \geq 0,25 \cdot m_0$	$c_2 = a' - (d_{a2} + d_{f1}) / 2 \geq 0,25 \cdot m_0$

Tabla 45. Formulario de engranajes cilíndricos rectos.

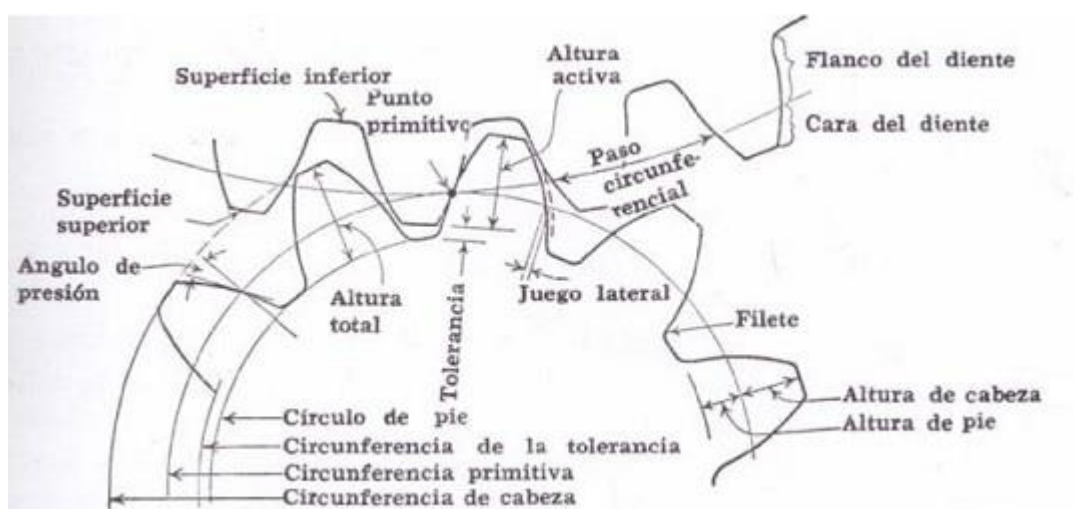


Figura 67. Nomenclatura engranajes de dientes rectos.

3.3.4.3. Comprobaciones

El fallo en un engranaje se puede dar por dos causas: la primera, rotura del diente por exceso de sollicitaciones flectoras (fallo catastrófico) y, la segunda, excesivo desgaste en los flancos del diente (fallo progresivo).

1. Comprobación a fatiga en el pie del diente (fórmula de Lewis)

La normativa de cálculo de los engranajes cilíndricos es la norma ISO 6336.

Se debe comprobar que los dientes de los engranajes resisten las tensiones a las que están sometidos.

La sollicitación en el pie del diente es:

$$\sigma_F = \sigma_{F0} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\beta} = \frac{F_t}{b \cdot m_0} \cdot Y_F \cdot Y_\varepsilon \cdot Y_\beta \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\beta}$$

Donde:

σ_{F0} = tensión nominal en la base del diente, que se corresponde con el máximo de la tensión principal en la base del diente cuando una pareja de engranajes libre de errores se carga con el par nominal y sin ningún valor de tensión previo.

Como se aprecia, la tensión final depende de diversos coeficientes que deben determinarse y que están en relación con distintos factores, tanto de diseño como de servicio.

Fuerza tangencial (F_t): Componente tangencial de la fuerza de contacto del piñón y la corona.

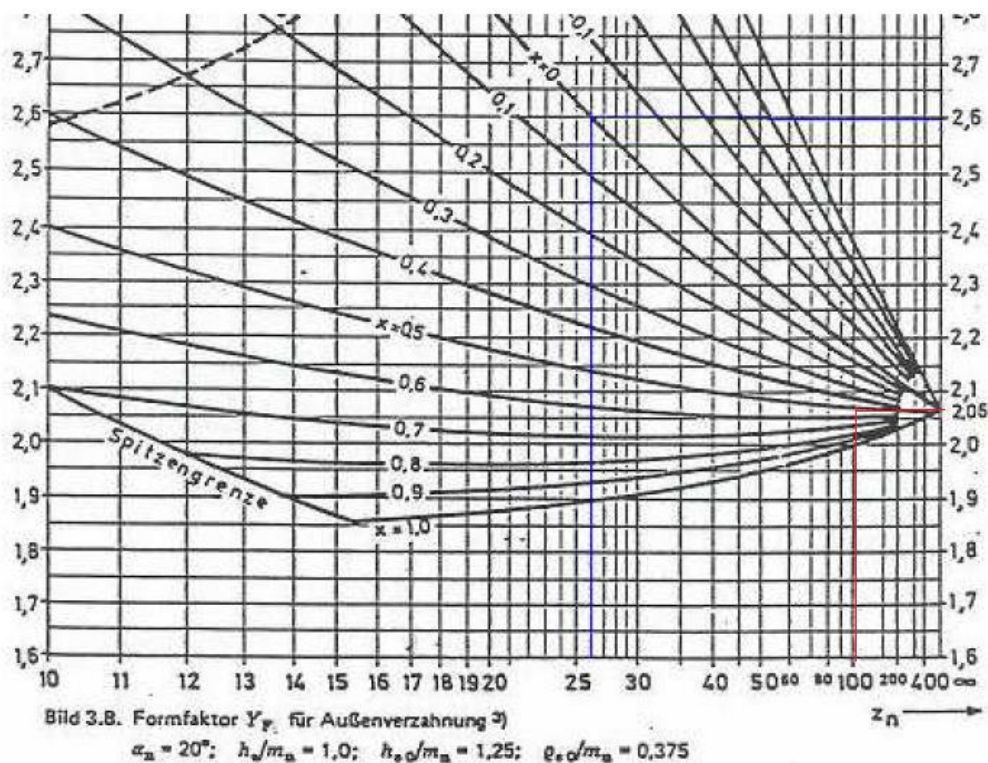
El momento torsor total, M_{giro} , que transmite la corona fue calculado antes en el apartado correspondiente al conjunto motor-reductor.

$$F_t = \frac{M_{\text{giro}}}{\frac{d'_2}{2}}$$

Hay que señalar que el diámetro primitivo empleado es el de la corona, ya que el momento torsor anterior es el que se aplica sobre la corona.

Factor de forma (Y_F): Tiene en cuenta la influencia de la forma de la base del diente en la tensión nominal en la base del diente con la carga aplicada en el punto más externo del contacto entre dientes. Dicho factor es función del número de dientes, del coeficiente de desplazamiento y del ángulo de presión normal. En consecuencia, es distinto para piñón y corona.

Se utiliza el gráfico procedente de la DIN 3990.



Gráfica 8. Factor de forma Y_F .

Dentado del piñón: para $x_1 = 0$ y $z_1 = 20$, se obtiene $Y_{F1} = 2,8$.

Dentado de la corona: para $x_1 = 0,5$ y $z_1 = 113$, se obtiene $Y_{F1} = 2,07$.

Coefficiente de recubrimiento (Y_ε): Este factor es el inverso del recubrimiento frontal y, por lo tanto, es el mismo para el piñón y la corona.

$$Y_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_\alpha}$$

$$\varepsilon_\alpha = \varepsilon_a = \frac{z_1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{d_{a1}}{d_{b1}}\right)^2 - 1} - \operatorname{tg} \alpha_v \right] + \frac{z_2}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{d_{a2}}{d_{b2}}\right)^2 - 1} - \operatorname{tg} \alpha_v \right]$$

Coefficiente para engranajes helicoidales (Y_β): Compensa el hecho de que la intensidad del momento flector en la base del diente de engranajes helicoidales es, como consecuencia de la oblicuidad de la línea de contacto, menor al correspondiente para el caso de engranajes rectos. Este coeficiente depende del

ángulo de inclinación primitivo β_0 , es decir, sólo se aplica en caso de engranajes helicoidales.

En caso de engranajes de dientes rectos, $Y_\beta = 1$.

Factor de aplicación o servicio (K_A): Este factor tiene en cuenta los incrementos de carga debidos a influencias externas sobre el par de entrada o de salida.

Working characteristic of driving machine	Working characteristic of driven machine			
	Uniform	Light shocks	Moderate shocks	Heavy shocks
Uniform	1,00	1,25	1,50	1,75
Light shocks	1,10	1,35	1,60	1,85
Moderate shocks	1,25	1,50	1,75	2,00
Heavy shocks	1,50	1,75	2,00	$\geq 2,25$

Tabla 46. Factor de aplicación K_A .

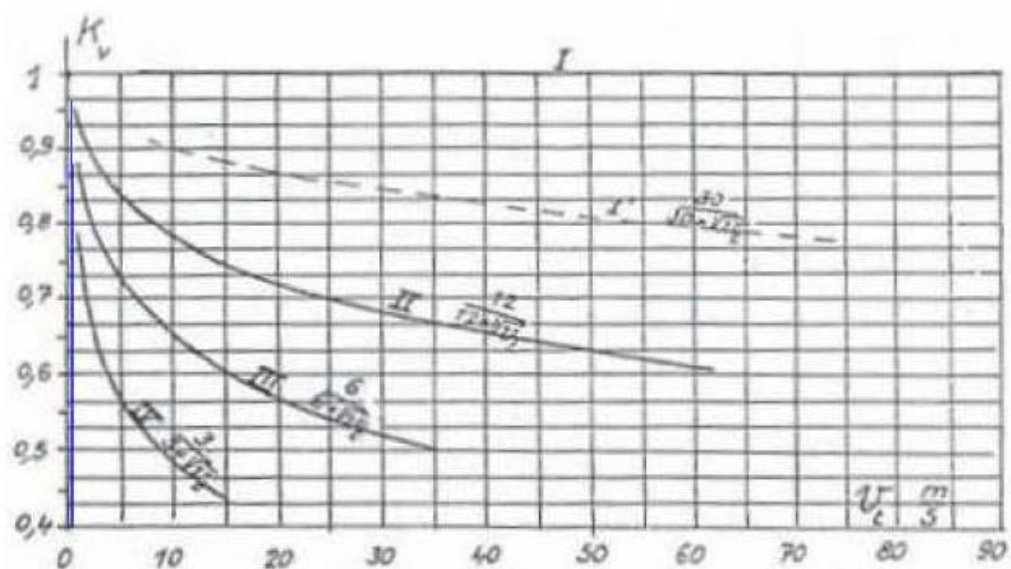
Se considerará un servicio uniforme, con lo que resulta un factor de servicio $K_A = 1$.

Factor dinámico o de velocidad (K_V): Este factor tiene en cuenta los incrementos de carga debidos a efectos internos dinámicos que aparecen entre los dientes de los engranajes por la transmisión irregular de velocidad que en realidad se produce debido a las imperfecciones de los engranajes reales y por la deformación de los dientes bajo la carga transmitida.

K_V depende de la calidad ISO del engranaje y de la velocidad tangencial del engranaje.

Curva	Calidad ISO
I	Hasta 4
I'	5 con buenas condiciones de montaje
II	5 y 6
III	7, 8 y 9
IV	10 y más

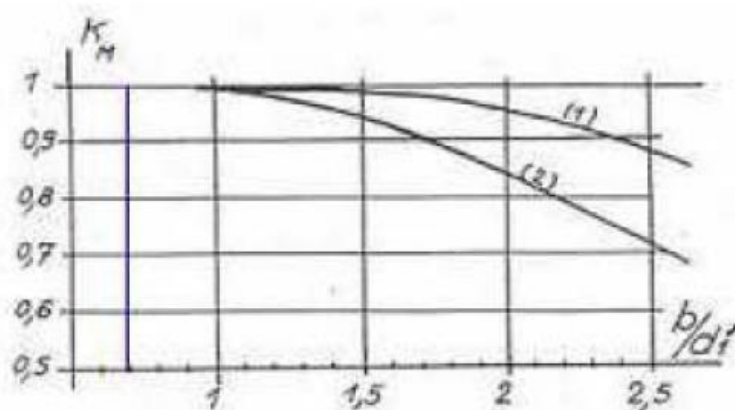
Tabla 47. Tipo de curva según la calidad ISO.



Gráfica 9. Factor de velocidad K_v .

Con una velocidad tangencial $v_t = 0,032$ m/s (velocidad nominal), resulta un factor de velocidad $K_v = 1$.

Factor de distribución de carga ($K_{F\beta}$): Este factor tiene en cuenta el efecto de la desigual distribución de carga a lo largo del ancho de cara sobre la tensión que se genera en la base del diente. El valor de $K_{F\beta}$ depende de la relación entre la anchura de los dientes y el diámetro de funcionamiento y de si los dientes tienen los extremos abombados para evitar concentraciones excesivas de carga en los extremos.



Gráfica 10. Factor de distribución de carga $K_{F\beta}$.

La gráfica de la normativa indica, tanto para la corona como para el piñón, un valor de $K_{H\beta} = 1$.

Sustituyendo los valores citados en la ecuación de sollicitación en el pie del diente, se obtienen las tensiones en el pie de los dientes del piñón y de la corona.

Para el piñón:

$$\sigma_{F1} = \sigma_{F0} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\beta} = \frac{F_t}{b \cdot m_0} \cdot Y_{F1} \cdot Y_\varepsilon \cdot Y_\beta \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\beta}$$

Para la corona:

$$\sigma_{F2} = \sigma_{F0} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\beta} = \frac{F_t}{b \cdot m_0} \cdot Y_{F2} \cdot Y_\varepsilon \cdot Y_\beta \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\beta}$$

A continuación se debe comprobar que las sollicitaciones producidas son inferiores a las máximas admisibles por los engranajes.

La resistencia a la fatiga en el pie del diente es también dependiente de diversos factores que disminuyen la resistencia teórica del material de construcción de los engranajes.

La expresión de cálculo es:

$$\sigma_{FG} = \sigma_{Flím} \cdot Y_{ST} \cdot Y_{NT} \cdot Y_{\delta relT} \cdot Y_{RrelT} \cdot Y_X$$

Los parámetros de esta fórmula se explican a continuación:

Resistencia a la fatiga en el pie del diente ($\sigma_{Flím}$): Es el valor de referencia de la tensión admisible. Esta resistencia depende del material del engranaje y de la resistencia a tracción en el núcleo del diente y se obtiene a partir de la gráfica en función de la resistencia a la tracción y del tipo de material empleado.

Tiene en cuenta la influencia del material, del tratamiento térmico, de la rugosidad superficial...

Se va a seleccionar un engranaje de acero de cementación F-1516 (16 Mn Cr 15).

Núm.	Grupo de materiales	Símbolos, según DIN	Estado de tratamiento	Valores de dureza en la rueda dentada		Valores de resistencia a la fatiga para Ten. en pie de diente/ carg. pol. $\sigma_{\text{H}} / \text{N/mm}^2$		Resisten. estática para el pie del diente $\sigma_{\text{H}} / \text{N/mm}^2$
				Material del núcleo	Superficie de los flancos	Presión de Hertz $\sigma_{\text{H}} / \text{N/mm}^2$	Ten. en pie de diente/ carg. pol. $\sigma_{\text{H}} / \text{N/mm}^2$	
1	Hierro fundido con grafito laminar, según DIN 1691	GG 20	-	HB = 170	HB = 170	270	50	200
2		GG 25		HB = 210	HB = 210	310	60	250
3		GG 35		HB = 230	HB = 230	360	80	350
4	Hierro fundido con grafito esferoidal, según DIN 1693	GGG 42	-	HB = 170	HB = 170	360	200	800
5		GGG 60		HB = 250	HB = 250	490	220	1000
6		GGG 80		HB = 275	HB = 275	560	230	1200
7		GGG 100		HB = 300	HB = 300	610	240	1300
8	Fundición maleable negra, según DIN 1692	GTS 35	-	HB = 140	HB = 140	360	190	800
9		GTS 45		HB = 235	HB = 235	490	230	1000
10	Acero fundido, según DIN 1681	GS 52	-	HB = 150	HB = 150	340	150	470
11		GS 60		HB = 175	HB = 175	420	170	520
12	Aceros de construcción en general, según DIN 17100	St 42	-	HB = 125	HB = 125	290	170	450
13		St 50		HB = 150	HB = 150	340	190	550
14		St 60		HB = 180	HB = 180	400	200	650
15		St 70		HB = 208	HB = 208	460	220	800
16	Aceros para bonificación, según DIN 17200	Ck 22	Bonificados	HV 10 = 140	HV 10 = 140	440	170	600
17		Ck 45	Normalizados	HV 10 = 185	HV 10 = 185	590	200	800
18		Ck 60	Bonificados	HV 10 = 210	HV 10 = 210	620	220	900
19		34 Cr 4	Bonificados	HV 10 = 260	HV 10 = 260	650	260	900
20		37 Cr 4	Bonificados	HV 10 = 290	HV 10 = 280	650	270	950
21		42 Cr Mo 4	Bonificados	HV 10 = 280	HV 10 = 280	670	290	1100
22		34 Cr Ni Mo 6	Bonificados	HV 10 = 310	HV 10 = 310	770	320	1300
23			Ck 45	Templados	HV 10 = 220	HV 10 = 500	1100	270
24	Aceros para bonificación, según DIN 17200 templados por flama o por inducción	37 Cr 4	postéricamente	HV 10 = 270	HV 10 = 610	1280	310	1150
25		42 Cr Mo 4	incluida la base del diente	HV 10 = 275	HV 10 = 650	1380	350	1300
26	Aceros para bonificación, según DIN 17200 nitrurados	Ck 45	Nitr. baño	HV 10 = 220	HV 1 = 400	1100	350	1100
27		42 Cr Mo 4	Nitr. baño	HV 10 = 275	HV 1 = 500	1220	430	1450
28		42 Cr Mo 4	Nitr. gas	HV 10 = 275	HV 1 = 550	1230	430	1450
29	Aceros de nitruración, según hoja de materiales hierro y acero 850-60	31 Cr Mo V 9	Nitrurados con gas	HV 10 = 320	HV 1 = 700	1400	445	1500
30	Aceros de cementación, según DIN 17210	C 15	Cementados templados	HV 10 = 190	HV 1 = 720	1600	230	900
31		16 Mn Cr 5		HV 10 = 270	HV 1 = 720	1630	460	1400
32		20 Mn Cr 5		HV 10 = 330	HV 1 = 720	1630	480	1500
33		20 Mo Cr 4		HV 10 = 270	HV 1 = 720	1630	400	1300
34		15 Cr Ni 8		HV 10 = 310	HV 1 = 720	1630	500	1600
35		18 Cr Ni 8		HV 10 = 400	HV 1 = 740	1630	500	1700
36		17 Cr Ni Mo 6		HV 10 = 400	HV 1 = 740	1630	500	1700
37	Materiales en capas de Durplat	Tejidos endurecidos bastos	Para marcha contra ruedas de acero templadas, mecanización fina, lubricación con aceite $\leq 60^\circ\text{C}$, velocidad periférica $v \leq 5 \text{ m/s}$			110	50	
38		Tejidos endurecidos finos				130	60	

Tabla 48. Materiales más usuales en el diseño de engranajes.

Factor de corrección de la tensión (Y_{ST}): Está relacionado con las dimensiones de los engranajes de referencia que se emplean en los test. Los valores límite para la tensión en la base del diente para los materiales, de acuerdo con la norma ISO

6336, se obtuvieron en una serie de test en los que se emplearon engranajes de referencia para los cuales $Y_{ST} = 2$ o se recalcularon los resultados para ese valor del factor. De este modo, el valor del factor es siempre $Y_{ST} = 2$.

Factor de vida o duración (Y_{NT}): La fatiga admisible disminuye al aumentar el número de ciclos, aunque para el acero existe un número de ciclos a partir del cual la fatiga se mantiene constante. Se tomará el valor más desfavorable que corresponde a un número de ciclos superior a 10^9 .

Para calcular el factor Y_{NT} se debe identificar a cuál de los cuatro grupos que a continuación se explican pertenece el material con el que se ha fabricado el engranaje. A continuación, se busca en la gráfica la curva correspondiente al grupo seleccionado y, de ese modo, fijando el número de ciclos de trabajo que se quiere que soporte el engranaje (eje X de la gráfica), se obtiene el valor del factor Y_{NT} en el eje Y.

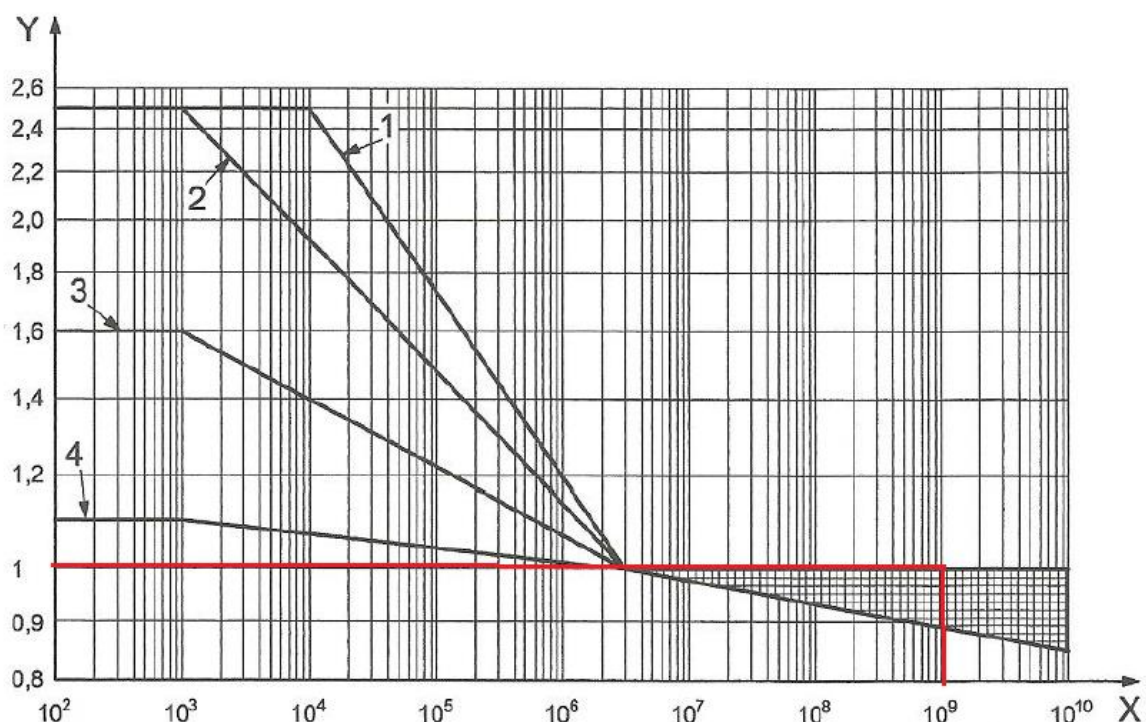
Los cuatro posibles grupos de materiales son:

- Grupo 1:
 - St: acero normalizado forjado de bajo contenido en carbono.
 - V: aleaciones de acero templado revenido y forjado.
 - GGG (perl., bai.): acero nodular procedente de colada.
 - GTS (perl.): fundiciones negras.

- Grupo 2:
 - **Eh: acero cementado y forjado.**
 - IF (root): acero forjado endurecido con llama o por inducción.

- Grupo 3:
 - GG: acero gris procedente de colada.
 - GGG (ferr.): acero nodular procedente de colada.
 - NT: acero nitrurado.
 - NV (nitr.): acero nitrurado templado y revenido.

- Grupo 4:
 - NV (nitrocar.): acero nitrocarburado templado y revenido.

**Key**X number of load cycles, N_L Y life factor, Y_{NT}

1 GTS (perl.), St, V, GGG (perl. bai.)

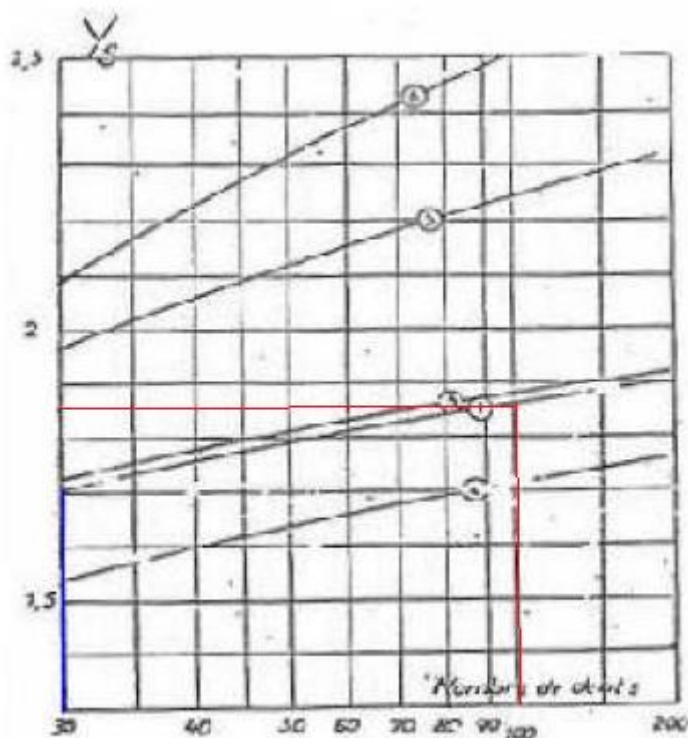
2 Eh, IF (root)

3 NT, NV (nitr.), GGG (ferr.), GG

4 NV (nitrocar.)

Gráfica 11. Factor Y_{NT} .

Factor relativo de sensibilidad de la entalla ($Y_{\delta_{relT}}$): Este valor corresponde a la relación entre el límite a fatiga pulsante de una probeta sin entallar y del diente del engranaje. La grafica da el valor de $Y_{\delta_{relT}}$ en función del número de dientes y para diversas cremalleras generatrices.

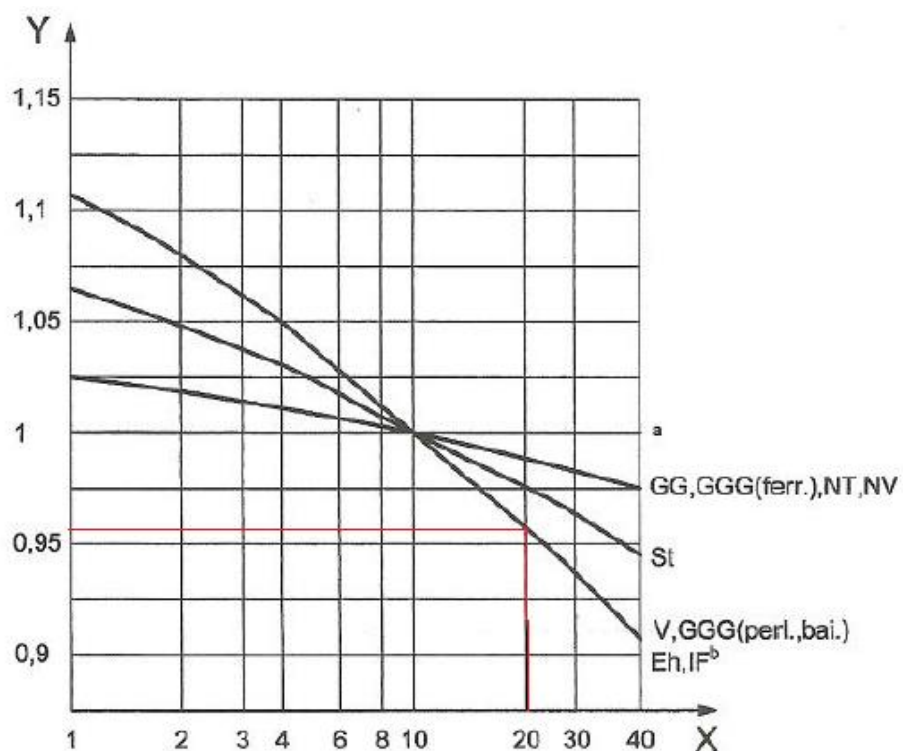


Gráfica 12. Factor de concentración de tensiones $Y_{\delta rel T}$.

La cremallera utilizada para tallar el piñón será la cremallera normalizada, de $h_{f0} = 1,25 \cdot m_0$ y $\alpha_0 = 20^\circ$, es decir la curva 1; y el número de dientes del piñón es $z_1 = 20$, por tanto, $Y_{\delta rel T} = 1,5$.

Para la corona: $z_2 = 113$, por tanto, $Y_{\delta rel T} = 1,85$.

Factor relativo de superficie (Y_{RrelT}): Tiene en cuenta la influencia de la rugosidad superficial en el radio de acuerdo del diente. El valor de este factor se obtiene de la gráfica que se muestra a continuación, en función de la rugosidad superficial R_z expresada en μm de la rueda dentada y del material en que esté fabricada.

**Key**

X roughness, R_z , μm
 Y relative surface factor, Y_{RrelT}

NOTE See ISO 6336-1:2006, Table 2, for an explanation of the abbreviations used.

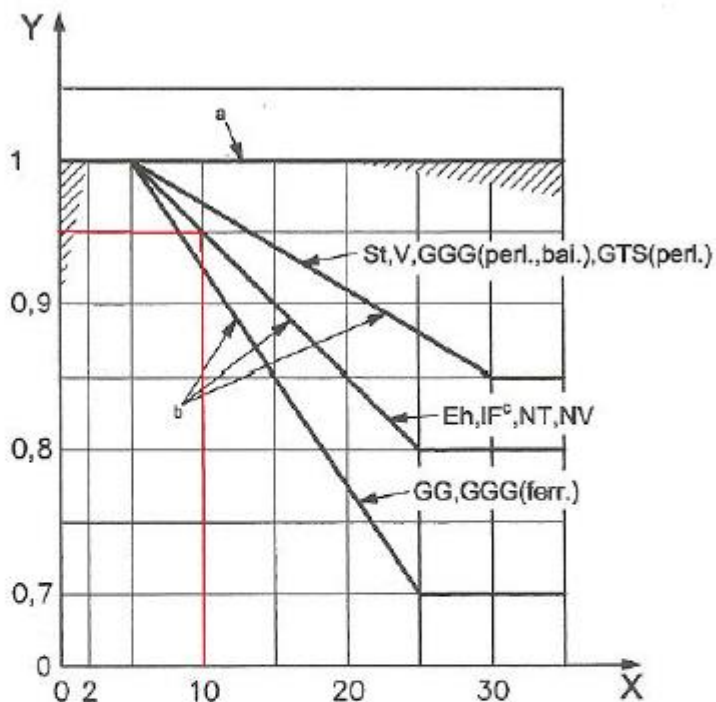
^a For static stress and all materials.

^b (root).

Gráfica 13. Factor Y_{RrelT} .

Factor de tamaño (Y_x): Está relacionado con la resistencia en la base del diente. Se usa para tener en cuenta la influencia de las dimensiones del diente en la resistencia a flexión del diente. El valor de este factor se obtiene de la gráfica 15 como función del módulo de la rueda dentada expresado en mm, del material y del tratamiento térmico. Los diferentes materiales y tratamientos térmicos y las siglas empleadas para determinarlos son las ya empleadas anteriormente.

Los valores que se recogen en la gráfica están basados en ensayos llevados a cabo sobre engranajes estándar de diferentes dimensiones y con diferentes valores de la resistencia a flexión.

**Key**X normal module, m_n , mmY size factor, Y_X

NOTE 1 See ISO 6336-1:2006, Table 2, for an explanation of the abbreviations used.

NOTE 2 Shaded area is in the range of scatter for static stress.

a Static stress (all materials).

b Reference stress.

c (root).

Gráfica 14. Factor de tamaño Y_X .

Sustituyendo todos los valores en la ecuación se obtiene la resistencia a la fatiga en el pie del diente del piñón y de la corona.

Para el piñón:

$$\sigma_{FG1} = \sigma_{Flim} \cdot Y_{ST1} \cdot Y_{NT} \cdot Y_{\delta relIT} \cdot Y_{RrelIT} \cdot Y_X$$

Para la corona:

$$\sigma_{FG2} = \sigma_{Flim} \cdot Y_{ST2} \cdot Y_{NT} \cdot Y_{\delta relIT} \cdot Y_{RrelIT} \cdot Y_X$$

El paso siguiente es comprobar que estos valores son superiores a las sollicitaciones a las que están sometidos los dientes durante el funcionamiento de la transmisión.

$$\sigma_{FG1} > \sigma_{F1}$$

$$\sigma_{FG2} > \sigma_{F2}$$

Si se cumplen estas dos condiciones, el dentado de la corona y del piñón está bien dimensionado en lo que respecta a la fatiga en el pie del diente.

Ahora se debe calcular el coeficiente de seguridad frente a fallo por flexión en la base del diente.

Se debe calcular por separado el coeficiente de seguridad frente al fallo por flexión en la base del diente para el piñón y para la rueda de la pareja de ruedas dentadas, y el mínimo de los dos valores será el coeficiente de seguridad frente al fallo por flexión en la base.

Las expresiones que se deben emplear para calcular los coeficientes de seguridad son las que se muestran a continuación:

$$S_{F1} = \frac{\sigma_{FG1}}{\sigma_{F1}} > S_{Fmín}$$

$$S_{F2} = \frac{\sigma_{FG2}}{\sigma_{F2}} > S_{Fmín}$$

Donde:

S_{Fi} = valor calculado del coeficiente de seguridad de piñón y rueda.

σ_{FGi} = valor admisible de la tensión de flexión en la base del diente.

σ_{Fi} = valor de la tensión a que está sometida la base del diente.

$S_{Fmín}$ = valor mínimo del coeficiente de seguridad que se impone para dar como válido el diseño.

2. Fatiga a presión superficial (fórmula de Hertz)

Los engranajes pueden fallar, además de por fatiga en el pie del diente, por fatiga a presión superficial (picado). Para determinar las tensiones superficiales que existen entre las superficies de los dientes de dos engranajes se utilizará la presión de Hertz, que permite calcular la tensión que se origina entre dos superficies cilíndricas al aplicar a las mismas una fuerza normal a la superficie de contacto.

La tensión entre las superficies se calcula:

Para el piñón:

$$\sigma_{H1} = Z_B \cdot \sigma_{H0} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta}} = Z_B \cdot Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\epsilon \cdot Z_\beta \cdot \sqrt{\frac{F_t}{b \cdot d'_1} \cdot \frac{i+1}{i}} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta}}$$

Para la rueda:

$$\sigma_{H2} = Z_D \cdot \sigma_{H0} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta}} = Z_D \cdot Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\epsilon \cdot Z_\beta \cdot \sqrt{\frac{F_t}{b \cdot d'_1} \cdot \frac{i+1}{i}} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta}}$$

Donde:

σ_{H0} = tensión nominal en el punto de contacto sobre la circunferencia primitiva (punto de intersección de la línea de acción y la línea que une los centros de los engranajes), que corresponde con la tensión inducida en una rueda libre de defectos cuando se le aplica el par nominal.

F_t = componente tangencial de la fuerza aplicada sobre el diente (calculada con anterioridad).

b = ancho de cara del engranaje.

d'_1 = diámetro primitivo del piñón.

i = relación de transmisión. Para engranajes internos tiene un valor negativo.

Los factores que afectan a la magnitud de la carga que actúa entre los dientes, K_A , K_V y $K_{H\beta}$ ($K_{F\beta}$), son los mismos que se estudiaron en la determinación de las tensiones en el pie del diente, que afectan igualmente a las tensiones entre los flancos de los dientes.

Además, aparecen nuevos factores que varían el valor final de las sollicitaciones en los flancos de los dientes.

Factor de contacto único en el piñón (Z_B): En general, sólo se calcula cuando la relación de transmisión i es menor que 1,5 (no es el caso). Por lo tanto, $Z_B = 1$.

Factor de contacto único en la rueda (Z_D): Para engranajes internos, $Z_D = 1$.

Factor de zona o geométrico (Z_H): Tiene en cuenta las curvaturas del flanco en el punto de contacto sobre la circunferencia primitiva y transforma una carga tangencial en el círculo de referencia en una carga tangencial en el círculo primitivo.

$$Z_C = \sqrt{\frac{\cos \beta_b}{\sin \alpha_t \cdot \cos \alpha_t}}$$

Donde β_b es el ángulo de hélice de base y α_t el ángulo de presión transversal.

Factor de elasticidad o material (Z_E): Tiene en cuenta propiedades específicas del material tales como el módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson... Sabiendo que E es el módulo de Young, que en caso del acero es 210.000 N/mm², dicho factor es igual a:

$$Z_E = \sqrt{0,35 \cdot E}$$

Factor del grado de recubrimiento (Z_ϵ): Tiene en cuenta la influencia de la distancia efectiva de la línea de contacto.

$$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{4 - \epsilon_\alpha}{3}}$$

Donde ε_α es el grado de recubrimiento de la pareja de ruedas dentadas ya calculado anteriormente.

En el caso de engranajes rectos con un grado de recubrimiento ε_α menor que 2, se debe elegir un valor de $Z_\varepsilon = 1$.

Factor del ángulo de hélice (Z_β): Tiene en cuenta la influencia del ángulo de hélice. Como se trata de un engranaje de dientes rectos, $Z_\beta = 1$.

Ahora solo queda sustituir los valores de los distintos coeficientes en la ecuación y conocer las tensiones en los flancos de los dientes.

Hay que calcular la tensión máxima admisible en los flancos de los dientes y corroborar que su valor es superior a las exigencias a las que se ven sometidos. Lógicamente, la tensión admisible también depende de ciertos factores.

La fórmula definitiva para conocer la sollicitación admisible en el flanco del engranaje es:

$$\sigma_{HG} = \sigma_{Hlím} \cdot Z_{NT} \cdot Z_X$$

Resistencia a fatiga ($\sigma_{Hlím}$): Es el valor de referencia de la tensión admisible.

Tiene en cuenta la influencia del material, del tratamiento térmico, de la rugosidad superficial...

Se calcula de igual forma que $\sigma_{Flím}$ (ver tabla 48).

Factor de vida o duración (Z_{NT}): Tiene en cuenta la variación de la capacidad del material de acuerdo con el número de ciclos que se le exige que soporte.

Para calcular el factor Z_{NT} se debe identificar a cuál de los cuatro grupos que a continuación se explican pertenece el material con el que se ha fabricado el engranaje. A continuación, se busca en la gráfica la curva correspondiente al grupo seleccionado y de ese modo fijando el número de ciclos de trabajo que se quiere

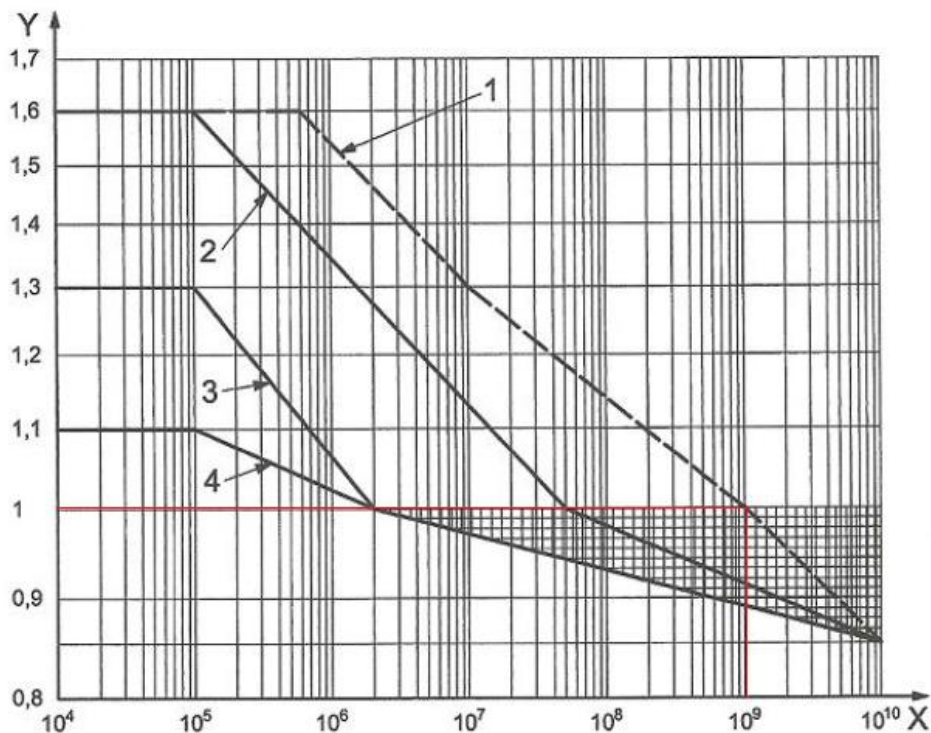
que soporte el engranaje (eje X de la gráfica) se obtiene el valor del factor Z_{NT} en el eje Y .

Los cuatro posibles grupos de materiales son:

- **Grupo 1:**
 - St: acero normalizado forjado de bajo contenido en carbono.
 - V: aleaciones de acero templado revenido y forjado.
 - GGG (perl., bai.): acero nodular procedente de colada.
 - GTS (perl.): fundiciones negras.
 - **Eh: acero cementado y forjado.**
 - IF: acero forjado endurecido con llama o por inducción.

Dentro de este grupo 1 se permite un pequeño grado de picado superficial.

- Grupo 2: El grupo 2 engloba los mismos materiales que el grupo 1 con la diferencia de que en los materiales del grupo 2 no se permite presencia alguna de picado superficial.
- Grupo 3: En este grupo se engloban los siguientes materiales:
 - GG: acero gris procedente de colada.
 - GGG (ferr.): acero nodular procedente de colada.
 - NT (nitr.): acero nitrurado.
 - NV (nitr.): acero nitrurado templado y revenido.
 - Grupo 4: En este grupo sólo se contempla:
 - NV (nitrocar.): acero nitrocarburado templado y revenido.

**Key**X number of load cycles, N_L Y life factor, Z_{NT} 1 St, V, GGG (perl., bai.), GTS (perl.), Eh, IF^a

2 St, V, GGG (perl., bai.), GTS (perl.), Eh, IF

3 GG, GGG (ferr.), NT (nitr.), NV (nitr.)

4 NV (nitrocar.)

Gráfica 15. Obtención del factor Z_{NT} .

Factor de tamaño (Z_x): Tiene en cuenta la influencia de las dimensiones de los dientes. Por medio de este factor se tiene en cuenta la evidencia estadística que muestra que los niveles de tensión a los que tiene lugar el colapso del material por mecanismos de fatiga disminuyen a medida que aumenta el tamaño del componente como consecuencia de la influencia en los defectos subsuperficiales de los pequeños gradientes de tensiones que aparecen y la influencia del tamaño en la calidad del material.

Los parámetros que mayor influencia tienen sobre este factor son:

- Calidad del material.

- Tratamiento térmico, profundidad del temple, distribución del temple...
- Radio de curvatura del flanco del diente.

Según la norma ISO, Z_X debe tomar un valor igual a 1.

Finalmente, se sustituyen en la ecuación todos los valores numéricos y se comprueba:

$$\sigma_{HG} > \sigma_{H1}$$

$$\sigma_{HG} > \sigma_{H2}$$

Con lo que el engranaje aguanta el picado superficial.

Ahora se debe calcular el coeficiente de seguridad frente a fallo por flexión en la base del diente.

Se debe calcular el coeficiente de seguridad frente al fallo por contacto superficial en el flanco del diente tanto para la rueda como para el piñón de la pareja engranajes y el coeficiente de seguridad para el sistema formado por las dos ruedas dentadas será el mínimo de ambos.

De este modo, los coeficientes de seguridad frente al fallo por contacto superficial en el flanco del diente para piñón y rueda respectivamente se calculan de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$S_{H1} = \frac{\sigma_{HG1}}{\sigma_{H1}} > S_{H\text{mín}}$$

$$S_{H2} = \frac{\sigma_{HG2}}{\sigma_{H2}} > S_{H\text{mín}}$$

Donde:

S_{Hi} = valor calculado del coeficiente de seguridad de piñón y rueda.

σ_{HG_i} = valor de la tensión de contacto admisible en el diente.

σ_{Hi} = valor de la tensión de contacto a la que está sometida el diente.

$S_{H_{\min}}$ = valor mínimo del coeficiente de seguridad que se impone para dar como válido el diseño.

3.3.2.4. Resolución de cálculos piñón de giro

PIÑÓN DE GIRO

Parámetros de generación

	Piñón (2)	Rueda o corona (3)	
i_{23} (relación de transmisión piñón-corona)		-5,65	-
m_0 (módulo normalizado)	10,00		mm
α_0 (ángulo de presión)	20,00		°
z (número de dientes)	20,00	-113,00	dientes
d (diámetro primitivo) = $m \cdot z$	200,00	-1130,00	mm
x (desplazamiento)	0,00	0,50	-

Parámetros de definición

	Piñón	Rueda	
d_b (diámetro de base) = $d \cdot \cos \alpha$	187,94	-1061,85	mm
p_b (paso de base) = $\pi \cdot m \cdot \cos \alpha$		29,52	mm
s_b (espesor de base) = $(\pi \cdot m)/2 + 2 \cdot x \cdot m \cdot \operatorname{tg} \alpha$	15,71	19,35	mm
h_a (altura de cabeza) = $m \cdot (1+x)$	10,00	15,00	mm
j (juego circunferencial) = $0,25 \cdot m$		2,50	mm
h_f (altura de pie) = $m \cdot (1,25-x)$	12,50	7,50	mm
h (altura total) = $h_a + h_f$	22,50	27,50	mm
d_a (diámetro de cabeza) = $d + 2 \cdot h_a$	220,00	-1100,00	mm
d_f (diámetro de pie) = $d - 2 \cdot h_f$	175,00	-1145,00	mm
d_0 (distancia nominal) = $m \cdot (z_1 + z_2)$		-930,00	mm
$B = 2 \cdot (x_1 + x_2) / (z_1 + z_2)$		-0,011	-
d_c (distancia de tallado) = $d_0 \cdot (1+B)$		-920,00	mm

Parámetros de funcionamiento

	Piñón	Rueda	
$B_V = B / (1 + 13 \cdot B)^{1/4}$		-0,011	-
α_V (ángulo de funcionamiento) => $\arccos \alpha_V = \cos \alpha / (B_V + 1)$		18,14	°
a' (distancia de funcionamiento) = $(d_{b1} + d_{b2}) / (2 \cdot \cos \alpha_V)$		-459,81	mm
R_c (radio de cabeza)	110,00	-550,00	mm
ρ (radio de base)	93,97	-530,93	mm
R' (radio polar) = $(d \cdot \cos \alpha) / 2 \cdot \cos \alpha_V$	98,88	-558,69	mm

ε_α (recubrimiento frontal)		1,92	-
d' (diámetro de funcionamiento) = $d_b/\cos\alpha_v$	197,77	-1117,38	mm
c (juego de pie)	2,69	2,69	mm

Comprobaciones

Comprobación a fatiga en el pie del diente

Fuerza tangencial (F_t)

M_{giro}	19502,19	N·m
d_2' (diámetro primitivo de la corona)	1,12	m
$F_t = M_{\text{giro}}/d_2'/2$	34906,89	N

Coefficiente de forma (Y_F)

x_1	0,00	-
z_1	20,00	dientes
Y_{F1} (GRÁFICA)	2,8	
x_2	0,50	-
z_2	113,00	dientes
Y_{F2} (GRÁFICA)	2,07	

Coefficiente de recubrimiento (Y_ε)

ε_α	1,92	-
$Y_\varepsilon = 1/\varepsilon_\alpha$	0,52	

Coefficiente para engrnaajes helicoidales (Y_β)

Y_β	1	
-----------	----------	--

Factor de aplicación o servicio (K_A)

K_A	1	
-------	----------	--

Factor dinámico o de velocidad (K_V)

K_V	1	
-------	----------	--

Factor de distribución de carga ($K_{\Phi\beta}$)

b (altura del diente)	71,00	mm
d'_1	197,77	mm
b/d'_1	0,36	
d'_2	1117,38	mm
b/d'_2	0,06	
$K_{\Phi\beta}$ (GRÁFICA)	1,00	

$\sigma_{F01} =$	71,62	N/mm ²
------------------	-------	-------------------

$\sigma_{F02} =$	52,95	N/mm ²
------------------	-------	-------------------

$\sigma_{F1} =$	71,62	N/mm²
-----------------	--------------	-------------------------

$\sigma_{F2} =$	52,95	N/mm²
-----------------	--------------	-------------------------

Resistencia a la fatiga en el pie del diente (σ_{Flim})

σ_{Flim} (TABLA)	460	N/mm²
-------------------------	------------	-------------------------

Factor de corrección de la tensión (Y_{ST})

Y_{ST}	2	
----------	----------	--

Factor de vida o duración (Y_{NT})

Y_{NT} (TABLA)	1,00	
------------------	-------------	--

Factor de sensibilidad a la entalla o concentración de tensiones ($Y_{\delta relT}$)

$Y_{\delta relT1}$ (GRÁFICA)	1,5	
------------------------------	------------	--

$Y_{\delta relT2}$ (GRÁFICA)	1,85	
------------------------------	-------------	--

Factor relativo de superficie (Y_{RrelT})

Y_{RrelT} (GRÁFICA)	0,955	
-----------------------	--------------	--

Factor de tamaño (Y_X)

Y_X (GRÁFICA)	0,95	
-----------------	-------------	--

$\sigma_{FG1} =$	1.252,01	N/mm²
------------------	-----------------	-------------------------

$\sigma_{FG2} =$	1.544,14	N/mm²
------------------	-----------------	-------------------------

$\sigma_{FG1} > \sigma_{F1}$ ✓

$\sigma_{FG2} > \sigma_{F2}$ ✓

Coefficiente de seguridad frente a fallo por flexión en la base del diente

S_{F1}	17,48	
----------	--------------	--

S_{F2}	29,16	
----------	--------------	--

Comprobación a fatiga a presión superficial

Factor de contacto único en el piñón (Z_B)

Z_B	1	
-------	----------	--

Factor de contacto único en la rueda (Z_D)

Z_D	1	
-------	----------	--

Factor de zona o geométrico (Z_H)

β_b	0,00	°
-----------	-------------	---

α_t	20,00	°
------------	--------------	---

Z_H	1,76	
-------	-------------	--

Factor de elasticidad o material (Z_E)

E (módulo de Young)	210000,00	N/mm²
---------------------	------------------	-------------------------

Z_E	271,11	N/mm³
-------	---------------	-------------------------

Factor del grado de recubrimiento (Z_ϵ)		
ϵ_α	1,92	
$Z_\epsilon =$	1	
Factor del ángulo de hélice (Z_β)		
Z_β	1	
Resistencia a la fatiga (σ_{Hlim})		
σ_{Hlim}	1630	N/mm²
Factor de vida o duración (Z_{NT})		
Z_{NT} (TABLA)	1	
Factor de tamaño (Z_X)		
Z_X (TABLA)	1	
$\sigma_{HG} =$	1630	N/mm²
$\sigma_{HG} > \sigma_{H1}$ ✓		
$\sigma_{HG} > \sigma_{H2}$ ✓		
Coefficiente de seguridad frente a fallo por contacto superficial en el flanco del diente		
S_{H1}	2,39	
S_{H2}	2,39	

3.3.5. Mecanismo de elevación y traslación

3.3.5.1. Introducción

Para estandarizar en lo posible los elementos de la grúa, se busca una solución compacta y de fácil instalación de las existentes en el mercado. Es por ello que se ha escogido un polipasto con mecanismo de elevación y traslación eléctricas del fabricante *DEMAG*.

En la elección del polipasto, se han seguido las indicaciones del fabricante para cumplir con la normativa y con las especificaciones de la grúa.

Para este caso en concreto, se ha escogido un polipasto del tipo de altura reducida, es decir, la altura entre el gancho y la pluma es lo más reducida posible. De esta forma, se puede aprovechar mucho mejor el espacio de debajo de la pluma y transportar cargas de más altura.

En el mercado existen polipastos de un solo raíl o de dos raíles. Para la presente aplicación, se ha escogido un carro birraíl EZDR.

En cuanto al sistema de suspensión de la carga, existen polipastos de cable y de cadena. Los polipastos de cadena se utilizan para poco tonelaje, por lo tanto, el sistema a utilizar en este caso será el de cable.



Figura 68. Carro birraíl EZDR, DEMAG.

3.3.5.2. Elección del polipasto

El polipasto viene determinado por el tipo de carga, el promedio de marcha, la carga a elevar y la disposición del cable o tipo de aparejado.

1. Tipo de carga

El tipo de carga estimado se puede determinar según el esquema de la figura siguiente:

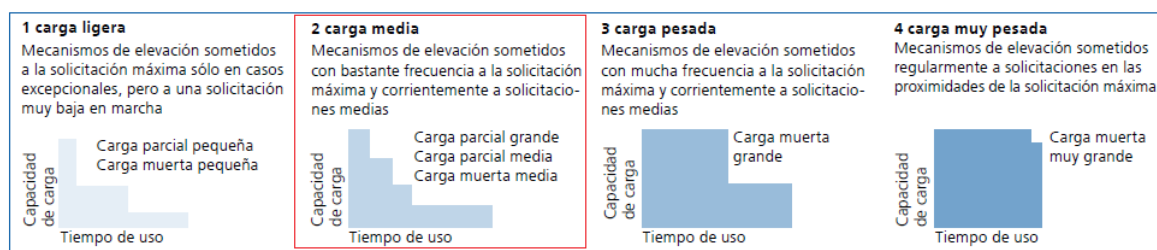


Figura 69. Tipo de solicitud, DEMAG.

Para este caso, se considera que el tipo de carga es del **tipo 2, carga media**. Se trata de mecanismos de elevación sometidos con bastante frecuencia a la solicitud máxima y corrientemente a solicitudes medias.

2. Promedio de marcha

Para el valor del promedio de marcha se estima un valor aproximado o se calcula de la siguiente forma:

$$t_{\text{marcha/día}} = \frac{2 \cdot L \cdot n \cdot t}{60 \cdot v_L}$$

Donde:

L = recorrido medio del gancho (10 m).

n = número de ciclos/h (15 ciclos/h).

t = tiempo de trabajo/día (3 h/día).

v_L = velocidad de elevación (4 m/min).

Por lo que, el promedio de marcha es de 3,75 h.

3. Carga a elevar

La capacidad del polipasto debe de ser de 8250 kg (peso de la carga + accesorios).

4. Disposición del cable

La disposición de cable recomendable para el uso será la de 4/1.

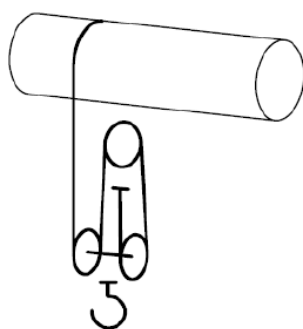


Figura 70. Disposición del cable de 4/1.

5. Selección del polipasto

Para un tipo de carga medio y un promedio de marcha de 3,75 horas, la tabla de elección del proveedor indica el grupo 2m.

La capacidad de carga requerida es de 8250 kg pero como en la tabla del fabricante no aparece exactamente esa capacidad, se tiene que escoger un polipasto de 10000 kg de capacidad de carga y con una disposición de cable de 4/1. A estas características, le corresponde el tamaño de polipasto DR 10 de la marca *DEMAG*, según el propio catálogo.

En total, el polipasto cuenta con dos velocidades. Una velocidad será la de servicio o trabajo de 4 m/min, y otra de precisión, más lenta, para actuar con suavidad de 0,7 m/min.

Tipo de carga					Horas de servicio medias por día (h)				
1	bajo				2-4	4-8	8-16	16 o más	
2	medio				1-2	2-4	4-8	8-16	
3	elevado				0.5-1	1-2	2-4	4-8	
4	muy elevado				0.25-0.5	0.5-1	1-2	2-4	
Grupo de accionamiento					1 Am	2 m	3 m	4 m	
Tipo de aparejado					Tamaño				
1/1	2/1	4/1	6/1	8/1					
2/2	4/2	8/2							
Capacidad de carga (t)					Tamaño				
0.5	1	2	-	-	-	-	-	-	■
0.63	1.25	2.5	-	-	-	-	-	■	-
0.8	1.6	3.2	-	-	DR 3	-	■	-	■
1	2	4	-	-	-	-	-	■	-
1.25	2.5	5	-	-	-	-	■	-	-
1.6	3.2	6.3	-	-	DR 5	■	-	-	■
2	4	8	12.5	-	-	-	-	■	-
2.5	5	10	16	-	-	-	■	-	-
3.2	6.3	12.5	20	25	DR 10	■	-	-	■
4	8	16	25	32	-	-	-	■	-
5	10	20	32	40	-	-	■	-	-
6.3	12.5	25	40	50	DR 20	■	-	-	-

Tabla 49. Criterios de selección del polipasto.

Tipo	Capacidad de carga	Recorrido del gancho	Velocidad de elevación			Grupo de accionamiento	Capacidad de carga	Recorrido del gancho	Velocidad de elevación		
	t		m	m/min			t		m	m/min	
DR 3	2/1						4/1				
	1.6	12 20	12/2	18/3	1-25 *	2m / M5 **	3.2	6 10	6/1	9/1.5	0.5-12.5 *
	1.25					3m / M6 **	2.5				
	1					4m / M7 **	2				
DR 5	2/1						4/1				
	3.2	12 20 30	12/2	18/3	1-25 *	1Am / M4 **	6.3	6 10 15	4.5/0.8	6/1	0.4-8 *
	2.5					2m / M5 **	5		6/1	9/1.5	0.5-12.5 *
	2					3m / M6 **	4				
	1.6					4m / M7 **	3.2				
	4/2										
	3.2	9.9 16.3	12/2	18/3	1-25 *	1Am / M4 **					
	2.5					2m / M5 **					
2	3m / M6 **										
1.6	4m / M7 **										
DR 10	2/1						4/1				
	6.3	12 20 30 40	8/1.4	0.4-9 *	1-18 *	1Am / M4 **	12.5	6 10 15 20	4/0.7	0.2-4.5 *	0.5-9 *
	5					2m / M5 **	10		5/0.8	0.5-9 *	0.5-12.5 *
	4					3m / M6 **	8				
	3.2					4m / M7 **	6.3				
	4/2						6/1				
	6.3	5.8 11.35 18.4 25.2	10/1.7	1-18 *	1-25 *	1Am / M4 **		6.7 13.3	2.7/0.4	0.3-6 *	-
	5					2m / M5 **	16				
4	3m / M6 **					12.5					
3.2	4m / M7 **										
DR 20	2/1						4/1				
	12.5	24 36 54	6/1	12/2	1-16 *	1Am / M4	25	12 18 27	3/0.5 6/1	0.5-5 *	0.5-8 *
	10					2m / M5	20				
	8					3m / M6	16				
	6.3					4m / M7	12.5				
	4/2						6/1				
	12.5	12.3 21.2 33.2	6/1	12/2	1-16 *	1Am / M4	40	12 18 24.7	4/0.7	0.3-3.3 *	0.3-5.3 *
	10					2m / M5	32				
	8					3m / M6	25				
	6.3					4m / M7	20				
	8/2						8/1				
	25	10.3 16.3 23.4	3/0.5 6/1	0.5-5 *	0.5-8 *	1Am / M4	50	9 13.5 18.5	3/0.5	0.3-2.5 *	0.2-4 *
20	2m / M5					40					
16	3m / M6					32					
12.5	4m / M7					25					

* Las cargas de hasta un tercio de la carga nominal se mueven al 1,5 de la velocidad nominal (ProHub)

** La vida útil del reductor es un 20 % superior a la duración a plena carga según ISO/FEM

Tabla 50. Tabla de selección del polipasto DEMAG.

Por tanto, la referencia del polipasto DEMAG es:

EK DR-Com 10-10 4/1-10 Z-4/0,7-400-02-50

3.3.5.3. Especificaciones del polipasto

POLIPASTO		
EK DR-Com 10-10 4/1-10 Z-4/0,7-400-02-50		
Carro	EK	
Polipasto de cable	DR-Com	
Tamaño	10	
Capacidad de carga	10.000	kg
Ejecución	4/1	
Altura de elevación	10	
Velocidad de elevación (50 Hz)	4/0,7	m/min
Datos técnicos		
Grupo de sollicitación FEM/ISO	2m	
Capacidad máxima	10000	kg
Altura de elevación	10	m
Peso	611	kg
Motor de elevación	ZBR 132 D 12/2	
Tensión de servicio	400	V
Tensión de mando	48	V
Frecuencia	50	Hz
Grado de protección	IP 55	
Velocidad de elevación principal	4	m/min
Velocidad de elevación de precisión	0,7	m/min
Factor de marcha	20/40	%
Potencia	1,4/8,9	kW
Revoluciones motor de elevación	400/2870	min ⁻¹
Corriente de arranque	1/1	A
Corriente nominal	9,6/18,5	A
cosphi de arranque	1/1	
cosphi nominal	0,54/0,89	
Freno	BR140	
Carro	EK	
Ancho de ala	300	mm
Motor de traslación	1/ZBA 71 B 4	
Convertidor de frecuencia standard	DIC-4-002-C	
Velocidad de traslación mínima	5	m/min
Velocidad de traslación máxima	24	m/min
Factor de marcha	60	%
Número de polos	4	
Corriente de arranque	3,6	A
Corriente nominal	2,4	A
cosphi de arranque	1	
cosphi nominal	1	

Tabla 51. Especificaciones polipasto DEMAG.**3.3.5.4. Topes final de carrera**

Al principio y final de la pluma, se necesitan unos topes para evitar que el polipasto colisione con la estructura de la columna o que salga por el extremo de la pluma.

Estos topes deben de ir provistos de un elemento de material elástico que amortigüe los posibles golpes.

El tope final de carrera más interior ha de colocarse como mínimo a 1 metro de la columna, para este tipo de polipasto seleccionado.

Se debe pintar una marca sobre la pluma para señalar este punto para su correcto montaje.

3.3.5.5. Selección del carril de rodadura

La gran parte de los aparatos de elevación utilizan carriles metálicos. Existen diferentes tipos de carriles. Entre ellos se elegirá el carril tipo *Llanton*, los cuales son carriles ordinarios que se emplean frecuentemente sobre los caminos de rodadura implementados sobre perfiles laminados o vigas cajón (rodadura de carros de puentes grúas, grúas pórtico o grúas consola). Se suministran rectangulares, con las esquinas superiores redondeadas o achaflanadas, con superficie bombeada. En la siguiente tabla se muestran las dimensiones y pesos de este tipo de carril.

bh (mm)	50.30	50.40	60.30	60.40
Pesos (daN/m)	11,8	15,7	14,1	18,8

Tabla 52. Dimensiones y pesos de carril tipo Llanton.**Figura 71. Perfil tipo Llanton.**

El carril debe cumplir las siguientes características:

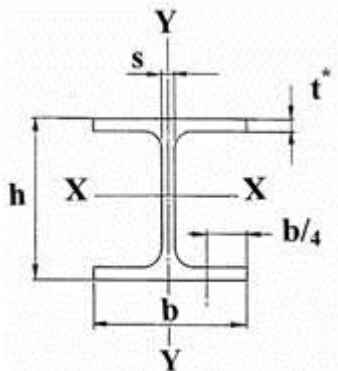
- Permitir una fácil rodadura del elemento rodante.
- Conformar un perfil equilibrado.
- Presentar un valor adecuado de inercia.

Se ha escogido un perfil con bordes redondeados con una anchura de 60 mm y altura de 30 mm.

ANEXO 4: Hojas especificaciones fabricante

3.4. Prontuario de perfiles metálicos, APTA

3.4.1. Perfiles IPE - Medidas, masas y datos de sección



Designación del perfil	Medidas mm					A cm ²	m Kg/m	Momento de inercia cm ⁴		Módulo resistente cm ³		Radio de giro cm		Superficie	
	h	b	s	t	r			I _x	I _y	W _x	W _y	i _x	i _y	m ² /m	m ² /t
IPE 80	80	46	3,8	5,2	5	7,64	6,0	80,1	8,49	20,0	3,69	3,24	1,05	0,328	
IPE 100	100	55	4,1	5,7	7	10,3	8,1	171	15,9	34,2	5,79	4,07	1,24	0,400	49,33
IPE 120	120	64	4,4	6,3	7	13,2	10,4	316	27,7	53,0	8,65	4,90	1,45	0,475	45,82
IPE 140*	140	73	4,7	6,9	7	16,4	12,9	541	44,9	77,3	12,3	5,74	1,65	0,551	42,70
IPE 160*	160	82	5,0	7,4	9	20,1	15,8	869	68,3	109	16,7	6,58	1,84	0,623	39,47
IPE 180*	180	91	5,3	8,0	9	23,9	18,8	1317	101	146	22,2	7,42	2,05	0,698	37,13
IPE 200*	200	100	5,6	8,5	12	28,5	22,4	1943	142	194	28,5	8,26	2,24	0,768	34,36
IPE 220*	220	110	5,9	9,2	12	33,4	26,2	2772	205	252	37,3	9,11	2,48	0,848	32,36
IPE 240*	240	120	6,2	9,8	15	39,1	30,7	3892	284	324	47,3	9,97	2,69	0,922	30,02
IPE 270*	270	135	6,6	10,2	15	45,9	36,1	5790	420	429	62,2	11,2	3,02	1,04	28,86
IPE 300*	300	150	7,1	10,7	15	53,8	42,2	8356	604	557	80,5	12,5	3,35	1,16	27,46
IPE 330*	330	160	7,5	11,5	18	62,6	49,1	11770	788	713	98,5	13,7	3,55	1,25	25,52
IPE 360*	360	170	8,0	12,7	18	72,7	57,1	16270	1043	904	123	15,0	3,79	1,35	23,70
IPE 400*	400	180	8,6	13,5	21	84,5	66,3	23130	1318	1160	146	16,5	3,95	1,47	22,12
IPE 450*	450	190	9,4	14,6	21	98,8	77,6	33740	1676	1500	176	18,5	4,12	1,61	20,69
IPE 500	500	200	10,2	16,0	21	116	90,7	48200	2142	1930	214	20,4	4,31	1,74	19,23
IPE 550	550	210	11,1	17,2	24	134	106	67120	2668	2440	254	22,3	4,45	1,88	17,78
IPE 600	600	220	12,0	19,0	24	156	122	92080	3387	3070	308	24,3	4,66	2,01	16,45

* Medidas más comerciales.

3.5. Grandes Rodamientos, *Rothe Erde*

Ver catálogo *ROTHE ERDE*; *Grandes rodamientos*. Disponible en <http://www.rotheisa.es>

3.6. Reductores, *Bonfiglioli*

Ver catálogo *BONFIGLIOLI*; *Reductores*. Disponible en <http://www.equitrans96.es/>

3.7. Motores, *Bonfiglioli*

Ver catálogo *BONFIGLIOLI*; *Motores*. Disponible en <http://www.equitrans96.es/>

3.8. Acoplamientos flexibles, *Escogear*

Ver catálogo *BONFIGLIOLI*; *Acoplamientos*. Disponible en <http://www.equitrans96.es/>

3.9. Polipastos de cable, *DEMAG*

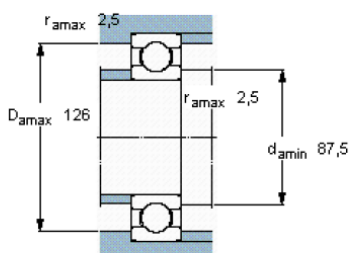
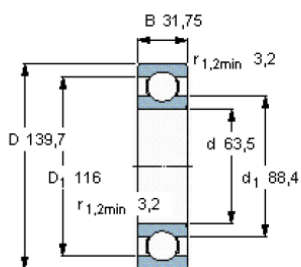
Ver catálogo *DEMAG*; *Polipastos de cable*. Disponible en <http://www.demagcranes.es/>

3.10. Rodamientos de bolas, *SKF*



Rodamientos rígidos de bolas, de una hilera

Dimensiones principales			Capacidades de carga básica		Velocidades nominales		Designación	
d	D	B	dinámica	estática	Velocidad de referencia	Límite de velocidad		
mm			C	C0	rpm		* rodamiento SKF Explorer	
63,5	139,7	31,75	92,3	60	9500	6700	RMS 20	Mercado de recambio únicamente



Factores de cálculo

 k_f 0,03 f_0 13

ANEXO 5: Dimensionamiento final

3.11. Redimensionamiento del contrapeso

Para poder situar el contrapeso entre las dos vigas, se ha redimensionado haciéndolo en forma de *T*, manteniendo su volumen original.

A continuación, se muestra el proceso de redimensionamiento:

1. Bloque de hormigón original:

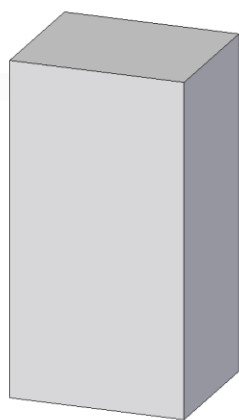


Figura 72. Bloque de hormigón 1.

Dimensiones: 1000x2300x1200 mm

$$\text{Vol original} = 1200 \cdot 1000 \cdot 2300 = 2,76 \cdot 10^9 \text{ mm}^3$$

2. Si se *corta* un bloque de dimensiones 1000x300x1200 mm:

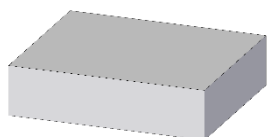


Figura 73. Bloque de hormigón 2.

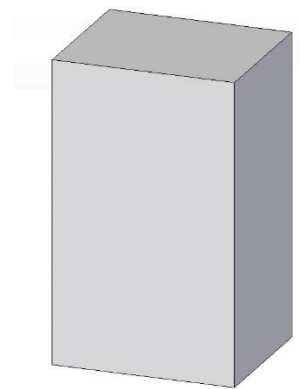


Figura 74. Bloque de hormigón 3.

Dimensiones: 1000x2000x1200 mm

3. Volviendo a *cortar* el bloque anterior por la mitad:

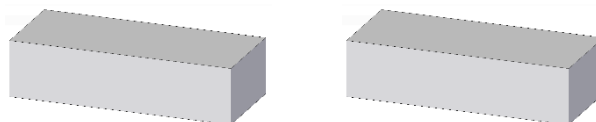


Figura 75. Bloques de hormigón 4.

Dimensiones: 500x300x1200 mm

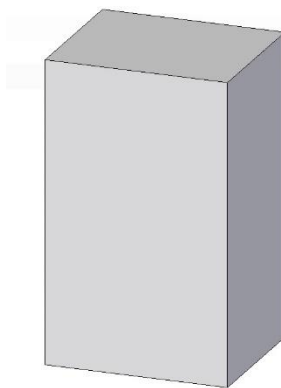


Figura 76. Bloque de hormigón 5.

Dimensiones: 1000x2000x1200 mm

4. *Cortando* uno de los dos bloques anteriores por el medio:

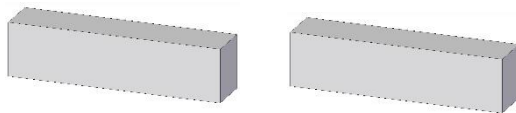


Figura 77. Bloques de hormigón 6.

Dimensiones: 250x300x1200 mm

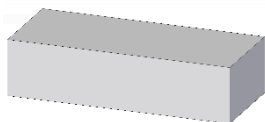


Figura 78. Bloques de hormigón 7.

Dimensiones: 500x300x1200

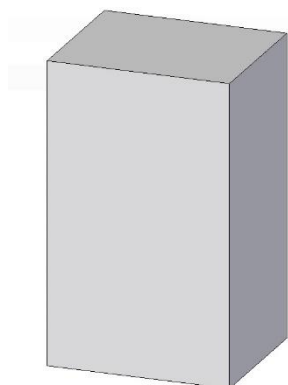


Figura 79. Bloque de hormigón 8.

Dimensiones: 1000x2000x1200 mm

5. Situando los bloques de dimensiones 250x300x1200 en el extremo izquierdo y derecho respectivamente del bloque de mayor tamaño:

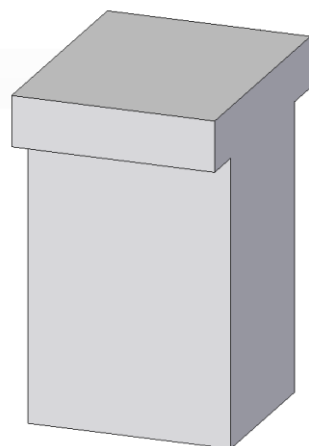


Figura 80. Bloques de hormigón 9.

6. Recalculando la altura del bloque de dimensiones 500x300x1200 para que tenga una anchura de 1000 mm y conserve su volumen:

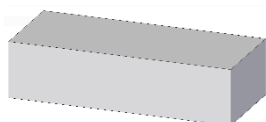


Figura 81. Bloque de hormigón 10.

$$\text{Vol} = 500 \cdot 300 \cdot 1200 = 1,8 \cdot 10^8 \text{ mm}^3$$

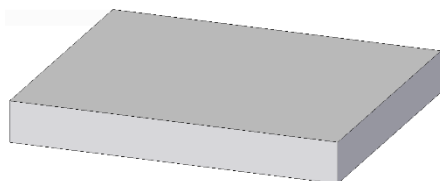


Figura 82. Bloque de hormigón 11.

$$1,8 \cdot 10^8 = 1000 \cdot h \cdot 1200 \Rightarrow h = 150 \text{ mm}$$

7. Finalmente situando el bloque de 1000x150x1200 en la parte inferior del bloque de dimensiones 1000x2000x1200:

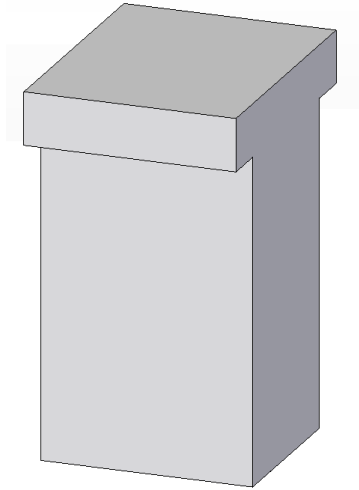


Figura 83. Bloque de hormigón 12.

$$\text{Vol} = (1000 \cdot 1850 \cdot 1200) \text{ mm}^3 + (1500 \cdot 300 \cdot 1200) \text{ mm}^3 = 2,76 \cdot 10^9 \text{ mm}^3 = \text{Vol original}$$

3.12. Uniones

En general, las estructuras de acero están formadas por piezas simples o compuestas que se unen entre sí para resistir conjuntamente. Para ello se debe garantizar que las uniones son capaces de transmitir adecuadamente las fuerzas de enlace de unas a otras piezas.

Por consiguiente, el objeto principal de la unión es el de asegurar la mejor continuidad de las piezas, continuidad que será más perfecta cuanto más uniforme sea la transmisión del esfuerzo.

Cabe mencionar que el comportamiento de las uniones es bastante complejo con un alto grado de indeterminación, lo que hace imposible un análisis riguroso. De ahí que las fórmulas que se aplican para su dimensionado estén basadas en consideraciones empíricas y en resultados de ensayos correctamente realizados.

Las uniones se clasifican básicamente en dos grupos: fijas o permanentes y desmontables o no permanentes.

Si se trata de materiales metálicos, los medios de unión comúnmente empleados son soldadura (unión permanente) y tornillos (unión no permanente).

El remache ha sido el elemento de unión más empleado en la construcción metálica si bien, hoy en día, prácticamente apenas se utiliza. Las uniones con bulones tienen poca aplicación, y las uniones por medios adhesivos se encuentran aún en fase experimental.

En el presente proyecto se han empleado como medio de unión soldaduras y tornillos.

3.12.1. Criterios de comprobación

En toda unión debe verificarse que los valores de cálculo de los efectos de las acciones, E_d , para cualquiera de las situaciones de cálculo (o combinaciones de acciones relevantes), no superan la correspondiente resistencia de cálculo, R_d , esto es;

$$E_d \leq R_d$$

debiéndose dimensionar con capacidad para resistir los mínimos siguientes:

- a) en el caso de nudos rígidos y empalmes, la mitad de la resistencia última de cada una de las piezas a unir.
- b) en el caso de uniones articuladas, la tercera parte del axil o el cortante último (según el caso) de la pieza a unir.

3.12.2. Uniones soldadas

3.12.2.1. Introducción

Se llama soldadura a la unión de dos piezas metálicas de igual o parecida composición, de forma que la unión quede rígida y estanca. Esto se consigue bien por la aportación de calor, bien por la aportación de otro metal de enlace o por la combinación de ambos efectos.

El empleo de la soldadura proporciona las ventajas siguientes:

- Uniones poco deformables.
- Uniones más económicas que las atornilladas.
- Uniones más sencillas de proyecto y ejecución.
- Realización de uniones estancas.

Entre las desventajas de las uniones soldados frente a las atornilladas se mencionan las siguientes:

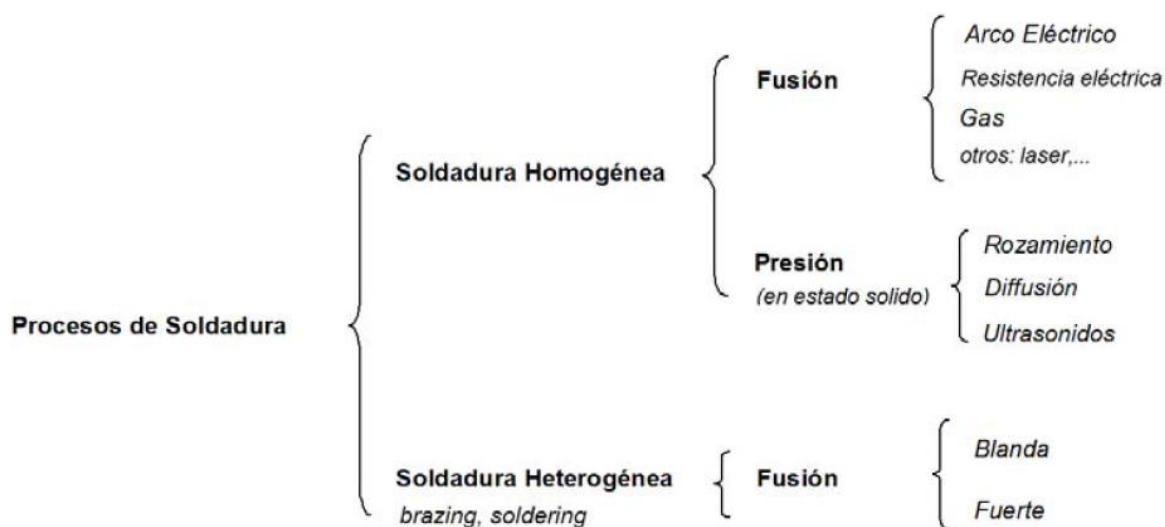
- Necesidad de personal cualificado.
- Necesidad de proteger en obra soldadores y soldaduras frente a la intemperie.
- Necesidad de utilizar procedimientos de control de calidad.

- En uniones mal resueltas, presencia de tensiones residuales de gran importancia.
- Propician fallos frente a la fatiga y la rotura frágil.

La soldadura es un proceso metalúrgico complejo con numerosas variantes:

- Piezas a unir en estado sólido, sin utilizar metal de aportación.
- Piezas a unir en estado sólido y metal de aportación en estado líquido.
- Bordes de las piezas a unir y metal de aportación en estado líquido.
- Bordes de las piezas a unir en estado pastoso, sin utilizar metal de aportación.

En el siguiente esquema se muestran las técnicas principales para soldar:



El sistema de soldar más importante para las estructuras metálicas es la soldadura por fusión.

En las soldaduras por fusión el calor proporcionado funde los extremos de las piezas y al solidificar se produce la unión.

Existen diferentes tipos de soldadura por fusión, pero los más utilizados son dos:

- Soldadura autógena.



Figura 84. Soldadura autógena.

- Soldadura por arco eléctrico, que es la que se utiliza en estructuras metálicas.



Figura 85. Soldadura por arco eléctrico.

3.12.2.2. Soldadura por arco eléctrico

La soldadura por arco se basa en que si a dos conductores en contacto se les somete a una diferencia de potencial, se establece entre ambos una corriente.

Si posteriormente se les separa, se provoca una chispa, cuyo efecto es ionizar el gas o aire que la rodea, permitiendo así el paso de la corriente a pesar de no estar los conductores en contacto.

Con esto se crea un arco eléctrico por transformación de la energía eléctrica luminosa y calorífica.

El calor provocado por el arco no sólo es intenso, sino que además está muy bien localizado, lo que resulta ideal para la operación de soldar. Las temperaturas alcanzadas son del orden de 3500°C.

En el circuito eléctrico formado por los electrodos y el arco, la intensidad de corriente depende de la tensión y de la resistencia del circuito. Si los electrodos se acercan o se separan variará la resistencia y la intensidad y, por lo tanto, la energía se transformará en calor, con lo que la soldadura no será uniforme.

Desde el punto de vista práctico, quiere decir que para obtener soldaduras uniformes es imprescindible mantener constante la separación de los electrodos durante el proceso del soldeo.

Existen diferentes variantes de este proceso general:

- Soldeo eléctrico, automático o semiautomático.
- Utilización de electrodos no consumibles.
- Arco desnudo.

Actualmente, se tiende a los sistemas semiautomáticos que presentan simultáneamente la uniformidad de los procedimientos automáticos y la elasticidad de los procedimientos manuales.

Los procedimientos de soldadura en arco pueden agruparse en cuatro tipos:

- Soldadura por arco en atmósfera inerte con electrodo no consumible (TIG).
- Soldadura por arco en atmósfera inerte con electrodo consumible (MIG, MAG).
- Soldadura por arco sumergido (SAW).
- Soldadura por arco manual con electrodos metálicos revestidos (SMAW).

Es el procedimiento de unión normalmente utilizado en la construcción metálica, pudiendo afirmarse sin titubeos que el gran desarrollo de la construcción metálica actual se debe en gran parte a este sistema.

La unión se consigue al provocar un arco eléctrico entre las piezas a unir y un electrodo que sirve de material de aportación.

El operario establece un contacto inicial entre el electrodo y la pieza a soldar (llamada trabajo), con lo que se inicia un flujo de corriente.

A continuación se retira ligeramente el electrodo y se establece un arco, que funde el electrodo y los bordes de la pieza a unir, formándose el cordón de soldadura.

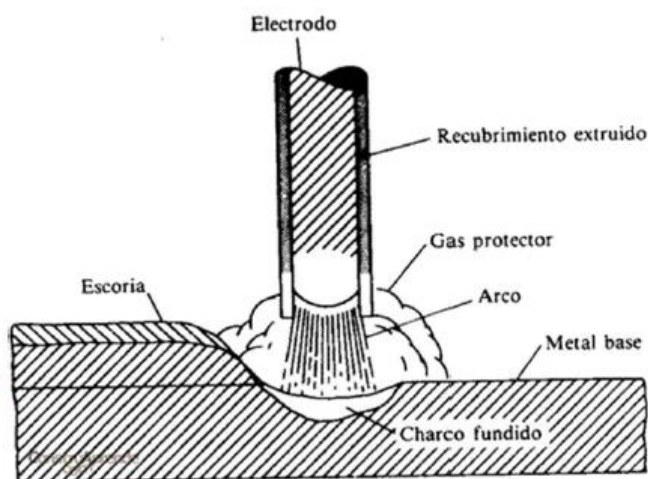


Figura 86. Soldadura por arco manual con electrodos revestidos.

El recubrimiento de los electrodos está constituido generalmente por óxidos minerales, carbonatos, silicatos o diversos compuestos orgánicos.

Además del efecto protector del material fundido, el revestimiento proporciona las siguientes ventajas:

- Al ser menos fusible que el metal del electrodo, forma una especie de vaina alrededor del arco, que facilita su dirección y evita la formación de arcos secundarios. También se ioniza mejor el aire que rodea la zona a soldar.

- Permite realizar las llamadas soldaduras de gran penetración gracias a que se puede utilizar más intensidad de corriente con ciertos tipos de electrodos, llamados electrodos de gran penetración, aumentando la zona fundida y evitando con esto el que se tenga que preparar los bordes de algunas piezas.
- Gracias a la protección de la escoria fundida, el enfriamiento de la soldadura se hace con mayor lentitud, evitando tensiones internas.

Los principales tipos de revestimiento de los electrodos son los siguientes:

Principales tipos de revestimiento de los electrodos		
Tipo de revestimiento	Pocentaje de nitrógeno	Volumen de H por 100 g/cm ³
Acido	0.034	9.0
Básico	0.015	2.5
Celulósico	0.028	15.0
Oxidante	0.035	1.5
Rutilo	0.025	12.0

Tabla 53. Principales tipos de revestimiento de los electrodos.

En la tabla 53 se puede observar el efecto protector de cada tipo de electrodo. En esta se indica el porcentaje aproximado de nitrógeno absorbido por la soldadura y el volumen de hidrógeno absorbido por 100 g de metal depositado.

Así mismo, puede observarse que el revestimiento básico es el que proporciona la mejor protección y, por tanto, dará soldaduras de mayor calidad. En contraposición, el electrodo básico es el más difícil de fundir.

Los diámetros más normales de electrodos son, en milímetros: 2, 2.5, 3.25, 4, 5, 6.3, 8, 10 y 12.

La elección del diámetro del electrodo depende del espesor del cordón de soldadura que se requiere depositar, siendo la intensidad de corriente necesaria función de este diámetro.

3.12.2.3. Manantiales de corriente

La corriente a utilizar puede ser continua o alterna. La capacidad de corriente necesaria en la salida para realizar un trabajo depende del espesor del metal que se vaya a soldar y del diámetro del electrodo.

La corriente continua permite una selección más amplia de electrodos y escalas de corriente con arco más estable, por lo que suele preferirse para trabajos en posiciones difíciles y chapas finas.

Con corriente continua, los dos tercios del calor los proporciona el polo positivo y el tercio restante el polo negativo. Los electrodos de fusión difícil, como los electrodos básicos, se funden mejor conectándolos al polo positivo.

La corriente alterna consume menos energía y produce menos salpicaduras. También los transformadores requieren menos mantenimiento que las dinamos. La corriente alterna se usa donde hay problemas de soplo del arco y en trabajos de soldadura en posición plana con chapas gruesas.

3.12.2.4. El cordón de soldadura

El cordón de soldadura tiene tres partes bien diferenciadas:

- a) Zona de soldadura. Es la zona central, que está formada fundamentalmente por el metal de aportación.
- b) Zona de penetración. Es la parte de las piezas que ha sido fundida por los electrodos. La mayor o menor profundidad de esta zona define la penetración de la soldadura. Una soldadura de poca penetración es una soldadura generalmente defectuosa.
- c) Zona de transición. Es la más próxima a la zona de penetración. Esta zona, aunque no ha sufrido la fusión, sí ha soportado altas temperaturas, que la han proporcionado un tratamiento térmico con posibles consecuencias desfavorables, provocando tensiones internas.

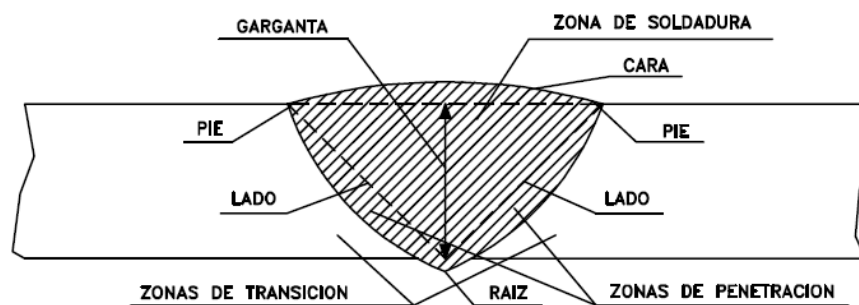


Figura 87. Partes del cordón de soldadura.

3.12.2.5. Clasificación de los cordones de soldadura

- Por la posición geométrica de las piezas a unir:
 - Soldaduras a tope. Antes de soldar se realiza preparación de bordes en las piezas para favorecer la penetración del cordón (en las de poco espesor no es necesaria).
 - De penetración completa o total, cuando la fusión y mezcla entre el material base y el de aportación alcanza a todo el espesor de la unión.

Consiste, en general, en unir las chapas situadas en un mismo plano. Si la soldadura es accesible por un solo lado, se realiza sin preparación de bordes, para espesores de chapa inferiores a 4 mm (figura 88a). Con espesores superiores a 6 mm se preparan los bordes para conseguir una buena penetración de la soldadura sobre el metal. En la figura 88b se representan los tipos de preparación de bordes más usuales: en V, U, X y doble U. También, a modo orientativo, se indican para cada uno de ellos los espesores de placa apropiados.

Debe evitarse el empleo de un metal de aportación de excesiva resistencia, con el fin de no reducir la capacidad de deformación de las uniones en la zona de soldadura.

Si se analiza la sección de un cordón de soldadura se distinguen dos zonas características (figura 88c). Una capa media que contiene metal de aportación y productos que proceden de la fundición del metal base. Y otra de penetración, formada por el cordón de cierre, en la que es fundamental que el metal base esté fundido para conseguir una buena trabazón de las piezas.

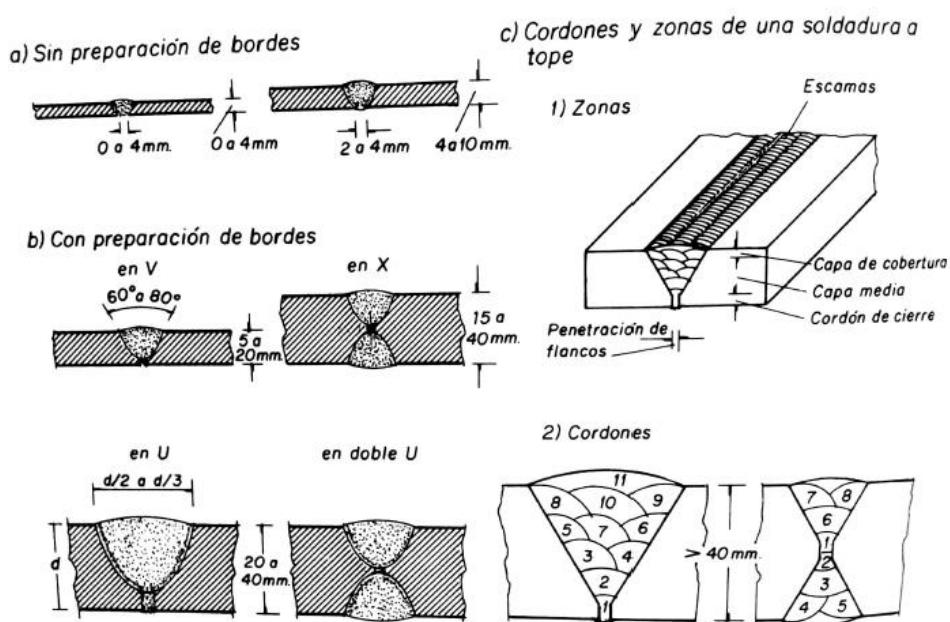


Figura 88. Soldaduras a tope de penetración completa de chapas situadas en un mismo plano.

Si las dimensiones de la chapa son grandes, no se podrá rellenar la junta de una sola pasada, siendo necesario realizar la soldadura en varias.

Además de la soldadura a tope de chapas situadas en el mismo plano pueden, por la posición relativa de las chapas a unir, distinguirse las siguientes: soldadura a tope en T y soldadura a tope en ángulo (figura 89).

La preparación de bordes de estas uniones puede ser con chaflán sencillo en V, en U o en J o de chaflán doble con análoga nomenclatura.

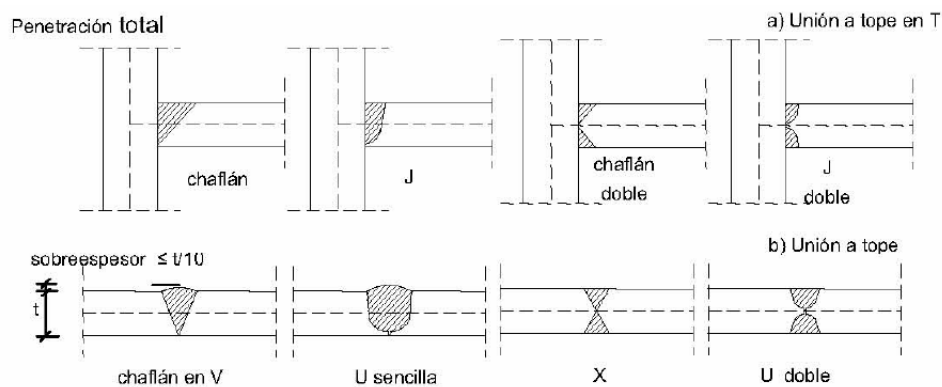


Figura 89. Penetración total de soldaduras a tope.

- De penetración parcial, si esta fusión y mezcla no alcanza a todo el espesor.

Al igual que las soldaduras a tope de penetración total las de penetración parcial pueden presentarse con planos prolongados (figura 90).

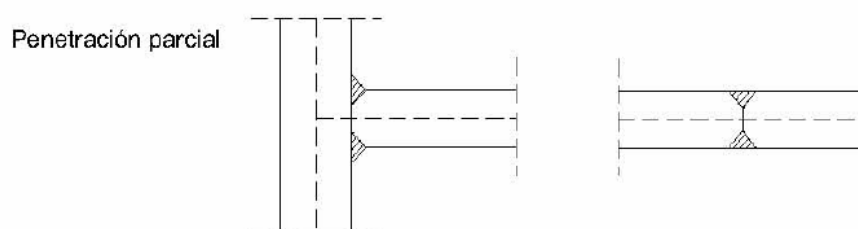


Figura 90. Penetración parcial de soldaduras a tope.

En uniones de fuerza que deban transmitir esfuerzos significativos de tracción no está autorizado emplear un solo cordón de soldadura de ángulo o a tope de penetración parcial si la unión queda solicitada excéntricamente respecto a la carga (figuras 91c y 91d). Por el contrario, se admiten estas soldaduras si forman un grupo alrededor del perímetro de una sección estructural hueca (figuras 91a y 91b).

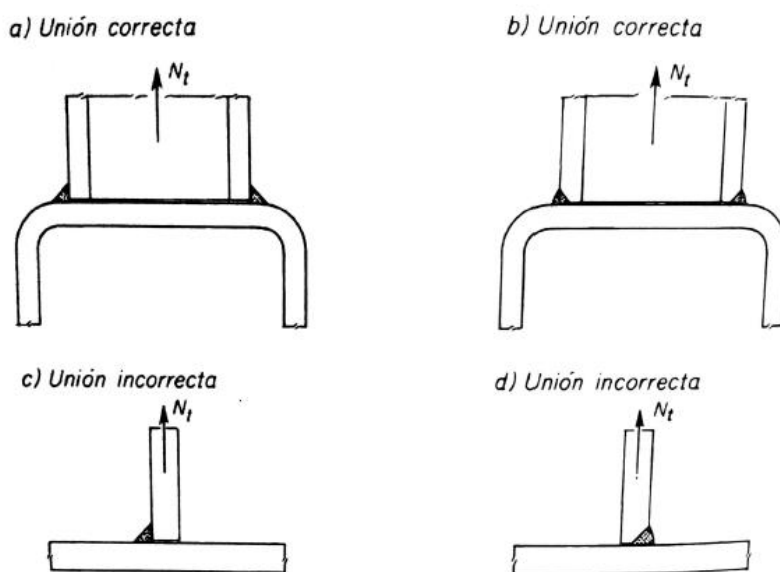


Figura 91. Disposiciones correctas e incorrectas de cordones de soldadura en ángulo a tope de penetración parcial.

- Soldaduras en ángulo o de cordones. En ellas no se realiza ningún tipo de preparación en los bordes de la pieza a unir antes de soldar y la penetración del cordón se debe exclusivamente a la fusión que se genera durante el proceso. Se utiliza para unir elementos cuyas caras de fusión forman un ángulo (α) comprendido entre 60° y 120° . Pueden ser uniones en T o de solape (figura 92). En el caso de uniones en T:

- si $\alpha > 120^\circ$, no se considerará que se pueden transmitir esfuerzos.

- si $\alpha < 60^\circ$, se considerará como soldadura a tope con penetración parcial.

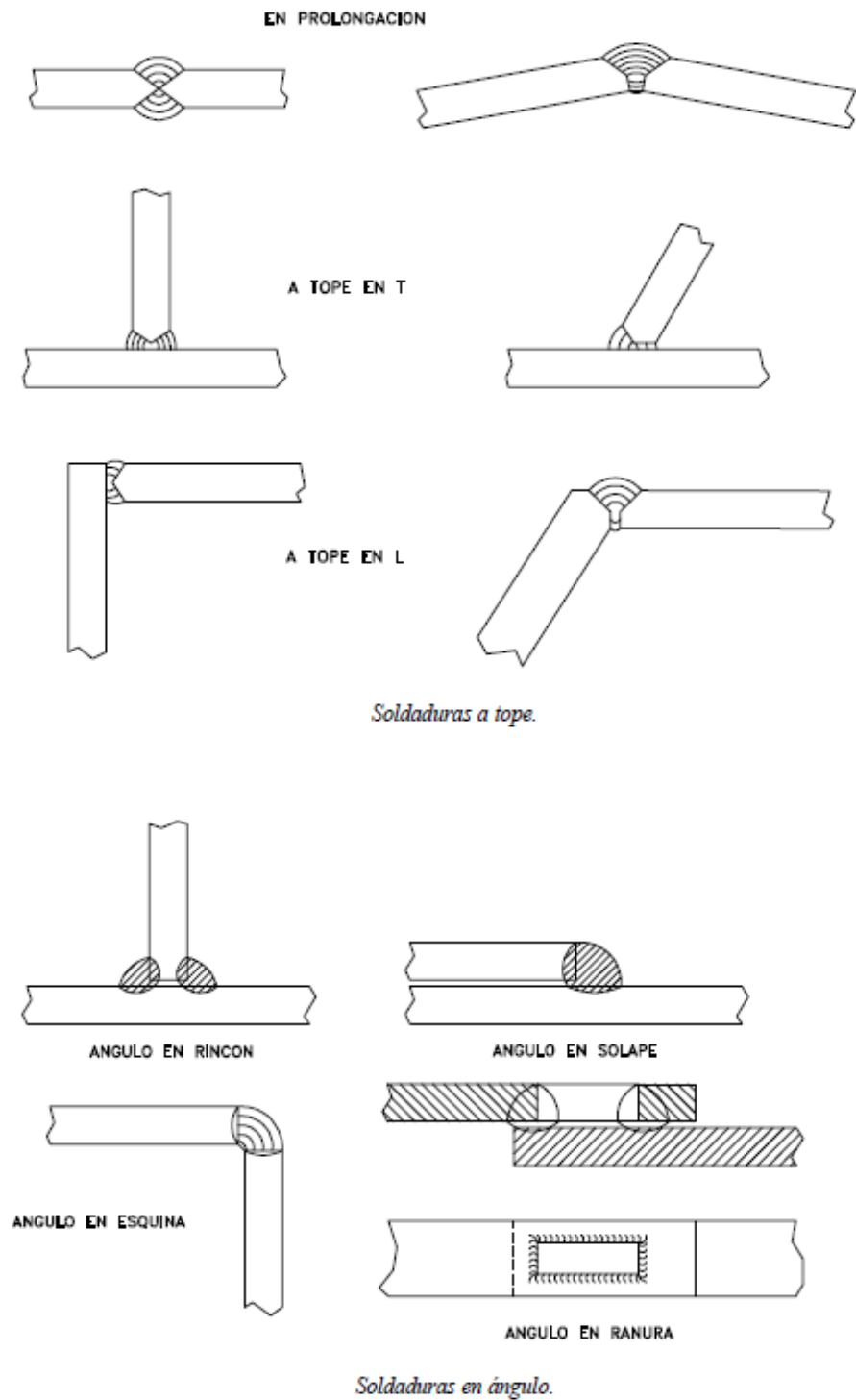


Figura 92. Tipos de cordones de soldadura.

Al igual que para la soldadura a tope, es necesario en los cordones de ángulo realizar la soldadura en varias pasadas (figura 93a). Efectuar varias pasadas mejora la calidad de la soldadura, pues si sobre una onda ya realizada se deposita la siguiente,

ésta produce un calentamiento que origina algo parecido a una normalización con posible eliminación de tensiones.

También el mismo cordón con igual espesor a de garganta puede ser: plano, ligero o colmado (figuras 93 b, c y d). En general, deben preferirse los cordones planos y ligeros a los colmados.

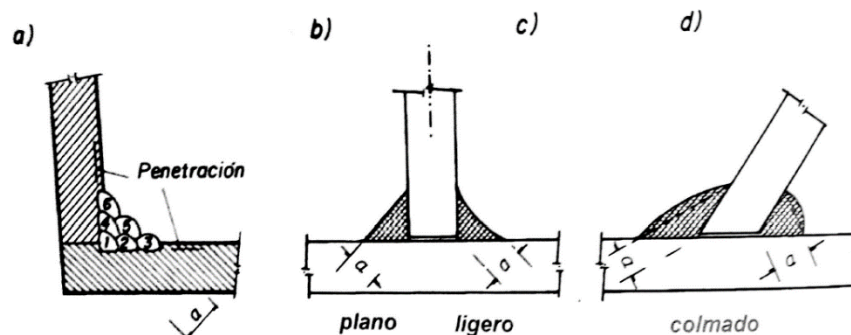


Figura 93. Cordones de ángulo.

Los cordones deberán, si es posible, prolongarse rodeando las esquinas, con el mismo espesor de garganta y la longitud de dos veces dicho espesor (figura 94).

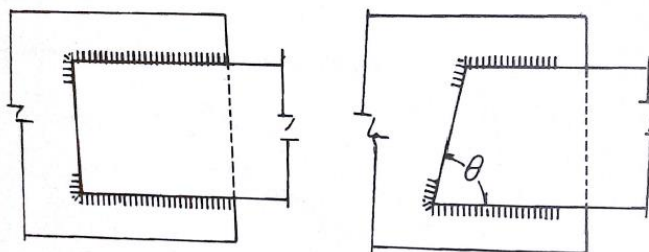


Figura 94. Prolongación en las esquinas de los cordones de ángulo.

Estos tipos definidos por la geometría de la unión, se pueden combinar de la forma indicada en la tabla siguiente:















Tipo de soldadura	Tipo de unión		
	Unión a tope	Unión a tope en T	Unión de solape
Soldadura en ángulo			
Soldadura de ojal (o en ranura)			
Soldadura a tope con penetración completa.	<p>Sencilla en V</p>  <p>En doble V</p>  <p>Sencilla en U</p>  <p>En doble U</p> 	   	
Soldadura a tope con penetración parcial	<p>En doble V</p>  <p>En doble U</p> 	<p>En chaflán doble</p> 	

Tabla 54. Tipos de uniones soldadas.

- Por la posición del cordón de soldadura respecto al esfuerzo:
 - Cordón frontal: Normal a la dirección de la fuerza.
 - Cordón lateral: Paralelo a la dirección de la fuerza.
 - Cordón oblicuo: Oblicuo a la dirección de la fuerza.

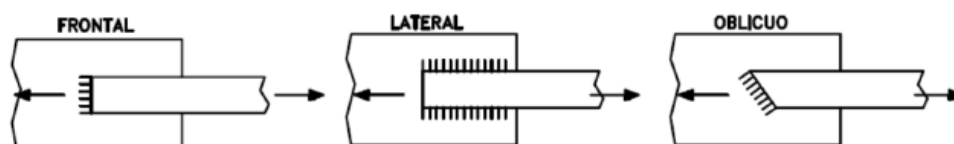


Figura 95. Clasificación del cordón de soldadura por la posición de este respecto al esfuerzo.

- Por la posición del cordón de soldadura durante la operación de soldar:
 - Cordón plano (H): Su superficie es aproximadamente horizontal. El metal de aportación se vierte desde encima.
 - Cordón horizontal en ángulo (C): Formado en la intersección de un plano horizontal con otro vertical, y sobre la cara superior del plano horizontal.
 - Cordón vertical (V): Su dirección es aproximadamente vertical.
 - Cordón en techo o en techo y en ángulo (T): Se sitúan en un plano horizontal, pero por su cara inferior.

La ejecución más recomendable es la del cordón plano y la del cordón de ángulo horizontal ya que el metal de aportación, fundido, se coloca por gravedad en la posición deseada.

Los cordones de techo son los más difíciles de realizar, debiéndose tomar las disposiciones constructivas convenientes, para limitarlos al mínimo.

Tan importante es la posición de los cordones que los soldadores, según su capacitación profesional, quedan encomendados de las soldaduras correspondientes a las siguientes posiciones:

- Sólo en posición horizontal.
- Cualquier posición, excepto en techo.
- Cualquier posición.

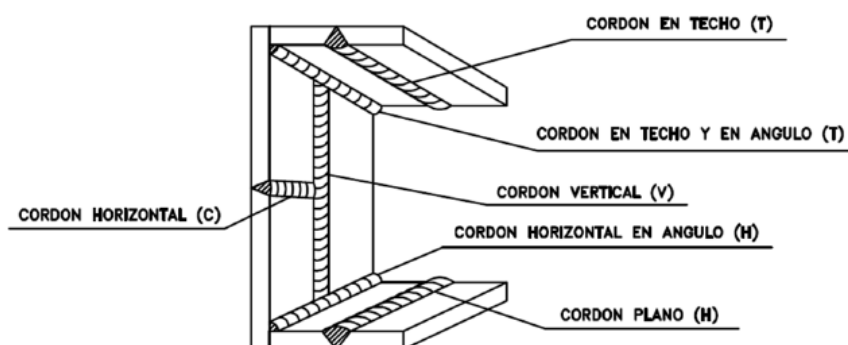


Figura 96. Clasificación del cordón de soldadura por la posición de este durante la operación a soldar.

Existen otros tipos de soldaduras pero las que se han empleado para la construcción de la grúa del presente proyecto son soldaduras a tope mayormente y soldaduras en ángulo.

3.12.2.6. Tensiones residuales

Al realizar un cordón de soldadura, las zonas próximas a él tienden a alargarse como consecuencia de las altas temperaturas que se originan. Estos alargamientos están inicialmente impedidos por el resto del material que permanece más frío. Posteriormente, el acortamiento que se presenta por el enfriamiento del cordón queda cortado por el material más frío, presentándose tensiones de tracción residuales, $\sigma_{r,0}$ en la soldadura y sus proximidades. Estas tensiones alcanzan valores máximos en dirección paralela al eje del cordón. Para restablecer el equilibrio de esfuerzos se genera un campo de tensiones autoequilibrado en el cual las fibras más alejadas del foco de calor presentan también tensiones de compresión menores en la misma dirección.

En la figura 97a, se representa, en una soldadura a tope de dos placas completamente libres, la distribución de las tensiones residuales longitudinales ($\sigma_{r,0}$) –paralelas al eje del cordón- y de las transversales $\sigma_{r,90}$ (figura 97b) –perpendiculares al eje del cordón-.

Mientras que las tensiones transversales no son muy elevadas (alrededor de 100 N/mm²) las longitudinales alcanzan valores muy altos –del orden del límite elástico del material-. En la figura 97c se recoge un modelo de distribución simplificado del campo de tensiones autoequilibrado correspondiente a las tensiones paralelas ($\sigma_{r,0}$). En la zona central (2c), se presentan tensiones residuales de tracción iguales al límite elástico (f_y).

La distribución de las tensiones residuales y su intensidad depende de muchos factores, entre los más importantes se citan los siguientes: procedimiento de soldadura, número de pasadas, espesor del cordón y geometría de las piezas a soldar.

Resumiendo, al ejecutar un cordón de soldadura se establece un estado de tensiones triaxial con claro predominio de las tensiones paralelas al eje del cordón.

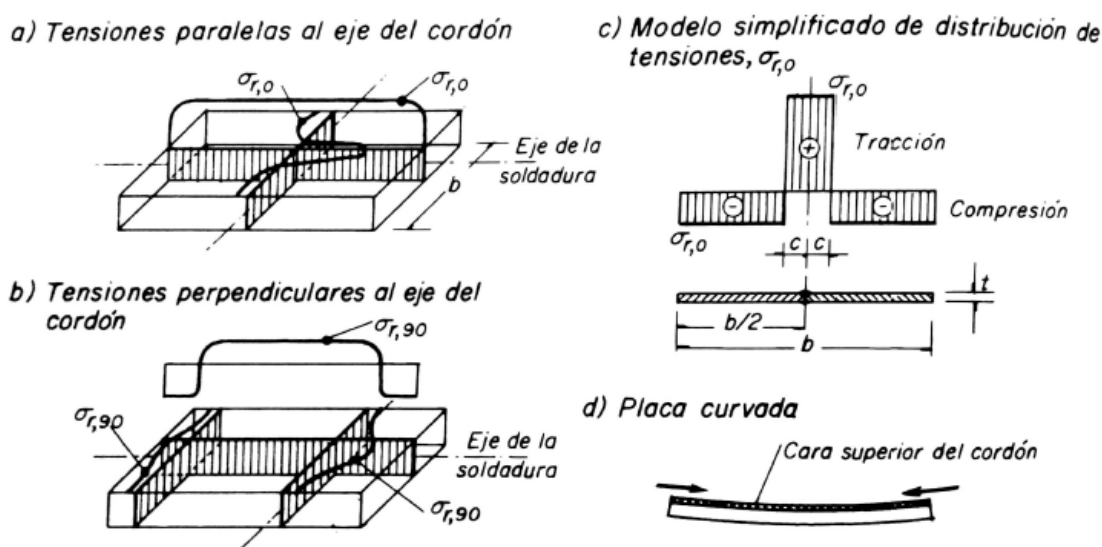


Figura 97. Tensiones residuales de una soldadura a tope.

Si el cordón es en V o en U, la distribución de tensiones axiales no es uniforme, siendo más importantes aquellas que se sitúan en la base del triángulo de soldadura, lo que da a lugar a flexiones que provocan cierta curvatura de la pieza (figura 97d).

Al situarse las tensiones residuales más importantes sobre el eje longitudinal del cordón, resulta que en la sección en la que se cruzan dos cordones el estado de tensiones es plano, ya que existen dos tensiones principales de tracción (figura 98a). Si son tres los cordones que se cruzan, el estado de tensiones es espacial (figura 98b), situación peligrosa, ya que en un estado de tensiones espacial se puede presentar la rotura frágil, lo que se aconseja evitar encuentros triaxiales de cordones.

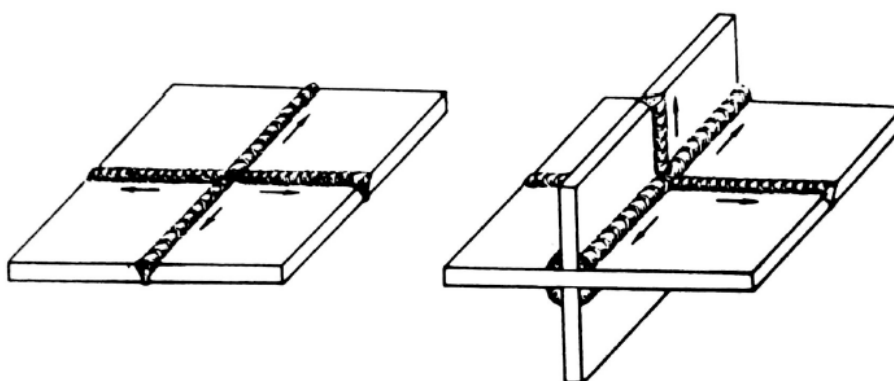


Figura 98. Cruces de cordones de soldadura.

A las tensiones residuales internas hay que añadir las debidas a las cargas y sobrecargas. Esta superposición no es peligrosa si es posible una adaptación plástica caso, por ejemplo, de un cordón solicitado a tracción según su eje longitudinal (figura 99).

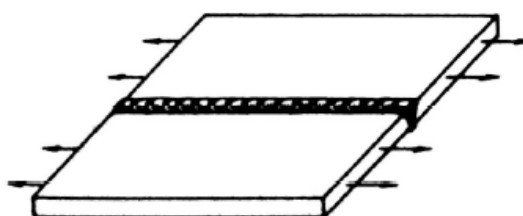


Figura 99. Cordón paralelo a las tensiones.

Por el contrario, si el esfuerzo de tracción se aplica sobre un cordón frontal (figura 100) se presenta en éste un estado plano de tensiones, motivo por el que se recomienda evitar, si es posible, las soldaduras a tope transversales a piezas extendidas.

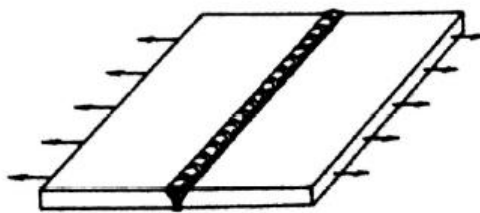


Figura 100. Cordón transversal a las tensiones.

3.12.2.7. Defectos de las soldaduras

Entre los defectos internos más importantes (figura 101a), cabe distinguir:

- a) Falta de penetración. La unión entre el metal base y el metal de aportación no es perfecta en algún punto, o queda alguna oquedad dentro del chaflán del material de aportación. Se produce por excesivo espesor, inadecuada preparación de los bordes, impericia del soldador, electrodos inadecuados o excesiva velocidad de ejecución.
- b) Falta de fusión. Se puede presentar si las superficies a soldar están revestidas por alguna capa de protección de cualquier tipo. Si las superficies están limpias y los electrodos son adecuados puede garantizarse la fusión completa.
- c) Poros u oclusiones. Se debe a las inclusiones de pequeñas bolas de gas en el metal depositado. Procede de una técnica inadecuada, consecuencia de un amperaje excesivo o de una longitud de arco también excesiva.
- d) Inclusiones de escoria. Procede de óxidos metálicos producidos por reacción química entre el metal, el aire y el revestimiento, si no es adecuado. También pueden presentarse en soldaduras verticales o de techo por un enfriamiento rápido.
- e) Grietas. Proceden de fisuras internas o en las caras debidas a tensiones residuales o esfuerzos mecánicos. Se deben a mala calidad del metal de aportación, o a un defecto del diseño de la unión.

Entre los principales defectos superficiales se citan: mordeduras, picaduras, desbordamientos, etc. (figura 101b).

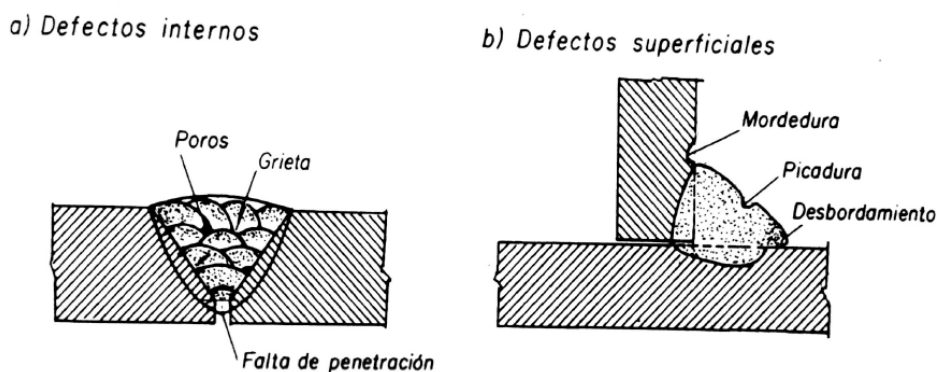


Figura 101. Defectos de las soldaduras.

Todos estos defectos se pueden evitar si la soldadura se efectúa cuidadosamente y se utilizan los electrodos adecuados.

3.12.2.8. Supervisión e inspección

Según las recomendaciones europeas (Europeans Recommendations for Steel Construction) la supervisión e inspección de las uniones soldadas incluye la comprobación de electrodos y de su adecuado almacenamiento, la preparación de las uniones, su presentación, el control de precalentado o del tratamiento térmico a aplicar, las secuencias de soldeo, su inspección visual y su control mediante pruebas radiográficas, ultrasónicas o con líquidos penetrantes.

En la inspección de la ejecución de las soldaduras los ensayos pueden ser: *destructivos*, realizados sobre placas de prueba extraídas de la unión realizada (en uniones a tope por fusión incluye los ensayos de tracción, plegado, impacto y rotura) y *no destructivos*, cada vez más empleados, que incluyen radiografías, ultrasonidos y líquidos penetrantes.

Si bien la inspección radiográfica es el método más seguro para examinar las soldaduras a tope, cada vez es más frecuente la prueba ultrasónica. Los defectos superficiales se detectan utilizando tintes penetrantes.

En la norma UNE 14001, que trata de la calificación de las soldaduras por rayos X y defectos de las uniones soldadas, la calidad de las soldaduras se fija de acuerdo con los grupos siguientes:

Color	Calidad	Clases de unión
Negro	1	<i>Soldadura perfecta</i>
Azul	2	<i>Soldadura buena</i>
Verde	3	<i>Soldadura regular</i>
Marrón	4	<i>Soldadura mala</i>
Rojo	5	<i>Soldadura muy mala</i>

Tabla 55. Clasificación de las soldaduras por rayos X.

Para determinar las clases de unión, que quedarán designadas por el número correspondiente, se tendrán en cuenta los defectos que aparezcan en la radiografía, con arreglo a las definiciones siguientes:

- **Soldadura perfecta.** Es la soldadura homogénea o soldadura con algunas inclusiones gaseosas muy pequeñas.
- **Soldadura buena.** Es la soldadura con débiles desviaciones de la homogeneidad, bajo la forma de uno o varios de los defectos siguientes: inclusiones gaseosas, inclusiones de escoria y mordeduras de bordes.
- **Soldadura regular.** Es la soldadura con pequeñas desviaciones de la homogeneidad, bajo la forma de uno o varios de los defectos siguientes: inclusiones gaseosas, inclusiones de escoria, mordedura de bordes y falta de penetración.
- **Soldadura mala.** Es la soldadura con marcadas desviaciones de la homogeneidad, bajo la forma de uno o varios de los defectos siguientes: inclusiones gaseosas, inclusiones de escoria, mordedura de bordes, falta de penetración y falta de fusión.
- **Soldadura muy mala.** Es la soldadura con gran desviación de la homogeneidad, bajo la forma de uno o varios de los defectos siguientes: inclusiones gaseosas, inclusiones de escoria, mordedura de bordes, falta de penetración, falta de fusión y grietas.

3.12.2.9. Clases de calidad

Se establecen una serie de clases entre las que se distinguen las siguientes:

- Calidad especial.
- Calidad superior.
- Calidad normal.
- Calidad mínima.

La elección de la calidad viene marcada por diferentes criterios: importancia de la obra, riesgo de los usuarios y del entorno, grado de sollicitación de la unión, tipo de comportamiento de la sección (elástico o plástico), características del detalle constructivo y su sensibilidad frente a la fatiga y rotura frágil, siendo posible que dentro de una misma estructura se presenten detalles que pertenezcan a diferentes clases de calidad.

El concepto de aseguramiento de la calidad incluye todas las medidas que se deben adoptar durante la elaboración del proyecto, fabricación y montaje.

3.12.2.10. Dimensiones fundamentales del cordón de soldadura

Las dimensiones fundamentales que sirven para determinar un cordón de soldadura son:

- Garganta, ancho o espesor de garganta (a). Es la altura del máximo triángulo isósceles cuyos lados iguales están contenidos en las caras de las dos piezas a unir y es inscribible en la sección transversal de la soldadura.
- Longitud eficaz (l). Es la longitud real de la soldadura menos los cráteres extremos. Se admite que la longitud de cada cráter es igual a la garganta.

$$l_{\text{eficaz}} = l_{\text{geométrica}} - 2 \cdot a$$

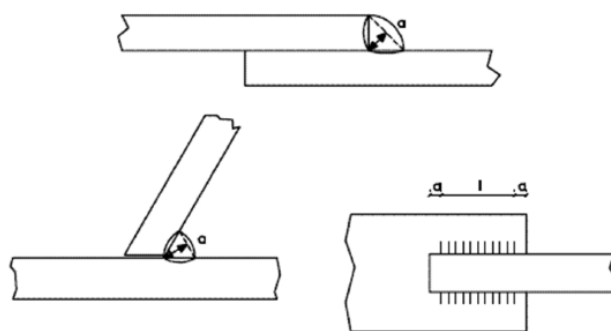


Figura 102. Longitud eficaz cordón de soldadura.

Se define el **plano de garganta** del cordón de soldadura (**A**) como el determinado por la línea de intersección de los dos planos a unir y la altura del mayor triángulo isósceles que puede ser inscrito en la sección del cordón (garganta).

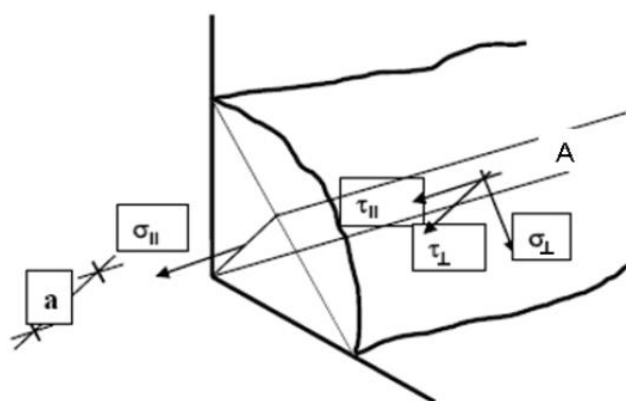


Figura 103. Plano de garganta de un cordón de soldadura.

3.12.2.11. Cálculo de soldaduras

En las uniones soldadas es mucho más importante una ejecución correcta que un cálculo más o menos riguroso. Todas las normas suponen que la ejecución de la soldadura cumple las reglas que la buena práctica aconseja, que el metal de aportación tiene como mínimo iguales o mejores características mecánico-resistentes que el metal base, y que una oportuna elección del material y un cuidadoso estudio de los detalles constructivos, evita la rotura frágil.

El proceso de cálculo del cordón de soldadura consiste en:

- Establecer el espesor de garganta del cordón a disponer en función de los espesores de las chapas a unir.
- Calcular la longitud del cordón de soldadura en función de los esfuerzos a transmitir y el espesor de garganta a disponer.
- Determinar la resistencia por unidad de superficie del cordón de soldadura.
- Verificar que la rigidez de la unión calculada corresponde al modelo de nudo a diseñar, rígido o articulado, cumpliendo las condiciones de diseño pertinentes.

Soldaduras a tope

Para el caso de las soldaduras a tope, el CTE o la anterior norma NBE EA-95 especifica que estas soldaduras, si son realizadas correctamente, esto es, ejecutadas continuas en toda su longitud y a penetración total, no requieren cálculo alguno, ya que al tener el metal de aportación una sección igual o mayor que la del metal de base y mayor, o al menos, igual límite elástico y carga de rotura, es evidente que su capacidad portante será superior (en uniones sometidas a cargas dinámicas sí que es preciso comprobarlas). La resistencia de cálculo será igual a la de la más débil de las piezas unidas.

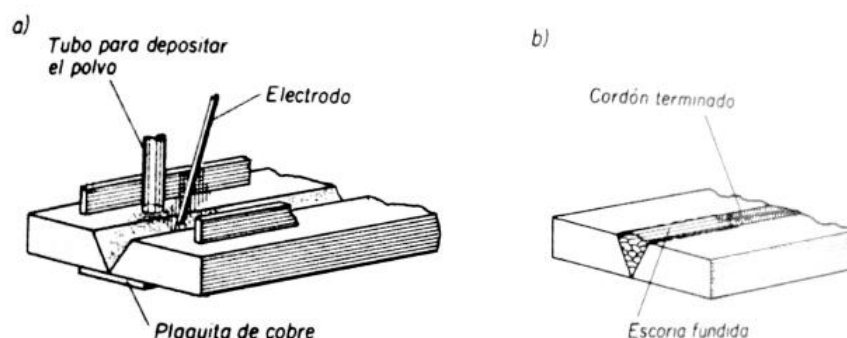


Figura 104. Ejecución de soldaduras a tope.

La mayor parte de soldaduras empleadas en el presente proyecto serán soldaduras a tope.

Resistencia de cálculo de las soldaduras a tope con penetración parcial

Como ya se ha comentado anteriormente, si la soldadura es de penetración total no es necesaria ninguna comprobación. La resistencia de cálculo será igual a la de la más débil de las piezas unidas.

En lo que respecta a las soldaduras a tope con penetración parcial, no se permite emplear un solo cordón para transmitir esfuerzos de tracción perpendiculares a su eje longitudinal.

En uniones con penetración parcial para transmitir la resistencia de cálculo, se determinará como la de los cordones de soldadura en ángulo, teniendo en cuenta lo siguiente:

- El espesor de garganta será la profundidad de la penetración que se pueda conseguir de forma estable, y que se debe determinar mediante evidencia experimental previa.
- Para el caso de que se tenga preparación de bordes en U, V, J o recto, se tomará como espesor de garganta el canto nominal de la preparación menos 2 mm, a menos que se puedan justificar experimentalmente valores superiores.
- Si la soldadura es en T, se comprobará como una soldadura a tope con penetración total, si se cumple lo siguiente:

$$a_{\text{nom},1} + a_{\text{nom},2} \geq t$$

$$c_{\text{nom}} \leq t/5 \text{ y } c_{\text{nom}} \leq 3 \text{ mm}$$

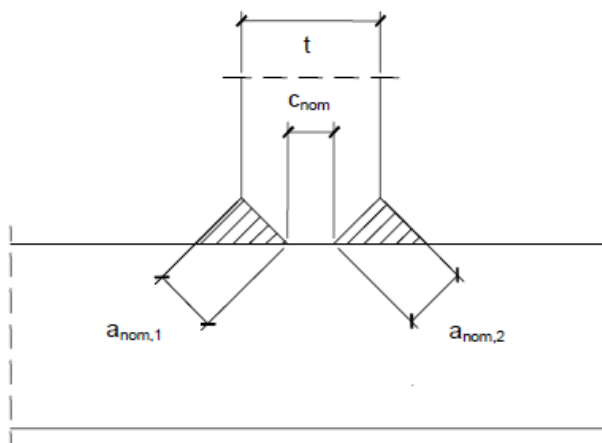


Figura 105. Soldadura a tope en T.

Soldaduras en ángulo

Se asimila el cordón de soldadura a un triángulo isósceles y se toma como sección de cálculo la definida por la altura a del triángulo isósceles, por ser la sección menor.

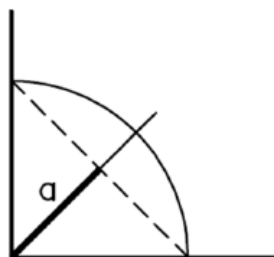


Figura 106. Triángulo isósceles que define el cordón de soldadura.

También se acepta que las tensiones son constantes a lo largo del plano definido por la altura a y cuya superficie es $a \cdot l$, siendo l la longitud de la soldadura.

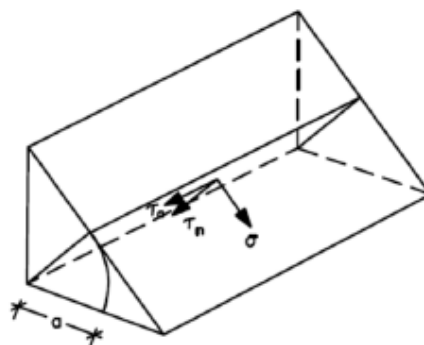


Figura 107. Plano definido por la altura a .

Sobre este plano, las componentes de las tensiones serán una tensión normal σ y dos componentes sobre el plano de referencia y perpendiculares entre sí, τ_a y τ_n .

A partir de estas tensiones, ya cada norma monta su expresión de cálculo, obtenida a partir de una base experimental, que proporciona la resistencia última de un cordón de soldadura. De este modo, la norma NBE EA-95, define como condición de seguridad de una soldadura en ángulo, que la tensión de comparación, σ_{co} , sea inferior a la resistencia de cálculo del acero. Es decir, que:

$$\sigma_{co} = \sqrt{\sigma^2 + 1,8(\tau_a^2 + \tau_n^2)} \leq f_u$$

siendo f_u la resistencia de cálculo del acero.

Aunque la tensión de comparación está referida al plano de garganta de la soldadura, en general resulta más sencillo para el cálculo abatir la sección de garganta sobre una de las caras del cordón. La relación entre las tensiones unitarias es la siguiente:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} (n + t_n)$$

$$\tau_n = \frac{1}{\sqrt{2}} (n - t_n)$$

$$\tau_a = t_a$$

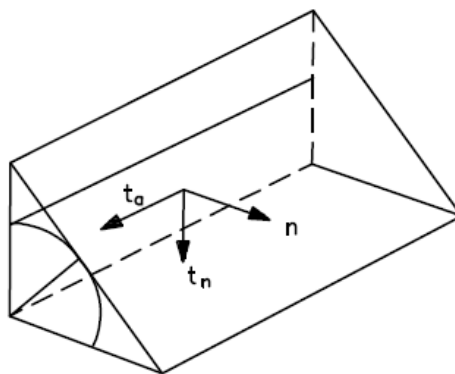


Figura 108. Abatimiento de la sección de garganta.

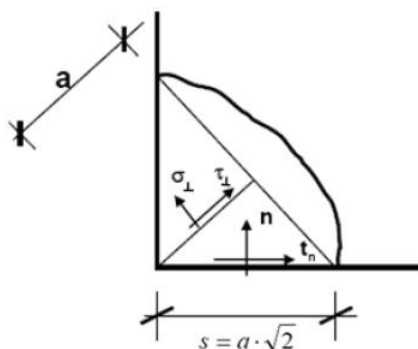


Figura 109. Tensiones abatidas en el cordón de soldadura.

Resistencia de cálculo de las soldaduras en ángulo

Como criterio general, todas las normas vigentes admiten que un cordón en ángulo agota su capacidad resistente cuando una determinada función del estado tensional, llamada **tensión de comparación**, σ_{co} , alcanza el valor de la tensión última del metal base. Es decir, y traducido en lenguaje matemático, cuando se cumple que:

$$\sigma_{co} = f(\sigma, \tau_a, \tau_n) = f_u$$

Cabe resaltar que σ_{co} no es más que un artificio ideado para facilitar los cálculos; y por consiguiente, no es una tensión real que pueda medirse con un dispositivo experimental.

Después de muchos años de estudio, y dada la complejidad el estado tensional existente en un cordón de soldadura, todavía no ha sido factible llegar a la determinación teórica de dicha función σ_{co} .

No obstante, y para dar una respuesta válida y a la vez que funcione, tradicionalmente se han admitido como válidas expresiones de la forma siguiente para la tensión de comparación:

$$\sigma_{co} = \beta \sqrt{k(\sigma^2 + \lambda(\tau_a^2 + \tau_n^2))}$$

donde los coeficientes β , k y λ se calculan mediante la realización de ensayos experimentales, donde los cordones de soldadura son llevados hasta la rotura (de ahí el que no se trabaje en “tensiones admisibles”).

Para el cálculo de las soldaduras en ángulo se pueden utilizar dos procedimientos:

Método direccional

Mediante este método, se pasa a descomponer los esfuerzos transmitidos por unidad de longitud en sus componentes tensionales, suponiendo que sobre la sección de garganta hay una distribución uniforme de tensiones.

Si se aplica el método de comprobación, la soldadura ejecutada en ángulo será suficiente si, con las tensiones de cálculo, se cumple simultáneamente que,

$$\sqrt{\sigma^2 + 3(\tau_a^2 + \tau_n^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$\sigma \leq 0,9 \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

siendo,

f_u = resistencia última de la pieza más débil de la unión.

σ = tensión normal perpendicular al plano de la garganta.

τ_n = tensión tangencial (en el plano de la garganta) perpendicular al eje del cordón.

τ_a = tensión tangencial (en el plano de la garganta) paralelo al eje del cordón.

γ_{M2} = factor parcial de seguridad, de valor 1,25.

β_w = coeficiente de corrección, según lo dado en la siguiente tabla.

acero	f_u N/mm ²	β_w
S 235	360	0,80
S 275	430	0,85
S 355	510	0,90

Tabla 56. Coeficiente de correlación, β_w .

Sustituyendo los valores de f_u y β_w para las calidades habituales de acero estructural, se obtienen los valores de la tabla siguiente:

acero	f_u N/mm ²	β_w	$f_{vw,d}$ N/mm ²
S 235	360	0,80	207,8
S 275	430	0,85	222,7
S 355	510	0,90	261,7

Tabla 57. Valores habituales de $f_{vw,d}$.

Método de la máxima tensión tangencial (simplificado)

Aplicando este otro criterio, la resistencia de una cordón de soldadura en ángulo es suficiente si la resultante de todas las fuerzas transmitidas por el cordón por unidad de longitud, $F_{W,Ed}$, no supera el valor de su resistencia de cálculo, $F_{W,Rd}$, con independencia de la orientación del cordón.

La comprobación de resistencia por unidad de longitud de un cordón en ángulo, por tanto, se realiza de acuerdo a la siguiente expresión:

$$F_{W,Ed} \leq F_{W,Rd} = a \cdot f_{vw,d}$$

siendo,

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot \sqrt{3}}, \text{ según marca el CTE y el EC3.}$$

f_u = resistencia última a tracción de la pieza más débil de la unión.

β_w = coeficiente de correlación, ya dado en la tabla 57.

a = espesor de garganta de un cordón en ángulo.

Esta última expresión de cálculo es más conservadora que la mostrada aplicando el método anterior y define la resistencia del cordón independientemente de su orientación con respecto a la de la sollicitación (cordón longitudinal, transversal, oblicuo).

Utilizando este último procedimiento se estaría del lado de la seguridad.

Se muestran a continuación en una tabla resumen las expresiones propuestas por las diferentes normativas para el cálculo de la resistencia de los cordones de soldadura en ángulo:

Método direccional
<p>La resistencia de un cordón será suficiente si se cumplen simultáneamente:</p> $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}$ $\sigma_{\perp} \leq 0.9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}} ; \text{ (en la EAE y el CTE no se incluye el parámetro 0.9)}$ <p>donde: σ_{\perp} = la tensión normal perpendicular a la garganta de la soldadura τ_{\perp} = la tensión tangencial (en el plano de garganta) perpendicular al eje de la soldadura τ_{\parallel} = la tensión tangencial (en el plano de garganta) paralela al eje de la soldadura f_u = la resistencia última del acero β_w = el coeficiente de correlación en función del tipo de acero γ_{M2} = el factor parcial de seguridad = 1.25</p>
Método de la máxima tensión tangencial
$F_{W,Ed} \leq F_{W,Rd} = a \cdot f_{vW,d}$ <p>donde: a = espesor de garganta</p> $f_{vW,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} ; \text{ para el EC3 y el CTE}$ $f_{vW,d} = \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2} \sqrt{2 + \cos^2 \alpha}} ; \text{ para la EAE}$

Tabla 58. Expresiones para el cálculo de resistencias en uniones soldadas.

Determinación de esfuerzos que solicitan a los cordones y condiciones que deben cumplir

En la comprobación de las uniones soldadas es necesario determinar qué esfuerzos solicitan a los cordones, lo cual es un problema muy complejo y no resuelto de forma general. Para el cálculo de estos esfuerzos se establecen las condiciones siguientes:

- a) Que exista equilibrio entre el conjunto de esfuerzos generados en los componentes de la unión y las fuerzas y momentos aplicados.
- b) Que las deformaciones obtenidas como consecuencia de la distribución establecida, no superen la capacidad de deformación de cada componente.
- c) Que cada componente resiste el esfuerzo supuesto.

En el cálculo de la estructura se utilizará generalmente un análisis elástico suponiendo uniones rígidas o flexibles. Si se suponen uniones semirrígidas deberán utilizarse las relaciones carga-deformación de cada componente de la unión.

Los esfuerzos transmitidos por la soldadura deberán cumplir una de las dos condiciones siguientes:

- No superar el valor de la resistencia de cálculo por unidad de longitud $F_{w,Rd}$.
- Como alternativa al punto anterior, se podrán descomponer los esfuerzos transmitidos por unidad de longitud en sus componentes, suponiendo que sobre la sección de garganta hay una distribución uniforme de tensiones (figura 110).

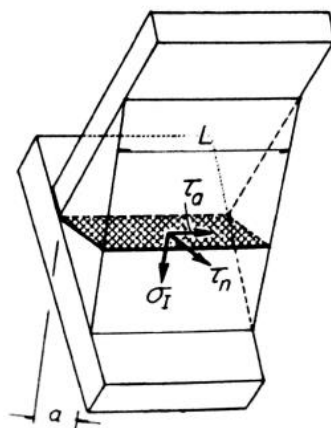


Figura 110. Descomposición de los esfuerzos transmitidos por unidad de longitud.

Para la determinación de la sección eficaz del cordón (figura 110), se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Como ya se ha dicho, los cordones deben, si es posible, prolongarse rodeando las esquinas con el mismo espesor de garganta y longitud dos veces dicho espesor.
- La longitud eficaz de un cordón de soldadura en ángulo será la total del cordón siempre que se mantenga el espesor de garganta nominal, pero no se considerarán cordones cuya longitud sea inferior a 40 mm o a seis veces el ancho de garganta ($6 \cdot a$).
- La sección eficaz de un cordón es la correspondiente a la superficie del rectángulo cuya base es la longitud eficaz, y su altura el espesor a .

Dimensionado del espesor de garganta del cordón de soldadura

El espesor de garganta a de un cordón de ángulo de una placa de espesor t estará comprendido entre los espesores que se indican en la tabla 59. En general, y con carácter orientativo, el espesor de garganta a de un cordón de ángulo que une dos perfiles de espesores $t_1 \leq t_2$ no debe ser inferior a $0,3 \cdot t_2$ ni superior a $0,7 \cdot t_1$. Además, el espesor de garganta no será menor de 3 mm.

Espesor de la pieza (mm)	Garganta a		Espesor de la pieza (mm)	Garganta a	
	valor max	valor min		valor max	valor min
4,0 - 4,2	3,0	3,0	13,5-14,1	9,5	5,0
4,3 - 4,9	3,0	3,0	14,2 - 15,5	10,0	5,0
5,0 - 5,6	3,5	3,0	15,6 - 16,9	11,0	5,5
5,7 - 6,3	4,0	3,0	17,0 - 18,3	12,0	5,5
6,4 - 7,0	4,5	3,0	18,4 - 19,7	13,0	6,0
7,1 - 7,7	5,0	3,0	19,8 - 21,2	14,0	6,0
7,8 - 8,4	5,5	3,0	21,3 - 22,6	15,0	6,5
8,5 - 9,1	6,0	3,5	22,7 - 24,0	16,0	6,5
9,2 - 9,9	6,5	3,5	24,1 - 25,4	17,0	7,0
10 - 10,6	7,0	4,0	25,5 - 26,8	18,0	7,0
10,7 - 11,3	7,5	4,0	26,9 - 28,2	19,0	7,5
11,4 - 12,0	8,0	4,0	28,3 - 31,1	20,0	7,5
12,1 - 12,7	8,5	4,5	31,2 - 33,9	22,0	8,0
12,8 - 13,4	9,0	4,5	34,0 - 36,0	24,0	8,0

Tabla 59. Valores límite de la garganta de cordones de soldadura, en mm, en uniones de fuerza.

En los perfiles con borde redondeado se toma como espesor nominal en el ala el espesor medido en la tangencia con el cilindro de redondeo (figura 111).

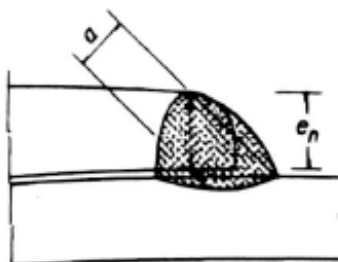


Figura 111. Espesor nominal en e_n un perfil de borde redondeado.

Resumiendo, el espesor de garganta de una soldadura en ángulo deberá cumplir la siguiente condición:

$$a \leq 0,7 \cdot e_{\text{mín}}$$

siendo e_{\min} el mínimo espesor de las chapas soldadas. El resultado de la expresión anterior se redondeará a la baja, no pudiendo adoptar calores inferiores a los mostrados a continuación en función del espesor de las chapas.

$$a \geq 3 \text{ mm para } e_{\min} \leq 10 \text{ mm}$$

$$a \geq 4,5 \text{ mm para } e_{\min} \leq 20 \text{ mm}$$

$$a \geq 5,6 \text{ mm para } e_{\min} > 20 \text{ mm}$$

Dimensionado de la longitud del cordón de soldadura

Obtención de la longitud del cordón de soldadura necesaria para transmitir un esfuerzo F_{Ed}

Dado el esfuerzo que solicita a la unión, una vez obtenido el espesor de garganta, función del espesor de las chapas a unir, la longitud del cordón de soldadura a disponer deberá cumplir la siguiente condición:

$$F_{W,Ed} \leq a \cdot L_W \cdot f_{vw,d}$$

Es decir, la longitud dispuesta de cordón de soldadura, L_W , deberá ser:

$$L_W \geq \frac{F_{W,Ed}}{a \cdot f_{vw,d}}$$

Además, se deberán cumplir las siguientes disposiciones mínimas:

$$L > 40 \text{ mm } \text{ó} \text{ } 6 \cdot a$$

En cordones laterales, paralelos al esfuerzo, que trasmitan axiles entre las piezas unidas, su longitud mínima será:

$$L > b \text{ ó } 15 \cdot a$$

siendo b la anchura de la pieza unida.

Obtención de la resistencia de un cordón de soldadura determinado

Determinado el espesor de garganta y la longitud del cordón de soldadura en ángulo a disponer, la resistencia del mismo será igual al valor obtenido en la siguiente expresión:

$$F_{W,Rd} = a \cdot L_w \cdot f_{vw,d}$$

Resistencia que deberá ser mayor o igual al esfuerzo que solicita a la soldadura. Esta comprobación se realiza en aquellos casos en que la longitud del cordón de soldadura es limitada, debiendo comprobar que, el cordón de soldadura dispuesto es suficiente para transmitir los esfuerzos previstos.

3.12.2.12. Disposiciones constructivas

En la siguiente tabla se recoge la información más relevante, en cuanto a disposiciones constructivas de las soldaduras, según la normativa que se aplique. Para el presente proyecto se seguirá la normativa relativa al CTE.

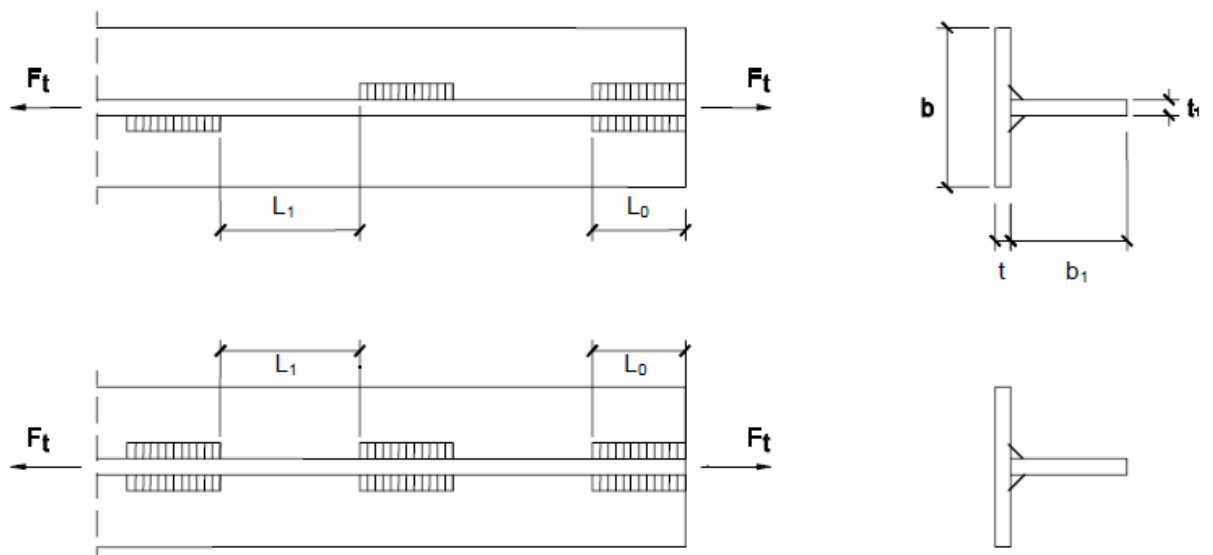
	EAE	DB SE-A	EC3
ESPESOR DE GARGANTA			
	$a \geq 3mm$ en chapas $\leq 10mm$ $a \geq 4,5mm$ en chapas $\leq 20mm$ $a \geq 5,6mm$ en chapas $> 20mm$	$a \geq 4mm$	$a \geq 3mm$
Piezas de sección tubular	$a \geq 0,7 t_{\min}$		
TERMINACIÓN			
	Los cordones deben prolongarse en una longitud al menos igual a $3a$	Deben prolongarse con el mismo espesor de garganta y longitud $2a$	Los cordones que terminen en esquinas deben prolongarse con una longitud igual a $\sqrt{2} \cdot a$
CORDONES DISCONTINUOS			
	Se pueden utilizar en ambientes con grado de corrosividad C1 o C2, con cargas predominantemente estáticas, y siempre que el espesor de garganta requerido sea inferior al recomendado.	No utilizables en ambientes corrosivos	No deben utilizarse soldaduras a tope discontinuas. No utilizables en ambientes corrosivos.
Dist. Entre extremos de cordones parciales	$L_1 \leq 200mm$, $L_1 \leq 12 t_{\min} (comp.)$, $L_1 \leq 16 t_{\min} (trac.)$, $L_1 \leq$ una cuarta parte de la distancia entre rigidizadores, cuando la soldadura se usa para conectarlos a una chapa o a una parte de una pieza sometida a compresión o a cortadura.	$L_2 \leq 12 t, 12 t_1, 0,25b, 200mm (comp.)$ $L_1 \leq 16 t, 16 t_1, 200mm (trac.)$	
Longitud de cada cordón parcial	$L_0 \geq 5 \cdot a$ $L_0 \geq 40mm$	$L_0 \geq 0,75 \cdot b_1, 0,75 \cdot b$	
Cordones parciales en los extremos	En cordones en ángulo discontinuos siempre tienen que existir, y deben tener una longitud $\geq \frac{3}{4} t_{\min}$	Es un detalle obligatorio	En cordones en ángulo discontinuos siempre tienen que existir, y deben tener una longitud $\geq \frac{3}{4} t_{\min}$
LONGITUD MÍNIMA			
	Los cordones en ángulo laterales que transmitan axil, $L_w \geq 15 \cdot a$ y $L_w \geq$ ancho de la pieza a unir.		

LONGITUD EFECTIVA			
La total del cordón si se mantiene el espesor de garganta nominal			
$L_{w,ef} \geq 40\text{mm}$ y $L_{wef} \geq 6 \cdot a$		$L_{w,ef} \geq 30\text{mm}$ y $L_{wef} \geq 6 \cdot a$	
SOLAPES			
$Solape \geq 5 \cdot t_{\min}$ $Solape \geq 25\text{mm}$			
+			
cordones frontales (si existen esfuerzos axiales)			
Si $L_w \geq 150 \cdot a \rightarrow$ $L_{w,ef} = \beta_1 \cdot L_w$ donde $\beta_1 = 1,2 - \frac{0,2 \cdot L_w}{150a} \leq 1$ ó $0,6 \leq \beta_1 = 1,1 - \frac{L_w}{17000} \leq 1$ si $L_w > 1700\text{mm}$	Si $L_w \geq 150 \cdot a \rightarrow$ $L_{w,ef} = \beta_1 \cdot L_w$ donde $\beta_1 = 1,2 - \frac{0,2 \cdot L}{150a} \leq 1$ L=longitud total del solape en la dirección del esfuerzo	Si $L_w \geq 150 \cdot a \rightarrow$ $L_{w,ef} = \beta_1 \cdot L_w$ donde $\beta_1 = 1,2 - \frac{0,2 \cdot L_l}{150a} \leq 1$ ó $L_l = \text{long. Total del solape en la dirección del esfuerzo}$ $0,6 \leq \beta_1 = 1,1 - \frac{L_w}{17} \leq 1$ si $L_w > 1,7 \text{ m}$	
DESGARRO LAMINAR			
Se trataran de evitar uniones en las que la dirección principal de las tensiones de tracción sea transversal a la dirección de laminación de las chapas que se unen.			

Tabla 60. Disposiciones constructivas de los cordones de soldadura.

En cordones discontinuos la distancia libre entre cordones deberá verificar las condiciones indicadas en las siguientes figuras:

- a) Tracción: $L_1 \leq 16 \cdot t$, $16 \cdot t_1$, 200 mm ; $L_0 \geq 0,75 \cdot b_1$, $0,75 \cdot b$



b) Compresión: $L_1 \leq 12 \cdot t, 12 \cdot t_1, 0,25 \cdot b, 200 \text{ mm}$; $L_0 \geq 0,75 \cdot b_1, 0,75 \cdot b$

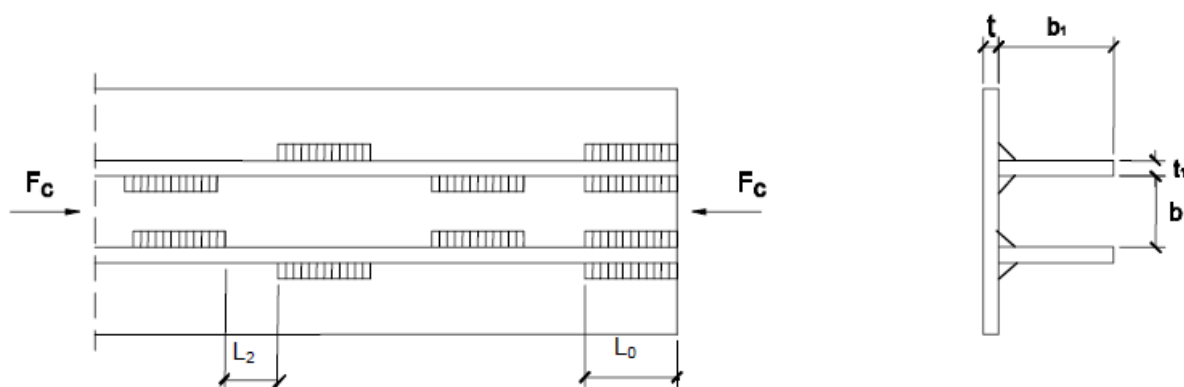


Figura 112. Dimensiones relevantes en los cordones de soldadura para comprobar los requisitos relativos a las disposiciones constructivas.

3.12.2.13. Cálculo de las soldaduras presentes

En la siguiente tabla se muestran las soldaduras presentes en el proyecto:

Uniones soldadas		
	Unión	Tipo
1	Pernos de anclaje-Placa de anclaje	Soldadura a tope
2	Placa de anclaje-Columna	Soldadura a tope circundante
3	Cartela base columna-Columna	Soldadura a tope
4	Cono rodamiento-Columna	Soldadura a tope
5	Cilindro-Tapa rodamiento-Placa superior	Soldadura a tope circundante
6	Refuerzo-Tapa rodamiento-Placa superior	Soldadura a tope
7	Pluma-Placa superior	Soldadura en ángulo
8	Cartela pluma-Pluma	Soldadura a tope
9	Protector meteorológico-Pluma	Soldadura a tope
10	Carril de rodadura-Pluma	Soldadura a tope
11	Chapa cierre pluma-Pluma	Soldadura a tope
12	Soporte tope-Varilla tope	Soldadura a tope
13	Tope final de carrera-Pluma	Soldadura a tope
14	Perfil cuadrado1-Perfil cuadrado 2-Perfil cuadrado 3- Guía	Soldadura a tope
15	Guía cable-Pluma	Soldadura a tope

Tabla 61. Uniones soldadas.

Cálculo de la unión del alma con las platabandas

Para la unión del alma con las platabandas debe cumplirse:

$$\frac{F \cdot S}{2 \cdot a \cdot I_x} \leq 0,75 \cdot \sigma_u$$

siendo:

F = esfuerzo cortante en la sección.

S = momento estático de la platabanda respecto al eje x.

a = espesor de garganta del cordón de soldadura.

I_x = momento de inercia de la sección completa respecto al eje x .

σ_u = tensión última o de rotura del material de las chapas a unir.

Puede, del lado de la seguridad, utilizarse la fórmula simplificada siguiente:

$$\frac{F}{2 \cdot a \cdot h_a} \leq 0,75 \cdot \sigma_u$$

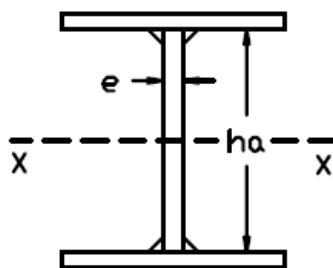


Figura 113. Unión del alma con platabandas.

Cálculo de la soldadura entre la pluma y la placa superior

La unión entre la pluma y la placa superior se calculará teniendo en cuenta que los cordones de soldaduras deberán resistir los esfuerzos a los que están sometidos.

Se recomienda que las gargantas de las diferentes soldaduras sean las mismas para evitar confusiones en la ejecución.

Se realizará una soldadura en ángulo únicamente con cordones frontales transversales.

Dependiendo de los espesores de los materiales a soldar, las gargantas tienen unos valores máximos y mínimos. Dado que el espesor del ala de la pluma es de 19 mm (espesor menor de las chapas a unir), si se consulta en la tabla 59 se observa que para este caso el espesor de la garganta está comprendido entre 6 mm y 13 mm.

Por otro lado, la pluma está apoyada sobre una placa de 40 mm de espesor.

Se tomarán como longitudes de cordón: $L_1 = 1120$ mm y $L_2 = 400$ mm.

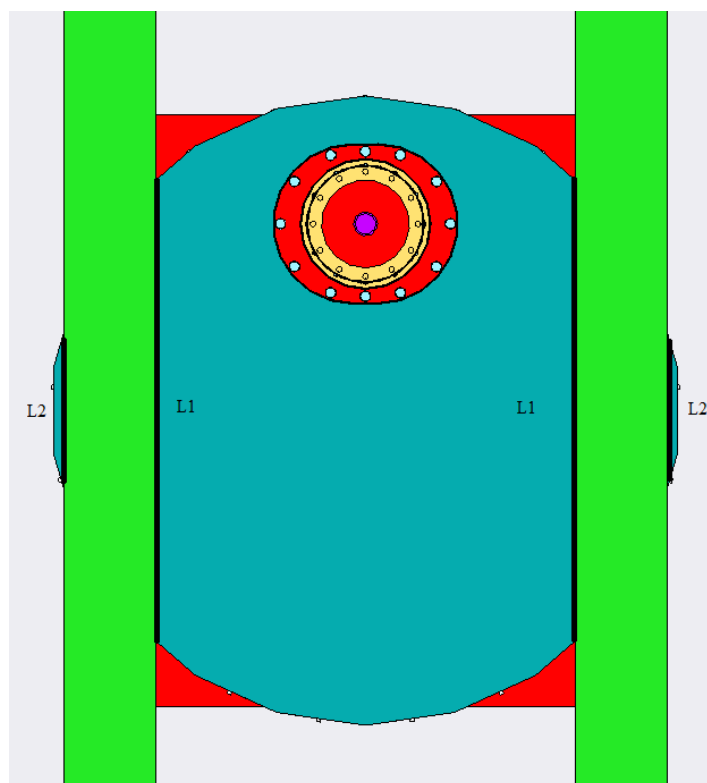


Figura 114. Cordones de soldadura unión pluma-placa superior.

Para el cálculo de las soldaduras, las cargas deben estar mayoradas con los coeficientes FEM. Estas solicitaciones son las obtenidas anteriormente en el cálculo de la estructura para la situación más desfavorable, que tal y como se observa es en servicio sin viento.

Se considerarán los mismos esfuerzos que para el cálculo del dimensionamiento de la pluma.

Cálculo a compresión

La resultante de las tensiones sobre la sección de garganta en un cordón frontal debe equilibrar, como se observa en la figura 115, la fuerza $N/2$.

$$\sigma_I = \frac{N}{2 \cdot a \cdot L} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \quad ; \quad \tau_n = -\frac{N}{2 \cdot a \cdot L} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \quad ; \quad \tau_a = 0$$

Sustituyendo estas expresiones en la ecuación:

$$\sqrt{\sigma_I^2 + 3\tau_n^2} = \sqrt{2} \cdot \frac{N}{2 \cdot a \cdot L} = 1,414 \cdot \frac{N}{2 \cdot a \cdot L} \leq \frac{f_u}{\beta_W \cdot 1,25}$$

Esta expresión adopta los formatos siguientes:

$$\frac{N}{2 \cdot a \cdot L} \leq \frac{0,565 \cdot f_u}{\beta_W} \quad \text{ó} \quad \frac{N}{\Sigma(a \cdot L)} \leq \frac{0,565 \cdot f_u}{\beta_W}$$

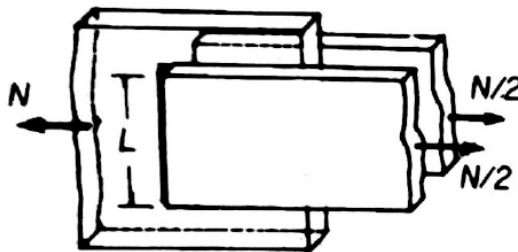


Figura 115. Cálculo de un cordón frontal.

Cálculo a flexión

Como se ha mencionado anteriormente, la unión pluma-placa superior se realizará con cordones frontales transversales (figura 116).

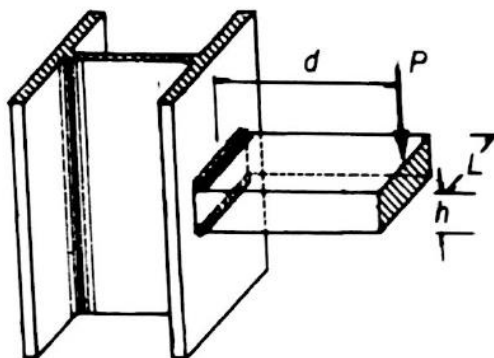


Figura 116. Unión soldada resistiendo a flexión con cordones frontales transversales.

El cálculo se efectúa análogo al expuesto anteriormente. La manera más sencilla de operar consiste en abatir las secciones de garganta sobre el plano que contiene todos los cordones. Las tensiones normales n sobre estos cordones abatidos se deducen fácilmente aplicando las expresiones:

$$n(z) = \frac{M}{I} \cdot Z \quad ; \quad n_{\text{máx}} = \frac{M}{W}$$

donde:

I = momento de inercia de la sección de garganta abatida sobre el plano de la unión.

M = momento flector de cálculo que solicita a la unión.

z = altura de la fibra considerada con relación al centro de gravedad de la sección abatida.

W = módulo resistente de la sección de garganta, abatida sobre el plano de la unión.

$n_{\text{máx}}$ = tensión normal máxima de cálculo referida a la superficie de la sección de garganta abatida sobre el plano de la unión.

Estas tensiones normales $n(z)$ referidas a la sección de garganta (figura 117), dan lugar en el cordón superior con el criterio de signos indicado en la figura a:

$$\sigma_l(z) = \frac{n(z)}{\sqrt{2}} \quad ; \quad \tau_l(z) = \frac{-n(z)}{\sqrt{2}} \quad ; \quad \tau_a(z) = 0$$

Y en el inferior, los mismos calores pero con signos cambiados.

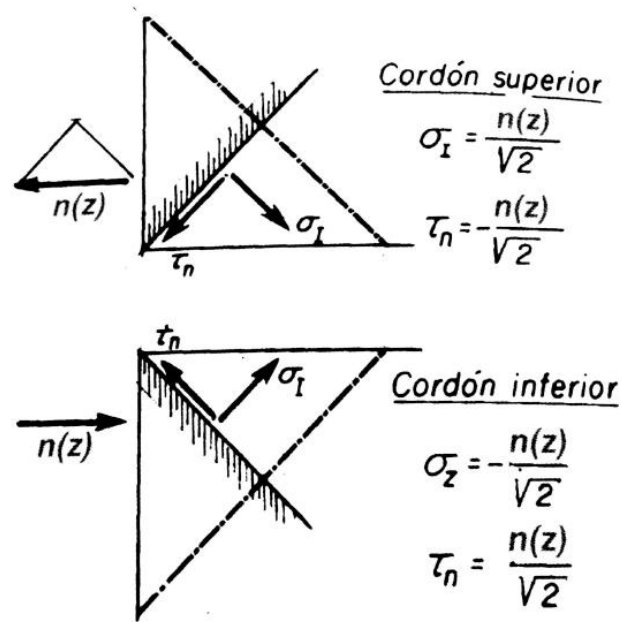


Figura 117. Criterio de signos para las tensiones en un cordón de soldadura.

El esfuerzo cortante P provocará también tensiones en la sección de garganta que se superponen a las anteriormente deducidas.

Para uniones con cordones frontales laterales (figura 118):

El momento flector, $P \cdot d$, provoca la tensión:

$$n_{\text{máx}} = \frac{P \cdot d}{W}$$

$W = L \cdot h \cdot a$ (si a es pequeño comparado con h).

En el cordón inferior (figura 117):

$$\tau_{n,\text{máx}} = -\sigma_{I,\text{máx}} = \frac{n_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} \cong \frac{P \cdot d}{\sqrt{2} \cdot L \cdot h \cdot a}$$

Este tipo de unión no es adecuado para resistir esfuerzos cortantes; de existir, se supone que se distribuyen uniformemente en la sección de gargantas abatida. En el cordón inferior será:

$$t_{n,med} = \frac{P}{2 \cdot a \cdot L}$$

Y pasando a tensiones en el plano de la garganta:

$$\sigma_{I,med} = \frac{P}{2 \cdot a \cdot L \cdot \sqrt{2}} \quad ; \quad \tau_{n,med} = \frac{P}{2 \cdot a \cdot L \cdot \sqrt{2}}$$

Sumando las tensiones originadas por la flexión y cortante combinados, se obtienen:

$$\tau_{n,m\acute{a}x} = \frac{P \cdot d}{L \cdot h \cdot a} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{P}{2 \cdot a \cdot L \cdot \sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{P}{L \cdot h \cdot a} \cdot \left(d + \frac{h}{2} \right)$$

$$\sigma_{I,m\acute{a}x} = -\frac{P \cdot d}{L \cdot h \cdot a} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{P}{2 \cdot a \cdot L \cdot \sqrt{2}} = -\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{P}{L \cdot h \cdot a} \cdot \left(d - \frac{h}{2} \right)$$

Si la influencia del cortante es poco importante, resulta:

$$\sqrt{\sigma_{I,m\acute{a}x}^2 + 3\tau_{n,m\acute{a}x}^2} = 1,41 \cdot P \cdot \frac{d}{L \cdot h \cdot a} < \frac{0,80 \cdot f_u}{\beta_w}$$

En la práctica se utiliza la ecuación siguiente:

$$\frac{P \cdot d}{L \cdot h \cdot a} \leq \frac{0,56 \cdot f_u}{\beta_w}$$

Cálculo a torsión

En uniones con sólo cordones laterales:

El momento torsor $M_t = F \cdot e$ se descompone en un par de fuerzas T que actúan sobre los cordones:

$$M_t = F \cdot e = T \cdot \left(h + 2 \cdot \frac{a}{2} \right) = T \cdot (h + a)$$

Estas fuerzas producen en los dos cordones la tensión tangencial longitudinal:

$$t_a = \tau_a = \frac{T}{a \cdot L} = \frac{M_t}{a \cdot (h+a) \cdot L}$$

$$t_n = \frac{F}{2 \cdot L \cdot a} \quad ; \quad \sigma = \tau_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot t_n$$

que se puede considerar como uniforme distribuida a lo largo de los cordones.

Resulta:

$$\sigma_{co} = \sqrt{\sigma^2 + 1,8(\tau_a^2 + \tau_n^2)} \leq \sigma_u$$

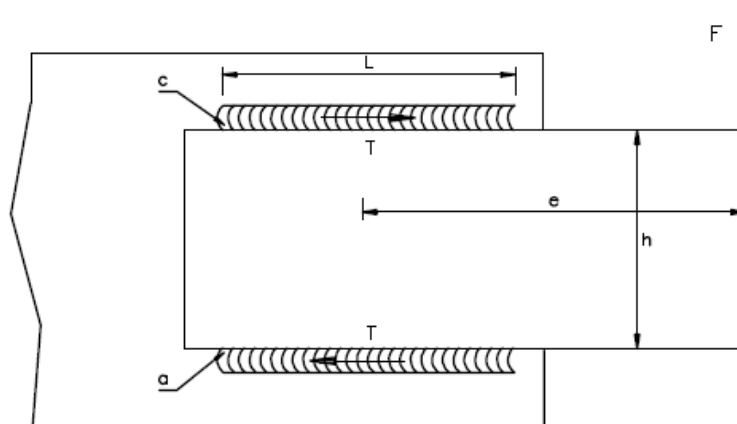


Figura 118. Unión con sólo cordones laterales.

3.12.2.14. Resolución de cálculos uniones soldadas

UNIONES SOLDADAS

Cálculo soldadura alma-platabandas

Esfuerzos en la sección (Caso más desfavorable: En servicio sin viento)

γ_s	1,06	
C_d	1,02	
C_s	1,50	
V_{y1}	33510,96	N
V_{y2}	43899,75	N
$V_{y1} \cdot \gamma_s \cdot C_s$	53282,43	N
$V_{y2} \cdot \gamma_s \cdot C_d \cdot C_s$	71475,82	N
V_y	124758,24	N
V_3	1065,92	N
$V_3 \cdot \gamma_s \cdot C_s$	1694,81	N
V_x	1694,81	N
V	124769,75	N
F = V	124769,75	N
t_1	12,00	mm
t_2	19,00	mm
a (TABLA) ≥ 3 mm	6,00	mm
$0,3 \cdot t_2 < a$ ✓	5,70	mm
$0,7 \cdot t_1 > a$ ✓	8,40	mm
h_a	562,00	mm
F/(2·a·h_a)	18,50	N/mm²
σ_u	410,00	N/mm ²
0,75·σ_u	307,50	N/mm²
F/(2·a·h_a) \leq 0,75·σ_u ✓		

Cálculo soldadura pluma-placa superior

Tipo de soldadura

Soldadura en ángulo. Unión con sólo cordones frontales transversales

Esfuerzos en la sección (Caso más desfavorable: En servicio sin viento)

N_1	110323,26	N
M_1	-286216560,00	N·mm
N_2	87799,50	N
M_2	702396000,00	N·mm
T_3	2334360,00	N·mm
$N_1 \cdot \gamma_S \cdot C_S$	175413,98	N
$M_1 \cdot \gamma_S \cdot C_S$	-455084330,40	N·mm
$N_2 \cdot \gamma_S \cdot C_d \cdot C_S$	142951,63	N
$M_2 \cdot \gamma_S \cdot C_d \cdot C_S$	1143613071,36	N·mm
N	318365,62	N
M	688528740,96	N·mm
$T_3 \cdot \gamma_S \cdot C_S$	3711632,40	N·mm
T	3711632,40	N·mm

Espesor de garganta del cordón de soldadura (a)

t_1	19,00	mm
t_2	40,00	mm
a (TABLA) ≥ 3 mm	13,00	mm
$0,3 \cdot t_2 < a \checkmark$	12,00	mm
$0,7 \cdot t_1 > a \checkmark$	13,30	mm

Longitud del cordón de soldadura (l)

L_1	1120	mm
L_2	400	mm

Resistencia del cordón de soldadura

Solicitaciones de compresión

N	318365,62	N
a_1	13,00	mm
L_1	1120,00	mm
a_2	13,00	mm
L_2	400,00	mm
f_u	430,00	N/mm ²
β_w (TABLA)	0,85	
$N/(a_1 \cdot L_1 + a_2 \cdot L_2)$	16,11	N/mm²
$(0,565 \cdot f_u)/\beta_w$	285,82	N/mm²
$N/(a_1 \cdot L_1 + a_2 \cdot L_2) \leq (0,565 \cdot f_u)/\beta_w \checkmark$		

Solicitaciones de flexión

M	688528740,96	N·mm
L ₁	1120	mm
L ₂	400	mm
h	220	mm
a	13,00	mm
f _u	430,00	N/mm ²
β _w	0,85	
Cordón 1		
M/(L ₁ ·h·a)	214,95	N/mm ²
Cordón 2		
M/(L ₂ ·h·a)	601,86	N/mm ²
(0,56·f _u)/β _w	283,29	N/mm ²
M/(L ₁ ·h·a) ≤ (0,56·f _u)/β _w ✓		
M/(L ₂ ·h·a) ≤ (0,56·f _u)/β _w ✗		

Solicitaciones de torsión

F _{inconj}	1065,92	N
F = F _{inconj} ·γ _S ·C _S	1694,81	N
M _t = T	3711632,40	N·mm
a	13,00	mm
h	220,00	mm
L ₁	1120,00	mm
L ₂	400,00	mm
Cordón 1		
t _a = τ _a	1,09	N/mm ²
t _n	0,06	N/mm ²
σ = τ _n	0,04	N/mm ²
σ _c	1,47	N/mm ²
σ _u	430,00	N/mm ²
σ _c ≤ σ _u ✓		
Cordón 2		
t _a = τ _a	3,06	
t _n	0,16	N/mm ²
σ = τ _n	0,12	N/mm ²
σ _c	4,11	N/mm ²
σ _u	430,00	N/mm ²
σ _c ≤ σ _u ✓		

3.12.2.15. Redimensionamiento de la estructura debido a la soldadura pluma-placa superior

Al no soportar el cordón 2 las solicitaciones de flexión, es preciso aumentar la longitud de dicho cordón. Para ello, se ha optado por modificar la placa superior. Se ha redimensionado la forma de dicha placa, pasando a tener una forma rectangular en vez de redondeada. De esta manera, se consigue aumentar la longitud de los cordones de soldadura. Además, se consigue una mayor estabilidad de la estructura.

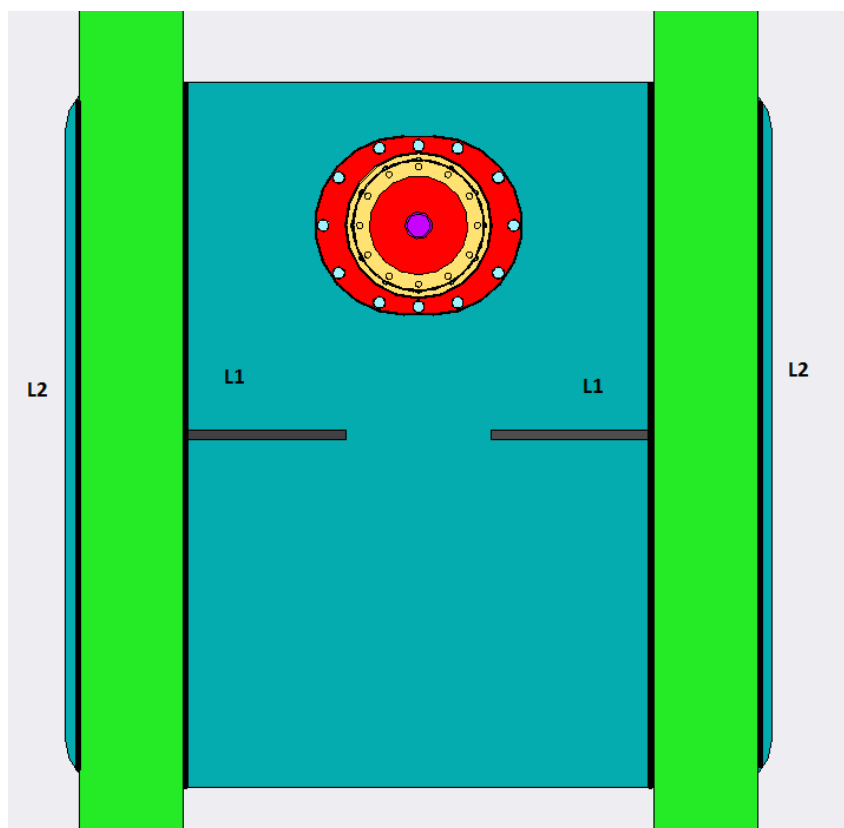


Figura 119. Cordones de soldadura unión pluma-placa superior (redimensionamiento).

3.12.2.16. Resolución de cálculos redimensionamiento soldadura pluma-placa superior

UNIONES SOLDADAS

Cálculo soldadura pluma-placa superior

Tipo de soldadura

Soldadura en ángulo. Unión con sólo cordones frontales transversales

Esfuerzos en la sección (Caso más desfavorable: En servicio sin viento)

N_1	110323,26	N
M_1	-286216560,00	N·mm
N_2	87799,50	N
M_2	702396000,00	N·mm
T_3	2334360,00	N·mm
$N_1 \cdot \gamma_S \cdot C_S$	175413,98	N
$M_1 \cdot \gamma_S \cdot C_S$	-455084330,40	N·mm
$N_2 \cdot \gamma_S \cdot C_d \cdot C_S$	142951,63	N
$M_2 \cdot \gamma_S \cdot C_d \cdot C_S$	1143613071,36	N·mm
N	318365,62	N
M	688528740,96	N·mm
$T_3 \cdot \gamma_S \cdot C_S$	3711632,40	N·mm
T	3711632,40	N·mm

Espesor de garganta del cordón de soldadura (a)

t_1	19,00	mm
t_2	40,00	mm
a (TABLA) ≥ 3 mm	13,00	mm
$0,3 \cdot t_2 < a \checkmark$	12,00	mm
$0,7 \cdot t_1 > a \checkmark$	13,30	mm

Longitud del cordón de soldadura (l)

L_1	1496	mm
L_2	1420	mm

Resistencia del cordón de soldadura

Solicitaciones de compresión

N	318365,62	N
a_1	13,00	mm

L_1	1496,00	mm
a_2	13,00	mm
L_2	1420,00	mm
f_u	430,00	N/mm ²
β_w (TABLA)	0,85	
$N/(a_1 \cdot L_1 + a_2 \cdot L_2)$	8,40	N/mm ²
$(0,565 \cdot f_u)/\beta_w$	285,82	N/mm ²
$N/(a_1 \cdot L_1 + a_2 \cdot L_2) \leq (0,565 \cdot f_u)/\beta_w$ ✓		

Solicitaciones de flexión

M	688528740,96	N·mm
L_1	1496	mm
L_2	1420	mm
h	220	mm
a	13,00	mm
f_u	430,00	N/mm ²
β_w	0,85	
Cordón 1		
$M/(L_1 \cdot h \cdot a)$	160,93	N/mm ²
Cordón 2		
$M/(L_2 \cdot h \cdot a)$	169,54	N/mm ²
$(0,56 \cdot f_u)/\beta_w$	283,29	N/mm ²
$M/(L_1 \cdot h \cdot a) \leq (0,56 \cdot f_u)/\beta_w$ ✓		
$M/(L_2 \cdot h \cdot a) \leq (0,56 \cdot f_u)/\beta_w$ ✓		

Solicitaciones de torsión

F_{inconj}	1065,92	N
$F = F_{inconj} \cdot \gamma_s \cdot C_s$	1694,81	N
$M_t = T$	3711632,40	N·mm
a	13,00	mm
h	220,00	mm
L_1	1496,00	mm
L_2	1420,00	mm
Cordón 1		
$t_a = \tau_a$	0,82	N/mm ²
t_n	0,04	N/mm ²
$\sigma = \tau_n$	0,03	N/mm ²

σ_c	1,10	N/mm²
σ_u	430,00	N/mm²
$\sigma_c \leq \sigma_u$ ✓		
Cordón 2		
$t_a = \tau_a$	0,86	
t_n	0,05	N/mm ²
$\sigma = \tau_n$	0,03	N/mm ²
σ_c	1,16	N/mm²
σ_u	430,00	N/mm²
$\sigma_c \leq \sigma_u$ ✓		

3.12.3. Uniones atornilladas

3.12.3.1. Introducción

Las uniones atornilladas se llevan cabo mediante piezas denominadas tornillos. Los tornillos son elementos de unión formados por una espiga cilíndrica llamada caña, uno de cuyos extremos tiene una cabeza de forma determinada, estando el otro extremo roscado.

La unión se forma introduciendo el tornillo en un agujero efectuado en las piezas a unir y colocando en el extremo roscado una turca (con su arandela correspondiente).

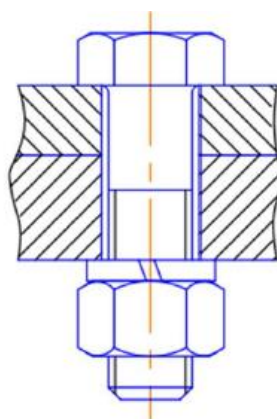


Figura 120. Tornillo.

Los tornillos se utilizan, fundamentalmente, en las construcciones desmontables, uniones provisionales y uniones de montaje de cierta entidad, ya que constituyen un medio de unión de fácil control de ejecución.

Entre sus ventajas frente a las uniones soldadas, se encuentran:

- La ejecución de las uniones puede realizarse en condiciones atmosféricas desfavorables.
- Menos costos de control de calidad.
- Plazos de ejecución más cortos.

- Mejor comportamiento frente a fatiga y a la rotura frágil.

Y como desventajas:

- Sobrecoste de gastos de proyecto como consecuencia de su cálculo y representación.
- El montaje de las piezas es más exigente al precisar de tolerancias más reducidas.
- Aspecto menos estético que las uniones soldadas.

De acuerdo con la puesta en carga de los tornillos cabe distinguir: tornillos ordinarios, tornillos calibrados y tornillos pretensados. Estos últimos se pretensan y transmiten las cargas por descompresión de las chapas y fricción, mientras que los tornillos ordinarios y calibrados transmiten las cargas por tracción, corte y aplastamiento.

En el presente proyecto se emplearán tornillos ordinarios y pretensados, estos últimos únicamente para la unión del gran rodamiento de giro.

3.12.3.2. Características de los tornillos

Características mecánicas del material

Las calidades de los aceros utilizados están normalizadas según la norma UNE EN 20898-1 y se indican en la tabla 62.

Calidad	f_y (N/mm ²)	f_{ub} (N/mm ²)
4.6	240	400
5.6	300	500
6.8	480	600
8.8	640	800
10.9	900	1000

Tabla 62. Calidades de acero de los tornillos.

Las calidades 4.6 y 5.6 corresponden a acero al carbono. Las superiores 8.8 y 10.9 a aceros al carbono con aditivos (B, Mn ó Cr), templados y revenidos (en la 10.9 se admiten además aceros aleados).

De acuerdo con la resistencia de los tornillos, arandelas y tuercas se pueden distinguir:

- Tornillos, arandelas y tuercas de baja resistencia (calidades 4.6, 4.8, 5.6, 5.8 y 6.8).
- Tornillos, arandelas y tuercas de alta resistencia (calidades 8.8 y 10.9).

Tornillos no pretensados

La diferencia entre los tornillos ordinarios y los tornillos calibrados está basada en sus características geométricas. En los tornillos ordinarios el diámetro de la caña es igual al de la rosca, figura 121, mientras que en los calibrados el diámetro de la caña es mayor.

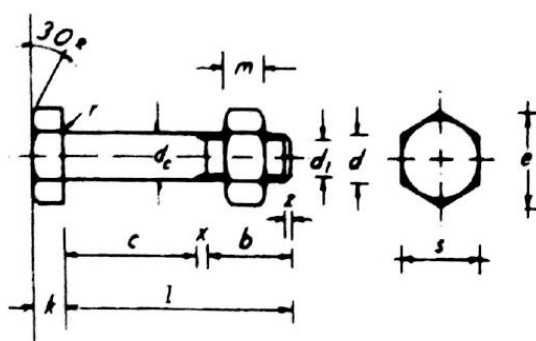


Figura 121. Tornillo ordinario.

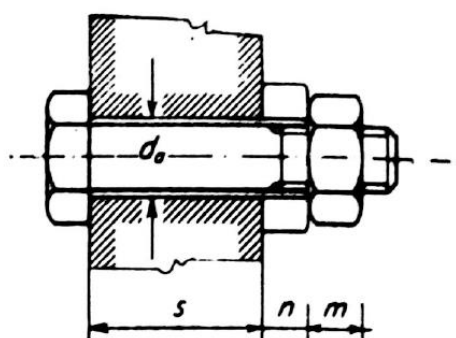


Figura 122. Longitud de apretadura.

Las dimensiones geométricas usuales de cada tipo de tornillo ordinario figuran en la siguiente tabla:

TORNILLO TIPO	Vástago			Cabeza			Área resistente A_s (cm ²)
	d_c (mm)	d_1 (mm)	b (mm)	k (mm)	s (mm)	e (mm)	
M-10	10	8,16	17,5	7	17	19,6	0,58
M-12	12	9,853	19,5	8	19	21,8	0,843
M-16	16	13,546	23	10	24	27,7	1,57
M-20	20	16,933	25	13	30	34,6	2,75
(M-22)	22	18,933	28	14	32	36,9	3,03
M-24	24	20,319	29,5	15	36	41,6	3,53
(M-27)	27	23,319	32,5	17	41	47,3	4,56
M-30	30	25,706	35	19	46	53,1	5,61
(M-33)	33	28,706	38	21	50	57,7	6,94
M36	36	31,096	40	23	55	63	8,17

nota: no es recomendable utilizar tornillos cuyo tipo figura entre paréntesis.

Tabla 63. Características geométricas de los tornillos ordinarios.

Según la norma UNE, el tipo de rosca es la triangular ISO, en calidad basta (figura 123). En la tabla 63 también se indica el área resistente del vástago en la zona de la rosca, A_s , definida por la expresión siguiente:

$$A_s = \left(\frac{d_3 + d_2}{2} \right)^2 \cdot \frac{\pi}{4}$$

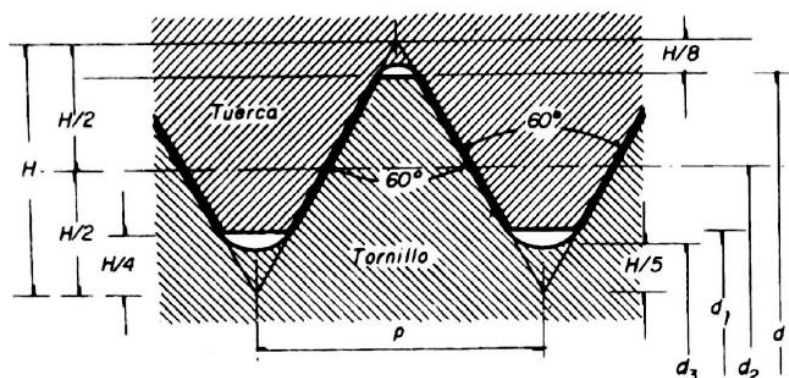


Figura 123. Rosca ISO.

En la tabla que se muestra a continuación se indican las longitudes nominales de los vástagos que corresponden a cada tipo de tornillo:

Longitud nominal / del vástago (mm)	Longitud de al caña c en mm.									
	M10	M12	M16	M20	(M22)	M24	(M27)	M30	(M33)	M36
30	10	8								
35	15	13	9							
40	20	18	14	10	8					
45	25	23	19	15	13	11				
50	30	28	24	20	18	16				
55	35	33	29	25	23	21				
60	40	38	34	30	28	26	23			
65	45	43	39	35	33	31	28			
70	50	48	44	40	38	36	33			
75	55	53	49	45	43	41	38			
80		58	54	50	48	46	43	40		
85		63	59	55	53	51	48	45		
90		68	64	60	58	56	53	50		
(95)		73	69	65	63	61	58	55		
100		78	74	70	68	66	63	60	57	54
(105)		83	79	75	73	71	68	65	62	59
110		88	84	80	78	76	73	70	67	64
(115)		93	89	85	83	81	78	75	72	69
120		98	94	90	88	86	83	80	77	74
(125)			99	95	93	91	88	85	82	79
130			104	100	98	96	93	90	87	84
140			114	110	108	106	103	100	97	94
150			124	120	118	116	113	110	107	104
160				130	128	126	123	120	117	114
170				140	138	136	133	130	127	124
180					148	143	143	140	137	134
190					158	156	153	150	147	144
200					168	166	163	160	157	154

Se evitarán en lo posible los valores entre paréntesis

Tabla 64. Longitudes del vástago de los tornillos ordinarios y calibrados.

Tornillos pretensados

La resistencia de las uniones en las que se emplean tornillos pretensados se debe al aprovechamiento de las fuerzas de rozamiento desarrolladas al apretar fuertemente los tornillos (figura 124). Estas fuerzas también contrarrestan la acción de las solicitaciones de tracción, P, que tienden a separar las piezas (figura 125).

La fuerza de apretadura origina en la caña del tornillo un esfuerzo de tracción muy elevado P_r , el cual comprime las piezas a unir, dando lugar a esfuerzos de rozamiento que se oponen al deslizamiento de ambas superficies.

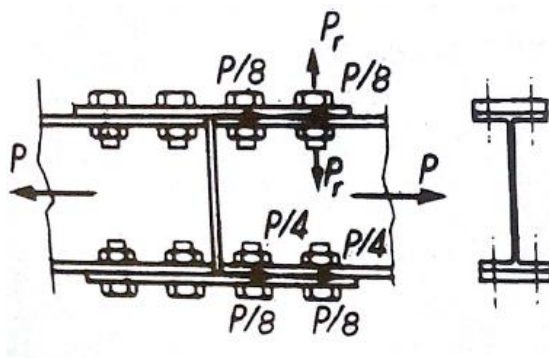


Figura 124. Tornillos pretensados.

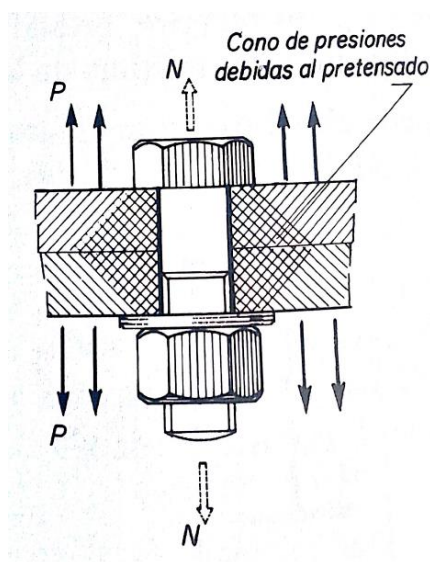


Figura 125. Unión atornillada pretensada.

Los tornillos pretensados provocan a lo largo de las secciones que unen una distribución de tensiones más favorable que los otros medios de unión. Así, en la figura 126, se representan las leyes de repartición de tensiones para la misma unión con tornillos no pretensados y pretensados. Se observa que en la segunda se reducen sensiblemente las elevadas puntas de tensiones existentes en las proximidades del agujero.

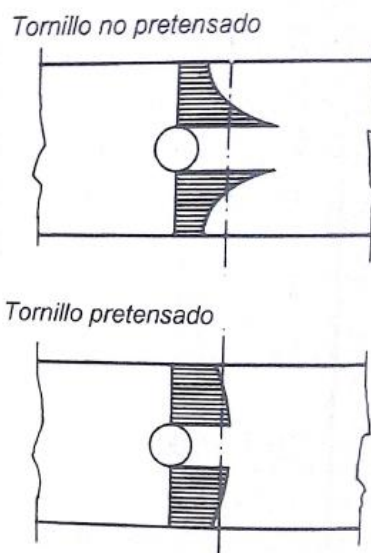


Figura 126. Distribución de tensiones en tornillos.

La magnitud de las fuerzas que se pueden transmitir depende fundamentalmente de:

- 1) La intensidad de la fuerza de tracción en el cuerpo del tornillo.
- 2) El coeficiente de rozamiento que se haya conseguido.

Destacar que en este tipo de uniones se puede conseguir que los tornillos no trabajen a corte y, por consiguiente, no será preciso calcularlos para esta sollicitación.

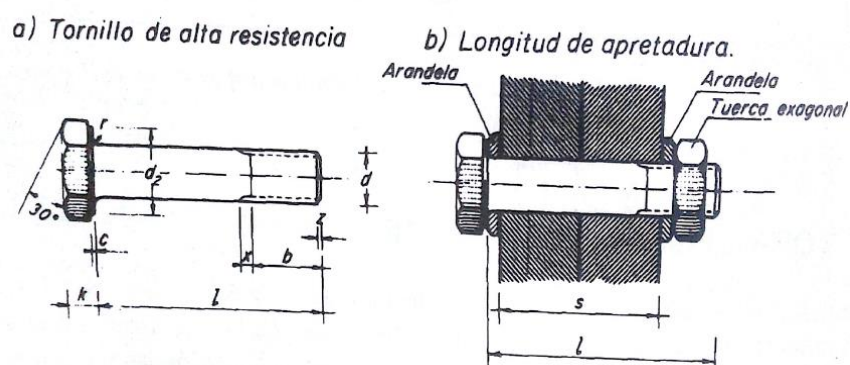


Figura 127. Tornillo de alta resistencia (pretensado).

Los únicos tornillos pretensados que se utilizarán en este proyecto son los del rodamiento, ya calculados en el cálculo de este mediante las instrucciones indicadas en el catálogo correspondiente.

3.12.3.3. Modos de fallo

Se tiene que comprobar que ninguno de los elementos que conforman la unión se agota bajo las tensiones a las que se puede ver sometida la unión.

Según la forma en que trabaje la unión, puede fallar por diferentes modos:

- a) La unión podría fallar por agotamiento del material de las chapas a unir en las partes del taladro efectuado para alojar el tornillo. La resistencia frente al aplastamiento se expresa en función de la tensión de rotura del acero de las chapas a unir y no de la tensión del límite elástico, debido a la existencia inevitable de los valores altos en las deformaciones locales que hacen trabajar el material a tensiones más allá del límite elástico.
- b) También se tiene que comprobar frente a cortadura, que este esfuerzo se produce cuando, en el vástago, las chapas unidas tratan de deslizar una con respecto a la otra.
- c) En una unión atornillada con los tornillos trabajando normalmente a su eje (por cortadura y aplastamiento) es preciso comprobar las piezas a unir cuando están sometidas a tracción, ya que los taladros son un debilitamiento que, si es excesivo, puede llevar a la rotura de la pieza por desgarramiento.
- d) En las uniones donde existen esfuerzos de tracción en la dirección del eje del tornillo, se tiene que comprobar la resistencia del tornillo, que depende, como es lógico, de la resistencia de cálculo del tornillo y de su área.
- e) Si la unión trabaja a tracción y a cortante, es necesario comprobar que no falle bajo esta sollicitación combinada.
- f) En los tornillos de alta resistencia pretensados, frente a cargas perpendiculares al eje de los tornillos la unión resiste mediante el rozamiento entre chapas favorecido por el esfuerzo de pretensado. Cuando la carga perpendicular alcanza el valor de la resistencia por rozamiento, la unión desliza hasta que el vástago del tornillo entra en contacto con las paredes del taladro. A partir de este momento, la parte de las fuerzas exteriores no

absorbidas por el rozamiento deberán serlo por el tornillo de alta resistencia trabajando a cortadura y deslizamiento.

3.12.3.4. Categorías de uniones atornilladas

El comportamiento de las uniones atornilladas puede evaluarse mediante fórmulas que interpreten los resultados de los ensayos. Para este fin se realiza la clasificación siguiente:

- Medio de unión resistiendo a cortadura.
- Medio de unión resistiendo a tracción.
- Medio de unión resistiendo a tracción y cortadura conjuntamente.

Cabe incluso distinguir el comportamiento del medio de unión frente a cada uno de los dos estados límite. El Estado Límite Último corresponde al colapso o fallo de la unión. Y el Estado Límite de Servicio se asocia con ciertas limitaciones de la unión, como consecuencia de un deslizamiento previo a la rotura.

En la EAE y el EC3 las uniones atornilladas se clasifican, en función de la manera de trabajar de los tornillos, en cinco categorías (en el CTE no se define esta clasificación). Cada una de estas categorías precisa de unas comprobaciones determinadas.

Si los tornillos están solicitados en dirección normal a su eje (cortante) se tiene:

- **Categoría A:** Trabajan a cortadura y aplastamiento. Para uniones de esta categoría se permiten tornillos de cualquier calidad, incluso de alta resistencia sin pretensar o pretensados pero sin controlar su par de apriete.
- **Categoría B:** Resistentes al deslizamiento en E.L.S. En esta categoría se utilizarán tornillos de alta resistencia pretensados con apretado controlado.
- **Categoría C:** Resistentes al deslizamiento en E.L.U.

En el caso de tornillos solicitados según la dirección de su eje (tracción), se tiene:

- **Categoría D:** Uniones con tornillos sin pretensar. Para esta categoría se utilizarán tornillos ordinarios o de alta resistencia, aunque no se requiere pretensado.
- **Categoría E:** Uniones con tornillos pretensados de alta resistencia. Se utilizarán sólo tornillos de alta resistencia con apretado controlado.

	Categoría	Comprobaciones
Cortante	Categoría A (tornillos sin pretensar)	Resistencia a cortante $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ Res. al aplastamiento $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$
	Categoría B (pretensados ELS)	Res. a cortante $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ Res. al aplastamiento $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ Res. al deslizamiento $F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$
	Categoría C (pretensados ELU)	Res. a cortante $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ Res. al aplastamiento $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ Res. axial de la chapa de unión $F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$
Tracción	Categoría D (tornillos sin pretensar)	Res. a tracción $F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ Res. a punzonamiento $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$
	Categoría E (tornillos pretensados)	Res. a tracción $F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ Res. a punzonamiento $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$
En la EAE el sufijo Ed es Sd.		

Tabla 65. Categorías de uniones atornilladas.

3.12.3.5. Expresiones para el cálculo de resistencias de uniones atornilladas sin pretensar

En la siguiente tabla se resumen de las expresiones para obtener las resistencias de cálculo:

Resistencia a cortante
$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s \cdot n}{\gamma_{M2}}$
donde: $\alpha_v = 0.5$ excepto para tornillos 4.6, 5.6 y 8.8; en la EAE $\alpha_v = \alpha$ y en el CTE siempre toma el valor 0.5 sin excepciones f_{ub} = resistencia a tracción del tornillo A_s = es el área resistente del vástago del tornillo, en el caso que ningún plano de corte pase por la zona roscada del tornillo se considera A (área del vástago del tornillo) n = número de planos de corte $\gamma_{M2} = 1.25$ (coeficiente parcial de seguridad)

Resistencia a aplastamiento de la chapa
$F_{b,Rd} = \frac{\alpha_b \cdot k_1 \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$ <p>donde:</p> $\alpha_b = \min \left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u} \text{ ó } 1.0 \right); \text{ en la EAE y el CTE } \alpha_b = \alpha$ $k_1 = \min \left(2.8 \frac{e_2}{3d_0} - 1.7; 1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7 \text{ ó } 2.5 \right); \text{ en la EAE } k_1 = \beta \text{ y en el CTE siempre toma el valor de 2.5}$ <p>f_u = resistencia última del acero de la chapa d = diámetro del vástago del tornillo t = menor espesor de las chapas que se unen</p>
Resistencia al deslizamiento
$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu \cdot F_{p,Cd}}{\gamma_{M3}}$ <p>donde: k_s = factor que depende del tipo de agujeros que se utilicen, si son estándar se toma igual a 1.0 n = número de posibles planos de desplazamiento μ = coeficiente de rozamiento, su valor oscila entre 0.5 y 0.2, en función del estado de las superficies de contacto $F_{p,Cd} = 0.7 \cdot f_{ub} \cdot A_s / \gamma_{M7}$ = fuerza de pretensado; en la EAE varía la notación, $F_{p,Cd} = \sum N_0$, y en el CTE se sustituye f_{ub} por $f_{yb} = f_{ub} / \gamma_{M7}$. γ_{M3} = coeficiente parcial de seguridad que toma el valor de 1.1 en general o 1.25 en uniones híbridas o en uniones sometidas a fatiga</p>
Resistencia a tracción
$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ <p>donde: $k_2 = 0.9$ para tornillos sin cabeza avellanada</p>
Resistencia a punzonamiento
$B_{p,Rd} = \frac{0.6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$ <p>donde: d_m = el menor diámetro medio entre los círculos circunscrito e inscrito a la tuerca o a la cabeza t_p = espesor de la chapa</p>

Tabla 66. Expresiones para el cálculo de resistencias en uniones atornilladas.

3.12.3.6. Disposiciones constructivas

En la siguiente tabla se muestran las disposiciones constructivas de tornillos:

	EAE	DB SE-A	EC3
DIST. MÍNIMA			
En la dirección de la fuerza	$e_1 \geq 1,2d_0$ se recomienda $e_2 \geq 2,0d_0$	$e_1 \geq 1,2d_0$	$e_1 \geq 1,2d_0$
	$p_1 \geq 2,2d_0$ se recomienda $p_1 \geq 3,0d_0$	$p_1 \geq 2,2d_0$	$p_1 \geq 2,2d_0$
En la dirección perpendicular a la fuerza	$e_2 \geq 1,2d_0$ se recomienda $e_2 \geq 1,5d_0$	$e_2 \geq 1,5d_0$	$e_2 \geq 1,2d_0$
	$p_2 \geq 2,4d_0$ se recomienda $p_2 \geq 3,0d_0$	$p_2 \geq 3,0d_0$	$p_2 \geq 2,4d_0$
DIST. MÁXIMA			
Al borde de la pieza e_1 y e_2	$\begin{cases} 12t \text{ ó } 150mm \\ \leq 40mm + 4t \\ \text{intemperie} \end{cases}$	$\begin{cases} \leq 40mm + 4t \\ 12t \text{ ó } 150mm \end{cases}$	$\begin{cases} \leq 40mm + 4t \\ \text{(intemperie)} \\ 8t \text{ ó } 125mm (*) \end{cases}$
Entre tornillos: en elementos a compresión (p_1 y p_2)	$\begin{cases} \leq 14t \\ \leq 200mm \end{cases}$		$\begin{cases} \leq 14t \\ \leq 200mm \text{ }^{\circ} \\ (*) \begin{cases} \leq 14t_{\min} \\ \leq 175mm \end{cases} \end{cases}$
Entre tornillos: en elementos a tracción	p_{1e} y $p_{2e} \begin{cases} \leq 14t \\ \leq 200mm \end{cases} \rightarrow \text{filas exteriores}$ p_{1i} y $p_{2i} \begin{cases} \leq 28t \\ \leq 400mm \end{cases} \rightarrow \text{filas interiores}$		
Agujeros RASGADOS	Las distancias e_1 , e_2 , p_1 y p_2 se medirán desde los centros de los semicírculos extremos.	a) La distancia entre el eje de rasgado y cualquier borde no será inferior a $1,5d_0$ b) La distancia entre el centro del radio extremo al borde adyacente no será inferior a $1,5 d_0$	$e_3 \geq 1,5d_0$ $e_4 \geq 1,5d_0$
Agujeros al TRESBOLILLO	En filas contiguas, los agujeros pueden estar dispuestos al tresbolillo.		En el caso de agujeros al tresbolillo en uniones en tracción podrá reducirse p_2 hasta no menos de $1,2 d_0$ siempre que la distancia entre agujeros L sea mayor a $2,4 d_0$.

(*) EN 10025-6:2004 Hot rolled products of structural steels. Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in quenched and tempered condition

Tabla 67. Reglas generales de disposición de tornillos.

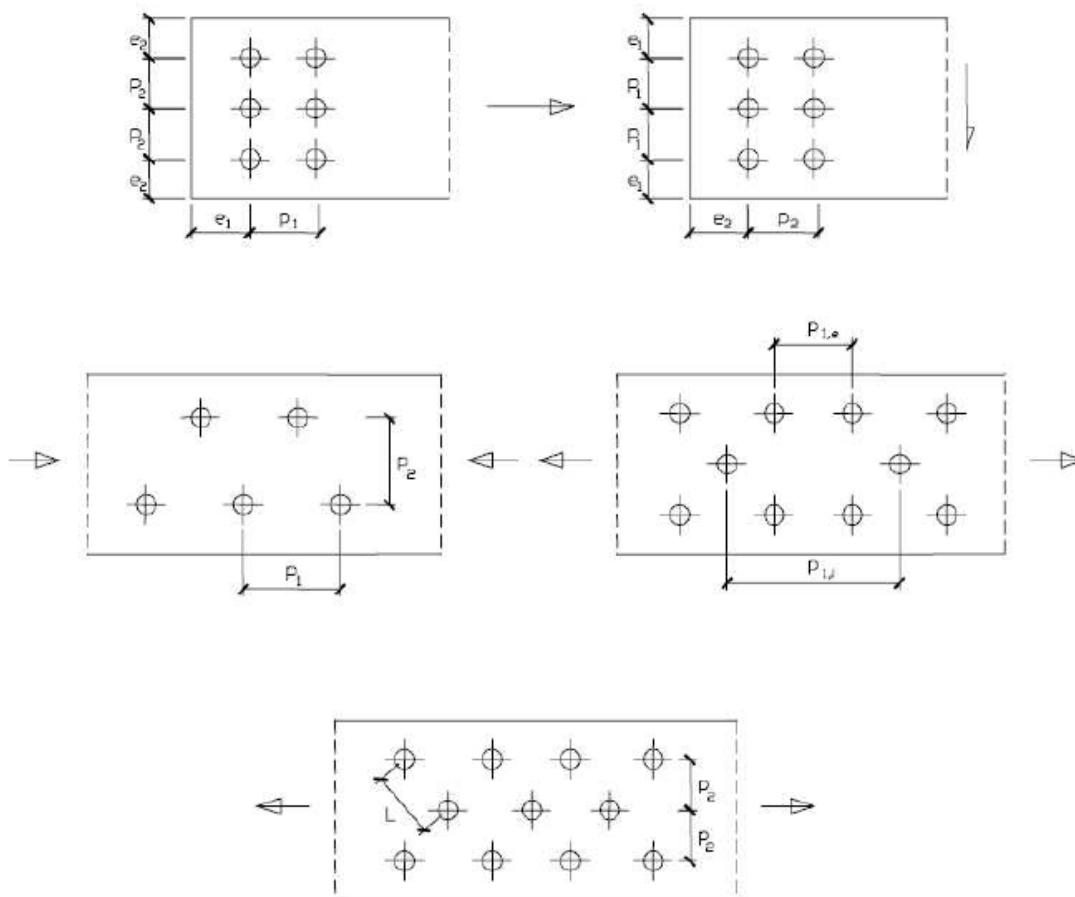


Figura 128. Nomenclatura de cada disposición de tornillos.

3.12.3.7. Cálculo de las uniones atornilladas presentes

En la siguiente tabla se muestran las uniones atornilladas presentes en el proyecto:

Uniones atornilladas		
	Unión	Tipo
1	Cono rodamiento-Rodamiento de giro	Tornillos pretensados M20
2	Rodamiento de giro-Tapa rodamiento	Tornillos pretensados M20
3	Camisa acoplamiento-Soporte eje	Tornillos ordinarios M8
4	Soporte eje-Placa superior	Tornillos ordinarios M16
5	Soporte carril-Pluma	Tornillos ordinarios M10

Tabla 68. Uniones atornilladas.

Se realizará una simple comprobación a cortante y a aplastamiento de los tornillos ordinarios de la unión camisa acoplamiento-soporte eje y soporte eje-placa superior para hallar el número mínimo de tornillos necesarios.

3.12.3.10. Resolución cálculos uniones atornilladas

UNIONES ATORNILLADAS

Esfuerzos (Caso más desfavorable: En servicio sin viento)

γ_s	1,06	
C_d	1,02	
C_s	1,50	
V_{y1}	33510,96	N
V_{y2}	43899,75	N
V_x	1065,92	N
$V_{y1} \cdot \gamma_s \cdot C_s$	53282,43	N
$V_{y2} \cdot \gamma_s \cdot C_d \cdot C_s$	71475,82	N
V_y	124758,24	N
$V_x \cdot \gamma_s \cdot C_s$	1694,81	N
V	124769,75	N

Unión atornillada camisa acoplamiento-soporte eje

Resistencia

Resistencia a cortante

M	8,00	mm
n	1,00	
f_{ub}	800,00	N/mm ²
$A = A_s$	36,60	mm ²
γ_{M2}	1,25	
$F_{v,Rd}$	11712,00	N
$F = V$	124769,75	N
n	10,65	
n_{mín}	11,00	
n	12,00	
$F_{V,Ed} = F/n$	10397,48	N
$F_{V,Ed} \leq F_{v,Rd}$ ✓		

Resistencia a aplastamiento de la chapa

α	1,00
----------	------

f_u	430,00	N/mm ²
d	8,00	mm
t	15	mm
γ_{M2}	1,25	
$F_{b,Rd}$	103200	N
$F_1 = F/n$	10397,48	N
$F_1 < F_{b,Rd}$ ✓		

Unión atornillada soporte eje-placa superior

Resistencia

Resistencia a cortante

M	16,00	mm
n	1,00	
f_{ub}	800,00	N/mm ²
$A = A_s$	157,00	mm ²
γ_{M2}	1,25	
$F_{v,Rd}$	50240,00	N
$F = V$	124769,75	N
n	2,48	
$n_{mín}$	3,00	
n	12,00	
$F_{V,Ed} = F/n$	10397,48	N
$F_{V,Ed} \leq F_{v,Rd}$ ✓		

Resistencia a aplastamiento de la chapa

α	1,00	
f_u	430,00	N/mm ²
d	16,00	mm
t	20	mm
γ_{M2}	1,25	
$F_{b,Rd}$	275200	N
$F_1 = F/n$	10397,48	N
$F_1 < F_{b,Rd}$ ✓		

3.13. Diseño final

Finalmente, el diseño de la grúa portuaria para elevación de embarcaciones definitivo es el que se muestra a continuación:

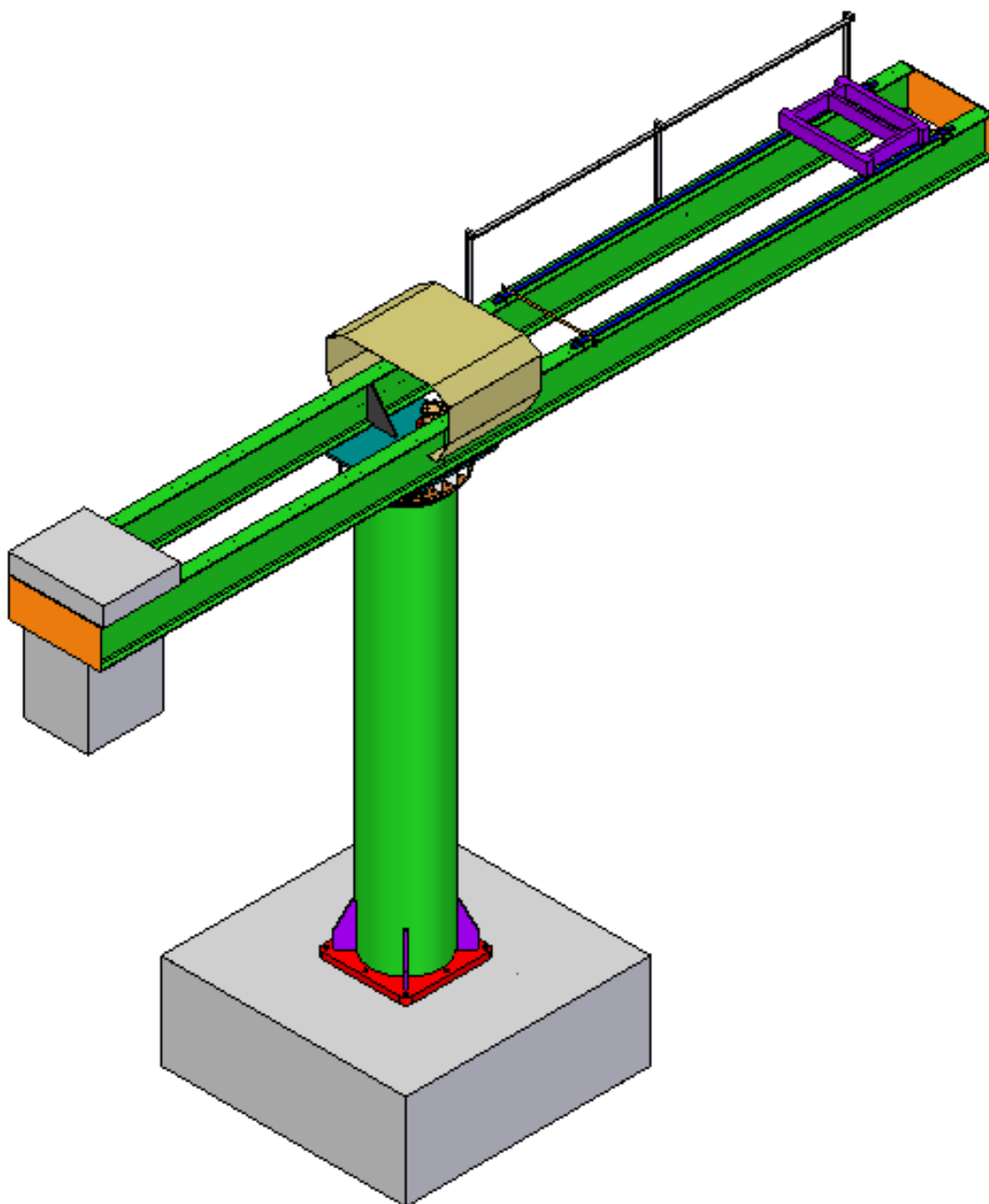


Figura 129. Grúa portuaria para elevación de embarcaciones (isométrica).