



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

DISEÑO DE UNA GRÚA TORRE.



**Volumen I**

**Memoria**

**Autor:** Oriol Montserrat Martínez

**Director:** Giovanni Gómez Gras

**Departamento:** 712EM

**Convocatoria:** Mayo 2017







## Resumen

Este trabajo se centrará en el estudio de una de las grúas más empleadas en el mundo de la construcción, la grúa torre. El estudio de la grúa torre comprenderá desde conocer las estructuras que la conforman, así como conocer los elementos que forman parte de esta y que permitirán a la grúa realizar las tareas para las que ha sido diseñada.

Se realizará una descripción de los elementos principales que permiten el funcionamiento de la grúa, y se harán los primeros pasos para el diseño y selección de varios de estos elementos entendiéndose que para un diseño más profundo requeriría de estudios mucho más complejos.

No solo se tratarán los elementos mecánicos pertenecientes a la grúa, sino que también se realizará un estudio de los esfuerzos que se producen en las grúas torre para así poder tener una idea de qué partes de la grúa definirán más adelante su diseño estructural. Se realizará el dimensionamiento de dicha estructura mediante el programa CYPE, con el que elegiremos los perfiles que conformarán la estructura siempre con criterios económicos y normativos.

En este trabajo también se mostrará cómo hacer uso de las normativas aplicables a la grúa objeto de este trabajo, de forma que las estructuras y elementos de la misma cumplan con las normativas que podemos encontrarnos actualmente.

## Resum

Aquest treball es centrarà en l'estudi d'una de les grues més emprades en el món de la construcció, la grua torre. L'estudi de la grua torre comprendrà des de conèixer les estructures que la conformen, així com conèixer els elements que formen part d'aquesta i que permetran a la grua realitzar les tasques per a les quals ha estat dissenyada.

Es realitzarà una descripció dels elements principals que permeten el funcionament de la grua, i es faran els primers passos per al disseny i selecció de diversos d'aquests elements entenent que per a un disseny més profund requeriria d'estudis molt més complexos.

No només es tractaran els elements mecànics pertanyents a la grua, sinó que també es farà un estudi dels esforços que es produeixen en les grues torre per així poder tenir una idea de quines parts de la grua definiran més endavant el seu disseny estructural. Es realitzarà el dimensionament d'aquesta estructura mitjançant el programa CYPE, amb el qual triarem els perfils que conformaran l'estructura sempre amb criteris econòmics i normatius.

En aquest treball també es mostrarà com fer ús de les normatives aplicables a la grua objecte d'aquest treball, de manera que les estructures i elements de la mateixa compleixin amb les normatives que podem trobar-nos actualment.

## Abstract

This work will focus on the study of one of the most used cranes in the construction world, the tower crane. The study will comprise from knowing the structures that contain it, as well as a description of the parts which make it up and that allow the crane to perform the tasks for which it has been designed.

The study will start with the first steps of the design and with the selection of some elements, on the right understanding that a deeper design would require more complex studies.

Not only will the mechanical elements belonging to the crane be treated, but also a study will be made of the efforts made in the tower cranes in order to have an idea of which parts of the crane will later define their structural design. The structure will be dimensioned using the CYPE program, from which we will choose the profiles that will conform the structure, taking into account the constraints due to the economic and regulatory criteria.

This work will also show how to make use of the regulations applicable to the crane subject of this work, so that the structures and elements of the same will agree to current regulations.





## Agradecimientos

He de empezar dando las gracias a mi familia porque sin ellos todo esto no habría sido posible. Los conocimientos que he ido adquiriendo a lo largo de mi carrera universitaria me han permitido comprender muchas cosas a la vez que se me han abierto muchas más preguntas. El interés por la ingeniería y el conocimiento es algo que nunca he perdido y que además, ha ido en aumento.

Este trabajo no se podría haber realizado tampoco sin el apoyo y ayuda mostrado por mi familia, amigos, y profesores. Agradecer especialmente la ayuda prestada por Giovanni Gómez que me ha guiado en lo posible y me ha marcado los pasos para que este trabajo fuera posible. También mencionar, Alexis Parraga, que me ha ayudado mucho cuando se me han presentado dificultades a lo largo del trabajo.

También agradecer finalmente a la universidad y sus docentes el trato recibido durante estos años de estudios, que, aunque duros, nunca me han hecho perder el interés por seguir creciendo a nivel académico.

## Glosario

$n$	Velocidad de rotación en revoluciones minuto.
$f$	Frecuencia, mínimo valor de rozamiento entre cable y tambor.
$p$	Número de polos de un motor eléctrico.
$K_c$	Coficiente utilizado para definir el diámetro del cable según la norma DIN.
$S$	Tensión máxima a la que es sometido el cable.
$d$	Diámetro del cable o eje al que se refiera.
$\eta$	Rendimiento de un mecanismo.
$i$	Relación de transmisión en un mecanismo de distintas poleas.
$F_0$	Fuerza de resistencia del cable.
$Z_p$	Coficiente de seguridad empleado para el cálculo del cable según la norma FEM.
$M_f, M_y, M_x$	Momentos de flexión respecto distintos ejes.
$I_0$	Inercia respecto al área de una sección.
$\sigma_{max,flex}$	Tensión máxima a flexión a la que esa sometida una sección.
$h_1$	Coficiente usado para el cálculo del diámetro primitivo de las poleas, depende del grupo del mecanismo.
$h_2$	Coficiente usado para el cálculo del diámetro primitivo de las poleas, depende del montaje del mecanismo.
$\sigma_m$	Tensión media.
$\sigma_a$	Tensión alternante.
$\sigma_R$	Tensión de rotura de un material.
$\sigma_F$	Tensión de fluencia de un material.
$\sigma_f$	Resistencia de la sección según las condiciones de esta.
$P_L$	Peso propio del cable para el cálculo de la flecha de este.
$P$	Peso concentrado del cable.
$h_{min}$	Distancia mínima entre la última polea y el tambor.
$b$	Coficiente que tiene presente la descarga debida al rozamiento entre espiras muertas y tambor.
$k$	Coficiente de seguridad en tornillos.
$S_{suj}$	Fuerza necesaria de sujeción en el caso de los tambores.
$\alpha$	El ángulo que abrazan las espiras en el tambor.

$K_2$	Coeficiente que depende del tornillo que se esté usando.
$f_{ub}$	Resistencia última a tracción del acero.
$f_{yb}$	Resistencia elástica del acero.
$V$	Cortante al que está sometido una sección.
$A_{ef}$	Área eficaz, definición útil tanto para el caso de tornillos como para cimentación.
$I_{massa}$	Inercia referente a la Massa del objeto analizado.
$c_1$	Coeficiente que depende del material de las ruedas.
$c_2$	Coeficiente dependiente del número de revoluciones para el cálculo de las ruedas.
$c_3$	Coeficiente que va en función de la duración de vida para la rueda.
$K$	Anchura del carril por donde circula el carro.
$q$	Presión ejercida por el viento.



## Índice

1. Introducción	18
1.1 Objetivos	18
1.2 Motivación	18
2 Historia de la grúa	19
3. La grúa. Tipología de grúas	22
3.1 Grúa torre	22
3.1.1 Grúa torre fija	22
3.1.2 Grúa torre desplazable	23
3.1.3 Grúa torre desmontable	23
3.1.4 Grúa torre auto desplegable	24
3.1.5 Grúa torre monobloc	24
3.1.6 Grúa torre trepadora	25
3.2 Grúa telescópica	25
3.3 Grúa móvil	25
3.4 Grúa pluma	26
3.5 Grúa pórtico	27
4. Grúa torre	28
4.1 Dimensiones	28
4.2 Prestaciones	29
4.2.1 Tiempo de vida esperado	29
4.2.2 Capacidad de carga	29
4.2.3 Movimientos de la grúa torre	30
4.3 Normativa aplicable	30
5. Partes de una grúa torre.	33
5.1 Pluma	33
5.2 Lastre de contrapluma	34
5.3 Contrapluma	35
5.4 Portapluma	35
5.5 Plataforma o soporte giratorio	35
5.6 Torre	35
5.7 Lastre	36
5.8 Carro de pluma	36
5.9 Polea	36
5.10 Tambor	37
	13

5.11 Cables	38
5.12 Aparejo	39
5.12.1 Gancho	40
5.12.2 Bidas de unión a la carga	41
5.13 Tirantes	44
5.14 Motores	44
5.14.1 Motores de corriente continua	44
5.14.2 Motores trifásicos	45
5.14.3 Frenos	46
5.14.3.1 Freno de cinta	46
5.14.3.2 Freno de mordazas	46
5.14.3.3 Frenos de disco	46
5.14.3.4 Frenos cónicos	47
5.15 Pasarelas y demás áreas transitables	47
6 Selección y dimensionamiento de componentes de la grúa	49
6.1 Aparejo	49
6.2 Cables	51
6.2.1 Cable de elevación	51
6.2.2 Cable de traslación	53
6.2.3 Unión cable estructura	56
6.2.4 Mantenimiento cables	57
6.3 Poleas	58
6.3.1 Poleas de elevación	58
6.3.1.1 Polea de elevación	58
6.3.1.2 Eje de las poleas de elevación	60
6.3.2 Poleas de traslación	64
6.3.2.1 Polea de traslación	64
6.3.2.2 Eje de las poleas de traslación	64
6.3.2.4 Flecha en el cable de traslación.	67
6.4 Tambor	69
6.4.1 Tambor de elevación	70
6.4.2 Tambor de traslación	73
6.4.3 Fijaciones del cable al tambor	75
6.5 Carro	77
6.5.1 Ruedas	79
	14

6.6 Contrapeso	82
6.7 Cimentación	82
6.7.1 Diseño de la cimentación	85
6.8 Base	87
6.9 Base giratoria	87
6.10 Cálculo motores	88
6.10.1 Cálculo del motor de elevación	88
6.10.2 Cálculo del motor de traslación	91
7. Cálculo de la estructura	94
7.1 Análisis simple	94
7.1.2 Clasificación FEM de la grúa	95
7.1.3 Cargas producidas por el propio peso	96
7.1.4 Fuerzas producidas por el viento	98
7.1.4.1 Fuerzas del viento, resumen y disposición	104
7.1.5 Fuerzas producidas por los mecanismos	105
7.1.6 Esquema de fuerzas	105
7.1.7 Cálculo de esfuerzos	106
7.1.7.1 Caso 1: peso propio más contrapeso	107
7.1.7.2 Caso 2: carga en punta	108
7.1.7.3 Caso 3: Acción del viento en servicio	111
7.2 Dimensionamiento de la estructura	113
7.2.1 Programa de diseño CYPE	113
7.2.2 Requerimientos de la estructura	113
7.2.3 Geometría de la estructura	113
7.2.3.1 Geometría de la torre	113
7.2.3.2 Geometría de la pluma	114
7.2.3.3 Geometría de la contrapluma	115
7.2.3.4 Geometría del portaflechas	115
7.2.4 Propiedades de la estructura en el programa	116
7.2.4.1 Nudos	116
7.2.4.2 Pandeo	116
7.2.4.3 Pandeo lateral	118
7.2.4.4 Flecha máxima	119
7.2.5 Estudio	120
7.2.6 Hipótesis adicionales	121
	15

7.2.6.1 Hipótesis de carga de servicio	121
7.2.6.2 Hipótesis de viento	122
7.2.6.3 Hipótesis de carga de mecanismos	125
7.2.6.4 Hipótesis del lastre de contrapeso	125
7.2.7 Asignación de perfiles	126
7.2.8 Resultados	129
7.2.8.1 Resultados de la pluma	129
7.2.8.2 Perfiles seleccionados para la pluma	130
7.2.8.3 Reacciones producidas por la pluma	136
7.2.8.4 Resultados específicos de la pluma	138
7.2.8.5 Deformaciones producidas	139
7.2.8.6 Resultados contrapluma	142
7.2.8.7 Perfiles seleccionados para la contrapluma	144
7.2.8.8 Reacciones producidas por la contrapluma	145
7.2.8.9 Resultados específicos de la contrapluma	146
7.2.8.10 Deformaciones producidas en la contrapluma	147
7.2.8.11 Resultados torre y castillete	148
7.2.8.12 Perfiles seleccionados para la torre y portapluma	150
7.2.8.13 Reacciones en la base de la torre	157
7.2.8.14 Resultados específicos de la torre	160
7.2.8.15 Deformaciones producidas en la torre	160
7.2.8.16 Resultados de la torre en estado fuera de servicio	164
7.2.9 Elección de la corona de giro	165
7.3 Uniones	169
7.3.1 Soldaduras	169
7.3.1.1 Calculo de soldaduras	172
7.3.2 Bulones	175
7.3.2.1 Cálculo de los bulones según EAE	175
Para los bulones se deberá emplear una tolerancia marcada por la norma ISO 286-2 con una tolerancia correspondiente a la clase H11, en los planos presentados en el anexo se le habrá asignado el valor correspondiente.	178
7.3.2.2 Cálculo de los bulones de la grúa	178
7.4 Conclusiones de los resultados	183
8. Grúa modelada en SolidWorks	184
9. Transporte, montaje y desmontaje	187



10. Seguridad y salud	190
10.1 Medidas preventivas	191
10.2 Seguridad	193
10.3 Gruista	194
10.3.1 Obligaciones del gruista	194
10.3.2 Prohibiciones del gruista	194
10.4 Material de seguridad	197
11. Mantenimiento	198
12. Impacto ambiental	199
13. Conclusiones	200
14. Presupuesto	201
15. Bibliografía	203

## 1. Introducción

### 1.1 Objetivos

En el presente trabajo se tratarán los tipos de grúas, centrándonos en la grúa torre. Se tratará de realizar el diseño de una grúa torre pasando por el nombramiento, descripción y selección de los elementos mecánicos que forman parte de esta y de las estructuras que le permiten cumplir sus funciones.

Se usará el programa Cype para el cálculo y dimensionamiento de la estructura que pretenderá mostrar unas características y capacidades que se asemejen al máximo a lo que hoy en día nos podemos encontrar en el mercado. La grúa tendrá que ser definida por módulos que permitan variar sus alturas lo que le dará a esta una mayor funcionalidad. Partiendo de estas premisas se realizarán las modificaciones que convengan a lo largo del trabajo para dar forma y más características a la grúa objeto del trabajo.

El objetivo del presente trabajo no es solo realizar un diseño resistente y adecuado respecto a las condiciones de trabajo de la grúa, sino que también se realizarán los cálculos con las normativas vigentes que nos podemos encontrar de forma que el dimensionamiento y diseño de las partes cumpla con estas.

### 1.2 Motivación

Poder conocer una de las máquinas más empleadas en la industria de la construcción, además de la combinación que ofrecen las grúas torre de estructuras metálicas con elementos mecánicos, es la principal motivación que promueve la realización de este trabajo.

Con el estudio de las grúas torre, se podrá ver la cantidad de mecanismos que intervienen en una tarea que puede resultar sencilla a simple vista. No obstante, también se pretende obtener una mejora en el manejo de normativas como el EAE, el CTE y los eurocódigos, normativas de obligado cumplimiento.

También me permitirá conocer con mayor detalle el comportamiento de las estructuras metálicas y como se deben definir estas para cumplir con los objetivos marcados.

## 2 Historia de la grúa

La invención de la grúa fue derivada de la necesidad de mover grandes cargas de forma vertical reduciendo el esfuerzo. En la antigüedad, el uso de rampas y rodillos era común para el traslado de grandes cargas en las construcciones, de manera que un elevado número de trabajadores era necesario para trasladar las cargas, los primeros sistemas de elevación por palancas los encontramos en el siglo XXII a.C. en la China y en la India.

La historia de la grúa empieza principalmente con la aparición de las primeras poleas, que datan de Grecia en el siglo VII a.C.

Durante los siglos VI a.C. y IV a.C. se experimentó un notable progreso técnico en Grecia, se tiene conocimiento del uso de poleas en obras de teatro, también apareció el tambor de arrollamiento lo que permitió entonces la aparición de los primeros sistemas de elevación de cargas por el siglo V a.C.

Arquímedes, en el siglo III a.C., realizó las primeras combinaciones de poleas, lo que permitió el transporte de cargas elevadas. Ya en el siglo II a.C. con la aparición de cabestrante, el tornillo sin fin y los engranajes, se pudieron construir máquinas elevadoras de varias toneladas, un ejemplo de estas máquinas consistía en acoplar un tambor manual a una rueda de gran diámetro, alrededor de dos metros, con radios de elevada resistencia. Las personas con el propio peso, subidos a los radios ejercía un momento que permitía la elevación de cargas con el mínimo esfuerzo.

Más adelante, ya en el año I d.C. vivió Hero, que por el 70 d.C. escribió el segundo tomo de su libro "Mecánica diversas técnicas de elevación de pesadas cargas". Describe aparatos de varios mástiles que presentaban grandes mejoras respecto a los aparatos de elevación vistos en épocas anteriores. Tras Hero, la grúa entra en un periodo donde se usó de forma común pero no se presentaron mejoras en su diseño.

En el siglo XII d.C., con el desarrollo de la navegación, el comercio, la minería y la metalurgia, también se desarrollaron las grúas. Las primeras apariciones de las grúas son en las orillas de ríos y puertos con el mismo fin de las que hoy en día conocemos.

Así pues, con el continuo desarrollo del comercio, la técnica de la grúa avanzó, también energéticamente, se empezaron a usar los primeros sistemas hidráulicos que permitiría usar fuerza no humana para elevar cargas. En ese momento, empezó la preocupación por la eficiencia de las máquinas de elevación, lo que llevó a Leonardo Da Vinci (1452-1519) a realizar notables mejoras así como inventar la primera grúa móvil, la cual, él mismo indicaba que presentaba problemas a nivel de diseño, como por ejemplo deformaciones que más adelante en la historia se irían resolviendo. Aparecieron en el siglo XVII las primeras grúas en voladizo en los puertos.

Entramos en los siglos XVIII y XIX, donde los avances en la metalurgia y el dominio del acero permiten la creación de elementos muy interesantes para las grúas, se desarrollan las rodaduras, lo que permite la creación de estructuras mucho más estables y duraderas. Las grúas pasan de ser de madera a poder estar hechas de acero de manera que las secciones disminuyen y ganan rigidez. También en el terreno de la energía en el año 1860 se crea la primera grúa a vapor. La electricidad será aplicada en el año 1881 después de descubrirse durante el siglo XV. Estos avances se producen de manera muy veloz, de forma que las grúas

pasan de ser de madera y accionadas manualmente a ser grúas muy similares a las que actualmente usamos.

Con la aplicación de la electricidad aparecieron nuevas oportunidades pero también nuevos problemas. Con tal de buscar solución a estos problemas, a la vez que se buscaba cooperación internacional, en el año 1889 se reunieron en París los principales técnicos de varios países europeos.

En el año 1888, M. Guynet diseñó un moderno carro de puente grúa. Este era accionado mediante la aplicación de la electricidad, este también disponía de elementos de seguridad en los frenos. Este fue uno de los primeros casos en que se aplicaban mecanismos de seguridad eléctricos, dando paso a lo que en los próximos años centraría el desarrollo de las grúas, la seguridad.

Los inicios del siglo XX están marcados por el conocimiento en los aparatos eléctricos y mecanismos de elevación, con una alta preocupación en dos aspectos muy importantes: la seguridad y el ruido.

Los procesos tecnológicos para la fabricación de piezas de acero iban evolucionando, lo que pudo permitir crear estructuras más estables y resistentes que las anteriores. Uno de los cambios importantes fue el cambio de las cadenas que se habían estado empleando entre los siglos XVIII y XIX por modernos cables metálicos que permitían trabajar con mayores resistencias y menos ruido.

Durante la edad media, los elementos reductores empleaban engranajes rectos, lo que suponía un mayor desgaste y más ruido por parte de estos. Entre el siglo XIX y XX, Ravelli diseñó una transmisión para carros de elevación que empleaba engranajes helicoidales. Esta tecnología fue introducida por Leason en la primera mitad del siglo XX, se caracteriza por el elevado rendimiento y por ser silencioso.

Para los movimientos de rotación de la grúa eran necesarios rodamientos estables, resistentes y de grandes dimensiones. En el año 1964, la Dirección de Puertos Marítimos impuso la circulación sobre rodamientos de bola en su programa de normalización. Al mismo tiempo la sociedad francesa R.K.S. del grupo S.K.F. lanzó al mercado un gran rodamiento de rodillos alternados que constituían el primer prototipo de los rodamientos de la plataforma de giro actuales.

A mitades del siglo XX, la competencia creciente entre las empresas, los problemas energéticos derivados del petróleo y la intención de elevar mayores cargas con las mismas potencias, hizo que el estudio de los mecanismos de elevación se centrara en disminuir el propio peso de la máquina.

M.L. Descans en el congreso de Amberes, celebrado en 1948, trazó las líneas maestras de las nuevas grúas en puertos que en breves serían aplicadas. En el 1949 en Bremen se empezaron a usar las denominadas grúas monobloc, unas grúas que mediante el uso de perfiles tubulares de alta resistencia permitían disminuir de forma notable el peso de las grúas. Este tipo de grúas se fueron extendiendo por países europeos y no europeos.

Para el caso de las grúas pórtico, la aparición de las grúas pórtico con una única viga principal recorrida por un carro permitía también disminuir el coste y peso de este tipo de grúas, la empresa DEMAG obtuvo grandes progresos en este tipo de grúas substituyendo las de doble

viga principal por vigas simples aligeradas. De esta manera se obtuvieron grúas pórtico con pesos muy inferiores a las 1000 toneladas que inicialmente podían tener.

Estructuralmente se han obtenido aligeramientos notables gracias a la utilización de aceros de alto límite elástico, en la actualidad estos aceros tienen valores de alrededor de los 900 MPa de límite elástico. Con estos materiales las plumas se deforman distancias de hasta varios metros recuperando su posición inicial al estar descargadas.

Actualmente la fabricación de los elementos estructurales de grúa se realiza incluso de forma automatizada, como es el caso de la fábrica central de POTAIN en Francia que fabrica de forma automática las celosías pertenecientes a torres, plumas o contraplumas de las grúas.

### 3. La grúa. Tipología de grúas

Una grúa es un mecanismo de elevación de cargas de funcionamiento discontinuo, que se emplea para elevar y distribuir las cargas situadas en la parte del gancho o elemento de sujeción, a distintas alturas y posiciones de manera tal que nos permite manipular elementos de construcción fácilmente y con poco esfuerzo.

Actualmente el mercado ofrece una gran variedad de grúas, en el presente trabajo expondremos brevemente estos tipos y nos centraremos en el diseño de una grúa de tipo torre.

#### 3.1 Grúa torre

La grúa torre es una herramienta de construcción, es utilizada para elevar cargas y distribuir las en un radio de efecto definido por la pluma, las cargas van en un gancho montado en un carro que a su vez se desplaza a lo largo de la pluma. Hay distintos tipos de grúas torre, a continuación mostraremos los tipos y algunas de sus características y usos:

##### 3.1.1 Grúa torre fija

La grúa torre fija tal y como indica su nombre es una grúa la cual su base no posee la capacidad de hacer movimientos de translación, o que en caso de que esta posea los mecanismos necesarios no puedan ser utilizados en el emplazamiento. Estas grúas son las que tienen bases de fundición o cualquier otro tipo de base que sea fija, de manera que se pueden definir de dos tipos según su base:

- Las apoyadas, que usan contrapesos para mantener fija la base.
- Las empotradas, que usan los primeros tramos de la grúa para ser encofradas con hormigón en una zapata o por otros métodos parecidos.

Son un tipo de torre muy empleada dado su bajo coste en comparación a otros tipos más sofisticados y sus capacidades de carga.

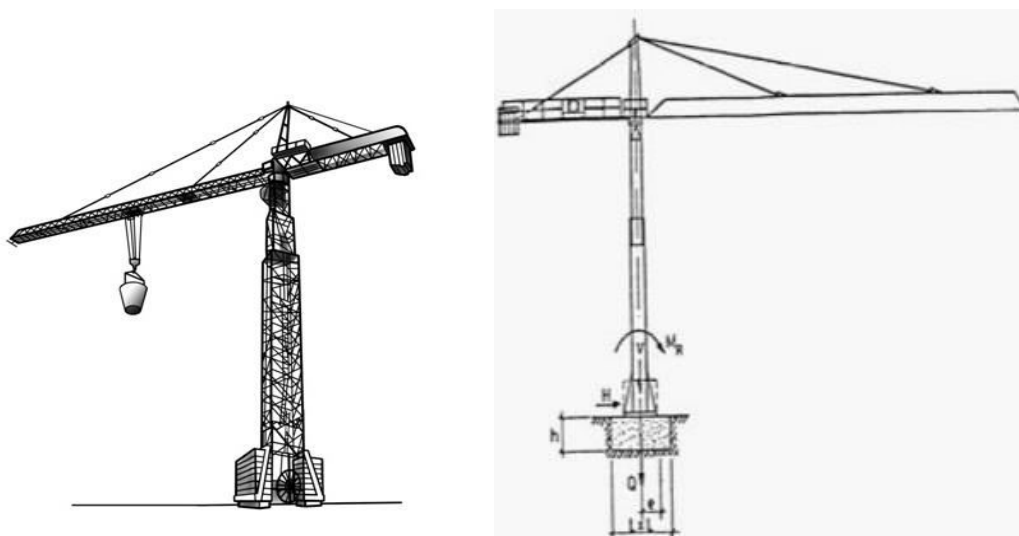


Imagen 1 y 2, Grúas torre fijas, con lastre y empotrada.

### 3.1.2 Grúa torre desplazable

Estas grúas son las que poseen la capacidad de desplazar su base durante el servicio, normalmente mediante carriles. Estas grúas tienen limitada altura ya que esta tiene que ir en función de la estabilidad de la misma y sin necesidad de contrapesos adicionales, tanto en estado de servicio como fuera de él.



Imagen 3, torre grúa desplazable sobre railes de Yantai Haishan.

### 3.1.3 Grúa torre desmontable

La grúa torre desmontable es una grúa destinada a ser montada y desmontada con frecuencia de manera que su diseño lo facilita, por otro lado posee ciertas limitaciones tanto en la cantidad de carga soportable como en su altura. No son tan usadas como las de base fija, pero también se emplean en obras de no gran magnitud.



Imagen 4, foto durante el montaje de una grúa torre desmontable.



### 3.1.4 Grúa torre auto desplegable

Es una grúa pluma orientable, la pluma está montada sobre la torre vertical la cual tiene capacidad de girar. Esta torre está unida a una base de fácil montaje, que ya está prevista para esta utilidad y permitir un rápido despliegue de la grúa como así también su replegamiento. No tienen unas altas prestaciones pero su facilidad de despliegue les da ciertas ventajas respecto a los otros tipos.



Imagen 5, procedimiento de despliegue de una grúa torre autodesplegable...

### 3.1.5 Grúa torre monobloc

La grúa torre monobloc es un tipo de grúa muy parecido al anterior, la grúa desmontable, toda la grúa forma parte de un solo bloque y esta se auto despliega sin necesidad de montajes adicionales. En ciertas ocasiones la base posee ruedas de manera que se facilita su desplazamiento.



Imagen 6, serie de imágenes del despliegue de una grúa torre monobloc.



### 3.1.6 Grúa torre trepadora

La grúa torre trepadora es una grúa que se instala apoyada en la misma construcción de manera que esta va ganando altura a medida que la construcción avanza.



*Imagen 7, grúa torre trepadora instalada apoyada sobre la misma obra.*

### 3.2 Grúa telescópica

Son grúas que suelen ir montadas sobre un automóvil, son usadas cuando se necesitan métodos de elevación rápidos, son capaces de soportar altas cargas y también son empleados para el montaje de las grúas torre fijas. Están formadas por un conjunto de tubos que se despliegan. El único inconveniente que tienen es la longitud de la pluma inclinada lo que hace necesario grandes espacios en los lugares donde debe ser desplegada.



*Imagen 8, grúa telescópica montada sobre un vehículo.*

### 3.3 Grúa móvil

Las grúas móviles pueden ir instaladas en cadenas, orugas, camiones o vehículos especiales para su transporte. Estas grúas tienen por pluma una estructura reticulada o de mástil, pueden girar sobre la base de la misma (si poseen el mecanismo para ello) o bien puede ser la misma pluma la que haga el movimiento de rotación. Las grúas telescópicas anteriormente explicadas, forman parte de este grupo aunque se han separado dado que estas son más

nuevas y potentes que las grúas móviles en general.



*Imagen 9, grúa móvil de estructura reticulada.*

### 3.4 Grúa pluma

Las grúas plumas son un grupo que no es usado en construcción sino que se usan en fábricas para el desplazamiento de grandes pesos a lo largo de esta y también pueden tener la capacidad de rotar sobre la base.



*Imagen 10, grúa pluma sin capacidad de rotación.*

### 3.5 Grúa pórtico

La grúa pórtico consiste en un montacargas apoyado sobre una viga y esta posee dos o más patas que en algunas ocasiones pueden ir sobre raíles y estar dotadas de movimiento. El gancho se desplaza a lo largo de la viga. Estas grúas son muy usadas en puertos y fabricas para el transporte de cargas elevadas a lo largo de la zona de trabajo. Actualmente la grúa pórtico más potente diseñada es capaz de soportar una carga de 20.000 toneladas.



*Imagen 11, grúa pórtico en Taisun, China, puede levantar hasta 20.000 toneladas.*

## 4. Grúa torre

En este apartado entraremos a explicar más detalladamente la grúa torre, sus partes y sus características, ya que es el tema del presente trabajo.

Como anteriormente se ha dicho, la grúa torre es un mecanismo empleado en la construcción de funcionamiento discontinuo destinado a distribuir en su radio de acción las cargas necesarias. Consiste de una pluma orientable sobre un soporte giratorio montado sobre la parte superior de la grúa unida a una base, esta base consiste básicamente de una torre metálica.

Las grúas torre pueden ser móviles o fijas, en el actual trabajo estudiaremos las grúas torre fijas ya que en nuestro caso no estará dotada de desplazamientos en la base de la misma.

En los siguientes apartados definiremos las características de la grúa torre objeto de diseño, es decir, ya centrándonos en características más específicas mencionaremos los aspectos principales a tener en cuenta para su diseño, así como la altura a la que queremos que trabaje, la carga de trabajo, la vida esperada de la grúa, y otros aspectos igualmente importantes.

### 4.1 Dimensiones

Entre las dimensiones que definen una grúa torre una de las más importantes es la altura de trabajo, es decir, la altura máxima en la que será capaz de trabajar la grúa torre. La altura puede variar según el diseño pero lo que realmente marcará el diseño será la distancia a la que se pretenda dar servicio, las grúas torre al estar fabricadas por módulos pueden variar su altura y longitud añadiendo o quitando módulos de manera que las alturas y longitudes de trabajo de una misma grúa torre puede variar según su composición.

La grúa torre del presente trabajo, pretende dar servicio a una altura máxima de 50 metros, la cual se podrá ver modificada según la composición por módulos que esta adquiera. Los módulos serán partes de 4 metros, compuesta por 12 módulos podrá alcanzar esa altitud, teniendo en cuenta que se deberá dejar como mínimo una distancia de 3 metros entre gancho y carga y que la misma carga ocupará un volumen esta altitud se verá reducida hasta alrededor de los 45 metros, lo que serían unos 10 pisos de altura de trabajo.

Otra dimensión muy importante en el diseño y también en la capacidad de trabajo de la grúa es la longitud de la pluma. La longitud de la pluma define la distancia máxima a la que la torre podrá llegar a trabajar, según el trabajo que se quiera realizar se requerirá una longitud mayor o menor. De la misma manera que la torre, la pluma está compuesta por módulos, y como ocurre en el caso de la torre la pluma de una misma torre podrá llegar a distintas longitudes viéndose limitada por la máxima.

En el presente trabajo se pretende dar servicio con una longitud máxima de trabajo de 50 metros, como ya se ha dicho estará fabricada por módulos, 3 de 11,6 metros, 2 de 5,8 metros y 1 de 3,95 metros. Las distintas disposiciones de estos le darán distintas longitudes de trabajo que modificarán la capacidad de carga de la grúa, más adelante se tratarán las cargas máximas de la grúa.

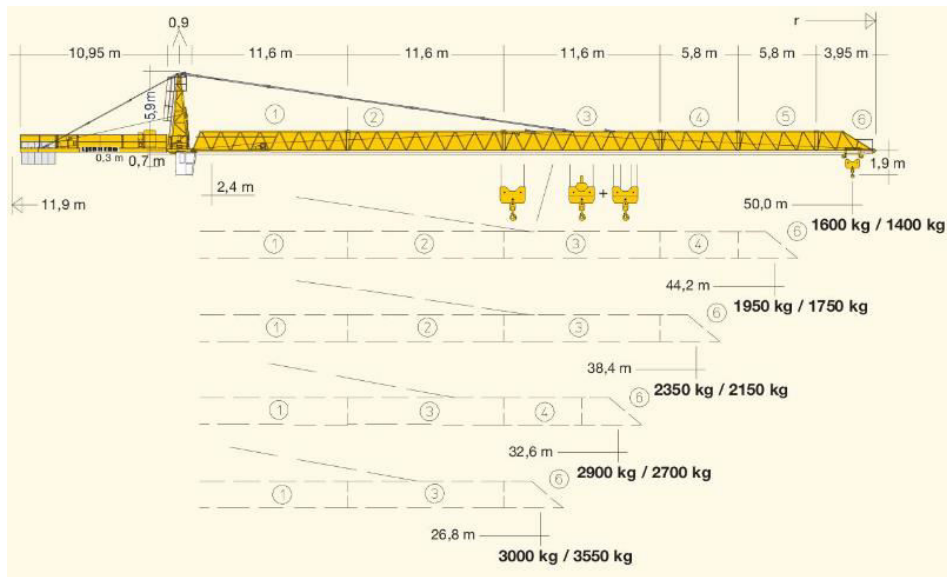


Imagen 12, parámetros principales del modelo tomado como ejemplo.

## 4.2 Prestaciones

A continuación, hablaremos de otros aspectos importantes de la grúa torre, que son el tiempo de vida esperado, la capacidad de carga y los movimientos de la grúa torre. Estas características son también muy importantes para definir tanto el diseño como las capacidades en servicio que tendrá la grúa y por tanto los trabajos para los que será adecuada.

### 4.2.1 Tiempo de vida esperado

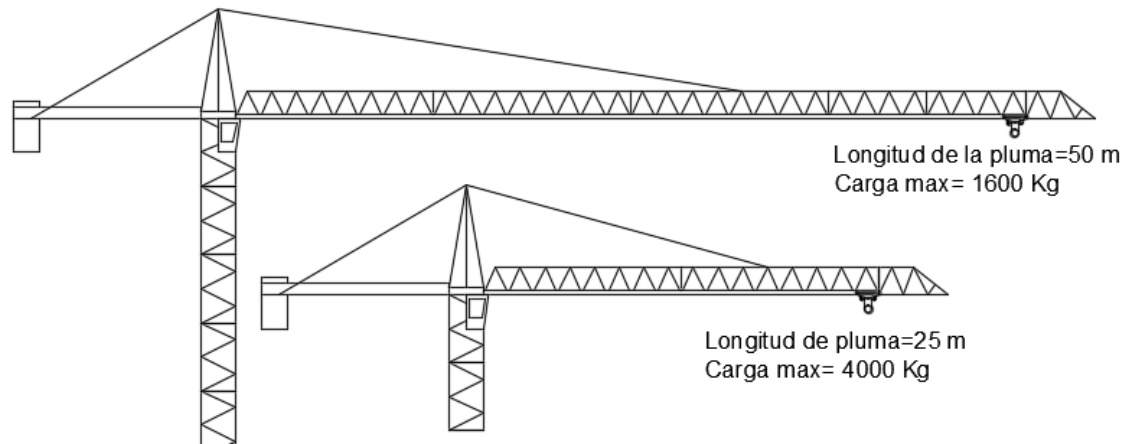
Para poder definir correctamente la grúa es necesario darle un tiempo de vida esperado y de ciclos de carga que realizará, siempre se intentará dar el máximo tiempo de vida por razones económicas. El número de ciclos definirá el diseño de sus elementos y para poder aplicar la norma vigente es un dato que será completamente necesario.

En el presente trabajo se realizará una grúa con la capacidad de trabajar durante 15 años, 4 horas al día, ya que esta no estará siempre realizando acciones de carga y descarga, y también deberá ser transportada y montada en las obras. Lo que dará un total de 17.400 horas de trabajo.

### 4.2.2 Capacidad de carga

La capacidad de carga de la grúa definirá en gran medida su diseño y también los trabajos para los que será adecuada. La mayoría de grúas torre presentan distintas capacidades de carga según la longitud a la que se pretenda dar servicio. Una longitud que se puede ver modificada según la composición por módulos.

En el presente trabajo se darán las capacidades de carga mostradas en el esquema 1, de manera que según el trabajo a realizar la grúa será montada según un esquema u otro, dando a entender que la modificación de la altura no modificara la capacidad de carga de esta ya que solo dependerá de la longitud de la pluma.



Esquema 1, capacidades de carga de la grúa en función de la altura.

#### 4.2.3 Movimientos de la grúa torre

Las grúas torre como se ha mostrado en apartados anteriores pueden realizar distintos movimientos según su diseño. Las grúas pueden realizar movimientos de rotación (3), normalmente el giro se producirá solo en la parte superior gracias a un mecanismo de giro, y también movimientos de traslación sobre raíles (4). En el presente trabajo la grúa será fija mediante una cimentación que la mantendrá estabilizada, y tendrá movimiento de giro en la parte superior.

Otro movimiento que debe ser mencionado es el del carro de la grúa torre (2), que permitirá desplazar la carga a diferentes longitudes de la pluma siempre manteniendo una distancia de seguridad respecto al final superior a 3 metros. El carro dispondrá también del aparejo que permitirá posicionar la carga a distintas alturas (1).

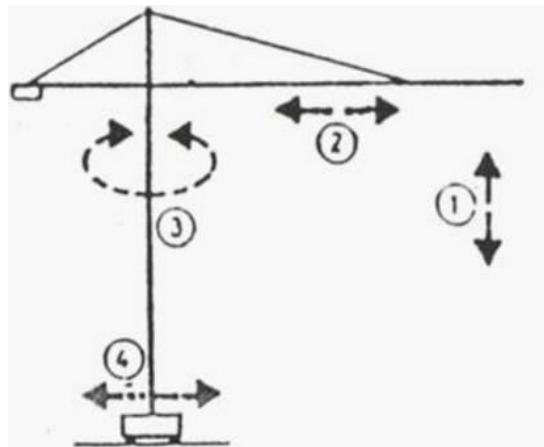


Imagen 13, movimientos principales de la grúa torre.

#### 4.3 Normativa aplicable

Para el cálculo de la estructura se pueden aplicar los eurocódigos referentes a las estructuras metálicas dedicadas al soporte de grúas. La referencia principal la encontramos en el EUROCODIGO 3- parte 6 – Diseño de estructuras metálicas – Parte 6 Estructuras para grúas.

Este eurocodigo hace referencia a otros eurocódigos en los que basa los cálculos de la estructura objeto del presente trabajo. A continuación, mostraremos una lista de los eurocódigos a los que hace referencia:

EN 1090 Ejecución de estructuras de acero y aluminio

    Parte 2 Requerimientos técnicos de las estructuras de acero

EN 1337 Rodamientos estructurales

EN ISO 1461 Especificaciones sobre revestimientos galvanizados por inmersión en caliente de los artículos de hierro y acero fabricados y métodos de ensayo

EN 1990 Eurocódigo: Bases del diseño estructural

EN 1991 Eurocódigo 1: Acciones en estructuras

    Parte 1-1 Acciones en estructuras- Densidades, peso propio y cargas para edificios

    Parte 1-2 Acciones en estructuras- Acciones en estructuras expuestas al fuego

    Parte 1-4 Acciones en estructuras- Acciones del viento

    Parte 1-5 Acciones en estructuras- Acciones térmicas

    Parte 1-6 Acciones en estructuras- Cargas de construcción

    Parte 1-7 Acciones en estructuras- Acciones accidentales

    Parte 3 Acciones en estructuras- Acciones inducidas por grúas y maquinaria

EN 1993 Eurocódigo 3: Diseño de estructuras de acero

    Parte 1-1 Reglas generales y reglas generales para edificaciones

    Parte 1-2 Diseño estructural para el fuego

    Parte 1-4 Diseño en acero inoxidable

    Parte 1-5 Elementos estructurales de placa

    Parte 1-8 Diseño de uniones

    Parte 1-9 Fatiga

    Parte 1-10 Propiedades de dureza y espesor del material

EN 1998 Eurocódigo 8: Previsiones del diseño de la resistencia de la estructura frente terremotos

EN 10164 Productos de acero con propiedades de deformación perpendiculares a la superficie mejoradas- Condiciones técnicas del suministro

ISO 11660 Grúas- Acceso, guardias y contenciones

    Parte 5 Puentes y grúas puente

TS 13001 Grúas – diseños generales

### Parte 3.3 Estados limite y pruebas de compatibilidad del contacto de railes/ruedas

También se puede emplear el EAE para el cálculo de las resistencias, el EAE comprende los cálculos de resistencia que se puedan dar en el eurocódigo con pequeñas modificaciones, ambos son igual de válidos en España.

En el caso de nuestro diseño se empleará un programa que implementará las normas necesarias en el cálculo de la estructura.

El programa que se ha usado es CYPE 3D, un programa capaz de calcular los esfuerzos de las barras y darnos la comprobación según la normativa que nosotros elijamos, en nuestro caso concreto será el EAE, por accesibilidad y más facilidad de manejo que no el caso de los eurocódigos, los cuales usaremos en algún apartado para tomar valores y datos necesarios. Más adelante se definirán los parámetros usados para el cálculo y se dará una breve descripción sobre el programa y su entorno.



## 5. Partes de una grúa torre.

En siguiente apartado se pasará a explicar las distintas partes de una grúa torre. En la imagen 12 podemos ver indicadas sus distintas partes:

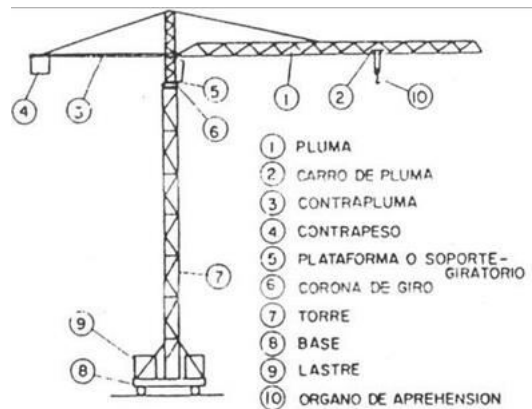


Imagen 14, esquema de una grúa torre y sus partes.

Las partes más destacadas de una grúa torre tal y como puede observar en la imagen 14 son las siguientes:

- Pluma
- Lastre de contrapluma
- Contrapluma
- Portapluma
- Plataforma o soporte giratorio
- Torre
- Lastre
- Carro de pluma
- Tirante

A continuación, pasaremos a describir las partes de la grúa que son parte fundamental de su estructura y esenciales para su funcionamiento.

### 5.1 Pluma

La pluma es una estructura reticulada triangular, está formada por bloques facilitando así su reemplazamiento en caso de producirse algún daño en algún bloque o bien para modificar su longitud o facilitar su transporte.

La pluma da a la grúa un radio de alcance de trabajo, esta está dotada de carriles o vías por donde se desplaza el carro que llevará el gancho y la carga.

La pluma está unida a la torre (aparte de la misma estructura) por un tirante de pluma el cual reduce la flecha en punta de la pluma disminuyendo así los esfuerzos de flexión. Son un elemento realmente importante ya que las grúas torres tienen una estructura en voladizo muy grande. También dispondrá de un cable que permitirá a los operarios trabajar en ella con seguridad.

En la imagen 13 podemos observar la pluma de una grúa torre con el tirante de pluma, y como también se ha señalado la estructura es reticulada triangular.



*Imagen 15, pluma de una grúa torre.*

## 5.2 Lastre de contrapluma

Los lastres o contrapesos son elementos muy pesados hechos de hormigón prefabricado. Los contrapesos se colocan en la contrapluma de manera que disminuyen los esfuerzos y momentos producidos por la pluma tanto cargada como en fuera de servicio. Estos bloques deben indicar de forma clara su peso y evitar que con los usos desaparezca esa información.



*Imagen 16, contrapeso sin montar.*



*Imagen 17, contrapluma con contrapesos montados.*

### 5.3 Contrapluma

La contrapluma es el elemento donde va el contrapeso de esta misma. Sirve para evitar que se creen grandes momentos en la base de la grúa y sirve por tanto para contrarrestar el peso de la carga de servicio. Esta va unida a la torre de la misma manera que la pluma y mediante un tensor se mantiene horizontal.

A diferencia de la pluma, la contrapluma no presenta una estructura triangular, sino que presenta una celosía plana (formada por triángulos) con barandillas para que los operarios puedan trabajar en ella y en la parte final de esta se sitúa el contrapeso y el mecanismo de elevación y traslación de carga con sus tambores de enrollamiento.

### 5.4 Portapluma

El portapluma o castillete se podría considerar como el elemento de anclaje de los tensores de manera que tiene que soportar tensiones importantes. El castillete también dispone de barandillas y escaleras para tener acceso a él por parte de los operarios.

### 5.5 Plataforma o soporte giratorio

La plataforma giratoria se sitúa en la parte superior de la torre, junto a ella se coloca la corona de giro (debajo de la plataforma) y en este soporte van unidas la pluma y la contrapluma. El conjunto de estos elementos es lo que le da a la grúa la posibilidad de realizar giros de 360º, específicamente a la pluma y la contrapluma. En algunas ocasiones la cabina de control puede estar situada en esta parte.



*Imagen 18, plataforma giratoria (situada en el centro) con cabina para el operario, justo debajo se puede intuir la corona.*

### 5.6 Torre

La torre estará compuesta por celosía metálica triangular, formando módulos rectangulares los cuales se deberán ir acoplando unos a otros mediante bulones para conseguir la altura deseada.

En la parte superior de la torre, encontraremos el sistema de giro con su corona de giro, y en la

parte inferior tendremos una estructura que permitirá la colocación de lastre, aunque en caso de cimentación no será necesario, que evite el giro de la estructura. El hecho de que la torre está formada por módulos le dará la capacidad a esta de tomar distintas alturas y distintas capacidades de levantamiento de carga, más adelante se entrará en detalle de estas características.

También dispondrá de una escalera metálica en su interior que permitirá el acceso a los operarios para realizar ya sea tareas de mantenimiento o montaje.

### 5.7 Lastre

El lastre tiene la función clave de mantener estable la grúa frente a su propio peso, al peso de la carga en servicio y el de la acción del viento en su estructura.

El lastre puede estar formado por una zapata enterrada o bien por varios bloques de hormigón colocados en su base, estos bloques deben ser tratados con el mismo cuidado que los de contrapeso, con su peso visible en todo momento y sin deterioro.

### 5.8 Carro de pluma

El carro de pluma es un elemento de pequeño tamaño que está dotado de movimiento a lo largo de la pluma gracias a unos railes por los que circula, en la imagen 14 se puede observar un carro circulando por la pluma de una grúa. Este dispone de un sistema de poleas que permite modificar la altura del aparejo, el cual tendrá un gancho que no permitirá manejar las cargas.



*Imagen 19, carro de pluma de una grúa torre.*

Para el funcionamiento del carro es necesario disponer de un sistema de levantamiento de la carga donde nos encontraremos el tambor de enrollamiento. A continuación, pasaremos a describir estos elementos que también son muy importantes e interesantes de cara al diseño de la grúa. Estos elementos son los siguientes: poleas, tambor, cables y gancho.

### 5.9 Polea

Las poleas son una parte esencial para el funcionamiento tanto del mecanismo de elevación como el de traslación, a continuación describiremos este elemento.

En poleas podemos distinguir dos grandes grupos, las de radios y las de alma de acero. Según la fabricación de las poleas podemos distinguir 4 grupos, las de fundición nodular, las de acero moldeado, acero soldado y de acero laminado.

-Fundición nodular: las poleas de fundición nodular no resisten bien el desgaste y son poco empleadas en esos sitios donde se vaya a trabajar con cargas elevadas.

-Poleas de acero moldeado: presenta mejores características frente al desgaste que las de fundición nodular.

-Poleas de acero soldado: son poleas ligeras que se usan de forma más frecuente que las de fundición, pueden tener radios compuestos por pletinas o varillas o bien tener un alma compuesta por placas más o menos gruesas en función de los esfuerzos a soportar.

-Poleas laminadas: las poleas laminadas se conforman trabajando en frío o caliente un disco circular hasta darle a este la forma de la garganta. El resto de elementos se soldaran.

Las poleas se acoplan a los ejes mediante ajustes con casquillos o bien con rodamientos en función de las necesidades. Es importante fijarse en el material de la garganta por donde pasara el cable ya que este influenciara mucho en la vida de este.

Más adelante se entrará a explicar con un poco más de detalle las dimensiones de la garganta y también la unión de las poleas con los ejes.



*Imagen 20, Polea con alma central.*

## 5.10 Tambor

El tambor es un elemento que también está presente tanto en el caso del sistema de elevación como el de traslación, ya que estos recogerán el cable para poder desplazar las carga y el carro respectivamente.

Los tambores deben calcularse de manera que una vez se haya recorrido la distancia necesaria este no pueda enrollar más capas de cable. Dentro de los tambores podemos distinguir dos grandes grupos, los tambores de una sola capa y los tambores con varias capas de cable.

-Tambores de una sola capa, son aquellos que se enrollan solo en una capa y normalmente están ranurados para acoplar mejor el cable. Son los más usados en mecanismos de elevación.

-Tambores de varias capas de cable, son aquellos en que el cable se va enrollando encima del mismo, normalmente son lisos.

Los tambores se fabrican normalmente en fundición de hierro, de acero fundido, o en construcción de chapa soldada.

Los tambores también se pueden separar en dos grupos, los ranurados o los lisos, teniendo los ranurados una garganta de perfil de propiedades específicas.

Más adelante, cuando se haga la selección del tambor explicaremos más detalladamente características de este a tener en cuenta para un correcto funcionamiento del mecanismo.

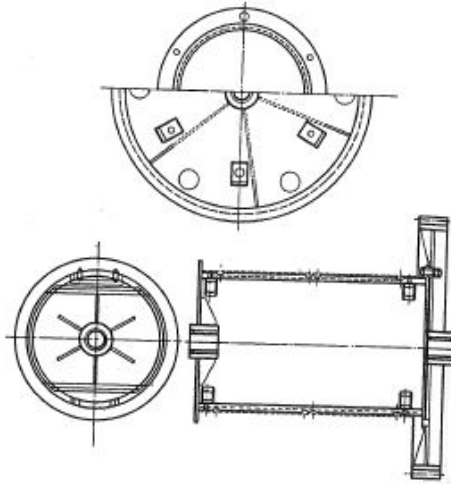


Imagen 21, dibujo de un tambor.

## 5.11 Cables

Los cables que se usan son metálicos, los podemos encontrar tanto para la elevación, como la traslación. Estos cables están compuestos por alambres que forman cordones, que, enrollados sobre un alma acaban formando el cabo. Así pues, pasamos a una descripción de estas partes:

-Alambre, normalmente de acero trefilado al horno, tienen cargas de rotura de hasta 1800 MPa.

-Almas, las almas pueden ser metálicas o bien textiles.

-Cordones, Son alambres trenzados sobre un alma o no.

-Cabos, son varios cordones trenzados alrededor de un alma.

A continuación, mencionaremos distintas formas de trenzar los cables, cordones, y sus estructuras transversales.

Los cordones se pueden clasificar en cables de igual diámetro, cables de diferente diámetro, alambre de forma especial, y de forma no circular:

-Cordones de igual diámetro, en este caso cada capa tiene s más que la anterior.

-Cordones de alambre de diferente diámetro, en este caso existen tres tipos:

- Seale: en el que las dos últimas capas llevan el mismo número de alambres.

- Warrington: la capa exterior lleva cables de distinto diámetro.
- Filler-wire: tiene pequeños alambres que sirven para cubrir los espacios que quedan, de esta manera se consigue una mayor resistencia al aplastamiento.

-Cordones de forma especial, son alambres con formas especiales en sus capas exteriores.

-Cordones de forma no circular, son aquellos que pueden ser triangulares o elípticos.

El trenzado de los cables se puede clasificar en dos tipos teniendo en cuenta el sentido de este en los cables y en los cordones.

-Tensión cruzada o normal, en este caso los alambres van en sentido contrario al de los cordones, es el más usado por su menor tendencia a deshacer la torsión y por tener una mayor resistencia.

-Torsión Lang o de sentido único, se tuercen tanto cordón como alambre en el mismo sentido, este tipo de cable es más flexible y proporciona un mayor llenado del área central, en el caso de usarlo con poleas se gasta menos, no es el más común pero a veces también es empleado.

Podemos encontrar cables monocordes, los cuales solo usan un cordón y están hechos enteramente de metal o bien cables de cordones que son los más usados en la práctica. El número de cordones que componen el cable oscila entre 3 y 8, el más común es 6 ya que permite una forma más redondeada. Dentro del grupo de cables con varios cordones se encuentran los que se trenzan los cordones en sentido contrario de manera que forman estructuras “antigiratorias” y así el cable tiende menos a girar con las cargas suspendidas.

Finalmente comentar los cables preformados, los cuales reciben antes de ser cableados la forma helicoidal, de esta manera se eliminan tensiones, se le da una vida más larga al cable, y estos tienden mucho menos a destorcerse.

## 5.12 Aparejo

En los aparatos de elevación muchas veces es necesario hacer el paso múltiple del cable desde la carga hasta el aparato de elevación, es por eso que se usan aparejos los cuales evitan el aflojamiento del cable a la vez que garantizan la estabilidad de la carga.

Los aparejos dependiendo de la carga que deban soportar pueden estar compuesto de más o menos poleas, además que estas pueden estar distribuidas de distinta manera, así pues, podemos distinguir entre aparejos de poleas continuas y aparejos de poleas exteriores e interiores a placas.

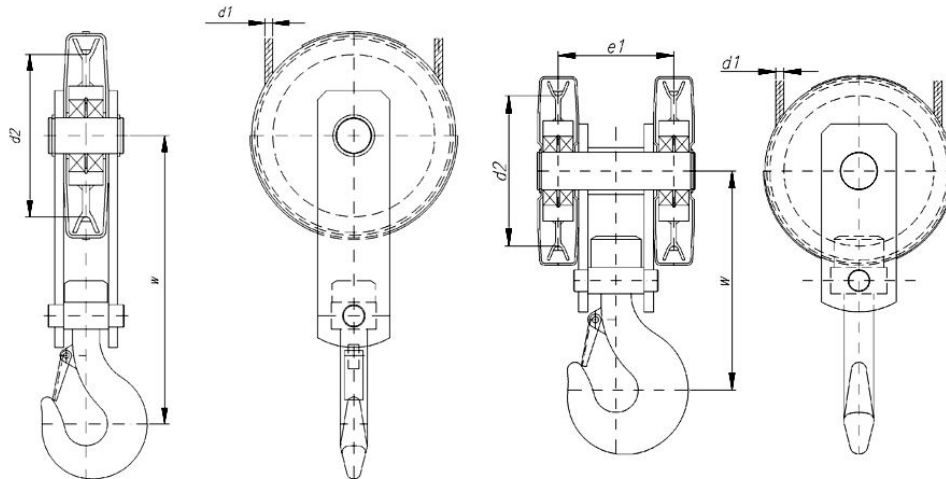


Imagen 22, esquema de un aparejo de una polea (izquierda), y de dos poleas (derecha)

Más adelante cuando pasemos a la selección de los aparejos describiremos más características de este y estudiaremos más a fondo su composición.

### 5.12.1 Gancho

El gancho es un elemento muy importante en los aparatos de elevación, en la grúa torre esté sujeta la carga y debe ser definido de forma muy escrupulosa para evitar que posibles choques o golpes no desestabilicen la unión carga-gancho, de manera que siguen unos criterios de seguridad importantes. El gancho y sus dimensiones actualmente están definidas por normas, de manera que su elección es sencilla.

Los ganchos se pueden distribuir en tres grupos:

- Gancho simple, son usados para cargas medias y bajas.
- Gancho doble, son usados para cargas más elevadas ya que su disposición geométrica permite una distribución de cargas más favorable.
- Gancho de hojas, son más ligeros que los forjados, y son empleados en grúas-puente de la industria del acero y en cucharas de colada.

Los ganchos como se indica en la figura tienen una caña, la cual puede ser de mayor o menor tamaño en función de la necesidad de altura de la carga.

En muchos casos en que se requiere una mayor seguridad se dispone de un gancho de seguridad que cubre el espacio que queda vacío entre el extremo del gancho y la parte opuesta de este, de manera que no permite la salida de la eslinga del gancho.



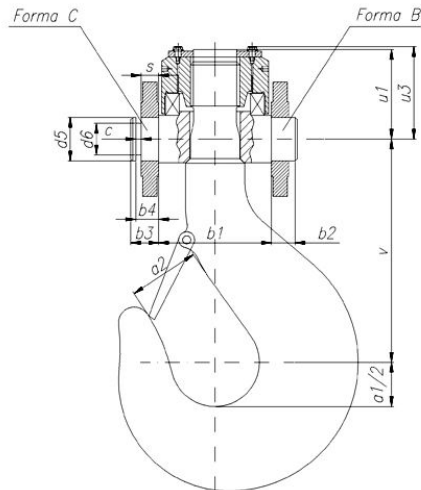


Imagen 23, esquema de un gancho simple (GOSAN).

Más adelante en el presente trabajo se seleccionaran los elementos que se van describiendo con unos criterios que también serán mencionados.

### 5.12.2 Bridas de unión a la carga

En algunas ocasiones no será posible que el gancho se una a la carga de forma directa, en estos casos será necesario el uso de bridas. La utilización de las bridas debe ser cuidadosa ya que de estas dependerá la carga que se esté elevando. Hay distintos tipos de brida, son los siguientes:

- Estrobo: conformado por cable de acero tal y como se muestra en la imagen 24. Son elementos metálicos de unión mecánica entre la carga y el gancho de la grúa. Son muy resistentes y se emplean tanto en el caso de cargas pesadas como ligeras. Su deterioro es comúnmente producido por un mal almacenaje, se debe de evitar que se formen cocas o torceduras. Los estrobos tiene en cada una de sus puntas un aro, la unión del cable en el aro debe realizarse mediante una unión tejida y emplomada. Esta unión produce una disminución de la capacidad de carga del cable de alrededor de un 6% de manera que para el cálculo y diseño se tomara un valor del 15% por motivos de seguridad. También deben mostrar la carga de maniobra para la que están preparados.
- Eslingas: normalmente hechas de fibra, se muestra en la imagen 24. Las cintas se usan para manejar tanto cargas pesadas como más livianas. Estos están compuestos por poliéster de alta tenacidad con unos valores de resistencia que varían en función del espesor y ancho de la cinta empleada. Las eslingas pueden ser de una capa, dos o tres capas.
- Cadenas: como su propio nombre indica son cadenas de acero. Están compuestas (como todas las cadenas) por eslabones de acero. Las cadenas son menos empleadas debido al desgaste que sufren y al propio peso del elemento. Las cadenas también presentan el inconveniente de que sufren roturas sin previo aviso. La carga a la que estarán sometidas las cadenas no deberá ser mayor a la indicada por el fabricante.

- Jarcias: en este caso pueden ser de cordel o de cuerdas, es decir o bien de fibras vegetales o de fibras sintéticas respectivamente, son menos empleados.

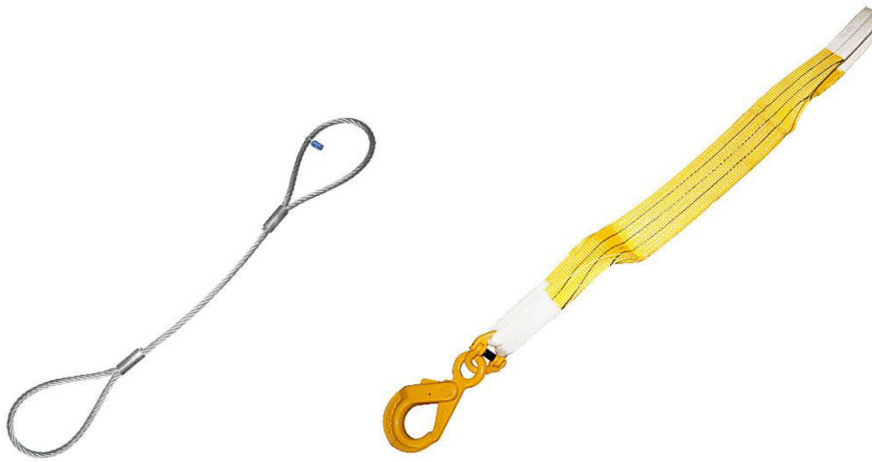


Imagen 24, Estrobo (izquierda) y eslinga de fibra (derecha). .

Las bridas mostradas en este apartado se pueden encontrar en el mercado sin necesidad de diseñarlas y deberán cumplir con la normativa vigente. Para la elección de una brida deberemos tener los siguientes datos:

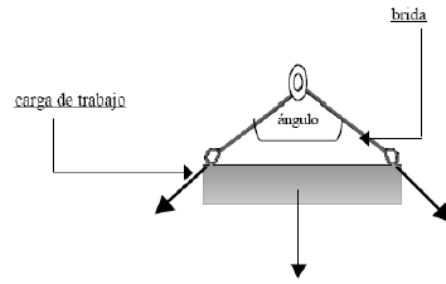
- Peso exacto de la carga a elevar también dicha carga de maniobra...
- Tamaño de la carga a elevar.
- La velocidad de desplazamiento del equipo.
- Capacidad de la brida a emplear.

También deberán tenerse en cuenta las siguientes normas:

- La carga debe mostrarse estable y en equilibrio.
- No debe haber ninguna posibilidad de deslizamiento o de que la carga pueda soltarse o cambiar su centro de masa debido a que está mal cogida.
- El ángulo máximo entre los enganches de la brida a la carga no deberán ser mayores de  $90^\circ$ . Esto se debe por lo mostrado en la figura 24 y complementado con la tabla 1, donde podemos ver que a mayor ángulo el cable deberá soportar mayores tensiones de manera que disminuiríamos su vida produciendo un mayor desgaste.

Angulo	Carga de trabajo
45°	0,5 P
90°	0,7 P
120°	1 P
150°	2 P
160°	3 P
165°	4 P
170°	6 P
175°	11P

Tabla 1, Cargas de trabajo en función del ángulo entre enganches.



P = Carga total del elemento que se está levantando

Imagen 25, Angulo entre enganches de la eslinga .

También podemos distinguir tres tipos de brida según su disposición, estos tres tipos son los siguientes:

- Brida simple: está compuesta por un solo cable el cual sus extremos terminan en un aro de manera que se pueda fijar la carga según se ve en la imagen 26.
- Brida sinfín: es aquella en que sus extremos están unidos formando un solo tramo. Se pueden ver bridas sin fin en la imagen 26.
- Brida de varios ramales: como su nombre indica son bridas que disponen de varios cables para unirse a la carga, se puede observar en la imagen 26



Imagen 26, Imagen de brida simple (izquierda), brida sinfín (centro) y brida de dos ramales (derecha).

### 5.13 Tirantes

Los tirantes son los elementos encargados de aguantar la pluma y la contrapluma de la grúa. Los tirantes pueden ser de dos tipos, de cable o bien formados por barras de acero unidas mediante bulones. En la imagen 27 se pueden ver los tirantes del segundo tipo.



Imagen 27, Tirante desmontado formado por barras unidas mediante bulones.

En la grúa objeto de diseño los tirantes aparecerán en 4 ocasiones, en dos de ellas los tirantes se emplearan para sujetar la contrapluma, y las otras dos serán para aguantar la pluma, empleando uno o los dos según la longitud de esta.

### 5.14 Motores

Las grúas pueden disponer de varios motores en función de los movimientos que puedan realizar. Los motores eléctricos empleados en este tipo de máquinas mayoritariamente son trifásicos asíncronos de anillos rozantes, en algunos casos se emplean motores en corto y de corriente continua.

Las tensiones para motores trifásicos son de 220, 380, y 500 V. Para corriente continua están normalizadas las tensiones mostradas en la tabla 2 con una tolerancia del  $\pm 5\%$ :

<b>Generadores</b>	<b>115</b>	<b>230</b>	<b>460</b>	<b>630</b>
<b>Motores</b>	110	220	440	600

Tabla 2, Tensiones normalizadas para motores trifásicos.

Como fuente de energía se usa la red trifásica corriente, con una frecuencia de 50 Hz en nuestro caso. Con rectificadores se obtiene la corriente continua, en muchas ocasiones donde trabaja la grúa hay redes con corriente continua cercanas.

#### 5.14.1 Motores de corriente continua

Los motores de corriente continua son usados cuando es necesaria una potencia por encima de los 200 kW o cuando se quiere una regulación con un alto margen. Se pueden alcanzar velocidades con un margen de 3 a 5 veces la nominal aunque en pocas ocasiones se llega a una relación de 1:3.

La parada de emergencia en estos motores se hace cortando la tensión. Para el frenado se reducirá la velocidad hasta un cierto punto y entonces se dejaran caer los frenos evitando picos altos de intensidad. Dentro de estos motores encontramos 3 tipos que mencionaremos a continuación:

- Motores de excitación en serie: desarrollan un elevado par de arranque y la velocidad se adapta a la carga. Eran más usados antiguamente.
- Motores de excitación en paralelo: actualmente no se usa. Era empleado en casos de poca potencia y la velocidad era independiente de la carga.
- Motores de excitación independiente: son unos motores muy fácilmente regulables para todo tipo de cargas y los más empleados en la actualidad.

#### 5.14.2 Motores trifásicos

Son los más usados en la actualidad. Dependiendo del número de polos su velocidad puede ser:

$$n = \frac{60f}{p}$$

Donde f es la frecuencia y p el número de polos, en el caso de los asíncronos varia con la carga. Al ser una velocidad muy elevada se hace necesario el uso de reductores para poder aprovechar la potencia.

Hay tres tipos de motores síncronos:

- De anillos rozantes: Su velocidad puede ser regulada electrónicamente o mediante resistencias aunque no con el mismo margen que en el caso de los de continua. El par máximo alcanza valores de hasta 3 veces el nominal. Son baratos y fiables.
- De colector: totalmente fuera de uso se regulaban manualmente.
- De jaula de ardilla: solo se usan en el caso de necesitar poca potencia, y normalmente no se regulan.



Imagen 28, Motor de 200 kW de anillos rozantes.

### 5.14.3 Frenos

En los sistemas de traslación, elevación de carga, movimiento sobre vías, etc., es necesario el uso del freno para detener el movimiento. En el caso de las grúas el freno actúa cuando se ha dejado de alimentar eléctricamente el motor por condiciones de seguridad, esto es mediante un resorte, el cual el mecanismo del freno vence cuando hay tensión y cuando deja de haberla el resorte lo empuja.

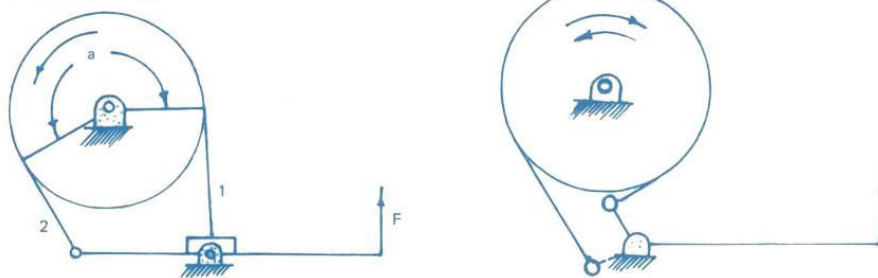
Podemos encontrar tres tipos de frenos principales, el de cinta, de mordazas, discos y los cónicos. A continuación los escribiremos.

#### 5.14.3.1 Freno de cinta

Se trata de una cinta que abraza una polea de entre 200 y 750 mm de diámetro en un ángulo de contacto de 250°, esta cinta es de acero y de un espesor de alrededor de 5 mm.

Esta cinta se acciona mediante un mecanismo de manera que mediante la fricción frena el giro. En el caso de las grúas en ocasiones la misma polea que se usa de freno está situada en el tambor, también disponen de un freno de mordazas alternativo. Actualmente se emplean solo como freno auxiliar en grúas portacontenedores de gran tamaño debido a los desajustes que presentaban.

Frenos de cinta



Esquema 2, Esquema del funcionamiento de un freno de cinta

#### 5.14.3.2 Freno de mordazas

Los frenos mordaza son los más populares y mediante el rozamiento de las zapatas sobre una superficie producen el frenado. Estas zapatas pueden ser accionadas directamente por el electroimán, mediante una palanca o por el sistema Eldro.

#### 5.14.3.3 Frenos de disco

Son accionados hidráulicamente y constan de un disco de acero y una pinza con dos bombines en oposición. También son muy empleados en la actualidad. En la imagen 29 se puede observar un disco de freno. De la misma manera que los frenos de mordazas unas zapatas presionan contra el disco originando una fricción y produciendo el frenado.

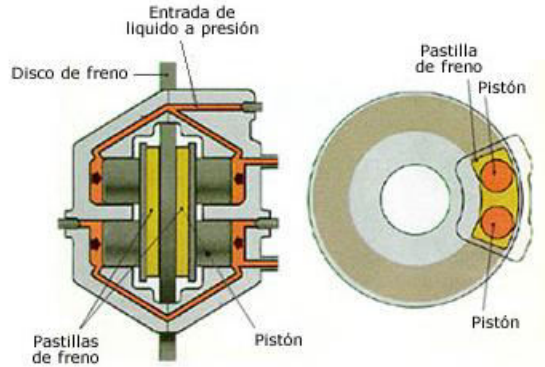


Imagen 29, Freno de disco.

#### 5.14.3.4 Frenos cónicos

El rotor del motor en forma cónica encaja con los frenos de manera que este actúa directamente sobre el rotor una vez se corta la tensión y el resorte deja de empujar el freno. Este freno y el motor normalmente forman un conjunto.

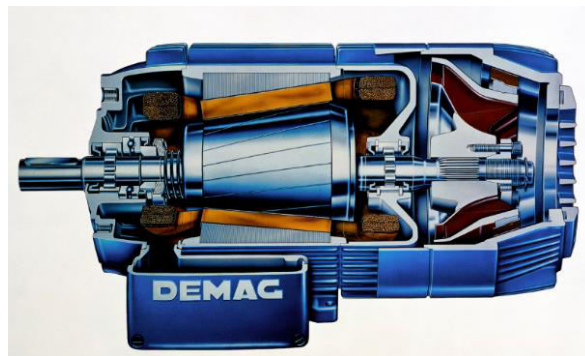


Imagen 30, Freno cónico integrado en motor.

### 5.15 Pasarelas y demás áreas transitables

La grúa dispondrá de pasarelas por las que transitarán los operarios para las tareas de montaje y mantenimiento. Estas pasarelas se deberán diseñar según lo descrito en la norma del Documento Básico SUA. Según el documento la altura a partir de la cual se deberán emplear protección es de 55cm, por lo que en nuestro caso toda la pasarela situada en la contrapluma llevara barandilla y suelo antideslizante, también se dispondrá de un enganche para que el operario pueda unirse a la estructura mediante un cinturón y un arnés así disminuyendo aún más las probabilidades de caída.

Las barandillas de la pasarela tendrán las siguientes características:

- Deberán tener una altura de como mínimo 1,1 m respecto al suelo de la pasarela.
- Se colocarán barandillas a una altura intermedia.
- Recorrerán a lo largo de toda la pasarela.
- También para mayor seguridad se podrá incluir un rodapié u otro elemento que proteja de la



misma manera.

A parte de la pasarela que hallaremos en la contrapluma también nos encontramos un par de áreas transitables más:

- La torre:  
La torre dispondrá de una escalera rodeada por una estructura anticaída, y el operario deberá ir unido a la estructura mediante un cable de seguridad unido al cinturón de este mediante un arnés.
- La pluma:  
En la pluma no se dispondrá de una pasarela como tal debido a la falta de espacio y a la forma constructiva de la grúa, por eso el operario deberá ir atado a la estructura mediante un arnés y un cable como ya se ha mencionado en los casos anteriores.

Sera obligatorio que en todo momento el operario haga uso del cable de seguridad para evitar cualquier riesgo de caída.



*Imagen 31, Modulo de grúa torre con escaleras interiores.*



## 6 Selección y dimensionamiento de componentes de la grúa

Este apartado se trata de escoger los distintos elementos que forman parte de la grúa aparte de la misma estructura.

La grúa, como ya se ha dicho en anteriores apartados consta de varios mecanismos que dotan a la grúa de distintos movimientos ya sean para elevar la carga, desplazarla, o bien realizar el giro de la pluma. Estos mecanismos están compuestos de distintos elementos que también son de vital importancia para que la grúa cumpla con las funciones para la que es diseñada.

El estudio de todas sus características, normativas, disposiciones, etc., llevaría mucho tiempo por lo que en el presente trabajo nos dedicaremos a describir las características más importantes para llevar a cabo su selección.

### 6.1 Aparejo

El aparejo es el elemento que junto con el gancho se encarga de elevar la carga, este está formado por las poleas y el mismo gancho. Estos ya se han comentado en anteriores apartados por lo que pasaremos a definir su elección.

Para realizar la selección del aparejo según las tablas de datos que nos proporcionan los fabricantes, se necesita saber los siguientes datos:

-Grupo DIN/FEM al que pertenece: en el caso de la grúa torre, al ser un aparato que siempre se usara en carga máxima, dado que el alquiler y uso de las grúas es básicamente para transportar la máxima carga posible, de manera que según la tabla 3 pertenece al grupo M8.

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	m	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 3, Clasificación de aparatos según el FEM.

-La carga: la carga máxima a la que será sometido, en nuestro caso y como ya se ha comentado anteriormente la grúa está diseñada para soportar 4 toneladas de peso.

-La vida: el tiempo de vida esperado de la grúa, que en nuestro caso eran como ya se mencionó en anteriores apartados 17.400 horas de trabajo.

-El cable: en este caso el cable puede definir el aparejo ya que este viene con las poleas con medidas dadas, o bien se puede comprobar que el cable que corresponde a esa polea cumpla con las condiciones y sea apto para su uso, en nuestro caso tomamos el segundo camino.

La selección se hará con la marca GOSAN, una empresa del País Vasco que se dedica a la fabricación de elementos mecánicos para elevación.

Según la tabla 4 podemos ver los distintos aparejos que nos ofertan, y sus medidas respecto a la imagen 32.

Nº	Grupo		Carga		Vida	Cable		Dimensiones								Simpl. a2	Dobl.	Peso kgs.	Tipo
	ISO FEM	DIN	t	h	d1	d2	d3	d4	d5	e1	e2	v	w						
5	M3	1 Bm	12,5	1.600	14	235	280	335	60	200	310	210	360	63	50	75	022.5.M3		
5	M4	1 Am	10	3.200	14	235	280	335	60	200	310	210	360	63	50	75	022.5.M4		
5	M5	2 m	8	6.300	12	240	280	335	50	200	297	210	360	63	50	75	022.5.M5		
5	M6	3 m	6,3	12.500	12	275	315	370	50	200	297	210	360	63	50	75	022.5.M6		
5	M7	4 m	5	25.000	12	315	355	410	50	210	307	210	360	63	50	80	022.5.M7		
5	M8	5 m	4	50.000	12	315	355	410	50	210	307	210	360	63	50	80	022.5.M8		
6	M3	1 Bm	16	1.600	16	265	315	370	60	240	350	240	420	71	56	102	022.6.M3		
6	M4	1 Am	12,5	3.200	16	265	315	370	60	240	350	240	420	71	56	102	022.6.M4		
6	M5	2 m	10	6.300	14	270	315	370	60	240	350	240	420	71	56	106	022.6.M5		
6	M6	3 m	8	12.500	14	310	355	410	60	240	350	240	420	71	56	106	022.6.M6		
6	M7	4 m	6,3	25.000	14	360	405	460	50	250	350	240	410	71	56	110	022.6.M7		
6	M8	5 m	5	50.000	14	360	405	460	50	250	350	240	410	71	56	110	022.6.M8		
8	M3	1 Bm	20	1.600	18	300	355	410	70	270	400	265	465	80	63	150	022.8.M3		
8	M4	1 Am	16	3.200	18	300	355	410	70	270	400	265	465	80	63	150	022.8.M4		
8	M5	2 m	12,5	6.300	16	305	355	410	60	270	380	265	465	80	63	152	022.8.M5		
8	M6	3 m	10	12.500	16	355	405	460	60	270	380	265	465	80	63	152	022.8.M6		
8	M7	4 m	8	25.000	16	405	455	510	60	280	390	265	455	80	63	155	022.8.M7		
8	M8	5 m	6,3	50.000	16	405	455	510	60	280	390	265	455	80	63	155	022.8.M8		
10	M3	1 Bm	25	1.600	20	295	355	565	80	290	430	280	500	90	71	178	022.10.M3		
10	M4	1 Am	20	3.200	20	295	355	565	80	290	430	280	500	90	71	178	022.10.M4		
10	M5	2 m	16	6.300	18	350	405	460	70	290	410	280	500	90	71	180	022.10.M5		
10	M6	3 m	12,5	12.500	18	400	455	510	70	290	410	280	500	90	71	180	022.10.M6		
10	M7	4 m	10	25.000	18	455	510	565	70	320	440	280	500	90	71	185	022.10.M7		
10	M8	5 m	8	50.000	18	455	510	565	70	320	440	280	500	90	71	185	022.10.M8		

Tabla 4, Tabla de aparejos ofertados por GOSAN.

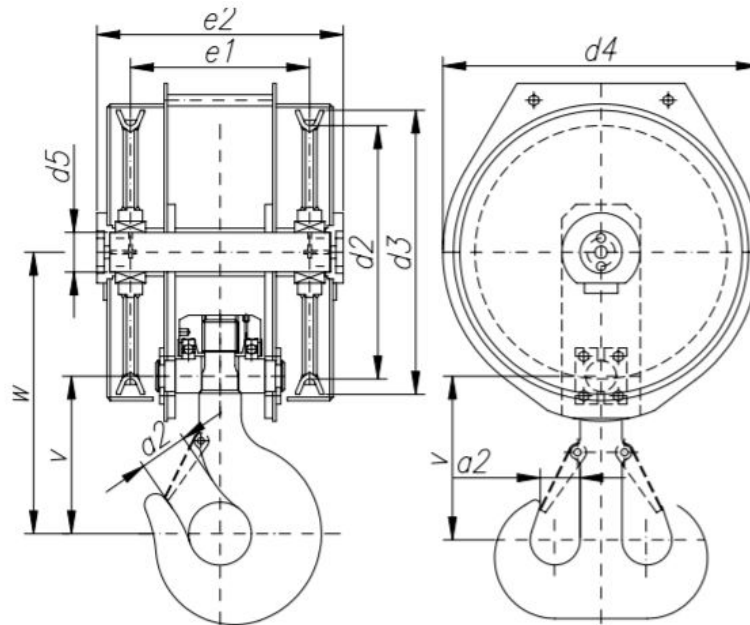


Imagen 32, Dimensiones geométricas del aparejo según tabla 4.

Se ha elegido según los datos anteriormente mencionados el aparejo con referencia 022.6.M8, con gancho simple. De manera que la carga para la que ha sido diseñado es mayor que para la que se usara, el tiempo de vida es mayor al esperado, y obviamente pertenece al grupo DIN de la grúa torre.

## 6.2 Cables

Los cables son los elementos encargados de transmitir los movimientos de elevación del carro y de traslación de la carga, por tanto dividiremos los cables según su uso y definiremos cada uno en función de las solicitaciones que reciba.

### 6.2.1 Cable de elevación

El cable de elevación de la carga debe estar diseñado correctamente ya que este debe aguantar con el peso de la carga y también evitar la rotación o los desplazamientos de esta.

Los cables se han definido anteriormente por lo que no entraremos en más detalles para describirlos.

Para el caso de la grúa torre el mejor tipo de cable según sus características y las solicitaciones a las que será sometido será un cable grueso, con alambres de alta resistencia y alma textil.

Los coeficientes de seguridad con los que los cables de las grúas torre son diseñados es entre 5-9.

Para definir el diámetro mínimo del cable la norma DIN establece una formula, la cual mediante una tabla de valores (tabla 5) de la variable que nos da la norma, se establece el diámetro mínimo del cable que escogeremos.

$$d = K_c * \sqrt{S}$$

Siendo S la tensión máxima a la que será sometido i Kc la variable que nos da la tabla.

GRUPO	COEFICIENTE	
	CARGAS Y CABLE ANTIGIRATORIO	PELIGROSAS
	180	200
1 Bm	0,265	0,250
1 Am	0,280	0,265
2m	0,315	0,280
3m	0,335	0,325
4m	0,375	0,365
5m	0,425	0,400

Tabla 5, Valores del coeficiente Kc según clasificación.

El valor de la tensión máxima a la que será sometido el cable se definirá con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{Q_u + Q_{es}}{i * \eta}$$

Siendo:

$Q_u$ : Carga máxima nominal del aparato.

$Q_{es}$ : Peso propio del aparejo.

$\eta$ : Rendimiento del aparejo.

$i$ : Relación del aparejo.

De manera que la fórmula quedará rellena de la siguiente manera, tomando como 10 m/s<sup>2</sup> la aceleración de la gravedad:

$$S = \frac{40000 + 1100}{4 * 0,97} = 10.592,78 \text{ N} = 10,59 \text{ KN}$$

El rendimiento se especifica según la tabla 6 teniendo en cuenta el aparejo de 4 ramales.

Nº de ramales	2	3	4	5	6	7
Poleas con rendimiento	$\eta$ 0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94

Tabla 6, Rendimientos en función del número de ramales del aparejo.

La norma DIN establece la fórmula mostrada a continuación que junto con la tabla 5 establece el diámetro mínimo del cable para un correcto funcionamiento:

$$d \geq k_c * \sqrt{S}$$

En nuestro caso, al usar cable antigiratorio y ser cargas peligrosas debido a su peso y altura, se tomara que Kc=0.425 ya que es el más desfavorable, también señalar que en esta fórmula se usan los decanewtons:

$$d \geq 0,425 * \sqrt{1059,28} = 13,83 \text{ mm}$$

De manera que el cable deberá tener un diámetro mayor a 13,83 mm, lo cual hace que el conjunto aparejo-cable cumplen con la normativa ya que el aparejo es para un cable de 14 milímetros. Para seleccionar el cable se ha elegido la marca SERCABLES, en la tabla 7 se muestran distintos diámetros de cables y sus respectivas resistencias. Como ya se ha mencionado en el caso de la grúa se elegirá un cable antigiratorio además, estará compuesto por alambres de pequeño diámetro lo que le dará una mayor resistencia.

### CABLES ANTIGIRATORIOS



Nom. diameter Ø	weight peso ca. kg/m	minimum breaking load carga de rotura mínima	
		1960 N/mm <sup>2</sup> 200 kp/mm <sup>2</sup>	
mm		kN	kp
3	0,035	5,79	590
4	0,0612	10,29	1.050
5	0,0957	16,06	1.640
6	0,138	23,14	2.360
7	0,188	31,56	3.220
8	0,245	41,19	4.200
9	0,310	52,05	5.310
10	0,383	64,34	6.560
11	0,463	77,84	7.900
12	0,551	95,57	9.440
13	0,647	108,63	11.080
14	0,750	126,09	12.862
16	0,980	164,69	16.779

Tabla 7, Diámetros de cables y sus respectivas resistencias de la marca SERCABLES...

En nuestro caso se elige por restricciones del aparejo y norma, el de diámetro 14 mm, el cual tiene una carga de rotura de 126,09 KN lo que nos da un coeficiente de seguridad mayor a 10, de manera que el cable cumple con las especificaciones.

Además se trata de un cable de acero inoxidable lo que hará que sea más resistente a la corrosión al estar expuesto a la intemperie.

#### 6.2.2 Cable de traslación

Para el cable de traslación se seguirá el cálculo mediante la norma FEM, ya que se realizando un cálculo previo con la norma DIN daba un diámetro de cable muy elevado.

Según la norma FEM la formula con la que calcularemos el diámetro del cable es la siguiente:

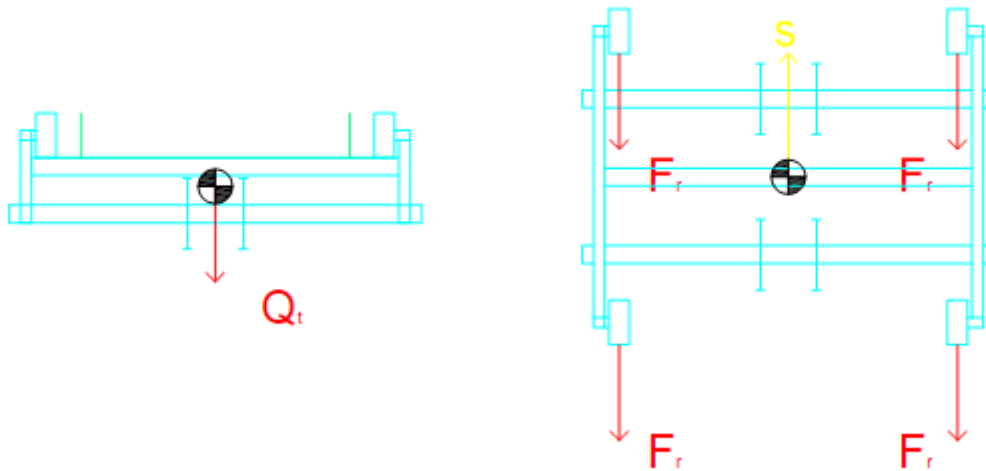
$$Z_p \leq \frac{F_0}{S}$$

Siendo  $F_0$  la resistencia a tracción del cable y  $S$  la tracción a la que estará sometido cuando se realice el movimiento del carro. Y  $Z_p$  el factor de seguridad que según la tabla 8 deberá de cumplir.

GRUPO	SEGURIDAD MINIMA $Z_p$	
	CARGAS Y CABLE ANTIGIRATORIO	PELIGROSAS
M3	4,0	
M4	4,5	
M5	5,6	
M6	7,1	
M7	9,0	
M8	11,2	

Tabla 8, Valores del coeficiente  $Z_p$  según la clasificación.

Para el cálculo de la tensión de cable se seguirá el esquema siguiente:



Esquema 3, Esquema de esfuerzos en el carro.

Donde tendremos que hay una carga total ( $Q_t$ ) que vendrá definida por el peso del carro, el aparejo, y la carga máxima a transportar, unas fuerzas de rozamiento producidas por las cuatro ruedas metálicas con los raíles ( $F_r$ ), y la tensión que realizará el cable para vencer las fuerzas resistentes ( $S$ ). El cable irá unido a una barra central del carro provista para soportar tales esfuerzos.

La carga total vendrá definida por:

$$Q_t = Q_{carro} + Q_{maxima} + Q_{aparejo}$$

$$Q_t = (1000 + 70 + 4000) * 9.8 = 49686 \text{ N} \approx 50 \text{ KN}$$

La fuerza de rozamiento total producida por las cuatro ruedas, teniendo en cuenta un coeficiente de rozamiento de  $\mu=0.3$  será de:

$$F_r = \mu * Q_t$$

$$F_r = 0.3 * 50 \text{ KN} = 15 \text{ KN}$$

La fuerza a vencer para mantener una velocidad constante será de 15 KN. Es necesario que calculemos ahora la fuerza necesaria para realizar la aceleración, para ello se emplearán las siguientes fórmulas:

$$a = \frac{v_f - v_i}{t}$$

$$F_a = m * a$$

Donde  $a$  será la aceleración que queremos alcanzar y  $F_a$  la fuerza necesaria para realizar esta aceleración. Esta fuerza deberá añadirse a la fuerza para velocidad constante. El cálculo se hará teniendo en cuenta una aceleración de 0 a 50 m/min en un tiempo de 5 segundos, para evitar movimientos en la carga.

$$a = \frac{0.83 - 0}{5} = 0.166 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_a = (1000 + 70 + 4000) * 0.166 = 841.62 \text{ N} = 0.842 \text{ KN}$$

$$F_t = 0.842 + 15 = 15.842 \text{ KN}$$


Por tanto la fuerza que deberá realizar el cable será de 15,84 KN.

Siguiendo la norma antes mencionada, tendremos que el cable deberá tener una resistencia a tracción:

$$F_0 \geq S * Z_p = 15.84 * 11.2 = 177.41 \text{ KN}$$

Se ha decidido optar por un cable de alta resistencia de la marca BRIDON, también comercializada por SERCABLES, ya que al ser de alta resistencia permitirá un diámetro menor de cable y en consecuencia una polea de menor diámetro y por tanto más fácil de manejar y encajar geométricamente. El cable será el señalado en la tabla 9, con una resistencia de 198 KN, por tanto con un coeficiente mayor al necesario según la norma FEM.





Diameter		Nominal length mass		Minimum Breaking Force						Axial stiffness @20% load	Torque generated @20% load		Metallic cross section
mm	inch	kg/m	lb/ft	EIP1960			EEIP2160				Ordinary	Lang's	
				kN	Tons (short)	Tons (metric)	kN	Tons (short)	Tons (metric)				
10.0	3/8	0.427	0.267	86.2	9.69	8.79				4.83	10.6	13.8	48.5
11.0		0.471	0.316	89.2	10.00	9.10				5.32	12.3	15.9	53.4
12.0	7/16	0.582	0.391	110	12.4	11.2				6.44	16.4	21.2	64.6
13.0		0.678	0.456	128	14.4	13.1				6.57	16.9	21.9	65.9
14.0	1/2	0.760	0.510	144	16.2	14.7				7.66	21.3	27.5	76.9
15.0		0.923	0.620	174	19.6	17.7				8.58	25.3	32.6	86.1
16.0	9/16	0.961	0.646	181	20.3	18.5				8.99	27.1	35.0	90.3
17.0		1.06	0.712	198	22.3	20.2				10.4	33.8	43.7	105
18.0	5/8	1.19	0.798	226	25.4	23.0	236	26.5	24.1	10.9	36.0	46.4	109
19.0		1.21	0.810	226	25.4	23.0	236	26.5	24.1	12.0	41.6	53.7	120
20.0		1.36	0.915	255	28.7	26.0	267	30.0	27.2	13.4	49.4	63.7	135
21.0		1.53	1.03	296	32.1	29.2	299	33.6	30.5	13.6	50.6	65.2	137
22.0		1.70	1.14	318	35.7	32.4	333	37.4	34.0	15.4	60.7	78.2	154
23.0	3/4	1.71	1.15	318	35.7	32.4	333	37.4	34.0	17.2	72.0	92.8	173
24.0		1.88	1.27	353	39.7	36.0	369	41.5	37.6	19.2	84.7	109	193
25.0		2.28	1.53	427	48.0	43.5	446	50.1	45.5	19.3	85.4	110	194
26.0	7/8	2.33	1.56	427	48.0	43.5	446	50.1	45.5	21.3	98.8	127	214
27.0										25.8	132	169	258
28.0										26.3	136	175	264

Tabla 9, Distintos diámetros de cable y sus características, de SERCABLES.

### 6.2.3 Unión cable estructura

El cable deberá ir unido a la estructura en dos ocasiones:

- El cable del sistema de elevación deberá ir unido a la punta de pluma.
- El cable de traslación ira unido a lado y lado del carro de traslación.

Estas unión serán articuladas y el cable irá unido a ellas mediante un manguito, tal y como se muestra en la figura 32.

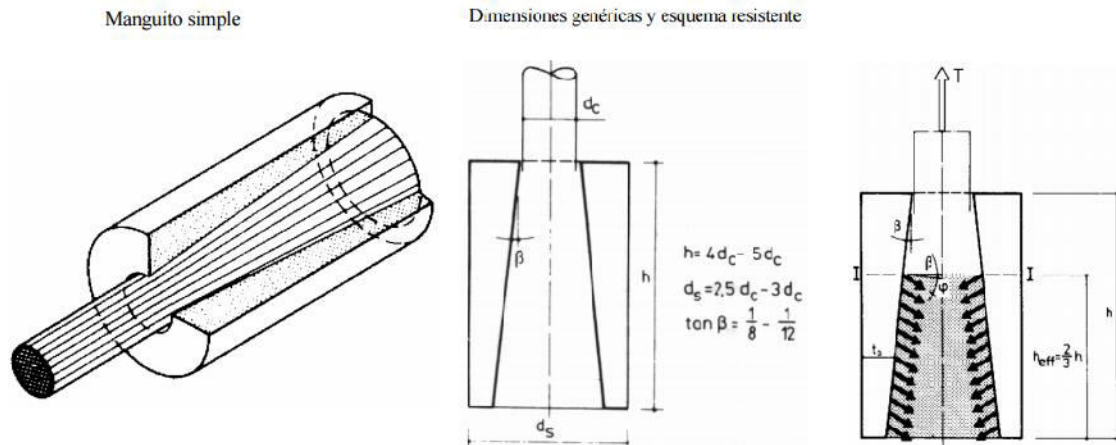




Imagen 32, Manguito de unión para cables.

Finalmente, este irá unido a la placa de anclaje como se ve en la figura 33.

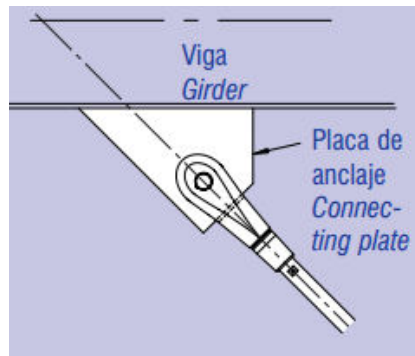


Imagen 33, placa de anclaje para cables.

También será necesario otro elemento que no asegure la tensión del cable, este elemento será el tensor e cable. El tensor de cable irá situado en los extremos del cable antes de unirse a la estructura. En la imagen 34 podemos ver distintos tensores.

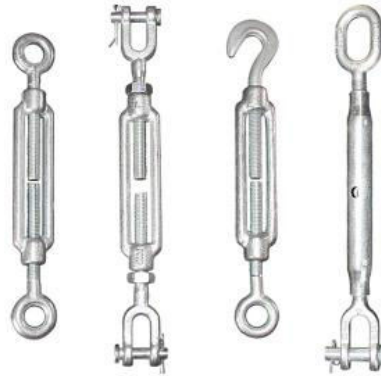


Imagen 34, Tensores para cables de distintos tipos.

#### 6.2.4 Mantenimiento cables

Los cables son una de las partes más importantes de la grúa y un fallo en estos podría provocar el desplome de la carga o la pérdida de control sobre el carro de manera que estos deben ser debidamente inspeccionados para evitar cualquier fallo.

El reglamento especifica que los intervalos máximos para la inspección de cables según la

Función de estos es de:

- Un periodo de 12 meses para cualquier tipo de cable.
- Un periodo de 3 meses para cables que elevan personas.
- Un periodo de 2 meses para el caso de los cables de la grúa torre objeto del presente trabajo.

De todas maneras el cable deberá ser inspeccionado cuidadosamente antes del montaje y después de este. Se anotará en el libro de incidencias lo que se haya podido percibir (defectos en el cable) así como la inspección que se ha realizado.

También es de relevante importancia fijarse si el fabricante del cable indica si este necesita algún tipo de lubricación y aplicarla debidamente. La lubricación es necesaria para evitar roces dentro del propio cable y por tanto darle una vida más larga.

### 6.3 Poleas

Para la elección de las poleas se han seguido las tablas disponibles en el libro Grúas de Emilio Larrode, citado en la bibliografía. Se tomarán las siguientes consideraciones respecto a la polea:

- La polea será de radios, lo que permitirá reducir la exposición al viento y también su masa.
- La polea será de acero moldeado ya que este es óptimo para servicios duros.
- El perfil de la garganta está normalizado según la norma DIN 15061, que según la tabla 10 nos muestra la diferencia admisible entre radio de garganta y de cable en función del diámetro de este.

Diámetro nominal del cable	Hasta 3	Más de 3 Hasta 6	Más de 6 Hasta 7	Más de 7
Diferencia admisible %	8	7	6	5

Tabla 10, Diferencias en gargantas según diámetro del cable.

#### 6.3.1 Poleas de elevación

##### 6.3.1.1 Polea de elevación

Para el caso de las poleas de elevación, primero deberemos calcular cual es el diámetro primitivo de polea óptimo. Esto se hará siguiendo el cálculo expuesto en el libro Grúas de Emilio Larrode, para ello se emplea la siguiente fórmula:

$$D \geq d_1 * h_1 * h_2$$

Siendo:

$d_1$ : diámetro del cable.

$h_1$ : coeficiente que depende del grupo en el que se encuentre el mecanismo.

$h_2$ : coeficiente de mayoración que depende del montaje.

$D$ : diámetro de enrollamiento sobre las poleas.

El valor de  $h_1$ , se tomara como 31.5 según la tabla 11 y teniendo en cuenta como anteriormente se ha mencionado que la grúa pertenece al grupo M8.

Grupo	DIN	Cable antigiratorio		
		Polea de cable	Polea compensadora	Tambor
M3	1 Bm	18	14	16
M4	1 Am	20	16	18
M5	2m	22,4	16	20
M6	3m	25	18	22,4
M7	4m	28	18	25

M8	5m	31,5	20	28
----	----	------	----	----

Tabla 11, Valores de  $h_1$  según el caso y grupo al que pertenezca el aparato.

El coeficiente  $h_2$  se calculara sumando los  $W$  obtenidos siguiendo los siguientes pasos:

$W=1$  para un tambor.

$W=2$  para una polea que no suponga inversión del sentido de enrollamiento del cable.

$W=4$  para una polea que produzca inversión del sentido de giro en el cable.

$W=0$  para poleas de equilibrio

El valor total de  $W$  según la distribución de poleas de la grúa es de 13 y según la tabla 12  $h_2$  será de 1.25.

$W_{tot}$	$\leq 5$	6 a 9	$> 10$
$h_2$	1	1,12	1,25

Tabla 12, Valores de  $h_2$  en función de  $W$  obtenido.

El diámetro del cable se ha mencionado anteriormente y la formula que define el diámetro óptimo será:

$$D = 15 * 31.5 * 1.25 = 590.63 \text{ mm}$$

Para elegir la polea emplearemos las tablas de poleas con rodamientos de bolas, aunque solo se han tomado las cargas verticales, cosa que haría más óptimos unos rodamientos de rodillos para absorber únicamente axiles, se opta por rodamientos de bola por los esfuerzos radiales que puedan producir fenómenos como el viento o el balanceo de la propia carga. Si nos fijamos en la tabla 13 con distintas dimensiones de poleas con rodamiento de bolas vemos que para un cable de 14 mm tocaría una polea de 315 milímetros. Con el cálculo anterior obteníamos un diámetro óptimo refiriéndonos a la vida del cable, de hecho y como anteriormente se ha mencionado no existe un diámetro mínimo en cuanto a la polea para un correcto funcionamiento del mecanismo, pero el diámetro sí que afecta a la vida del cable. Teniendo en cuenta que el cable que hemos seleccionado tiene un factor de seguridad muy elevado y que seleccionar una polea de mayor tamaño no solucionaría el problema, seleccionaremos la polea de 315 mm cuyas dimensiones vienen definidas en la tabla 13 ya mencionada.

D <sub>1</sub>	p cable	r	d <sub>2</sub>	b	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub> h <sub>g</sub>	M <sub>7</sub> d <sub>5</sub>	d <sub>6</sub>	M <sub>7</sub> d <sub>7</sub>	d <sub>8</sub>	l <sub>1</sub> -0,2	l <sub>2</sub>	l <sub>3</sub>	l <sub>4</sub> -0,2	l <sub>5</sub>	Rodamientos		Paso apr. Kg.	Referencia
																X	Y		
225	10-11	5,8	290	32	45	60	110	145	85	120	85	100	77	60	62	6212	6200	10	010.22.09
250	10-13	5,6	285	34	40	50	90	125	80	115	55	100	76	56	76	6210	6208	11	010.25.08
		6,3	290	38	50	60	110	145	90	125	55	100	77	60	82	6212	6210	12	010.25.10
		7	295	44	60	70	125	165	110	145	60	110	82	65	87	6214	6212	14	010.25.12
280	10-13	5,0	315	34	40	50	90	125	80	115	55	100	76	56	76	6210	6208	11	010.25.08
		6,3	320	38	50	60	110	145	90	125	55	100	77	60	82	6212	6210	12	010.25.10
		7	325	44	60	70	125	165	110	145	60	110	82	65	87	6214	6212	14	010.25.12
315	13-15	7	360	38	50	60	110	145	90	125	55	100	77	60	82	6212	6210	18	010.31.10
		8	350	40	60	70	125	165	110	145	60	110	82	65	87	6214	6212	20	010.31.12
		8	350	40	60	70	125	165	110	145	60	110	82	65	87	6214	6212	22	010.31.14
355	15-17	8	389	40	60	70	125	165	110	145	60	110	82	65	87	6214	6212	22	010.35.12
		9	411	48	80	90	140	180	125	165	65	110	87	70	92	6216	6214	24	010.35.14
		9	411	48	80	90	140	180	125	165	65	110	87	70	92	6216	6218	30	010.35.18
400	17-19	9	456	48	80	70	125	165	110	145	60	110	82	65	87	6214	6212	28	010.40.12
		10	456	50	70	80	140	180	125	165	65	110	87	70	92	6216	6214	30	010.40.14
		10	456	50	70	80	140	180	125	165	65	110	87	70	92	6216	6218	34	010.40.16
450	19-21	10	508	50	70	80	140	180	125	165	65	110	87	70	92	6216	6214	35	010.45.14
		11	528	60	80	90	160	200	140	180	70	120	95	85	113	6220	6218	40	010.45.18
		11	528	60	80	90	160	200	140	180	70	120	95	85	113	6222	6218	44	010.45.18
500	20-24	11	578	60	80	100	180	230	140	180	70	130	95	85	113	6220	6218	41	010.50.18
		12,5	570	60	80	110	200	260	150	210	80	140	108	95	123	6222	6218	44	010.50.18
		12,5	570	60	80	110	200	260	150	210	80	140	108	95	123	6224	6220	48	010.50.20
560	20-26	11	638	60	80	110	200	260	160	210	80	140	108	95	123	6222	6218	55	010.56.18
		12,5	630	60	80	110	200	260	160	210	80	140	108	95	123	6224	6220	58	010.56.20
		14	630	60	80	110	200	260	160	210	80	140	108	95	123	6226	6224	65	010.56.24
630	24-31	12,5	700	60	80	120	215	265	180	230	85	150	113	100	128	6224	6220	70	010.63.20
		14	700	60	110	130	230	290	200	250	95	160	123	100	132	6228	6224	74	010.63.24
		16	710	70	120	140	250	305	215	265	100	180	134	100	132	6228	6224	77	010.63.24
710	25-34	14	780	60	110	130	230	290	200	250	95	160	123	100	132	6228	6224	86	010.71.22
		16	790	70	120	140	250	305	215	265	100	180	134	100	132	6228	6224	96	010.71.24
		18	810	80	140	160	240	290	210	265	85	140	119	95	127	6032	6028	100	010.71.28
800	29-36	16	880	70	120	140	250	305	215	265	100	180	134	100	132	6228	6224	125	010.80.24
		18	900	80	130	150	270	330	230	280	100	180	134	110	142	6230	6226	130	010.80.26
		20	900	83	140	160	240	290	210	265	85	140	119	95	127	6032	6028	135	010.80.30
900	33-38	18	1000	80	140	160	240	290	210	265	110	170	144	100	132	6228	6224	152	010.90.28
		20	1000	83	150	170	260	320	225	275	90	150	124	100	132	6034	6030	157	010.90.32
		20	1000	83	150	170	260	320	225	275	90	150	124	100	132	6034	6030	167	010.90.36
1000	37-43	20	1100	83	150	170	260	320	225	275	90	150	124	100	132	6034	6030	175	010.90.40
		22,5	1124	100	160	180	280	340	240	300	110	170	144	110	142	6230	6226	182	010.90.44
		22,5	1124	100	160	180	280	340	240	300	110	170	144	110	142	6048	6044	182	010.90.44
1120	41-46	22,5	1244	100	200	220	340	400	310	370	120	180	154	130	162	6044	6040	210	010.100.40
		25	1258	110	220	240	360	420	340	400	130	180	164	130	162	6048	6044	220	010.100.44
		25	1258	115	230	250	380	440	360	420	130	180	164	130	162	6052	6048	235	010.100.48
1250	46-51	25	1385	110	240	260	400	480	360	420	130	210	174	150	194	6052	6048	330	010.125.40
		28	1385	115	250	280	420	500	400	460	150	210	194	150	194	6058	6052	350	010.125.52
		28	1385	115	250	280	420	500	400	460	150	210	194	150	194	6058	6052	350	010.125.52

Tabla 13, Distintos valores geométricos de las poleas dados por el libro Grúas de Emlío Larrode.

6.3.1.2 Eje de las poleas de elevación

A continuación comprobaremos que el eje de la polea resiste los esfuerzos para los que ha sido diseñado.

Primero debemos saber las solicitaciones a las que estará sometido:

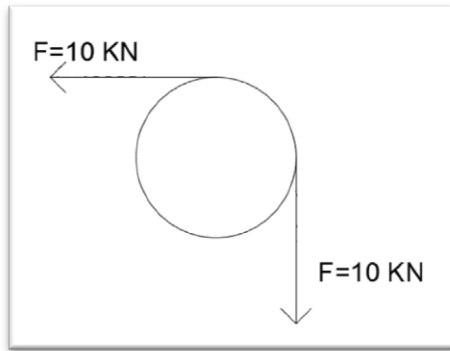
Al aparejo le daremos un peso de 70 kg (mayor al que se especifica en la hoja de datos del aparejo), y la carga como ya se ha mencionado será de 4 toneladas.

$$Q = 70 * 9.8 + 4000 * 9.8 = 39886 N$$

Teniendo en cuenta que habrá dos ramales, esta carga se dividirá entre el número de cables que lo aguantan, 4:

$$T_{cable} = \frac{39886}{4} = 9971.5 \approx 10 KN$$

Por lo que el eje estará solicitado según vemos en el esquema 4.



Esquema 4, Esquema de esfuerzos en la polea.

Obviaremos la tensión mínima en el posterior cálculo ya que esta bajaría las sollicitaciones respecto a los ciclos de carga y descarga y de esta manera mayoramos las cargas teniendo por tanto un mayor coeficiente de seguridad.

A continuación, mostramos el cálculo de las reacciones y los diagramas de esfuerzos del eje:

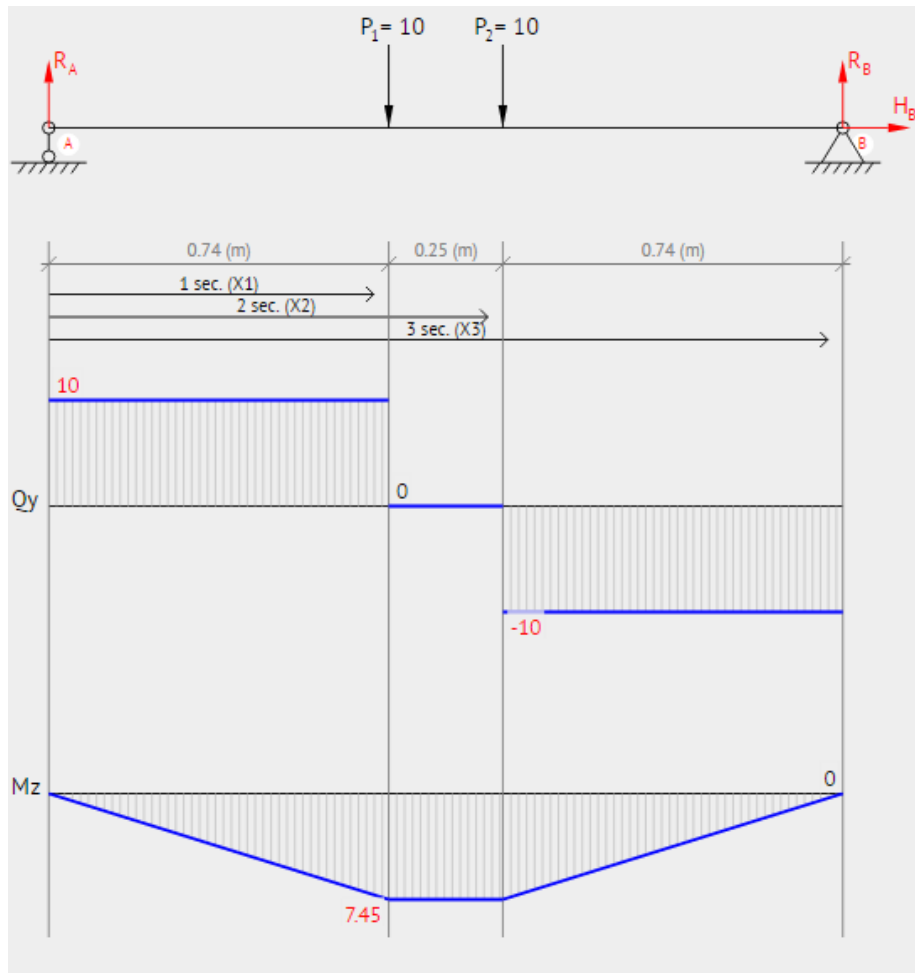


Imagen 35, Diagramas de esfuerzo en los ejes de la polea de elevación.

En los gráficos (solo mostramos uno dado que el otro presenta los mismos valores) vemos que las reacciones y momentos máximos, son los siguientes:

$$R_{ax} = 10 \text{ KN}$$

$$R_{ay} = 10 \text{ KN}$$

$$R_{bx} = 10 \text{ KN}$$

$$R_{by} = 10 \text{ KN}$$

$$M_{max,z} = 7.45 \text{ KN} * m$$

$$M_{max,y} = 7.45 \text{ KN} * m$$

Continuando con el cálculo de las solicitaciones del eje, elegiremos las secciones más solicitadas, en este caso queda claro que será donde se sitúan las poleas siendo las dos secciones igual de críticas, calcularemos el momento flector compuesto:

$$M_f = \sqrt{M_y^2 + M_z^2} = \sqrt{7.45^2 + 7.45^2} = 10.53 \text{ KN} * m$$

Con un diámetro de 70 mm (en la tabla de selección de la polea podemos ver los diámetros de eje admisibles para la polea de 315 mm) tendremos una tensión máxima a flexión de:

$$\sigma_{max,flex} = \frac{M_f * y}{I_o}$$

Con:

$M_f$ : momento flector de la seccion analizada.

$y$ : distancia al punto mas alejado desde el centro de masas.

$I_o$ : inercia de la seccion analizada.

De manera que la tensión máxima a flexión quedara definida de la siguiente forma:

$$\sigma_{max,flex} = \frac{10530 * \frac{0.07}{2}}{\frac{\pi}{64} * 0.07^4} = 312.7 \text{ MPa}$$

Analizando el ciclo de carga y descarga tenemos:

Y la tensión media y alternante son las siguientes:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = \frac{312.7 + 0}{2} = 156.35 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{312.7 - 0}{2} = 156.35 \text{ MPa}$$

Teniendo ya las solicitaciones debemos obtener la resistencia del eje en la sección analizada. El material del eje será acero AISI 4340 con las siguientes características mecánicas:

-La tensión a rotura es de  $\sigma_R = 1560 \text{ MPa}$

-La tensión a fluencia es de  $\sigma_F = 1100 \text{ MPa}$

Primero obtendremos la resistencia para el cálculo:

$$\sigma'_f = 1560 * 0.5 = 780 \text{ MPa}$$

Ahora deberemos introducir varios factores de minoración para hacer de la resistencia un valor más real:

- $K_a$ : factor de acabado superficial, en nuestro caso 0.83 .

- $K_b$ : factor de tamaño, en nuestro caso con un eje de diametro 70 mm es de 0.75 .

- $K_c$ : factor de esfuerzo, al no estar sometido ni a torsión ni axil se toma como 1.

- $K_d$ : factor de temperatura, dado que no trabajara a atemperaturas mayores de 200 Cº se toma como 1.

- $K_e$ : factor de confiabilidad, dado que se trata de una grua perteneciente al grupo M8 buscaremos una alta confiabilidad, en nuestro caso del 99% dando un factor de 0.814 .

- $K_f$ : Factor de entalla, dado que el eje irá con ajuste por apriete tanto en el acoblamiento del rodamiento como en los apoyos de los extremos, se tomará como 1.

Obtendremos la resistencia minorada de la siguiente manera (se tiene que tener en cuenta que estos cálculos se hacen a vida infinita o lo que sería lo mismo a  $10^6$  ciclos de vida):

$$\sigma_f = \left[ K_a * K_b * K_c * K_d * K_e * \frac{1}{K_f} \right]_{10^6} * \sigma'_f$$

$$\sigma_f = [0.83 * 0.75 * 1 * 1 * 0.814 * 1]_{10^6} * 780 = 395.24 \text{ MPa}$$

Ahora siguiendo con el cálculo debemos entrar en el diagrama de Sodeberg, y sacar el valor que se usará para comparar la resistencia y la sollicitación y por tanto saber el factor de seguridad al que está sujeto el eje.

$$\sigma_m^s = \frac{\sigma_f}{\frac{\sigma_a}{\sigma_m} + \frac{\sigma_f}{\sigma_F}} = \frac{395.24}{1 + \frac{395.24}{1100}} = 290.77 \text{ Mpa}$$

Finalmente el factor de seguridad es:

$$FS = \frac{\sigma_m^s}{\sigma_m} = \frac{290.77}{156.35} = 1.86$$

Por lo que el eje resistirá a vida con un factor de seguridad de 1,86.

No se considera el cálculo de los demás ejes ya que en el cálculo se ha tomado el caso más desfavorable y en ningún otro caso este deberá soportar mayores esfuerzos.

### 6.3.2 Poleas de traslación

#### 6.3.2.1 Polea de traslación

Para el cálculo del diámetro óptimo de la polea de traslación se hará de la misma forma que en el caso de las de elevación. Tenemos la misma fórmula que en el anterior caso:

$$D \geq d_1 * h_1 * h_2$$

El valor de  $h_1$ , se tomará como 31.5 según la tabla 11 y teniendo en cuenta como en el caso anterior el grupo al que pertenece la grúa, al M8.

El coeficiente  $h_2$  se calculará sumando los  $W$  obtenidos, dando un valor mayor de 10, y por tanto según la tabla 12 tomaremos un valor para  $h_2$  de 1,25.

El diámetro del cable se ha mencionado anteriormente y la fórmula que define el diámetro óptimo será:

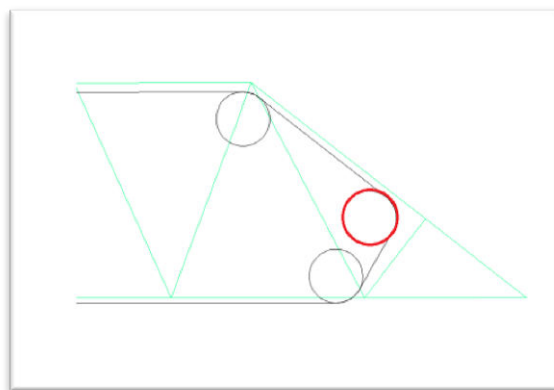
$$D = 15 * 31.5 * 1.25 = 590.625 \text{ mm}$$

Nos ocurre como en el caso anterior, una polea de estas dimensiones implicaría un diámetro mayor según la tabla 13, y una polea por encima de los 400 mm de diámetro es demasiado para la configuración geométrica de la grúa. Se ha decidido poner la polea de 400 mm ya que según el cable y la tabla 13, esta sería la correcta, como en el caso de las poleas de elevación se opta por escoger un diámetro inferior al óptimo, lo que reducirá la vida del cable que de todas maneras cumplirá con las solicitaciones. En la tabla 13 se pueden consultar las características de la polea empleada.

#### 6.3.2.2 Eje de las poleas de traslación

Como en el caso anterior, comprobaremos que el diámetro del eje de la polea es suficiente para resistir los esfuerzos para los que ha sido diseñado.

Sabiendo del cálculo del cable que la tensión será de aproximadamente 16 kN, y que la peor configuración para el cable es la mostrada en el esquema 5, realizaremos el cálculo del factor de seguridad del eje.



Esquema 5, Polea más solicitada del sistema de traslación.

Las fuerzas estarán distribuidas según esquema 5. Los esfuerzos obtenidos en función de los ángulos han sido los siguientes:



$$F_x = -20.61 \text{ KN}$$

$$F_y = -4.01 \text{ KN}$$

Y a continuación mostramos los diagramas de tensiones y las reacciones en el eje para cada esfuerzo:

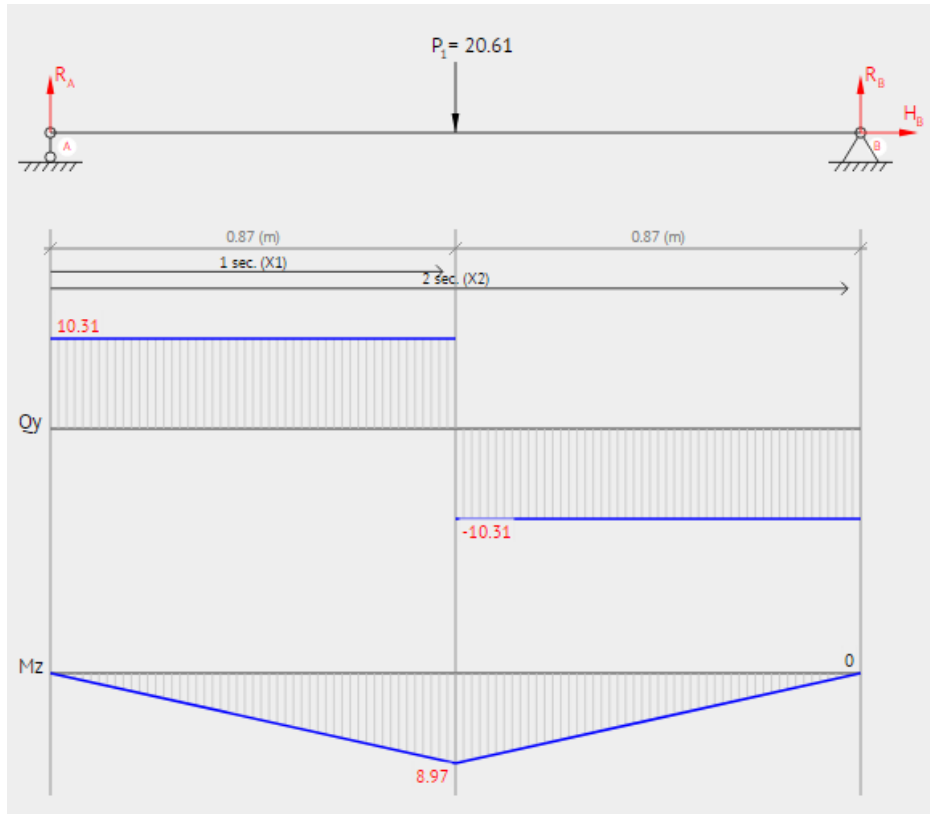


Imagen 36, Diagramas de esfuerzo en los ejes de la polea de traslación eje X.

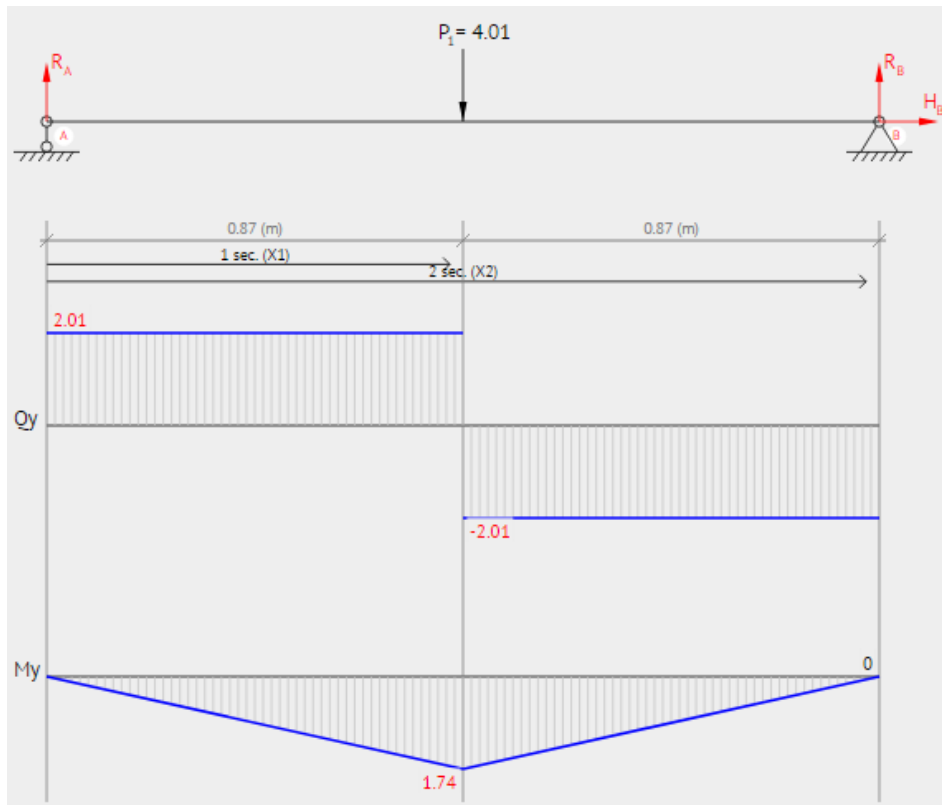


Imagen 37, Diagramas de esfuerzo en los ejes de la polea de traslación eje Y.

En el cálculo se ha obviado la tensión mínima de los cables del mismo modo que en los anteriores cálculos. Los cálculos nos dan los siguientes resultados:

$$R_{ax} = 10.31 \text{ KN}$$

$$R_{ay} = 2.01 \text{ KN}$$

$$R_{bx} = 10.31 \text{ KN}$$

$$R_{by} = 2.01 \text{ KN}$$

$$M_{max,z} = 8.97 \text{ KN} * m$$

$$M_{max,y} = 1.74 \text{ KN} * m$$

Para el cálculo de las sollicitaciones nos fijaremos en el punto donde se acopla la polea dado que es el más solicitado, el momento flector vendrá dado por:

$$M_f = \sqrt{M_y^2 + M_z^2} = \sqrt{8.97^2 + 1.74^2} = 9.14 \text{ KN} * m$$

Escogeremos del mismo modo que para el anterior caso un diámetro de eje de 70 milímetros, de manera que el esfuerzo máximo a flexión quedara como sigue:

$$\sigma_{max,flex} = \frac{9140 * \frac{0.07}{2}}{\frac{\pi}{64} * 0.07^4} = 271.43 \text{ MPa}$$

El ciclo de carga seguirá el mismo esquema que en el caso de la polea de elevación por lo que

las tensiones medias y alternantes quedan definidas según:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = \frac{312271.43 + 0}{2} = 135.72 Pa$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{271.43 - 0}{2} = 135.72 MPa$$

Usando el acero anteriormente mencionado tenemos unos valores de resistencia y fluencia de:

-La tensión a rotura es de  $\sigma_R = 1560 MPa$

-La tensión a fluencia es de  $\sigma_F = 1100 MPa$

La resistencia de cálculo es:

$$\sigma'_f = 1560 * 0.5 = 780 MPa$$

Se emplearan los mismos factores de minoración que para el caso del eje de elevación de manera que nuestra resistencia minorada para una vida infinita de eje es de:

$$\sigma_f = [0.83 * 0.75 * 1 * 1 * 0.814 * 1]_{10^6} * 780 = 395.24 MPa$$

Mediante el diagrama de Soderberg sacamos la tensión media y realizamos una comprobación del factor de seguridad obtenido:

$$\sigma_m^s = \frac{\sigma_f}{\frac{\sigma_a}{\sigma_m} + \frac{\sigma_f}{\sigma_F}} = \frac{395.24}{1 + \frac{395.24}{1100}} = 290.77 MPa$$

$$FS = \frac{\sigma_m^s}{\sigma_m} = \frac{290.77}{135.72} = 2.14$$

Por lo que el eje resistirá a vida infinita con un factor de seguridad de 2,14.

El resto de ejes dependientes del sistema de traslación tendrán solicitaciones inferiores a las calculadas en este apartado de manera que se entiende que los demás ejes resistirán las cargas a las que estén sometidos.

#### 6.3.2.4 Flecha en el cable de traslación.

Un aspecto a tener en cuenta en el caso del cable es la flecha que se producirá cuando este no esté en estado de tensión para desplazar el carro.

Para evitar que el cable, por su propio peso se combe, y produzca un arco, deberemos darle una tensión en el montaje para evitar o disminuir esta flecha máxima.

En el caso de la grúa objeto de diseño nos fijaremos en la mayor longitud que recorra el cable sin apoyos, esto es según se muestra en la figura 38, una longitud de alrededor de 51 metros (usaremos esta simplificación dado que en cualquier caso se aumentará la tensión y por tanto cumpliremos con el objetivo de este apartado).

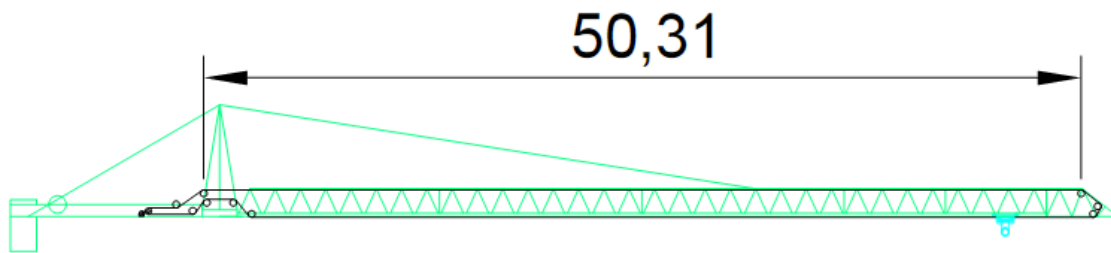


Imagen 38, Longitud del cable en la distancia más larga entre apoyos.

Para determinar la tensión necesaria para tener una flecha adecuada, se empleará el cálculo simplificado proporcionado por TECUN, este cálculo es a priori para el caso de los cables suspendidos en líneas eléctricas, aunque este no sea nuestro caso, la aproximación es suficiente para dar un valor a la tensión necesaria para evitar una flecha excesiva.

Para vanos de hasta 500 metros de longitud, la forma de un cable apoyado en dos puntos se puede comparar con la de una parábola, de esta manera se puede simplificar el cálculo de la flecha.

La relación que existe entre flecha y tensión se demuestra a continuación. En la imagen 39 podemos observar lo que sería un cable apoyado en sus extremos, formando una parábola.

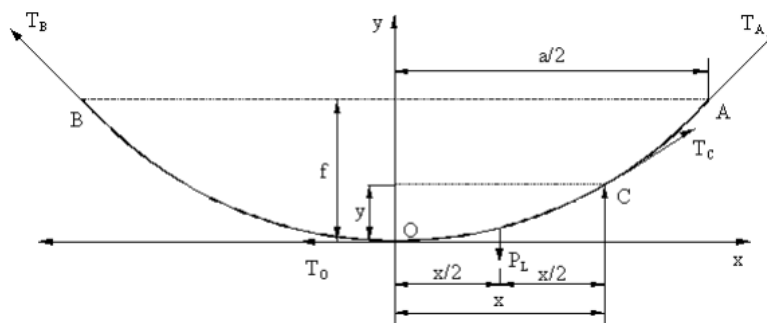


Imagen 39, Cable biapoyado con deformaciones debidas al propio peso.

Primero tomamos el momento en el punto C, considerando el trozo de cable OC, este tendrá un peso propio que denominamos  $P_L$  aplicado en el punto medio y estará también sometido a las tensiones que producirán los extremos:

$$\frac{P_L x}{2} = T_0 y$$

Aislamos  $y$ , y tendremos:

$$y = \frac{x P_L}{2 T_0}$$

Ahora cambiamos lo que es el peso concentrado en el punto medio P, a un peso de consideración lineal:

$$P_L = P * x$$

Finalmente consideramos el punto A sustituyendo los valores en las anteriores ecuaciones:

$$y = f$$

$$x = \frac{a}{2}$$

Finalmente nos queda la siguiente ecuación, donde se relaciona la tensión del cable con el peso unitario y la longitud del “vano”.

$$f = \frac{Pa^2}{8T_0}$$

Nuestros valores para la anterior ecuación serán:

*a*: nuestro vano es de 51 m

*f*: la flecha se tomará como la longitud del vano dividido de 400  $f = 0.1275$  m

*P*: sacado de la tabla de características del cable es de  $1.06 \frac{\text{Kg}}{\text{m}}$

Si lo sustituimos con nuestros valores, la tensión a la que deberá ser montado el cable será:

$$T_0 = \frac{1.06 * 51^2}{8 * 0.1275} = 2524.57 \text{ KN} = 2.53 \text{ KN}$$

Como esta tensión es muy inferior a la necesaria para desplazar el carro, tendremos que esto no supone ningún inconveniente para el correcto funcionamiento.

#### 6.4 Tambor

El tambor se ha definido anteriormente como el elemento que enrollará el cable y permitirá a la carga desplazarse verticalmente.

Para el cálculo del tambor se seguirán los pasos que a continuación se detallaran. Para tomar los valores de espesor en paredes se tomaran unas tablas que se han confeccionado mediante el cálculo por elementos finitos, estas tablas junto con el diámetro del tambor y la fuerza que se soporta por ramal nos dan un espesor resistente, relacionado obviamente con la tensión de trabajo de distintos materiales. Se deberá tener en cuenta que el cable no debe sobrepasar un ángulo de  $1^\circ 30'$  respecto a la perpendicular del tambor, y en el caso de los tambores acanalados el ángulo del cable respecto al tambor no deberá superar los  $6^\circ$ , tal y como se muestra en la figura 40, esto definirá la distancia entre la última polea y el tambor.

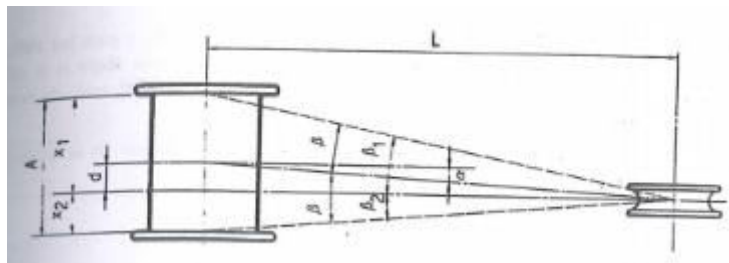


Imagen 40, Definición de las variables de las que depende la geometría del tambor y la última polea.

Con estas premisas se diseñara la geometría del sistema.

### 6.4.1 Tambor de elevación

El primer cálculo que se debe hacer es el del diámetro mínimo del tambor. Al igual que en el caso de las poleas no existe un diámetro mínimo que condicione el buen funcionamiento del mecanismo, de todas maneras la curvatura sí que influirá en la duración de vida del cable. El cálculo es el siguiente:

$$d_{tambor} = d_{cable} * h_1 * h_2$$

Para el valor de  $h_1$  tenemos en cuenta que la grúa se clasifica en el grupo M8, por tanto según la tabla 11 el valor de  $h_1$  es 28.

La fórmula quedara definida de la siguiente manera:

$$d_{tambor} = 14 * 28 * 1 = 392 \text{ que redondearemos a } 400 \text{ mm}$$

Por lo que el diámetro mínimo del tambor será de 400.

En el siguiente paso ya tendremos definido el diámetro del tambor, según la fórmula anteriormente mencionada por lógica se escogería 400, pero por motivo de diseño (un tambor de tan solo 400 mm de diámetro sería demasiado alargado para la estructura de una grúa torre) se elegirá un tambor de diámetro 800 milímetros.

El siguiente paso es definir la longitud que tendrá una espira de cuerda en el tambor.

$$L_{espira} = \pi * d_{tambor} = \pi * 800 = 2512 \text{ mm}$$

También necesitaremos saber la cantidad de metros de cable que deberemos enrollar:

$$L = H * ramales = 50000 * 4 = 200000 \text{ mm}$$

Con la longitud de una espira y los metros de cable a recoger tendremos la cantidad de espiras que deberá tener el tambor, cabe añadir que se deben dejar dos espiras muertas por cada parte donde se enrolle el cable por motivos de seguridad.

$$N^{\circ} \text{ espiras} = \frac{L}{L_{espira}} + N^{\circ} \text{ espiras muertas} = \frac{200000}{2512} + 4 = 84 \text{ espiras}$$

Con la tabla 14 podemos obtener los siguientes datos de las dimensiones de la ranura del tambor:

Diámetro del cable	10	13	16	19	22	27	33	40	44
s	12	15	18	22	25	31	37	45	49
r	5,5	7	9	10,5	12	15	18	22	24
a	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6

Tabla 14, Distintos Valores geométricos de la garganta según el diámetro del cable.

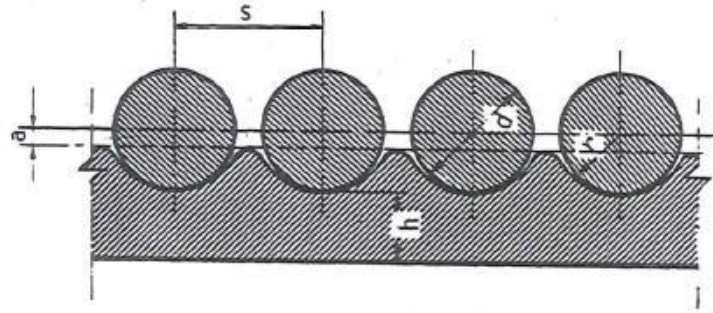


Imagen 41, Variables geométricas de la garganta del tambor.

Mediante interpolación obtenemos que para el cable de 14 mm de diámetro los valores son los siguientes:

S: 16

R: 7,7

A: 1,7

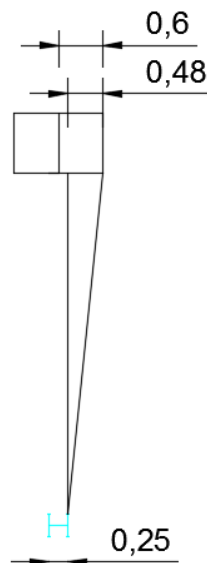
De manera que la longitud del tambor será de:

$$L_{tambor} = s * N^{\circ} \text{ espiras} = 16 * 84 = 1176 \text{ mm}$$

Por lo que la parte donde se enrollara el cable en el tambor será de 1,18 metros.

Como bien se ha mencionado al principio es condición que el cable no supere un ángulo de 6 grados (en el caso de tambores acanalados) respecto al tambor en el enrollamiento. A continuación mostraremos el cálculo realizado para saber la distancia mínima a la que se deberá situar la última polea del tambor para no superar dichos grados.

En el esquema 6 se muestra un esquema de la configuración de la última polea y el tambor:



Esquema 6, Esquema geométrico del paso del cable de la polea al tambor.

Las ecuaciones empleadas se basan en la trigonometría:

$$c * \tan(6) = 0.48$$

Siendo  $c$  la distancia mínima para no sobrepasar los  $6^\circ$ . Resolviendo la ecuación nos da una distancia mínima de 4,57 m entre la última polea y el tambor.

También se debe considerar dejar una zona lisa entre las dos zonas de enrollamiento, esta distancia deberá situarse entre los valores que definen las ecuaciones:

$$l_{max} = B + 2h_{min} \tan(6^\circ)$$

$$l_{min} = B - 2h_{min} \tan(6^\circ)$$

Con  $B$  la distancia entre las dos poleas.

La distancia que más interesa es la mínima, dado que por geometría no interesa que el tambor sea aún mayor. La distancia mínima deberá ser:

$$l_{min} = 0.25 - 2 * 4.52 * \tan(6^\circ) = -0.7$$

Por tanto elegiremos no dejar espacio liso entre las dos canales de los cables.

Para saber el espesor de pared usaremos las tablas 15 donde podemos observar que relacionan la tensión de trabajo de cada ramal ( $S$ ), la tensión de trabajo de un determinado material, y el diámetro del tambor.



S (daN)	DIAMETROS (mm)							
	250	300	400	500	600	700	800	1000
500	4	4						
1000	5	5						
1500		6	6					
2000		8	7					
2500			8	8				
3000			9	9				
4000				11				
5000				12	12			
6000						13	13	
7000						14	14	
8000							15	
9000							16	16
10000							17	17

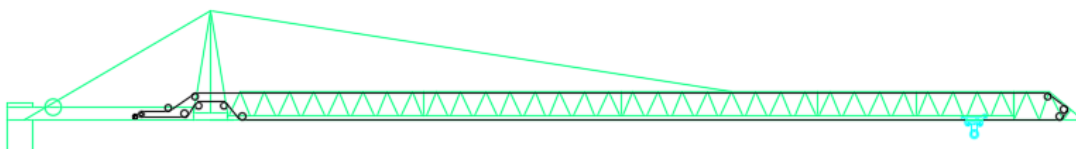
S (daN)	DIAMETROS (mm)							
	250	300	400	500	600	700	800	1000
500	3	3						
1000	4	4						
1500		5	5					
2000		6	6					
2500			7	6				
3000			7	7				
4000				8				
5000				9	9			
6000					10	10		
7000					11	11		
8000						12		
9000							12	12
10000							13	13

Tabla 15, Espesores de pared del tambor según la resistencia del material y el esfuerzo del cable.

Para un tambor de 800 mm de diámetro, con un material de tensión de trabajo de 80 MPa, una pared de 13 mm sería suficiente.

### 6.4.2 Tambor de traslación

Para los tambores de traslación se seguirá el mismo método que en el anterior caso, con la diferencia que calcularemos dos tambores, uno para el movimiento positivo en X y el otro para el movimiento en dirección contraria. El sistema de traslación funcionará según se ve en el esquema 5.



Esquema 7, Esquema del sistema de traslación.

Cuando el tambor 1 enrolle, el carro se desplazara en dirección a la torre, mientras el tambor 2 desenrollara cable para permitir al carro desplazarse. Cuando sea el tambor 2 el que enrolle el carro se desplazara hacia la punta de la pluma, mientras el tambor 1 desenrollara cable permitiendo el desplazamiento.

Ambos tambores tendrán las mismas características dado que deberán enrollar una misma cantidad de cables y con unos mismos esfuerzos.

De la misma manera que en el caso anterior, calcularemos primero el diámetro mínimo del tambor con tal de no disminuir la vida del cable. Esto viene definido por la fórmula:

$$d_{tambor} = d_{cable} * h_1 * h_2$$

Que en este caso quedara:

$$d_{tambor} = 15 * 28 * 1 = 420 \text{ mm}$$

Escogemos un diámetro normalizado en este caso de 500 milímetros.

A continuación calculamos la longitud de una espira:

$$L_{espira} = \pi * d_{tambor} = 1570 \text{ mm}$$

La cantidad de cable a recoger por los tambores será de aproximadamente 50 m, con este dato y sabiendo que se deben dejar 2 espiras muertas por seguridad, calculamos el número de espiras que deberá tener:

$$N^{\circ} \text{ espiras} = \frac{L}{L_{espira}} + N^{\circ} \text{ espiras muertas} = \frac{50000}{1570} + 2 = 34 \text{ espiras}$$

Fijándonos en la tabla 14 mostrada en el apartado anterior e interpolando para un cable de 15 mm de diámetro obtendremos los siguientes valores:

S: 17

R: 8,33

A: 1,83

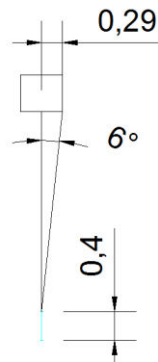
Finalmente la longitud de uno de los tambores de traslación será de:

$$L_{tambor} = s * N^{\circ} \text{ espiras} = 17 * 34 = 578 \text{ mm}$$

El otro tambor, tendrá las mismas características.

También para este caso deberemos cumplir con el ángulo máximo de enrollamiento para tambores acanalados, 6°. Para esto se seguirá el mismo método empleado en la configuración del de elevación.

Nos fijamos en el esquema 8, para dar paso al cálculo que viene a continuación:



Esquema 8, Esquema geométrico del paso del cable de la polea al tambor en elevación.

Usando la misma ecuación que en el caso anterior teniendo en cuenta que en este caso la longitud de enrollamiento tomada será la mitad de la longitud total del tambor, dado que la longitud de enrollamiento estará centrada respecto a la polea.

$$c * \tan(6) = 0.289 \text{ m}$$

Nos queda una distancia mínima de 2.75 m entre la última polea y el tambor para cumplir con la condición de los 6°.

Para el espesor de pared, recurriremos a las tablas ya mostradas, la 15, donde podemos ver que con un material de resistencia de 80 MPa con una pared de 8 mm basta.

### 6.4.3 Fijaciones del cable al tambor

Las fijaciones en el tambor deben ser seguras, y accesibles para los casos de revisión.

Según la imagen 42 podemos ver distintas configuraciones de sujeciones.

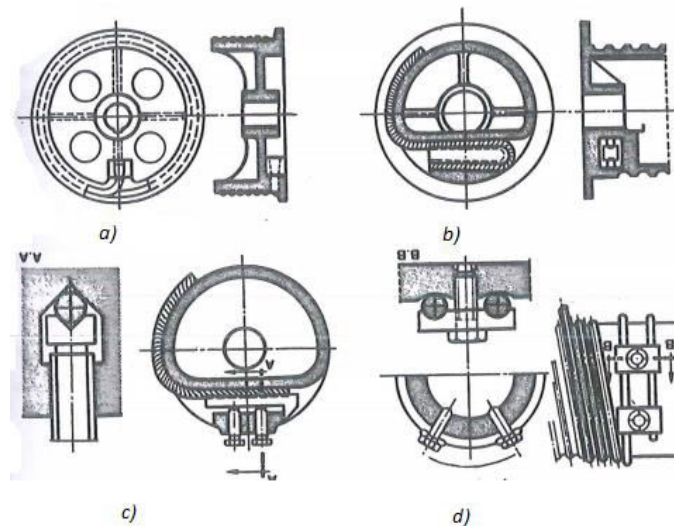


Imagen 42, Distintas formas de unión entre cable-tambor, a) y b) por placas, c) aprietes cónicos, d) por manguito.

a) y b) sujeción por placas de apriete.

c) Sujeción por aprietes cónicos.

d) sujeción por manguito relleno.

El caso más empleado es el de por placas de apriete donde unas placas aprietan el cable mediante uno o dos tornillos que permiten modificar la presión que ejercerán.

A continuación se realizara el cálculo de los tornillos necesarios y de la fuerza de apriete necesaria tanto para el caso de elevación como para el de traslación.

La tensión de sujeción a la que deberá estar sujeto el cable será:

$$S_{suj} = \frac{S_{max}}{e^{f\alpha}}$$

Con:

$S_{suj}$ : Tension de sujecion del cable.

$S_{max}$ : Tension maxima a la que es sometido el cable.

$f$ : minimo valor de rozamiento entre el cable y el tambor, en nuestro caso 0,1

$\alpha$ : en radianes, el angulo que abrazan el tambor las espiras muertas.

Sabiendo que la tensión máxima es de 10 KN en el de traslación, de 15 KN en el de elevación (en condiciones estáticas, sin tener en cuenta la aceleración) y teniendo 2 espiras muertas, tenemos un ángulo de  $4\pi$  rad, nos queda:

$$S_{suj,elevacion} = \frac{10,6}{e^{0.1*4\pi}} = 2.85 \text{ KN}$$

$$S_{suj,traslacion} = \frac{15}{e^{0.1*4\pi}} = 4.27 \text{ KN}$$

El número de tornillos necesarios para realizar ese esfuerzo será:

$$Z = \frac{N}{F_{t,Rd}}$$

Siendo:

$N$ : esfuerzo necesario de apriete de todos los tornillos.

$F_{t,Rd}$ : Esfuerzo admisible de un tornillo.

El valor del esfuerzo necesario de los tornillos vendrá dado por:

$$N = \frac{bkS_{suj}}{c}$$

Dónde:

$b$ : coeficiente que tiene en cuenta la descarga debida al rozamiento de las espiras muertas con el tambor, 0.65.

$k$ : coeficiente de seguridad, 1,25.

$c$ : coeficiente de resistencia al movimiento del cable, entre 0.35 y 0.4.

El valor de  $N$  entonces, será:

$$N_{elevation} = \frac{0.65 * 1.25 * 2.85}{0.35} = 6.62 \text{ KN}$$

$$N_{elevation} = \frac{0.65 * 1.25 * 4.27}{0.35} = 9.91 \text{ KN}$$

El esfuerzo a tracción admisible de un tornillo vendrá definido por:

$$F_{t,Rd} = \frac{K_2 * f_{ub} * A_s}{\gamma}$$

Dónde:

$K_2$ : 0.9 para tornillos sin cabeza avellanada.

$f_{ub}$ : resistencia a tracción del tornillo.

$A_s$ : área resistente del vastago del tornillo.

$\gamma$ : coeficiente de seguridad, para nuestro caso 4.

En nuestro caso se ha elegido un tornillo de calidad 8.8, con un diámetro de 12 en ambos casos (no mayor al diámetro del cable ya que entonces una parte de la área de este no actuaría). Por lo que tendremos unos valores de  $800 \frac{N}{mm^2}$  y una  $A_s$  de  $84,27 \text{ mm}^2$  dando los siguientes resultados:

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 * 800 * 84.27}{4} = 15168.6 \text{ N} = 15.17 \text{ KN}$$

Por tanto el número necesario de tornillos será de:

$$Z = \frac{6.62}{15.17} = 0.44 = 1 \text{ tornillo}$$

$$Z = \frac{9.91}{15.17} = 0.65 = 1 \text{ tornillo}$$

En ambos casos con un solo tornillo de fijación será necesario.

## 6.5 Carro

El carro como ya se ha descrito anteriormente es el elemento que recorrerá la pluma y se encargará de repartir las cargas en su longitud de trabajo. El carro tiene que reunir dos cualidades fundamentales:

-Debe estar diseñado para resistir los esfuerzos para los que será usado.

-Debe tener el mínimo peso posible ya que el peso que produzca el carro será desfavorable para la grúa y se añadirá a la propia carga de servicio. Cuanto menos pese el carro más carga podrá soportar la grúa.

El carro también deberá disponer de la estructura necesaria para poder acoplar las poleas de elevación de la carga como también deberá disponer de enganches para los cables dedicados a los desplazamientos del mismo. Se ha modelizado un carro de forma simple mediante SolidWorks. En las imágenes 43,44 y 45 se pueden observar las que serían las principales medidas y formas geométricas del carro.

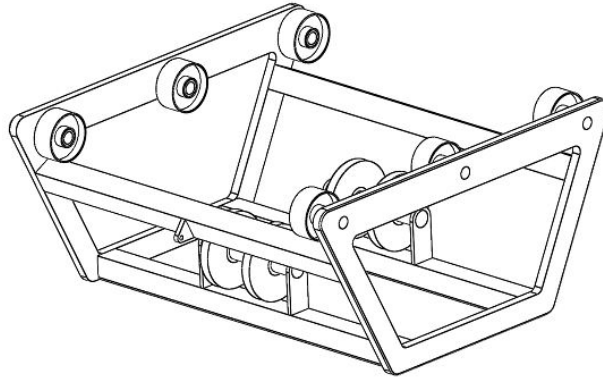


Imagen 43, Imagen del carro realizado con SolidWorks.

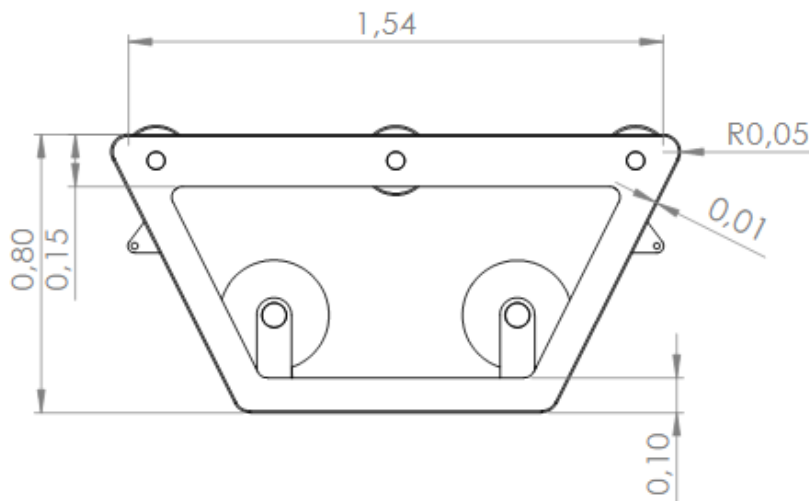


Imagen 44, Principales medidas del frontal del carro.

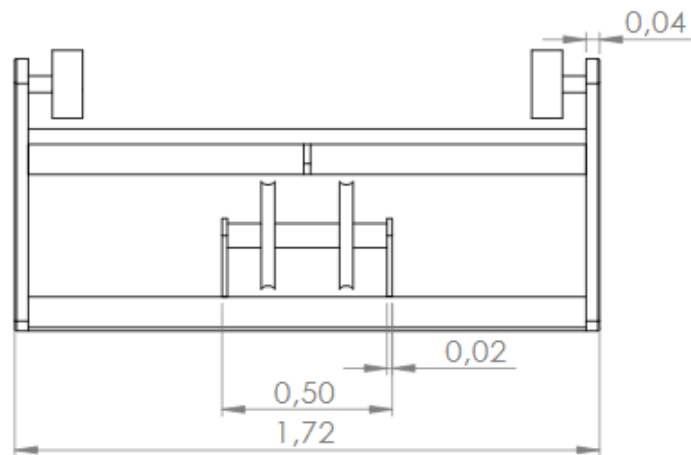


Imagen 45, Principales medida del perfil derecho del carro.

### 6.5.1 Ruedas

En los aparatos de elevación las ruedas metálicas son el tipo más usado. Estas ruedas tienen una o dos pestañas laterales que ayudan a guiar las ruedas por los raíles. En el caso de no llevar pestañas deben haber unos rodillos guías complementarios con el eje vertical de rotación.

En la imagen 46 se muestran los distintos tipos de perfiles de ruedas metálicas.

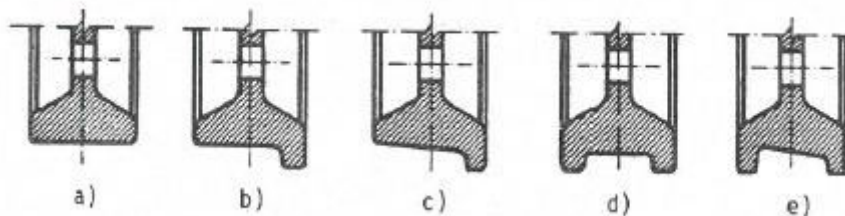


Imagen 46, Perfiles de ruedas metálicas según el libro Grúas de Emlio Larrode

- a) cilíndrica sin pestaña.
- b) cilíndrica de una pestaña.
- c) cónica de una pestaña.
- d) cilíndrica de dos pestañas.
- e) cónica de dos pestañas.

En nuestro caso se ha decidido usar ruedas de una pestaña, para ello deben cumplir con las siguientes condiciones:

- La distancia entre los carriles no debe sobrepasar los 4 metros.
- Ambos caminos deben encontrarse en la misma cota vertical.

-La disposición de las pestañas en las de un carril debe ser opuesta a las del otro carril.

Al tratarse de ruedas libres ya que ninguna de ellas es motora, serán de perfil cilíndrico, las de perfil cónico se emplean más en el caso de las motoras ya que ayudan realinear el aparato en caso que una de las ruedas avance más que la otra.

El cálculo de las ruedas de un aparato de elevación vendrá definido por la norma DIN 15070. La carga de las ruedas se calculará de la siguiente manera:

$$R \leq P_{adm} * c_2 * c_3 * d_1 * (K - 2 * r_1)$$

Por lo que el diámetro quedara definido por:

$$d_1 \geq \frac{R}{P_{adm} * c_2 * c_3 * (K - 2 * r_1)}$$

Dónde:

$c_1$ : coeficiente material, vendrá definido por la tabla 16.

$c_2$ : coeficiente del número de revoluciones, indicado en la tabla 16.

$c_3$ : coeficiente de vida de la rueda, valor definido según la tabla 16.

$P_{adm}$ : presión admisible del material conforme la tabla 16.

$R$ : carga a la que estará sometida la rueda.

$k$ : anchura de la cabeza de carril.

$r_1$ : radio de redondeado del carril.

Los valores definidos para nuestro caso serán los siguientes:

$c_1$ : 1, ya que elegimos un material con una presión admisible de  $5.6 \text{N} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  o superior.

$c_2$ : elegimos la rueda de menor tamaño, 200 mm a una velocidad ya anteriormente mencionada de  $50 \frac{\text{m}}{\text{min}}$ , el coeficiente tendrá un valor de 0,87. El valor del diámetro

inicialmente elegido deberá ser superior o igual al que finalmente nos de la ecuación.

$c_3$ : en este caso elegimos 0,8 ya que desconocemos el uso que tendrá y de esta manera nos aseguramos el peor caso.

$P_{adm}$ : se ha elegido una presión admisible de 5.6 MPa.

$R$ : la carga a la que estará sometida la rueda, será la carga total, anteriormente mencionada son 50 KN, y teniendo en cuenta 6 ruedas en total, la carga se reparte dejando un  $R = 12,5 \text{KN}$ .

$K$ : la anchura de carril en nuestro caso será de alrededor de 200 mm, como una rueda tan ancha no va a ser necesaria, se escoge un valor según la tabla 17,



donde vemos que la anchura de la rueda de 200 mm es de 72,5 mm.

r: el redondeo del carril, supondremos un valor de 5 mm, de todas formas se considerara el valor de 72,5 como el total de  $(-2r_1)$  ya que tenemos suficiente ancho de carril.

Material		P <sub>adm</sub> N/mm <sup>2</sup>	c <sub>1</sub>
Resistencia a la tracción mínima N/mm <sup>2</sup>			
carril	Rueda portadora		
590	≤ 330	2,8	0,5
	410	3,6	0,63
	490	4,5	0,8
	590	5,6	1,0
≥ 690	740	7,0	1,25

Duración de funcionamiento del mecanismo de rodadura (referida a 1 hora)	c <sub>3</sub>
hasta 16 %	1,25
más de 16 a 25 %	1,12
más de 25 a 40 %	1
más de 40 a 63 %	0,9
más de 63 %	0,8

c <sub>2</sub>	n min <sup>-1</sup>
0,66	200
0,72	160
0,77	125
0,79	112
0,82	100
0,84	90
0,87	80
0,89	71
0,91	63
0,92	56
0,94	50
0,96	45
0,97	40
0,99	35,5
1	31,5
1,02	28
1,03	25
1,04	22,4
1,06	20
1,07	18
1,09	16
1,1	14
1,11	12,5
1,12	11,2
1,13	10
1,14	8
1,15	6,3
1,16	5,6
1,17	5

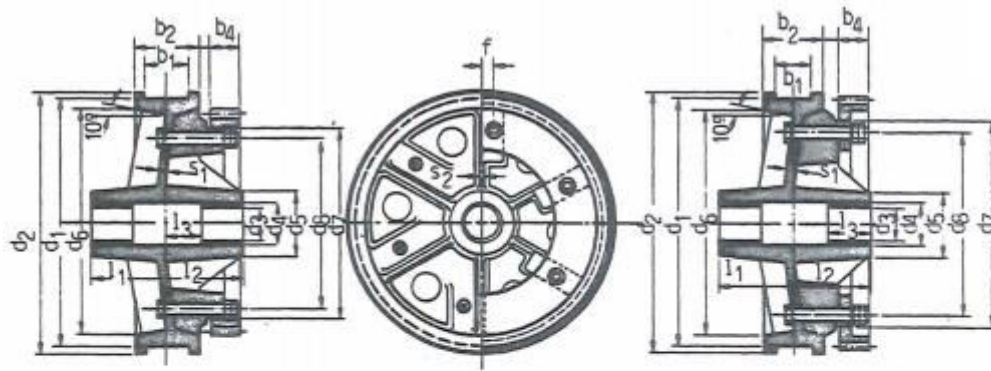
Diámetro de la rueda portadora d <sub>1</sub> mm	c <sub>2</sub>														
	para v en m/min														
	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	250
200	1,09	1,06	1,03	1	0,97	0,94	0,91	0,87	0,82	0,77	0,72	0,66	-	-	-
250	1,11	1,09	1,06	1,03	1	0,97	0,94	0,91	0,87	0,82	0,77	0,72	0,66	-	-
315	1,13	1,11	1,09	1,06	1,03	1	0,97	0,94	0,91	0,87	0,82	0,77	0,72	0,66	-
400	1,14	1,13	1,11	1,09	1,06	1,03	1	0,97	0,94	0,91	0,87	0,82	0,77	0,72	0,66
500	1,15	1,14	1,13	1,11	1,09	1,06	1,03	1	0,97	0,94	0,91	0,87	0,82	0,77	0,72
630	1,17	1,15	1,14	1,13	1,11	1,09	1,06	1,03	1	0,97	0,94	0,91	0,87	0,82	0,77
710	-	1,16	1,14	1,13	1,12	1,1	1,07	1,04	1,02	0,99	0,96	0,92	0,89	0,84	0,79
800	-	1,17	1,15	1,14	1,13	1,11	1,09	1,06	1,03	1	0,97	0,94	0,91	0,87	0,82
900	-	-	1,16	1,14	1,13	1,12	1,1	1,07	1,04	1,02	0,99	0,96	0,92	0,89	0,84
1000	-	-	1,17	1,15	1,14	1,13	1,11	1,09	1,06	1,03	1	0,97	0,94	0,91	0,87
1120	-	-	-	1,16	1,14	1,13	1,12	1,1	1,07	1,04	1,02	0,99	0,96	0,92	0,89
1250	-	-	-	1,17	1,15	1,14	1,13	1,11	1,09	1,06	1,03	1	0,97	0,94	0,91

Tabla 16, Valores de las variables empleadas en el cálculo del diámetro de la rueda-

La fórmula quedara finalmente de la siguiente manera:

$$d_1 \geq \frac{12500}{5.6 * 0.87 * 0.8 * 72.5} = 44.24 \text{ mm}$$

El valor elegido para entrar en las tablas es superior al mostrado por la ecuación de manera que la rueda de 200 mm mostrada en la tabla 17 es la adecuada.



Forma	d <sub>1</sub> H9	b <sub>1</sub> máx	b <sub>2</sub>	b <sub>4</sub>	l <sub>1</sub> simétrica	l <sub>2</sub> asimétrica	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub> H7	d <sub>5</sub>	d <sub>6</sub> máx	d <sub>7</sub> H9	d <sub>8</sub>	e	f	l <sub>3</sub>	s <sub>1</sub> mín	s <sub>2</sub>	Nº nervios	Nº yalmas	Peso completo to kg.	
- SG - -	200	55	90	40	105	80	60	105	230	45	55	85	170	160	125	-	40	18	-	4	1	26
- SG - -	250	55	90	50	115	85	60	115	280	50	60	100	210	200	155	15	50	18	-	4	1	42
- SG - -	315	55	90	60	125	95	65	125	350	60	75	120	270	260	200	15	60	18	-	4	1	66
- BK - -	315	65	110	60	135	105	75	135	350	60	75	120	270	260	200	15	60	18	-	4	1	75
SK - - -	400	65	110	65	140	105	75	140	440	80	95	140	345	270	210	15	80	20	-	4	1	115
- SG - -	400	90	140	65	155	120	90	155	440	80	95	140	345	300	240	15	80	20	-	4	1	120
- BK - -	400	90	140	65	155	120	90	155	440	80	95	140	345	270	210	15	80	20	-	4	1	130
- BK - -	400	90	140	65	155	120	90	155	440	80	95	140	345	300	240	15	80	20	-	4	1	135

Tabla 17, Valores geométricos de a rueda elegida.

En nuestro caso la rueda solo llevaría una pestaña ya que la otra pestaña no encajaría en el perfil sobre el que se va a desplazar el carro.

### 6.6 Contrapeso

Los contrapesos como ya se han definido anteriormente estarán compuestos por bloques de hormigón que se colocaran en la contrapluma para así contrarrestar el momento y esfuerzos creados por la pluma y su carga. Para definir los bloques de contrapeso antes es necesario conocer las cargas que inducirá la pluma y su carga, por tanto la definición del peso que deberán ejercer los contrapesos se calculara más adelante en el apartado del cálculo de la estructura.

La empresa ARGAPREF fabrica contrapesos de hormigón a medida, de manera que con los valores calculados se le asignara a esta empresa la tarea de fabricar los contrapesos.

### 6.7 Cimentación

El lastre situado en la parte inferior de la grúa es uno de los elementos más importantes, ya que es la única conexión con el exterior que tiene la grúa y la función de este es mantener la estabilidad de esta tanto en estado de servicio como fuera de él.

En el presente trabajo se darán los pasos sobre como calcular la zapata necesaria para que cumpla con su función estabilizadora, dado que depende en gran medida del terreno donde se situara la grúa, no se pueden definir unas medidas exactas, ya que estas se deberán calcular en función del terreno y de los esfuerzos que en este caso si se darán (los da el fabricante).

Primero debemos tener un conjunto de datos previos:

- Informe geotécnico:

Para realizar el cálculo de la cimentación es necesario conocer la naturaleza y características del terreno donde se va actuar. El informe geotécnico debe ser elaborado por especialistas en el terreno, y este se basará en ensayos de campo y correlaciones empíricas, aportando los siguientes datos:

**-Cota de apoyo:** el cimiento deberá apoyarse en terreno natural y nunca en relleno. Se entiende como relleno el terreno con baja capacidad portante y elevada deformabilidad que pueden provocar modificaciones inadmisibles para la estructura.

**-Carga de hundimiento del terreno:** la presión transmitida al terreno no deberá sobrepasar el cociente entre la carga de hundimiento de este y el coeficiente de seguridad. Dicho coeficiente también se denomina como carga admisible. Este valor viene definido en gran medida por factores que dependen del terreno. A continuación mostramos las ecuaciones simplificadas para el cálculo de la carga mediante pruebas en el terreno:

-En suelos arenosos con ensayo SPT (ensayo de penetración estándar):

$$Q_{adm} = 10 * N_{SPT} (KPa)$$

-En suelos arcillosos contando con un ensayo a resistencia a compresión simple:

$$Q_{adm} = 1000 * R_u (KPa)$$

El coeficiente de seguridad para el cálculo de la carga de hundimiento admisible se recomienda que sea superior a 3, aunque se aconseja usar un factor de 3,5 debido a los efectos del movimiento cíclico de la grúa.

**-Parámetros de corte del terreno:** la cohesión ( $C_k$ ) y el ángulo de rozamiento interno del terreno situado justo por debajo de la zapata son necesarios para comprobar la estabilidad de la grúa frente al deslizamiento.

- Acciones transmitidas por la grúa torre:

Debido al propio peso, la carga en servicio y el efecto del viento, en la base de la grúa se producen unos esfuerzos que deben ser transferidos y absorbidos adecuadamente por la cimentación. El fabricante de la grúa debe proveer la información acerca de estos esfuerzos, serían: el esfuerzo axial, el cortante y el momento flector.

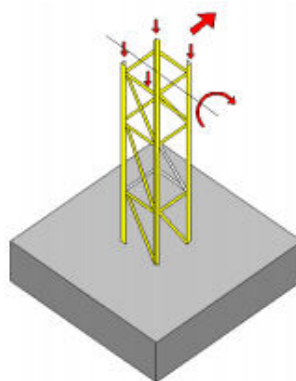


Imagen 47, Acciones transmitidas por la torre a la zapata.

La excentricidad que implique el momento puede calcularse de la siguiente manera:

$$e = \frac{M}{N}$$

$M$ : momento flector proporcionado por el fabricante, en KNm.

$N$ : esfuerzo vertical proporcionado por el fabricante, en KN.

Se puede decir que la resultante de cargas verticales puede situarse a un radio  $e$  del eje del mástil de la grúa según se observa en la imagen 48.

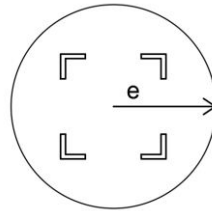


Imagen 48, Radio  $e$  de las cargas resultantes.

- Elemento de anclaje o empotre: el fabricante también suministra la parte inferior de la grúa que ira unida a la cimentación. La geometría de la base es importante para poder definir el tamaño de la cimentación. Una de las formas para determinar las acciones que provocan esta base es la de obviar la celosía del mástil y quedarnos solo con los cuatro cordones verticales. Cabe considerar dos ejes en el cálculo de los esfuerzos, uno en que estos sean paralelos a los lados del mástil (imagen 49) y otro que pase por las diagonales de este (imagen 49) debido a que la grúa puede funcionar en cualquier dirección.

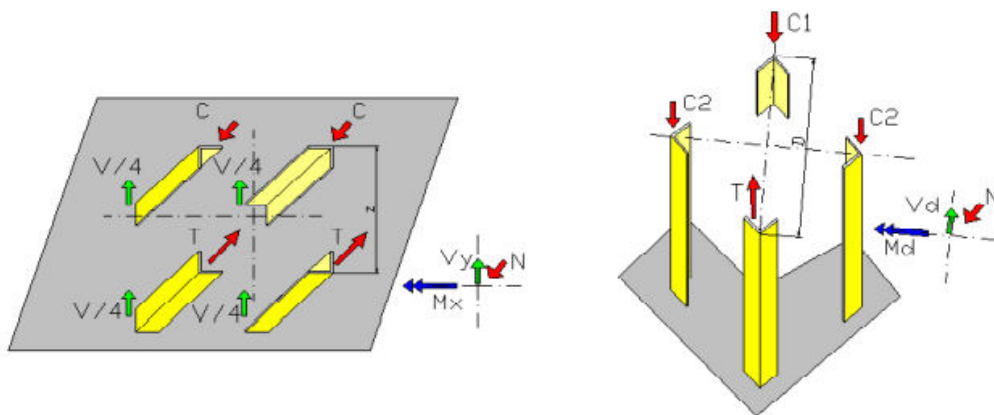


Imagen 49, Esfuerzos producidos por las barras.

Las acciones en el primer caso son las siguientes:

-Axiles en cordones comprimidos:

$$C = \frac{N}{4} + \frac{M_x}{2Z}$$

-Axiles en cordones traccionados:

$$T = \frac{N}{4} - \frac{M_x}{2Z}$$

-Cortante en cada cordón:

$$V = \frac{V_y}{4}$$

Para el caso de la imagen 49 a la derecha tenemos:

-Axil en cordón más comprimido:

$$C_1 = \frac{N}{4} + \frac{M_d}{D}$$

-Axil en cordones sobre diagonal:

$$C_2 = \frac{N}{4}$$

-En el más traccionado:

$$T = \frac{N}{4} - \frac{M_d}{D}$$

-Cortante en cada cordón:

$$T = \frac{N}{4} - \frac{M_d}{D}$$

Siendo:

$N$ : axil proporcionado por el fabricante, en KN.

$M_x$ : Momento flector proporcionado por el fabricante en KNm.

$Z$ : separación entre cordones verticales en el caso del eje paralelo a las caras, en m.

$V_y$ : esfuerzo cortante proporcionado por el fabricante, en KN.

$M_d$ : Momento flector proporcionado por el fabricante, en KNm.

$D$ : separación entre cordones verticales en el caso del eje en diagonal, en m.

Con estas fórmulas podremos saber los valores en el peor de los casos. En nuestro caso los valores máximos son los siguientes:

### 6.7.1 Diseño de la cimentación

#### -Resistencia vertical

Existen dos métodos de cálculo para estimar la presión transmitida al terreno por la cimentación. Uno de ellos considera una respuesta elástica y lineal del suelo y la respuesta de este es proporcional a la presión recibida, mientras que el segundo consiste en suponer un comportamiento plástico del terreno en que este legado a un cierto nivel de presión plastifica hasta alcanzar el equilibrio de fuerzas con el exterior. La normativa actual establece el método del área equivalente como el válido para calcular los esfuerzos transmitidos por una cimentación al terreno.

El método del área eficaz se rige por las siguientes normas:

$$c = \frac{a}{2} - e$$

$$a_{ef} = 2c = c * \left(\frac{a}{2} - e\right) = a - 2e$$

$$A_{ef} = a * (a - 2e) = a^2 - 2ae$$

Si  $e > \frac{a}{6}$ :

$$A_{ef} = a^2 - 2ae = a^2 - \frac{2a^2}{6} = a^2 - \frac{a^2}{3} = \frac{2a^2}{3}$$

$$N_{adm} = Q_{adm} * A_{ef}$$

$Q_{adm}$ : esfuerzo admisible característico del terreno, en KPa.

$N_{adm}$ : esfuerzo admisible por el terreno, en KN.

$A_{ef}$ : area eficaz, m.

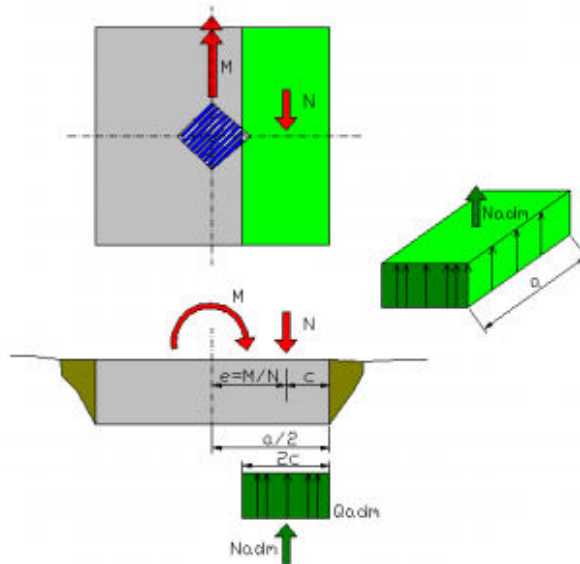


Imagen 50, Esfuerzos producidos en la cimentación.

Dándonos el valor de la fuerza admisible del terreno respecto a una zapata con unas dimensiones (imagen 50).

**-Resistencia al deslizamiento y al vuelco**

Otro apartado a solventar para lograr el equilibrio es la resistencia al deslizamiento. Al deslizamiento se oponen dos fuerzas, ambas actúan en el plano de contacto entre la cimentación y el terreno. Uno de ellos es el rozamiento seco de Coulomb y la cohesión del terreno es otro. Según el CTE la resistencia frente al deslizamiento debe cumplir:

-En suelos arenosos donde solo actúa el rozamiento:

$$V < \frac{N}{\gamma_R} \tan\left(\frac{2}{3}\varphi\right)$$

-En suelos cohesivos donde también se tiene en cuenta la cohesión:

$$V < \frac{N * \tan\left(\frac{2}{3}\varphi\right) + 0.5c_k B}{\gamma_R}$$

Dónde:

$c_k$ : Cohesion del terreno, en KN/m<sup>2</sup>.

$\varphi$ : angulo de rozamiento del terreno.

$\gamma_R$ : factor de seguridad.



$B$ : area de contacto con el terreno, en  $m^2$ .

La normativa exige coeficientes de seguridad de 1,5.

En el caso del vuelco se debe cumplir con un factor de seguridad que relaciona los momentos estabilizadores y los momentos desestabilizadores. Según la guía de cimentación:

$$F_v < \frac{M_{estabilizadores}}{M_{desestabilizadores}}$$

Según el CTE el valor de  $F_v$  debe ser mayor que 2.

Con las formulas presentadas y los valores descritos respecto la grúa objeto del presente trabajo se puede comprobar si la cimentación elegida en función del terreno resistirá los esfuerzos transmitidos por la grúa.

## 6.8 Base

La base será el elemento de unión de la grúa al terreno. La base será el primer módulo, parte del ira enterrado en la cimentación y podrá disponer de una estructura para poder incluir unos contrapesos adicionales en la base, en la imagen 50 podemos observar la estructura donde se situarían estos contrapesos. Los contrapesos situados en la base podrán ser sacos de arena o bloques de hormigón, en el caso de ser sacos de arena estos se podrán vaciar mediante agujero facilitando su retirada y recogiendo la arena por la parte inferior de la base.

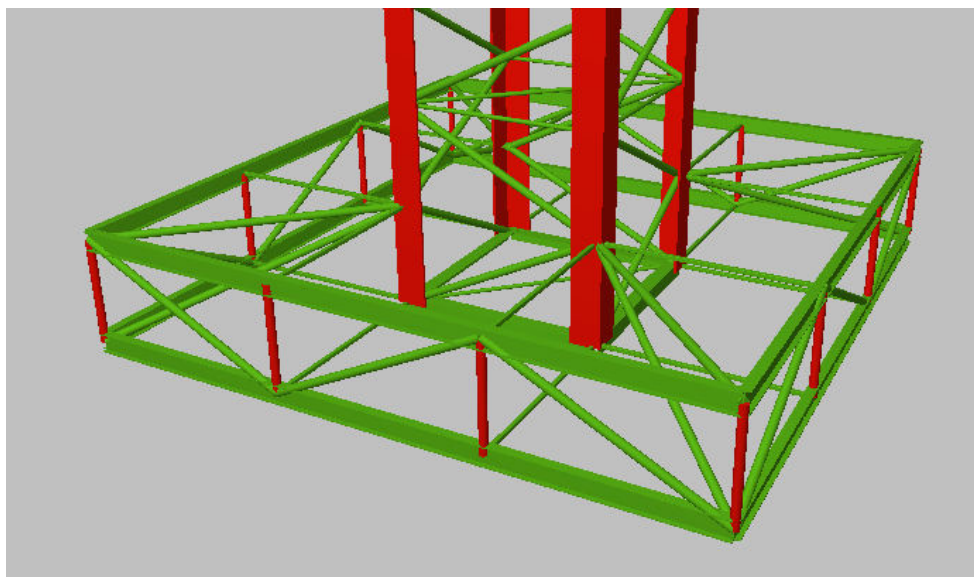


Imagen 51, Estructura de la base dispuesta para los contrapesos adicionales.

## 6.9 Base giratoria

Como ya se ha mencionado con anterioridad la grúa dispondrá de un movimiento de rotación que únicamente implicara la pluma y la contra pluma (y también sus elementos) de manera que dotará a la grúa de un radio de acción para ser usada en trabajo.

La base giratoria está compuesta por una corona de giro con un rodamiento incorporado que permite realizar giro sobre el eje de la misma plataforma. La corona de giro y el rodamiento están preparados para soportar tanto fuerzas axiales como radiales y de flexión.

La elección de la corona de giro se debe hacer cuidadosamente ya que deberá soportar grandes cargas y un mal funcionamiento inutilizaría la grúa. En la imagen 52 se muestra una corona de giro de gran tamaño, la corona ira fijada tanto a la torre como a la parte superior de la grúa mediante tornillos. La parte inferior ira fijada a la torre y la parte superior ira fijada en la parte superior dotando de movimiento a la pluma y contra pluma (también al castillete).



Imagen 52, Corona giratoria de gran tamaño similar a las usadas en las grúas torre.

Para la elección de la corona de giro se empleara la guía que nos facilita Thyssen Krupp, dentro de esta guía nos fijaremos en la serie 9 de rodamientos, ya que estos según especifica en el catálogo son los empleados en grúas torre. Más adelante con los pesos de la grúa diseñada se hará el cálculo y elección según la guía mencionada.

## 6.10 Cálculo motores

La grúa en función de los movimientos de los que disponga tendrá varios motores, en el presente trabajo la grúa dispondrá de tres motores, uno de rotación de la pluma y contrapluma, uno de traslación del carro y otro de elevación de la carga.

Para seleccionar el motor debemos saber la potencia que nos será necesaria para realizar dichos movimientos. A continuación expondremos y realizaremos estos cálculos.



Imagen 53, Motor eléctrico Siemens similar al que se usara en la grúa.

### 6.10.1 Cálculo del motor de elevación

La potencia del motor de elevación según el FEM se realiza con la siguiente ecuación:



$$P = \frac{V_{elev} * W}{4500 * \eta}$$

Siendo:

$V_{elev}$ : velocidad de elevacion en  $\frac{m}{min}$ .

$W$ : carga a elevar en daN.

$\eta$ : rendimiento, en nuestro caso 0,85.

Para el caso de estudio el peso a elevar anteriormente se ha mencionado, y este era de 41100N. La velocidad de elevación es de 50m/min, por lo que la potencia necesaria será:

$$P = \frac{50 * 4110}{4500 * 0.85} = 53.73 CV$$

La elección del motor se hará según la tabla 18, en este caso se escoge un motor de 60 CV con referencia 1LS2 186-A44-2 de la marca EMZ.

Potencia nominal según VDE (kW)	CV	Tipo de construcción	Con o sin levanta-esco-billas	Tensión de servicio V	Tipo	Peso neto kg	Momento de inercia $\frac{GD^2}{4}$ kg m <sup>2</sup>	Valores de servicio a potencia nominal					Relación entre par máximo y nominal	Características motor		P <sub>1</sub> (W)	
								Velocidad r.p.m.	Rendimiento $\eta$ %	Factor de potencia cos $\phi$	Intensidad a 380 V A	Par en N.m.		Tensión V	Intensidad A		
1.500 r. p. m. (4 polos)																	
5,5	4	—	SIN	220/380	1LS1 133-4AA2.	75	0,03	1410	77	0,80	99	27	2,8	130	21		
7,5	5,5	—	SIN	220/380	1LS1 135-4AA2.	80	0,035	1410	82	0,85	12	37	2,7	170	22		
10	7,5	—	SIN	220/380	1LS1 163-4AA2.	110	0,068	1425	85	0,82	16,3	50	3,0	180	27		
15	11	—	SIN	220/380	1LS1 166-4AA2.	125	0,09	1440	87	0,83	23	74	3,4	260	26		
20	15	180 L	SIN	220/380 500	1LS2 136-4AA2. -4AA3.	215	0,23	1445	88	0,84	31	101	4	250	37		
25	18,5	200 L	SIN	220/380 500	1LS2 155-4AA2. -4AA3.	285	0,39	1450	89	0,85	37	124	3,8	215	54		
30	22	200 L	SIN	220/380 500	1LS2 156-4AA2. -4AA3.	305	0,43	1450	90	0,86	43	148	4	250	54		
40	30	225 M	SIN	220/380 500	1LS2 176-4AA2. -4AA3.	400	0,76	1455	91,5	0,88	57	201	3,9	165	115		
50	37	250 M	SIN	220/380 500	1LS2 185-4AA2. -4AA3.	555	1,02	1460	90,5	0,88	71	247	3,8	180	125		
60	45	250 M	SIN	220/380 500	1LS2 186-4AA2. -4AA3.	595	1,16	1465	91,5	0,88	85	300	4,2	230	121		
82	60	280 S	SIN	220/380 500	1LS2 204-4AA2. -4AA3.	745	1,9	1470	92,5	0,88	112	392	4	255	145		
100	75	280 M	SIN	220/380 500	1LS2 206-4AA2. -4AA3.	820	2,17	1475	93	0,89	138	497	4	305	150		
125	90	315 S	SIN	220/380 500	1LS2 224-4AA2. -4AA3.	980	3,1	1475	93,5	0,89	165	582	3,8	315	175		
150	110	315 M	SIN	220/380 500	1LS2 226-4AA2. -4AA3.	1.070	3,65	1475	94	0,90	200	712	4	380	175		
180	132	355	SIN	380 500	1LS4 354-4AA1. -4AA3.	1.400	4,9	1475	93	0,90	240	853	3,6	395	205		
210	155	355	SIN	380 500	1LS4 355-4AA1. -4AA3.	1.450	5,5	1480	93,5	0,90	280	1.000	3,9	475	198		
250	185	355	SIN	380 500	1LS4 356-4AA1. -4AA3.	1.550	6,2	1480	94	0,90	330	1.120	4,2	580	192		
315	230	400	SIN	380 500	1LS4 404-4AA1. -4AA3.	2.000	11	1485	94,5	0,91	405	1.480	3,7	455	305		
380	285	400	SIN	380 500	1LS4 406-4AA1. -4AA3.	2.150	13	1485	95	0,91	500	1.830	3,9	570	300		
485	355	450/1	SIN	380 500	1LS4 454-4AA1. -4AA3.	2.800	20	1490	95	0,92	620	2.270	4,1	630	340		
610	450	450/2	SIN	380 500	1LS4 456-4AA1. -4AA3.	3.100	24	1490	95	0,92	780	2.890	4,1	790	345		

Tabla 18, Tabla con valores de distintos motores de la marca EMZ.

- **Freno de elevación**

El freno de elevación será de mordazas, el cálculo del freno de mordazas se hace siguiendo la imagen 54, con las ecuaciones siguientes:

$$M_{freno} = 4 * b * r^2 * p * tg\Psi * a$$

Siendo:

$$a = \frac{\pi}{4}$$

$p$ : supones una presión de 1 MPa.

$r$ : el valor de  $r$  debe ser  $150 < r < 350$  mm.

$$tg\psi = 0.3$$

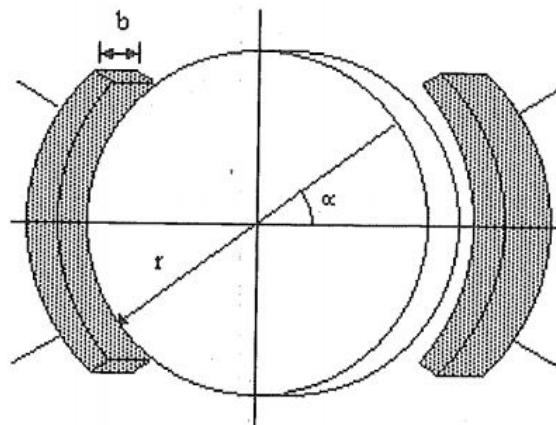


Imagen 54, Freno de mordazas y los principales valores.

Sabemos que el freno por razones de seguridad deberá ejercer un momento máximo que será el momento máximo del motor por un factor de la tabla 19.

Tipo	K
Elevación	2-2,5
Traslación	1,5

Tabla 19, Valores del factor de seguridad en función del sistema.

De manera que:

$$M_{freno} > M_{max, motor} * 2.5$$

Siendo el par motor máximo el par nominal multiplicado por el factor que nos da la tabla del catálogo de motores 4,2, de manera que:

$$M_{max, motor} = 300 * 4.2 = 1260 Nm$$

$$M_{freno} > 1260 * 2.5 = 3150 Nm$$

Para un pre diseño podemos suponer una anchura de 0,1 m de manera que:

$$M_{freno} > 3150 \text{ Nm}$$

$$4 * 0.20 * r^2 * 1 * 10^6 * 0.3 * \frac{\pi}{4} > 3150 \text{ Nm}$$

$$r > 0.13 \text{ m}$$

De manera que deberá tener un radio mayor a 130 mm con un ancho de 200 mm.

### 6.10.2 Cálculo del motor de traslación

La potencia del motor de traslación según el FEM es:

$$P_{tras} = \frac{W_{tras} * \omega * V_{tras}}{4.5 * 10^6 * \eta}$$

Dónde:

$V_{tras}$ : velocidad de traslacion en  $\frac{\text{m}}{\text{min}}$ .

$\omega$ : factor debido a los rozamiento, 7 en el caso de rodamientos y 20 para cojinete de deslizamiento.

$W_{tras}$ : peso a desplazar en el movimiento de traslacion en daN.

Para el caso que nos precede la carga a desplazar es de 50000N o sea 5000 daN, con una velocidad de traslación de 50m/min, tendremos:

$$P_{tras} = \frac{5000 * 7 * 50}{4.5 * 10^6 * 0.85} = 0.46 \text{ CV}$$

En este caso no tendremos en cuenta la resistencia que podría oponer el viento ya que el área de exposición será de un valor muy bajo.

Según la tabla 18 el motor con menor potencia es el de 5,5 CV por tanto se escoge el motor con referencia 1LS1 133-4AA2 de la marca EMZ.

Para el caso del motor de traslación es necesario comprobar que el par de arranque no es superior al par máximo que puede transmitir el motor, para ello necesitamos las siguientes características del motor:

$n_1$ : velocidad del motor, en este caso 1500 rpm.

$n_2$ : velocidad en potencia nominal del motor, en este caso 1410 rpm.

$M_{mot}$ : par en potencia nominal del motor, en este caso 27 Nm.

$i$ : relación maxima entre par nominal y par maximo, en este caso 2,8.

$I_{motor}$ : momento de inercia del motor, en este caso 0,3 Nm<sup>2</sup>.

Con estos valores sabemos que el momento máximo transmitido por el motor es de:

$$M_{max,motor} = 2.8 * 27 = 75.6 \text{ Nm}$$

Para calcular el par de arranque total es necesario conocer el par resistente y el par de

aceleración:

$$M_A = M_W + M_b$$

Siendo  $M_A$  el momento total,  $M_W$  el momento resistente y  $M_b$  el momento de aceleración, todos en Nm. El cálculo de estos momentos es el siguiente:

$$M_W = P_{tras} * \frac{7160}{n_1}$$

Y el valor del momento de aceleración:

$$M_b = \frac{I_{total} * n_1}{37,5 * t_a}$$

Dónde:

$I_{total}$ : la inercia total en Nm<sup>2</sup>.

$t_a$ : tiempo de aceleración, en el caso de la grúa torre en elevación 4 seg.

El cálculo de la inercia total es el siguiente:

$$I_{total} = I_{massa\ lineal} + I_{massa\ rotativa}$$

Donde tenemos que la inercia de la masa movida linealmente es:

$$I_{massa\ lineal} = \frac{W_{tras} * d^2}{\eta}$$

$$d = \frac{v_{tras}}{\pi * n_1}$$

En nuestro caso será:

$$d = \frac{50}{\pi * 1500} = 0.0106\ m$$

$$I_{massa\ lineal} = \frac{50000 * 0.0106^2}{0.85} = 6.61\ Nm^2$$

Y la inercia rotativa:

$$I_{massa\ rotativa} = I_{motor} * \frac{n_2^2}{n_1^2}$$

En este caso:

$$I_{massa\ rotativa} = 0.3 * \frac{1410^2}{1500^2} = 0.265\ Nm^2$$

Y por tanto la inercia total será:

$$I_{total} = 6.61 + 0.265 = 6.875\ Nm^2$$

Los pares de resistencia y aceleración serán:

$$M_W = 0.46 * \frac{7160}{1500} = 2.19 \text{ Nm}$$

Y el valor del momento de aceleración:

$$M_b = \frac{6.875 * 1500}{375 * 4} = 6.875 \text{ Nm}$$

Ahora se debe comparar el valor del par de arranque con el valor del par máximo del motor:

$$M_{total} = 6.875 + 2.19 = 9.07 \text{ Nm}$$

$$M_{total} < M_{maximo} \rightarrow 9.07 < 75.6 \rightarrow OK$$

Por tanto se cumple y el motor seleccionado es apto para el servicio.

- Freno de traslación

De la misma manera que con los frenos de elevación, debemos calcular el par necesario del freno:

$$M_{freno} > M_{max, motor} * 1.5$$

Siendo el par motor máximo el par nominal multiplicado por el factor que nos da la tabla del catálogo de motores 4,2, de manera que:

$$M_{max, motor} = 75.6 \text{ Nm}$$

$$M_{freno} > 75.6 * 1.5 = 113.4 \text{ Nm}$$

Para un prediseño podemos suponer una anchura de 0,05 m de manera que:

$$M_{freno} > 113.4 \text{ Nm}$$

$$4 * 0.05 * r^2 * 1 * 10^6 * 0.3 * \frac{\pi}{4} > 113.4 \text{ Nm}$$

$$r > 0.05 \text{ m}$$

De manera que deberá tener un radio mayor a 50 mm con un ancho de 50 mm.

## 7. Cálculo de la estructura

En los siguientes apartados determinaremos las acciones, los esfuerzos y deformaciones a las que está sometida la estructura de la grúa, así como también sus respectivas comprobaciones.

Primero mediante un cálculo simplificado según el libro Grúas de Emilio Larrode se calcularán los esfuerzos con los datos extraídos de una grúa que está en el mercado de la marca Liebherr y se realizará mediante SAP2000 una simulación de esfuerzos en una simplificación de la estructura de la grúa para poder entender de mejor manera cuáles serán sus puntos más solicitados y como se distribuirán los esfuerzos a lo largo de la grúa. Mediante un software de diseño se evaluará la estructura y se determinarán los perfiles necesarios para que cumpla con su objetivo y con las condiciones de seguridad impuestas por el EAE.

### 7.1 Análisis simple

En este apartado y como ya se ha citado con anterioridad se seguirá el cálculo de las cargas mostrado en el libro Grúas de Emilio Larrode para sacar los esfuerzos a mano. Para ello primero se deben tener datos sobre la estructura como los pesos propios de los distintos elementos, para ello nos basaremos en la ficha técnica de una grúa que se encuentra en el mercado, la grúa 100 LC de la marca Liebherr.

En la imagen 55 podemos ver lo que sería una vista completa de la grúa Liebherr de la cual sacaremos los datos para el cálculo de los esfuerzos.

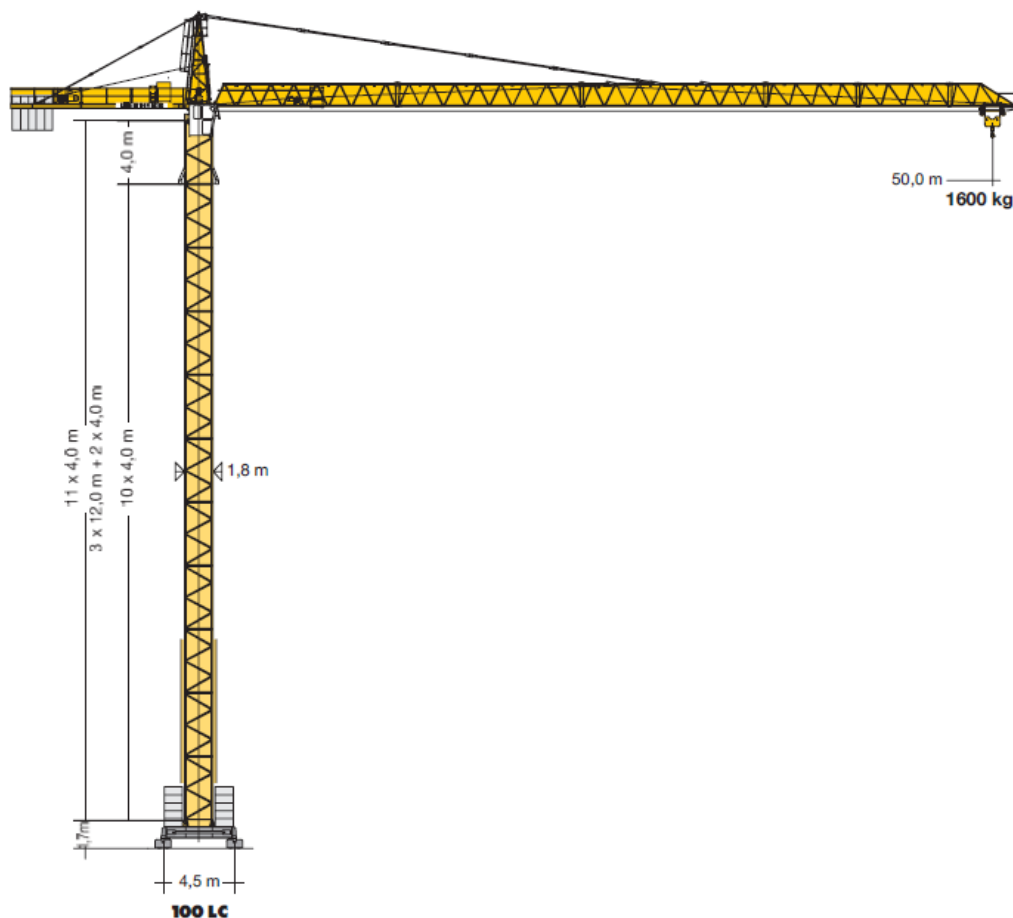


Imagen 55, Grúa Liebherr modelo ejemplo para el trabajo.

Las grúas torre se caracterizan por estar compuestas de módulos lo que facilita su montaje, además dependiendo del radio de acción que le queramos dar a la grúa esta poseerá distintas capacidades hasta el punto que si se monta la grúa para una distancia máxima de 26,8 metros tendrá una capacidad de carga de 3550 Kg con pesos intermedios dependiendo de la distancia máxima según se muestra en la imagen 56. Esta característica se tendrá en cuenta más adelante para el cálculo de la grúa objeto de este trabajo.

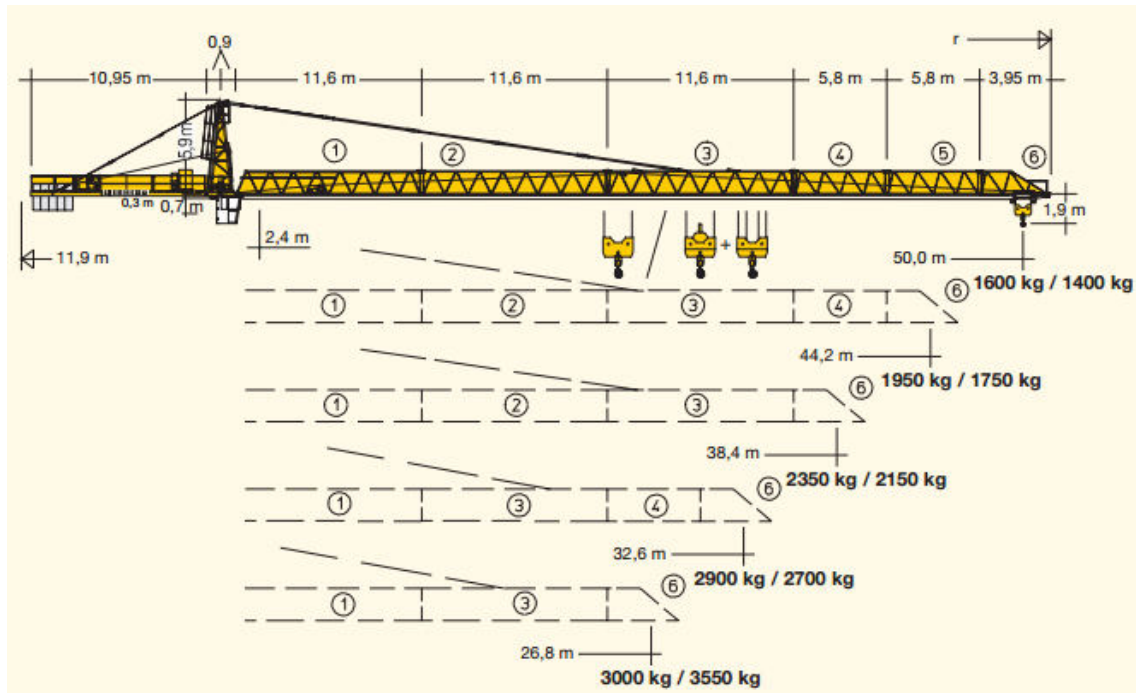


Imagen 56, Distintas capacidades de trabajo según longitudes de la pluma.

### 7.1.2 Clasificación FEM de la grúa

Antes de pasar al cálculo se debe realizar una clasificación de la máquina que estamos evaluando. Para ello se deben conocer 2 aspectos básicos:

- Vida del aparato: en este caso debemos definir el número de horas en las que la máquina estará dando servicio.
- Estado de carga: el estado de carga definirá la clasificación del grupo FEM o DIN en el que se pueda encontrar la máquina.

Estos dos valores vendrán definidos por las tablas 20 y 21 que se muestran a continuación:

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

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 a carga máxima.	1,000

Tabla 20, Grupo y estado según la vida y la frecuencia de cargas.

		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 21, Clasificación según los grupos por el FEM del mecanismo.

En nuestro caso de evaluación (LC 100 Liebherr) no tenemos estos datos, pero para el diseño de la grúa objeto de este trabajo se ha establecido la siguiente clasificación:

-Vida del aparato: el aparato tendrá una vida ya definida en el apartado 6.2.1 de 17.500 horas, por lo que según la tabla ya mostrada nos encontramos que forma parte del grupo F.

-Estado de carga: basándonos en suposiciones realistas y fijándonos en la tabla 21 se ha decidido escoger el estado de carga 4, ya que en la mayoría de ocasiones la grúa levantará una porción bastante próxima a la máxima carga. De esta manera también se conseguirá un factor de seguridad mayor.

De esta forma y conforme la tabla 21 la grúa queda definida en el grupo M8.

### 7.1.3 Cargas producidas por el propio peso

A continuación, mencionaremos los pesos de las distintas partes de la grúa según la ficha técnica proporcionada por Liebherr, y como deberá ser su distribución a lo largo de la estructura, haciendo algunas simplificaciones, para llevar a cabo el primer cálculo.



- Pluma: los valores de la pluma los podemos encontrar en la tabla siguiente:







		① 1520
		② 1060 ③ 1000 ④ 360 ⑤ 267
		⑥ 230

Imagen 57, Pesos de los módulos que conforman la pluma de Liebherr, en Kg.

De manera que el peso de la pluma será:

$$1520 + 1060 + 1000 + 360 + 267 + 230 = 4437 \text{ Kg}$$

$$4437 = 4437 * 10 = 44370 \text{ N} = 44.37 \text{ KN}$$

Si tenemos en cuenta una distancia de 50 metros la carga del propio peso en la pluma será:

$$\frac{44.37}{50} = 0.887 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

- Contrapluma: los valores de la contrapluma teniendo en cuenta que deberemos situar también el motor de elevación son:

		1480
		655

Imagen 58, Peso de la contrapluma, en Kg.

El peso a distribuir en la contrapluma teniendo en cuenta una longitud de 11 metros será de:

$$1480 * 10 = 14800 \text{ N} = 14.8 \text{ KN}$$

$$\frac{14.8}{11} = 1.35 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

El peso del motor se situara a 6 metros de la torre en la estructura del contrapeso y será de:

$$655 * 10 = 6550 \text{ N} = 6.55 \text{ KN}$$

- Contrapeso: El contrapeso según especificaciones de la ficha técnica es de 12750 Kg en la simulación se situara en el extremo de la contrapluma, será de:

$$12750 * 10 = 127500 \text{ N} = 127.5 \text{ KN}$$

- Columna: la columna teniendo en cuenta que estará compuesta por 12 bloques de 4 metros y también el peso del mecanismo de giro en el punto más alto tendrá unas cargas de:

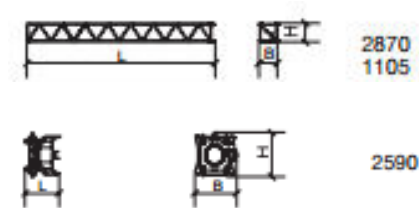


Imagen 59, Pesos de los módulos que conforman la torre, de 4 y de 12 metros respectivamente, en Kg.

-Carga distribuida en la torre:

$$2870 * 12 = 34440 \text{ N} = 34.44 \text{ KN}$$

$$\frac{34.44}{48} = 0.72 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

-Carga del mecanismo de giro:

$$2590 * 10 = 25900 \text{ N} = 25.9 \text{ KN}$$

- Portaflecha: para la porta flecha se entenderá una distribución de carga igual como simplificación, por lo que se asignara una longitud de 7 metros y será de:



Imagen 60, peso del portaflecha, en Kg.

$$740 * 10 = 7400 \text{ N} = 7.4 \text{ KN}$$

$$\frac{7.4}{7} = 1.05 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

#### 7.1.4 Fuerzas producidas por el viento

A continuación calcularemos los esfuerzos que genera el viento en la estructura de la grúa, se analizará el caso en que el viento actué perpendicular a la pluma ya que es el peor de los casos y donde se generaran más esfuerzos. Cabe recordar que en caso de que el viento supere el máximo permitido en servicio la grúa se posicionara en veleta de manera que la pluma ira paralela a la dirección del viento generando así unos menores esfuerzos en la estructura.

Para el cálculo primero deberemos saber la presión ejercida por el viento a las distintas alturas a las que trabaja la torre. En la tabla 22 extraída del libro Grúas de Emilio Larrode mostrada más abajo se pueden encontrar los distintos valores de velocidad del viento a distintas alturas.

Altura del elemento por encima del suelo		Viento limite 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 <sup>2</sup> ó daN/m <sup>2</sup>	Ibs/sq.ft	m/s	km/h	miles p h	kgf/m <sup>2</sup> ó daN/m <sup>2</sup>	Ibs/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 22, Valores del viento según altura de trabajo.

Para nuestro caso teniendo en cuenta una altura de 50 m los valores que tendremos serán:

- De 0 a 20 metros de altitud tendremos una velocidad de  $20 \frac{m}{s}$  en estado de servicio y una velocidad de  $36 \frac{m}{s}$  fuera de servicio.
- De 20 a al punto más alto de la grúa tendremos una velocidad de  $20 \frac{m}{s}$  en estado de servicio y de  $42 \frac{m}{s}$  fuera de servicio.

La presión del viento se calcula siguiendo la fórmula:

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

Siendo:

$q$ : presión del viento en  $\frac{N}{m^2}$ .

$\rho$ : es a densidad del viento, se tomara como  $1.23 \text{ Kg/m}^3$ .

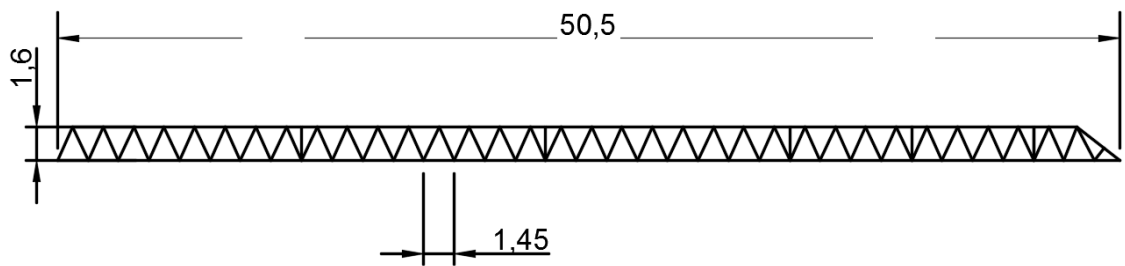
$v_w$ : velocidad del viento en  $\frac{m}{s}$ .

En la siguiente tabla se expresan los valores para cada caso en la grúa estudiada:

Altura m	En estado de servicio $N/m^2$	Fuera de servicio $N/m^2$
0-25	246	797,04
25-Altura	246	1084,86

Tabla 23, Valores del viento según el caso estudiado.

- Pluma: la pluma se será conforme el esquema 9 presentado abajo.



Esquema 9, Esquema de la pluma del caso estudiado.

Estará compuesta por un total de barras mostrado en la tabla 24. En este caso se consideraran para mayor simplificación del cálculo que todas las barras tienen una misma longitud o sección en función de si son diagonales, montantes o el caso de la viga que sirve de carril.

La siguiente tabla muestra el recuento del número de barras de la estructura a analizar:

	Cantidad de barras	Longitud	Perfil
<b>Diagonales</b>	68	1,76	Tubular, de diámetro 60mm espesor 4 mm.
<b>verticales</b>	5	2	Tubular, de diámetro 60mm espesor 4 mm.
<b>Carril</b>	3x11,6 2x5,8 1x3,95 m	m m	Perfil UPE de dimensiones según figura 61.
<b>Montante superior</b>	3x11,6 2x5,8 1x2,05 m	m m	Perfil en L de lados iguales de 160 mm espesor 5

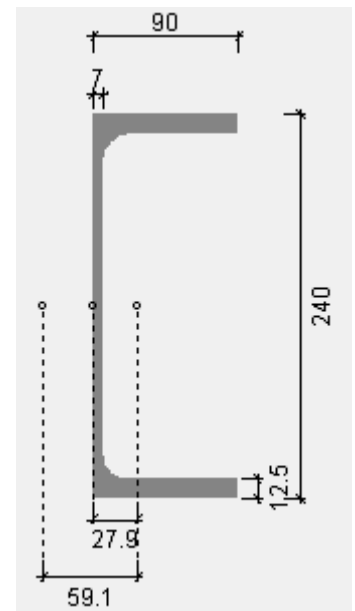


Tabla 24, Cantidad y perfil de las barras que conforman la pluma.

Imagen 61, Perfil UPE 240 .

Con estos datos procedemos al cálculo del área expuesta al viento que tiene la pluma, para ello cogemos las longitudes de las barras y las multiplicaremos por sus anchos respectivos, en el caso de las tubulares por su diámetro:

$$A_{total,expuesta} = 68 * 1.76 * 0.06 + 5 * 2 * 0.06 + (3 * 11.6 + 2 * 5.8 + 3.95) * 0.24 + (3 * 11.6 + 2 * 5.8 + 2.05) * 0.16 = 27.62 \text{ m}^2$$

Para calcular la fuerza que realiza el viento deberemos tener en cuenta un factor de exposición  $c_f$  este factor de exposición lo podemos saber mediante la tabla 25, y sabiendo que  $\psi$  es:

$$\varphi = \frac{A}{A_e}$$

Que en nuestro caso tomara el valor de  $\varphi = 1$ .



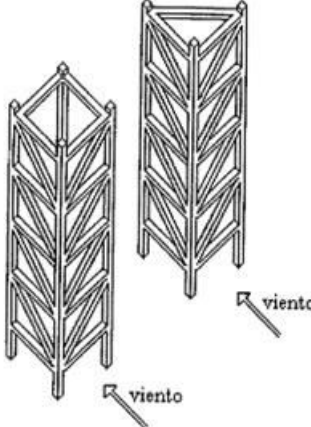
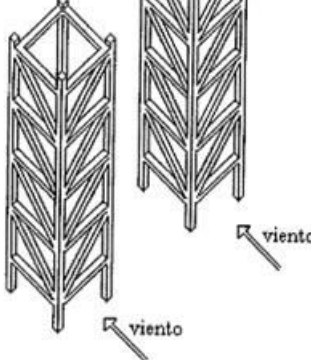

Cable metálico	Viento perpendicular al cable		1,20	
			$\varphi$ $C_f$	
Estructuras en celosía	Celosías simples, viento perpendicular a las caras. (utilizar factor de sombra $\eta_m$ para marcos múltiples)		$\leq 0,05$ 1,95	
			Perfiles, angulares, vigas cajón, placas	0,10 1,90
				0,20 1,75
				0,30 1,60
				0,40 1,45
				0,50 1,45
Estructuras en celosía		Componentes tubulares	$\leq 0,05$ 1,30	
			$d \cdot v_w < 4,64 \text{m/s}^2$	0,10 1,25
				0,20 1,20
				0,30 1,10
				0,40 1,05
				0,50 1,05
	$d \cdot v_w \geq 4,64 \text{m/s}^2$	0,80		
	Estructuras de celosías ensambladas cuadradas o triangulares con el viento perpendicular a las caras	Estructuras cuadradas de perfiles, angulares, vigas cajón y placas.	$< 0,025$ 4,0	
			$0,025+0,45$ $4,13-5,18\varphi$	
			$0,45+0,7$ 1,8	
			$0,7+1,0$ $1,33+0,67\varphi$	
			Caso de viento en la diagonal, se multiplica el valor perpendicular a la cara por:	$1,0+0,75\varphi$
	Estructuras triangulares de perfiles, angulares, vigas cajón y placas.	$< 0,025$ 3,6		
		$0,025+0,45$ $3,71-4,47\varphi$		
		$0,45+0,7$ 1,7		
		$0,7+1,0$ $1,0 + \varphi$		
	Estructuras triangulares y cuadradas con componentes tubulares. Se multiplican los valores anteriores por estos coeficientes:	$< 0,3$ 0,66		
		$0,3+0,8$ $0,66\varphi+0,47$		
		$0,8+1,0$ 1,0		

Tabla 25, Valores del factor de exposición para distintas disposiciones de barras.

Tenemos un coeficiente de exposición de 1 (el último caso de la tabla anteriormente mostrada), por lo que la fuerza que ejercerá el viento en la pluma será de:

- En estado de servicio, con viento a  $20 \frac{m}{s}$ :

$$F = A * q * c = 27.62 * 246 * 1 = 6794.52 \text{ N}$$

No tenemos en cuenta el estado fuera de servicio ya que el viento no actuara perpendicular a la pluma sino paralelo.

También deberemos tener la fuerza producida en los perfiles posteriores a la cara expuesta, para ello se debe multiplicar la fuerza obtenida anteriormente por un coeficiente llamado coeficiente de sombra, este coeficiente se obtiene con la tabla 25 y los siguientes valores:

$$\varphi = 1$$

$$\frac{b}{h} = \frac{1.6}{1.45} = 1.10$$

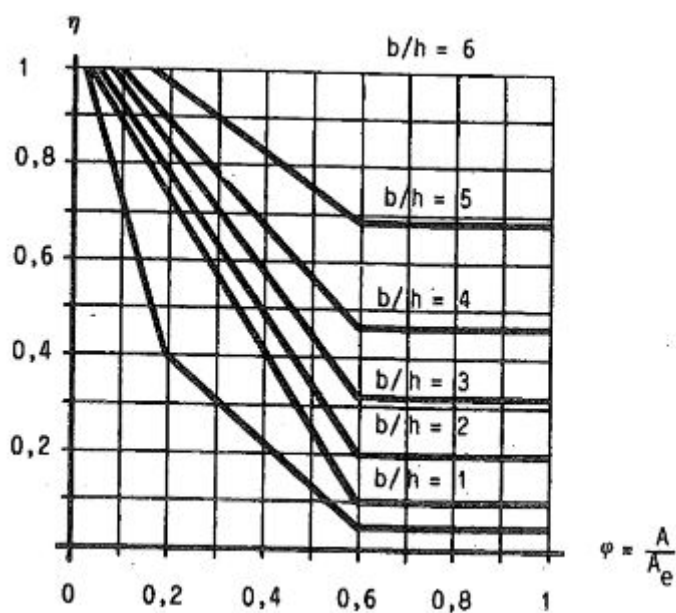


Grafico 1, Relación entre factor de exposición, relación de áreas y coeficiente de sombra.

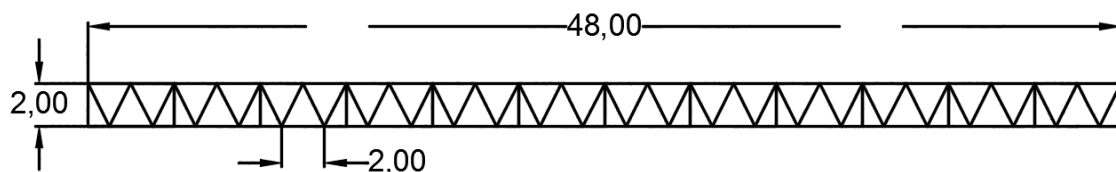
De manera que el coeficiente de sombra para este caso es de 0,12.

Y la fuerza que se producirá por el efecto sombra es la siguiente:

- En estado de servicio con viento de 20 m/s:

$$F = 6794.52 * 0.12 = 815.34 \text{ N}$$

- Torre: a continuación se muestra un esquema de la torre:



Esquema 10, Esquema la torre con sus principales medidas.

En la tabla 26 se muestra el recuento de barras y las propiedades de estas, de la misma manera que en el anterior caso se han tenido en cuenta simplificaciones con tal de agilizar el cálculo.

	Cantidad de barras	Longitud	Perfil
<b>Diagonales</b>	48 -20 hasta 20 metros de altura. -28 hasta el punto más alto.	2,24	Tubular, de sección de 60mm, espesor 4 mm.
<b>Horizontales</b>	12 -5 hasta los 20 metros de altura. -7 hasta el punto más alto de la torre.	2	Tubular, de sección de 60mm, espesor 4 mm.
<b>Mástiles</b>	24 -10 hasta los 20 metros de altura. -14 hasta el punto más alto.	4	Perfil en L de lados iguales de 250 mm, espesor de 5 mm.

Tabla 26, Composición de barras de la torre.

Por lo que le área expuesta, sabiendo que el coeficiente de exposición es 1 como en el caso anterior y distinguiendo entre la que está por encima de los 20 metros y la que está por debajo tendremos:

$$A_{>20m} = 28 * 2.24 * 0.06 + 7 * 2 * 0.06 + 14 * 4 * 0.25 = 18.6 \text{ m}^2$$

$$A_{<20m} = 20 * 2.24 * 0.06 + 5 * 2 * 0.06 + 10 * 4 * 0.25 = 13.28 \text{ m}^2$$

Con estos valores y la presión del viento podemos obtener la fuerza en cada uno de los casos:

- En estado de servicio:

$$F = 246 * (18.6 + 13.28) * 1 = 7842.48 \text{ N}$$

- Fuera de servicio:

$$F_{>20m} = 18.6 * 1084.86 * 1 = 20178.4 \text{ N}$$

$$F_{<20m} = 13.28 * 797.04 * 1 = 10584.69 \text{ N}$$

De la misma manera que en el caso anterior deberemos tener en cuenta el coeficiente de sombra para saber la fuerza ejercida por el viento en la parte posterior de la estructura, de la misma manera que en el caso anterior tendremos que :

$$\varphi = 1$$

$$\frac{b}{h} = 1$$

Según la gráfica anteriormente mostrada tendremos un valor del coeficiente de sombra de 0,1 de manera que las fuerzas serán de:

- En estado de servicio:

$$F = 7842.48 * 0.1 = 784.25 \text{ N}$$

- Fuera de servicio:

$$F_{>20m} = 20178.4 * 0.1 = 2017.84 \text{ N}$$

$$F_{<20m} = 10584.68 * 0.1 = 1058.47 \text{ N}$$

En este caso sí que debemos tener en cuenta el valor de la fuerza en estado fuera de servicio ya que el área expuesta de la torre continuara siendo la misma.

- Contrapluma: La contrapluma estará conformada básicamente por un perfil tubular cuadrado de dimensiones 160mm de lado y 6 mm de espesor con una longitud total de 11 metros, también constara de una barandilla y varios elementos que en este caso despreciaremos, por lo que la fuerza ejercida total será de:

$$A = 11 * 0.16 = 1.76 \text{ m}^2$$

- En servicio:

$$F = 1.76 * 246 = 432.96 \text{ N}$$

En este caso no tendremos en cuenta el factor sombra, ni la fuerza en estado fuera de servicio debido a que el viento no actuara de forma perpendicular a la contrapluma.

El caso del castillete no se tendrá en cuenta como parte de la simplificación. Los perfiles usados para el análisis de fuerzas ejercida por el viento han sido elegidos según un primer prediseño de la estructura realizado con CYPE, estos valores solo nos servirán para ver cuál es la distribución de fuerzas a lo largo de la pluma y más adelante en el caso del cálculo y dimensionamiento se empleará una mezcla de los valores proporcionados en este apartado por el FEM y los proporcionados por el eurocódigo.

#### 7.1.4.1 Fuerzas del viento, resumen y disposición

A continuación se muestra una tabla con un resumen de las fuerzas del viento calculadas:

				Total N
Pluma	En servicio	Expuesta	6794,52	7609,86
		Sombra	815,34	
Torre >20 metros	En servicio	Expuesta	4575,6	4621,36
		Sombra	45,76	
	Fuera de servicio	Expuesta	20178,4	22196,24
		Sombra	2017,84	
Torre <20 metros	En servicio	Expuesta	3266,88	3593,57
		Sombra	326,69	
	Fuera de servicio	Expuesta	10584,69	11643,16
		Sombra	1058,47	



Contrapluma	En servicio	Expuesta	432,96	432,96
-------------	-------------	----------	--------	--------

Tabla 27, Esfuerzos debidos al viento en la grúa torre.

Para realizar el cálculo de los esfuerzos se deben distribuir estas cargas a lo largo de la estructura. En el caso analizado será el más desfavorecido, en este caso de la grúa en estado de servicio. El reparto de cargas se hará de forma uniforme a lo largo de la estructura de la misma manera que se ha realizado en el caso de la carga por peso propio.

- Pluma: con una longitud de 50 metros tendremos una carga distribuida de:

$$\frac{7609.86}{50} = 152.2 \frac{N}{m}$$

- Torre: la torre en estado de servicio recibe la misma presión de viento de manera que tendremos:

$$\frac{7842.48}{48} = 163.39 \frac{N}{m}$$

- Contrapluma: con una distancia de 11 metros tendremos una carga de:

$$\frac{432.96}{11} = 39.36 \frac{N}{m}$$

Todas estas cargas serán perpendiculares a la estructura.

### 7.1.5 Fuerzas producidas por los mecanismos

La estructura de la grúa también deberá soportar unas cargas debidas a los mecanismos que se deben considerar, ya que algunas de estas son importantes. Las cargas debidas a mecanismo que deberá soportar la grúa se sacarán del catálogo de la grúa ya mencionada y serán:

- Plataforma de giro: la plataforma de giro tendrá un peso de 2590 Kg y la fuerza que producirá será de:

$$F_{mec\ giro} = 2590 * 10 = 25900\ N$$

- Mecanismo de elevación de carga: con un peso de 655 Kg tendrá un valor de:

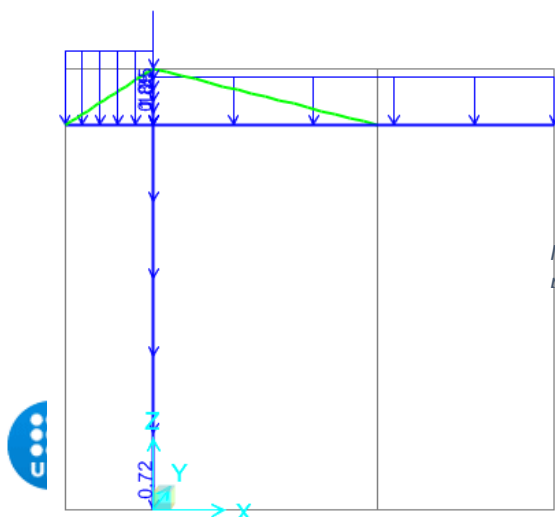
$$F_{mec\ elev} = 655 * 10 = 6550\ N$$

El mecanismo de elevación de carga se situara a 6 metros de la torre en la estructura de la contrapluma.

### 7.1.6 Esquema de fuerzas

En las siguientes imágenes se mostraran las distribuciones de fuerzas realizadas con SAP2000.

- Fuerzas debidas al peso propio:



Con los valores calculados en el apartado 7.1.3.

Imagen 62, Cargas introducidas por los pesos propios según cálculos anteriores.

- Fuerzas debidas a la acción del viento:

Los valores son los calculados en el apartado 7.1.4.1.

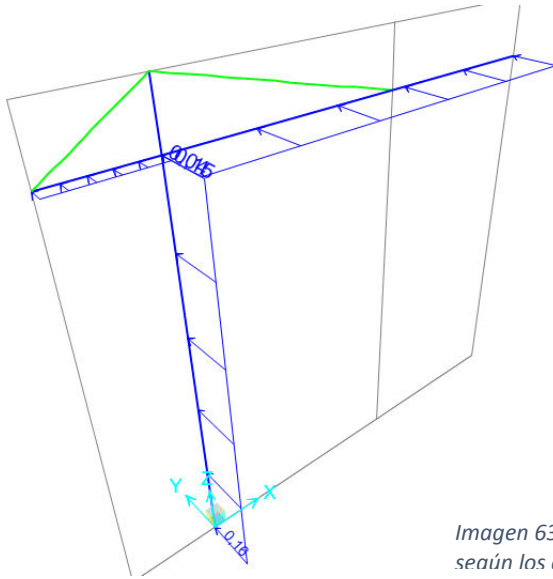


Imagen 63, Cargas introducidas por el viento según los cálculos anteriores.

- Fuerzas debidas a los mecanismos:

Con los valores calculados en el apartado anterior.

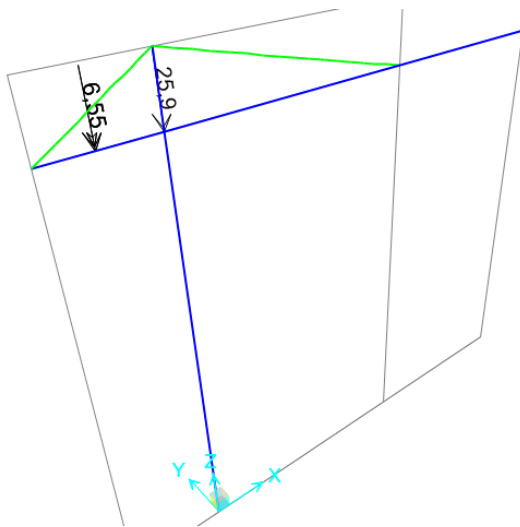


Imagen 64, Cargas introducidas por los mecanismos.

### 7.1.7 Cálculo de esfuerzos

A continuación mostraremos los cálculos realizados por el programa cuando se dan las siguientes combinaciones:

- Caso de solo peso propio más el contrapeso: es interesante conocer la distribución de esfuerzos en este caso ya que la grúa debe permanecer estable en el caso de que no lleve carga.
- Caso de carga en punta: en este caso pondremos la carga de 1,6 toneladas en la punta y observaremos como se distribuyen los esfuerzos.
- Caso de esfuerzos producidos por el viento: debido a que es un análisis en plano los

esfuerzos producidos por el viento solo tienen el sentido Y del plano de manera que se realizara un análisis a parte sin tener en cuenta pesos, ya que estos esfuerzos debidos al viento serán independientes a la carga o peso propio.

#### 7.1.7.1 Caso 1: peso propio más contrapeso

El momento distribuido en la estructura en caso de no tener contrapeso sería el siguiente:

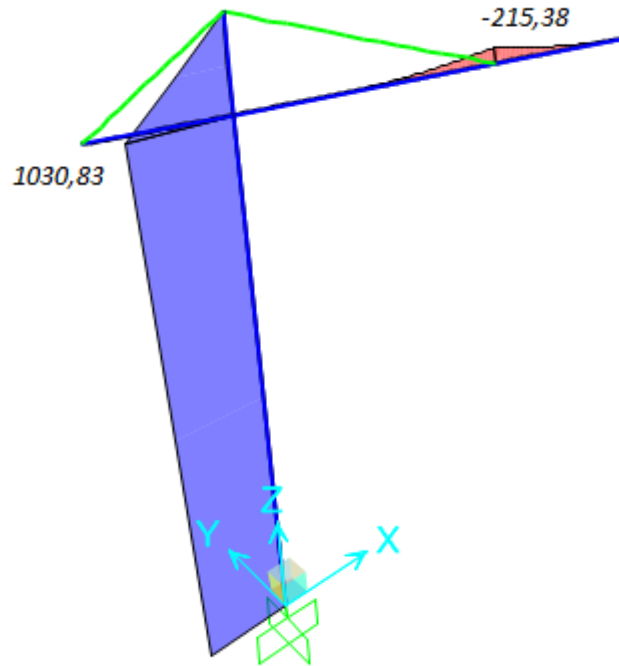


Imagen 66, Diagrama de esfuerzos producidos por el propio peso de la estructura y los contrapesos.

De forma que el momento en la base será de 1030,83 KNm, en caso de que pongamos el contrapeso la distribución de momentos quedara de la siguiente manera:

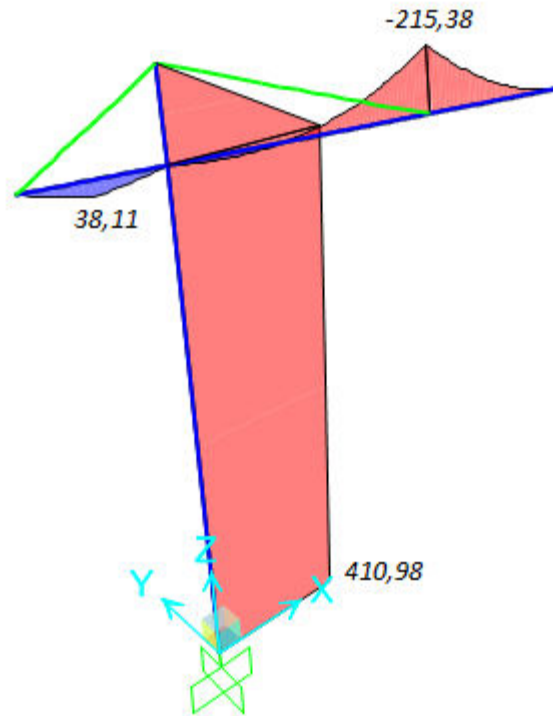


Imagen 67, Diagrama de momentos producidos por el propio peso de la estructura y los contrapesos.

Como se puede observar en la imagen anterior el momento en la base es de sentido contrario al anterior caso y se ha reducido en más de la mitad, de este modo se puede entender que la función del contrapeso es estabilizar la grúa frente a su propio peso dando un margen para también absorber parte del momento que va a producir la carga.

#### 7.1.7.2 Caso 2: carga en punta

En este caso podremos ver los esfuerzos producidos por la carga dispuesta en la punta de la pluma de la torre ya que será la posición más desfavorable, en la imagen 68 se muestra la distribución de los momentos que produciría la carga por si sola:

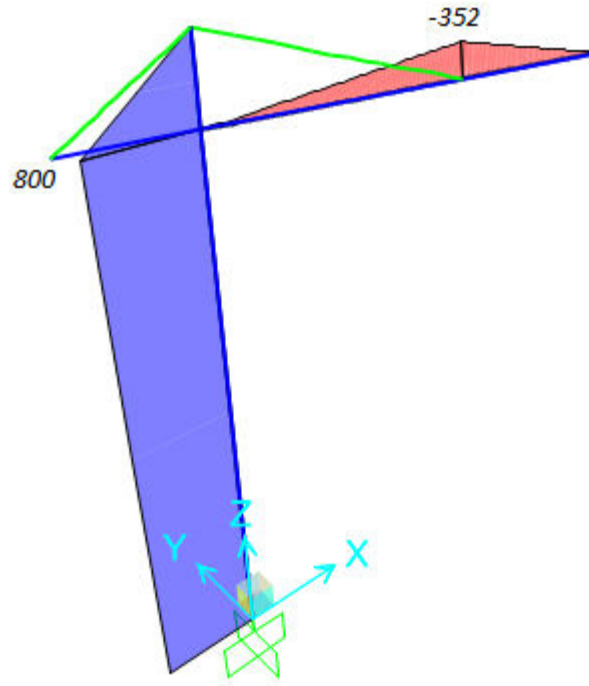


Imagen 68, Diagrama de momentos producidos por la carga en la punta.

Podemos ver que el momento que debería absorber la base es de 800 KNm, si le aplicamos el contrapeso (también se tendrá en cuenta el propio peso) se obtiene el siguiente diagrama:

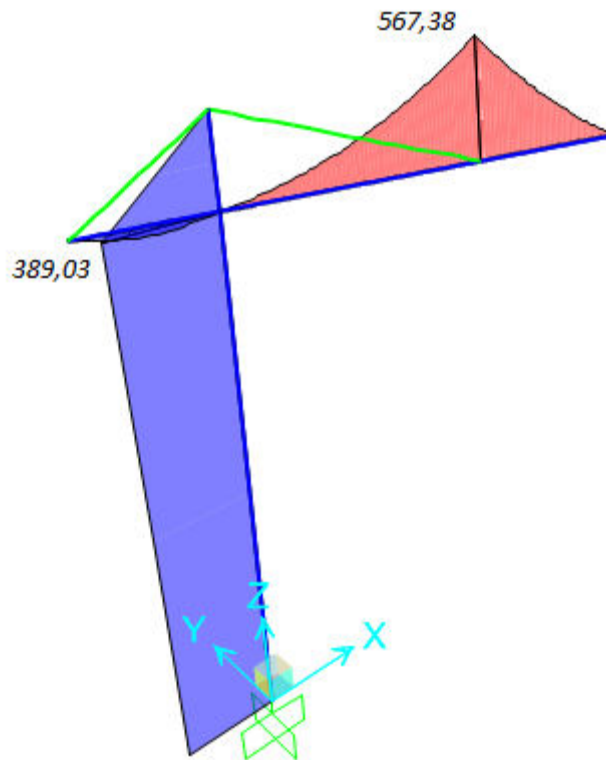


Imagen 69, Diagrama de momentos producidos por la suma de la carga y los contrapesos.

Se puede observar que el momento producido en la base se reduce en más de la mitad y tiene un valor de 389,08 KNm. Si comparamos el valor producido en la base en el caso del propio peso con el contrapeso con este caso podemos ver como los valores aún y ser opuestos tienen son de una cantidad muy parecida. De esta manera se puede ver de manera gráfica la función del contrapeso que es reducir en la medida de lo posible los momentos producidos en la base tanto en el caso de que la grúa esta descargada como cuando está en servicio ya que los momentos producidos en la base son muy parecidos.

Para más datos y comprender mejor la distribución de esfuerzos a lo largo de la torre a continuación se muestran los diagramas de axiles y cortantes:

- Axiles:

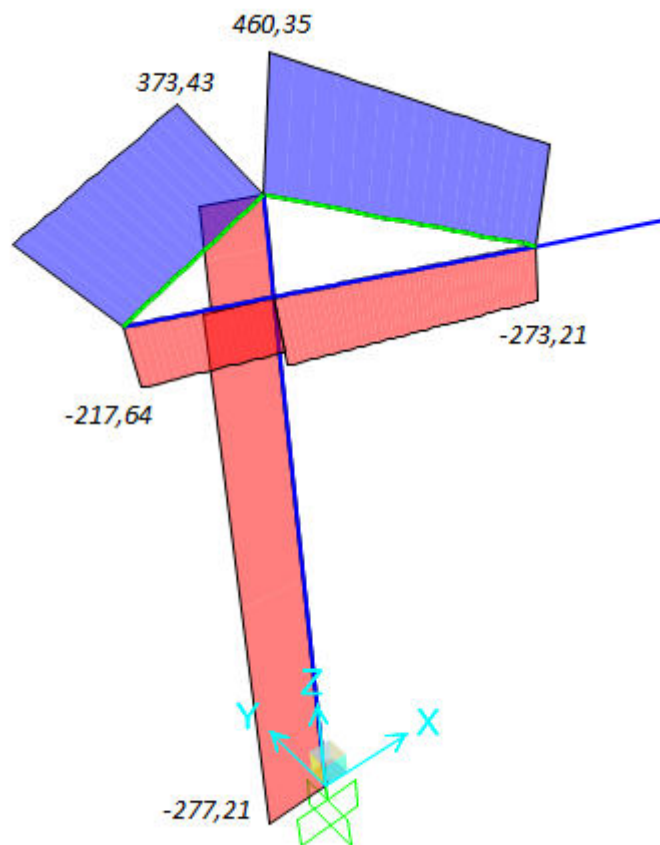


Imagen 69, Diagrama de momentos producidos por la suma de la carga y los contrapesos.

En el caso de los axiles podemos comprobar como los cables ejercen un esfuerzo de compresión tanto en la pluma como en la contrapluma y que la torre es el elemento que debe resistir más axil si no tenemos en cuenta los cables.

- Cortante:

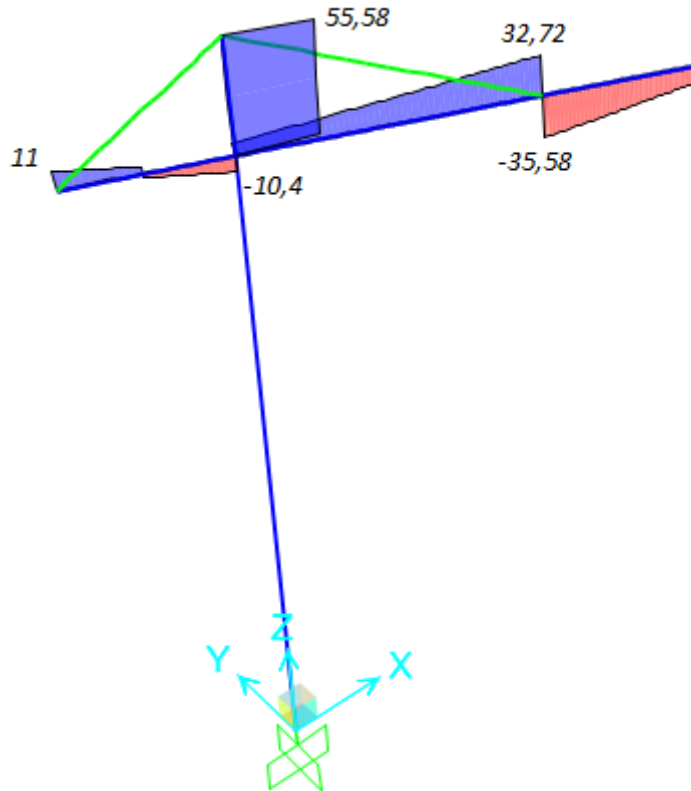


Imagen 70, Diagrama de cortantes producidos por la suma de la carga y los contrapesos.

Como se puede observar el cortante solo es produce en la pluma y contrapluma, esto es debido a los esfuerzos producidos en lo alto del portaflechas y en la base de unión entre pluma-torre-contrapluma, ya que el esfuerzo cortante producido en el portaflechas se neutraliza con los esfuerzos de compresión producidos en la pluma y contrapluma.

#### 7.1.7.3 Caso 3: Acción del viento en servicio

En este caso podremos observar los esfuerzos producidos por el viento, estos se pueden observar en la imagen 71 y 72.

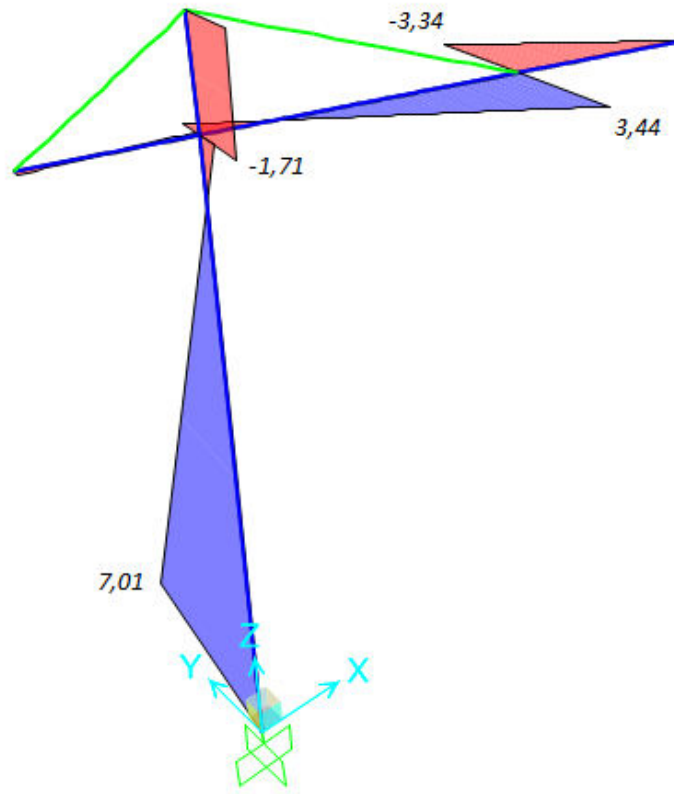


Imagen 71, Diagrama de cortantes producidos por el viento.

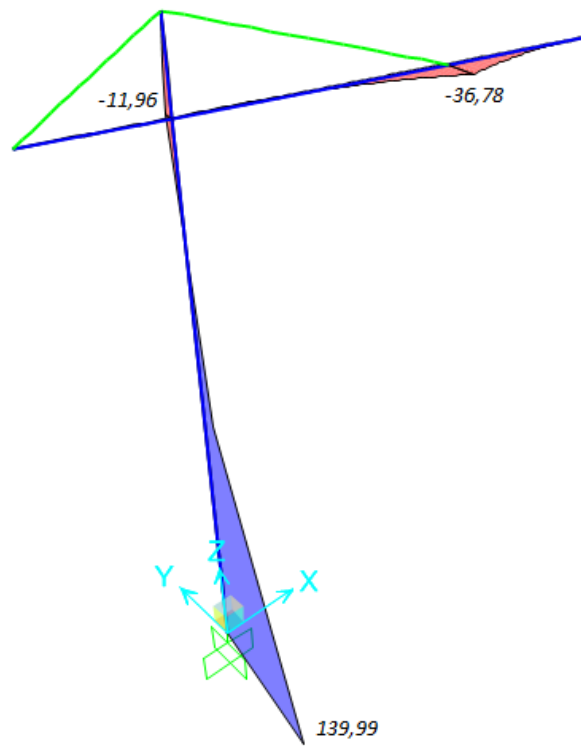


Imagen 72, Diagrama de momentos producidos por el viento.



## 7.2 Dimensionamiento de la estructura

En los próximos apartados pasaremos a hacer un dimensionamiento de la estructura mediante un programa especializado en el cálculo de estructuras metálicas. Deberemos antes definir el propósito del diseño, las cargas que deberá soportar y las dimensiones principales del modelo. También se deberá acudir al EAE para conseguir el valor de algunas variables necesarias para que el programa realice correctamente el cálculo.

### 7.2.1 Programa de diseño CYPE

El programa de diseño empleado será el CYPE más específicamente el metal 3D, un programa que nos permite el cálculo, la verificación y el dimensionamiento de estructura de acero.

El programa nos permite aplicar tanto la normativa del eurocódigo 3 como el EAE para el cálculo de estructuras metálicas. En nuestro caso se empleará el EAE por cuestiones de accesibilidad y proximidad.

Mediante este programa daremos la forma geométrica de la estructura, asignaremos perfiles, la calcularemos y la verificaremos, para así acabar dando una estructura final con unos perfiles debidamente seleccionados.

### 7.2.2 Requerimientos de la estructura

Anteriormente se han mencionado las características que tendrá la grúa, a continuación hacemos un resumen de los objetivos que debe cumplir la estructura a diseñar:

- Ser capaz de dar servicio a una longitud máxima de 50 metros con una capacidad de 1,6 toneladas de carga de servicio máxima.
- Ser capaz de dar servicio con una longitud de 25 metros con una capacidad de 4 toneladas de carga de servicio máximo.
- La altura de trabajo máxima será de 50 metros de altura.
- La torre estará formada por módulos intercambiables.

### 7.2.3 Geometría de la estructura

La estructura está compuesta por cuatro partes principales, la torre, la pluma, el contrapeso y el portaflechas o castillete. A continuación, definiremos geométricamente cada una de estas partes.

#### 7.2.3.1 Geometría de la torre

La torre estará compuesta por 12 módulos de 4 metros de altura, y en cada lado de 2 metros habrá una cercha de tipo Warren con barras horizontales cada 2 metros para mayor rigidez. También se dispone una barra central que servirá para apoyar la estructura por la que se subirá a la torre.

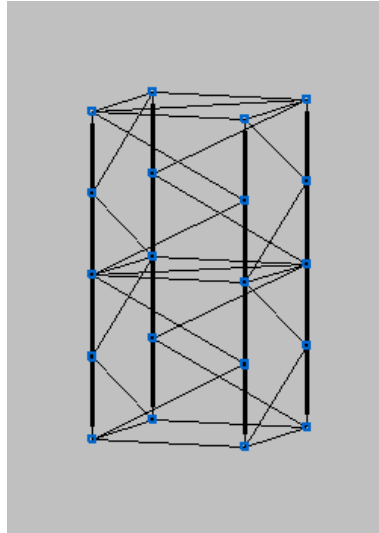


Imagen 73, Definición geométrica de la torre.

### 7.2.3.2 Geometría de la pluma

La pluma estará compuesta de varios tipos de módulos, 3 módulos de 11,6 metros, 2 de 5,8 metros, y uno de 3,95 metros de longitud. Todos estarán formados por dos cerchas de tipo Warren que coincidirán en un montante superior conformando una estructura triangular de 1,2 metros de anchura y 1,4 de altura.

- Módulo de 11,6 metros de longitud:

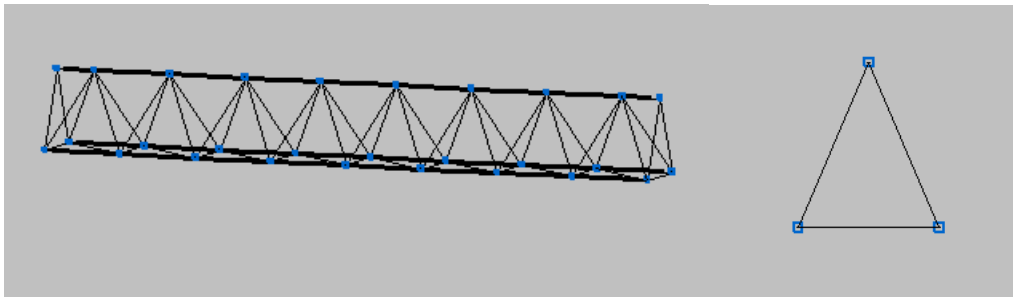


Imagen 74, Definición geométrica del módulo de 11,6 metros de la pluma.

- Módulo de 5,2 metros de longitud:

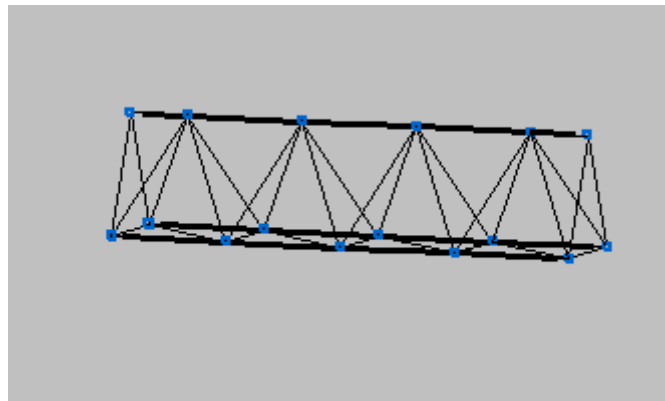


Imagen 75, Definición geométrica del módulo de 5,2 metros de la pluma.

- Modulo final de 3,95 metros de longitud:

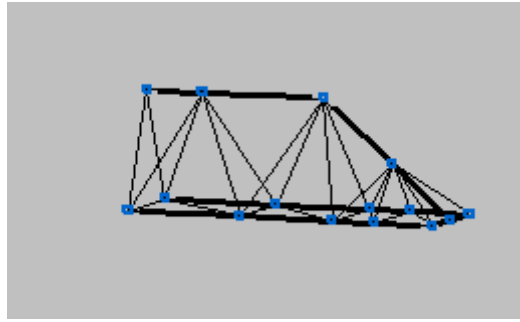


Imagen 76, Definición geométrica de la punta de la pluma.

La totalidad de la pluma de 50 metros de longitud será conforme se observa en la imagen 77.

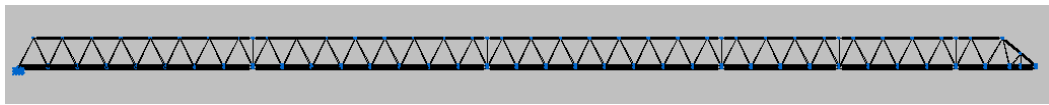


Imagen 77, Pluma realizada en Cype.

#### 7.2.3.3 Geometría de la contrapluma

La contrapluma estará formada por dos barras unidas por una cercha tipo Warren, tendrá una distancia total de 11 metros de longitud y una anchura de 2 metros, en la imagen 77 se puede observar la contrapluma.

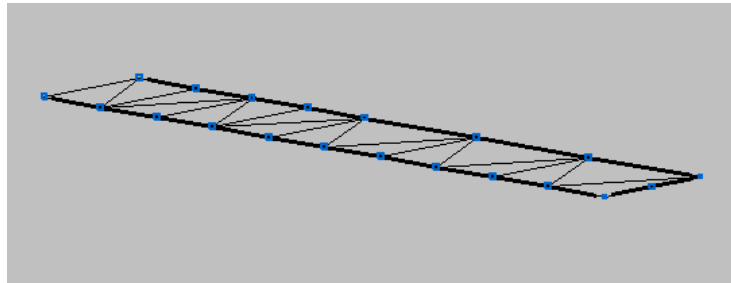
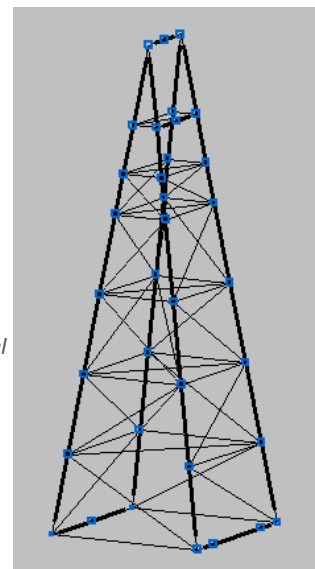


Imagen 77, Definición geométrica de la contrapluma.

#### 7.2.3.4 Geometría del portaflechas

El porta flechas tendrá una altitud de 7 metros, conformado por cerchas tipo Pratt, las 4 primeras de una altura de 1 metros, la siguiente de 0.5 metros de altura y la primera empezando por arriba tendrá una altura de 1 metro. No tiene una geometría acabada en punta para facilitar el anclaje de los tensores y también facilitar su montaje.

Imagen 78, Definición geométrica del portaflechas.



### 7.2.4 Propiedades de la estructura en el programa

Como ya se ha mencionado anteriormente se asignará el EAE como normativa para realizar las comprobaciones, el metal asignado será el S275. Para definir correctamente la estructura hará falta repasar las propiedades que da por definición el programa de manera que podamos definir manualmente ciertas comprobaciones de acuerdo al proyecto objeto del estudio para asegurarnos que cumpla con lo especificado en la normativa.

#### 7.2.4.1 Nudos

Uno de los primeros aspectos a los que debemos prestar atención son los puntos de unión entre las distintas barras de la estructura. El programa nos da a elegir entre vinculación interior y exterior, la vinculación interior la usaremos para las uniones entre barras, la exterior servirá para definir las barras con el suelo y definir el empotramiento. Las opciones dentro de vinculación interior son:

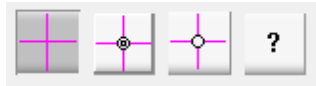


Imagen 79, formas de unión entre barras e Cype.

Donde, por orden, tenemos: empotrada, articulada, con un coeficiente de empotramiento a elegir y la última opción es para definir la relación entre distintas barras en un mismo nudo. La estructura estudiada podría estar definida por nudos articulados según se indica en el mismo EAE aunque en la práctica y teniendo en cuenta que en muchos casos el nudo sirve de unión entre varias barras, la unión pasaría a ser prácticamente empotrada debido a la imposibilidad de la barra de rotar entorno a ese nudo a causa de las demás barras.

#### 7.2.4.2 Pandeo

El pandeo forma parte de los fallos por inestabilidad que puede presentar una estructura. El pandeo tiende a producirse en los elementos más esbeltos sometidos a compresión. En la imagen 80 se puede ver una imagen donde se ve el pandeo producido por unos esfuerzos de compresión producidos en la barra.

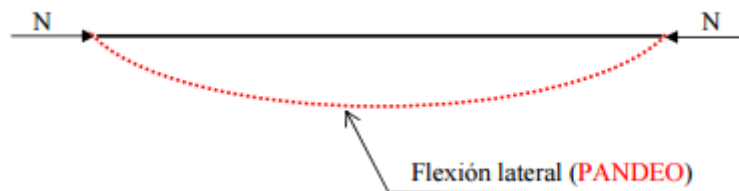


Imagen 80, Definición gráfica de pandeo.

Los límites admisibles de pandeo vendrán definidos por el EAE y en el programa se nos pide definir las longitudes de pandeo con las que se realizarán las comprobaciones

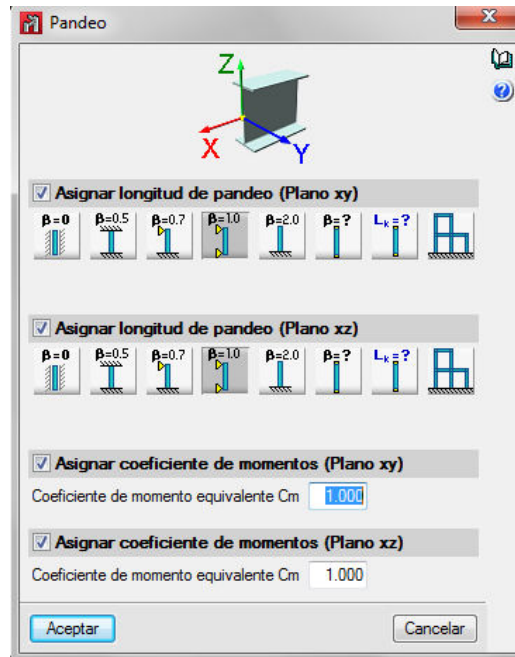


Imagen 81, Definición del pandeo en el programa de cálculo Cype.

Para ello recurriremos al capítulo IX, estados de límite último, artículo 35 donde se tratan los estados límite de inestabilidad. En este apartado se trata el pandeo en varios elementos estructurales con distintos tipos de secciones.

En nuestro caso nos interesa fijarnos en el apartado dedicado a elementos compuestos. Este apartado está en el capítulo XV, artículo 71, elementos compuestos. Iremos directamente al apartado 71.2.3.1 Elementos triangulados. En este apartado podremos saber el valor de  $L_{cor}$  de las barras del montante en el caso de la torre, este valor es el valor de  $\beta L$  que es la longitud de pandeo de la barra.

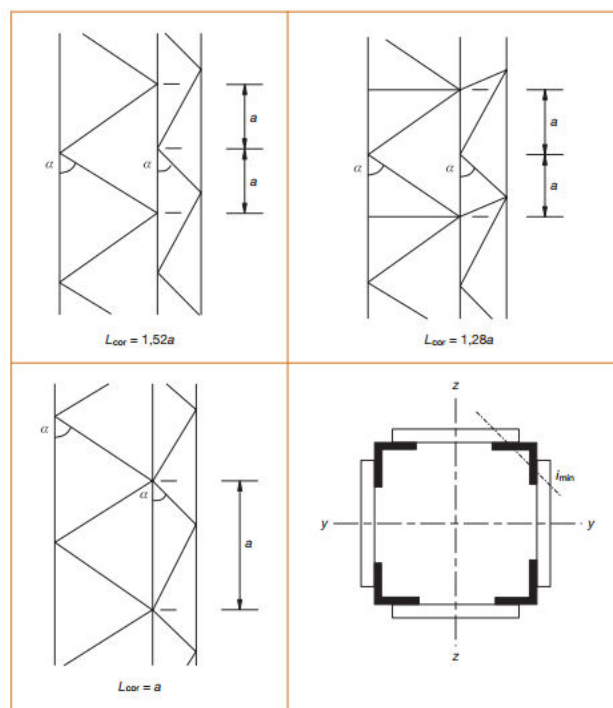


Imagen 82, Definición de la longitud de pandeo según el EAE.

El valor de la longitud de pandeo vendrá definido por la tabla de la imagen 82 extraída del EAE, donde podemos ver que en nuestro caso con la cercha tipo Warren con barras horizontales tendremos que:

$$L_{cor} = 1.28a$$

Sabiendo que  $a$  es de 1 metro de longitud a pandeo de la barra y el valor de  $\beta$  son:

$$L_{cor} = 1.28 * 1 = 1.28 \text{ m}$$

$$\beta = \frac{L_{cor}}{L} = \frac{1.28}{2} = 0.64$$

El anterior caso solo servirá para el caso de las vigas principales de la torre, también deberemos definir los valores de beta para las diagonales y montantes de la torre, y los cordones, diagonales y montantes de la pluma y contrapluma.

Para los montantes y diagonales de la torre se tomara beta con valor igual a 1, ya que el EAE nos indica que el valor de beta en caso de no variar los esfuerzos axiles a lo largo de la barra es la misma longitud de la barra.

Para los cordones (superiores e inferiores) de la pluma y las diagonales y montantes se tomara el valor de beta también igual a 1. De la misma forma que en el caso de los montantes y diagonales de la torre el valor de beta es el mismo de la longitud de la barra si se cumple que esta no varía sus esfuerzos axiles a lo largo de la misma. Para montantes y diagonales de la pluma se sigue el mismo criterio que en el caso de los de la torre.

Para la contrapluma se tomara valores de beta igual a 1 por lo expuesto en los anteriores párrafos ya que se cumple con las condiciones expuestas.

Para el portapluma también se establecerá beta igual a 1 dado que en caso de realizar el cálculo según lo establecido en este apartado sobre las vigas principales de la torre nos daría un valor de beta as favorable, al ser difícil de calcular debido a distancias variables, nos quedamos con el peor de los casos.

Si bien en el libro consultado para la implementación de la normativa nos indica que para perfiles huecos los valores de beta pueden ser inferiores a los mostrados, se ha optado por no acudir a esa sección debido a que se realiza una combinación entre barras huecas y perfiles laminados.

#### 7.2.4.3 Pandeo lateral

El pandeo lateral es otro aspecto a comprobar que se comprende también dentro de los estados límites de inestabilidad. El pandeo lateral solo se da en caso de perfiles abiertos, por lo que en nuestro proyecto la mayor parte de elementos no se verán comprometidos por el pandeo lateral, pero se deberán comprobar las vigas principales que realizan la función de mástiles y los carriles.

El programa para definir la longitud de pandeo, de la misma manera que en el anterior caso

nos pide el valor de beta y además, como se observa en la imagen 83 también necesitamos el coeficiente de momento equivalente  $C_m$ .

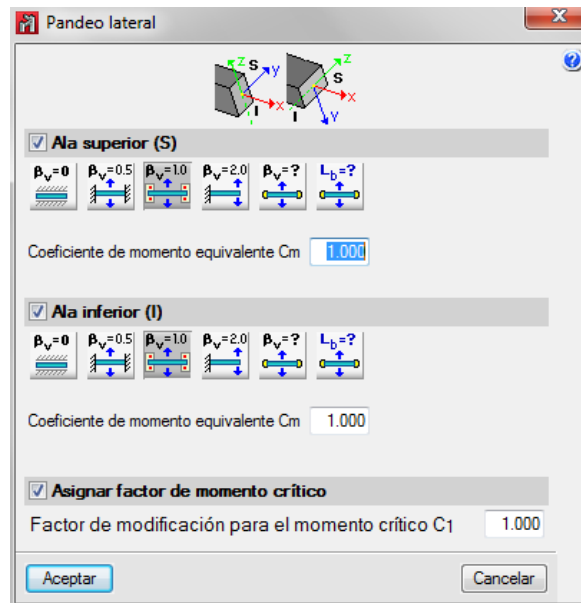


Imagen 83, Definición del pandeo lateral en Cype.

Para el caso de nuestra estructura y en los elementos donde se aplicará el pandeo lateral los valores serán los siguientes:

$$\beta = 1$$

$$C_m = 1$$

Dado que el programa nos deja elegir la barra comprendida entre arriostramientos por lo que la longitud será la longitud real de la barra y el valor de  $C_m$  se deja por defecto en 1 dado que al estar arriostrada por la celosía se debe tomar como 1.

#### 7.2.4.4 Flecha máxima

La flecha máxima es la deformación vertical que sufre una barra sometida a esfuerzos como se define en la imagen 84 extraída del EAE. El programa no realizará la comprobación a flecha a no ser que se lo indiquemos, en la imagen 85 se puede ver el menú donde se define la flecha máxima que podrán tener los elementos seleccionados.

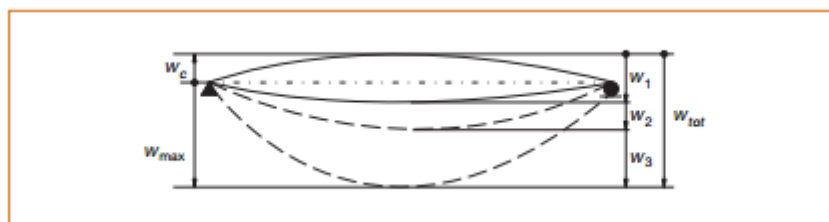


Imagen 84, Definición grafica de la flecha según EAE.

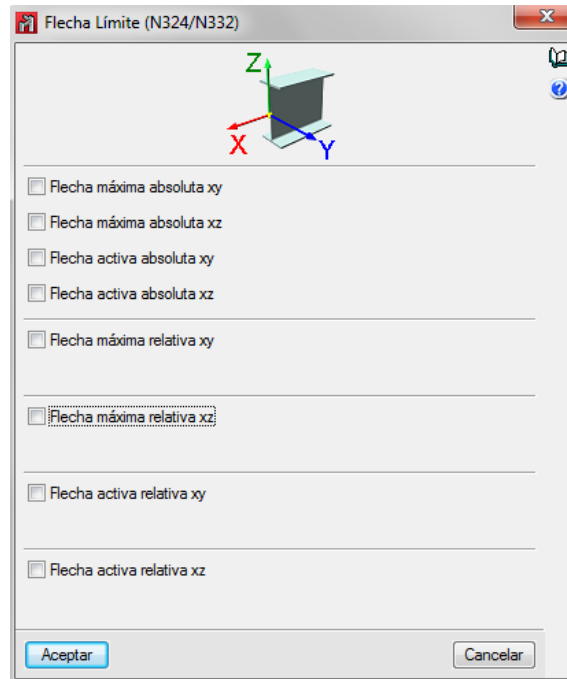


Imagen 85, Definición de la flecha límite en Cype.

La flecha máxima vendría definida por el reglamento específico de aplicación de la estructura de diseño. En el EAE podemos encontrar un poco de ayuda para definir la flecha, este caso nos debemos fijar en el capítulo X que trata sobre el estado límite de servicio, dentro de este capítulo el artículo 37 nos habla del estado límite de deformaciones. No he hallado una referencia explícita a la estructura de la pluma de la grúa torre, ni de la pluma que sería el caso donde más conviene comprobar que la flecha no supera un límite que pudiese comprometer la estructura o su funcionamiento.

Si bien no hay una referencia específica la grúa objeto de diseño sí que se hace mención a las vigas carrileras de pórticos grúa donde dice que la flecha máxima horizontal puede limitarse, de forma orientativa, a  $L/800$ . El EAE también indica que se recomienda fija un valor límite específico para cada proyecto particular, en función del uso y tipo de equipamiento. Dado que el EAE no nos indica claramente un valor, se asimilara  $L/800$  como flecha máxima para la pluma ya que esta servirá de carril.

Para el resto de elementos sujetos a la comprobación de la flecha se tomará por valor  $L/300$  que sería un valor típico en edificación.

### 7.2.5 Estudio

Para el estudio de la estructura y las comprobaciones pertinentes se dividirá la estructura en 3 partes más sencillas que se calcularán según el orden siguiente:

- Pluma: se realizara el cálculo de la estructura de la pluma simulando los apoyos que tendría en la estructura de la torre y castillete.
- Contrapluma: de la misma forma que en el caso de la pluma se calculará la contrapluma con los pesos pertinentes del lastre.



- Torre y castillete: finalmente se analizará el castillete simulando los esfuerzos producidos por la pluma y contrapluma con sus respectivas cargas, en el castillete y en los apoyos en la torre.

También se debe tener en cuenta que la grúa estará solicitada tanto a 1,6 toneladas de peso con la pluma de 50 metros, como 4 toneladas de peso con la pluma de 25 metros de longitud. Por lo que primero deberemos efectuar los cálculos en uno de los casos, realizar las comprobaciones con las mismas secciones en el otro y en caso de ser necesario hacer las modificaciones pertinentes teniendo en cuenta la intercambiabilidad de los módulos de la grúa.

La intercambiabilidad de los módulos se tomara siguiendo los siguientes aspectos:

- Los bloques de la torre, a excepción del primero de ellos ya que este será la unión con la base, deberán tener las mismas secciones de manera que se pueda facilitar el empleo de estos tanto en el caso de usar la grúa de 50 metros de altitud o menor.
- De los bloques que forman parte de la pluma tendrán intercambiabilidad los 2 tramos intermedios de 11,6 metros de longitud (el primero será distinto debido a que es el de unión a la torre), y los dos módulos de 5,2 metros de longitud.

### 7.2.6 Hipótesis adicionales

Teniendo ya la geometría deberemos definir las cargas que no son producidas por el propio peso de la estructura y que también queremos que el programa evalúe. Para ello contamos con el menú de hipótesis adicionales, en este menú podremos definir el nombre de las hipótesis que en cada caso se deben evaluar, para más adelante asignar las cargas a cada hipótesis.

#### 7.2.6.1 Hipótesis de carga de servicio

La hipótesis con la carga de servicio será la que se asignara para simular la carga de servicio que elevará la grúa, tendremos dos cargas de servicio:

- La de 1,6 toneladas en el caso de la pluma de 50 metros de longitud.
- La de 4 toneladas con la pluma de una longitud de 25 metros.

En ambos casos se situará la carga en tres puntos distintos, un punto próximo situado a 5,5 metros de distancia de la torre (distancia de seguridad para evitar el choque de la carga con la torre), en un punto medio de la torre, en este caso a la misma longitud que el cable, y finalmente en el punto más alejado. En la imagen 86 se pueden ver las distintas posiciones de la carga según la hipótesis con la carga de 1,6 toneladas. También se añadirá el peso del carro y aparejo que se asumirá como 500 Kg.

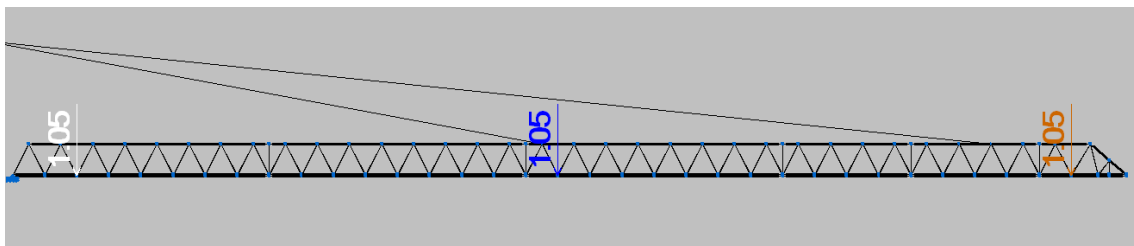


Imagen 86, Posición de las cargas definidas en Cype.

Cabe destacar que estas tres posiciones de carga se deberán seleccionar como incompatibles cuando estemos editando la hipótesis ya que no se dará el caso de tener la carga en dos puntos distintos a la vez.

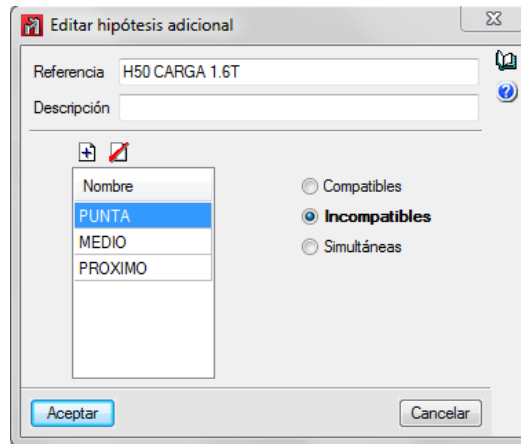


Imagen 87, Hipótesis introducidas en el programa para el caso de carga en servicio.

Las hipótesis de la carga se definirán como hipótesis de sobrecarga de uso.

#### 7.2.6.2 Hipótesis de viento

Para realizar la comprobación al viento de la estructura se hará uso de una combinación de normativas que nos permita evaluar la estructura añadiendo unas cargas de viento adecuadas. Las normativas empleadas serán el FEM y el eurocódigo 1 Acciones en la estructura – Parte 1-4 – Acciones generales – Acciones del viento.

Deberemos distinguir entre dos casos de carga de viento:

- Viento en estado de servicio: será el viento máximo al que la grúa estará expuesta mientras esté en funcionamiento, el viento en estado de servicio lo definiremos mediante el FEM, donde nos indica según la tabla 22 que el viento tendrá una velocidad de 20 m/s y siguiendo los cálculos mostrados en los apartados de los cálculos simples tendremos una presión del viento de:

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

Con una densidad del viento de  $1,23 \frac{Kg}{m^3}$ , tendremos una presión de  $243 N/m^2$ . Esta carga producida por el viento será introducida mediante paños, de manera que tendremos según el programa un esfuerzo de  $0.025 t/m^2$  que será aplicado sobre las caras de las barras expuestas. Este caso se aplicará para todas las partes y se tendrá en cuenta que pueda actuar en todas las direcciones para la torre teniendo en cuenta que cuando la dirección sea paralela a la longitud de la pluma el viento no ejercerá fuerza en la pluma.

- Viento fuera de servicio: para este caso se ha seguido el método mostrado en el eurocódigo, se ha elegido así ya que por los datos que se nos da en el libro de “Grúas, de Emilio Larrode” la distribución de fuerzas quedaría lejos de la realidad aumentando los esfuerzos en la grúa de una forma poco lógica. Si usamos el método mostrado en

el eurocódigo podremos introducir un paño con una presión debida al viento ascendente según la altura, algo que se asemejaría más a la realidad.

El cálculo empieza según el apartado 4.2 donde calcularemos la velocidad básica del viento según la zona en la que nos encontremos. En la imagen 88 podemos ver que los valores de viento para la zona de uso esperada para la grúa es de 28 m/s con la formula mostrada a continuación obtenemos la velocidad básica del viento:

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0}$$

Dónde:

$v_b$ : velocidad basica del viento.

$c_{dir}$ : factor que depende de la direccion, este valor se encuentra en el anexo nacional, también se recomienda usar 1 como valor del coeficiente, en nuestro caso sera 1.

$c_{season}$ : factor que depende de la estacion, lo podemos encontrar en el anexo nacional, también se recomienda usar 1 como valor del coeficiente, en nuestro caso sera 1.

$v_{b,0}$ : valor del viento obtenido de la imagen 88 anteriormente mostrada,  $29 \frac{m}{s}$ .

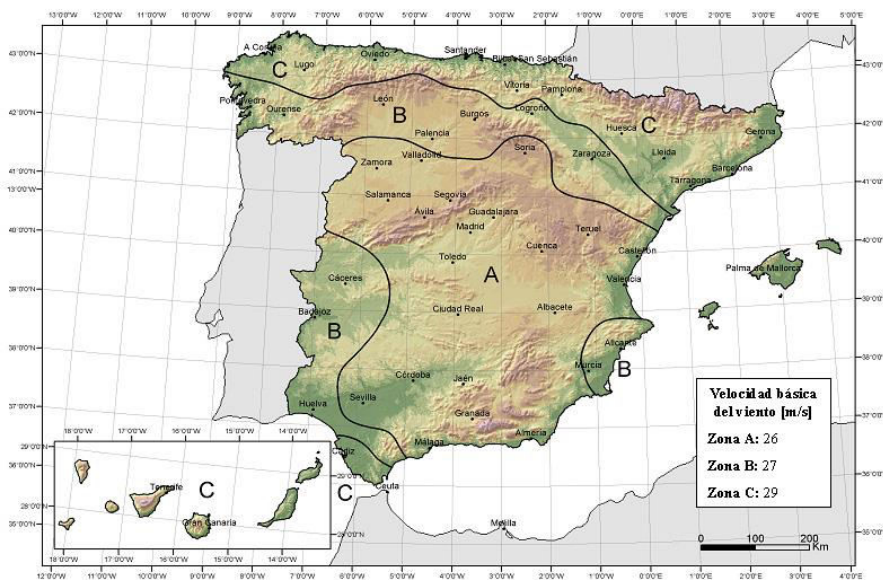


Figura D.1 Valor básico de la velocidad del viento,  $v_b$

Imagen 88, Valores del viento según el área geográfica.

Con los valores obtenidos de la imagen y los ya mencionados tenemos un valor de velocidad básica del viento:

$$v_b = 29 \frac{m}{s}$$

Ahora deberemos definir la categoría del terreno para más adelante calcular la variación de la velocidad del viento en función de la altura. Según la tabla 26 extraída del eurocódigo podremos definir la categoría del terreno como III, esto nos dará los siguientes valores según la tabla que más adelante serán usados:

$$z_0 = 0.3 m$$

$$z_{min} = 5 m$$

Terrain category		$z_0$ m	$z_{min}$ m
0	Sea or coastal area exposed to the open sea	0,003	1
I	Lakes or flat and horizontal area with negligible vegetation and without obstacles	0,01	1
II	Area with low vegetation such as grass and isolated obstacles (trees, buildings) with separations of at least 20 obstacle heights	0,05	2
III	Area with regular cover of vegetation or buildings or with isolated obstacles with separations of maximum 20 obstacle heights (such as villages, suburban terrain, permanent forest)	0,3	5
IV	Area in which at least 15 % of the surface is covered with buildings and their average height exceeds 15 m	1,0	10

NOTE: The terrain categories are illustrated in A.1.

Tabla 26, Valores de  $z$  y  $z_0$  según el terreno.

Para el cálculo de la variación de la velocidad según la altura se empleará la siguiente fórmula extraída del eurocódigo:

$$v_m(z) = c_r(z) * c_o(z) * v_b$$

Donde tendremos:

$c_r(z)$ : factor de rugosidad del terreno.

$c_o(z)$ : factor de orografía del terreno, valor recomendado de 1.

El cálculo del factor de rugosidad tomará distintos valores según la altura. En el eurocódigo se indica que el valor que tomará  $c_r(z)$  variará según:

$$c_r(z) = K_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \quad \text{para } z \leq z_{min}$$

Dónde:

$K_r$ : factor del terreno que depende de la rugosidad de este se calculará siguiendo la formula expuesta más abajo.

Para nuestro caso deberemos calcular el factor para una altura de 48,6 (altura máxima de la torre) y a 5 metros ya que es la altura mínima y hasta esa altitud el viento tomara ese valor de velocidad. Con estos valores podremos hacer una distribución variable en la que de 0 a 5 metros de altitud tomara los valores con  $c_r(5)$  y de los 5 a los 48,6 metros tomara un valor ascendente que empezara con el valor de la presión obtenido a partir de  $c_r(5)$  hasta el valor de  $c_r(48,6)$ . Para el cálculo de las velocidades según la altura primero deberemos obtener el factor  $K_r$  el cual depende únicamente de la categoría del terreno:

$$K_r = 0.19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07}$$

Donde tenemos:

$z_{0,II}$ : es el valor de  $z_0$  para la categoría II de terreno, que es 0,05 m.

Por tanto nuestro valor de  $K_r$  será el siguiente:

$$K_r = 0.19 * \left(\frac{0.3}{0.05}\right)^{0.07} = 0.215$$

Y finalmente para las distintas alturas tendremos un coeficiente de rugosidad, unas

velocidades y unas presiones debidas al viento de:

$$-z \leq 5 \text{ m:}$$

$$c_r(5) = K_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0.215 * \ln\left(\frac{5}{0.3}\right) = 0.605$$

$$v_m(5) = c_r(z) * c_o(z) * v_b = 0.605 * 1 * 29 = 17.545 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para la presión del mismo modo que en el caso del estado en servicio se empleara la misma fórmula dándonos un valor de presión del viento de:

$$q = \frac{1}{2} \rho * v_w^2 = \frac{1}{2} 1.23 * 17.545^2 = 189.314 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

En el programa introduciremos un paño de  $0.019 \frac{\text{t}}{\text{m}}$ .

$$-z = 48.6 \text{ m:}$$

$$c_r(48.6) = K_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0.215 * \ln\left(\frac{48.6}{0.3}\right) = 1.094$$

$$v_m(5) = c_r(z) * c_o(z) * v_b = 1.094 * 1 * 29 = 31.726 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$q = \frac{1}{2} \rho * v_w^2 = \frac{1}{2} 1.23 * 31.726^2 = 619.021 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

En el programa introduciremos un paño de  $0.062 \frac{\text{t}}{\text{m}}$ .

Con los valores obtenidos podremos definir las hipótesis del viento para la comprobación de la estructura.

#### 7.2.6.3 Hipótesis de carga de mecanismos

En esta hipótesis se definirán las cargas producidas por los pesos de los mecanismos. Se tendrán en cuenta las siguientes cargas:

- La carga producida por la corona de giro que se estimará en 25,9 KN distribuidos en las cuatro esquinas de la parte más alta de la torre (sin contar el castillete). Cabe destacar que se ha dejado un espacio entre torre y castillete para el acoplamiento de la corona de giro.
- El peso producido por los tambores de enrollamiento que se estimara en 7 KN (dato estimado a partir del peso en la grúa Liebherr) y se situará entre 4 puntos en la contrapluma a una distancia de 7 metros de longitud de la torre.

Estas cargas serán definidas como peso muerto debido a que siempre estarán presentes en la estructura.

#### 7.2.6.4 Hipótesis del lastre de contrapeso

En este caso definiremos la carga producida por el contrapeso. Esta carga definida como peso muerto se definirá en cuanto se tenga el esfuerzo producido por el peso de la pluma. Se definirá según la siguiente formula:

$$F_{x,contrapeso} + F_{x,peso propio contrapluma} = \frac{F_{x,carga}}{2} + F_{x,peso propio pluma}$$

$F_{x,contrapeso}$ : fuerza en eje x producida por los tensores del contrapeso sin tener en cuenta el propio peso.

$F_{x,carga}$ : fuerza en el eje x producida por los tensores con solo la carga.

$F_{x,peso\ propio\ pluma}$ : fuerza en el eje x producida por los tensores con el peso de la pluma.

$F_{x,peso\ propio\ contrapluma}$ : fuerza en el eje x producida por el propio peso de la contrapluma.

Se deberán determinar distintos lastres para el caso de 1,6 toneladas y de 4 toneladas.

La fuerza producida por los contrapesos se dispondrá distribuida sobre las barras con un esfuerzo repartido equivalente al contrapeso.

### 7.2.7 Asignación de perfiles

A continuación describiremos los perfiles usados para definir la estructura en sus diferentes partes. Más adelante se comprobarán y se seleccionarán dentro del grupo elegido perfiles suficientemente resistentes con las herramientas que nos da Cype. A continuación se muestra una lista de las distintas partes y la familia de sección elegida.

- Pluma: en la pluma se distinguirán distintos elementos:
  - Diagonales, se emplearán perfiles de la familia CHS que son barras de perfil tubular circular.

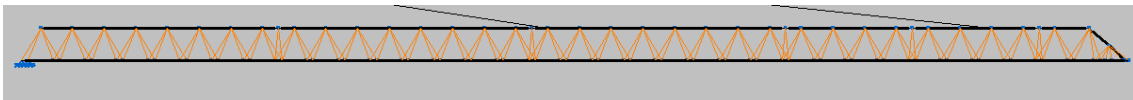


Imagen 89, Diagonales y montantes con perfil CHS de la pluma.

- Cordón superior, se definirá como un perfil SHS de lados iguales.

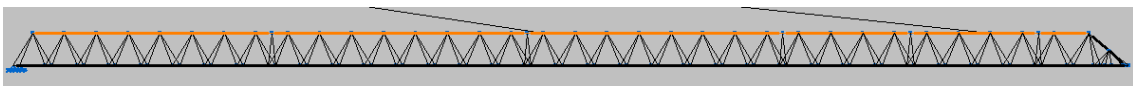


Imagen 90, Cordón con perfil tubular cuadrado SHS.

- Vigas carril (cordones inferiores), se definirán con un perfil UPE que deberá tener un ancho suficiente para que las ruedas del carro se acoplen bien.

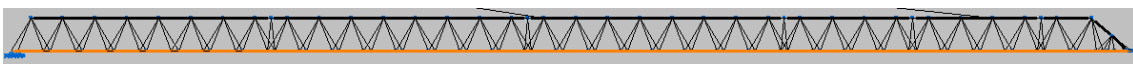


Imagen 91, Cordones inferiores con perfil UPE.

- Contrapluma:
  - Montantes, se definirán con un perfil tubular cuadrado.

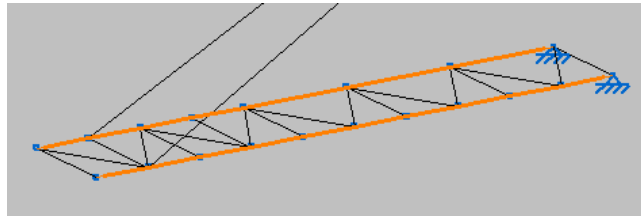


Imagen 93, Cordones de la contrapluma con perfil SHS.

- Diagonales, se empleará un perfil CHS.

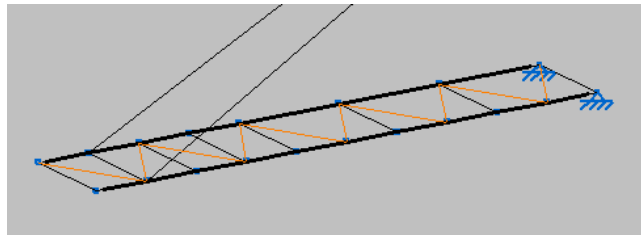


Imagen 94, Diagonales de perfil CHS.

- Barras horizontales, se usarán también perfiles de la familia CHS.

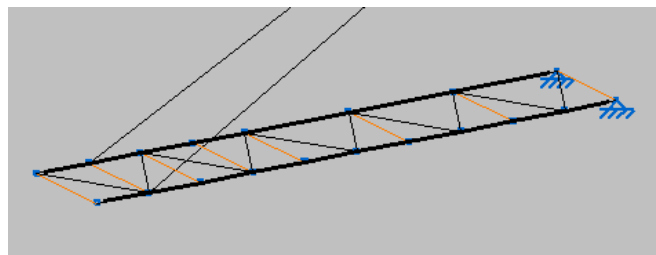


Imagen 96, Montantes de perfil CHS.

- Torre y castillete:
  - Cordones de la torre, se usará un perfil cuadrado SHS.

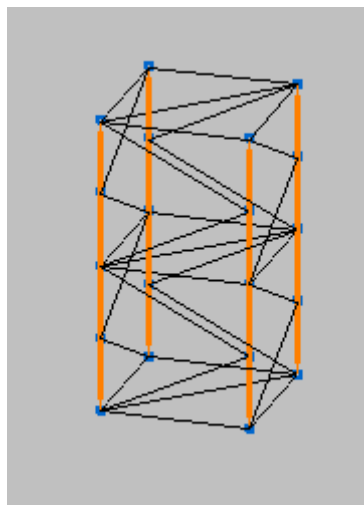
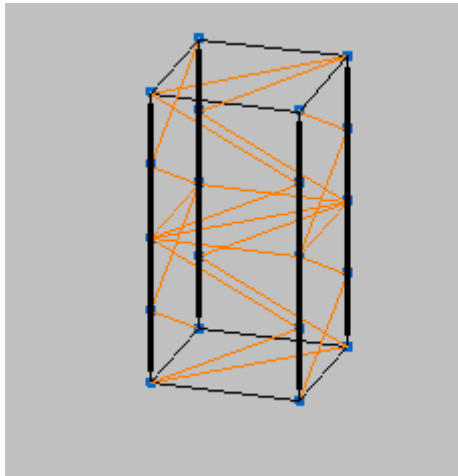


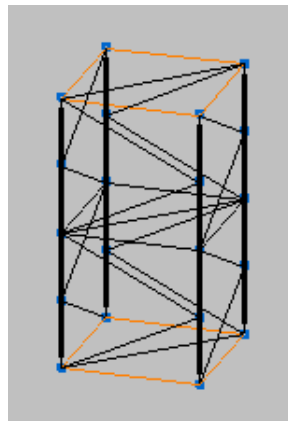
Imagen 97, Cordones de la torre en SHS.

- Diagonales y montantes de la torre, se usarán perfiles tubulares redondos CHS.



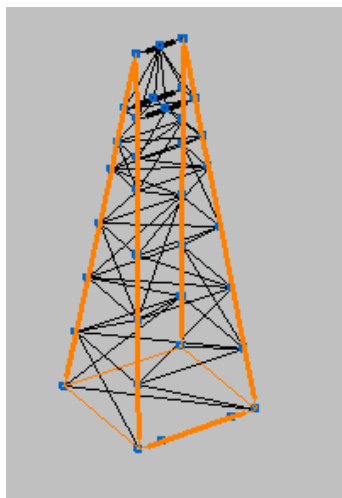
*Imagen 98, Diagonales y montantes de la torre de perfil CHS.*

- Barras horizontales del principio y final de módulo, se usarán perfiles en L.



*Imagen 99, Montantes superiores e inferiores de los módulos en perfil L.*

- Perfiles de los cordones del portaflechas, se usarán perfiles SHS.



*Imagen 100, Montantes del portaflechas en SHS.*



- Perfiles de las diagonales y montantes del portaflechas, se usarán perfiles CHS.

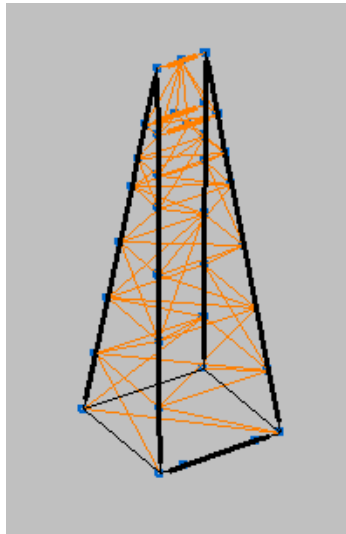


Imagen 101, Diagonales, montantes y resto de barras en perfil CHS.

## 7.2.8 Resultados

Los resultados se dividirán según se ha definido anteriormente, la pluma, la contrapluma y la torre y castillete.

### 7.2.8.1 Resultados de la pluma

Como ya se ha comentado anteriormente la pluma de la grúa deberá ser analizada en dos casos:

- Pluma de 25 metros de longitud compuesta por el primer módulo de 11,6 metros, otro de 11,6 metros (en este caso distinto al primero) y la punta formada por el módulo de 3,95 metros de longitud. En este caso la pluma se cargará con un total de 4,5 toneladas de peso de carga de servicio, esta carga se situará en 3 puntos distintos según se puede ver en la imagen 102.

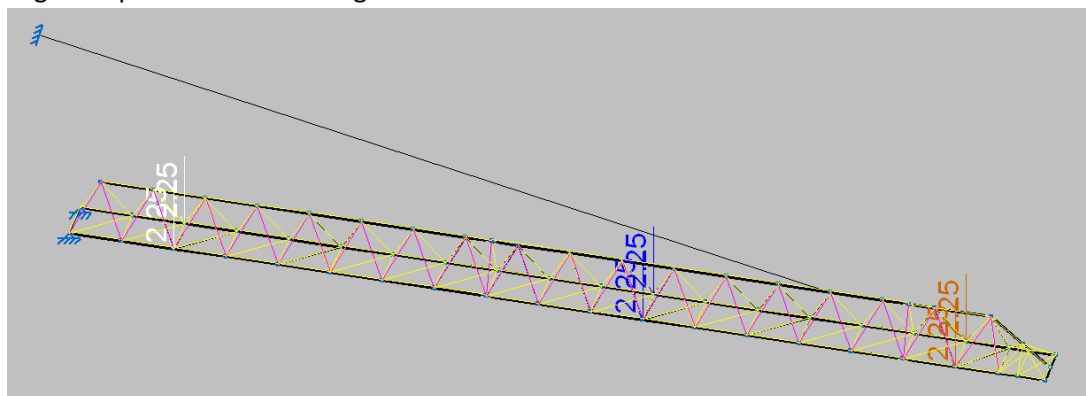


Imagen 102, Distribución de las cargas para la pluma de 25 metros.

- Pluma de 50 metros de longitud compuesta por la totalidad de módulos, 3 módulos de 11,6 metros de longitud (donde el primero tendrá una configuración distinta a los dos siguientes), 2 de 5,8 metros de longitud y el tramo final con la punta de 3,95 metros de longitud. En este caso como ya se ha indicado anteriormente se cargará la pluma con una carga de servicio de 2,1 toneladas, como en el caso de los 25 metros se analizara la estructura con la carga en tres puntos distintos según se puede ver en la imagen 103.

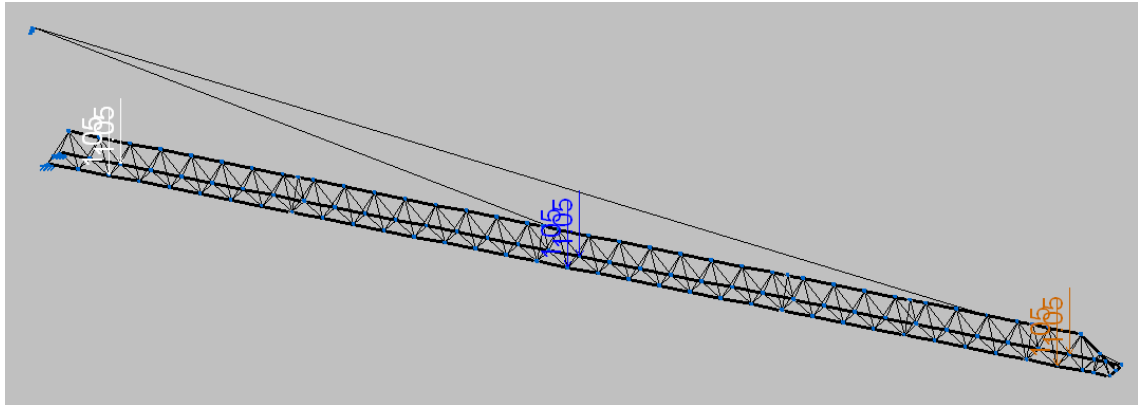


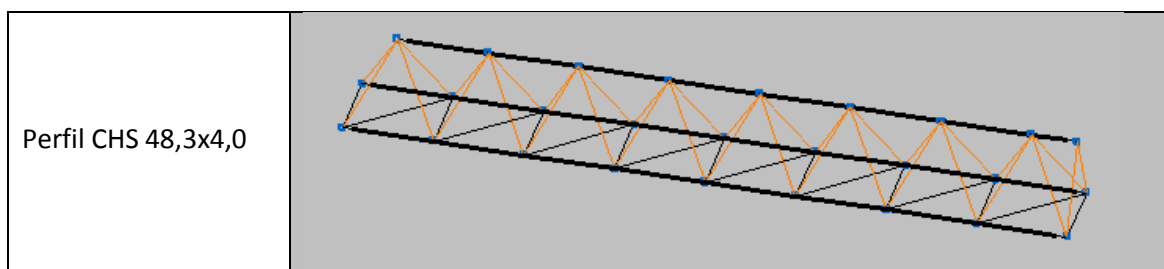
Imagen 103, Distribución de las cargas para la pluma de 50 metros.

Teniendo las hipótesis, la geometría y las cargas se ha procedido al cálculo y comprobación de la estructura seleccionando para aquellos elementos que no cumplieran unas secciones más resistentes, siempre teniendo en cuenta una relación entre eficiencia y peso buena de manera que se ha pretendido que la estructura sea lo más liviana posible. También con anterioridad se definieron grupos para facilitar el dimensionamiento y también para unificar perfiles según su función.

#### 7.2.8.2 Perfiles seleccionados para la pluma

Los perfiles finalmente seleccionados se muestran a continuación para cada módulo de la pluma:

- Módulo inicial de 11,6 metros de longitud:



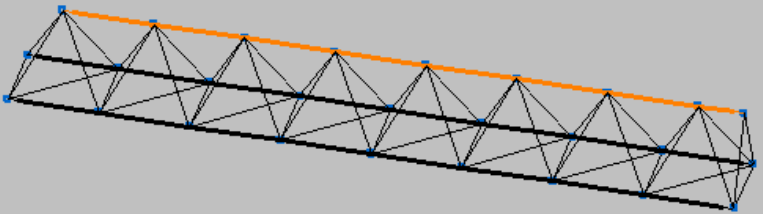
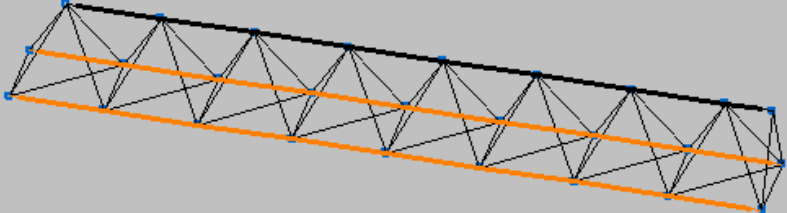
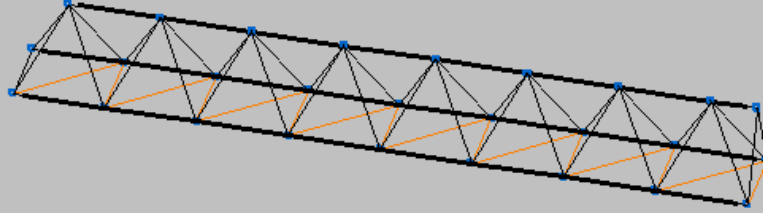
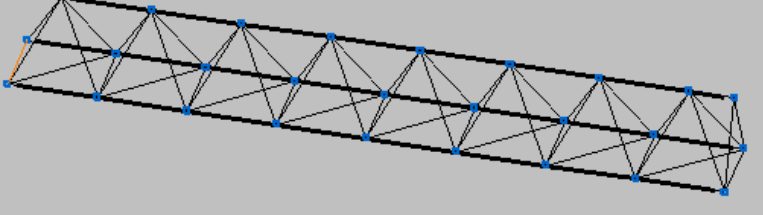
<p>Perfil SHS 130x4</p>	
<p>Perfil UPE 220</p>	
<p>Perfil CHS 42,4x4</p>	
<p>Perfil L 200x200x28</p>	

Tabla 27, Definición de las barras del módulo de 11,6 metros.

En la imagen 104 se puede ver una imagen de la estructura tridimensional con los perfiles expuestos.

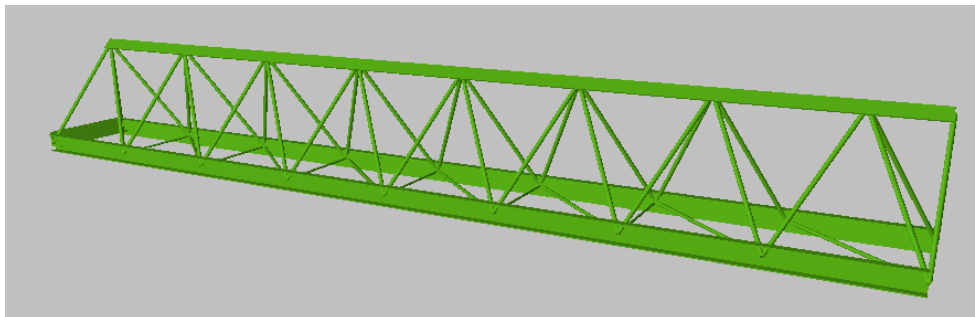


Imagen 104, Módulo de 11,6 metros mostrado por Cype .

El peso total del módulo inicial según lo calculado por CYPE será de 1588,98 Kg.

- Módulo de 11,6 metros de longitud intermedio:

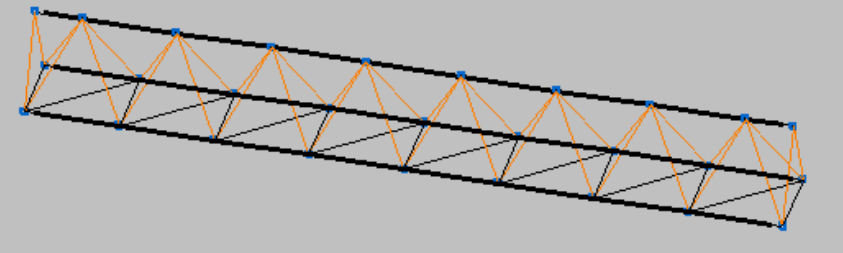
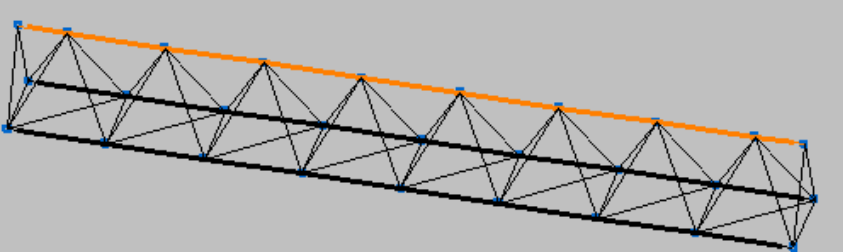
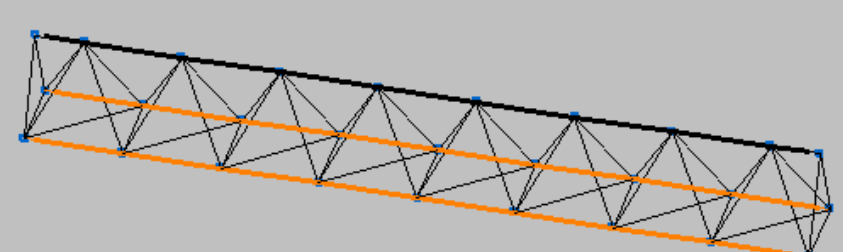
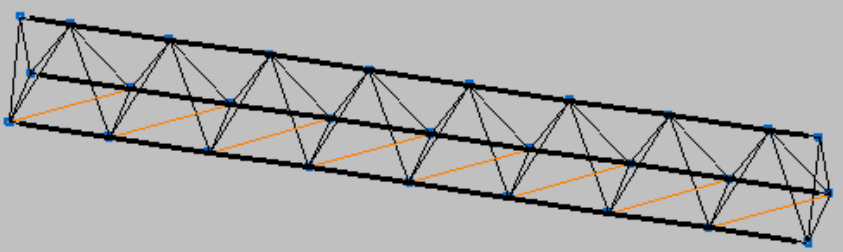
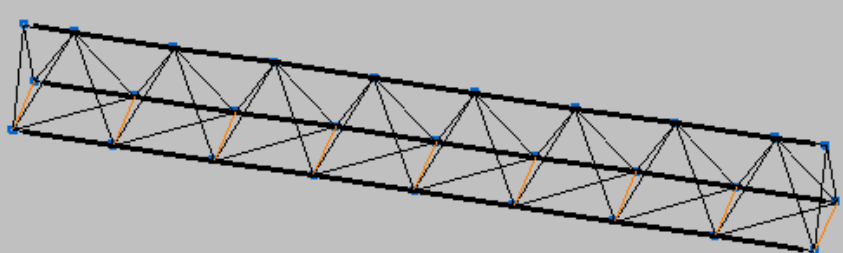
<p>Perfil CHS 48,3x4</p>	
<p>Perfil SHS 130X4</p>	
<p>Perfil UPE 220</p>	
<p>Perfil CHS 42,4x4</p>	
<p>Perfil CHS 42,4x4</p>	

Tabla 28, Definición de las barras del módulo de 11,6 metros intermedio de la pluma.

En la imagen 105 se muestra el módulo de forma tridimensional con los perfiles definidos.

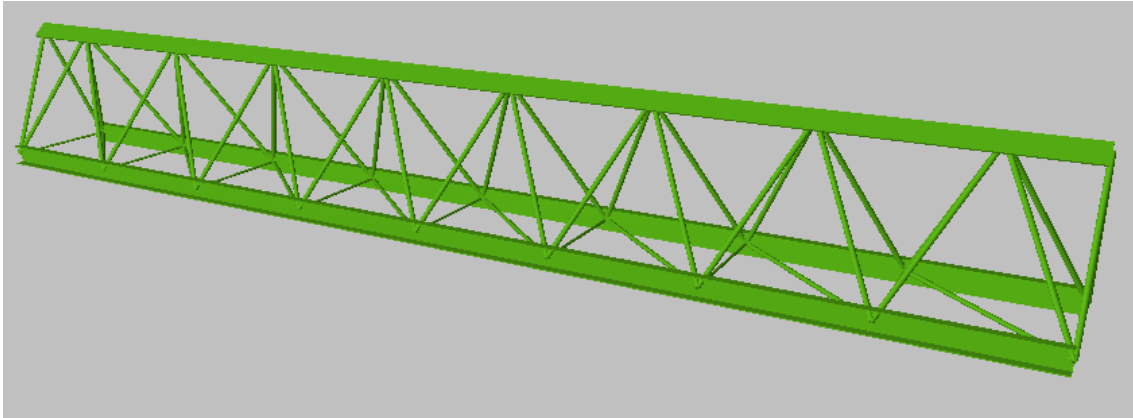


Imagen 105, Modulo de 11,6 metros intermedio mostrado por Cype .

El peso total del módulo intermedio de 11,6 metros de la pluma será de 1657,78 Kg

- Módulo de 5,8 metros de longitud:

<p>Perfil CHS 48,3x4</p>	
<p>Perfil SHS 130x4</p>	
<p>Perfil UPE 220</p>	
<p>Perfil CHS 42,4x4</p>	

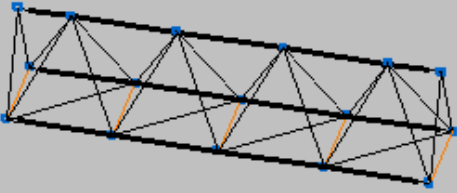
<p>Perfil CHS 42,4x4</p>	
--------------------------	--

Tabla 29, Definición de las barras del módulo de 5,8 metros de la pluma.

En la imagen 106 se puede observar el módulo de forma tridimensional con los perfiles asignados.

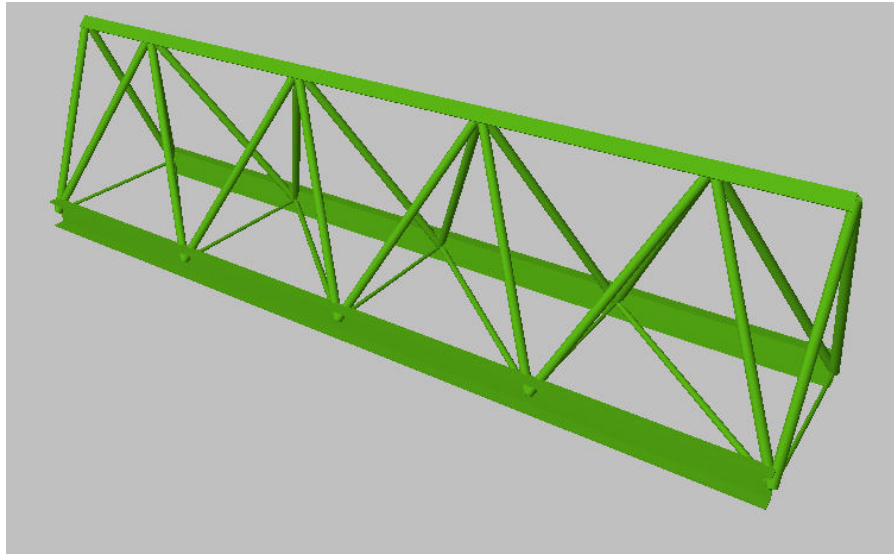
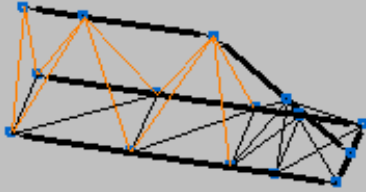
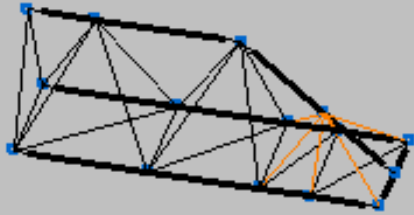


Imagen 106, Módulo de 5,8 metros intermedio mostrado por Cype .

El peso del módulo de 5,8 metros de la pluma será de 547,63 Kg.

- Punta de la pluma de 3,95 metros de longitud:

<p>Perfil CHS 48,3x4</p>	
<p>Perfil CHS 26,9x2,5</p>	

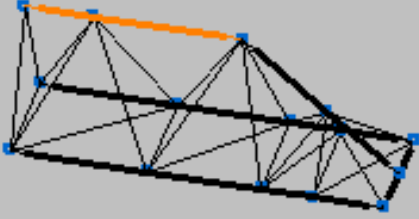
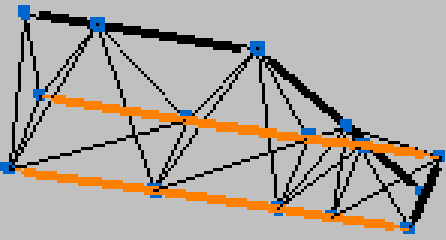
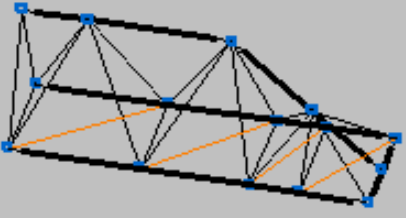
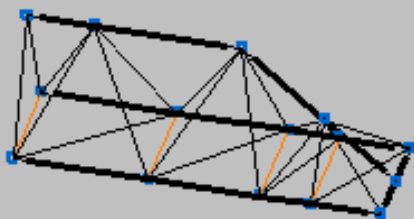
<p>Perfil SHS 130X4</p>	
<p>Perfil UPE 220</p>	
<p>Perfil CHS 26,9x2,5</p>	
<p>Perfil CHS 26,9x2,5</p>	

Tabla 30, Definición de las barras del módulo de 5,8 metros de la pluma.

En la imagen 107 se puede observar la punta con las secciones aplicadas.

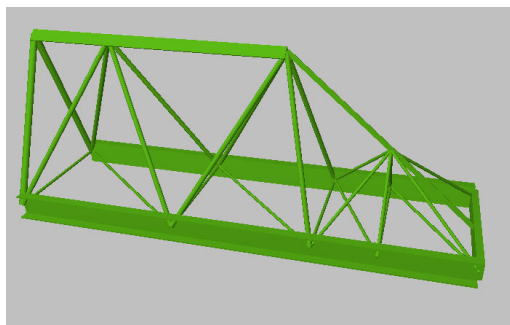


Imagen 107, Modulo de la punta de la pluma mostrado por Cype.

El peso del módulo de la punta de la torre según CYPE será de 429,54 Kg

### 7.2.8.3 Reacciones producidas por la pluma

A continuación, se mostrarán unas tablas con los valores de las reacciones producidas por la pluma y los tensores en sus puntos de unión con la torre. Las tablas se dividirán para el caso de la pluma corta y la larga, y también se separarán entre los esfuerzos producidos por el peso propio, la carga sin tener en cuenta el peso propio y con la suma de los dos ya que estos valores nos serán útiles para definir en el siguiente punto el contrapeso adecuado.

- Grúa de 25 metros de longitud con la carga de servicio de 4,5 toneladas:

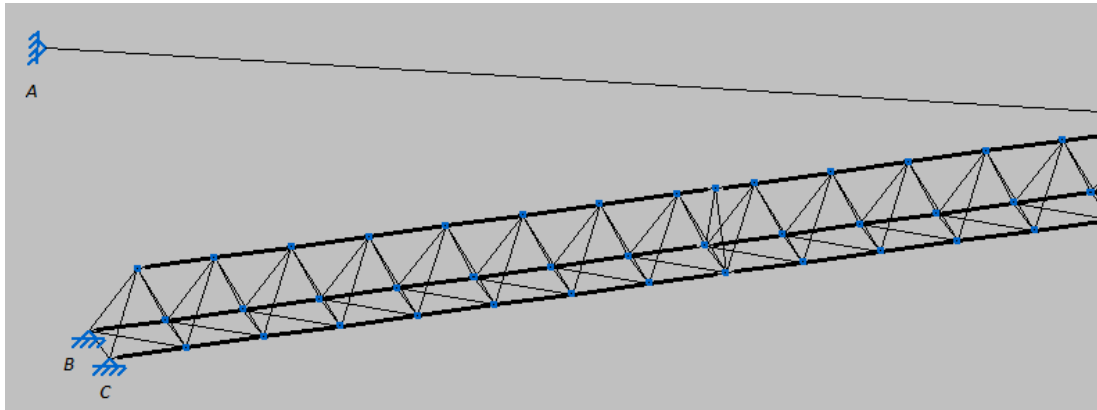


Imagen 108, Puntos de apoyo de la pluma de 25 metros a la torre.

- Reacciones en el caso del peso propio

Reacciones	A	B	C
Rx	-8,894	4,447	4,447
Ry	0,000	-0,406	0,406
Rz	1,857	0,997	0,997

Tabla 31, Reacciones del peso propio en los puntos de apoyo para la pluma de 25 m, en toneladas.

- Reacciones en el caso de la carga en punta

Reacciones	A	B	C
Rx	-19,154	-9,577	9,577
Ry	0,000	-0,142	0,142
Rz	4,000	0,250	0,250

Tabla 32, Reacciones con la carga en punta en los puntos de apoyos para la pluma de 25 m, en toneladas.

- Reacciones con la combinación de ambos

Reacciones	A	B	C
Rx	-28,048	-5,130	14,024
Ry	0,000	-0,548	0,548
Rz	5,857	1,247	1,247

Tabla 33, Reacciones por la combinación de ambas cargas en los apoyos para la pluma de 25 m, en toneladas.



- Reacciones producidas por el viento sin tener en cuenta los pesos:

Reacciones	A	B	C
<b>R<sub>x</sub></b>	-0,749	-8,060	8,809
<b>R<sub>y</sub></b>	0,000	0,581	0,214
<b>R<sub>z</sub></b>	0,156	0,287	0,472

Tabla 34, Reacciones producidas por la acción del viento en los apoyos para la pluma de 25 m, en toneladas.

- Reacciones producidas por la combinación del viento y el peso propio:

Reacciones	A	B	C
<b>R<sub>x</sub></b>	-9,643	-3,613	13,256
<b>R<sub>y</sub></b>	0,000	0,175	0,620
<b>R<sub>z</sub></b>	2,013	1,284	1,469

Tabla 35, Reacciones producidas por la combinación del viento y peso propio en los apoyos para la pluma de 25 m, en toneladas.

- Reacciones con la combinación de todas las cargas:

Reacciones	A	B	C
<b>R<sub>x</sub></b>	-28,797	-13,190	22,833
<b>R<sub>y</sub></b>	0,000	0,033	0,762
<b>R<sub>z</sub></b>	6,013	1,534	1,719

Tabla 36, Reacciones producidas por la combinación de todas las cargas en los apoyos para la pluma de 25 m, en toneladas.

- Grúa de 50 metros de longitud con carga de servicio de 2,1 toneladas:

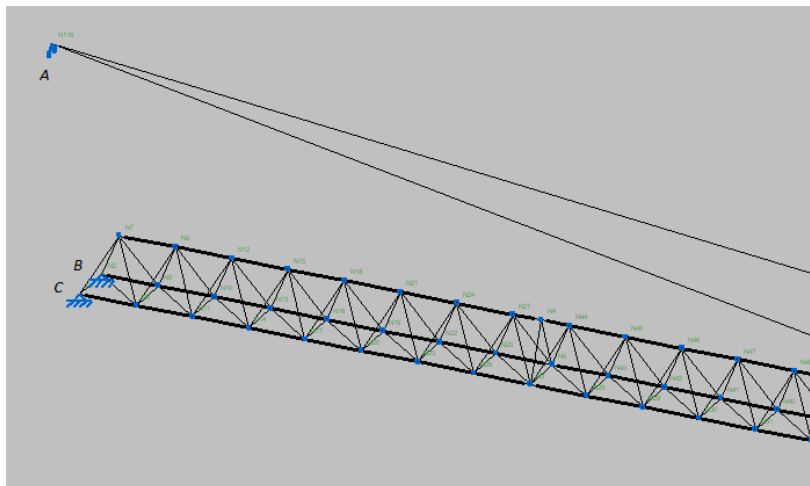


Imagen 109, Puntos de apoyo de la pluma de 50 metros a la torre.

- Reacciones en el caso del peso propio

Reacciones	A	B	C
<b>R<sub>x</sub></b>	-26,262	13,131	13,131
<b>R<sub>y</sub></b>	0,000	-0,558	0,558
<b>R<sub>z</sub></b>	3,990	1,278	1,278

Tabla 37, Reacciones del peso propio en los puntos de apoyo para la pluma de 50 m, en toneladas.

- Reacciones en el caso de la carga en punta

Reacciones	A	B	C
Rx	-16,994	8,497	8,497
Ry	0,000	-0,164	0,164
Rz	1,479	0,310	0,310

Tabla 38, Reacciones con la carga en punta en los puntos de apoyos para la pluma de 50 m, en toneladas.

- Reacciones con la combinación de ambos

Reacciones	A	B	C
Rx	-43,256	21,628	21,628
Ry	0,000	-0,721	0,721
Rz	5,469	1,589	1,589

Tabla 39, Reacciones por la combinación de ambas cargas en los apoyos para la pluma de 50 m, en toneladas.

- Reacciones producidas por el viento sin tener en cuenta los pesos:

Reacciones	A	B	C
Rx	-2,820	33,457	-30,637
Ry	0,000	-1,268	-0,294
Rz	0,440	0,855	-0,625

Tabla 40, Reacciones producidas por la acción del viento en los apoyos para la pluma de 50 m, en toneladas.

- Reacciones producidas por la combinación del viento y el peso propio:

Reacciones	A	B	C
Rx	-29,082	46,588	-17,506
Ry	0,000	-1,826	0,264
Rz	4,430	2,133	0,653

Tabla 41, Reacciones producidas por la combinación del viento y peso propio en los apoyos para la pluma de 50 m, en toneladas.

- Reacciones con la combinación de todas las cargas:

Reacciones	A	B	C
Rx	-46,076	55,085	-9,009
Ry	0,000	-1,990	0,428
Rz	5,909	2,443	0,963

Tabla 42, Reacciones producidas por la combinación de todas las cargas en los apoyos para la pluma de 50 m, en toneladas.

Más adelante prestaremos más atención a estos resultados para realizar el diseño de los bulones que unirán la grúa con la estructura de la torre.

#### 7.2.8.4 Resultados específicos de la pluma

A continuación mostraremos unas imágenes que nos ayudaran a entender cuáles son las partes más solicitadas de la pluma y como se producen las distribuciones de los esfuerzos a lo

largo de esta.

El esfuerzo más importante en una estructura triangulada o cercha es el axil, este esfuerzo es el predominante en las barras por tanto nos fijaremos en este tipo de esfuerzo. La distribución del axil a lo largo de la estructura en el caso con más carga (combinación del peso propio, carga en punta y viento) es el mostrado en la imagen 110 y 111.

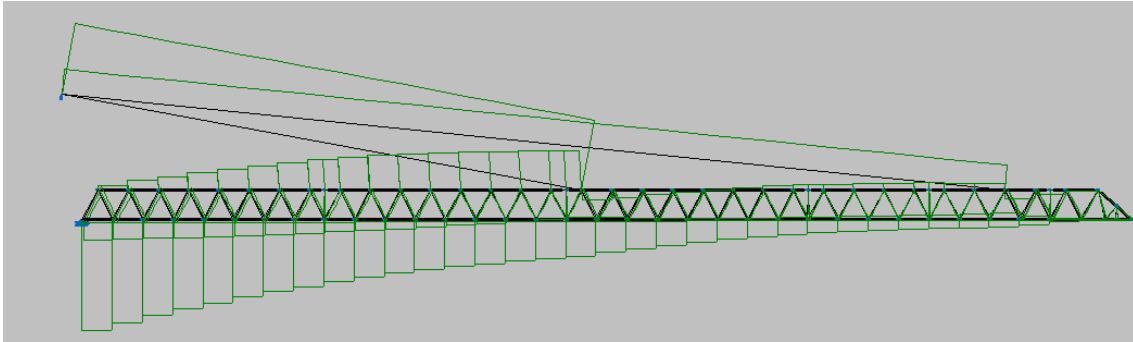


Imagen 110, Distribución de axiles a lo largo de la pluma de 50 metros de longitud.

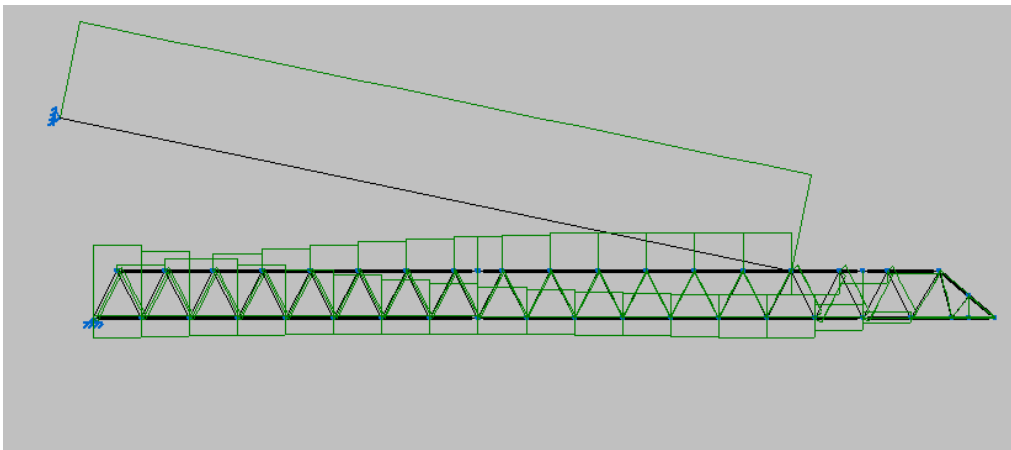


Imagen 111, Distribución de axiles a lo largo de la pluma de 25 metros de longitud.

Como es de esperar el esfuerzo axil va en aumento a medida que nos acercamos al punto de unión con la torre esto es obviamente producido por el propio peso de la pluma. también cabe prestar atención en el cordón superior donde vemos que cuando el tensor aparece este produce unos esfuerzos de compresión en el cordón muy elevados, en el caso expuesto es de 26,5 toneladas en el caso de la pluma de 50 metros y de 16 toneladas en el caso de los 25 metros este es el mayor esfuerzo producido en la pluma de 50 metros mientras que en la pluma de 25 metros de longitud el mayor esfuerzo se produce en la viga UPE que une con la torre con un esfuerzo axil de valor 21,855 toneladas. El primer tensor no produce tal efecto debido a que este solo soporta parte de la carga de servicio y no gran parte del peso de la pluma como si es el caso del segundo cordón.

También podemos comprobar que las diagonales y montantes tienen valores de compresión muy inferiores a los presentados por los cordones superiores e inferiores.

#### 7.2.8.5 Deformaciones producidas

A continuación mostraremos las deformaciones producidas en cada uno de los casos en la

pluma de la grúa. En el caso del viento cabe tener en cuenta que es la máxima velocidad justo antes de parar las operaciones de la grúa y ponerla en veleta libre ya que no se acepta su funcionamiento más allá de la velocidad anteriormente especificada ( 20 m/s).

Para la pluma de 25 metros tendremos los siguientes resultados:

- Deformaciones en el caso del peso propio:

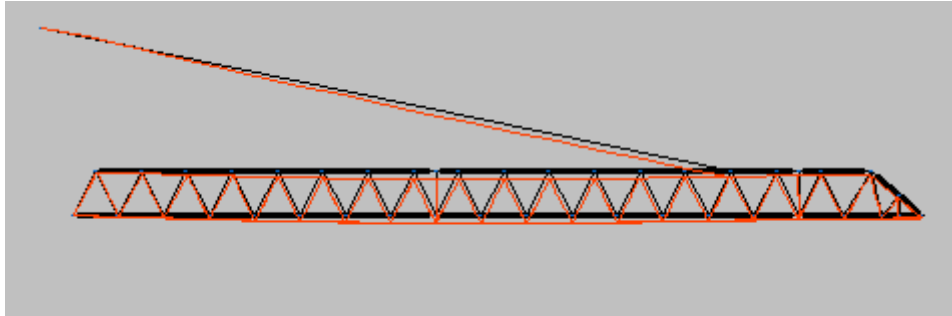


Imagen 112, Deformación producida en la pluma de 25 metros con el peso propio a escala 50.

La máxima deformación se produce en las barras situadas al inicio del segundo módulo y es de hasta 4,907 mm.

- Deformaciones en el caso de la carga en punta (teniendo en cuenta el peso propio):

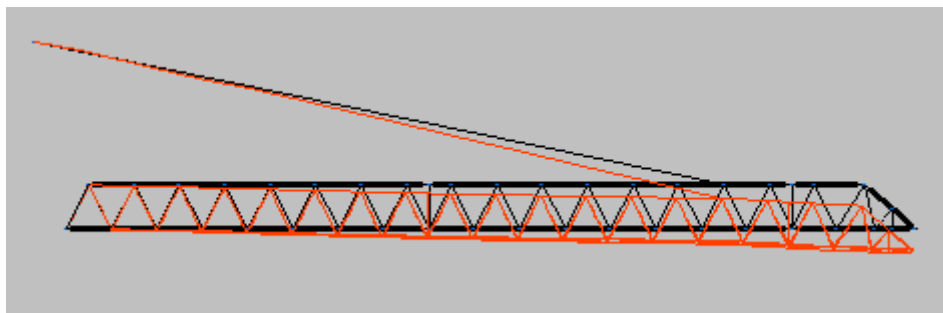


Imagen 113, Deformación producida en la pluma de 25 metros añadiendo la carga a escala 50.

De la misma forma que en el anterior caso el desplazamiento máximo se produce en la punta con un valor de 12,932 mm.

- Deformaciones producidas por el viento:  
-Con la carga máxima en punta:

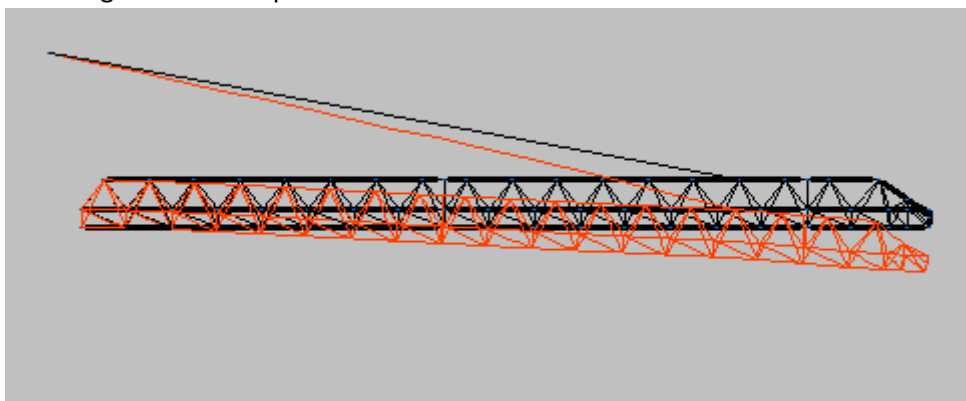


Imagen 114, Deformación producida en la pluma de 25 metros con el viento, el peso propio y la carga en punta a escala 50.

La máxima deformación se produce en la punta con un desplazamiento de 37.537 mm, en este caso la deformación es más destacable en el eje Y debido a la carga del viento.

-Sin la carga máxima aplicada:

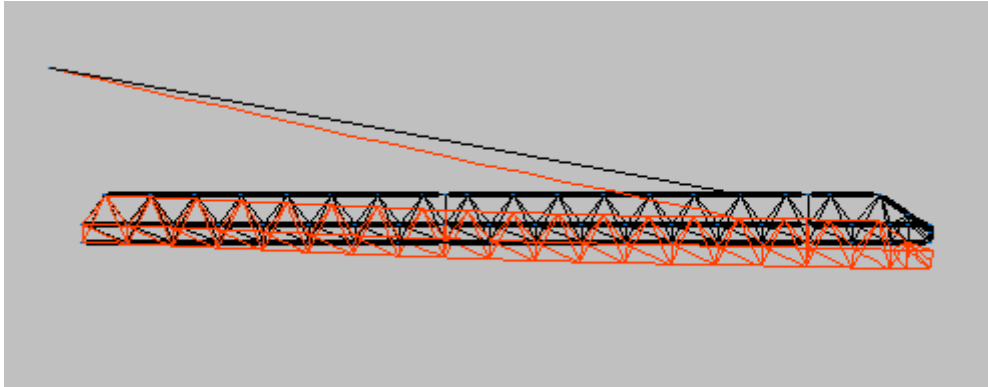


Imagen 115, Deformación producida en la pluma de 25 metros con el viento y el peso propio a escala 50.

La máxima deformación producida en la punta da un desplazamiento máximo de 32,211 mm.

Para la pluma de 50 metros tendremos los siguientes resultados:

- Deformaciones en el caso del peso propio:

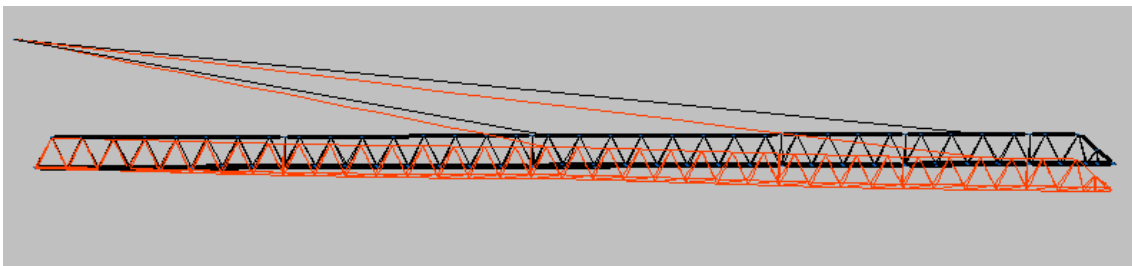


Imagen 116, Deformación producida en la pluma de 50 metros con el peso propio a escala 50.

La máxima deformación se produce en la punta con un desplazamiento de hasta 26,264 mm.

- Deformaciones en el caso de la carga en punta (teniendo en cuenta el peso propio):

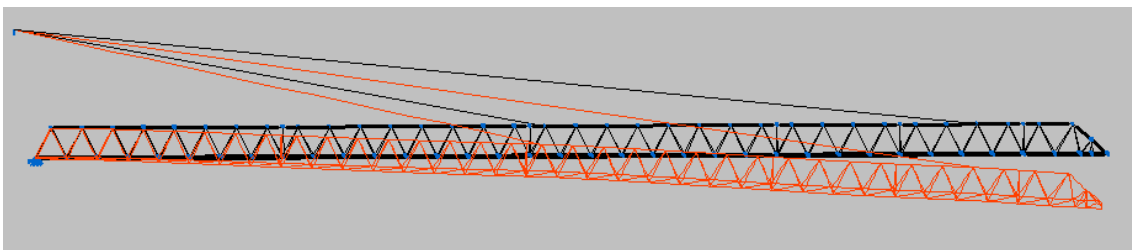


Imagen 117, Deformación producida en la pluma de 50 metros añadiendo la carga en la punta a escala 50.

De la misma forma que en el anterior caso el desplazamiento máximo se produce en la punta con un valor de 48,961 mm.

- Deformaciones producidas por el viento:  
-Con la carga máxima en punta:

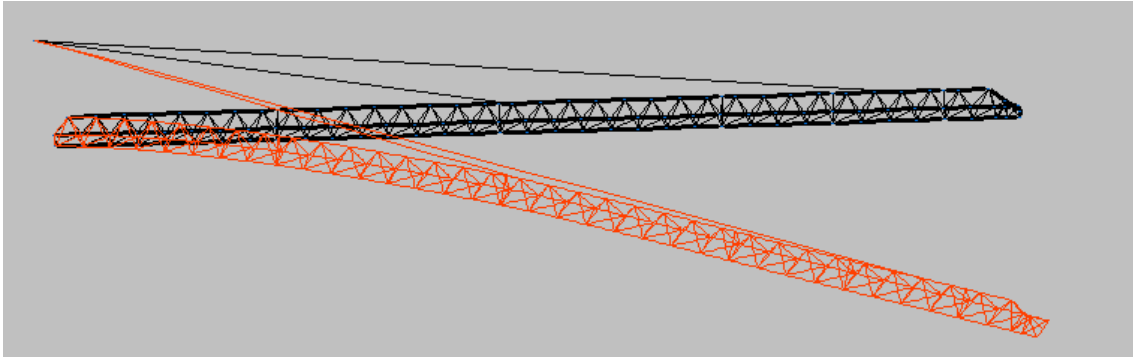


Imagen 118, Deformación producida en la pluma de 50 metros por la suma del viento, la carga y el peso propio a escala 50.

La máxima deformación se produce en la punta con un desplazamiento de 421,909 mm, a diferencia de los anteriores casos en este caso la pluma toma una deformación respecto al eje Y a causa del viento.

- Sin la carga máxima aplicada:

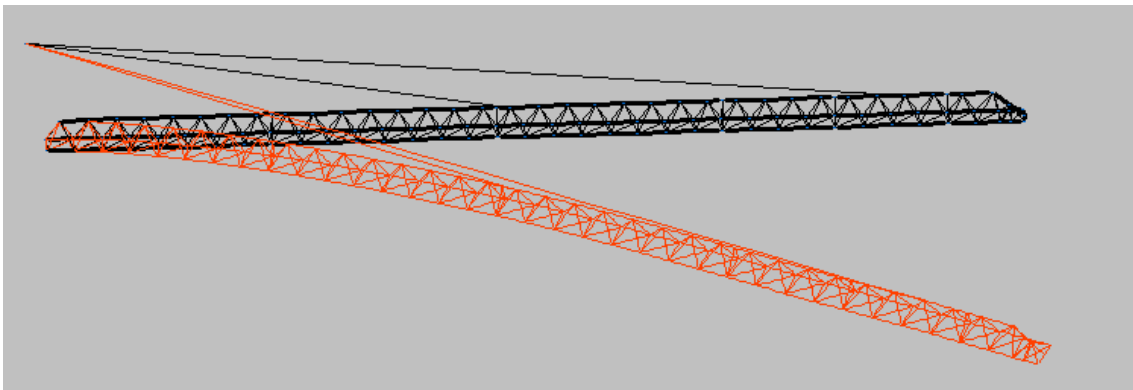


Imagen 119, Deformación producida en la pluma de 50 metros por la suma del viento, la carga y el peso propio a escala 50.

La máxima deformación producida en la punta da un desplazamiento máximo de 421,761 mm.

#### 7.2.8.6 Resultados contrapluma

Para realizar el cálculo de la contrapluma primero deberemos saber que cargas debidas al contrapeso debemos tener en cuenta, para ello se seguirá el cálculo anteriormente expuesto:

$$F_{x,contrapeso} + F_{x,peso\ propio\ contrapluma} = \frac{F_{x,carga}}{2} + F_{x,peso\ propio\ pluma}$$

Para ello deberemos tener en cuenta el caso donde se producen los mayores esfuerzos, que es con la carga en la punta de la pluma, se deberá hacer para ambos casos ya presentados:

- Contrapeso en el caso de la pluma de 25 metros de longitud:  
Los datos obtenidos en la unión del cable de las tablas anteriores son los siguientes:

$$F_{x,carga} = -19.154 t$$

$$F_{x,peso\ propio\ pluma} = -8.894 t$$

$$F_{x,peso\ propio\ contrapluma} = 0.719 t$$

De manera que la componente en la dirección X que produzcan los tensores de la contrapluma deberá ser:

$$F_{x,contrapeso} = \frac{19.154}{2} + 8.894 - 0.719 = 17.752 t$$

Teniendo en cuenta que los tensores harán un ángulo de 29º respecto la torre tendremos que la componente Z de los tensores deberá ser:

$$F_{z,contrapeso} = 9.853 t$$

Por tanto deberemos distribuir la carga anteriormente mencionada en la contrapluma de manera que el tensor ejerza la fuerza que se ha determinado con anterioridad.

Tenemos en cuenta que son dos tensores por lo que la fuerza estará repartida según:

$$F_{z,tensor} = \frac{9.853}{2} = 4.927 t$$

Si tenemos en cuenta que esto se simulara con una carga repartida en unas de las barras de la contrapluma de una longitud de 2,2 metros según se puede ver en la imagen 120 nos quedará una carga repartida en cada lado de:

$$F_{contrapeso,barra} = \frac{4.927}{2.2} = 2.239 \frac{t}{m}$$

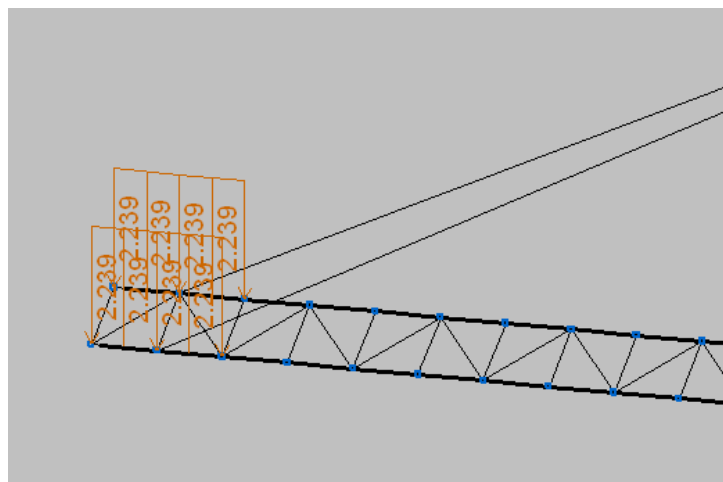


Imagen 120, Distribución de las fuerzas del contrapeso en la contrapluma para el caso de 25 metros de longitud.

- Contrapeso en el caso de la pluma de 50 metros de longitud:  
En este caso al tener dos tensores tendremos en cuenta los esfuerzos producidos por la suma de estos tanto en el caso del peso propio como en el caso de la carga en punta, por tanto tendremos unos valores de:

$$F_{x,carga} = -16.994 t$$

$$F_{x,peso\ propio\ pluma} = -26.262 t$$

$$F_{x,peso\ propio\ contrapluma} = 0.719 t$$

Como en el anterior caso se usara la formula mencionada para el cálculo del esfuerzo del tensor:

$$F_{x,contrapeso} = \frac{16.994}{2} + 26.262 - 0.719 = 34.040 t$$

Con un mismo ángulo que en el anterior caso tendremos que el contrapeso deberá ser de:

$$F_{z,contrapeso} = 18.895 t$$

Teniendo en cuenta que son dos tensores y que estará repartida en la misma longitud que en el anterior caso nos quedará una distribución de fuerzas según se puede observar en la imagen 121:

$$F_{z,tensor} = \frac{18.895}{2} = 9.448 t$$

$$F_{contrapeso,barra} = \frac{9.448}{2.2} = 4.294 \frac{t}{m}$$

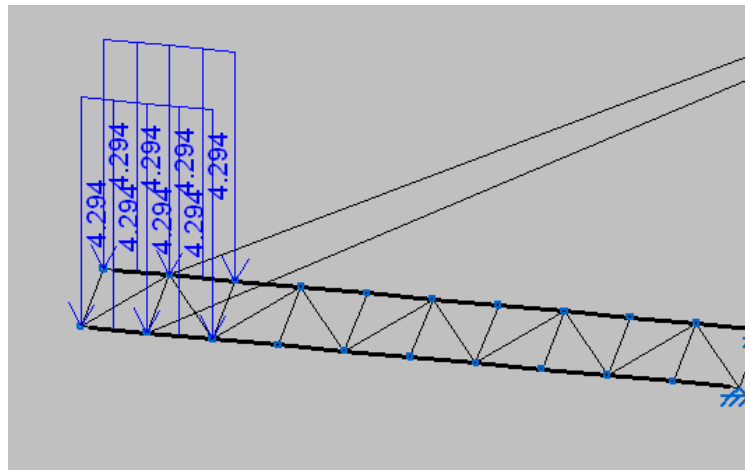


Imagen 121, Distribución de las fuerzas del contrapeso en la contrapluma para el caso de 50 metros de longitud.

#### 7.2.8.7 Perfiles seleccionados para la contrapluma

Con estos datos se pasa a la comprobación de elementos y asignación de secciones en función de las necesidades y esfuerzos que estos deban resistir. La configuración final de la contrapluma, que será la misma tanto para el caso de los 50 metros de longitud como para el de 25 metros exceptuando el contrapeso, será la siguiente:



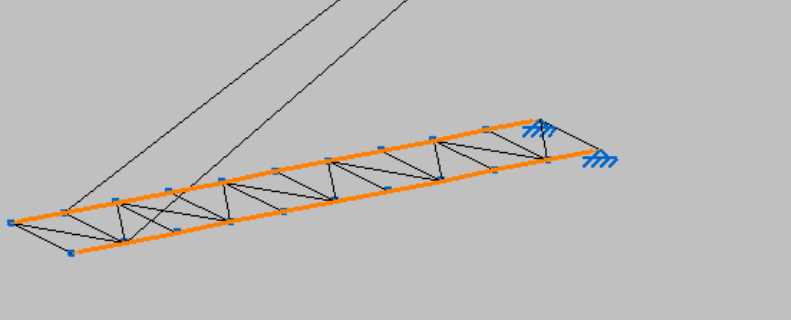
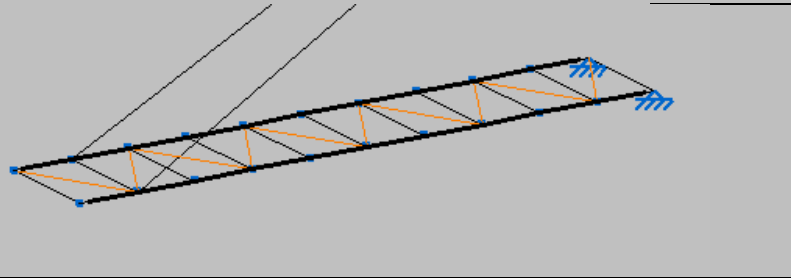
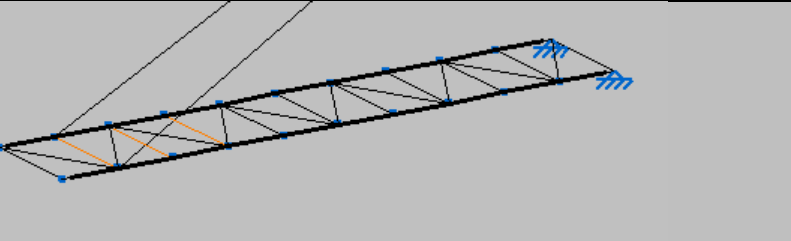
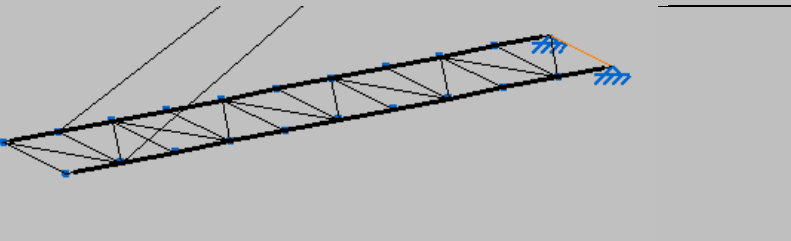
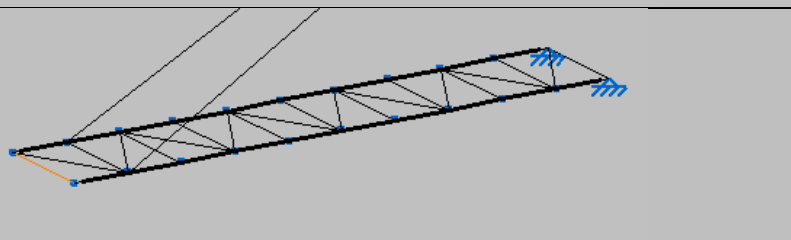
<p>Perfil SHS 130X12</p>	
<p>Perfil CHS 76,1X2,5</p>	
<p>Perfil CHS 60,3X2,5</p>	
<p>Perfil CHS 60,3X2,5</p>	
<p>Perfil CHS 76,1x2,5</p>	

Tabla 43, Selección de perfiles para la contrapluma.

El peso total de la contrapluma se situara en los 749,80 Kg.

#### 7.2.8.8 Reacciones producidas por la contrapluma

A continuación mostraremos en tablas las reacciones producidas en los puntos mostrados en la figura 122:

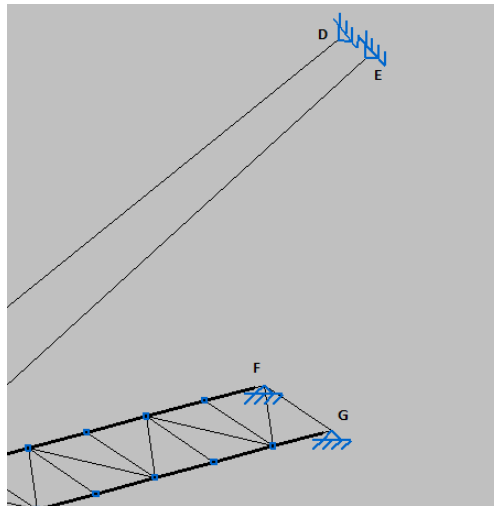


Imagen 122, Puntos de unión entre la contrapluma y la torre.

- Reacciones producidas por el peso propio:

Reacciones	D	E	F	G
Rx	0,359	0,360	-0,359	-0,360
Ry	-0,020	0,020	-0,001	0,001
Rz	0,198	0,198	0,152	0,152

Tabla 44, Reacciones en la contrapluma producidas por el peso propio.

- Reacciones en el caso de la pluma de 25 metros con una carga de 4,5 toneladas:

Reacciones	D	E	F	G
Rx	9,308	9,308	-9,308	-9,308
Ry	0,473	-0,473	0,017	-0,017
Rz	5,124	5,124	0,152	0,152

Tabla 45, Reacciones en la contrapluma con el contrapeso para 25 metros de longitud añadido.

- Reacciones en el caso de la pluma de 50 metros de longitud con una carga de 2,1 toneladas:

Reacciones	D	E	F	G
Rx	17,521	17,521	-17,521	-17,521
Ry	0,925	-0,925	0,033	0,035
Rz	9,645	9,645	0,152	0,152

Tabla 46, Reacciones en la contrapluma con el contrapeso para 50 metros de longitud añadido.

#### 7.2.8.9 Resultados específicos de la contrapluma

De la misma forma que la pluma la contrapluma está compuesta por una estructura triangulada de forma que los valores más interesantes a analizar son los del axil. En la imagen 123 podemos ver la distribución del esfuerzo axil en las barras que conforman la contrapluma.

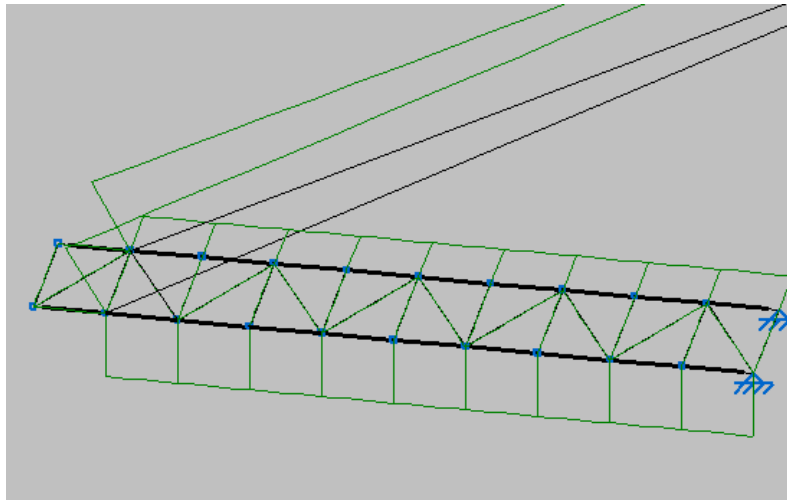


Imagen 123, Repartición de axiles en la contrapluma.

El valor de los cordones se mantiene estable con un mismo nivel de esfuerzo axial a lo largo de los mismos a partir de la aparición de los tensores que transforman los esfuerzos verticales producidos por el contrapeso en esfuerzos axiales. Este valor es de 8.932 t con el contrapeso de 4,927 toneladas y de 17,130 t en el caso del contrapeso de 18.895 t.

También hay que tener en cuenta que en la parte donde se sujetarán los contrapesos se producirá un cortante que traerá consigo una deformación considerable de esa zona respecto al resto de la estructura que más adelante podremos observar. En la imagen 124 podemos ver el grafico del cortante en las barras. Tiene valores máximos de 2,495 t para la pluma de 25 metros y de 4,756 t para el caso de 50 metros.

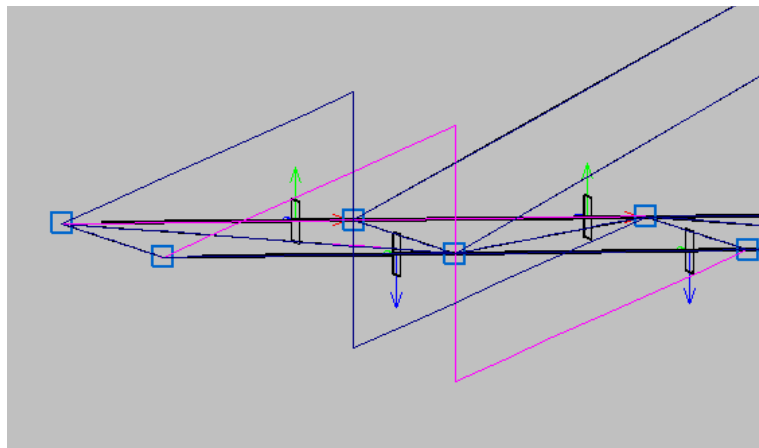


Imagen 124, Repartición de cortantes en la contrapluma.

#### 7.2.8.10 Deformaciones producidas en la contrapluma

A continuación mostraremos los desplazamientos producidos en la contrapluma en los dos casos estudiados:

- Deformaciones con el contrapeso para la pluma de 25 metros:

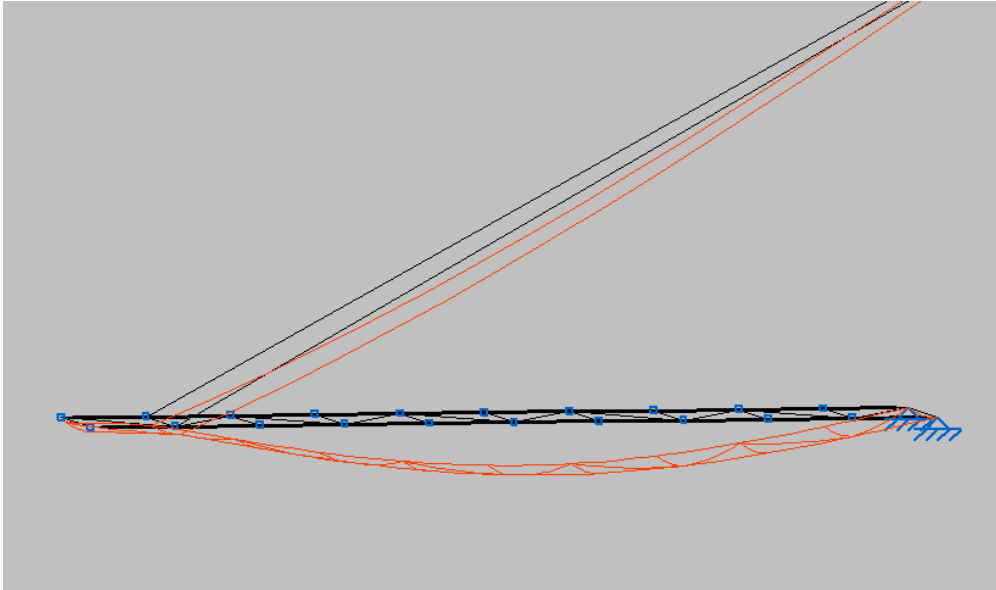


Imagen 125, Deformaciones en la pluma causadas por el contrapeso del caso de 25 metros de longitud, a escala 50.

La máxima deformación se produce en el centro de la contrapluma con un desplazamiento de 13,488 mm.

- Deformaciones con el contrapeso para la pluma de 50 metros:

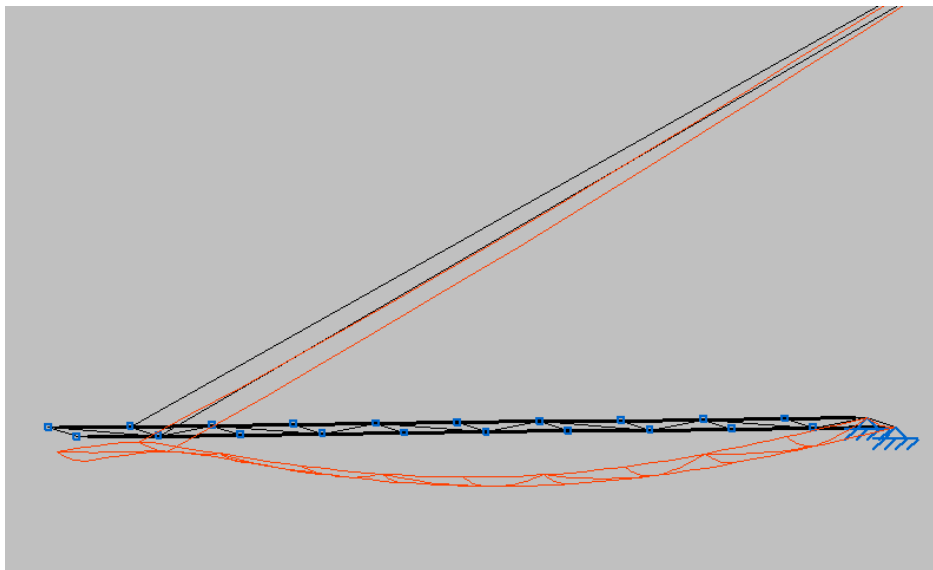


Imagen 126, Deformaciones en la pluma causadas por el contrapeso del caso de 50 metros de longitud, a escala 50.

La máxima deformación se produce en el centro de la contrapluma con un desplazamiento de 14.399 mm.

#### 7.2.8.11 Resultados torre y castillete

Para evaluar la torre y castillete se emplearan los esfuerzos producidos en el peor de los casos presentados anteriormente. El caso que muestra mayores esfuerzos es el de la pluma de 50 metros de longitud con la carga de 2,1 toneladas de peso, los esfuerzos producidos en los

puntos según la imagen 127 serán:

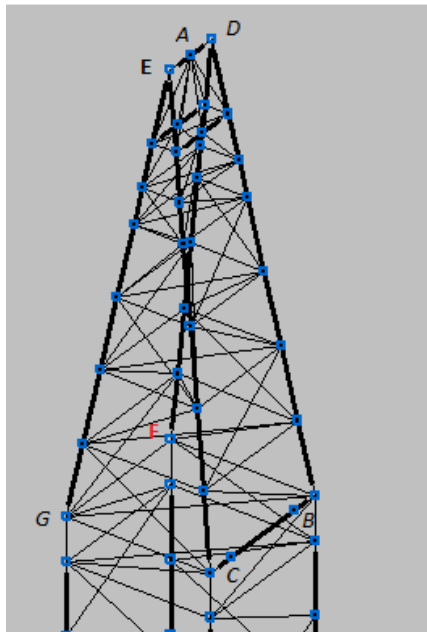


Imagen 127, Puntos de unión presentes en la torre, donde A, B, C enlazan con la pluma y D, E, F, G enlazan con la contrapluma.

En las tablas a continuación se muestra un resumen de los esfuerzos producidos en los puntos mostrados en la imagen 127 en distintos casos.

Reacciones	A	B	C	D	E	F	G
Rx	-8,894	4,447	4,447	9,308	9,308	-9,308	-9,308
Ry	0,000	-0,406	0,406	0,473	-0,473	0,017	-0,017
Rz	1,857	0,997	0,997	5,124	5,124	0,152	0,152

Tabla 47, Reacciones a introducir en la torre por los pesos propios en el caso de 25 metros de longitud, con el contrapeso añadido, en toneladas.

Reacciones	A	B	C	D	E	F	G
Rx	-26,262	13,131	13,131	17,521	17,521	-17,521	-17,521
Ry	0,000	-0,558	0,558	0,925	-0,925	0,033	0,035
Rz	3,990	1,278	1,278	9,645	9,645	0,152	0,152

Tabla 48, Reacciones a introducir en la torre por los pesos propios en el caso de 50 metros de longitud, con el contrapeso añadido, en toneladas.

Reacciones	A	B	C	D	E	F	G
Rx	-28,048	14,024	14,024	9,308	9,308	-9,308	-9,308
Ry	0,000	-0,548	0,548	0,473	-0,473	0,017	-0,017
Rz	5,857	1,247	1,247	5,124	5,124	0,152	0,152

Tabla 49, Reacciones a introducir en la torre producidas únicamente por la carga, en toneladas.

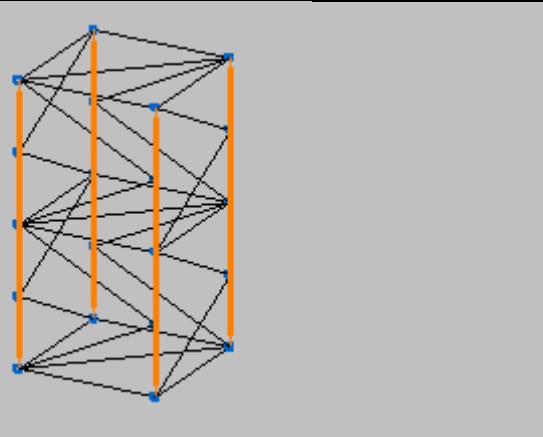
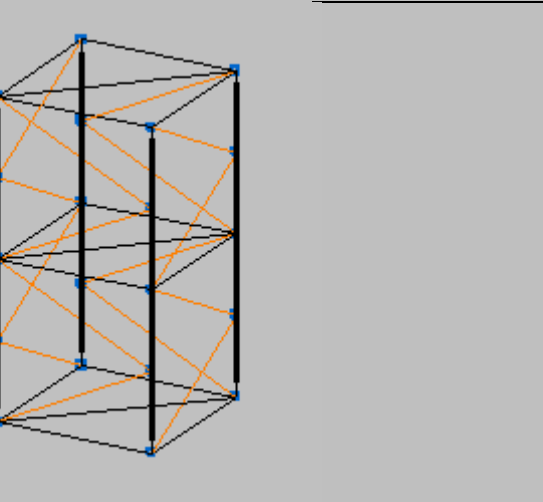
Reacciones	A	B	C	D	E	F	G
Rx	-43,256	21,628	21,628	17,521	17,521	-17,521	-17,521
Ry	0,000	-0,721	0,721	0,925	-0,925	0,033	0,035
Rz	5,469	1,589	1,589	9,645	9,645	0,152	0,152

Tabla 49, Reacciones a introducir en la torre producidas únicamente por la carga, en toneladas.

Si comparamos las anteriores tablas podemos comprobar que los esfuerzos en el eje X por los tensores en la punta se mantiene entre los -9,432 y las 9,722 toneladas en el caso de la pluma de 25 metros y de -8.214 y 8.78 toneladas en el caso de la pluma de 50 metros de longitud. De esta manera confirmamos que los esfuerzos se mantienen en un rango disminuyendo así los esfuerzos que deberán soportar las barras que conforman la estructura.

#### 7.2.8.12 Perfiles seleccionados para la torre y portapluma

Los perfiles seleccionados de acuerdo con las comprobaciones realizadas por el programa para las distintas hipótesis presentadas y también de acuerdo a su funcionalidad se han obtenido los siguientes perfiles, cabe añadir que el modulo inicial de la torre se ha definido de la misma forma que los demás debido a que con la configuración de los demás módulos este también cumplía:

<p>Perfil SHS 220x2,5</p>	
<p>Perfil CHS 88,9x5</p>	

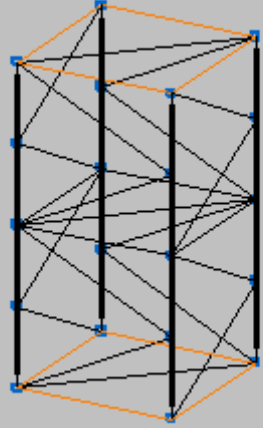
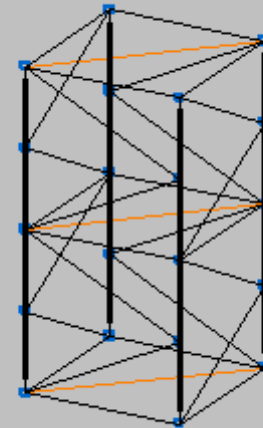
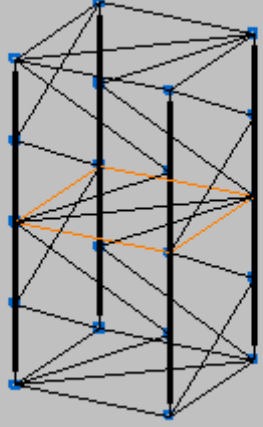
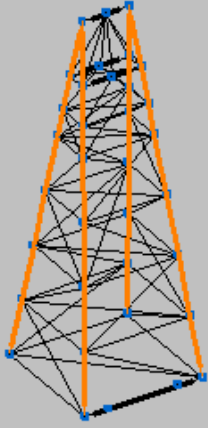
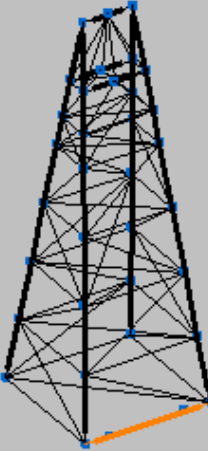
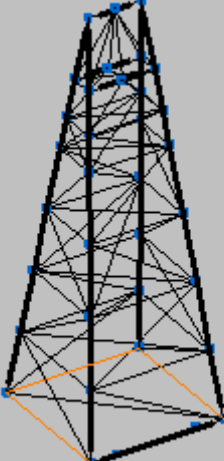
<p>Perfil L 150x150x10</p>	
<p>Perfil CHS 42,4x2,5</p>	
<p>Perfil CHS 42,4x2,5</p>	

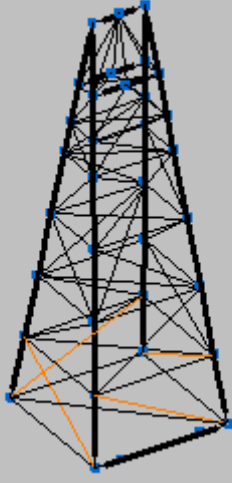
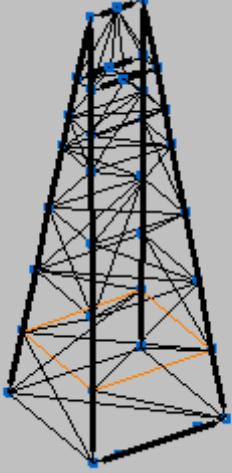
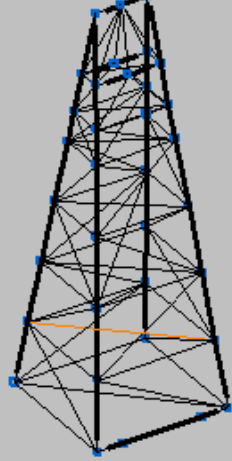
Tabla 50, Selección de perfiles para los módulos de la torre.

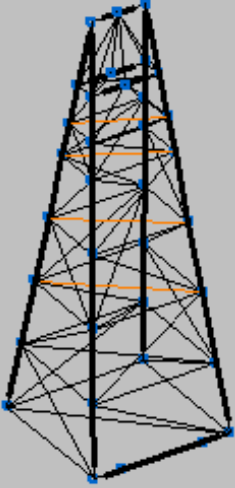
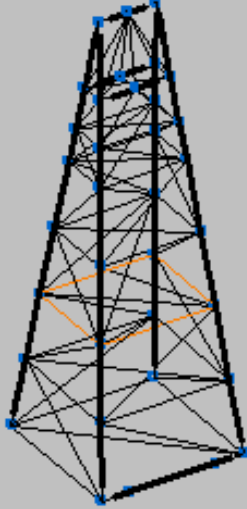
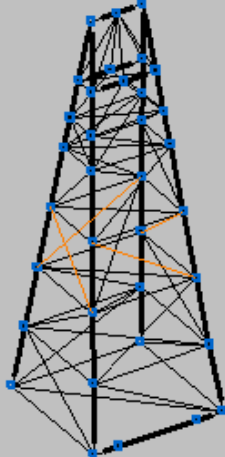
Cada módulo de la torre pesara 1967 Kg, es mayor al peso de los módulos de la grúa tomada por ejemplo, teniendo en cuenta que tiene una mayor capacidad el peso se da por correcto.

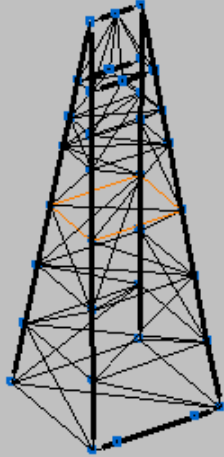
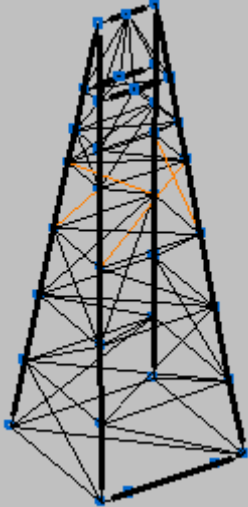
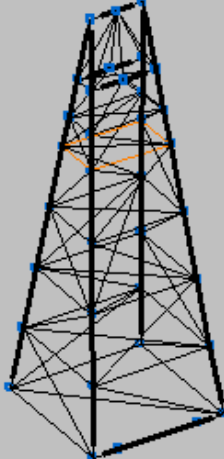
Para el portapluma tendremos:

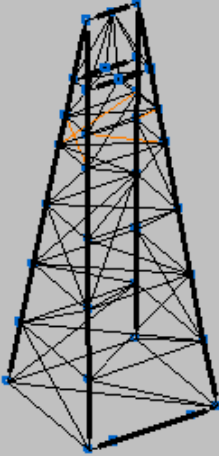
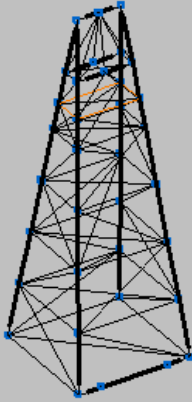
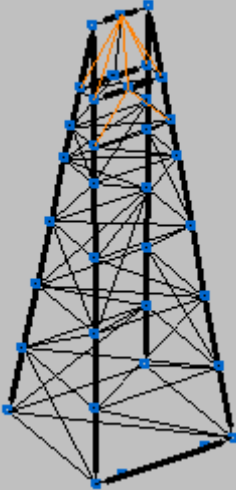
<p>Perfil SHS 260x12,5</p>	
<p>Perfil L 250x250x28</p>	
<p>Perfil SHS 90x4</p>	



<p>Perfil CHS 60x3,5</p>	 A 3D wireframe model of a tower structure, showing a square base and a square top, connected by four vertical legs and a network of diagonal bracing. The structure is rendered in black lines with blue dots at the joints. The tower is shown from a perspective view, slightly rotated.
<p>Perfil CHS 42,4x2,5</p>	 A 3D wireframe model of a tower structure, identical in geometry to the first one, showing a square base and a square top, connected by four vertical legs and a network of diagonal bracing. The structure is rendered in black lines with blue dots at the joints. The tower is shown from a perspective view, slightly rotated.
<p>Perfil CHS 48,3x3</p>	 A 3D wireframe model of a tower structure, identical in geometry to the first two, showing a square base and a square top, connected by four vertical legs and a network of diagonal bracing. The structure is rendered in black lines with blue dots at the joints. The tower is shown from a perspective view, slightly rotated.

<p>Perfil CHS 36,7x2,5</p>	
<p>Perfil CHS 26,9x3</p>	
<p>Perfil CHS 60,3x3,2</p>	

<p>Perfil CHS 26,9x3</p>	
<p>Perfil CHS 76,1x2,5</p>	
<p>Perfil CHS 21,3x2,5</p>	

<p>Perfil CHS 48,3x4</p>	
<p>Perfil CHS 48,3x4</p>	
<p>Perfil CHS 42,4x2,5</p>	

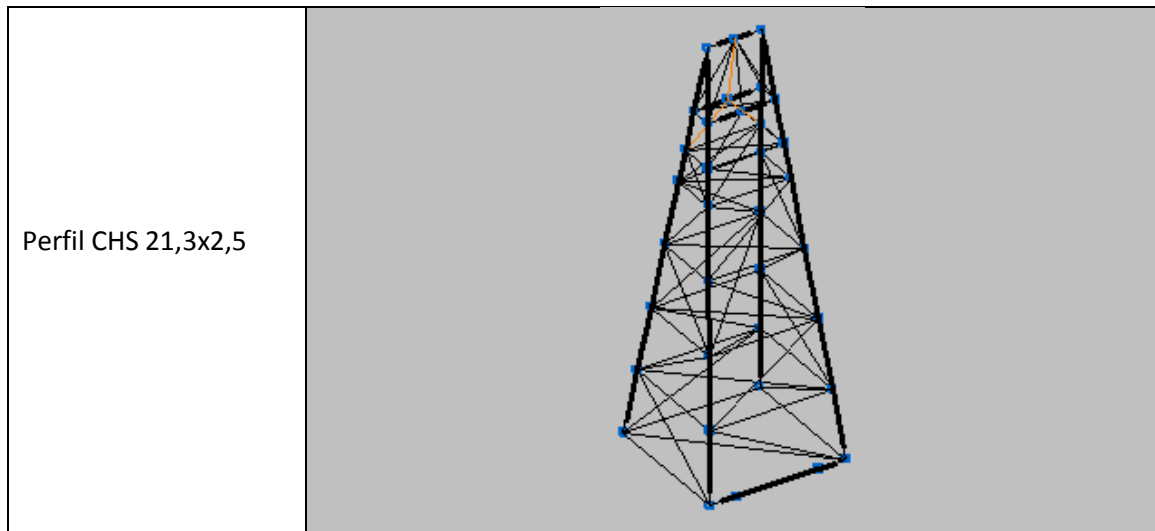


Tabla 51, Selección de perfiles para el portapluma.

7.2.8.13 Reacciones en la base de la torre

A continuación se mostrarán unas tablas con los valores de las reacciones en los casos más interesantes. Se seguirá el esquema presentado en la imagen 127 donde el lado BD será donde esté la pluma y el lado AC será el de la contrapluma.

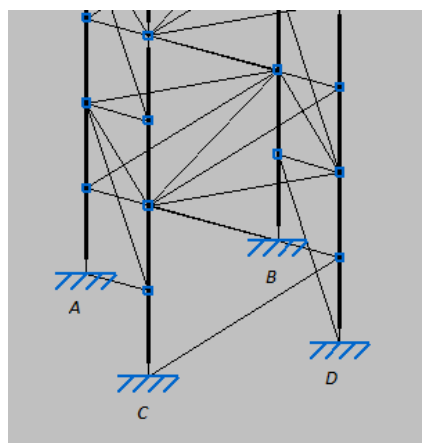


Imagen 127, Puntos de unión de la torre al suelo.

Los valores obtenidos en las distintas hipótesis son los siguientes:

- Caso de la pluma sin cargar (con las cargas de los contrapesos añadidas para cada caso):  
 -Pluma de 50 metros:

Reacciones	A	B	C	D
Rx	0,103	-0,079	0,079	-0,103
Ry	-0,207	-0,007	0,181	0,031
Rz	27,010	1,947	26,835	1,920
Mx	-0,041	0,040	-0,073	-0,030
My	0,137	0,069	0,052	0,006
Mz	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 52, Reacciones en la base producidas por la torre con la grúa de 50 metros descargada.

-Pluma de 25 metros:

<b>Rx</b>	<b>0,083</b>	<b>-0,063</b>	<b>0,064</b>	<b>-0,083</b>
<b>Ry</b>	-0,193	0,022	0,174	-0,003
<b>Rz</b>	25,591	-2,545	25,476	-2,548
<b>Mx</b>	-0,045	0,026	-0,064	-0,036
<b>My</b>	0,133	0,075	0,060	0,028
<b>Mz</b>	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 53, Reacciones en la base producidas por la torre con la grúa de 25 metros descargada.

- Caso de la pluma cargada:

-Pluma de 50 metros:

Reacciones	A	B	C	D
<b>Rx</b>	0,106	-0,082	0,082	-0,106
<b>Ry</b>	-0,033	-0,189	0,006	0,213
<b>Rz</b>	1,971	27,928	1,901	28,012
<b>Mx</b>	0,032	0,076	-0,041	0,043
<b>My</b>	-0,006	-0,054	-0,071	-0,143
<b>Mz</b>	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 54, Reacciones en la base producidas por la torre con la grúa de 50 metros cargada.

-Pluma de 25 metros:

Reacciones	A	B	C	D
<b>Rx</b>	0,090	-0,069	0,069	-0,090
<b>Ry</b>	-0,001	-0,186	-0,020	0,207
<b>Rz</b>	-2,046	27,221	-2,047	27,346
<b>Mx</b>	0,037	0,069	-0,030	0,047
<b>My</b>	-0,026	-0,063	-0,079	-0,141
<b>Mz</b>	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 55, Reacciones en la base producidas por la torre con la grúa de 25 metros cargada.

- Caso de la pluma cargada con el viento perpendicular a la pluma:

-Pluma de 50 metros:

Reacciones	A	B	C	D
<b>Rx</b>	2,970	7,034	-7,160	-2,843
<b>Ry</b>	7,527	-2,891	2,881	-6,651
<b>Rz</b>	2,357	36,881	-6,701	27,944
<b>Mx</b>	-2,791	3,453	-3,580	2,765
<b>My</b>	3,481	2,656	-2,888	-3,572
<b>Mz</b>	-0,007	-0,026	-0,014	-0,012

Tabla 56, Reacciones en la base producidas por la torre con la pluma de 25 metros cargada y la acción del viento haciendo efecto.

-Pluma de 25 metros:

Reacciones	A	B	C	D
Rx	-0,723	-1,980	2,090	0,612
Ry	-0,749	0,992	-0,390	3,373
Rz	-27,030	4,753	20,879	52,787
Mx	0,361	-1,445	0,349	-1,126
My	-0,826	-1,070	0,426	0,938
Mz	0,010	-0,010	0,004	0,005

Tabla 57, Reacciones en la base producidas por la torre con la pluma de 50 metros cargada y la acción del viento haciendo efecto.

- Caso de la pluma con el viento favorable a la carga:

-Pluma de 50 metros:

Reacciones	A	B	C	D
Rx	-0,218	-0,976	-0,829	-0,406
Ry	-0,020	-0,208	-0,006	0,232
Rz	-12,467	42,308	-12,477	42,448
Mx	0,208	-0,037	-0,159	0,215
My	-0,417	-0,353	-0,383	-0,546
Mz	-0,013	0,001	0,007	0,000

Tabla 58, Reacciones en la base producidas por la torre con la grúa de 50 metros cargada y el viento en el sentido de la pluma.

-Pluma de 25 metros:

Reacciones	A	B	C	D
Rx	-0,234	-0,964	-0,842	-0,391
Ry	0,012	-0,205	-0,032	0,225
Rz	-16,484	41,601	-16,425	41,782
Mx	0,213	-0,044	-0,148	0,219
My	-0,437	-0,362	-0,390	-0,545
Mz	-0,013	0,001	0,007	0,000

Tabla 59, Reacciones en la base producidas por la torre con la grúa de 25 metros cargada y el viento en el sentido de la pluma.

- Caso de la pluma con el viento favorable al contrapeso:

-Pluma de 50 metros:

Reacciones	A	B	C	D
Rx	0,407	0,829	0,976	0,218
Ry	-0,051	-0,177	0,026	0,200
Rz	16,406	13,550	16,280	13,574
Mx	-0,140	0,195	0,073	-0,132
My	0,397	0,258	0,228	0,268
Mz	0,000	0,007	0,001	-0,013

Tabla 60, Reacciones en la base producidas por la torre con la grúa de 50 metros cargada y el viento en el sentido de la contrapluma.

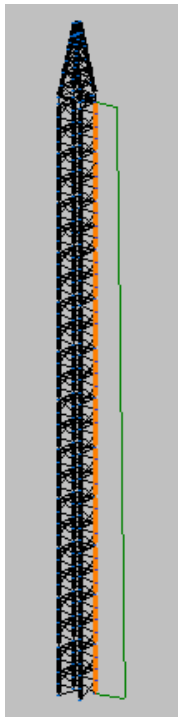
-Pluma de 25 metros:

Reacciones	A	B	C	D
Rx	0,391	0,842	0,964	0,234
Ry	-0,020	-0,174	0,000	0,194
Rz	12,390	12,843	12,333	12,908
Mx	-0,135	0,187	0,084	-0,128
My	0,378	0,249	0,220	0,269
Mz	0,000	0,007	0,001	-0,013

Tabla 61, Reacciones en la base producidas por la torre con la grúa de 25 metros cargada y el viento en el sentido de la contrapluma.

#### 7.2.8.14 Resultados específicos de la torre

A continuación, mostraremos la repartición de los esfuerzos axiales a lo largo de la torre, esto solo se analizará en el caso de la grúa torre con la pluma de 25 metros ya que es el caso que mayores esfuerzos produce. En la imagen 128 podemos ver la distribución de los axiles a través de uno de las vigas que hace función de mástil.



Como se observa en la imagen el valor del axil va en aumento a medida que nos acercamos a la base. Cabe destacar que el aumento del valor del axil se produce a causa del propio peso introducido por la estructura, un aumento que en comparación a los esfuerzos introducidos por la pluma y la contrapluma son muy bajos.

Como es de esperar en el caso de la pluma cargada tendremos que los dos mástiles situados en el lado de la pluma tendrán valores de compresión muy elevados en contraposición a los valores de tracción que soportarán las barras situadas en el lado del contrapeso. En el tramo final de la torre los esfuerzos axiales producidos en los cordones son de un máximo de 26 toneladas.

Imagen 128, Repartición de esfuerzos axiales en uno de los cordones de la torre.

#### 7.2.8.15 Deformaciones producidas en la torre

A continuación enumeraremos los desplazamientos producidos en la torre en los casos más excepcionales. Los casos presentados son los siguientes:

- Deformaciones en el caso de las cargas propias para la pluma de 25 metros de longitud, se ha tenido en cuenta el peso del contrapeso:



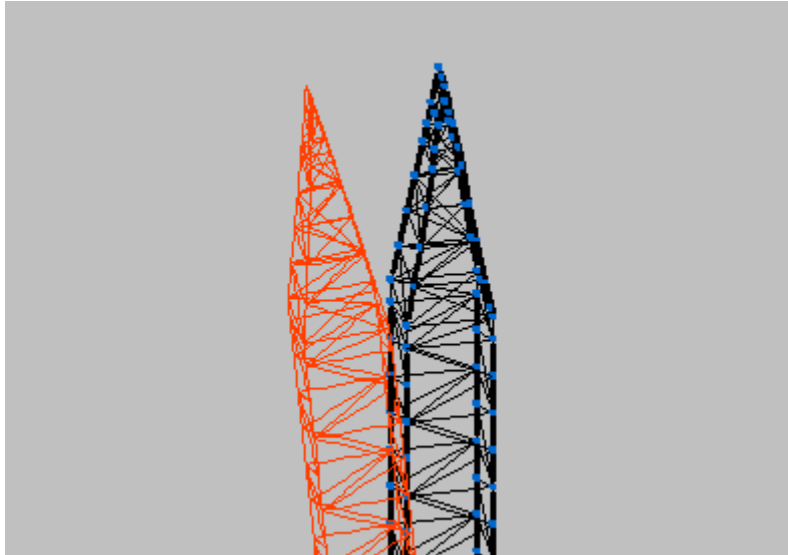


Imagen 129, Deformaciones en la parte alta de la torre con la grúa de 25 metros de longitud descargada, a escala 50.

Se producen unos desplazamientos de 84,408mm en la punta del portaplumas.

- Deformaciones en el caso de los pesos propios teniendo en cuenta la pluma de 50 metros de longitud teniendo en cuenta la carga introducida por el contrapeso:

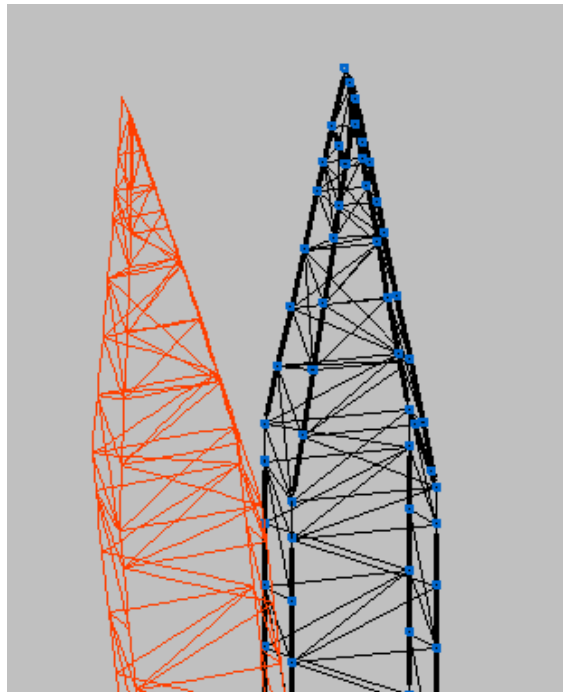


Imagen 130, Deformaciones en la parte alta de la torre con la grúa de 50 metros de longitud descargada, a escala 50.

Se produce un desplazamiento de 74,484 mm en la punta del portaplumas.

- Deformaciones en el caso de la pluma de 25 metros de longitud cargada:

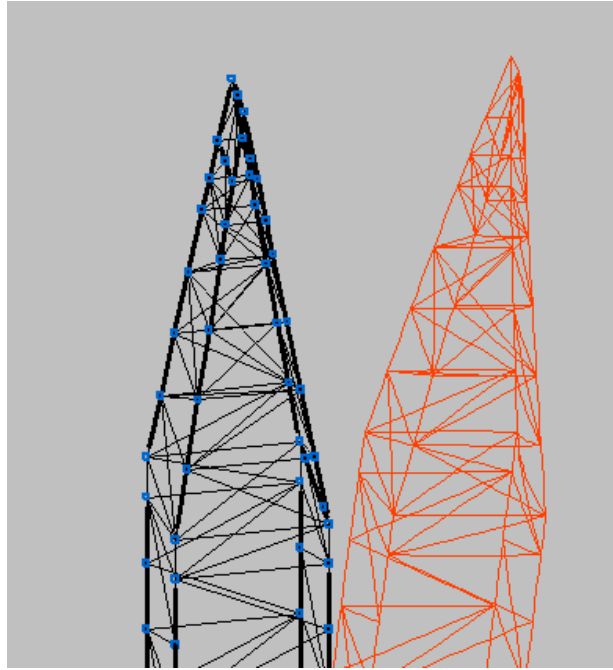


Imagen 131, Deformaciones en la parte alta de la torre con la grúa de 25 metros de longitud cargada, a escala 50.

Se produce un desplazamiento 84,906 mm en la punta del portaflechas.

- Deformaciones en el caso de la pluma de 50 metros cargada:

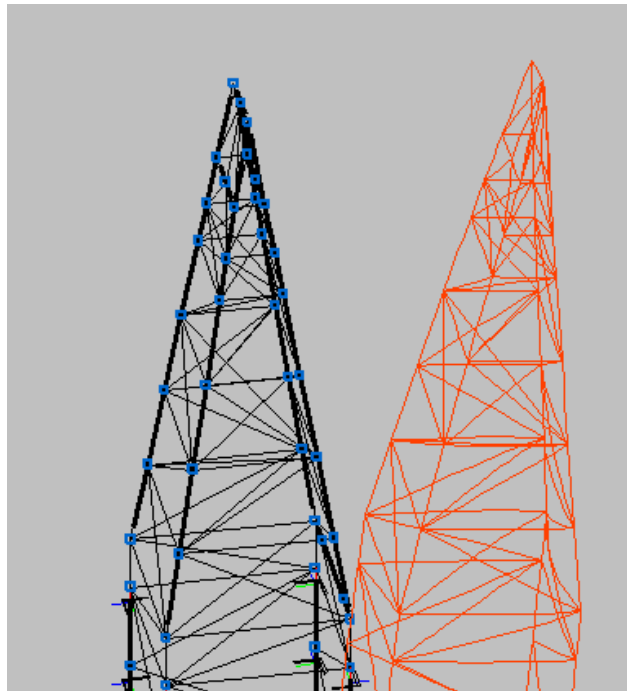


Imagen 132, Deformaciones en la parte alta de la torre con la grúa de 50 metros de longitud cargada, a escala 50.

Con un desplazamiento máximo de 78,117 mm en la punta del portaplumas.

- Deformaciones en el caso de la grúa de 25 metros de longitud de pluma con el viento empujando en la dirección de la contrapluma y con la carga dispuesta en la punta:

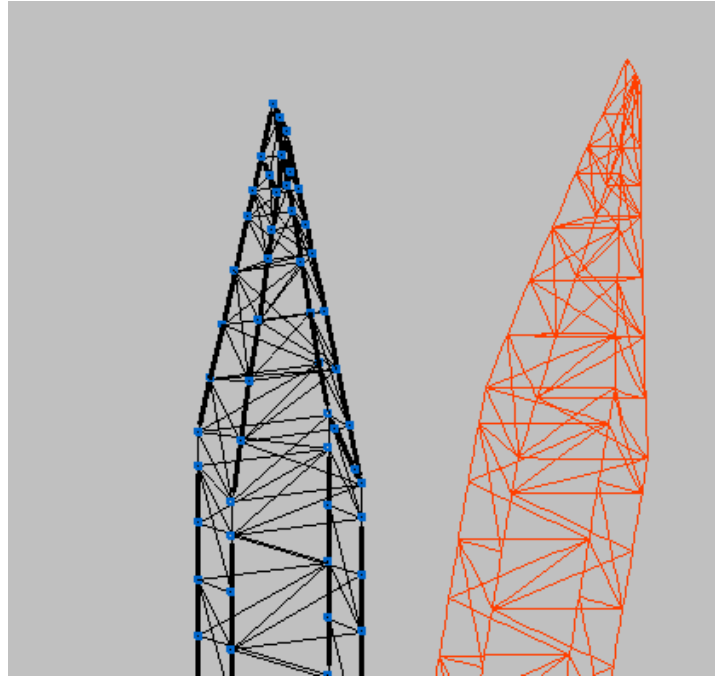


Imagen 133, Deformaciones en la parte alta de la torre con la grúa de 25 metros de longitud cargada y el viento haciendo efecto en la pluma, a escala 50.

Este es el caso que más desplazamiento presenta, de la misma forma que en los anteriores casos y como es de esperar se produce en la punta, con un valor máximo de 131,205 mm.

- Desplazamientos en el caso de la pluma cargada de 25 metros de longitud con el viento favorable al contrapeso:

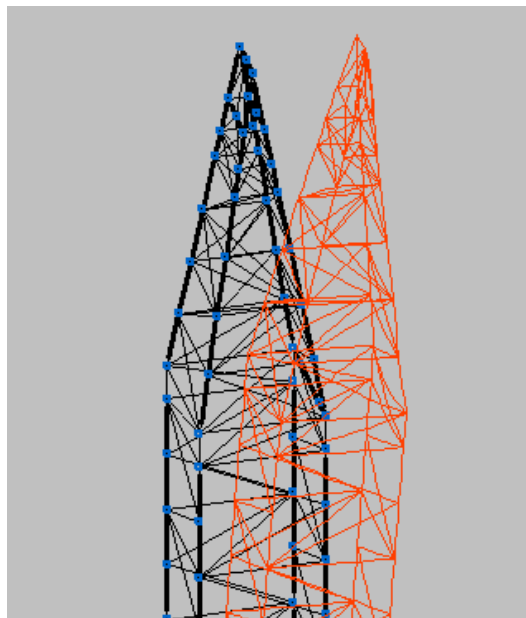


Imagen 134, Deformaciones en la parte alta de la torre con la grúa de 50 metros de longitud cargada y el viento haciendo efecto en la pluma, a escala 50.

En este caso el viento ayudara a estabilizar la grúa frente a la carga de la pluma y por tanto los

desplazamientos se verán reducidos. El máximo desplazamiento de la misma forma que en los anteriores caso se produce en la punta del portaplumas con un valor 44,879 mm.

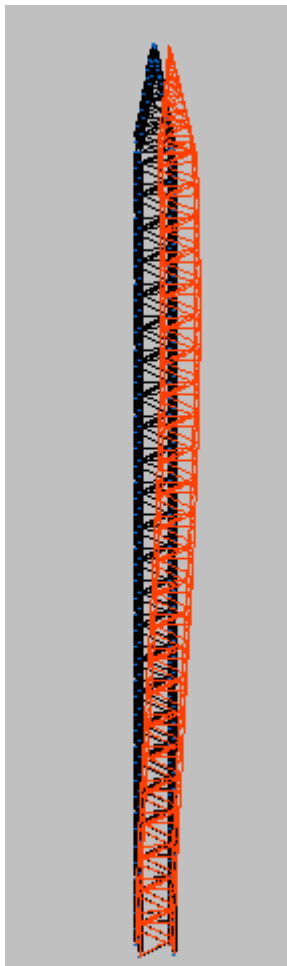
#### 7.2.8.16 Resultados de la torre en estado fuera de servicio

Cuando la velocidad del viento supere los 20 m/s la grúa no podrá estar en estado de servicio, entonces se podrá en veleta libre (se desembraga la plataforma giratoria y se le da libertad de giro) de manera que el viento solo afectará a la torre debido que la pluma se alineará con la dirección de este.

Para estos casos se ha analizado la grúa con las cargas introducidas por los pesos muertos de la pluma (en ambos casos) y la contrapluma con sus respectivos contrapesos. El viento actuará en el sentido de la pluma.

A continuación mostraremos unas imágenes de las deformaciones producidas para el caso tanto de la pluma de 25 metros de longitud y de 50 metros de longitud con la fuerza del viento actuando.

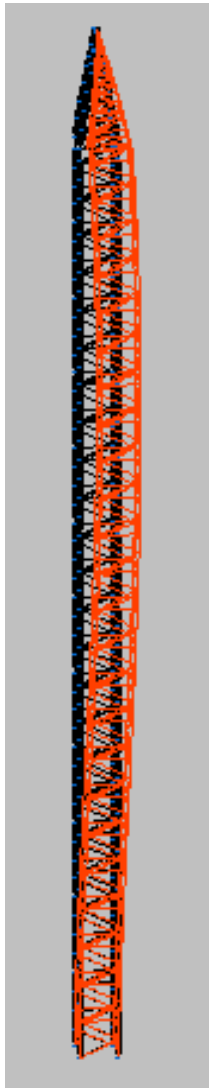
- Deformación producida en el caso de la pluma de 50 metros de longitud:



*Imagen 135, Deformación general de la torre para el caso de 50 metros de longitud con el efecto del viento.*

En este caso el desplazamiento máximo es de 14,871 mm y se produce en el módulo número 10.

Deformación producida en el caso de la pluma de 25 metros de longitud:



*Imagen 136, Deformación general de la torre para el caso de 25 metros de longitud con el efecto del viento.*

En este caso debido a que el contrapeso ejerce más esfuerzo que en el caso de la pluma de 50 metros y por tanto los desplazamientos no son tan elevados en la parte superior. El máximo desplazamiento se produce en el módulo 9 con un desplazamiento de 11,408 mm.

Los esfuerzos que debe soportar la grúa en estado fuera de servicio son menores que en el caso de la grúa en estado de servicio, esto es gracias a que al ponerse en veleta libre la fuerza que produciría el viento en la pluma no se tiene en cuenta y los esfuerzos adicionales de las cargas de servicio no se aplican debido a la prohibición de su uso con un viento superior a 20 m/s.

#### 7.2.9 Elección de la corona de giro

Ahora que ya tenemos los pesos de cada uno de los elementos que conforman la grúa torre podemos pasar a elegir la corona de giro mediante la guía de Thyssen Krupp. La guía nos indica la colocación del rodamiento en función de cómo actúe la carga sobre él, la imagen 137 muestra las indicaciones dadas en la guía para el caso que nos ocupa.

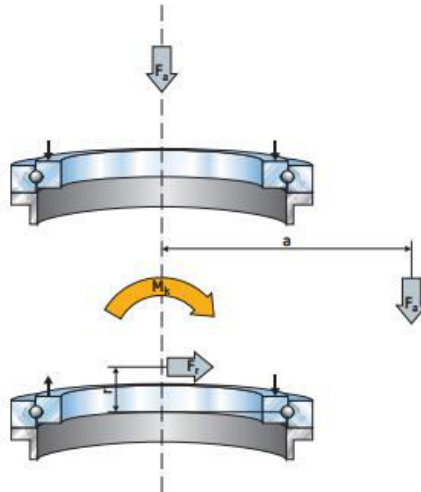


Imagen 137, Colocación de la corona de giro según los esfuerzos que se muestran en la imagen.

En la guía se nos indica cómo realizar el cálculo de los esfuerzos y para ello deberemos primero obtener el centro de masas de la pluma, y la contrapluma. En los anteriores apartados se han mencionado los pesos de cada uno de los módulos y sus longitudes, calculando el centro de masas respecto la unión con la torre nos queda la siguiente relación:

$$r_{cm} = \frac{1}{M} * \sum m_i r_i$$

Dónde:

$r_{cm}$ : distancia al centro de masas del sistema equivalente.

$M$ : masa total, en nuestro caso y por facilitar los cálculos lo realizaremos con las fuerzas producidas por las masas con una gravedad de  $10 \text{ m/s}^2$ , será la variable  $B$ .

$m_i, r_i$ : son las masas  $i$  las distancias respecto el sistema elegido.

En nuestro caso queda de la siguiente manera:

$$r_{cm} = \frac{1}{58.46} * (15.9 * 5.8 + 16.6 * 17.4 + 16.6 * 29 + 5.5 * 37.7 + 4.3 * 38.65)$$

$$r_{cm} = 21.18 \text{ m}$$

Para el caso de la contrapluma diremos que tenemos una carga de 7,5 kN (variable  $CL$ ) situado en su mitad, es decir a 5,5 metros de distancia de la unión a la torre.

Las cargas que emplearemos para el cálculo están basadas en el caso de la pluma de 50 metros de longitud con la carga en la punta de esta, ya que será el caso que produzca mayores esfuerzos axiales. Las cargas que usaremos en el cálculo serán las siguientes y estarán en las siguientes posiciones (siempre teniendo en cuenta que a la longitud se le añadirán 2 metros equivalentes a la distancia al punto más alejado de la torre en su unión, ya que el cálculo del momento se debe hacer respecto al punto más alejado del rodamiento):

-La carga de servicio situada a 50 metros en sentido positivo:  $Q = 21 \text{ kN}$

-La carga del contrapeso situada a 10 metros en sentido negativo:  $CP = 189 \text{ kN}$

-La carga del propio castillete situada en el centro del rodamiento:  $P = 29.4 \text{ KN}$

Una vez tenemos las cargas podemos pasar al cálculo de las fuerzas que más adelante usaremos para la selección. El cálculo es el siguiente:

$$F_a = 21 + 58.46 + 189 + 7.5 + 29.4 = 305.36 \text{ KN}$$

$$M_K = -21 * 50 - 58.46 * 23.18 + 189 * 12 + 7.5 * 7.5 = -80.85 \text{ KNm}$$

Debemos tener en cuenta los factores de mayoración que nos indica la guía, en nuestro caso se empleara un factor de mayoración  $f_{stat} = 1.10$  de forma que los valores con los que entraremos en las tablas serán:

$$F_a' = 305.36 * 1.10 = 335.9 \text{ KN}$$

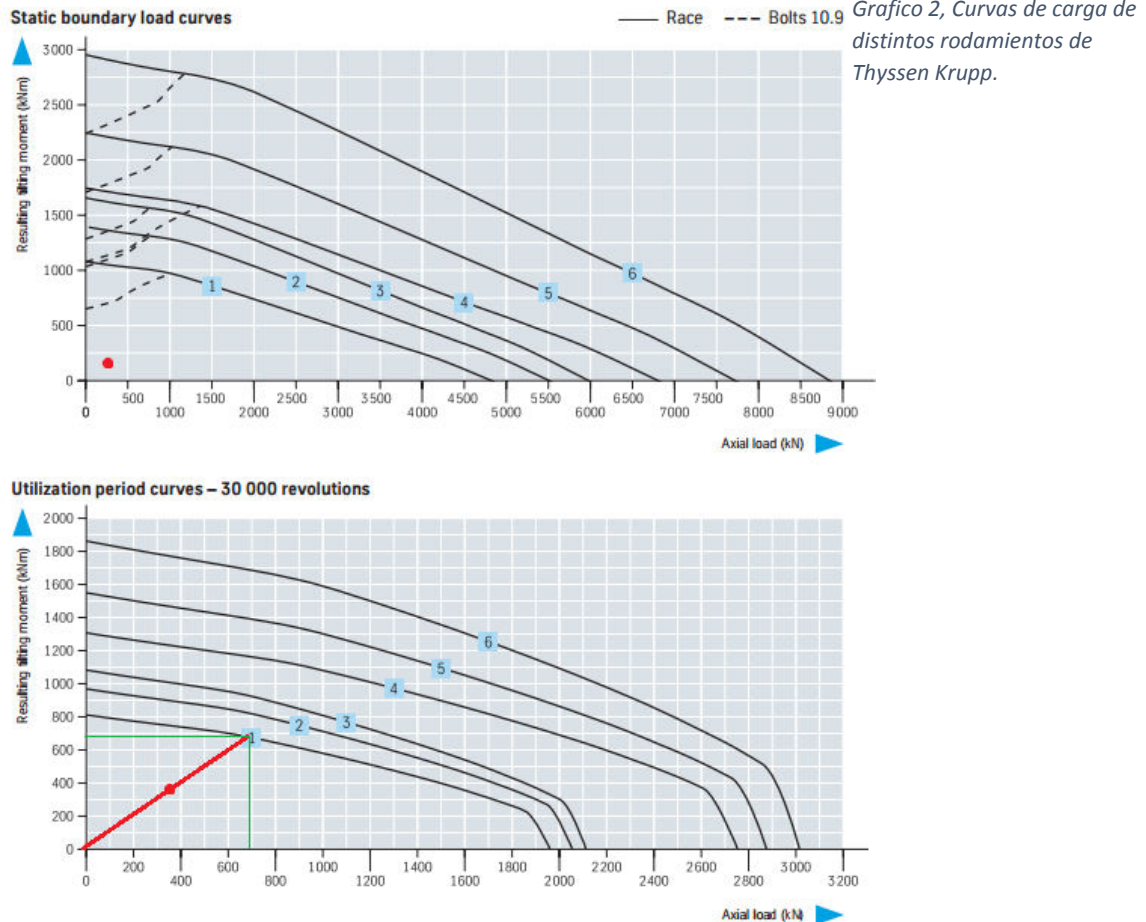
$$M_K' = -80.85 * 1.10 = -88.94 \text{ KNm}$$

Con estos valores podremos acceder a las tablas de periodo de utilización, para el análisis estático deberemos aplicar un factor de mayoración en la carga de servicio, de forma que los valores se verán modificados de la siguiente manera:

$$F_a' = 341.67 \text{ KN}$$

$$M_K' = -377.69 \text{ KNm}$$

Con estos valores entraremos en los gráficos 2 donde podemos ver que nos da un margen considerable para cualquier de los rodamientos en el grafico presente ya que los puntos referidos a nuestra demanda de esfuerzos se sitúan bastante por debajo de esas curvas.



En la guía también se nos da un cálculo simple para averiguar el número de revoluciones, aproximadamente, que aguantaría el rodamiento, para ello recurrimos al anterior grafico de utilización, en el cual si escogemos el primer rodamiento y nos fijamos en los valores de fuerza y momento que es capaz de resistir siguiendo una línea recta desde el origen que pase por nuestro punto obtenemos los siguiente valores:

$$F_{a0} = 700 \text{ KN}$$

$$M_{K0} = 700 \text{ KNm}$$

Primero se realiza una comparación entre valores, y nuestro caso quedaría:

$$f_L = \frac{F_{a0}}{F'_a} = \frac{700}{341.67} = 2.05$$

$$f_t = \frac{M_{K0}}{M'_K} = \frac{700}{377.69} = 1.85$$

Escogemos el valor más bajo por motivos de seguridad en el dimensionamiento y obtenemos el siguiente número de ciclos para la vida del rodamiento (p es un factor que depende del rodamiento elegido, en nuestro caso al ser de bolas,  $p = 3$ ):

$$G = (f_t)^p * 30000 = (1.85)^3 * 30000 = 189948 \text{ ciclos}$$

Lo cual nos da holgadamente un número suficiente de rotaciones para alcanzar la vida máxima



de la grúa con el mismo rodamiento. Cabe tener en cuenta que se deberán seguir las indicaciones dadas por el fabricante en su mantenimiento e instalación ya que de esto dependerá un menor o mayor desgaste del rodamiento. En la tabla 62 podemos ver las características del rodamiento elegido:

Bearing with external gearing		Geometry									
Drawing number		$\varnothing D_L$ mm	$\varnothing D_s$ mm	$\varnothing D_i$ mm	H mm	$\varnothing O$ mm	$\varnothing U$ mm	$H_1$ mm	$H_2$ mm	$H_s$ mm	$H_o$ mm
1	091.20.1006.990.11.1503 091.20.1006.991.21.1503	1006	1168,0	893	92	1012	1005	83	83	9	9
2	091.20.1146.990.11.1503 091.20.1146.991.21.1503	1146	1308,0	1033	92	1152	1145	83	83	9	9
3	091.20.1246.990.11.1503 091.20.1246.991.21.1503	1246	1408,0	1133	92	1252	1245	83	83	9	9
4	091.25.1154.990.11.1503 091.25.1154.991.21.1503	1154	1341,6	1023	104	1160	1153	95	95	9	9
5	091.25.1310.990.11.1503 091.25.1310.991.21.1503	1310	1497,6	1179	104	1316	1309	95	95	9	9
6	091.25.1502.990.11.1503 091.25.1502.991.21.1503	1502	1689,6	1371	104	1508	1501	95	95	9	9

Tabla 62, Valores geométricos de distintas coronas de giro de Thyssen Krupp.

## 7.3 Uniones

En los siguientes apartados trataremos las uniones que se dan en la estructura, que son básicamente de dos tipos, las desmontables, que servirán de unión entre módulos, y las fijas, que este caso se tratarán de las molduras empleadas para la unión directa de barras que conforman las estructuras de los módulos.

### 7.3.1 Soldaduras

Según la normativa del EAE, el cálculo de las soldaduras presentadas en este proyecto se seguirá según lo expuesto en el artículo 59 del EAE que trata las soldaduras de forma general y para las uniones con secciones tubulares se empleará el artículo 64 combinado del anexo 9.

Una de las primeras condiciones que se establece es que el espesor de las piezas a soldar debe ser mayor o igual a 4 milímetros y que los materiales a soldar y los materiales de aportación estén dentro del apartado 29.5, el material de aportación deberá tener características mecánicas superiores al metal base. Para el caso de uniones entre piezas de sección tubular el espesor mínimo deberá ser de 2,5 mm para las piezas a unir.

Los métodos de soldadura autorizados los podemos encontrar también en artículo 59, en la tabla 63 se muestran los tipos de uniones expuestas en el EAE según las disposición de las barras a unir.

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 (*)	Sencilla en V En doble V Sencilla en U En doble U	Chafán sencillo Chafán doble Sencilla en J En doble J	
Soldadura a tope con penetración parcial (*)	En doble V En doble U	Chafán doble	
Soldadura de tapón (o botón)			

Tabla 63, Tipos de soldadura según el EAE.

Para definir la garganta de la soldadura se seguirá lo expuesto en la imagen 138, cuando haya penetración de forma constante se podrá tomar en cuenta esa longitud como parte de la garganta.

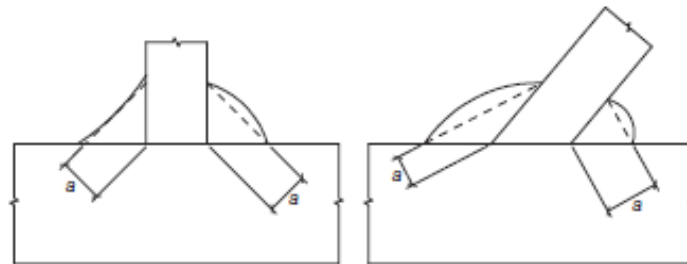


Imagen 138, Como medir la garganta especificada en el EAE.

También para este tipo de soldaduras según el EAE debemos cumplir las siguientes relaciones en función del espesor de las chapas a unir:

- Si  $t = 10$        $a \geq 3 \text{ mm}$
- Si  $t = 20$        $a \geq 4.5 \text{ mm}$
- Si  $t > 20$       $a \geq 5.6 \text{ mm}$

También es importante conocer los coeficientes de correlación de los distintos materiales, en la tabla 64 se muestran estos valores según el EAE.

Tipo de acero	Coefficiente de correlación, $\beta_w$
S 235	0,80
S 275	0,85
S 355	0,90
S 420	1,00
S 460	1,00

Tabla 64, Valores de  $\beta_w$  según el EAE.

Las uniones soldadas de sección tubular entre diagonales y montantes se harán a lo largo de todo el perímetro de la pieza a unir con excepción en las uniones a solape donde la parte solapada no será necesario soldarla. La soldadura puede ser a tope, con penetración en ángulo, parcial o una combinación de ellas. Se cumplirá que la soldadura tenga una mayor resistencia que el material base cuando esta tenga una garganta eficaz "a" dé como mínimo el espesor de la pieza a unir cuando la unión sea a penetración completa. En la imagen 139 se pueden ver los detalles constructivos de la soldaduras entre perfiles tubulares.

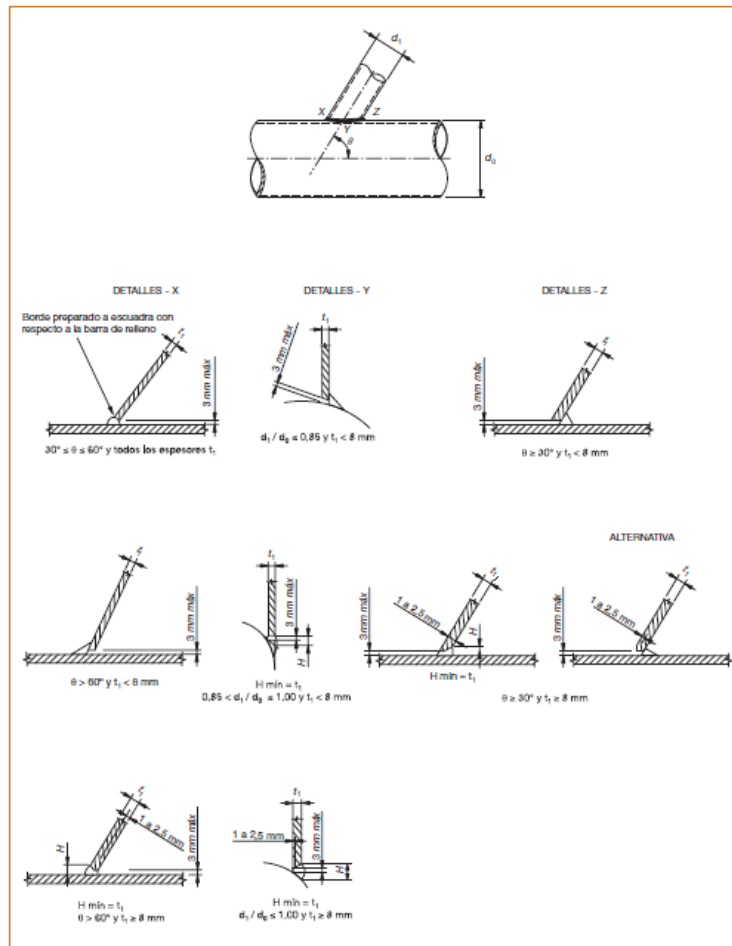


Imagen 139, Definición de las gargantas entre perfiles tubulares según el EAE.

Como se puede observar en la imagen la holgura tampoco deberá exceder los 3 milímetros. El EAE también define las celosías según la disposición de las barras, en nuestro caso tendremos uniones en forma KT y K en su mayoría. Otra condición que debemos tener en cuenta es que el



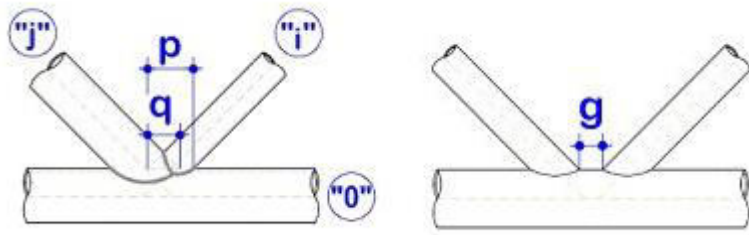


Imagen 142, Variables presentes en la geometría de la unión para soldaduras.

En la imagen que se muestra a continuación se puede ver la definición final de la unión entre las barras elegidas:

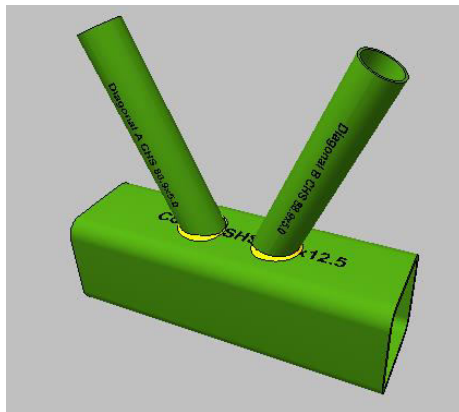


Imagen 143, Vista de la unión obtenida por Cype.

A continuación se puede observar la geometría de la unión:

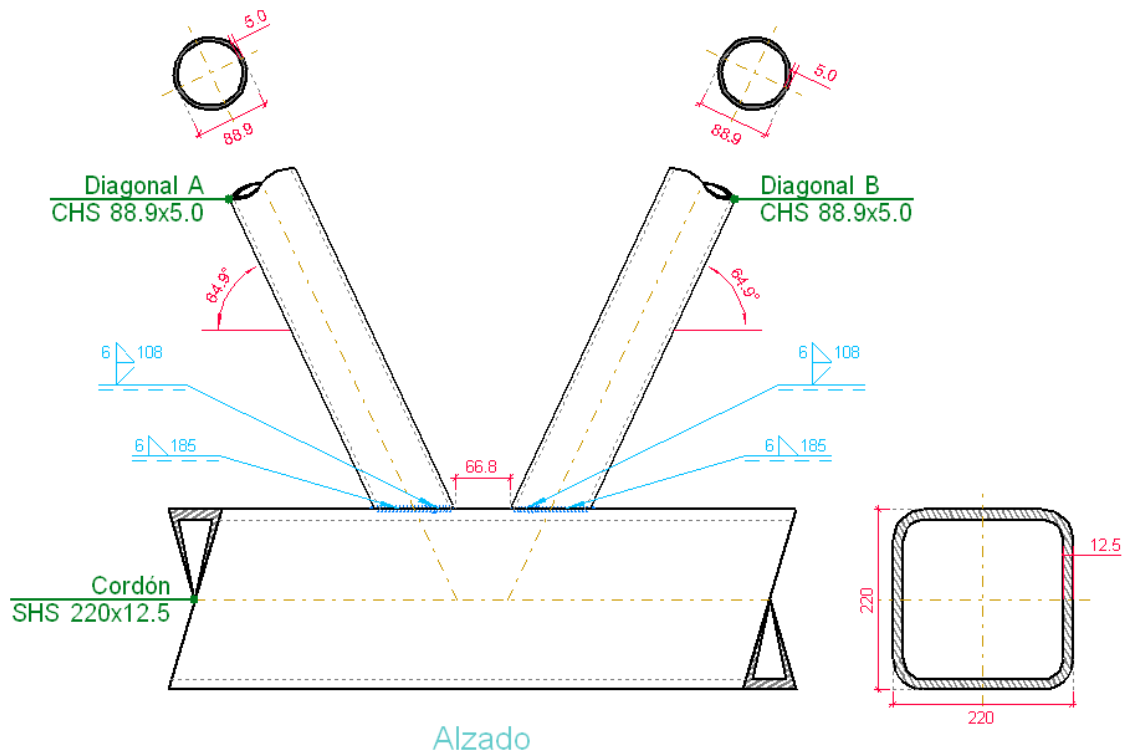


Imagen 144, Definición geométrica de la unión.

Para el caso de las uniones KT en la torre se empleará la combinación de soldadura y tornillos, ya que los cordones de 42,4x2,5 se unirán mediante tornillos con el final de la barra prensado, y la unión de las barras SHS se hará según la imagen 144 anteriormente mostrada ya que mantendrán unas mismas características geométricas. Mientras que los cordones formados por L se harán con soldadura a tope de penetración completa de forma que no es necesaria ninguna comprobación.

También mediante el programa CYPE se podrán dimensionar las uniones KT y K de la contrapluma ya que al ser una celosía plana y no espacial el EAE también indica el cálculo de forma directa. De la misma forma que en el caso anterior se han debido hacer algunas modificaciones de manera que cumplierse con las indicaciones que daba el EAE. Una vez cumplidas las condiciones de ángulos y espesores las uniones quedarán definidas según se puede observar en la tabla 65. En la tabla 66 obtenida por Cype podemos ver cómo se han cumplido las condiciones para poder acceder a los cálculos en el caso de la unión KT.

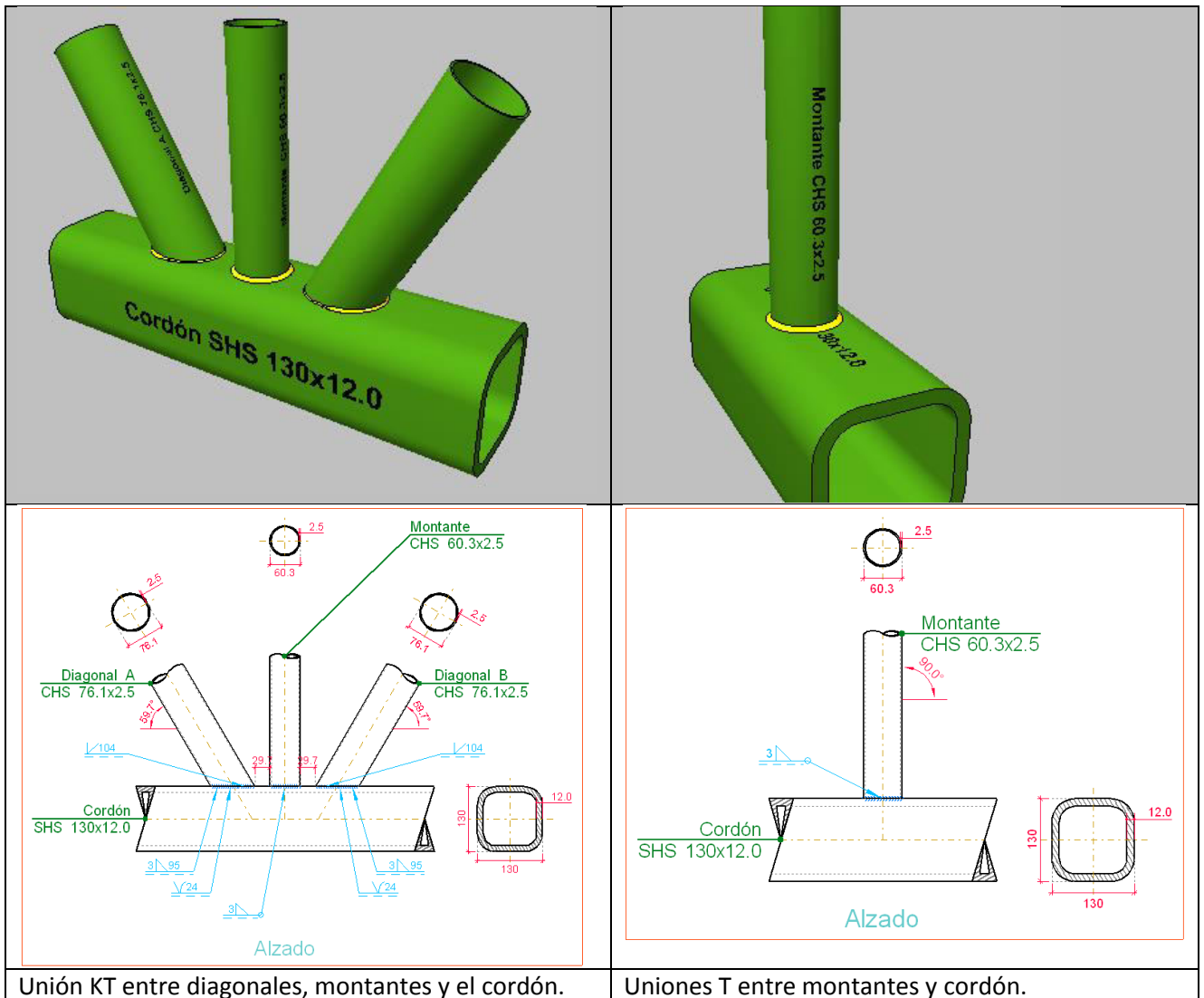


Tabla 65, Vista de las uniones de la contrapluma por Cype.

Comprobación	Unidades	Calculado	Límites	
			Mínimo	Máximo
Límite elástico	kp/cm <sup>2</sup>	2803.3	--	4689.1
Clase de sección ( $d_i/t_i$ )	--	30.44	--	42.73 (Clase 1)
$d_i/t_i$	--	30.44	--	50.00
Espesor	mm	2.5	2.5	25.0
Ángulo	grados	30.29	30.00	--
Espaciamiento	mm	29.7	5.0	--
$d_i/b_o$	--	0.59	0.40	0.80
$g/b_o$	--	0.23	0.23	--

Tabla 66, Comprobaciones de la unión proporcionadas por Cype.

Las modificaciones introducidas en la contrapluma para cumplir geoméricamente producen modificaciones muy pequeñas en los esfuerzos producidos en la torre, de forma que se opta por no rehacer los cálculos de esfuerzos una vez llegados a este punto.

### 7.3.2 Bulones

Los bulones serán los elementos de unión encargados de unir los distintos módulos que componen la estructura. El cálculo de los bulones viene definido por el EAE de manera que se seguirán los pasos allí indicados para su cálculo y comprobación.

Los bulones tendrán dos características principales:

-Permitirán la rotación alrededor de su eje, aparte de ser una de las condiciones que se han tenido en cuenta durante el cálculo es una característica que resultara muy práctica para la fase de montaje y desmontaje. Y de esta manera evitamos la transmisión de momentos alrededor del eje Y.

-Los bulones serán uniones desmontables ya que de esta manera se permitirá modificar características geométricas de la pluma o torre según las necesidades y también porque de esta manera se facilitara su montaje y desmontaje.

#### 7.3.2.1 Cálculo de los bulones según EAE

Uno de los primeros pasos es fijarnos en el artículo 29.4 donde se nos da las características mecánicas de los materiales empleados para la fabricación de bulones, estas características las podemos observar en la tabla 67 en función del espesor de chapa y el estado del acero:

Estado	Temple y revenido						Normalizado			
	d ≤ 16 mm		16 mm < d ≤ 40 mm		40 mm < d ≤ 100 mm		d ≤ 16 mm		16 mm < d ≤ 100 mm	
Designación	$f_{yb}$	$f_{tb}$	$f_{yb}$	$f_{tb}$	$f_{yb}$	$f_{tb}$	$f_{yb}$	$f_{tb}$	$f_{yb}$	$f_{tb}$
C 22	340	500 a 650	290	470 a 620	—	—	240	430	210	410
C 25	370	550 a 700	320	500 a 650	—	—	260	470	230	440
C 30	400	600 a 750	350	550 a 700	300 (*)	500 a 550 (*)	280	510	250	480
C 35	430	630 a 780	380	600 a 750	320	550 a 700	300	550	270	520
C 40	460	650 a 800	400	630 a 780	350	600 a 750	320	580	290	550
C 45	490	700 a 850	430	650 a 800	370	630 a 780	340	620	305	580
C 50	520	750 a 900	460	700 a 850	400	650 a 800	355	650	320	610
C 55	550	800 a 950	490	750 a 900	420	700 a 850	370	680	330	640
C 60	580	852 a 1.000	520	800 a 950	450	750 a 900	380	710	340	670

Tabla 67, Valores de límites elásticos y de fluencia en N/mm<sup>2</sup> para distintos aceros según el EAE.

Una vez tenemos en cuenta el material con el que se fabricara la unión podemos pasar al cálculo. El cálculo de los bulones en el EAE se detalla en el artículo 58.9 dentro del capítulo XIV “Uniones”. Se seguirá la explicación dada en el EAE siguiendo los pasos que más adelante será empleados para el cálculo de las dimensiones de distintos bulones de la grúa.

Primero se puede establecer el espesor necesario de las chapas que formaran parte de la unión según podemos ver en la imagen 145 mediante la fórmula presentada:

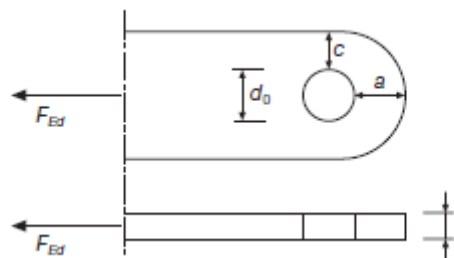


Imagen 145, Referencias geométricas de las placas del bulón.

$$t \geq 0.7 * \sqrt{\frac{F_{Ed} \gamma_{M0}}{f_y}}$$

Donde:

$F_{Ed}$ : esfuerzos a los que será sometido el bulón según esquema 145.

$\gamma_{M0}$ : factor de seguridad aplicado a la chapa, en nuestro caso 1,05.

$f_y$ : límite elástico del acero elegido.



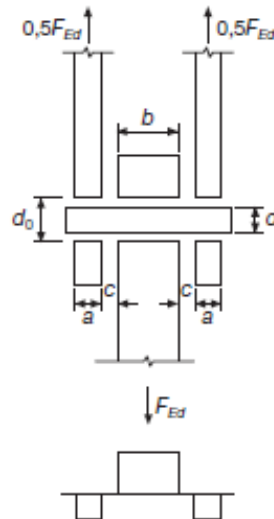


Imagen 146, Referencias geométricas entre las placas que conforman la unión.

Entonces el diámetro del agujero vendrá limitado por:

$$d_0 \leq 2.5 * t$$

Una vez obtenidos estos valores podemos obtener los anchos de material necesarios para resistir los esfuerzos de diseño, esto se hace según las expresiones siguientes:

$$a \geq \frac{F_{Ed} \gamma_{M0}}{2t f_y} + \frac{2d_0}{3}$$

$$c \geq \frac{F_{Ed} \gamma_{M0}}{2t f_y} + \frac{d_0}{3}$$

Los valores obtenidos con las anteriores expresiones se deberán tener en cuenta para las siguientes fases del cálculo donde obtendremos los valores de resistencia del bulón según el diámetro que le asignemos. La resistencia a cortante de un bulón de diámetro  $d$  sección transversal  $A$  y fabricado con un acero de resistencia  $f_{up}$  será:

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6A f_{up}}{\gamma_{M2}}$$

En el caso presentado en la imagen 146 se producirá un momento que vendrá dado por la expresión:

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed}(b + 4c + 2a)}{8}$$

Y se deberá cumplir que:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} = \frac{1.5W f_{yp}}{\gamma_{M0}}$$

Dónde:

$W$ : Modulo de resistencia de la sección que para el caso del bulón con sección circular será de:

$$W = \frac{\pi d^3}{32}$$

$\gamma_{M2}$ : Factor de seguridad aplicado al bulón, de 1,25.

En caso de que el bulón deba ser desmontable se deberá cumplir que:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} = 0.8W f_{yp}$$

La resistencia combinada a cortante y flexión deberá cumplir que:

$$\left[ \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \right]^2 + \left[ \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right]^2 \leq 1$$

Finalmente nos muestra el cálculo de la resistencia a aplastamiento para una pieza de espesor  $t$ , con un acero con un límite elástico  $f_y < f_{yp}$  dontra un bulón de diámetro  $d$ , la expresión dada es la siguiente:

$$F_{b,Rd} = \frac{1.5tdf_y}{\gamma_{M0}}$$

Teniéndose que cumplir:

$$F_{b,Ed} \leq F_{b,Rd}$$

En caso de que la unión sea desmontable las expresiones serán las siguientes:

$$F_{b,Rd} = 0.6tdf_y$$

$$F_{b,Ed} \leq F_{b,Rd}$$

Para los bulones se deberá emplear una tolerancia marcada por la norma ISO 286-2 con una tolerancia correspondiente a la clase H11, en los planos presentados en el anexo se le habrá asignado el valor correspondiente.

### 7.3.2.2 Cálculo de los bulones de la grúa

En este apartado calcularemos las dimensiones necesarias de los bulones y de las chapas que servirán de unión para que soporten los esfuerzos a los que serán sometidos.

Los valores que se darán en este apartado se han calculado conforme el apartado 9.3.2.1 de este proyecto donde se explicaba el método de cálculo según el EAE. Como el EAE nos da las expresiones para realizar la comprobación será necesario realizar varias pruebas hasta conseguir un valor adecuado de dimensiones de la unión, para ello se ha empleado la herramienta EXCEL que nos permitirá introduciendo unos valores conseguir ver si las comprobaciones dan correctamente. En la imagen 147 podemos ver la hoja de Excel empleada.

Bulon			Calculo espesor		
d<d0	75,00		0,5F	200000,00	
f <sub>u</sub>	610,00	f <sub>y</sub> 320	ym0	1,05	
ym2	1,25		f <sub>u</sub> chapa	255,00	
c	10,00		f <sub>y</sub> chapa	410,00	
Area	4417,86		t>=	20,09 t elegida	30 a
F <sub>u,Rd</sub>	1293550,78		d0<=	50,22 d0 elegida	75
Med	6500000,00		d0<=*	75,00	
Mrd	18933705,72	MrdDesmontable 10602875	F	400000,00	
w	41417,48		ym0	1,05	
Para estar OK este valor tiene que ser positivo			f <sub>u</sub> chapa	255,00	
	12433705,72	4102875	f <sub>y</sub> chapa	410,00	
Para estar OK este valor tiene que ser <=1			t>=	28,41 t elegida	30 b
	0,21		d0<=	71,02 d0 elegida	75
			d0<=*	75,00	
Aplastamiento caso 1			Para el calculo de anchuras		
Fb,Rd	1317857,14	Fb,Rd desmontab 553500	Caso 1	Caso 2	
Tiene que dar positivo			a>=	58,54	67,07
	1117857,14	353500	c>=	33,54	42,07
Aplastamiento caso 2					
Fb,Rd	1317857,14	Fb,Rd desmontab 553500			
Tiene que dar positivo					
	917857,14	153500			

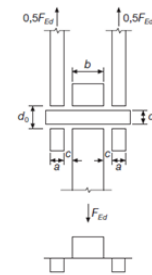


Imagen 147, Hoja de Excel empleada para el cálculo de los bulones.

En el programa EXCEL deberemos introducir el valor de los esfuerzos a los que será sometido, los valores de resistencia elástica de los materiales (según las tablas del EAE), y el espaciado *c* (según esquema presentado anteriormente) que habrá entre las chapas. El programa nos dara unos rangos de valores de espesor (para los dos tipos de chapas que analizamos) y unos rangos para el agujero. Deberemos elegir unos valores y el programa nos realizará las distintas comprobaciones.

En nuestro caso se han elegido los siguientes materiales:

- Material del bulón: el bulón estará fabricado con C50 normalizado y como intuimos que el diámetro será mayor a 16 milímetros tendremos las siguientes características mecánicas:
  - $f_{yp} = 320 \text{ N/mm}^2$
  - $f_{up} = 610 \text{ N/mm}^2$
- Material de la chapa: se ha elegido el mismo material usado en el programa de cálculo CYPE, el S275, según las tablas presentadas por el EAE tendrá los siguientes valores:
  - Si  $t \leq 40 \text{ mm}$ :

$$f_y = 275 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 430 < 580 \text{ mm}^2$$

- Si  $40 \leq t \leq 80 \text{ mm}$ :

$$f_y = 255 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 410 < 560 \text{ mm}^2$$

Que para el caso de estudio se elegirá el de menor resistencia es decir el segundo caso para la chapa.

Los bulones calculados serán los presentados a continuación y su elección se ha basado en el hecho de ser los más cargados, el resto de bulones con el mismo propósito se dimensionarán con unas mismas características. Los casos presentados son los siguientes:

- Bulones de unión de la pluma a la estructura de la torre: estos bulones estarán dispuestos de manera que el lado con dos chapas este en la pluma y el lado con una en la torre. Los mayores esfuerzos en uno de esos dos nudos de unión se darán en el caso de la pluma de 50 metros de longitud, con la carga en punta y el viento, dando un valor total de:

$$F_{Ed} = 551400 N$$

El valor se da en newtons ya que en la hoja de EXCEL se introduce por newtons. Los valores obtenidos se muestran en la tabla a continuación:

Valores para el lado con una chapa	
$t \geq$	33.36 mm
$d_0 \leq$	83.39 mm
Valores para el lado con dos chapas	
$t \geq$	23.59 mm
$d_0 \leq$	58.96 mm

Tabla 68, Valores de espesor y del diámetro calculados según el EAE.

Con estos valores y tras realizar algunas pruebas para conseguir que el bulón cumpliera se han obtenido los siguientes valores:

Valores elegidos para el lado con una chapa	
$t$	35 mm
$d_0$	75 mm
Valores elegidos para el lado con dos chapas	
$t$	30 mm
$d_0$	75 mm

Tabla 69, Valores de espesor y diámetros elegidos para proseguir con el cálculo según el EAE.

De manera que según el esquema 146 presentado anteriormente los valores que deberán tomar los espesores serán los siguientes:

Valores para el lado con una chapas	
$a \geq$	70.17 mm
$c \geq$	45.17 mm
Valores para el lado con dos chapa	
$a \geq$	61.77 mm
$c \geq$	36.77 mm

Tabla 70, Valores según la imagen 146 e espesores de chapa.

- Bulones de unión de los módulos de la pluma, habrán dos tipos, los situados en el cordón superior y los de los raíles o cordón inferior. Se ha seguido el mismo método que en el anterior caso con el siguiente valor de esfuerzo para el cordón superior:

$$F_{Ed} = 206000 N$$

Los valores obtenidos han sido los siguientes:

Valores para el lado con una chapa	
$t \geq$	20.39 mm
$d_0 \leq$	50.96 mm
Valores para el lado con dos chapas	

$t \geq$	14.42 mm
$d_0 \leq$	36.04 mm

Tabla 71, Valores de espesor y del diámetro calculados según el EAE.

<b>Valores elegidos para el lado con una chapa</b>	
$t$	25 mm
$d_0$	50 mm
<b>Valores elegidos para el lado con dos chapas</b>	
$t$	20 mm
$d_0$	50 mm

Tabla 72, Valores de espesor y diámetros elegidos para proseguir con el cálculo según el EAE.

<b>Valores para el lado con una chapa</b>	
$a \geq$	43.89 mm
$c \geq$	27.22 mm
<b>Valores para el lado con dos chapas</b>	
$a \geq$	39.93 mm
$c \geq$	23.26 mm

Tabla 73, Valores según la imagen 146 e espesores de chapa.

Los bulones para la unión en los cordones inferiores serán según el siguiente esfuerzo:

$$F_{Ed} = 318940 \text{ N}$$

Los valores obtenidos se presentan en las siguientes tablas:

<b>Valores para el lado con una chapa</b>	
$t \geq$	25.37 mm
$d_0 \leq$	63.42 mm
<b>Valores para el lado con dos chapas</b>	
$t \geq$	17.94 mm
$d_0 \leq$	44.84 mm

Tabla 74, Valores de espesor y del diámetro calculados según el EAE.

<b>Valores elegidos para el lado con una chapa</b>	
$t$	30 mm
$d_0$	60 mm
<b>Valores elegidos para el lado con dos chapas</b>	
$t$	25 mm
$d_0$	60 mm

Tabla 75, Valores de espesor y diámetros elegidos para proseguir con el cálculo según el EAE.

<b>Valores para el lado con una chapa</b>	
$a \geq$	53.61 mm
$c \geq$	33.61 mm
<b>Valores para el lado con dos chapas</b>	
$a \geq$	48.17 mm
$c \geq$	28.16 mm

Tabla 76, Valores según la imagen 146 e espesores de chapa.

- Los bulones de unión de la contrapluma a la estructura de la torre se dimensionarán teniendo en cuenta un esfuerzo de:

$$F_{Ed} = 175216.60 \text{ N}$$

Valores para el lado con una chapa	
$t \geq$	18.80 mm
$d_0 \leq$	47.01 mm
Valores para el lado con dos chapas	
$t \geq$	13.30 mm
$d_0 \leq$	33.24 mm

Tabla 77, Valores de espesor y del diámetro calculados según el EAE.

Valores elegidos para el lado con una chapa	
$t$	20 mm
$d_0$	50 mm
Valores elegidos para el lado con dos chapas	
$t$	20 mm
$d_0$	50 mm

Tabla 78, Valores de espesor y diámetros elegidos para proseguir con el cálculo según el EAE.

Valores para el lado con una chapa	
$a \geq$	44.55 mm
$c \geq$	27.88 mm
Valores para el lado con dos chapas	
$a \geq$	38.94 mm
$c \geq$	22.27 mm

Tabla 79, Valores según la imagen 146 e espesores de chapa.

- Los bulones de unión para los distintos módulos que conforman la torre, para ellos se ha tenido en cuenta el caso en el que aparecían mayores esfuerzos axiales en las partes que unían módulos, con esto tenemos un valor de:

$$F_{Ed} = 400000 \text{ N}$$

Valores para el lado con una chapa	
$t \geq$	28.41 mm
$d_0 \leq$	71.02 mm
Valores para el lado con dos chapas	
$t \geq$	20.09 mm
$d_0 \leq$	50.22 mm

Tabla 80, Valores de espesor y del diámetro calculados según el EAE.

Valores elegidos para el lado con una chapa	
$t$	30 mm
$d_0$	75 mm
Valores elegidos para el lado con dos chapas	
$t$	30 mm
$d_0$	75 mm

Tabla 81, Valores de espesor y diámetros elegidos para proseguir con el cálculo según el EAE.

Valores para el lado con una chapa	
$a \geq$	67.07 mm
$c \geq$	42.07 mm
Valores para el lado con dos chapas	
$a \geq$	58.54 mm
$c \geq$	33.54 mm

Tabla 82, Valores según la imagen 146 e espesores de chapa.

#### 7.4 Conclusiones de los resultados

Los resultados obtenidos en los anteriores apartados se acercan a las hipótesis del inicio donde decíamos que la mitad del momento producido por la carga en su posición más desfavorable en la pluma era contrarrestado por el contrapeso. Esto se puede observar de forma clara en los desplazamientos producidos en la torre, donde vemos que este se mantiene dentro de un rango de valores sin mostrar diferencia de desplazamientos muy notables.

Al ser una estructura en celosía los esfuerzos más importantes son los axiles, los axiles vienen definidos primordialmente por las cargas de servicio a las que la grúa es sometida y por las cargas introducidas por el propio peso de la pluma. Al ser una estructura con un voladizo muy importante es complicado impedir que esta se deforme mucho, de hecho como hemos podido observar la diferencia en los desplazamientos de las plumas de 25 y 50 metros son importantes.

El diseño inicial contemplaba solo un tirante para ambos casos de longitud de pluma, pero con el predimensionamiento se obtuvieron desplazamientos muy grandes e incluso inadmisibles, por eso finalmente se optó por el uso de dos tirante en la pluma de mayor longitud ofreciéndole a esta dos apoyos y por tanto menos pluma en voladizo.

Uno de los elementos que mayores dificultades ha presentado en el diseño ha sido el castillete. Este debe ser muy rígido ya que soportara todos los esfuerzos de los tirantes además que será el que a más desplazamientos estará sometido debido a lo visto en el apartado del cálculo simple. Se tuvieron que realizar varios diseños hasta el mostrado en los anteriores apartados ya que se tuvo que rigidizar con más barras con tal de evitar desplazamientos elevados.

En el anexo 1 se podrán ver los planos de la estructura de una forma más definida y con las uniones a bulones realizadas.

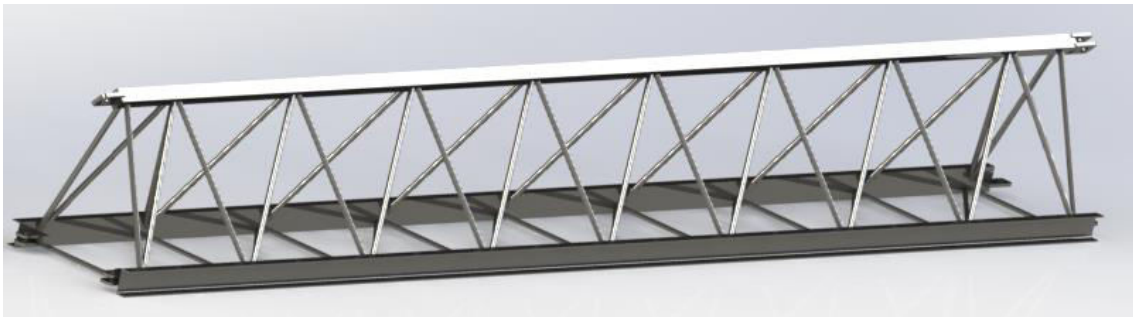
## 8. Grúa modelada en SolidWorks

A continuación se mostraran unas imágenes del modelado realizado mediante SolidWorks. En este modelado se han realizado varias modificaciones de manera que se pudieran encajar las piezas con mayor facilidad y lógica. Los planos han sido extraídos desde estos modelos.

También comentar que en el caso de los bulones de los módulos de la torre, el bulón tiene medidas inferiores a las calculas en el apartado de uniones, esto se debe a que por razones estéticas y por simplicidad se optaría por poner un bulón con unas características geométricas parecida a los cordones que forman la torre, por tanto se debería buscar un material de mayor resistencia capaz de cumplir con las nuevas medidas geométricas y realizar los ajustes necesarios a las barras del cordón.

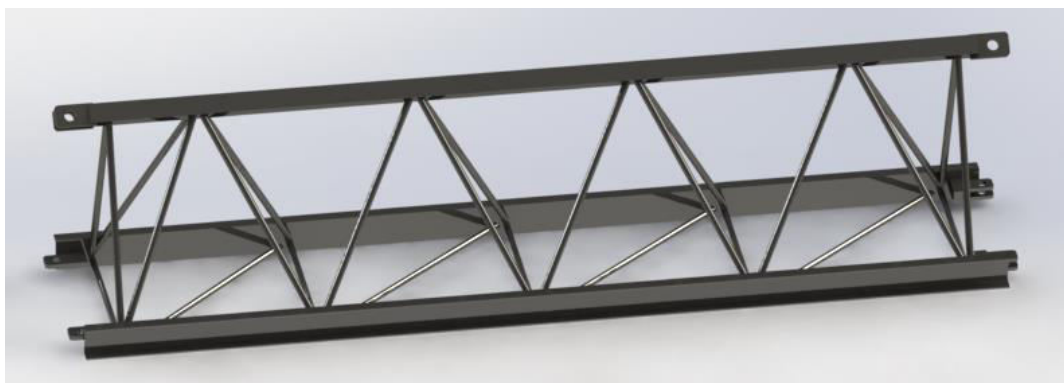
Este modelado presenta algunas modificaciones respecto al empleado para los cálculos, aunque de todas formas es un modelo comprobado mediante Cype que obtendría unos resultados parecidos. Esto es debido que en el momento de realizar el modelado 3d aparecen problemas que a simple vista no han sido visibles. Por tanto es un modelo que nos sirve para dar a entender un poco más las dimensiones de la grúa y el ensamblamiento de esta. En el anexo 1 se podrán encontrar los planos referentes a las imágenes aquí mostradas.

-Módulo de 11,6 metros de la pluma:



*Imagen 148, Modulo de 11,6 metros de la pluma modelizado con SolidWorks.*

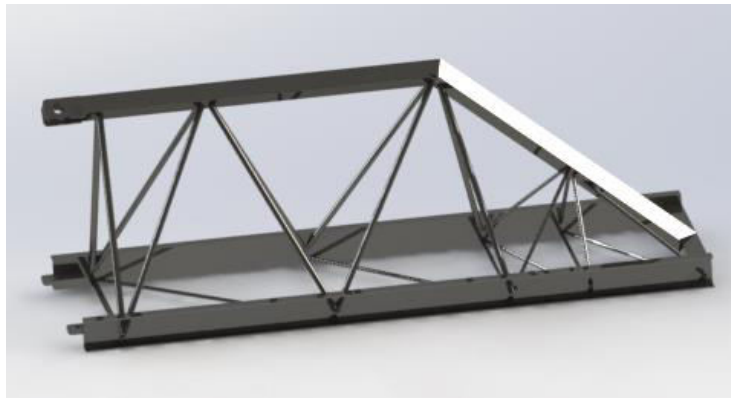
-Módulo de 5,8 metros de la pluma:



*Imagen 149, Modulo de 5,8 metros de la pluma modelizado con SolidWorks.*



-Módulo de la punta de la pluma:



*Imagen 150, Modulo de la punta de la pluma modelizado con SolidWorks.*

-Módulo de la torre:



*Imagen 151, Modulo de 4 metros de la torre modelizado con SolidWorks.*

-Contrapluma:



*Imagen 152, Contrapluma según la modificación para el cálculo de uniones modelizada con SolidWorks.*

-Castillete:



*Imagen 153, Castillete modelizado con SolidWorks.*

## 9. Transporte, montaje y desmontaje

La grúa ha sido diseñada por módulos de manera que se facilitara no solo el intercambio de estos por razones de mantenimiento y por modificar la altura de la torre sino que también significa una ventaja para su transporte.

El transporte de la grúa se realizara mediante camiones como los mostrados en la imagen 148. Estos camiones serán los que se encargaran de trasladar la grúa desmontada hasta la obra cuando se la requiera y también serán los que se llevaran los módulos al almacén al finalizar esta. De ser necesario y según la normativa del lugar a realizar las tareas de elevación se deberán pedir los permisos necesarios tanto para el transporte, como para el montaje y uso de la grúa.



Imagen 154, Contenedores Open Top, y el camión que los transporta a la derecha.

El montaje de la grúa torre será realizado por los operarios, estos serán supervisados por un técnico cualificado el cual tendrá la responsabilidad sobre el montaje de la misma. Los operarios recibirán unas órdenes y pasos para el correcto montaje de la grúa torre.

Para el montaje serán necesarios otros elementos a parte de la misma estructura, el más destacado es la necesidad de usar una grúa telescópica para poder erigir la torre y acoplar en ella la pluma y contrapluma. El montaje de la torre deberá pararse en caso de que los vientos superen los 50 Km/h.

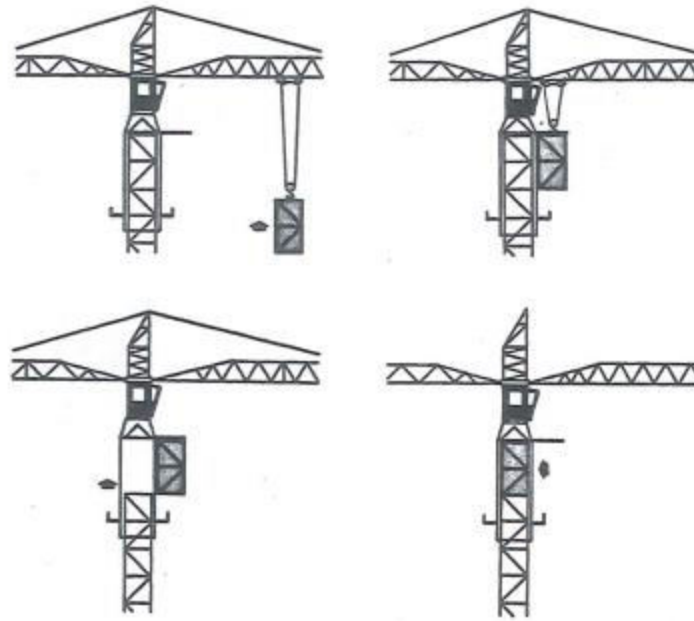
Los pasos que se seguirán para el montaje de la grúa torre son los siguientes:

1. Se realizará la cimentación y se colocará la base con los pesos complementarios en caso de ser necesarios.
2. Se realizará la colocación de la torre, una vez colocado el primer tramo que va unido a la base, se irán colocando los módulos, teniendo en cuenta que si la grúa telescópica empleada lo permite se podrán colocar varios módulos ya unidos para facilitar el montaje y disminuir el tiempo empleado para el despliegue.
3. Se instalará la plataforma de giro en la parte más alta de la torre, y seguidamente se colocará el castillete.
4. Se colocara la contrapluma con una parte del contrapeso (suficiente para contrarrestar la pluma una vez se haya colocado), la contrapluma se unirá con los tensores al castillete y se ira soltando desde una posición en que los tensores estén relajados hasta que estos estén tensos de forma graduada y sin sobresaltos. Antes de colocar la contrapluma se colocarán las barandillas de esta y los elementos de seguridad para los operarios.

5. Se colocará la pluma, se unirá mediante el tensor al castillete y se irá tensando de la misma forma que en el caso de la contrapluma, evitando sobresaltos y movimientos bruscos. En la pluma se debe disponer un cable para que los operarios se enganchen y así evitar el riesgo de caídas durante el montaje.
6. Se instalarán el resto de contrapesos de los que disponga la grúa.
7. Finalmente se instalarán el resto de mecanismos en la estructura.

En los pasos anteriormente descritos es necesario disponer en nuestro caso de una grúa telescópica de por lo menos unos 60 metros de altitud de alcance, esto podría resultar un problema y actualmente existe otro método de desplegamiento el cual incluye un módulo extra con una estructura completamente diferente a los módulos de la estructura que conforman la torre que permite el “autoensamblaje” de la torre sin necesidad de otras grúas más allá del inicio del montaje. Para este caso la grúa debe sufrir algunas modificaciones, por ejemplo los cordones de la torre deberán de disponer de unos railes por los que se desplazará el módulo de autoensamblaje además del resto de elementos necesarios para el correcto funcionamiento de este. Las fases para este caso de montaje serían las siguientes:

1. De la misma forma que en el caso interior se construye el anclaje de la torre al suelo y se disponen los pesos adicionales en la base en caso de ser necesario.
2. Se colocan unos primeros tramos de la torre, en este punto será necesario el uso de una grúa telescópica, se colocarán los tramos necesarios que permitan incluir el tramo de autoensamblaje.
3. Se colocará la contrapluma con parte del contrapeso de la misma forma que en el anterior caso.
4. Se colocará la pluma.
5. Se acabarán de poner los contrapesos y elementos adicionales tales como mecanismos.
6. El módulo de autoensamblaje empezará a trabajar según se puede observar en la imagen 149, este elevará la parte superior de la torre hasta dejar el espacio para incluir un nuevo módulo, entonces la misma grúa torre será utilizada para aumentar su propia altura elevando un módulo y acercándolo al módulo de autoensamblaje. Este último tendrá unos railes que recogerán el nuevo módulo y lo introducirán para formar parte, una vez ensamblado, del resto de la estructura según se puede observar en la imagen 149.



*Imagen 155, Montaje de una grúa torre con el módulo neumático.*

Este último método descrito presenta mejoras respecto al anterior ya que nos permite modificar la altura de la torre sin necesidad de usar una grúa, además que presenta tiempos de montaje inferiores. Aun así es un sistema más complejo que el anterior ya que la torre se debe diseñar de acuerdo al módulo que servirá para montarla, además del propio diseño del módulo y sistema que se usara.

## 10. Seguridad y salud

A continuación se pasaran a nombrar normas de seguridad y prevención para evitar accidentes durante el uso y montaje de la grúa torre.

La legislación que recoge estas normas en España es el Real Decreto 1627/1997, es una norma de obligado cumplimiento, y por tanto es importante que tanto los trabajadores como empresas que tomen parte en la obra lo conozcan. El Real Decreto mencionado es una norma que aparece por imperativo de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales 31/1995 siendo una normativa de mínimos que se deben cumplir. Esta ley pretende establecer un mínimo de garantías y responsabilidades para conseguir un nivel adecuado de seguridad para los trabajadores.

## 10.1 Medidas preventivas

A continuación se mostraran unas tablas con posibles situaciones peligrosas que se pueden dar y sus respectivas medidas para evitarlas, en distintas fases del proceso.

- **Riesgos directos**

-Trabajos de montaje, desmontaje y mantenimiento:

Situación peligrosa	Medida
<b>Caída de personas en el desplazamiento de la torre y trabajos en la misma.</b>	Existirá en la torre una escalera fija con aros salvavidas o bien eléctrico de un sistema con cinturones de seguridad con dispositivo eléctrico <sup>191</sup> en toda la altura de la grúa. Durante los trabajos de montaje y desmontaje el operario ira provisto de un eléctrica que le unirá a la estructura y les sujetara. Se usara calzado antideslizante.
<b>Caída de personas en el desplazamiento de la pluma, contrapluma y trabajos en las mismas.</b>	Cuando un trabajador deba operar en la pluma o contrapluma deberá ir sujeto con un cinturón de seguridad. La cuerda del cinturón ira unida a una cuerda que siga la pluma en su longitud.
<b>Caída de personas desde pasarelas y plataformas de servicio.</b>	Las plataformas de servicio deberán disponer <sup>191</sup> de barandillas y el suelo será antideslizante.
<b>Desplome de la grúa por rotura del cable o fallo en los husillos.</b>	Se deberá realizar el mantenimiento adecuado de los elementos de la pluma.
<b>Atrapamiento en los puntos de contacto de los cables-poleas o en los engranajes.</b>	Los trabajos de mantenimiento se realizaran siempre con la grúa fuera de servicio. Las poleas y elementos que puedan presentar esta problemática deberán estar cubiertas para evitarlo, además, la ropa de trabajo de los operarios deberá ir ajustada al cuerpo.

Tabla 83, Medidas de seguridad frente a los riesgos principales.

-Durante su utilización:

Situación peligrosa	Medida
<b>Contacto eléctrico indirecto debido a la conexión entre el sistema eléctrico y los elementos de la grúa.</b>	En la grúa existirá una puesta a tierra asociada a una diferencia de 300 miliamperios. La resistencia de la puesta a tierra no debe superar los 80 Ohmios. En el caso de una grúa móvil, la toma de tierra debe hacerse enterrando un cable de cobre en toda la longitud de la vía, y conectar con un piqueta cada tramo.
<b>Contacto eléctrico directo, provocado por el contacto entre la carga o cables de la grúa con líneas eléctricas aéreas.</b>	Para este caso se debería consultar el NPT 72 (Guía de buenas prácticas)
<b>Atrapamiento de personas entre la grúa móvil y elementos fijos.</b>	Debe haber una distancia mínima de 70 cm entre las partes más externas de la grúa y los elementos exteriores más próximos.

<b>Desplome de la grúa debido a la colocación defectuosa de la vía.</b>	Las vías deben seguir un recorrido rectilíneo y horizontal, además deberán mantener una separación constante.
<b>Desplome de la grúa debido a una deficiencia en el lastre o contrapluma.</b>	Se deben seguir las instrucciones proporcionadas por el fabricante. El peso del lastre deberá repartirse simétricamente, y el valor del peso deberá mostrarse claramente.
<b>Desplome de la grúa al salirse de las vías.</b>	La grúa se deslizará sobre raíles que tendrán unos topes en sus extremo de 3/5 del diámetro de la rueda. Se situarán dispositivos limitadores a un metro de cada final de recorrido con tal de aumentar la seguridad.
<b>Desplome de la grúa a causa de fallos en el terreno.</b>	Deberá realizarse un estudio del terreno que ayude a evitar el desplome del terreno.
<b>Caída de la carga.</b>	Para evitar la caída de la carga se debe vigilar: <ul style="list-style-type: none"> <li>-El cable debe tener la longitud necesaria.</li> <li>-Ver si hay pestillo de seguridad.</li> <li>-Colocar limitadores de carga.</li> <li>-Mantener debidamente los cables.</li> <li>-No se superará la carga estipulada por el fabricante.</li> <li>-Si el cable presenta algún síntoma de desgaste se debe sustituir.</li> </ul>

Tabla 84, Medidas de seguridad frente a los riesgos durante la utilización.

- **Riesgos indirectos:**

-Durante su utilización:

<b>Situación peligrosa</b>	<b>Medida</b>
<b>Desplome de la grúa.</b>	En caso de vientos iguales o superiores a 60 Km/h o bien el límite que fije el conductor. En caso de producirse este viento la grúa móvil deberá dirigirse a los carriles de seguridad, y la grúa fija deberá orientar la pluma en la dirección del viento y ser puesta en veleta (en giro libre). No se deben arrancar objetos del suelo con la grúa. No se debe elevar cargas si estas no están en el mismo eje que el carro-gancho.
<b>Caída de la carga o parte de esta.</b>	Cuando las cargas sean alargadas se sujetarán con eslingas dobles para así evitar su deslizamiento. Las plataformas de transporte de materiales estarán apantalladas y en caso de no poder estarlo se atarán con cuerdas.
<b>Caída de personal al recoger la carga con posibilidad de caída.</b>	Se dotarán de plataformas en voladizo con barandillas y rodapiés para la descarga de materiales, evitando caídas del personal.
<b>Caída del gruísta.</b>	En caso de ser necesario se colocaría una plataforma dotada de barandillas y rodapiés.

Tabla 85, Medidas de seguridad frente a los riesgos indirectos.



## 10.2 Seguridad

Antes de poner a trabajar la grúa el gruista debe comprobar el correcto funcionamiento de todos los movimientos y dispositivos de seguridad. También se deben poner a cero todos los mandos que no lo estuvieran.

Durante el funcionamiento se debe cumplir lo siguiente:

- Las contramarchas no deben ser utilizadas como freno.
- Se recomienda no dejar caer el gancho al suelo con tal de mantener los niveles de tensión.
- El conductor no puede abandonar la grúa mientras esta esté cargada.
- Cuando haya un relevo entre conductores el saliente deberá informar del estado de la grúa al entrante y además, lo anotara en el libro de incidencias que se guardara en la obra.
- Los movimientos de la grúa se deben manejar teniendo en cuenta los efectos de la inercia, de manera que se eviten las paradas bruscas o sacudidas.
- Queda prohibido arrancar objetos del suelo. El conductor dará avisos antes de realizar cada movimiento.
- Se debe evitar en la medida de lo posible que la carga vuele por encima de personas.
- No se usará el mecanismo de elevación para elevar personas.

En la grúa existen unos elementos de seguridad electromecánicos llamados limitadores. Las funciones de estos son las siguientes:

- Limitador de par máximo: para el avanece del carro y la subida del gancho cuando se detecta una carga superior a la establecida.
- Limitador de carga máxima: impide subir el gancho cuando este sobrepasa la carga máxima en un 10%.
- Limitador del recorrido de altura del gancho: son básicamente finales de carrera dispuestos en la parte superior e inferior.
- Limitador de traslación del carro: de la misma manera que en el caso anterior consiste de unos finales de carrera que impiden que el carro llegue al final de su recorrido donde se hallaran unos topes de goma.
- Limitador del número de giros de la torre: para evitar que se dañen los cables eléctricos es preciso limitar el número de vueltas que puede dar la pluma, de manera que este limitador limitara las vueltas que pueda dar la grúa (en los dos sentidos) en un par o tres.

En caso de ir sobre vías estas también deberán tener sus limitadores.

Los elementos bajo tensión deberán estar protegidos y fuera del alcance de cualquier persona ajena a la obra. Se debe tener especial cuidado con los armarios de contadores que deberán estar bajo llave.

También es muy importante disponer en la grúa de una placa fácilmente visible donde se indique las capacidades de carga en función de la distancia, los limitadores deberán actuar en función de las especificaciones de la placa.

### 10.3 Gruista

Según la legislación el gruista deberá tener el título exigible que podrá obtener cumpliendo los siguientes requisitos:

- Aprobar un a prueba de conocimientos generales de aritmética, dibujo y electricidad.
- Deberá aprobar un curso teórico-práctico de 200 horas. Si se acredita experiencia se podrá optar por un curso de 50 horas.
- Deberán aprobar un examen realizado por la dirección regional de industria.
- Deberán pasar un examen médico a nivel de vista, orientación, equilibrio y agudeza auditiva.

El gruista es uno de los trabajadores más importantes de la obra ya que de él depende la puesta en marcha y el funcionamiento de la grúa y por tanto el avance de la obra, así como la seguridad en gran parte del resto de trabajadores. Por lo que esta persona deberá ser una persona capaz y responsable aparte de cumplir con lo estipulado en la normativa.

#### 10.3.1 Obligaciones del gruista

El gruista deberá descansar periódicamente ya que debe mantener unos buenos reflejos y mantenerse fresco durante el manejo.

Existirá en la obra un libro donde se indiquen las obligaciones diarias que deberá mantener el gruista:

- Comprobar funcionamiento de los frenos.
- Observar un funcionamiento normal de la grúa antes de usarla.
- Verificar el comportamiento del lastre.
- Colocar la carga de nivelación para mantener la tensión del cable.
- Cuando se acabe de operar con la grúa esta deberá encararse en la dirección del viento, sin freno (en veleta), subir el gancho hasta el carro y cortar la corriente.

Las obligaciones semanales serán:

- Volver a apretar los tornillos, sobretodo en la torre y pluma como en la base giratoria.
- Verificar la tensión del cable y su engrase.
- Comprobar las vías.
- Comprobar las protecciones de las que dispone la grúa.
- Realizar el mantenimiento necesario de partes que pueden sufrir desgaste como sería el caso de los cojinetes.

#### 10.3.2 Prohibiciones del gruista

A continuación, mostraremos un conjunto de prohibiciones que según la norma UNE 58-101 se deben cumplir.

-Prohibido hacer tracciones oblicuas.

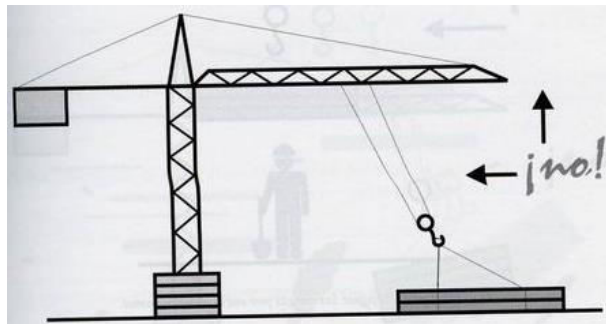


Imagen 156, Prohibición de levantar cargas oblicuas.

-Prohibido arrancar objetos o piezas del suelo o pared.

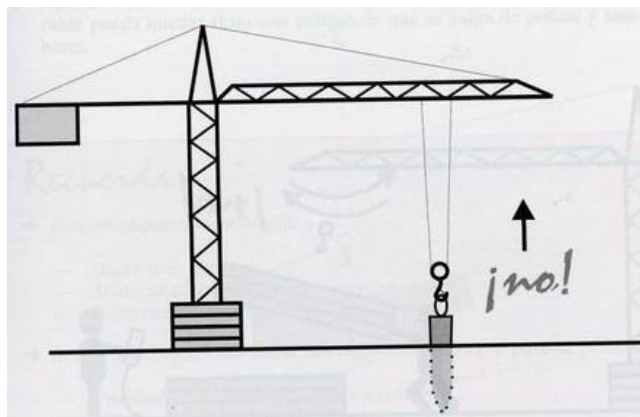


Imagen 157, Prohibición de arrancar objetos.

-Transportar cargas por encima de otro personal de la obra.

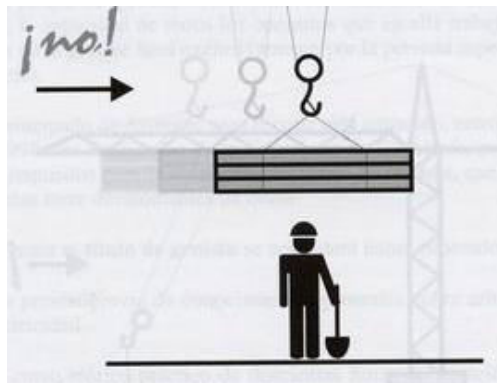


Imagen 158, Está prohibido hacer pasar las cargas por encima de personas.

-Transportar cargas por zonas transitables por personas o vehículos si estas no han sido cortadas antes.

-Queda prohibido balancear las cargas.

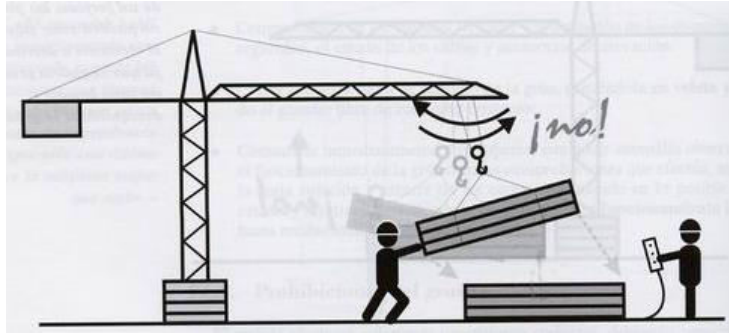


Imagen 159, Está prohibido balancear las cargas.

-Utilizar la grúa para transportar personal.

-Trabajar con vientos superiores a 72 Km/h o bien si la carga es difícil de controlar aun teniendo un viento inferior.

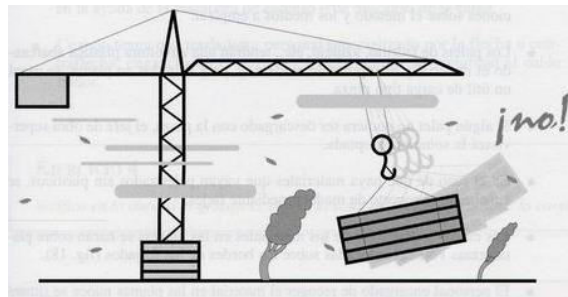


Imagen 160, Prohibido trabajar con vientos superiores a los 20 m/s.

-Trabajar con tormenta eléctrica cercana.

-Apoyar el gancho sobre una superficie o cualquier lugar.

## 10.4 Material de seguridad

A continuación mostraremos unas tablas con el material empleado para la protección de distintas partes del cuerpo. Dicho material deberá ser suministrado por la empresa de construcción, además esta deberá acordar la ocupación de la vía con las autoridades para proceder a la instalación de la grúa torre.

<b>Protecciones de cabeza</b>	<b>Protecciones de manos y brazos</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cascos de seguridad, no metálicos, clase N, aislados para baja tensión, con el fin de proteger a los trabajadores de los posibles choques, impactos y contactos eléctricos.</li> <li>• Protectores auditivos acoplables a los cascos de protección.</li> <li>• Gafas de montura universal contra impactos y antipolvo.</li> <li>• Mascarilla antipolvo con filtros protectores.</li> <li>• Pantalla de protección para soldadura autógena y eléctrica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Guantes contra las agresiones mecánicas (perforaciones, cortes, vibraciones).</li> <li>• Guantes de goma finos, para operarios que trabajen con hormigón.</li> <li>• Guantes dieléctricos para B.T.</li> <li>• Guantes de soldador.</li> <li>• Muñequeras.</li> <li>• Mango aislante de protección en las herramientas.</li> </ul>	
<b>Protecciones de pies y piernas</b>	Protecciones del cuerpo	Equipos adicionales
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Calzado provisto de suela y puntera de seguridad contra las agresiones mecánicas.</b></li> <li>• <b>Botas dieléctricas para B.T.</b></li> <li>• <b>Botas de protección impermeables.</b></li> <li>• <b>Polainas de soldador.</b></li> <li>• <b>Rodilleras.</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crema de protección y pomadas.</li> <li>• Chalecos, chaquetas y mandiles de cuero para protección de las agresiones mecánicas.</li> <li>• Traje impermeable de trabajo.</li> <li>• Cinturón de seguridad, de sujeción y caída, clase A.</li> <li>• Fajas y cinturones antivibraciones.</li> <li>• Pértiga de B.T.</li> <li>• Banqueta aislante clase I para maniobra de B.T.</li> <li>• Linterna individual de situación.</li> <li>• Comprobador de tensión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Casco de protección aislante clase E-AT.</li> <li>• Guantes aislantes clase IV.</li> <li>• Banqueta aislante de maniobra clase II-B o alfombra aislante para A.T.</li> <li>• Pértiga detectora de tensión (salvamento y maniobra).</li> <li>• Traje de protección de menos de 3 kg, bien ajustado al cuerpo y sin piezas descubiertas eléctricamente conductoras de la electricidad.</li> <li>• Gafas de protección.</li> <li>• Insuflador boca a boca.</li> <li>• Tierra auxiliar.</li> <li>• Esquema unifilar</li> <li>• Placa de primeros auxilios.</li> <li>• Placas de peligro de muerte y E.T.</li> </ul>

Tabla 86, Material de seguridad del que se debe disponer en la obra.

## 11. Mantenimiento

En este apartado expondremos cuales son las principales acciones de mantenimiento que debemos hacer a la grúa torre y sus elementos para que estos realicen sus funciones sin problemas y también para aumentar la vida útil de estos.

Para asegurar el correcto funcionamiento y evitar un desgaste pronunciado también se deben seguir los puntos expuestos en el anterior apartado de seguridad y salud como por ejemplo la prohibición de arrancar objetos del suelo con la grúa o evitar cambiar de sentidos de marcha de forma brusca.

Los principales elementos a verificar después del montaje serán los siguientes:

- Los cables y las tensiones de estos, y en caso de ser necesario se realizaran los ajustes pertinentes. El mantenimiento y la detección de defectos se explican más ampliamente en el apartado 6.2.4.

- Los limitadores se deberán comprobar y que los valores que estos den sean los correctos conforme especificaciones.

- Los frenos siendo un elemento muy importante deberán verificarse antes de ponerse en uso la grúa y se deberán revisar cada día antes de usarse la grúa.

- El zócalo del terreno donde se asienta la grúa ya que este puede sufrir variaciones a causa del asentamiento del peso de la grúa. La horizontalidad se deberá comprobar cada 600 h de uso.

- Los motores deberán ir con una protección no inferior a IP55 de esta forma los protegeremos contra el polvo y agua, además deberán tener un periodo de rodaje de 500 horas tras el cual se deberá lubricar. Cada 12000 será necesario cambiar el lubricante y comprobar el estado de los motores.

- La corona de giro es un elemento muy importante y deberá ser tratado cuidadosamente. Después de ser montada se deberá engrasar, pasadas las 100 horas se deberá volver a engrasar y deberá pasar por mantenimiento cada semana. El engrase se deberá realizar una vez al mes.

- También será necesario realizar un engrase general de todos los elementos que forman parte de la grúa, desde los rodamientos de las poleas, hasta el cable, bulones... Todos estos elementos deberán ser revisados después de ser desmontada la grúa y antes de ser puesta en funcionamiento de nuevo.

En caso de que algún elemento presentara un desgaste pronunciado o algún tipo de imperfección que lo inhabilite para su uso este deberá ser reemplazado. De la misma forma pasa con los módulos, en caso de que alguno este dañado deberá ser reemplazado de forma inmediata.

## 12. Impacto ambiental

En este apartado explicaremos brevemente cual es el impacto ambiental producido por la grúa torre en todas sus fases. El impacto que produce la grúa se puede dividir según la fase del proceso de uso o fabricación en el que nos encontremos. De este modo se evaluara el impacto según las fases que mostramos a continuación:

-Fase de fabricación: en esta fase se deben obtener las materias primas necesarias para producir el acero en las minas, además de un uso importante de agua y energía por parte de la industria metalúrgica para poder conformar las barras de acero que se necesiten.

-Fase de montaje y desmontajes: en esta fase las emisiones y el gasto de energía que se producirá será inferior a la anterior. En este caso lo más destacable es la necesidad de usar camiones para el transporte y grúas para su montaje con las emisiones correspondientes de estos.

-Fase de estado de servicio: esta fase y dependiendo del uso que se le dé es de las menos contaminantes. La grúa posee dos motores de baja potencia eléctricos, esto quiere decir que obviamente habrá el impacto producido por las emisiones realizadas al generar esa energía utilizada aunque este será bajo en comparación a las otras dos fases. Por otro lado cuando la grúa está montada esta produce un impacto visual, esto solo será mientras este montada ya que al finalizar las tareas la grúa desaparecerá del lugar.

Cuando la estructura de la grúa llegue al final de la vida se deberá tomar en consideración la opción de reciclar el acero. Con el acero reutilizado se puede conseguir ahorrar hasta 1,5 toneladas de hierro, 500 kilogramos de carbón por cada tonelada de acero reutilizado. No solo se consigue un ahorro material sino que también se conseguiría disminuir el uso de agua hasta un 40% y el de energía en un 70%.

Para el resto de elementos que lo permitan también se considerara el reciclarlos y reutilizar los materiales aprovechables con tal de reducir el impacto ambiental de unas estructuras tan comúnmente empleadas en la construcción.

## 13. Conclusiones

El objetivo del presente trabajo era el estudio y diseño de una grúa torre, pasando por los elementos mecánicos que permiten a esta realizar sus funciones hasta un cálculo mediante un programa de la estructura de la misma.

Las grúas torre como cualquier máquina de grandes dimensiones están compuestas por una cantidad de elementos muy grande como se ha podido comprobar. El diseño de todos estos elementos es una tarea complicada y que requeriría de mucho tiempo por lo que se han nombrado las características y aspectos principales de estos elementos con tal de poder realizar su selección de acuerdo al funcionamiento esperado.

Con el programa CYPE hemos podido realizar el cálculo de la estructura en ELU (estado limite ultimo) de acuerdo con las normativas. A medida que el cálculo iba avanzando se debieron realizar varias modificaciones, la más destacable es el uso de perfiles tubulares ya que con este tipo de perfiles es más sencillo el cálculo de las uniones según las normativas vigentes.

También es importante mencionar la importancia de usar las normativas vigentes para el cálculo de los distintos elementos, el uso continuo de las normativas se ha visto traducido en una mayor facilidad de cara a las fases finales en el manejo de las normativas las cuales pueden facilitar las cosas si se saben interpretar de forma correcta.

Como conclusión final podemos decir que el objetivo del trabajo se ha cumplido, ya que se han dado los parámetros principales para la selección de aquellos elementos considerados como más importantes de la grúa además de haber realizado el cálculo de la estructura según la normativa vigente, una estructura que a nivel de desplazamientos (uno de los aspectos más importantes tratándose de una estructura de gran voladizo) entra dentro de un rango aceptable.



## 14. Presupuesto

A continuación se mostrara un presupuesto simple que tendrá en cuenta la fabricación de la grúa y los elementos aquí mencionados. También se indicaran las horas de trabajo para la realización del presente proyecto.

Para la realización de la estructura tendremos el siguiente apartado:

Estructura acero				
Ud	Descripción	Unidades	Precio unitario	Total
Kg	Acero en distintos tipos de barra según lo especificado en proyecto. Acero S	35179	1,12	39400,48
m	Cable de acero de 14 milímetros de diámetro.	200	12,42	2484,00
m	Cable de acero de 15 mm de diámetro.	100	15,64	1564,00
m	Cable metálico de seguridad.	225	2,30	517,50
m	Tirantes de la grúa.	80	1,12	89,60
h	Oficial 1a Soldador.	550	20,50	11275,00
h	Oficial 2a Soldador.	300	14,00	4200,00
h	Montador de estructuras metálicas.	500	20,50	10250,00
Ud	Accesorios, partida referente a los materiales empleados por los soldadores, además de los accesorios necesarios para el montaje, tales como una grúa.	1	10000,00	10000,00
<b>TOTAL</b>				<b>79780,58</b>

Tabla 87, Presupuesto simple del material de la estructura.

Para los elementos presentes en la grúa:

Elementos mecánicos				
Ud	Descripción	Unidades	Precio unitario	Total €
U	Tambor del sistema de elevación.	1	560,74	560,74
U	Tambor del sistema de traslación.	1	462,80	462,80
U	Motor de 5,5 CV para los sistemas de elevación y traslación.	2	210,12	420,24
U	Corona de giro Thyssen Krupp.	1	14230,00	14230,00
U	Poleas del sistema de elevación.	12	310,50	3726,00
U	Aparejo.	1	345,00	345,00
U	Poleas del sistema de traslación.	9	225,30	2027,70
U	Carro de la pluma.	1	12500,00	12500,00
U	Accesorios, partida referente a los accesorios necesarios para el montaje no especificados en el capítulo.	1	10000,00	10000,00

Kg	Contrapesos de 19 y 10 toneladas.	29000	0,94	27260,00
TOTAL				71532,48

Tabla 88, Presupuesto simple de los elementos mecánicos de la grúa.

Los costes de ingeniería serán los siguientes:

Ingeniería				
Ud	Descripción	Unidades	Precio unitario	Total
h	Horas de trabajo de la ingeniería para la realización del proyecto.	420	18,00	7560,00
TOTAL				7560,00

Tabla 89, Presupuesto de ingeniería del proyecto.

No se ha tenido en cuenta el coste de montaje de la grúa en el sitio de obra ya que este dependerá de la empresa que la use, en nuestro caso solo nos encargaremos de fabricarla y almacenarla. Los costes de almacenaje se deberán tener en cuenta en un futuro plan de negocio ya que mientras esta no esté en uso (alquilada) se deberá almacenar, al ser un coste variable no se incluye en estas partidas.

Finalmente el coste del proyecto se resume de la siguiente manera:

Total estructura	178573,06
Ingeniería	7560,00
Beneficio industrial 6%	10714,38
Total sin IVA	196847,44
Total con IVA (21%)	238185,41

Tabla 90, Total del presupuesto presentado en este apartado.

## 15. Bibliografía

Emilio Larrode, Antonio Miravete., 1996. *GRUAS*. [Libro] [Imagen 21, 22, 25, 40, 41, 42, 46, 54, 149]

<http://www.kkiem.agh.edu.pl/dydakt/fem/3DFrame.htm> [En línea] [*Repartición de esfuerzos en barra tridimensional*, consultado el 26 de Julio del 2016]

Robert L. Norton., 2013. *Diseño de máquinas*. [Libro]

<https://www.thyssenkrupp-rotheerde.com/> [En línea] [*Selección de la corona de giro*, consultado el 15 de febrero de 2017.]

<http://www.sercables.com/> [En línea] [*Elección del cable*, consultado el 20 de septiembre de 2016.]

<http://www.stahlcranes.com/es/unternehmen/historie/krantechnik.php>[En línea] [*Historia y elementos mecánicos de la grúa*, consultado el 14 de Junio de 2016.]

<http://www.gruasarlin.com/historia-invencion-evolucion-grua/>[En línea] [*Historia de la grúa*, consultado el 12 de Junio de 2016.]

<http://construccion-nicolas.blogspot.com.es/2009/05/historia-de-la-grua.html> [En línea] [*Historia de la grúa*, consultado el 14 de Junio de 2016.]

[https://es.wikipedia.org/wiki/Gr%C3%BAa\\_\(m%C3%A1quina\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Gr%C3%BAa_(m%C3%A1quina)) [En línea] [*Tipología de grúas*, consultado el 7 de Agosto de 2016.] [Imagen 11]

<http://www.tradeindia.com>[En línea] [*Tipología de grúas*, consultado el 7 de Agosto de 2016.][Imágenes 1, 2, 3]

<http://www.talleresjosearroyo.com>[En línea] [*Montaje de las grúas torre y elementos de la grúa*, consultado el 22 de Septiembre de 2016.][Imagen 4]

<http://victoryepes.blogs.upv.es/files/2012/12/Grua-autodesplegable.jpg> [En línea] [*Grúas autodesplegables*, consultado el 27 de Septiembre de 2016.][Imagen 5]

<http://aldoarqangel.blogspot.com.es/2009/04/como-se-arman-las-gruas-o-winch.html> [En línea] [*Grúa monobloc*, consultado el 18 de Septiembre de 2016.][Imagen 6]

<http://www.monografias.com/trabajos32/grua-torre/grua-torre.shtml> [En línea] [*Información general de la grúa torre, sus componentes y normativas*, consultado el 25 de enero de 2017.][Imagen 7, 156, 157, 158, 159, 160]

<http://www.transmaquina.com> [En línea] [*Grúas telescópicas*, consultado el 17 de octubre de 2016.][Imagen 8]

<http://www.directindustry.es> [En línea] [*Imágenes de grúas y elementos de estas*, consultado el 23 de octubre de 2016.][Imagen 9, 10, 18, 30]

<http://nilson-israel-navarro-valle.blogspot.com.es/2014/04/gruas-torre.html> [En línea] [*Movimientos principales de la grúa torre*, consultado el 1 de noviembre de 2016.][Imagen 12, 13]

<http://www.arqhys.com/construccion/fotos/construccion> [En línea] [*Pluma de la grúa torre*, consultado el 11 de noviembre de 2016.][Imagen 14]

<http://www.iltecnicos.com/wp-content/uploads/2012/10/grua1.jpg> [En línea] [*Elementos de la grúa torre*, consultado el 25 de noviembre de 2016.][Imagen 15]

<http://www.gruasmetalbo.com> [En línea] [*Imágenes de distintos elementos e información de estos*, consultado el 21 de marzo de 2017.][Imagen 16, 34]

[http://previpedia.es/Gr%C3%BAa\\_torre](http://previpedia.es/Gr%C3%BAa_torre) [En línea] [*Imagen de la contrapluma con contrapesos*, consultado el 7 de diciembre de 2016.][Imagen 17]

<http://www.expo000.com/pavilions/construction-machinery/index.php?app=goods&id=1534> [En línea] [*Imagen del carro de la grúa*, consultado el 3 de diciembre de 2016.][Imagen 19]

<https://www.unioviado.es/DCIF/IMecanica> [En línea] [*Cálculos de cable, poleas y distintos elementos mecánicos de la grúa*, consultado el 18 de septiembre de 2016.][Imagen 20]

[http://caminos.udc.es/info/asignaturas/622/contenido\\_publico/recursos/P2\\_12\\_anclaje.pdf](http://caminos.udc.es/info/asignaturas/622/contenido_publico/recursos/P2_12_anclaje.pdf) [En línea] [*Información sobre los anclajes del cable*, consultado el 9 de enero de 2017.][Imagen 20]

<http://www.gosan.net/> [En línea] [*Aparejos para grúas torre*, consultado el 14 de septiembre de 2016.][Imagen 23, 24]

[www.beamguru.com](http://www.beamguru.com) [En línea] [*Diagramas de esfuerzos de los ejes, herramienta que permite el cálculo*, consultado el 19 de septiembre de 2016.][Imagen 35, 36, 37]

<http://www.ingemecanica.com/> [En línea] [*Distintos conceptos y procedimientos relacionados con la mecánica*, Consultado el 16 de febrero de 2017.]

<http://www.emz.de> [En línea] [*Motores eléctricos*, consultado el 24 de septiembre de 2016.][Imagen 28]

<http://www.aficionadosalamecanica.net/frenos-3.htm> [En línea] [*Frenos de disco*, consultado el 21 de octubre de 2016.][Imagen 29]

[https://previa.uclm.es/area/ing\\_rural/Acero/Textos/RD-751-2011-Instruccion-Acero-Estructural-EAE-2011-Comentada.pdf](https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Acero/Textos/RD-751-2011-Instruccion-Acero-Estructural-EAE-2011-Comentada.pdf) [En línea] [*Principios de cálculo para soldadura*, consultado el 17 de marzo de 2017.]

[https://previa.uclm.es/area/ing\\_rural/trans\\_const/elementosconstruccion02.pdf](https://previa.uclm.es/area/ing_rural/trans_const/elementosconstruccion02.pdf) [En línea] [*Principios de cálculo para soldadura*, consultado el 17 de marzo de 2017.]

[https://www.uclm.es/area/ing\\_rural/Acero/Textos/RD-751-2011-Instruccion-Acero-Estructural-EAE-2011-Comentada.pdf](https://www.uclm.es/area/ing_rural/Acero/Textos/RD-751-2011-Instruccion-Acero-Estructural-EAE-2011-Comentada.pdf) [En línea] [*Instrucción del acero estructural, EAE*, Consultado el 21 de abril de 2017.]

<https://law.resource.org> [En línea] [*Eurocodigos*, Consultado el 21 de marzo de 2017.]

<http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/ingenieria-grafica/material-de-clase-1/4.1.%20Tolerancias.pdf> [En línea] [*Tolerancias de elementos de unión*, Consultado el 28 de marzo de 2017.]





## Vº DE AUTORIZACIÓN DE DEFENSA DE TRABAJO FIN DE GRADO

Yo, GIOVANNI GÓMEZ GRAS Director/a del TFG/TFM

llevado a cabo por el / la estudiante:

Nombre : Oriol

Apellidos : Montenat i Martínez

DNI : 41016270 W

Grado en Ingeniería : Mecánica Máster en : \_\_\_\_\_

### ACREDITO:

Que el / la estudiante se encuentra en condiciones de realizar, en la presente convocatoria, la defensa del trabajo de fin de Grado / de Master que a continuación se relaciona:

Título del TFG/TFM: Diseño de una grua torre

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Y para que conste, a petición del interesado y los efectos de autorización de defensa de TFG / TFM, firmo el presente visto bueno.

Barcelona a, 12 de MAIG de 20 17

El/la Director/a del TFG/TFM

Firma: