

GRADO EN MECÁNICA
TRABAJO FIN DE GRADO

***DISEÑO DE LA PLUMA DE UNA GRÚA
TELESCÓPICA AUTOPROPULSADA***

DOCUMENTO 3- ANEXO

Alumno/Alumna: Llaguno, Jauregui, Israel
Director/Directora (1): Macho, Mier, Erik

Curso: 2018/2019

Fecha: Bilbao, 24, 06, 2019

3. ANEXO

3.1- DATOS DE PARTIDA	7
3.2 - INTRODUCCIÓN.....	7
3.3 - DETERMINACIÓN DE SOLICITACIONES	8
3.3.1- CLASIFICACIÓN DE LOS APARATOS EN FUNCIÓN DEL SERVICIO	9
3.3.2- TIPOS DE SOLICITACIONES SOBRE LA ESTRUCTURA.....	11
3.3.3 - DETERMINACIÓN DE COMBINACIONES DE SOLICITACIONES	20
3.4 - ESTIMACIÓN DE LA CARGA EN LA PLUMA	22
3.5 - CÁLCULO DEL CILINDRO HIDRÁULICO DE ELEVACIÓN	22
3.6- ELECCIÓN DEL MATERIAL.....	26
3.7- MÉTODO DE CÁLCULO.....	27
3.8- RESOLUCIÓN DE CÁLCULOS	30
3.8.1 HIPÓTESIS 1	30
3.8.2 HIPÓTESIS 2	45
3.8.3 CÁLCULO DEL CILINDRO HIDRÁULICO DE ELEVACIÓN.....	65
3.8.4- DIMENSIONADO DE LA CELOSÍA.....	68
3.8.5- CILINDRO HIDRÁULICO DE LA CELOSÍA.....	80
3.8.6- TABLAS DE CARGAS	81
3.8.7- ESTABILIDAD DEL CONJUNTO.....	83
3.8.8- BULONES.....	94
3.8.9- SOLDADURAS	101
3.8.10- DIMENSIONADO DEL GANCHO	106
3.8.11- DIMENSIONADO DEL RODAMIENTO DE GIRO	107
3.9- HOJAS DE CÁLCULO.....	109
3.9.1- HOJAS DE CÁLCULO PARA EL DIMENSIONADO DE LA PLUMA	109
3.9.2- HOJAS DE CÁLCULO PARA EL DIMENSIONADO DEL TRAMO FIJO.....	111
3.9.3- HOJAS DE CÁLCULO PARA LA FUERZA DEL CILINDRO HIDRÁULICO ..	112
3.9.4- HOJAS DE CÁLCULO PARA EL DIMENSIONADO DE LA CELOSÍA	113
3.9.5- HOJAS DE CÁLCULO PARA LA ESTABILIDAD	114
3.9.6- HOJAS DE CÁLCULO PARA LA SOLDADURA.....	115
3.9.6- HOJAS DE CÁLCULO PARA TABLAS DE CARGAS.....	116
3.9.7- HOJAS DE CÁLCULO PARA RODAMIENTO	116

INDICE FIGURAS

Figura 1: Unión pluma-cilindro desde 0° a 83,36°	23
Figura 2: Formulario Liebherr para cilindros a medida	24
Figura 3: Fórmulas para cilindros a medida	25
Figura 4: Valores máximos para cilindros a medida	25
Figura 5: Ejes de coordenadas	27
Figura 6: Imagen 3D y en corte del eje fuerte	28
Figura 7: Proceso de dimensionamiento de la pluma y elementos	29
Figura 8: Dibujo esquematizado de la pluma completa y sus centros de gravedad	32
Figura 9: Fuerzas totales en la pluma	35
Figura 10: Ejes de coordenadas en GIM	36
Figura 11: Vistas auxiliares para la obtención de fuerza y momentos en GIM	37
Figura 12: Sección crítica de la pluma	38
Figura 13: Tensiones normales por la fuerza axial	40
Figura 14: Tensiones normales por momentos flectores	40
Figura 15: Tensiones tangenciales por la fuerza cortante	41
Figura 16: Tensiones tangenciales por momentos flectores	41
Figura 17: Momento de inercia en una sección rectangular	42
Figura 18: Distancia "y"	42
Figura 19: Telescopado de la pluma	43
Figura 20: Esquema de los tramos y distancia entre ellos	43
Figura 21: Numeración de los tramos de telescopado	45
Figura 22: Eje de giro y distancia desde éste hasta la línea de cálculos	47
Figura 23: Fuerzas para el primer tramo	49
Figura 24: Fuerzas por ejes	50
Figura 25: Giro de ejes a favor de la sección	50
Figura 26: Descomposición fuerzas	51
Figura 27: Fuerzas y momentos en el tramo 1	52
Figura 28: Fuerzas y momentos en la sección crítica del tramo (extremo inferior)	53
Figura 29: Sección crítica del tramo 1	53
Figura 30: Distancias a la línea neutra	54
Figura 31: Distancias de la sección	54
Figura 32: Fuerzas axiales descompuestas para el tramo 1	55
Figura 33: Esquema para los tramos consecutivos plano X-Z	56
Figura 34: Esquema para tramos consecutivos plano X-Y	57
Figura 35: Cálculo de la dimensión de los tramos consecutivos	57
Figura 36: Sección crítica del tramo fijo	58
Figura 37: Esquema dimensiones - fuerzas del tramo fijo	59
Figura 38: Configuraciones de estudio de la pluma	61
Figura 39: Configuración de carga máxima	62
Figura 40: Configuración de pluma completamente extendida	63

Figura 41: Medidas finales de la pluma	64
Figura 42: Esquema de medidas para situar el cilindro hidráulico	66
Figura 43: Diseño de la celosía	68
Figura 44: Vista superior de la celosía	68
Figura 45: Vista inferior de la celosía	69
Figura 46: Numeración de las barras de la celosía	69
Figura 47: Disposiciones de la celosía	70
Figura 48: Fuerzas axiales en las barras de la celosía en configuración a $83,36^\circ$ (GIM)	71
Figura 49: Fuerzas axiales en las barras de la celosía en configuración a 45° (GIM)	72
Figura 50: Características mecánicas del acero S275JR	73
Figura 51: Prontuario de barras con sección hueca circular	74
Figura 52: Longitudes de pandeo según las condiciones de extremo	75
Figura 53: Valores del coeficiente de pandeo	75
Figura 54: Curvas de pandeo	75
Figura 55: Cordón superior e inferior de la celosía	77
Figura 56: Barras interiores de la celosía	78
Figura 57: Posición de los centros de gravedad para plumas telescópicas y celosías	84
Figura 58: Dimensiones de posicionamiento de los estabilizadores	87
Figura 59: Valor L_m y pesos en configuración de celosía a $83,36^\circ$	91
Figura 60: Valores L_m y pesos en configuración de celosía a 45°	92
Figura 61: Bulón de elevación de la pluma	95
Figura 62: Bulón del cilindro hidráulico de elevación	96
Figura 63: Bulones del cilindro hidráulico de la celosía	97
Figura 64: Bulones de anclaje de la celosía	97
Figura 65: Bulón de giro	98
Figura 66: Tuerca KM	99
Figura 67: Catálogo de tuercas KM	100
Figura 68: Pieza de unión pluma-cilindro	101
Figura 69: Representación de tensiones para soldaduras en ángulo	101
Figura 70: Descomposición de fuerzas para las soldaduras	102
Figura 71: Tensiones en las soldaduras	102
Figura 72: Dimensiones de la pieza de unión pluma-cilindro	103
Figura 73: Descomposición de fuerzas al plano de la soldadura	103
Figura 74: Dimensiones de las soldaduras	104
Figura 75: Tensión de rotura, coeficiente de correlación y coeficiente parcial para las soldaduras	105
Figura 76: Ganchos según el peso a soportar	106
Figura 77: Tipo de gancho elegido	107
Figura 78: Rodamiento ROTHE ERDE	108

INDICE TABLAS

Tabla 1: Definición de la vida del mecanismo	9
Tabla 2: Definición de estado de carga	10
Tabla 3: Clasificación del aparato	10
Tabla 4: Clasificación de aparatos (FEM/DIN)	11
Tabla 5: Valores de velocidades y presiones de viento	15
Tabla 6: Coeficientes de forma para la fuerza del viento	19
Tabla 7: Valores M en función del grupo	21
Tabla 8: Equivalencias del acero elegido	26
Tabla 9: Resumen de las dimensiones de los tramos	65
Tabla 10: Resumen de las tensiones máximas en los tramos	65
Tabla 11: Resumen de medidas del cilindro hidráulico de elevación	67
Tabla 12: Resumen de las dimensiones del cilindro hidráulico de la celosía	80
Tabla 13: Cargas máximas para ángulo máximo	81
Tabla 14: Cargas máximas para 60° de inclinación	81
Tabla 15: Cargas máximas para 50° de inclinación	82
Tabla 16: Cargas máximas para 40° de inclinación	82
Tabla 17: Resumen de los pesos de la grúa	85
Tabla 18: Resumen de las distancias de los elementos de la grúa	85
Tabla 19: Valores de las distancias de los estabilizadores	87
Tabla 20: Resumen de los diámetros de los bulones	99
Tabla 21: Resumen de los diámetros de los bulones roscados	100

INDICE GRÁFICAS

Grafica 1: Representación de los valores de ξ	13
Gráfica 2: Determinación del coeficiente η	17
Grafica 3: Aproximación del coeficiente de forma	35

3- ANEXOS

3.1- DATOS DE PARTIDA

DATOS DE PARTIDA		
Distancia entre tramos de la pluma (m)	0,005	
Radio Carga máxima (m)	10	
Longitud tramo fijo (m)	14,5	
Longitud tramo extensible (m)	57,5	
Número de tramos ext.	5	
Longitud por tramo ext. (m)	11,5	
Longitud celosía (m)	14,5	
Masa carga (Kg) / (KN)	250.000	2.452,5
Velocidad angular máxima (rad/s)	0,06	
Velocidad de rotación máxima (m/s)	0,6	
Tiempo en alcanzar esa velocidad (s)	8	
Aceleración angular (rad/s ²)	0,008	
Longitud total (m)	86,5	
q = Presión aerodinámica (Kg/m ²)	25	
q _{max} = Presión aerodinámica para V _w = 42 m/s	110	
Densidad material F-114 (Kg/m ³)	7850	
Angulo inclinación máxima (º) / rad	83,36	1,45

Los datos rellenados en verde son datos obtenidos mediante cálculos.

3.2 - INTRODUCCIÓN

Para realizar el cálculo de la estructura de la grúa se han seguido los pasos descritos en el libro “Grúas” de Emilio Larrodé y Antonio Miravete, el cual determina las reglas de cálculo basándose en la normativa de la Federación Europea de la Manutención, FEM.

En este caso particular llamamos estructura a la pluma de nuestra grúa telescópica autopropulsada. Tiene como objeto absorber los esfuerzos generados por las diferentes sollicitaciones y transmitirlos a la estructura fija, que serán los estabilizadores de la grúa.

La técnica de cálculo de la pluma de la grúa se compone de varias fases:

- 1) Determinación de sollicitaciones y combinaciones de ellas que actúan sobre la pluma.

- 2) Obtención de tensiones, esfuerzos y desplazamientos existentes mediante los cálculos correspondientes.
- 3) Comprobación de los valores obtenidos con los valores admisibles de elasticidad, resistencia y estabilidad.

3.3 - DETERMINACIÓN DE SOLICITACIONES

Las solicitaciones existentes sobre la estructura de un aparato de elevación se van a calcular mediante la normativa de la FEM.

A fin de clarificar la situación del CNE (Comité Nacional Español) de la FEM, diferenciándolo de una asociación profesional tan genérica como la de ingenieros industriales, en 1989 se constituyó la Asociación Española de Manutención, AEM, con personalidad jurídica propia que dio marco legal independiente al comité español de la FEM. Se puede afirmar que la AEM materializó un cambio de nombre de una asociación con 35 años de historia (en aquel momento), que por el ordenamiento jurídico no podía constituirse desde su constitución en 1954, como asociación con personalidad propia homologable en Europa.

En la actualidad la AEM ha incorporado las siglas FEM a su acrónimo y en su logo, por lo que hoy se denomina, FEM-AEM, Asociación Española de Manutención, reflejando el cambio que se empezó a gestar en la asamblea general, celebrada en el año 2000.

FEM-AEM está organizada en grupos de producto (las antiguas secciones), siguiendo el cambio organizativo que ha acordado la FEM a nivel europeo.

A las empresas españolas les conviene asociarse a la FEM-AEM puesto que esta es la forma para participar en FEM y tener acceso a sus documentos de trabajo, y una vía directa de defensa de sus intereses en los foros de FEM que preparan las “reglas del juego” de la industria de la manutención europea que posteriormente se van convirtiendo en normas europeas (EN).

El presente método de obtención de solicitaciones es aplicable a aparatos de elevación correspondientes a la sección I de la FEM y no sería aplicable a grúas móviles sobre neumáticos, cintas, orugas, camiones, remolques y patines, correspondientes a la sección V.

Teniendo en cuenta que la grúa simplemente utilizará las ruedas para desplazarse y no para trabajar, es decir que una vez llegado al lugar de trabajo pondrá los estabilizadores dispuestos anterior y posteriormente antes de comenzar a trabajar, se puede suponer que dicha grúa pertenece a la sección I de la FEM.

3.3.1- CLASIFICACIÓN DE LOS APARATOS EN FUNCIÓN DEL SERVICIO

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

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

3.3.1.1- VIDA DEL MECANISMO

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

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

Tabla 1: Definición de la vida del mecanismo

Se estima una vida de 10 años, trabajando las 52 semanas del año, 6 días a la semana durante 8 horas al día. La grúa se sabe que no estará trabajando esas horas constantemente debido a una posible avería, mantenimiento...etc. pero se trabajará de cara de la seguridad durante el diseño. Se calculan un total de 24.960 horas de vida total del mecanismo, por lo tanto, la grúa se encuentra en el **grupo F**.

VIDA DEL MECANISMO

Horas al día	8
Días a la semana	6
Semanas al año	52
Años	10
Total horas en la vida del mecanismo	24960

3.3.1.2- ESTADO DE CARGA

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

Esta idea está caracterizada por un espectro de cargas elevadas, indicando el número de ciclos para los cuales el aparato es capaz de levantar una cierta fracción de la carga máxima.

Se consideran en la práctica, cuatro estados convencionales de carga, caracterizadas por el valor k , representando la frecuencia de la carga máxima durante el servicio en un número de ciclos determinado. (Tabla 2)

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

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

Tabla 2: Definición de estado de carga

Se considera para el estado de carga una frecuencia aproximada igual de cargas pequeñas, medianas y máximas ya que no se utilizará una grúa para el levantamiento de su carga máxima constantemente. Por lo tanto, esto se corresponde con un estado de carga 3 y un factor $k = 0,500$.

3.3.1.3- CLASIFICACIÓN DEL APARATO

A partir de la vida del mecanismo y del estado de cargas, los aparatos se clasifican en seis grupos según la FEM. (Tabla)

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

Tabla 3: Clasificación del aparato

Por tanto, según la vida del mecanismo y su estado de carga, la grúa se clasifica en el **grupo M8**.

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

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

Tabla 4: Clasificación de aparatos (FEM/DIN)

3.3.2- TIPOS DE SOLICITACIONES SOBRE LA ESTRUCTURA

Previo a calcular la estructura se han de determinar las solicitaciones que actúan sobre ella, teniendo en cuenta los factores de seguridad que les afectan a cada solicitación.

Los tipos de solicitaciones a tener en cuenta son:

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

3.3.2.1- SOLICITACIONES PRINCIPALES

Las solicitaciones principales son las siguientes:

- a) **Solicitaciones debidas a la carga de servicio**, o peso de la carga útil más el peso de los elementos accesorios: gancho, cuchara,...
- b) **Solicitaciones debidas al peso propio**, o peso de todos los elementos que componen la grúa a excepción de la carga de servicio.
En principio se tomarán unos valores aproximados para poder empezar a realizar los primeros cálculos pero a medida que vayamos estableciendo los valores reales éstos valores se irán cambiando. Los valores aproximados se estimarán teniendo en cuenta la longitud de la pluma.

3.3.2.2- SOLICITACIONES DEBIDAS A MOVIMIENTOS VERTICALES

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

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

$$Q_{sc} = Q_s \cdot \Psi$$

El coeficiente Ψ está definido por la expresión:

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

Donde:

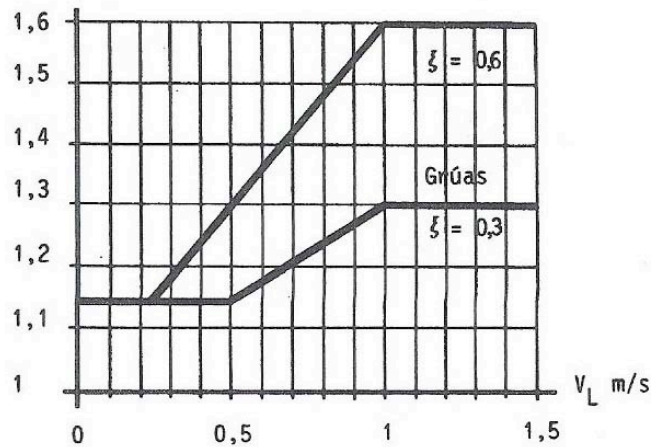
V_L = Velocidad de elevación (m/s).

ξ = Coeficiente experimental.

- 0,6 para puentes grúa y pórticos.
- 0,3 para grúas.

Al ser una grúa autopropulsada, se utiliza $\xi = 0,3$.

Los valores de ξ están representados en la siguiente gráfica:



Gráfica 1: Representación de los valores de ξ

El coeficiente Ψ tiene en cuenta la manipulación de la carga de servicio, que constituye el choque más importante. Las **solicitaciones debidas a aceleraciones o deceleraciones** sobre el movimiento vertical son **despreciables**.

3.3.2.3- SOLICITACIONES DEBIDAS A MOVIMIENTOS HORIZONTALES

- a. **Efectos horizontales debidos a movimientos de dirección.** Se tiene en cuenta el efecto que genera la aceleración debida al movimiento de giro de la grúa. La grúa inicia una fuerza de aceleración hasta llegar a la velocidad deseada y un movimiento de deceleración al parar. Esto genera una

La fuerza de inercia será:

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

Dónde:

- m = Masa del cuerpo.
- a_G = Aceleración del centro de gravedad del cuerpo.

- b. **Efectos de la fuerza centrífuga.** Por el hecho de estar girando, tanto la carga como la pluma describen un movimiento circular. En el movimiento circular existe una fuerza centrífuga como consecuencia de la aceleración normal hacia afuera de la circunferencia que describe el movimiento.

La fuerza centrífuga tendrá un valor de:

$$F_c = m \cdot w^2 \cdot r$$

Dónde:

- m = Masa del cuerpo en cuestión
- w^2 = Velocidad angular del cuerpo
- r = Radio desde el eje de giro al centro de gravedad del cuerpo

c. **Efectos de choque de topes.** Solo se considera cuando el choque se produce sobre la estructura, o cuando se produce sobre la carga suspendida.

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

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

En este proyecto la carga no se encuentra rígidamente guiada sino que está suspendida de un cable, por lo que no se considera efectos de choque de topes por carga suspendida. Se deberán considerar sobre la estructura en el caso de tener una velocidad de translación de 0,7 m/s pero nuestra velocidad de translación se considera en torno a **0,6 m/s**.

3.3.2.4- SOLICITACIONES DEBIDAS A EFECTOS CLIMÁTICOS.

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

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

El contacto del viento con la superficie

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

Las medidas realizadas en determinadas localidades presentan una continua variación aleatoria tanto en la velocidad como en la dirección del viento. Con el modelo de variación aleatoria se pueden obtener tendencias o medias para intervalos de tiempo determinados. Se utilizan mapas de viento basados en datos históricos como fuente de información de velocidades de viento, así como principales tempestades, etc.

El aire a nivel del mar ejerce una presión uniforme de 101,4 KPa. Cuando el aire está en movimiento, sin embargo, esta presión se modifica. La fuerza del viento ejerce sobre una superficie en su camino una presión y una fuerza negativa o succión en la superficie opuesta debido a los cambios de presión locales. Como ejemplo, un cambio de un 1% en la presión normal es equivalente a 1,014 KPa.

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

La relación de la presión estática viene dada por:

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

Donde ρ es la densidad del aire. Si la velocidad se expresa en metros por segundo y la presión en pascales, la expresión queda:

$$q = \frac{5}{8} \cdot v_w^2$$

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

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

Tabla 5: Valores de velocidades y presiones de viento

En este caso la altura del elemento por encima del suelo podría ascender a unos 70 metros por lo que se obtiene un **viento máximo** de **42 m/s** (151,2 Km/h). La **velocidad del viento** se toma **20 m/s** (72 Km/h) y una **presión aerodinámica** de **25 Kgf/m² ó daN/m²**.

Al aumentar la altura sobre el suelo, el efecto de arrastre del viento sobre el suelo llega a ser menos pronunciado, hasta llegar a una altura en la cual el viento es libre de arrastres. Pero las alturas a las que desaparece el efecto de arrastre son más grandes que las de las alturas de instalaciones de grúas (de 250 a 460 metros), por ello se asume que las grúas están situadas en la zona de arrastre.

Varias fuentes registran datos referentes a los cambios de la velocidad del viento con la altura para cada zona. Normalmente estos datos proceden de estudios realizados en zonas costeras y en los cuales se incluyen los efectos de las tormentas por lo que suelen estar mayorados. Es por ello que se ha de diferenciar entre el tipo de relieve topográfico en el que estamos estudiando esta variación. Este es el caso del exponente de Davenport, cuyos valores son aceptados por la normativa americana (ANSI). La ley exponencial propuesta diferencia entre los siguientes coeficientes.

$p = 1/7$ terreno abierto y zonas costeras.

$p = 1/4,5$ zonas boscosas, ciudades, extrarradios de ciudades y zonas costeras abruptas.

Entonces la variación de la velocidad con la altura viene expresada como:

$$v_w = v_{w0} \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^p$$

La expresión por tanto de la presión del viento en unidades del sistema internacional será por tanto:

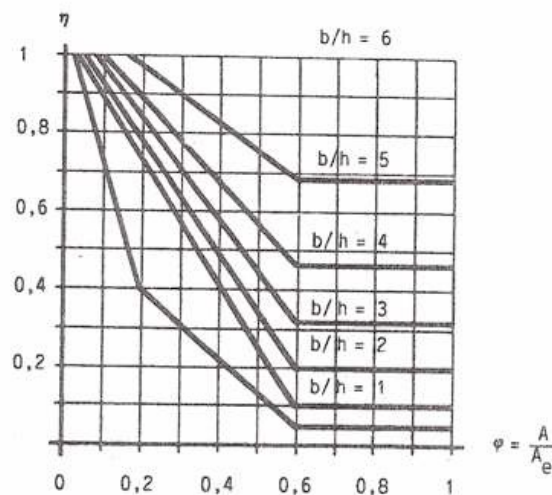
$$q = \frac{5}{8} \cdot v_{w0}^2 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^{2p}$$

Presión del viento sobre objetos

La expresión anterior da la presión del viento sobre objetos de formas indefinidas. Evidentemente un objeto cortante originará menores perturbaciones o cambios de presión en la corriente del viento que la que ocasionará una gran superficie plana. A través de ensayos e investigaciones se han obtenido datos que relacionan la forma de los objetos con la resistencia que ellos inducen. En la tabla (Tabla) se dan valores de coeficientes para estas

fuerzas de oposición para una serie de formas típicas utilizadas en construcciones de grúas.

Cuando un objeto está enfrente de otro idéntico al primero, se debe considerar el efecto “sombra”. Este parámetro está relacionado con la forma y la distancia entre los objetos. La grafica (Grafica) da valores del coeficiente de sombra η , el cual representa que parte del viento sobre el primero de los dos objetos actúa sobre el segundo. El coeficiente puede ser aplicado sucesivamente a cuerpos adicionales. Finalmente los efectos de la presión del viento disminuyen si éste no incide normal a la superficie. La presión efectiva del viento se traduce en la presión del viento multiplicada por el cuadrado del seno del ángulo que forma la dirección del viento con la superficie en cuestión.



Gráfica 2: Determinación del coeficiente η

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

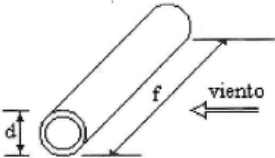
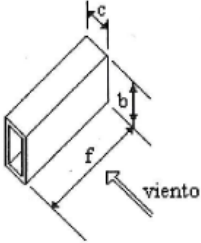
$$F = q \cdot A \cdot C$$

Donde:

- F = Fuerza sobre la superficie actuando en la dirección del viento.
- q = Presión estática a la altura h del objeto. (En este caso se toma la presión aerodinámica **25 Kg/m²**)
- A = Área del objeto sobre la que actúa el viento.
- C = Coeficiente de forma
 - = C_f para viento actuando normal a la superficie.
 - = $C_f \cdot \eta_m$ para consecutivos e idénticos objetos equidistantes.
- C_f = Coeficiente de forma, expresado en tabla.

- η_m = Efecto acumulativo de sombra sobre m idénticos equidistantes objetos.
- η = Coeficiente de sombra, dado en tabla.
- Θ = Angulo entre la dirección del viento y a superficie del objeto.

Cuando una superficie está situada a un ángulo determinado con la dirección del viento, y se requiere conocer el efecto del viento normal a la superficie, se resuelve de manera ordinaria. Para viento actuando sobre la diagonal de una torre cuadrada, el coeficiente C puede tomarse como $1.0 + 0,75\phi$ veces el valor frontal sobre la cara de una torre teniendo en cuenta la sombra sobre la segunda cara. Donde ϕ es la relación entre el área sólida y el área total de dicha cara ($\phi = A/A_e$) siendo A la suma de todas las áreas de los componentes de la cara, y A_e el área total considerada. **La fuerza se toma actuando en la diagonal**

		f/d	C_f
Tubos		$d \cdot v_w < 4,5 \text{ m/s}^2$	50 1,10
		$v_w = \text{velocidad del viento (m/s}^2)$	40 1,00
		$d = \text{diámetro (m)}$	30 0,95
			20 0,90
			10 0,80
			5 0,75
		<hr/>	
		$d \cdot v_w \geq 4,5 \text{ m/s}^2$	50 0,80
			40 0,75
			30 0,70
			20 0,70
			10 0,65
			5 0,60
<hr/>			
		f/d	C_f
vigas cajón grandes sobre 35 mm cuadradas ó 25 x 45 mm rectangulares		$\frac{b}{c} \geq 2$	40 2,20
			30 2,10
			20 1,95
			10 1,75
			5 1,55
		$\frac{b}{c} = 1$	40 1,90
			30 1,85
			20 1,75
			10 1,55
			5 1,40
		$\frac{b}{c} = \frac{1}{2}$	40 1,40
			30 1,35
			20 1,30
			10 1,20
			5 1,00
$\frac{b}{c} = \frac{1}{4}$	40 1,00		
	30 1,00		
	20 0,90		
	10 0,90		
	5 0,80		

		η	C_r	
Celosías simples, viento perpendicular a las caras. (utilizar factor de sombra η_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
			0,10	1,25
		$d \cdot v_w < 4,64m/s^2$	0,20	1,20
			0,30	1,10
			0,40	1,05
			0,50	1,05
		$d \cdot v_w \geq 4,64m/s^2$	0,80	

Estructuras de celosías ensambladas cuadradas o triangulares con el viento perpendicular a las caras		$< 0,025$	4,0
		0,025+0,45	4,13-5,18 η
		0,45+0,7	1,8
		0,7+1,0	1,33+0,67 η
		Caso de viento en la diagonal, se multiplica el valor perpendicular a la cara por:	1,0+0,75 η
Estructuras triangulares de perfiles, angulares, vigas cajón y placas.		$< 0,025$	3,6
		0,025+0,45	3,71-4,47 η
		0,45+0,7	1,7
		0,7+1,0	1,0 + η
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 η +0,47
		0,8+1,0	1,0

Donde η depende de A/A_e y b/h , con

A: superficie expuesta al viento

A_e : superficie expuesta al viento mayorada con superficies de posibles agujeros interiores, para el caso de vigas aligeradas, estructuras de celosía, $A_e > A$

Para el resto, $A = A_e$

h: anchura de la viga

b: distancia que separa las caras enfrentadas entre el perfil de cálculo y el intermedio

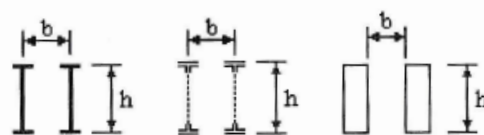


Tabla 6: Coeficientes de forma para la fuerza del viento

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

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

- $1 \text{ m}^2/1.000 \text{ daN}$ para cargas hasta 5.000 daN
- $0.5 \text{ m}^2/1.000 \text{ daN}$ para cargas de 5.000 daN a 25.000 daN

2. **Sobrecarga de nieve.** No se tienen en cuenta sobrecargas de nieve en el cálculo de grúas.
3. **Variaciones de temperatura.** Las solicitaciones debidas a variación de temperatura no se consideran excepto en casos particulares, por ejemplo, que los elementos no puedan dilatarse libremente.

3.3.3 - DETERMINACIÓN DE COMBINACIONES DE SOLICITACIONES

Según lo descrito en el libro de “Grúas”, tras realizar el análisis de todas las tensiones producidas por las distintas solicitaciones, hay que realizar las combinaciones de estas solicitaciones con sus respectivos coeficientes de seguridad y calcular con ello una única tensión equivalente.

Existen tres casos posibles de combinaciones: Aparato en servicio sin viento, aparato en servicio con viento y aparato sometido a solicitaciones excepcionales. Como es lógico, únicamente interesa el caso más desfavorable de los descritos.

Después de obtener esa tensión equivalente del caso más desfavorable se pasará a dimensionar el perfil de la estructura que soporte dicha tensión equivalente.

Las combinaciones para los tres casos son las siguientes:

CASO I: GRÚA EN SERVICIO SIN VIENTO.

Para este caso, la solicitación toma el siguiente valor:

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

Donde:

C_S = Coeficiente de seguridad. En este caso **1,5**.

S_G = Solicitación debida a peso propio.

S_L = Solicitación debida a la carga en servicio. (Movimientos verticales)

S_H = Solicitaciones horizontales. (Fuerzas de inercia + centrífuga)

Ψ = Coeficiente dinámico.

M = Coeficiente variable con el grupo al que pertenece el aparato.

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

Tabla 7: Valores M en función del grupo

Para el grupo M8 de este proyecto el valor será **M = 1,2**

CASO II: GRÚA EN SERVICIO CON VIENTO.

Para este caso, la sollicitación toma el siguiente valor:

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

Donde:

S_W = Sollicitación de viento.

C_S en este caso toma el valor de **1,33**.

M toma el mismo valor que en el caso anterior (Tabla).

CASO III: GRÚA SOMETIDA A SOLICITACIONES EXCEPCIONALES.

Se adoptan como sollicitaciones:

a) Viento en tempestad.

$$(S_G + S_{W \text{ máx}}) \cdot C_S$$

b) Efecto de choque con los topes de fin de carrera.

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

c) Ensayos estático y dinámico.

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

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

En este caso $C_S = 1,1$

Donde:

$S_{W \text{ máx}}$ = Se representa en la tabla.

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

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

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

3.4 - ESTIMACIÓN DE LA CARGA EN LA PLUMA

Se ha realizado una tabla de datos en Excel para variar las dimensiones de una pieza y poder observar en ella la superficie más desfavorable. Los datos que se han introducido han sido atendiendo a las posibles necesidades reales de construcción siendo además una superficie desfavorable para un alzamiento vertical, por ejemplo un pilar de grandes dimensiones. Se ha supuesto como material el hormigón, muy utilizado en construcción, y además es un material con poca densidad, por tanto más superficie ocupa. También habría que añadir que es un material suficientemente resistente para una pieza de grandes dimensiones.

SUPERFICIE DE LA CARGA		
Peso (Kg) / (KN)	250.000	2.452,5
Densidad del material (Hormigón) Kg/m ³	2.200	
Volumen (Cubo)	113,64	
Superficie (Cubo)	23,46	
Estimación pieza		
Alto	30	
Ancho	2	
Profundidad	1,89	
m ² /1.000 daN	0,24	
Área carga (m ²)	60	

Como conclusión las dimensiones del pilar estimadas son:

2x20x1,89 (Ancho x Alto x Profundidad)

Y un **Área de 60 m²**.

3.5 - CÁLCULO DEL CILINDRO HIDRÁULICO DE ELEVACIÓN

Antes de iniciar el cálculo de la pluma de la grúa es preciso decidir la ubicación exacta de anclaje del cilindro hidráulico de elevación, ya que dependiendo de ésta, las fuerzas en el tramo fijo variarán su valor. De la misma manera variará también la fuerza que debe ejercer el pistón hidráulico de elevación.

Esta decisión se ha tomado aproximando las medidas del cilindro objeto de cálculo a otro de una grúa de semejantes características en el mercado. Se debe tener en cuenta el ángulo máximo de elevación para así obtener la carrera del cilindro, ya que después habrá que buscar entre los catálogos de cilindros hidráulicos si el cilindro obtenido está normalizado o habría que fabricarlo exclusivamente para la pluma, siendo eso posible.

Por supuesto la diferencia entre la fabricación exclusiva o un elemento normalizado es el aumento de precio, muy importante a la hora de la construcción de cualquier elemento.

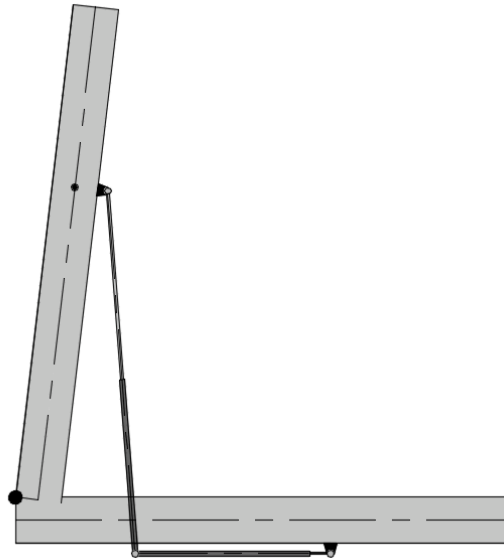


Figura 23: Unión pluma-cilindro desde 0° a 83,36°

En este caso se ha utilizado AutoCAD para simular la elevación de la pluma desde 0° hasta 83,36°. En un primer momento se realiza una aproximación ya que tras dimensionar el tramo fijo de la pluma es cuando se podrá efectuar el cálculo con total exactitud. Se estima una distancia desde el bulón de giro hasta el primer anclaje en el eje X de 2,7 metros y 7 metros hasta el segundo. Su distancia en el eje Y desde el mismo punto hasta ambos será de 0,3 metros mas la altura del tramo fijo.

Para estas aplicaciones en concreto no se encuentran cilindros normalizados, ya que, tanto las carreras como las fuerzas a soportar son bastante altas y especiales. Para ello, Liebherr, empresa con más de 60 años de experiencia en maquinaria de construcción, realiza cilindros especiales en base a unas necesidades de construcción.

Hydraulic Cylinders

Request Date:	Telephone:
Company:	E-Mail:
Contact Person:	Application:
Road:	Machine / Type:
Postcode: Location:	Required quantity:
Country:	Requested delivery date:

<p>Cylinder variant – series 350 bar</p> Piston-Ø [mm] (D): Piston rod-Ø [mm] Stroke [mm] (N): Installation length = Zero stroke length + stroke [mm] (M): End of stroke cushioning, rod side <input type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no End of stroke cushioning, piston side <input type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no Piston rod coating: Hardened piston rod <input type="checkbox"/> yes <input type="checkbox"/> no Corrosion protection <input type="checkbox"/> standard <input type="checkbox"/> sea water Required colour (RAL): Required add-on parts (valve blocks, etc.):	<p>Belastungspezifikation</p>  <p> $F_1 =$ kN Tensile force $F_2 =$ kN Compressive force $F_0 =$ kN Lateral force $v_1 =$ m/s $v_2 =$ m/s </p>
--	---

<p>Special solution – variance from standard</p> Piston-Ø [mm] (D): Piston rod-Ø [mm] (d): Stroke [mm] (N): Installation length [mm] (M): Pin-Ø, rod side [mm] (B): Pin-Ø, piston side [mm] (B): Piston rod head width [mm] (A): Cylinder head width [mm] (A): Head radius, rod side [mm] (C): Head radius, piston side [mm] (C): SAE connection, rod side ["] (F): SAE connection, piston side ["] (F): Miscellaneous:	<p>Special solution – variance from standard</p> Max. operating pressure [bar]: Compressive force (F_2) [kN]: Tensile force (F_1) [kN]: Lateral force (F_0) [kN]: Planned service life [Oh]: Ambient temperatures [°C]: Operating temperatures [°C]: Corrosive media (e. g. sea air): Medium used: Volume flow, rod side (V_1) [l/min]: Volume flow, piston side (V_2) [l/min]: Retracting and extending speed [m/s]: Load / usage (compression) <input type="checkbox"/> static <input type="checkbox"/> dynamic Load / usage (tensile) <input type="checkbox"/> static <input type="checkbox"/> dynamic Miscellaneous:
--	---

Figura 24: Formulario Liebherr para cilindros a medida

Para ello cuentan con un formulario de la figura anterior que se debe de rellenar para fabricar el cilindro hidráulico en cuestión.

Para rellenar debidamente el formulario también posee unas fórmulas para los cilindros a medida, donde podemos hacer el cálculo de las fuerzas a soportar por el cilindro que se diseñe. Según la fuerza a soportar por el cilindro se calcularán diámetros de pistón, de vástago... Incluso se puede obtener la fuerza máxima a soportar por el cilindro sin que pandee.

Todo lo proporcionado por Liebherr se encuentra en inglés debido a su mercado internacional.

Las fórmulas mencionadas son las de la siguiente figura:

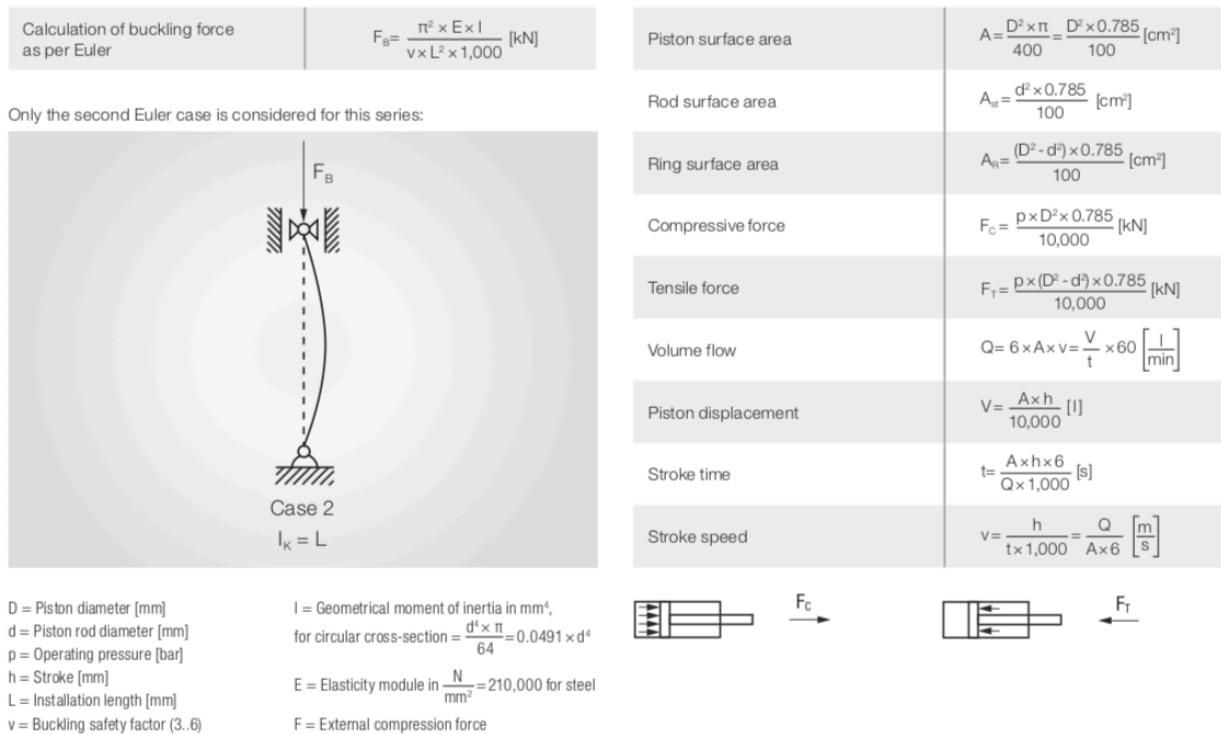


Figura 25: Fórmulas para cilindros a medida

Será necesario obtener la fuerza que soportará el pistón para realizar los cálculos necesarios para rellenar completamente el formulario.

Por supuesto existen unos valores máximos de fabricación en cuanto a la presión de funcionamiento, carrera máxima..., como los siguientes:

Hydraulic cylinders for mobile and stationary applications

- Stroke lengths up to 8,000 millimetres
- Nominal diameters up to 500 millimetres
- Operating pressures up to 630 bar
- Lifting speeds up to 1 m/s
- Operating temperatures from -40 °C to +80 °C
- Chrome coatings, nickel-chrome, HVOF and many others
- Corrosion protection for continental and maritime environments
- End of stroke cushioning (the piston side and/or the rod side)

Figura 26: Valores máximos para cilindros a medida

3.6- ELECCIÓN DEL MATERIAL

Antes de comenzar a calcular las dimensiones de la pluma se ha de decidir el material con el que se construirá, ya que serán imprescindibles sus características para dicho cálculo.

Según el libro “GRÚAS” de Emilio Larrodé, el material utilizado tanto en plumas como en bastidores es el acero F-114: ($\sigma_{\text{lim.elástico}} = 700 \text{ MPa}$). Se toma este dato como límite que no deberá sobrepasar el material como consecuencia de sus fuerzas exteriores.

El límite elástico, también denominado límite de elasticidad, es la tensión máxima que un material elastoplástico puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes. Si se aplican tensiones superiores a este límite, el material experimenta un comportamiento plástico con deformaciones permanentes y no recupera espontáneamente su forma original al retirar las cargas. Normalmente se toma este valor de límite elástico como el valor de fallo aunque el valor de fallo total de la pieza sea superior. Se utiliza un coeficiente de seguridad de 2 por lo que el máximo valor admisible de la pieza será 350 MPa.

CS= Valor de fallo / Máximo valor admisible

El acero **C45 / F114** es típicamente utilizado en elementos de máquinas de buena resistencia, bloques hidráulicos, moldes y portamoldes. Temple bien. Se puede emplear para piezas templadas por inducción que requieran durezas superficiales de 55 HRC.

Coeficiente de dilatación mm/mm/°C x 10⁻⁶

20°-100°	200°	300°
11,8	12	12,2

Composición química (%)

C 0,42-0,48	
Si 0,20-0,30	S (% máx.) 0,035
Mn 0,55-0,70	P (% máx.) 0,035

Los denominados “Aceros de Construcción” se denomina a un grupo de aceros no aleados de entre 0,1% y 0,5% de carbono usados para piezas estructurales de maquinaria de cierta responsabilidad.

EQUIVALENCIAS APROXIMADAS	IHA	CENIM	DIN	SAE/AISI	BS	UNI
	F-114	F-1140/C45 K	CK45	1045	EN8	C-45

Tabla 8: Equivalencias del acero elegido

A este Acero se le suele realizar algún tratamiento superficial para mejorar sus características mecánicas como se observa a continuación.

En estado de temple (830°C) y revenido (600°C)

Resistencia a la tracción (N/m²) 7,693E+08
Límite de elasticidad (N/m²) 6,973E+08
Alargamiento de rotura (%) 12-15
Densidad (Kg/m³) 7.850

Los aceros templados en un medio conveniente y revenidos posteriormente presentan propiedades mecánicas superiores a las de los aceros normalizados; las mejoras en las propiedades mecánicas no solo de dureza, sino también de la resistencia mecánica depende de la estructura del temple (martensita) que se ha formado tras el temple. El temple consiste en el calentamiento del acero hasta temperaturas de austenización y posteriormente es enfriado rápidamente.

Pero el acero después del temple suele quedar generalmente demasiado duro y frágil. Mediante el revenido se eliminan las tensiones internas producidas tras el temple, disminuyendo la dureza y la resistencia mecánica, pero aumentando la tenacidad del acero. Para ello se calienta lentamente a temperatura de revenido inmediatamente después del temple. La temperatura de revenido depende de las propiedades mecánicas finales que deseemos obtener.

3.7- MÉTODO DE CÁLCULO

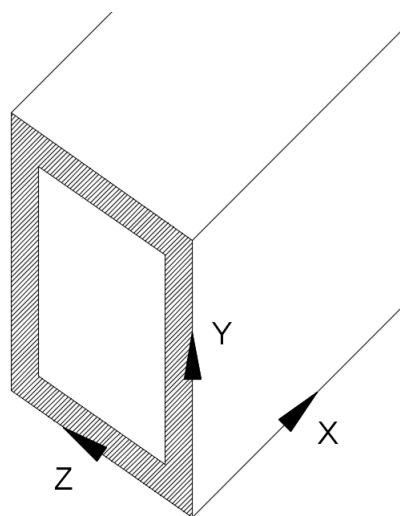


Figura 27: Ejes de coordenadas

Por norma general, para los cálculos en este anexo se hará referencia a los ejes coordenados tal cual se pueden ver en la figura, siendo en ese sentido positivos y en sentido contrario negativos. Aunque la grúa varíe los ángulos de elevación, las fuerzas siempre se podrán en los ejes mencionados.

Para el cálculo de la pluma se utiliza el método de fallo estático con las fórmulas de Resistencia de Materiales. Estas fórmulas dejan de ser válidas para determinar el estado tensional en determinadas zonas de una pieza como zonas de cambio repentino en la forma de la pieza, y puntos de apoyo y aplicación de cargas de la pieza. Pero en el caso de esta pluma, será rectangular en toda su sección, poniendo el lado más grande en posición vertical ya que posee de esta manera se situaría la pieza sobre su “eje fuerte”, es decir, sobre el eje de mayor momento de inercia, ya que este eje será el eje que más fuerza tendrá que soportar.

Como se observa en la figura el “eje fuerte” es el eje Z.

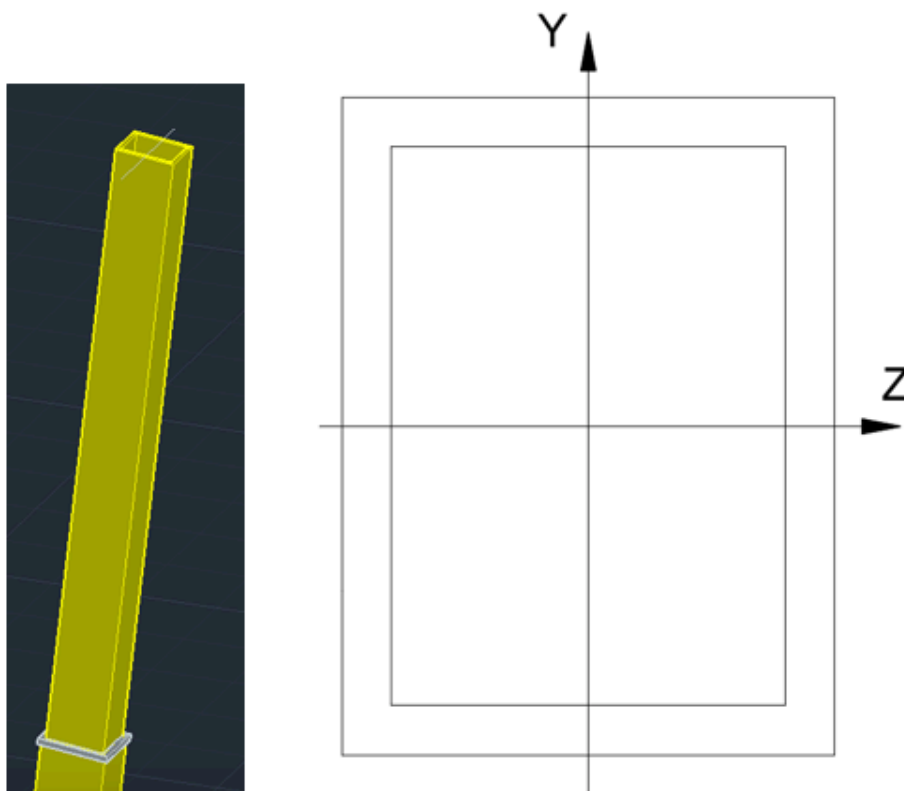


Figura 28: Imagen 3D y en corte del eje fuerte

Las fórmulas de Resistencia de Materiales son:

- $\sigma = F / A$ Tensión nominal bajo carga axial
- $\sigma = M \cdot y / I$ Tensión nominal bajo momento flector.

En primer lugar, se calcularán las solicitaciones que se producen en la pluma. Después, a cada solicitación se le aplicarán los diferentes coeficientes FEM que le corresponden, para después hallar las diferentes combinaciones de solicitaciones y ver cuál será la más desfavorable. Una vez obtenida la combinación más desfavorable se procederá a obtener la sección más crítica de la pluma para calcular el punto más crítico. Por último, se calculará la tensión máxima equivalente en ese punto y se comparará con la tensión máxima admisible de la pluma, la cual tendrá que ser menor para que no se produzca el fallo de la pieza, en este caso, de la pluma.

El proceso que se seguirá para el dimensionamiento tanto de la pluma como de los diferentes elementos de la grúa autopropulsada será el que se indica en el siguiente mapa de proceso:

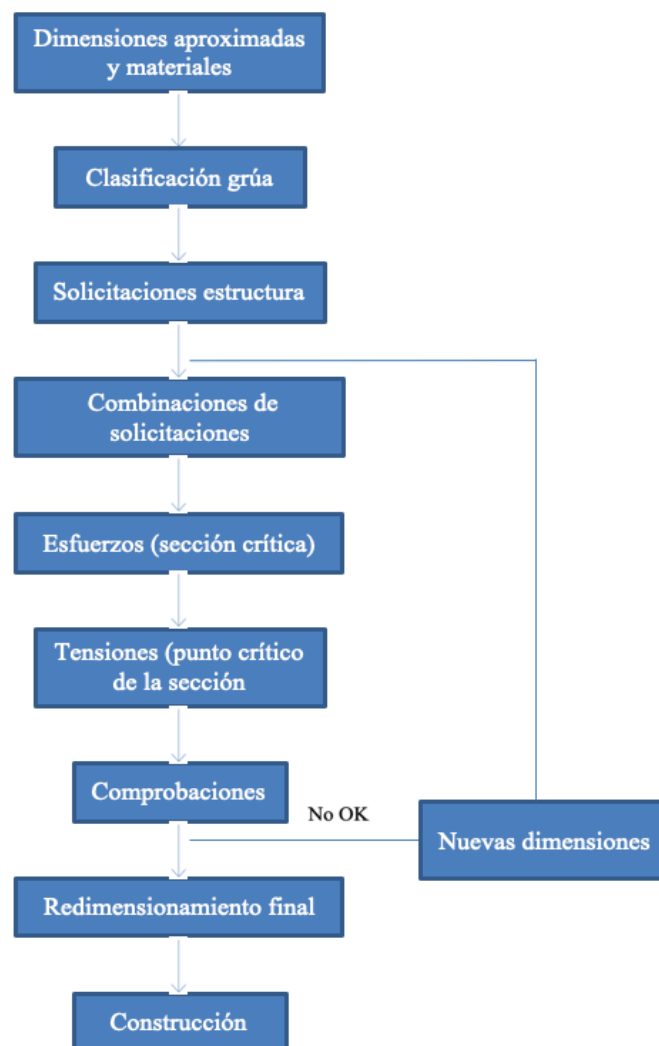


Figura 29: Proceso de dimensionamiento de la pluma y elementos

3.8- RESOLUCIÓN DE CÁLCULOS

3.8.1 HIPÓTESIS 1

En una primera hipótesis realizada se ha supuesto la pluma como un objeto continuo, ya que al obtener las tensiones en el punto más crítico y tras comprobar que dichas tensiones son soportadas por la sección del material elegido, cumpliendo este punto, no se tendría problemas con el cumplimiento de los puntos menos restrictivos. Se calculará la grúa en elevación máxima, elevada 83,36 grados, ya que es en el punto en el que se ha decidido que la pluma soportará la carga máxima.

Se procede a analizar todas las solicitaciones y realizar todas las combinaciones de ellas como nos dice el libro “GRÚAS”.

3.8.1.1 SOLICITACIONES PRINCIPALES

Dentro de las solicitaciones principal entran tanto el peso de la celosía como el de la pluma de la grúa.

En el caso de la pluma se ha decidido un peso aproximado, que en este caso ha sido de 800 kg.

Masa celosía (Kg) / S_G celosía (KN)	800	7,85
--	-----	-------------

Pero en el caso de la pluma, sabiendo el material del que estará fabricada, se ha obtenido la densidad del material por metro cubico para poder, con las dimensiones que se vayan estimando, calcular el peso exacto de la pluma en cada estimación. Para facilitar todos los cálculos, se ha realizado todo con tablas del programa “Excel”, de forma que poniendo las fórmulas una sola vez, en caso de no cumplimiento, basta con cambiar las dimensiones y el programa rehará todos los cálculos realizados a partir de éste.

El volumen de la pluma se obtiene multiplicando el largo por el ancho y por el fondo de dicha pluma, y después restándole el volumen del hueco interior, ya que tendrá que ser hueca dejando espacio al cilindro interior de extensión de la pluma.

Densidad material F-114 (Kg/m3)	7.850
Largo (m)	72
Alto (m)	1
Ancho (m)	1
Espesor (m)	0,1
Masa pluma (Kg)	203.472
S_G Pluma (KN)	<u>1.996,06</u>

Se recuerda pasar a unidades de fuerza (N) multiplicando por la Fuerza de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$). En este caso se utiliza como unidad el KN debido a los altos valores de fuerza con los que se trabaja.

3.8.1.2 SOLICITACIONES POR MOVIMIENTOS VERTICALES (CARGA)

$$S_{CS} = S_L \cdot \Psi$$

$$\Psi = 1 + \xi \cdot V_L = 1 + (0,3 \cdot 0,6) = 1,18$$

La velocidad lineal se obtiene de la fórmula:

$$V_L = \omega \cdot R = 0,06 \cdot 10 = 0,6 \text{ m / s}$$

$$\omega = \frac{83,36-0}{24} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{360} = 0,06 \text{ rad / s}$$

La velocidad angular (rad/s) se ha obtenido decidiendo que la pluma, desde su posición horizontal hasta su posición máxima ($83,36^\circ$), tarde un tiempo de 24 segundos. El radio coincide con el radio de carga máxima, longitud a la que se encuentra la carga en su posición máxima de elevación, 10 metros.

Masa carga (Kg) / (KN)	250.000	2.452,5
S_L Carga de servicio (KN)		2.452,5
ξ Coeficiente experimental		0,3
V_L Velocidad de elevación (m/s)		0,6
Ψ Coeficiente dinámico		1,18
S_{CS} Solicitación de carga de servicio (KN)		<u>2.893,95</u>

3.8.1.3 SOLICITACIONES POR MOVIMIENTOS HORIZONTALES

Dentro de estas solicitaciones se tienen dos efectos como se ha explicado anteriormente. Los efectos producidos por los **movimientos de dirección** y los efectos de la **fuerza centrífuga**.

Dentro de los efectos producidos por los movimientos de dirección se tiene la **fuerza de inercia**.

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

Se tendrá una fuerza de inercia por cada elemento, es decir, una fuerza de inercia que será producida por la carga, otra fuerza de inercia producida por la celosía, y una última fuerza de inercia producida por la pluma. En cada caso particular la aceleración (lineal) del centro de gravedad será diferente, debido al radio, siendo su ecuación:

$$a = \alpha \cdot r$$

La aceleración angular (α) será la misma en todos los casos, ya que depende del eje de giro de la pluma. Esta se ha obtenido mediante la decisión que la velocidad de rotación de la pluma sean **0,6 rpm** y que esa velocidad se desea alcanzar en **8 segundos**.

$$\alpha = \frac{\pi \cdot n}{30 \cdot t} = \frac{3,14 \cdot 0,6}{30 \cdot 8} = 0,008 \text{ rad} / \text{s}^2$$

Los radios se obtienen del dibujo esquematizado de los diferentes elementos que lo componen, mediante trigonometría.

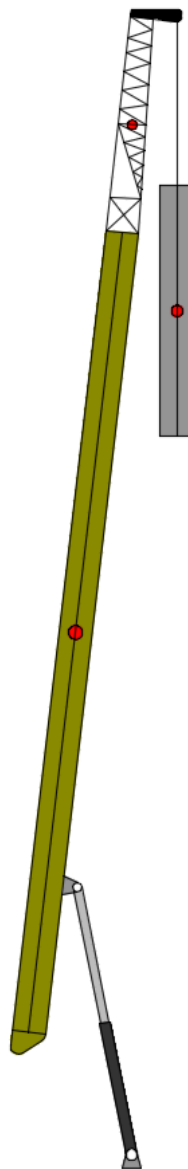


Figura 30: Dibujo esquematizado de la pluma completa y sus centros de gravedad

Los datos obtenidos totales son los siguientes:

F_{in} carga (N) / (KN)	19.634,95	19,63
F_{in} celosía (N) / (KN)	57,57	0,06
F_{in} pluma (N) / (KN)	732,28	0,73

En cuanto a los efectos de la **fuerza centrífuga** también se obtendrá la fuerza producida por cada elemento.

$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot r$$

F_c carga (N) / (KN)	9000	9
F_c celosía (N) / (KN)	26,39	0,03
F_c pluma (N) / (KN)	335,03	0,33

3.8.1.4 SOLICITACIONES DEBIDAS A EFECTOS CLIMÁTICOS, ACCIÓN DEL VIENTO

Se obtiene la fuerza que ejerce el viento sobre cada superficie mediante la fórmula descrita anteriormente:

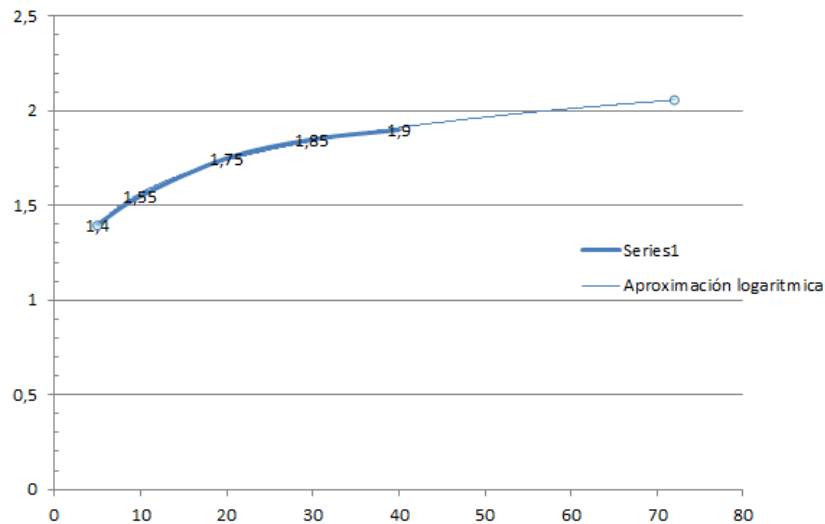
$$F = q \cdot A \cdot C$$

La presión estática, q , tomaremos el mismo valor para todos los elementos, siendo éste el dato de Presión aerodinámica dado en el libro "GRUAS", 25 Kg/m^2 .

Para la obtención del coeficiente de forma, en nuestro caso la pluma se compone de dos tramos. Uno que, aunque sea telescópico, se está estudiando como una superficie uniforme de modo que estudiaremos la superficie máxima aunque después, en la construcción, al ser por tramos, los tramos serán de menor área. De este modo, a pesar de tener más superficie expuesta al viento, soportará más esfuerzo. El otro tramo, el tramo final, como se a explicado será una celosía opcional para trabajos exclusivos en los que sea necesaria más altura y radio de carga, y ésta se estimará en un primer momento.

Por ello, para hallar el coeficiente de forma del tramo telescópico, se obtiene de la tabla de vigas cajón de la figura arriba expuesta, donde se ha realizado una aproximación logarítmica ya que no existen valores para nuestra viga con valores de $f = 72 \text{ m}$, $b = 1 \text{ m}$ y $c = 1 \text{ m}$.

Del gráfico se obtiene que el coeficiente de forma aproximado será $C_f = 2,05$.



Grafica 3: Aproximación del coeficiente de forma

En cuanto al tramo de celosía, entramos en la primera tabla para estructuras en celosía con valor $d \cdot v_w < 4,64$ m/s ya que “d” se refiere al diámetro que nunca sobrepasara los 0,1 metros y v_w que viene dado en tabla, 20 m/s. De ella se obtiene un valor de $C_f = 1,05$. Después, en la siguiente tabla para estructuras de celosía ensambladas, en el apartado de Estructuras triangulares y cuadradas con componentes tubulares, nos dice que multiplicaremos el valor anteriormente obtenido por el coeficiente $0,66\phi + 0,47$, ya que tenemos un ϕ entre 0,3 y 0,8. El coeficiente $\phi = A/A_e$ donde A es la superficie expuesta al viento y A_e es la superficie expuesta al viento mayorada con superficies de posibles agujeros interiores, para el caso de vigas aligeradas, estructuras de celosía... Se estima $\phi = 0,5$.

El valor final obtenido será $C_f = 0,84$.

Para la carga el coeficiente de forma es 1.

El área en el caso de la celosía también será un área aproximado. Las áreas para la carga, celosía y pluma son 60, 7,25 y 72 m² consecutivamente.

S_w carga (N) / (KN)	14.715	14,71
S_w celosía (N) / (KN)	1.494	1,49
S_w pluma (N) / (KN)	36.198,9	36,20

3.8.1.5 COMBINACIONES DE LAS SOLICITACIONES

Para realizar las diferentes combinaciones de solicitaciones se ha utilizado el programa de GIM (Mechanism Analysis Software), donde se esquematiza la grúa para colocar ahí las solicitaciones. Cada combinación establece unos coeficientes que hay que multiplicar a las solicitaciones que contiene, ya que no todas las combinaciones poseen todas las solicitaciones, sino que cada una establece una combinación diferente.

La combinación para el caso I es la combinación de grúa en servicio sin viento:

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

Por tanto en esta combinación aparecen todas las solicitaciones (S_G = solicitaciones de peso propio; S_L = solicitaciones por movimientos verticales, carga; S_H = solicitaciones por movimientos horizontales, fuerza de inercia y fuerza centrífuga) multiplicadas por una serie de coeficientes, los cuales son $M = 1,2$, $C_S = 1,5$ y $\Psi = 1,18$. Una vez multiplicadas cada solicitación por su coeficiente se introduce en el programa situada en su sitio correspondiente.

Se recuerda que se podrán las solicitaciones divididas por cada elemento, por ejemplo, dentro de las solicitaciones por peso propio entran la de la carga, celosía y pluma, así como dentro de las solicitaciones por movimientos horizontales entran las de las fuerzas de inercia y centrífuga de los tres elementos. Por tanto el esquema en este caso queda de la siguiente manera:

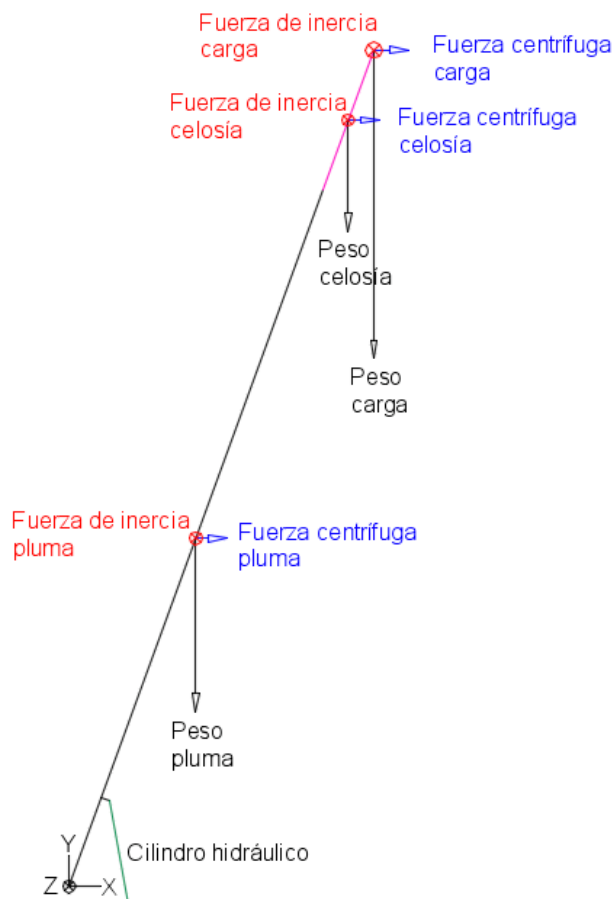


Figura 31: Fuerzas totales en la pluma

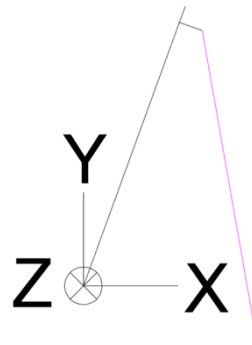


Figura 32: Ejes de coordenadas en GIM

Pero el programa GIM es un programa de trabajo de 2D, con lo que solo se pueden introducir las fuerzas en los ejes X-Y según los ejes de la figura, y por tanto con la vista de la figura se obtendrán las fuerzas en los ejes X-Y y los momentos en el eje Z. El programa devuelve las fuerzas en el sentido que interesa, a lo largo de la barra.

Para poder calcular todas las fuerzas y momentos se hacen dos vistas más, así, en un mismo punto, basta con hacer la suma de las diferentes vistas y se obtienen las fuerzas. De esta manera también se obtienen los momentos correspondientes a los tres ejes.

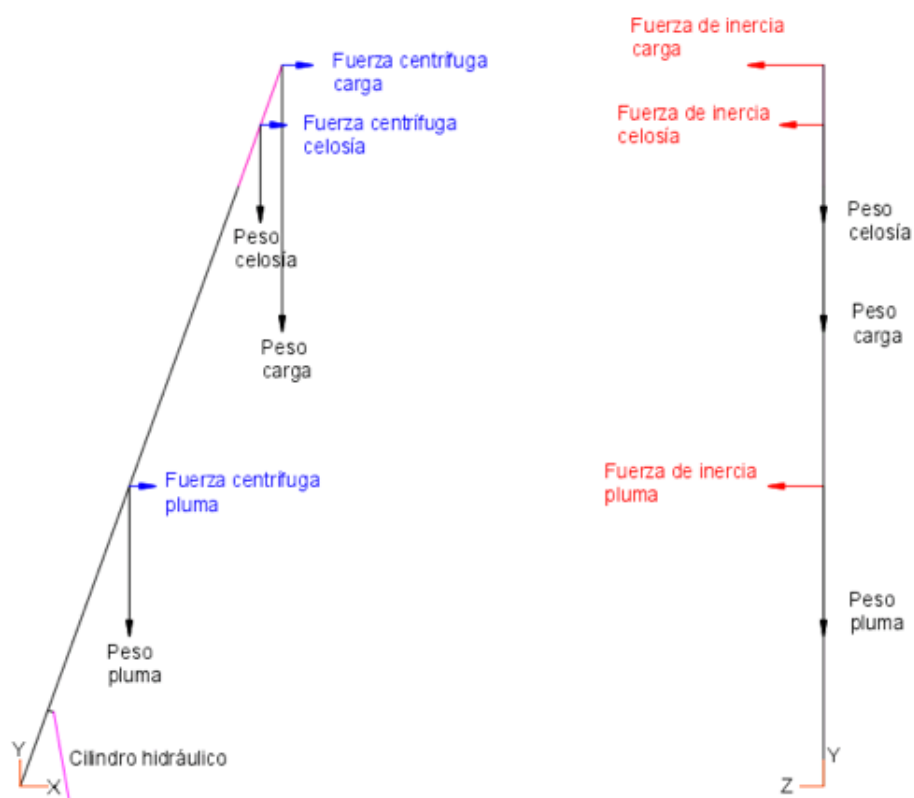




Figura 33: Vistas auxiliares para la obtención de fuerza y momentos en GIM

Cabe destacar que se debe tener especial cuidado ya que en alguna ocasión se podría hablar de una misma fuerza en una vista diferente.

Los datos con el programa se obtienen suponiendo las fuerzas como puntuales, aunque para visualizar los diagramas de esfuerzo se sabe que tanto el peso como la fuerza que ejerce el viento son fuerzas linealmente distribuidas.

Se realiza la misma operación para los siguientes casos de combinación de solicitaciones. Las combinaciones son las mencionadas anteriormente:

Caso II, grúa en servicio con viento:

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

En este caso los coeficientes M y Ψ son del mismo valor, cambia el valor del coeficiente de seguridad C_S que pasa ser de 1,33.

Caso III, grúa sometida a solicitaciones excepcionales. Dentro de éste caso se recuerda que entran tres subapartados: viento en tempestad, efecto de choque con los topes de fin de carrera y ensayos estático y dinámico. En el que partículas de este proyecto solo se tienen en cuenta dos de ellos, el de viento en tempestad y los ensayos estático y dinámico. Esto se debe a que la carga no se encuentra rígidamente unida y la velocidad de desplazamiento de la estructura no es superior a 0,7 m/s, con lo que no existen efectos de choque de topes.

Viento en tempestad, donde el coeficiente de seguridad es de 1,1

$$(S_G + S_{W \text{ máx}}) \cdot C_S$$

Ensayos estático y dinámico donde el coeficiente de seguridad es también 1,1 y los coeficientes de mayoración ρ_1 y ρ_2 son 1,2 y 1,4 respectivamente.

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

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

3.8.1.6 ESTUDIO DE LA SECCIÓN CRÍTICA

Tras introducir en el programa GIM todas las combinaciones de solicitaciones que indica en libro “GRUAS” para una grúa autopropulsada se obtiene que la combinación más desfavorable, o donde se calculan fuerzas y momentos mayores, es la combinación del **caso I, grúa en servicio sin viento**.

La sección más desfavorable corresponde a la sección donde se encuentra la unión del cilindro hidráulico con la pluma de la grúa. Se podía intuir ya que los puntos de unión suelen ser los puntos críticos, y en este caso era el único punto de unión de elementos. En esa sección la pluma pasa de trabajar a compresión a trabajar a tracción. Si estudiamos la sección se obtiene un esquema como el siguiente.

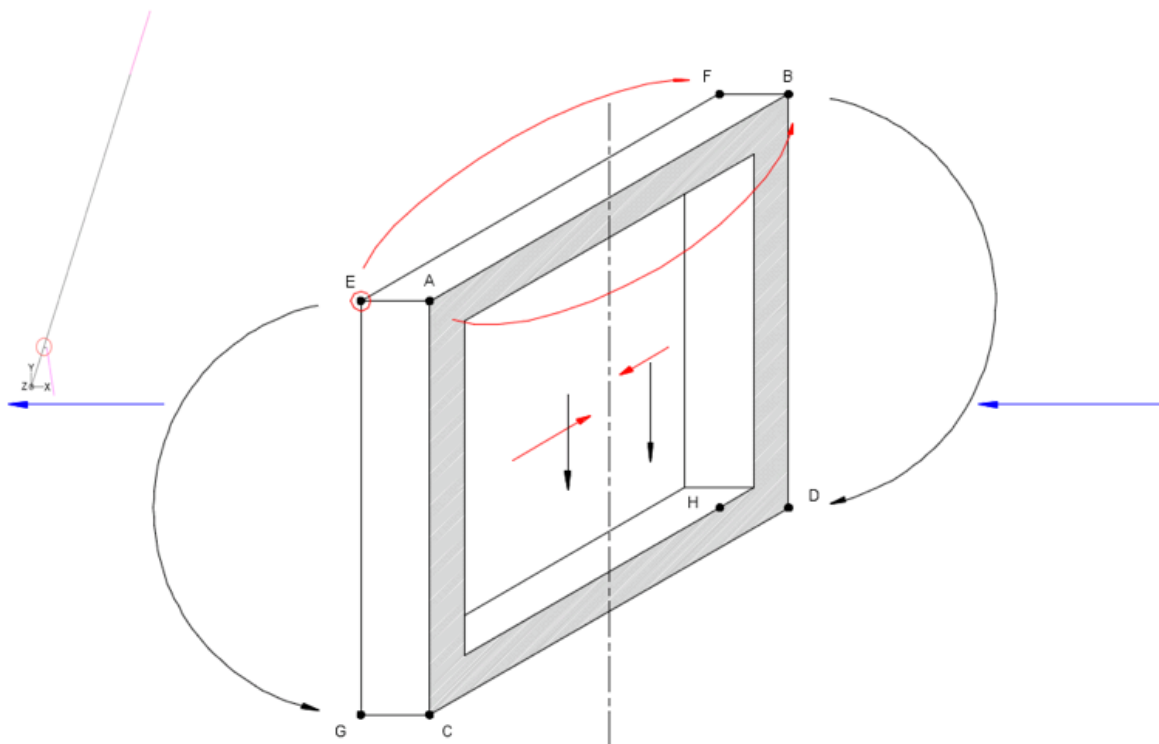


Figura 34: Sección crítica de la pluma

Las tensiones que se pueden generar son las siguientes:

- Tensión normal debido a fuerza axial:

$$\sigma = \frac{N}{A}$$

Siendo “N” el valor de la fuerza axial y “A” el Área de la sección

- Tensión normal debido al momento flector:

$$\sigma = \frac{M \cdot d}{I}$$

Siendo “M” el valor del momento flector, “d” la distancia del punto donde existe esa tensión hasta la línea neutra y “I” el momento de inercia respecto al eje que se aplica dicho momento.

- Tensión tangencial debida a la fuerza cortante:

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{b \cdot I}$$

Siendo “V” el valor de la fuerza cortante, “Q” el momento estático de la zona de la sección y “b” la base de la sección.

- Tensión tangencial debida al momento torsor:
En este caso como la sección del perfil es cerrado de espesor delgado y constante, se puede definir como:

$$\tau = \frac{M}{2 \cdot S_m \cdot e}$$

Siendo “M” el momento torsor, “Sm” la superficie encerrada por la línea de la sección y “e” el espesor de la misma.

Las tensiones normales son generadas por la fuerza axial y los momentos flectores y las tensiones tangenciales son generadas por las fuerzas a cortante y por los momentos torsores. En este caso las **tensiones tangenciales son muy pequeñas** en comparación con las tensiones normales por lo que se ha decidido prescindir de ellas por no ser críticas y así facilitar los cálculos.

La distribución de tensiones en los casos anteriores se representa de la siguiente manera:

- ❖ Tensiones normales generadas por la fuerza axial:

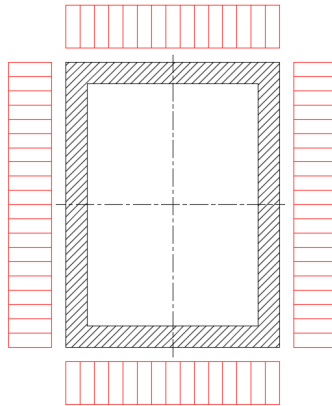


Figura 35: Tensiones normales por la fuerza axial

- ❖ Tensiones normales generadas por los momentos flectores:

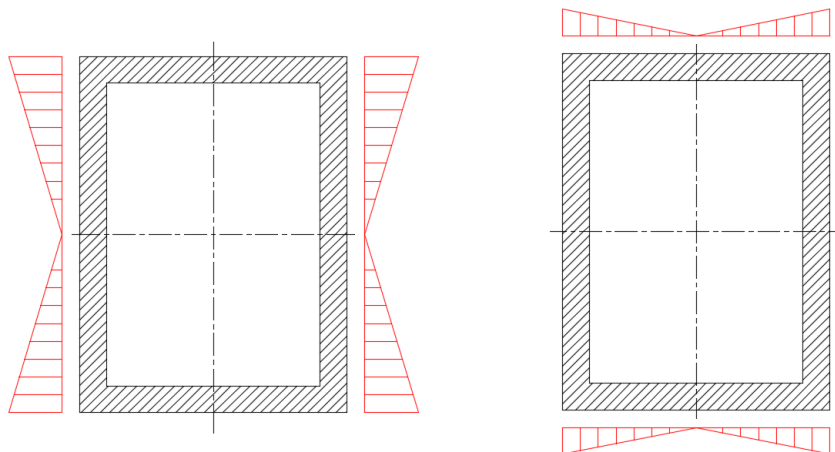


Figura 36: Tensiones normales por momentos flectores

En la imagen de la izquierda las tensiones corresponderían a los momentos en el eje z y la imagen derecha las tensiones por momentos en el eje y.

- ❖ Tensiones generadas por los esfuerzos a cortante:

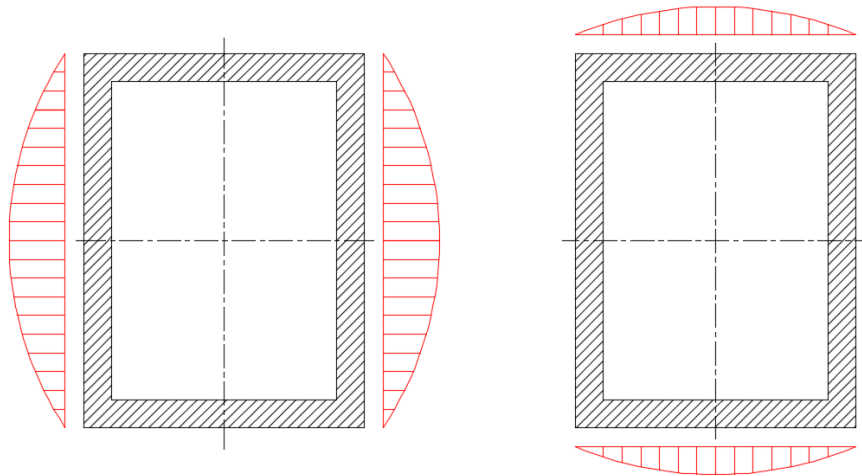


Figura 37: Tensiones tangenciales por la fuerza cortante

La imagen izquierda tensiones debidas a cortante en el eje z y la imagen derecha debidas a cortantes en el eje y.

- ❖ Tensiones generadas por el momento torsor:

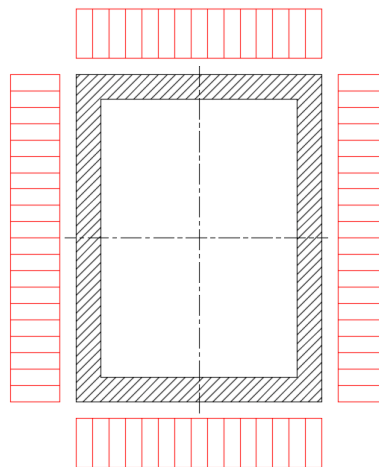


Figura 38: Tensiones tangenciales por momentos flectores

Analizando estos diagramas se concluye que las tensiones normales debidas a los momentos flectores son mayores a medida que se alejan de la línea neutra. En cambio, las tensiones tangenciales generadas por los esfuerzos a cortante son mayor cuanto más próximo se esté de la línea neutra. Como se ha dicho las tensiones tangenciales se consideran despreciables. Por ultimo las tensiones debido al momento torsor y a la fuerza axial se mantienen constante a lo largo de la sección.

De estas distribuciones se obtiene que el punto más solicitado es el punto E, ya que en ese punto los momentos se suman y a éstos se les añade la tracción de la parte izquierda de la unión. En el lado derecho no ocurre lo mismo debido a que en ese lado la fuerza resultante es una fuerza a compresión que se resta en dicho punto. En ciertas secciones convendrá analizar las dos partes de la sección dependiendo de la magnitud de los momentos y las fuerzas debido a que pueden ser diferentes en ambos lados.

El momento de inercia de una sección rectangular se obtiene de la figura:

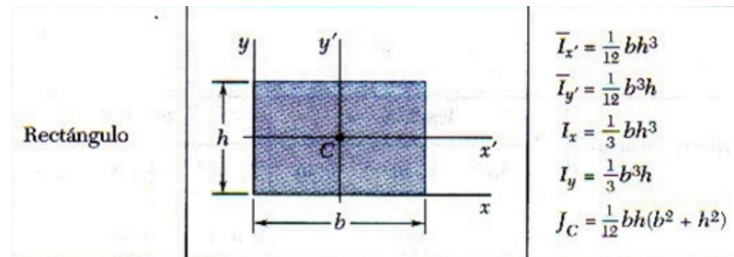


Figura 39: Momento de inercia en una sección rectangular

En este caso particular el valor de la distancia de la línea neutra hasta el punto a calcular es de 50 cm^2 .

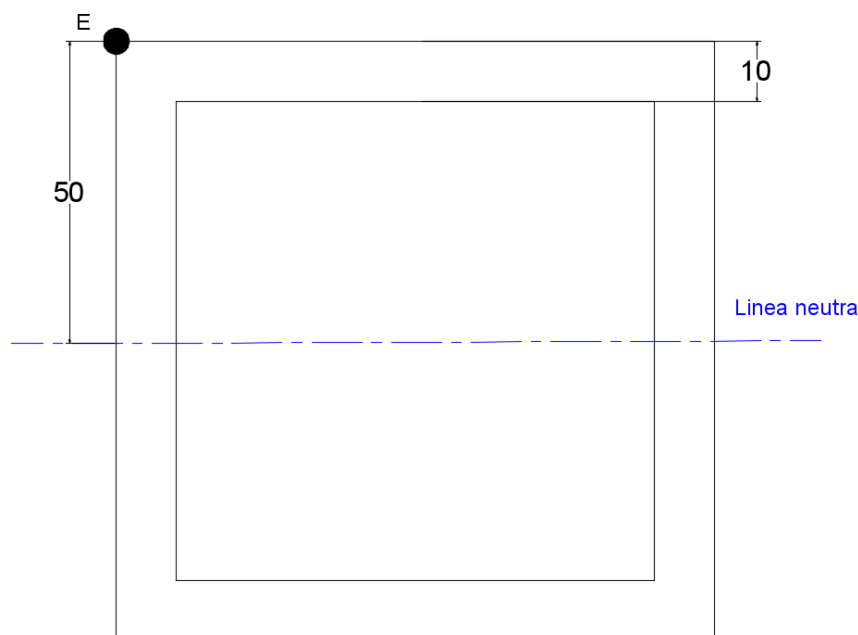


Figura 40: Distancia "y"

Tras obtener las tensiones (σ), se suman para el punto más desfavorable, punto E, y se compara con la tensión admisible de la sección (350 MPa). Para esta hipótesis se obtiene que la sección **cumple** con las características estudiadas (**1 m x 1 m x 0,1 m**).

Pero una vez obtenidas las medidas para la sección mas desfavorable, se han de obtener las medidas para las diferentes secciones ya que se trata de una pluma telescópica. Para obtener esta sección se había decidido la simplificación de la pluma en una sección uniforme, pero una vez obtenida para la sección crítica conviene deducir las siguientes secciones para así realizar un excelente aprovechamiento de material, fundamental en el estudio de un proyecto.

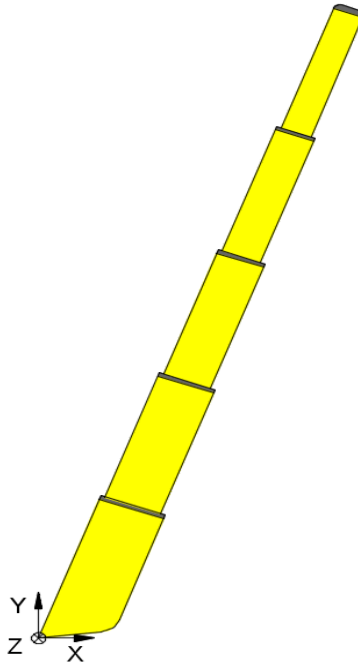


Figura 41: Telescopado de la pluma

Se decide el espacio entre tramos, de manera que no exista rozamiento en la extracción de los dichos tramos de telescopado. El valor del espacio será 0,005m (5 mm).

De esta manera resulta un esquema de pluma como el siguiente:

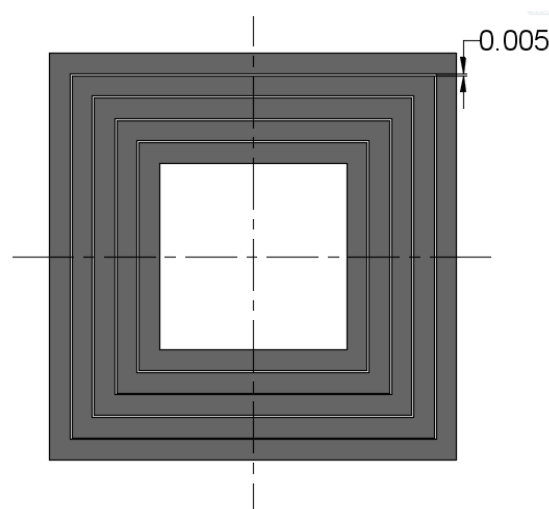


Figura 42: Esquema de los tramos y distancia entre ellos

3.8.1.7 CONCLUSIÓN

Tras calcular los diferentes tramos, se observa que no hay material para el último tramo. Para solucionar el problema existiría la posibilidad de a medida de ir avanzando en los tramos, ir bajando el espesor del tramo. Realizándolo habría que estar constantemente iterando sin saber seguro que el perfil soporta las fuerzas a las que está sometido ya que únicamente podríamos asegurar que con el espesor estudiado cumple perfectamente. Es importante asegurar también un espacio en el hueco del último tramo para la introducción del cilindro hidráulico de telescopado. Los diferentes tramos deben ser huecos para el alojamiento del cilindro y los diferentes dispositivos (anclajes, carriles...etc) para su telescopado.

Por tanto, y como conclusión, esta hipótesis queda descartada para el correcto dimensionamiento de la pluma.

3.8.2 HIPÓTESIS 2

Después de comprobar que la hipótesis 1 no es la mejor solución para llevar a cabo el dimensionamiento de la pluma, se opta por una segunda hipótesis. En ésta, en lugar de hacer el estudio como una superficie uniforme y obtener la sección más desfavorable, se realiza el estudio de la pluma tramo a tramo. De esta manera aseguramos el hueco en el último tramo de telescopado, que es por el cual se comienza a estudiar, y se realizará un **aprovechamiento de material** más óptimo ya que se estudiará cada tramo independiente acercándose a la tensión admisible. Se ha buscado ajustarse lo máximo a la tensión admisible variando en cada tramo el espesor hasta aproximarse lo máximo posible. Al estudiar los tramos separados cada uno de ellos posee su propia fuerza de peso propio, de inercia, centrífuga, un coeficiente de forma particular... Todo ello se calculará con una hoja Excel para facilitar la variación de datos y ser así mucho más precisos en el dimensionamiento de cada tramo, así como ver como afecta esa variación de los datos en las fuerzas más críticas.

Al comenzar el cálculo por la parte de la celosía de la pluma, el primer tramo a estudiar será el tramo superior de telescopado.

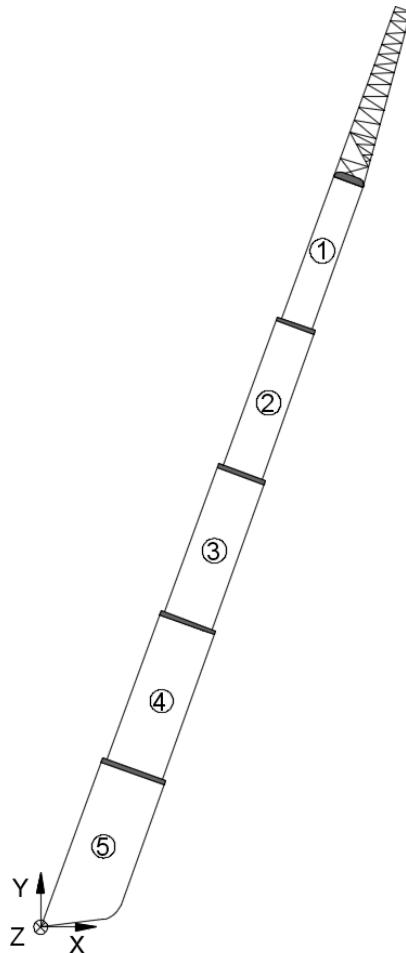


Figura 43: Numeración de los tramos de telescopado

Al realizar las tablas de Excel también se ha introducido la **fuerza** que debe ejercer el **pistón** de elevación en cada caso. Se cree que esta fuerza puede ser determinante en el proyecto.

Los cálculos que se han automatizado con la tabla de Excel han sido comprobados con el programa GIM para un tramo y de esta manera se asegura que los cálculos para los tramos restantes están realizados correctamente.

3.8.2.1 TRAMO 1

Ya que los cálculos en todos los tramos de telescopado son los mismos, la tabla Excel ha facilitado los cálculos. Se ha tenido en cuenta que las fuerzas obtenidas al final de cada tramo, son las fuerzas que se ejercen en la punta del tramo siguiente. En el extremo superior del primer tramo actúan la fuerza de la carga y de la celosía.

Los datos obtenidos en la hipótesis 1 para la velocidad y aceleración angulares, así como la distancia entre tramos siguen siendo los mismos:

$$\omega = 0,06 \text{ rad / s}$$

$$\alpha = 0,008 \text{ rad / s}^2$$

$$\text{Distancia entre tramos} = 0,005 \text{ metros}$$

Se recuerdan las fórmulas de las fuerzas centrífuga de inercia:

$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot r \quad (\text{kg} \cdot \text{rad} / \text{s} \cdot \text{m}) \quad (\text{Newton})$$

$$F_{in} = m \cdot a_G = m \cdot \alpha \cdot r \quad (\text{kg} \cdot \text{rad} / \text{s}^2 \cdot \text{m}) \quad (\text{Newton})$$

Las fuerzas se multiplicarán por 0,001 para el manejo de los valores en KN, por el alto valor de los datos.

Al estudiar todo por separado cada tramo tendrá su propio peso, su propia fuerza centrífuga y su propia fuerza de inercia. Si se observan las fórmulas, tanto la velocidad como la aceleración angular poseen siempre el mismo valor pero la masa y el radio variarán.

El cálculo de los radios se realiza sabiendo el ángulo de inclinación de la pluma (83,36°) y las medidas de los tramos de la pluma y la celosía.

$$\text{Tramo fijo de la pluma} = 14,5 \text{ metros}$$

$$\text{Cada tramo extensible} = 11,5 \text{ metros}$$

$$\text{Total 5 tramos extensibles} = 57,5 \text{ metros}$$

$$\text{Celosía} = 14,5 \text{ metros}$$

Cabe destacar que debido a que el giro de la pluma se realiza desde la esquina de la pluma, y todos los cálculos se realizarán desde la línea central de la misma, habrá que añadir a los cálculos de los radios la multiplicación de la mitad de la altura del tramo por el coseno de $6,64^\circ$. Este dato se añade al final, una vez obtenido el alto del tramo fijo. Al estar todo automatizado lo variará automáticamente.

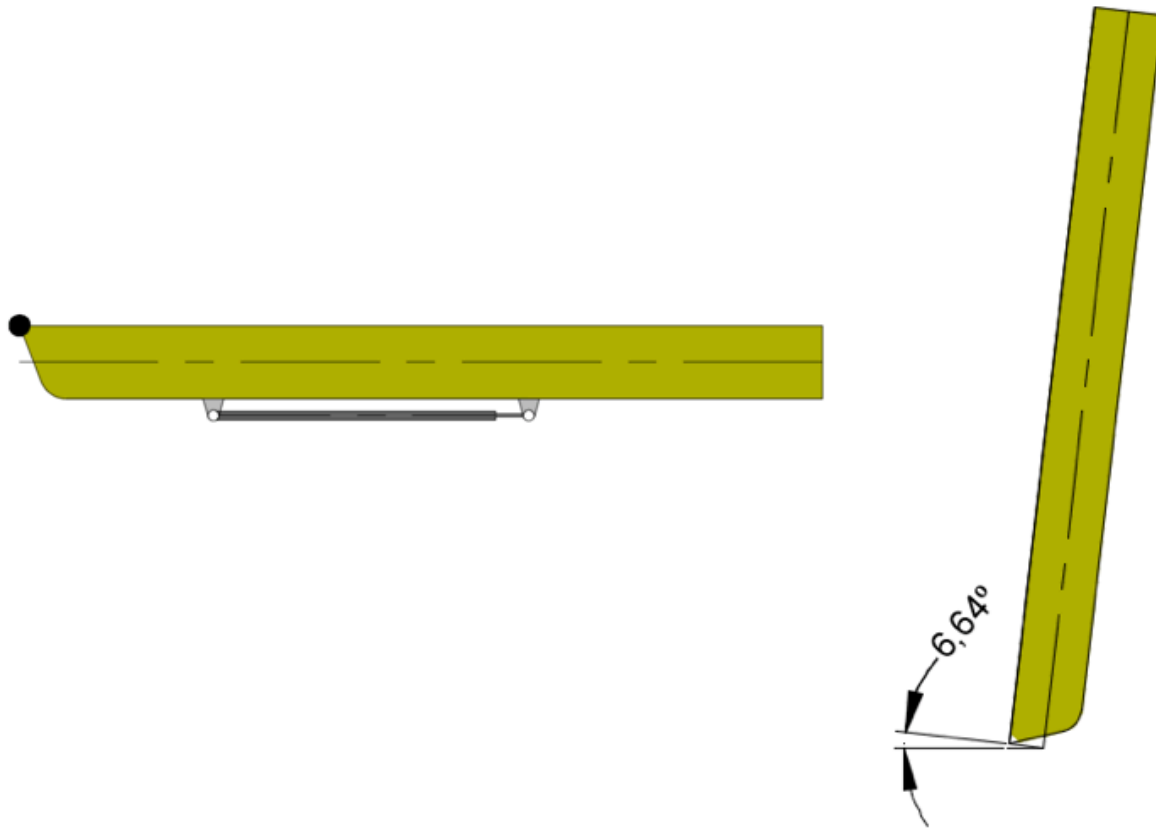


Figura 44: Eje de giro y distancia desde éste hasta la línea de cálculos

Para calcular las fuerzas en la parte superior del primer tramo de la pluma, se tendrán que calcular las fuerzas correspondientes a la carga y a la celosía.

La masa de la carga es dato conocido, 250.000 kg, y la masa de la celosía para el estudio del primer tramo, como en la hipótesis anterior, supone un caso de incertidumbre todavía, por lo que se hace una estimación intentando aproximarse lo máximo. Se toma como dato aproximado 800 kg

Se procede a obtener los datos para los radios y con ello se obtienen las fuerzas centrífugas y de inercia para la celosía y la carga, así como su peso.

$$\text{Radio carga} = (\text{Tramo fijo} + \text{Total tramos extensibles} + \text{Celosía}) \cdot \text{Cos}(83,36^\circ)$$

$$\text{Radio carga} = (14,5 + 57,5 + 14,5) \cdot \text{Cos}(83,36^\circ)$$

$$\text{Radio celosía} = (\text{Tramo fijo} + \text{Total tramos extensibles} + (\text{Celosía} / 2)) \cdot \text{Cos}(83,36^\circ)$$

$$\text{Radio celosía} = (14,5 + 57,5 + (14,5 / 2)) \cdot \text{Cos} (83,36^\circ)$$

$$F_c \text{ carga} = m \cdot w^2 \cdot r = 250.000 \cdot 0,06^2 \cdot \text{radio carga} \cdot 0,001 = \text{KN}$$

$$F_{in} \text{ carga} = m \cdot \alpha \cdot r = 250.000 \cdot 0,008 \cdot \text{radio carga} \cdot 0,001 = \text{KN}$$

$$\text{Peso carga} = 250.000 \cdot 9,81 \cdot 0,001 = \text{KN}$$

Éstas fuerzas se suponen en la punta de la celosía.

$$F_c = m \cdot w^2 \cdot r = 800 \cdot 0,06^2 \cdot \text{radio carga} \cdot 0,001 = \text{KN}$$

$$F_{in} = m \cdot \alpha \cdot r = 800 \cdot 0,008 \cdot \text{radio carga} \cdot 0,001 = \text{KN}$$

$$\text{Peso celosía} = 800 \cdot 9,81 \cdot 0,001 = \text{KN}$$

Faltaría por obtener la fuerza del viento para la combinación en la que se encuentra el viento.

$$F_{\text{viento}} = q \cdot A \cdot C = \text{Kg/m}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{adimensional} = \text{Kg}$$

Se multiplicará por 9,81 m/s² de la gravedad y por 0,001 para pasarlo a las unidades de KN. El coeficiente de presión estática, q, será el mismo en todos los casos, como se ha deducido con anterioridad, igual a 25 Kg/m².

El área de la carga se encuentra en el apartado 3.4, A = 60 m². El coeficiente de forma es igual a 1

$$F_{\text{viento carga}} = q \cdot A \cdot C = 25 \cdot 60 \cdot 1 \cdot 9,81 \cdot 0,001 = \text{KN}$$

Para la obtención del área de la celosía se hace una estimación de unos 4,35 m². El coeficiente es el mismo que en la hipótesis 1, C = 0,84.

$$F_{\text{viento celosía}} = q \cdot A \cdot C = 25 \cdot 4,35 \cdot 0,84 \cdot 9,81 \cdot 0,001 = \text{KN}$$

A estas fuerzas habría que añadir los coeficientes que indican las combinaciones. Solo se han puesto las dos combinaciones más restrictivas ya que son las que podrían limitar la pluma. Las dos combinaciones son *grúa en servicio sin viento* y *grúa en servicio sin viento*.

$$\text{Grúa en servicio sin viento} \quad [M (S_G + \Psi S_L + S_H)] \cdot C_S$$

$$\text{Grúa en servicio sin viento} \quad [M (S_G + \Psi S_L + S_H) + S_W] \cdot C_S$$

S_G = Solicitación debida al peso propio

S_L = Solicitación debida a la carga en servicio (Carga)

S_H = Solicitaciones debidas a movimientos horizontales (Centrifuga e inercia)

S_W = Solicitaciones debidas a efectos climáticos (Viento)

Por tanto, y según las combinaciones, las fuerzas quedarán multiplicadas por los siguientes coeficientes:

$$M = 1,2$$

$$\Psi = 1,18$$

$C_s = 1,5$ para el caso sin viento y $1,33$ para el caso con viento

Peso de la carga: se multiplicará por Ψ (1,18), M (1,2) y por el coeficiente de seguridad según la combinación en la que se encuentre.

Pesos propios (celosía, tramos): por M (1,2) y por el coeficiente de seguridad según la combinación en la que se encuentre.

Fuerzas centrífuga y de inercia: por M (1,2) y por el coeficiente de seguridad según la combinación en la que se encuentre.

Fuerza del viento: por M (1,2) y por C_s (1,33)

Una vez obtenidos los valores para las dos combinaciones, las fuerzas se situarán en su lugar correspondiente:

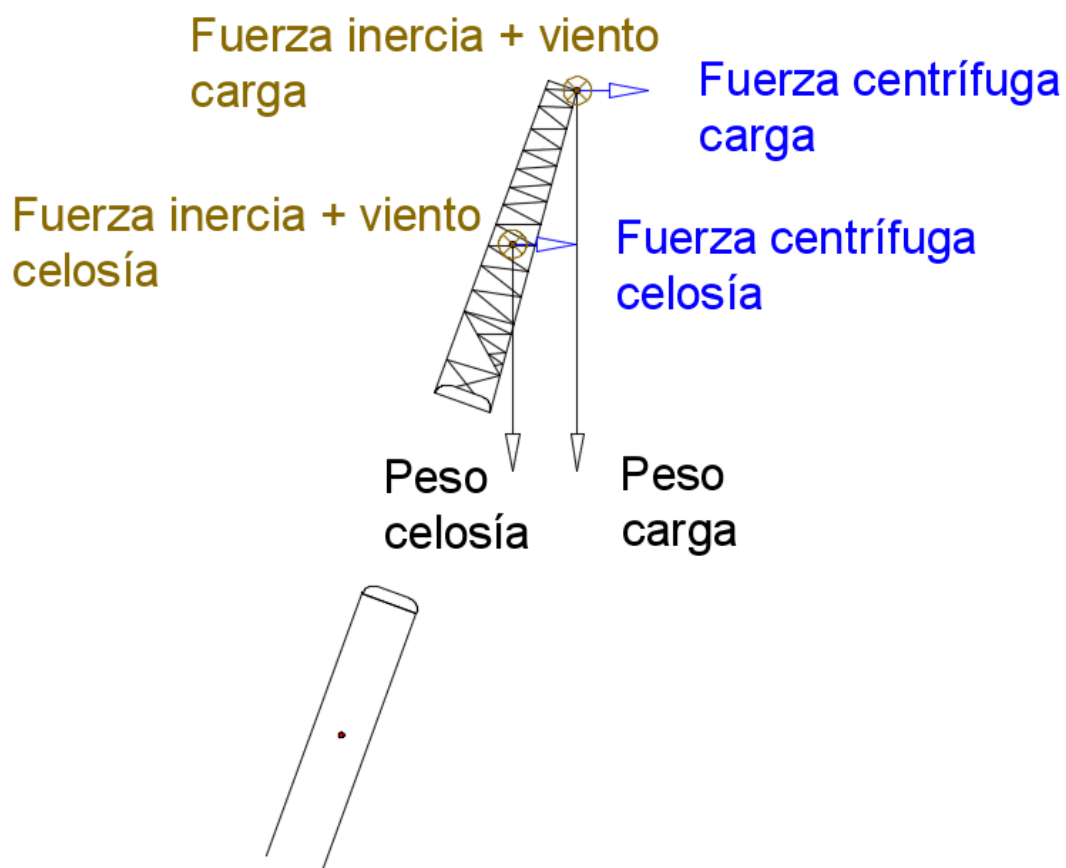
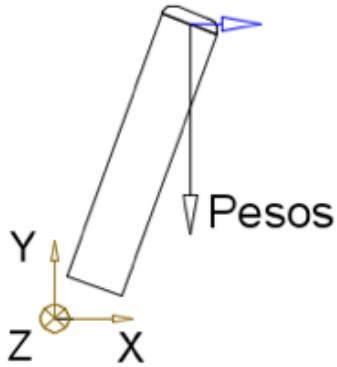


Figura 23: Fuerzas para el primer tramo

Si dividimos las fuerzas por ejes, las fuerzas de peso propio y el peso de la carga y las fuerzas centrífugas actúan en el plano X-Y creando los momentos en el eje Z. Las fuerzas de inercia y del viento actúan en el plano X-Z creando momentos en el eje Y.

Fuerzas centrífugas



Fuerzas de inercia y viento



Figura 24: Fuerzas por ejes

Éste primer tramo es distinto a los demás ya que se tiene que tener en cuenta que en su extremo superior se encuentran la celosía y la carga. Para obtener las fuerzas resultantes en el extremo superior del tramo 1, se han obtenido por una parte las fuerzas en X, Y y Z como en los ejes de la figura anterior, sumando las fuerzas actuantes en esos ejes, es decir, en este caso, sumando las fuerzas centrífugas actuando en el eje X, los pesos actuando en el eje Y y según la combinación, las fuerzas de inercia y el viento actuando en el eje Z.

En cambio, para obtener el momento en el plano X-Y, cambiaremos el sentido a los ejes que interesan para la realización de la sección crítica, y para ello hay que situar el eje X a favor de la sección como en la siguiente figura.

Fuerzas centrífugas

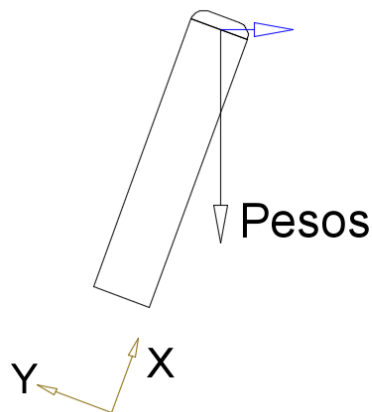


Figura 25: Giro de ejes a favor de la sección

En consecuencia las fuerzas que se tienen en un principio hay que descomponerlas y ver cuáles de ellas son las que crean momento en el eje que afecta a la sección crítica de la pluma. En este caso las fuerzas descompuestas que nos afectan son las fuerzas centrífugas multiplicadas por el seno de los grados de inclinación ($83,36^\circ$) y los pesos multiplicados por el coseno de los mismos. El momento obtenido es el momento en el eje Z. En la siguiente figura se puede observar la descomposición de la carga para entender mejor el concepto.

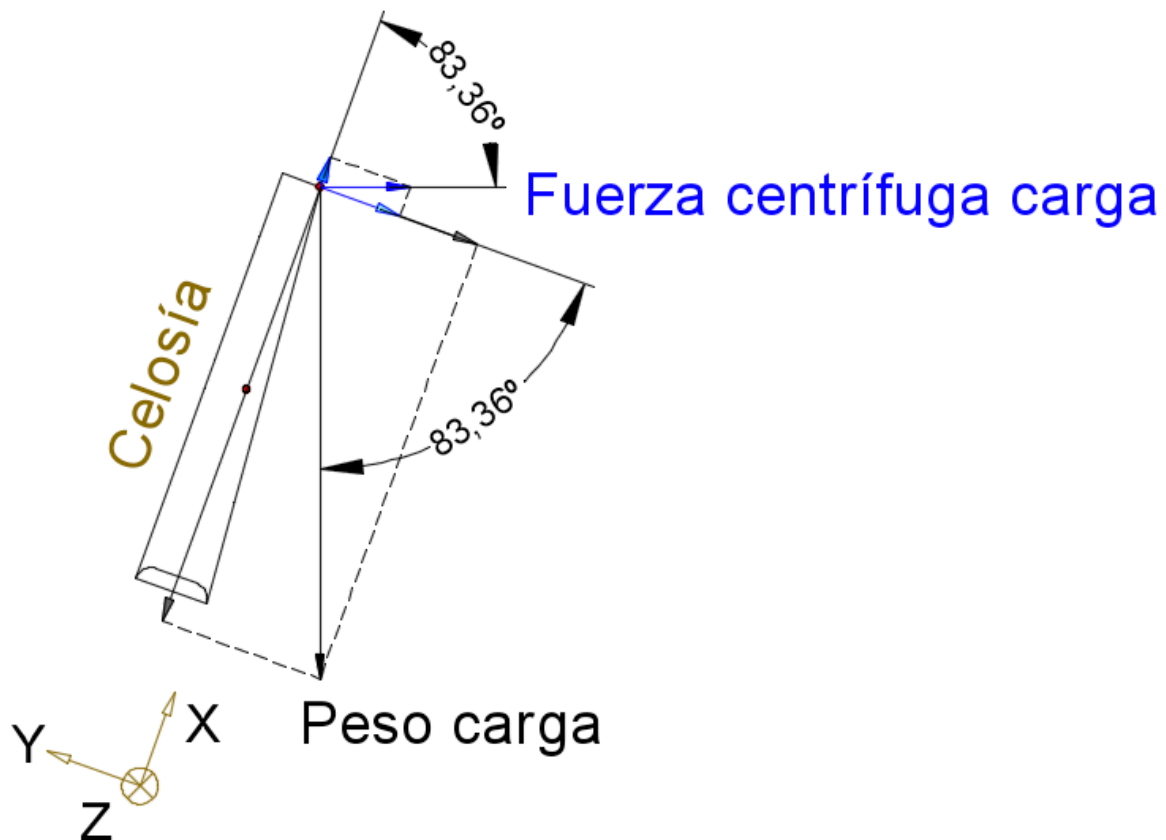


Figura 26: Descomposición fuerzas

Para el momento en el eje Y las fuerzas se tienen en la ubicación correcta. Un momento se obtiene multiplicando una fuerza por una distancia, con lo que falta por concretar cual es la distancia. Como se puede observar la distancia para los momentos correspondientes a la carga serán los metros que mide la celosía, 14,5, pero para los correspondientes a la celosía, debido a que se suponen dichas fuerzas en su centro de gravedad, la distancia será la mitad de la celosía, $14,5 / 2$.

Una vez obtenidos los datos anteriores, ya se tienen todas las fuerzas y momentos correspondientes a la celosía y la carga que afectan al extremo superior del primer tramo de telescopado. El siguiente paso será obtener las fuerzas y momentos en la parte inferior del tramo.

Para obtener esas fuerzas y momentos, se añaden las fuerzas generadas por el tramo de telescopado, su fuerza de inercia y la fuerza que ejerce el viento, su fuerza centrífuga peso correspondiente a dicho tramo. La masa del tramo se obtiene con la densidad del material, que corresponde a 7850 kg/m^3 . Tanto el volumen como el área se obtienen en cada tramo con sus dimensiones correspondientes, que son las que variaremos hasta obtener las dimensiones finales. El coeficiente de forma, C , para obtener la fuerza que ejerce el viento, se obtiene con las tablas del apartado 3.3.2.4, también con las dimensiones, y realizando las interpolaciones necesarias., y el

Contando las fuerzas y momentos equivalentes obtenidos de la celosía y carga en todos los ejes, se obtiene un esquema como éste.

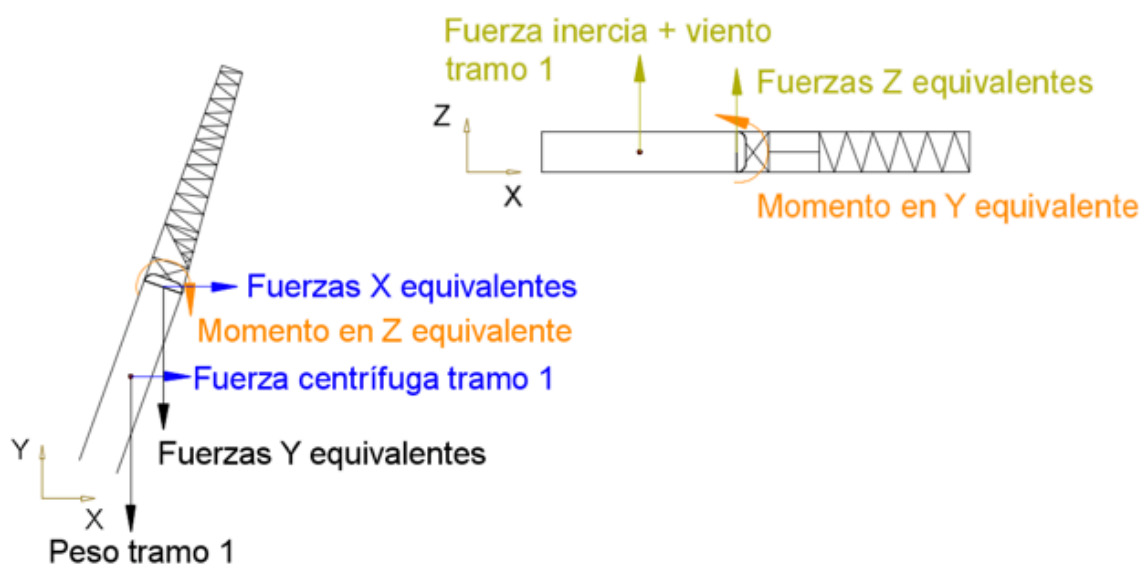


Figura 27: Fuerzas y momentos en el tramo 1

Llegados a este punto, el procedimiento para obtener las fuerzas y momentos en la parte inferior del tramo es exactamente igual que se ha hecho con la celosía y la carga.

Para las fuerzas en X e Y simplemente hay que sumar a las fuerzas de la parte superior las fuerzas generadas por el tramo.

En cuanto al momento en el eje Z se descomponen tanto las fuerzas equivalentes de la parte superior como las fuerzas generadas por el tramo 1 y se obtiene el momento multiplicando por la longitud del tramo, 11,5 m, para el caso de las fuerzas equivalentes descompuestas, y por la mitad de la longitud para el caso de las fuerzas generadas por el tramo.

Para el momento en el eje Y no hace falta descomponer y las distancias corresponden a la explicación anterior.

Sí que habrá que añadir en ambos casos el momento obtenido en la parte superior del tramo 1. En el Excel realizado se ha separado por una parte el momento creado por las fuerzas equivalentes de la parte superior y el momento creado por las fuerzas generadas por el tramo, para después sumar ambas. Simplemente se ha realizado de esa manera para simplificar y poder realizarlo de manera más ordenada. De esta manera la única diferencia en la obtención de los datos es la distancia. Después se suman dichos momentos.

Por lo que el tramo 1 nos queda de la siguiente manera, sabiendo que los momentos en el extremo inferior son los momentos más restrictivos del tramo, de ahí su obtención. Esto se debe a que no existe ninguna barra ni nada durante el tramo.

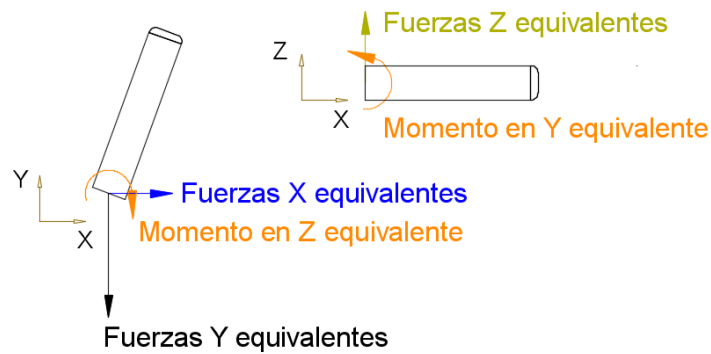


Figura 28: Fuerzas y momentos en la sección crítica del tramo (extremo inferior)

Una vez obtenidos los momentos, se procede a calcular la tensión producida por los momentos en ambos ejes con las fórmulas para el cálculo de la sección crítica del apartado 3.8.1.6. Esas tensiones se sumarán porque el punto más crítico de la sección es en el que ambos momentos actúan a la vez (punto A)

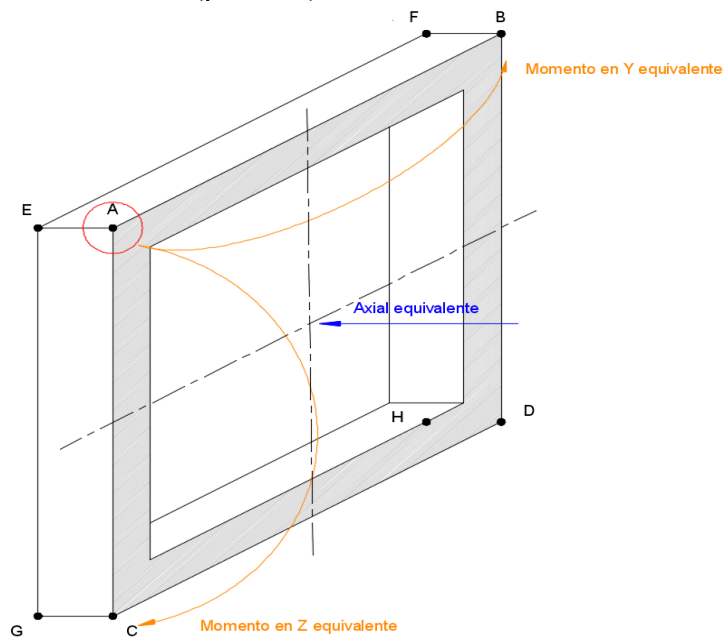


Figura 29: Sección crítica del tramo 1

Para completar los datos de la fórmula de la tensión se debe de calcular el momento de inercia de la tensión, y tener en cuenta que tanto la distancia a la línea neutra “d” como el momento de inercia “I” para las dos tensiones es distinta. Se recuerda la fórmula.

$$\sigma_x = \frac{M_z \cdot d}{I_z}$$

$$\sigma_y = \frac{M_y \cdot d}{I_y}$$

Las distancias desde la línea neutra al punto se ilustran en la imagen de abajo. Se indica con la letra “z” la distancia para obtener la tensión en el eje Z, σ_x , y con la letra “y” la distancia para calcular la tensión en el eje Y, σ_y .

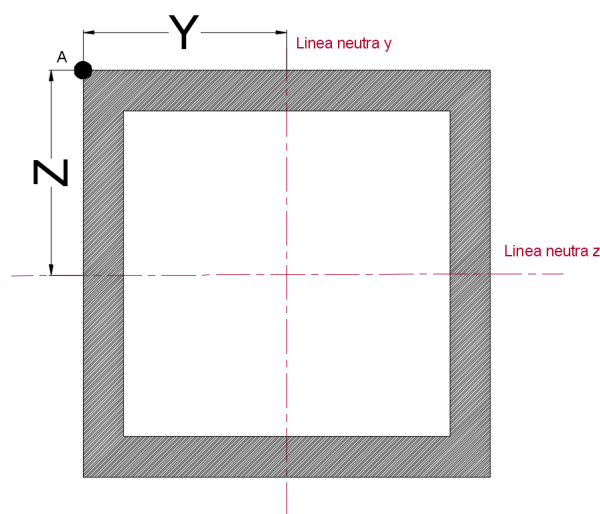
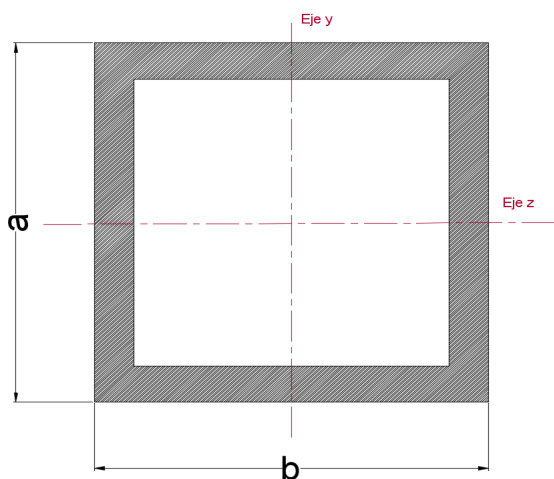


Figura 30: Distancias a la línea neutra

La fórmula para obtener el momento de inercia para los diferentes ejes son las siguientes:



$$I_y = \frac{1}{12} \cdot b^3 \cdot a$$

$$I_z = \frac{1}{12} \cdot b \cdot a^3$$

Figura 45: Distancias de la sección

Pero se puede deducir un patrón claramente diferenciado. Las componentes axiales de las fuerzas centrífugas actúan a favor del eje X, pero las componentes axiales de los pesos actúan en contra. Lógicamente las componentes correspondientes a los pesos será mayor que las componentes en sentido contrario por lo que la fuerza axial total será una fuerza en sentido contrario al eje X creando una compresión en el tramo y su tensión contrarrestará a la tensión producida por los momentos flectores como se ha mencionado en anterioridad.

Una vez que se han calculado todas las tensiones que afectan a la sección más crítica, se sumarán la tensión producida por el momento flector en el eje Y y la tensión producida por el momento flector en el eje Z, y se le restará la tensión producida por la fuerza axial. Esto ocurrirá, al menos, en todos los tramos de telescopado.

$$\sigma_y = \frac{My \cdot d}{I_y} + \sigma_x = \frac{Mz \cdot d}{I_z} + \sigma = \frac{N}{A} = \sigma \text{ total sección}$$

Calculada la tensión total que afecta a la sección, ésta será la tensión que compararemos con la tensión admisible del material elegido. La tensión de la sección tendrá que ser inferior la la tensión admisible del material para que las dimensiones de la sección sea la correcta.

$$\sigma_{\text{total sección}} < \sigma_{\text{admisible}}$$

3.8.2.2 TRAMOS 2,3,4 Y 5

Tras obtener las fuerzas en el primer tramo, las fuerzas y momentos que actúan en el extremo inferior del tramo, son las mismas fuerzas que actúan en el extremo superior del tramo siguiente. Realizando los mismos cálculos que se han realizado en el tramo 1 para obtener las fuerzas y momentos en la parte inferior se obtendrán los del extremo inferior del siguiente tramo. El procedimiento será igual para los otros cuatro tramos de telescopado.

En cada tramo siguiente las únicas fuerzas que habría que añadir a las obtenidas en el tramo anterior son las fuerzas que genera el propio tramo; las fuerzas centrífugas y de inercia, el peso y la fuerza del viento.

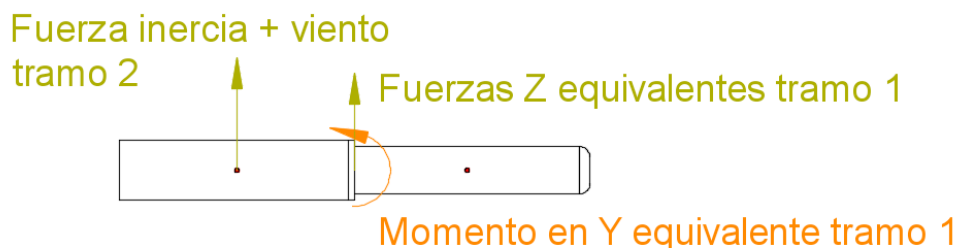


Figura 33: Esquema para los tramos consecutivos plano X-Z

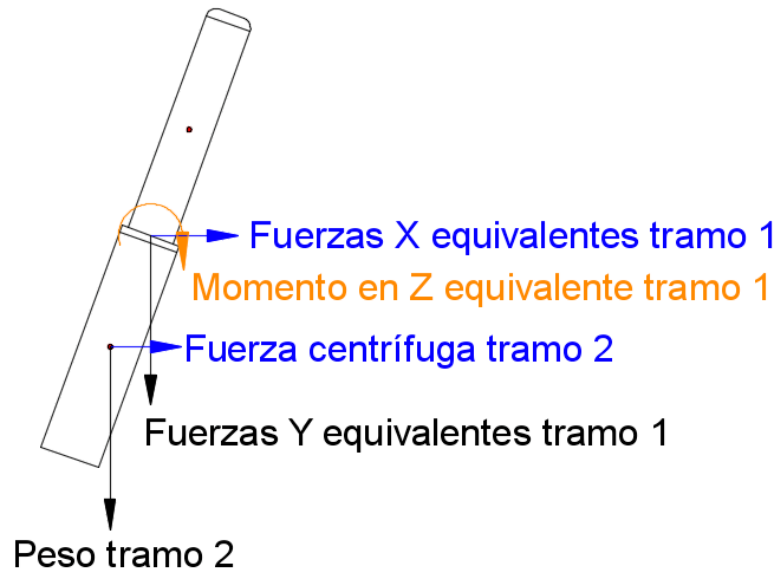


Figura 34: Esquema para tramos consecutivos plano X-Y

La dimensión tanto en alto como en ancho del nuevo tramo será la del tramo anterior sumándole dos veces la medida entre tramos (0,005 metros) y dos veces el espesor del tramo. Este procedimiento también será el mismo para los tramos de telescopado.

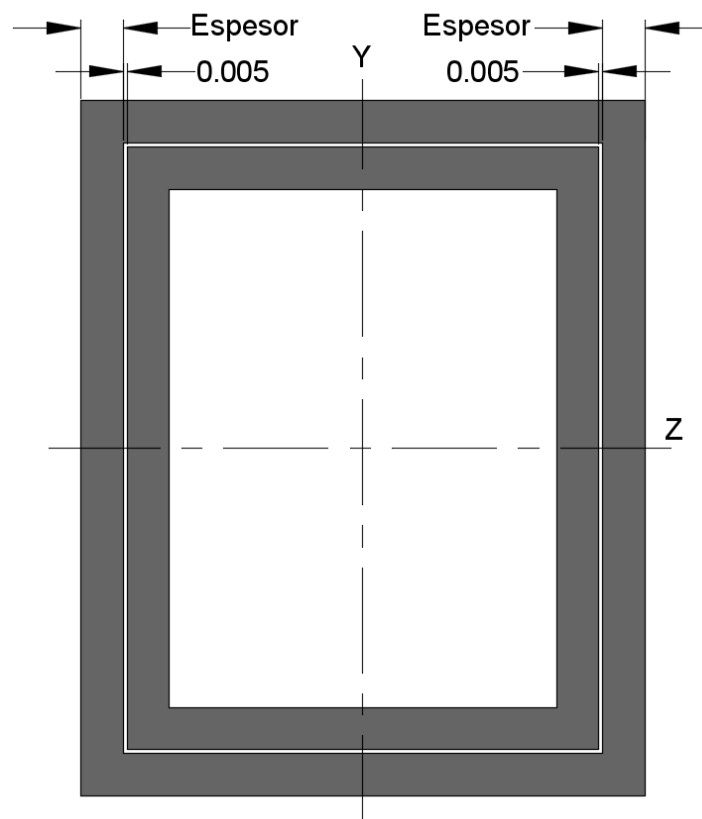


Figura 35: Cálculo de la dimensión de los tramos consecutivos

Variando el espesor para aproximar lo máximo posible a la tensión admisible se variarán también las medidas de la pluma automáticamente.

Como se ha mencionado obtendremos las fuerzas y momentos en los extremos inferiores de los tramos y comprobaremos en todos ellos la tensión en ese extremo inferior.

3.8.2.3 TRAMO FIJO

El último tramo de la pluma se le denomina tramo fijo, debido a que es el tramo que se encuentra siempre en la misma situación, donde se alojan todos los tramos de telescopado y al que se le añade el anclaje para situar después el cilindro hidráulico de elevación de la pluma. Con el mismo procedimiento que el utilizado en los tramos anteriores se obtienen las fuerzas y momentos en la parte derecha de la unión pluma-cilindro, importante ya que esa unión será la sección más crítica. Se varia la longitud del tramo, que en este caso es la longitud desde el extremo superior hasta en anclaje del cilindro, 7,5 metros.

Por otra parte esta sección es un tanto diferente a las demás debido a que en este caso si se coge una sección justo en la unión de un espesor infinitesimalmente estrecho obtenemos fuerzas diferentes a un lado de la sección y a otro. La unión del cilindro es la que hace que esas fuerzas y momentos sean diferentes.

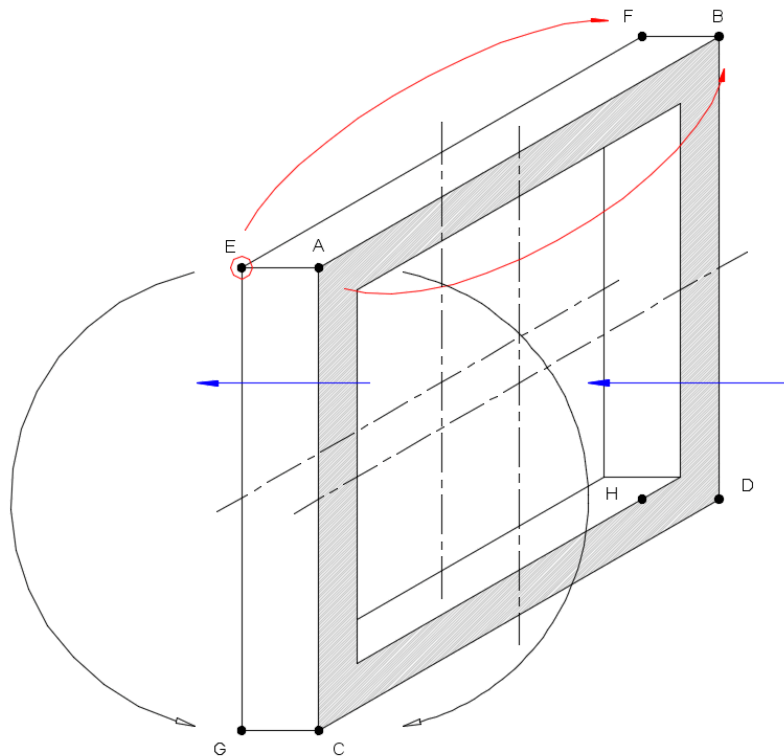


Figura 36: Sección crítica del tramo fijo

Según la imagen de los sentidos de los momentos y las fuerzas a ambos lados se podría deducir que el punto más restrictivo es el punto E, redondeado en la imagen, ya que tanto los momentos como la fuerza axial actúan de forma desfavorable para el punto, pero habría que realizar la comprobación matemáticamente para asegurarse.

En este último tramo fijo se han calculado la fuerza del cilindro, las fuerzas en horizontal y vertical en el eje de giro, y la axial y el momento en la parte inferior de la unión pluma-cilindro para obtener lo arriba mencionado. Para todo ello las distancias variarán según la altura del tramo.

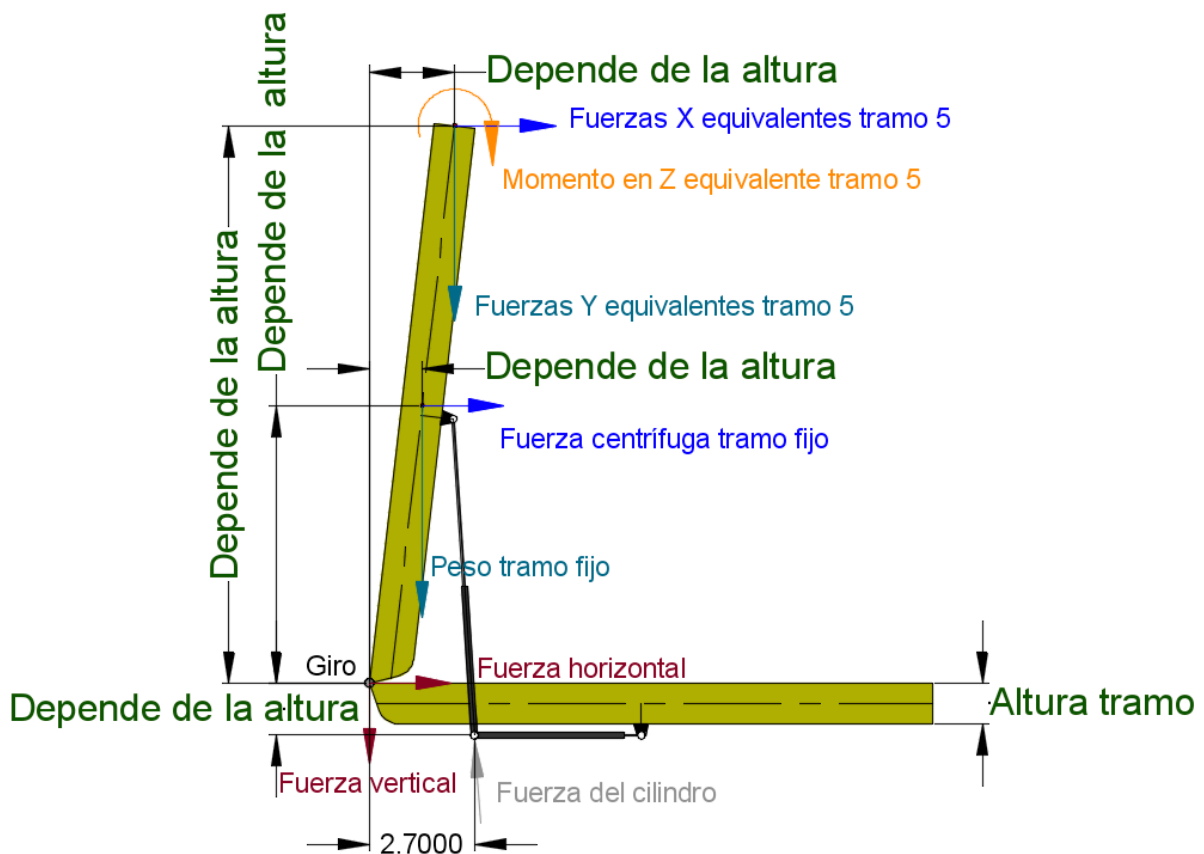


Figura 37: Esquema dimensiones - fuerzas del tramo fijo

En la imagen se observa cómo las dimensiones dependen de la altura final del tramo. El de la imagen es el esquema del cual se obtienen las fuerzas que se han mencionado anteriormente. También depende de la dimensión final el ángulo de inclinación del cilindro hidráulico, así como la carrera del mismo. Una vez se han obtenido las dimensiones finales, se realiza un equilibrio de fuerzas para calcular las fuerzas que son incógnitas. Haciendo un equilibrio de momentos en el eje de giro se obtiene la fuerza del cilindro y después con un equilibrio de fuerzas horizontales y verticales se obtienen la fuerza horizontal y vertical en el eje de giro. Obtenidas esas fuerzas principales se obtienen el momento en la unión pluma-cilindro, el momento a la izquierda de dicha unión para comprobar la sección crítica, el momento en la

parte inferior de la pluma, la axial en la parte izquierda de la unión también para la comprobación de la sección crítica y las cortantes a ambos lados de la unión. Las cortantes se calculan para comprobar si el valor es lo suficientemente pequeño como para despreciarlo, como se a decidido con anterioridad, pero como podemos realizar fácilmente los cálculos para comprobarlo, se decide realizarlo.

3.8.2.4 CONCLUSIONES Y DATOS

Realizados ya todos los cálculos en el programa Excel se procede a variar todos los datos e ir visualizando si las comprobaciones de la sección se van cumpliendo para todos los tramos. Para que no suceda como en la hipótesis uno, que para eso se ha realizado una segunda hipótesis, se fija una medida del tramo 1 para tener el suficiente espacio de almacenaje del cilindro hidráulico de telescopado. El tramo 1 será de (0,7 x 0,5 x X) metros. Las medidas se refieren a ALTO x ANCHO x ESPESOR.

Como se puede observar la fluctuación de todos y cada uno de los datos según se van introduciendo los datos variables (espesores), se observa que existe algún dato que posee un valor un tanto elevado y que conviene analizarlo. El dato se refiere a la fuerza que ejerce el cilindro hidráulico si la carga de 250 Tn se sitúa en lo alto de la pluma. Tendría que soportar más de 20.000 KN de fuerza a compresión, lo cual es demasiado elevado para un cilindro hidráulico.

Al observar este problema se estima también las fuerzas que debería soportar la celosía, en la punta de la cual se encuentran las 250 Tn, al ser también demasiado elevadas y ser la celosía un elemento opcional, se decide que ésta nunca se utilizará para alzar la carga máxima.

A partir de este momento **se divide el dimensionamiento para dos configuraciones** distintas. **La primera**, la cual se realizará el estudio con la carga máxima y en la que no existe ningún tramo extendido, y **la segunda**, decidiremos cuál será la carga máxima a soportar cuando la pluma está completamente extendida.

Tras este estudio se realizará el estudio de la **carga máxima a soportar con la configuración de pluma completamente extendida más celosía**.

Con ayuda del Excel, simplemente quitándole lo referido a la celosía y modificando las fuerzas producidas por la carga, ya que esta se encontrará ahora en un radio diferente, se obtendrán todos los datos de igual forma. A ello se le unirá la configuración de pluma con carga máxima. Esta configuración está ligada a la anterior ya que hay que tener en cuenta que cuando la grúa se encuentra en la configuración de carga máxima, intervienen los pesos y fuerzas de todos los tramos de telescopado. Se supone la aproximación que actúan todos en el centro de gravedad del tramo fijo para facilitar un poco los cálculos.

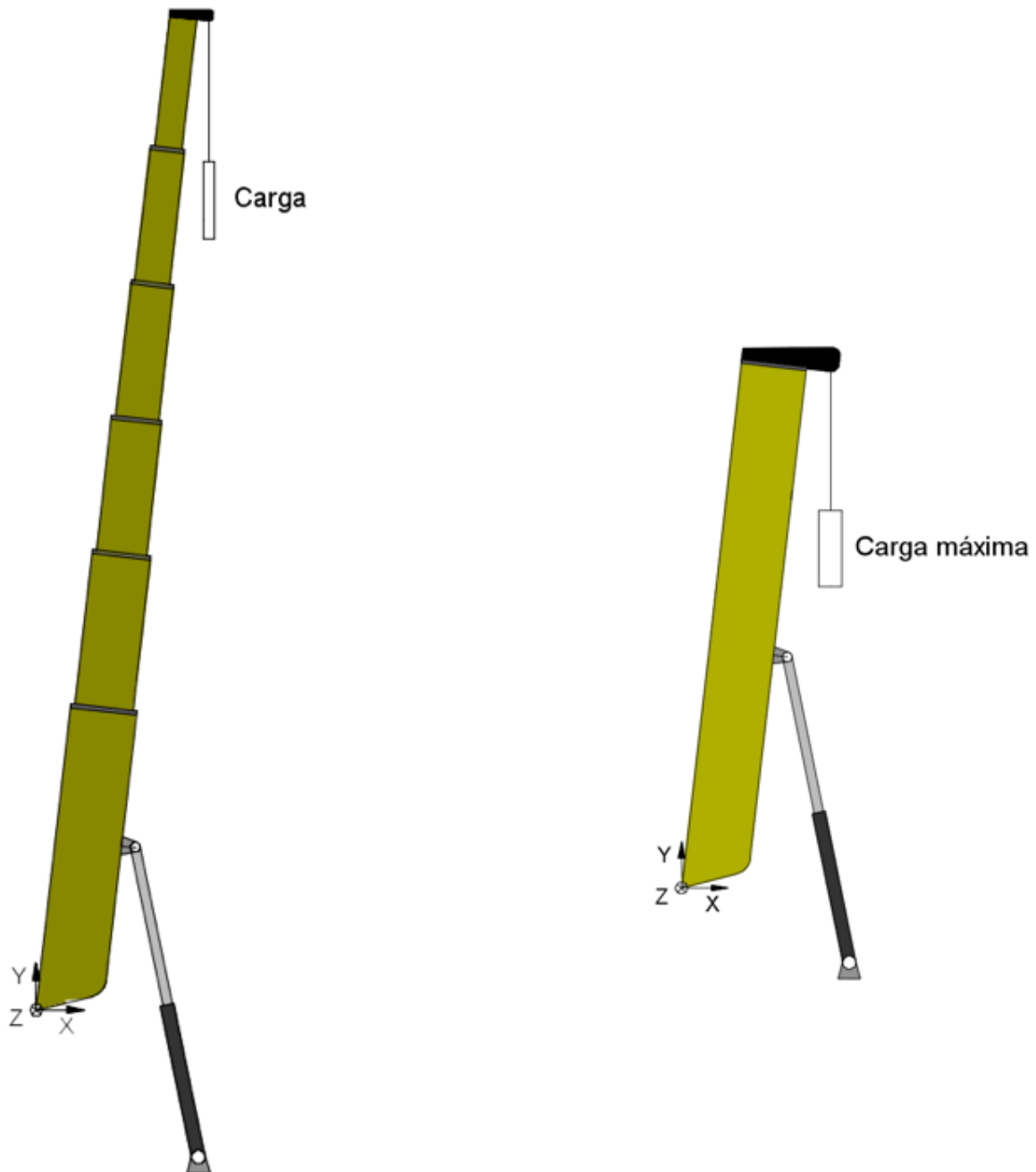


Figura 38: Configuraciones de estudio de la pluma

La imagen de la izquierda se refiere a la configuración de pluma completamente extendida, y la configuración de la derecha se refiere a la configuración de carga máxima.

Primero se comprueba más o menos la fuerza a soportar por el cilindro con la configuración de carga máxima, para comprobar también si es configuración posible. Además la carga máxima va a ser la variable más limitante con la fuerza del cilindro. Las otras fuerzas que intervienen son los pesos de los tramos, las cuales no producirán demasiada variación.

Una vez comprobado lo anterior se pasará a ver qué fuerza máxima podrá levantar la pluma en configuración de pluma completamente extendida observando que la fuerza a soportar por el cilindro sea muy similar a la de la anterior configuración, por tanto se puede deducir que la fuerza que **limita** ambas configuraciones es la **fuerza del cilindro hidráulico**.

3.8.2.5 DATOS FINALES CARGA MÁXIMA

Se realiza la siguiente configuración.

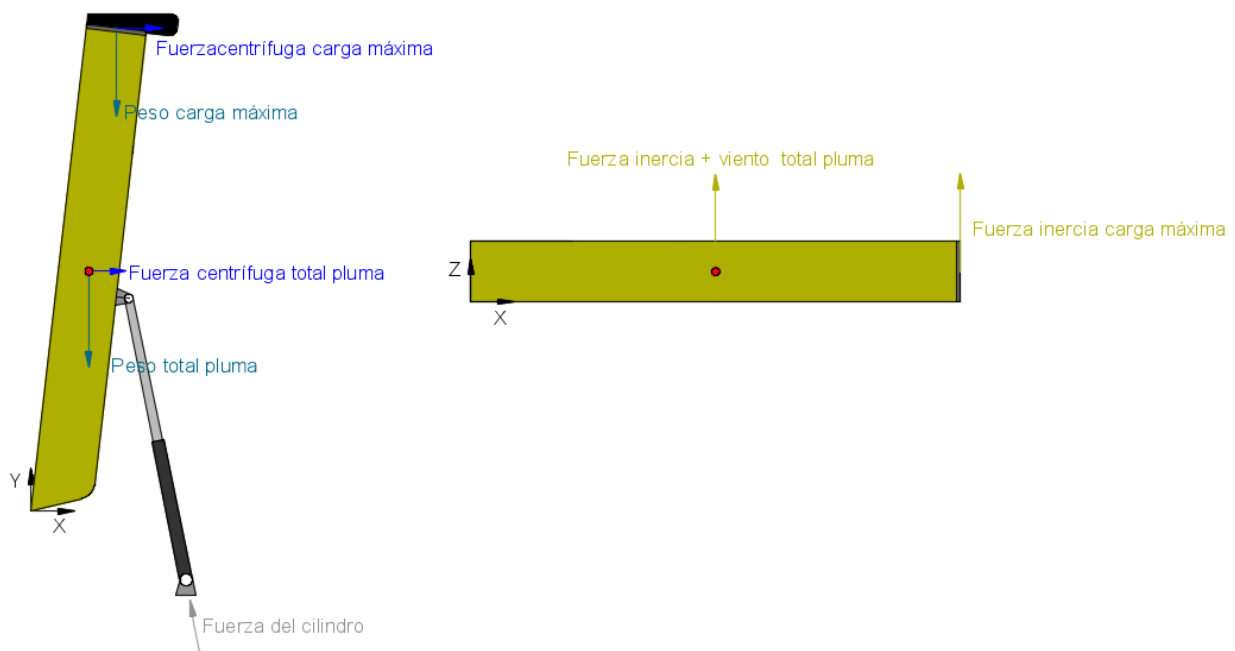


Figura 39: Configuración de carga máxima

Lo primero que se debe tener en cuenta y valorar es la fuerza del cilindro, que se obtiene como en anterioridad con un equilibrio de momentos en el eje de giro. La **fuerza del cilindro** para este caso tiene un valor de **4839,80 KN**. Esta fuerza es algo más lógico y aceptable desde el punto de vista de obtener un cilindro hidráulico. El problema sobre todo residía en que con la fuerza demasiado elevada como se tenía anteriormente, el diámetro del pistón que se obtendría sería de una dimensión demasiado elevada también, y por lo tanto sería un tanto ilógico. La fuerza obtenida ahora es más lógica desde ese punto de vista. Además se puede tomar como referencia una grúa comercializada y se observa más o menos el diámetro de pistón que puede tener.

Lo segundo que se observa es que la **sección crítica**, que se calcula automáticamente gracias a las tablas de Excel, cumple de sobra en este caso con un valor de **126,40 MPa**. El valor es menor que el valor admisible del material con holgura, por lo que la sección cumple perfectamente su objetivo.

3.8.2.6 DATOS FINALES PLUMA COMPLETAMENTE EXTENDIDA

La configuración es la siguiente:

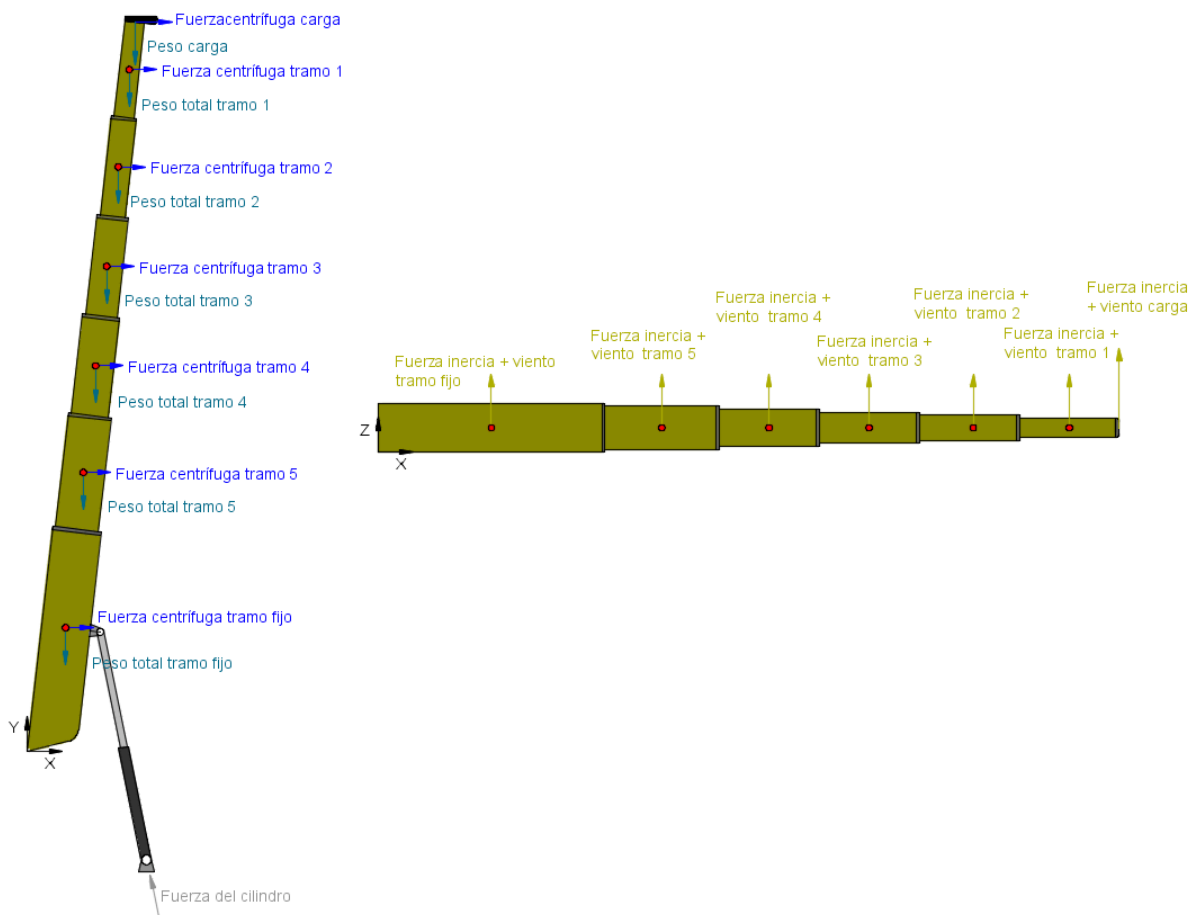


Figura 40: Configuración de pluma completamente extendida

En esta configuración se ha estado observando también constantemente, mientras se variaba la carga y los espesores de los tramos, la fuerza a ejercer por el cilindro. Aunque se haya dividido en dos apartados, al estar relacionados ambos por el peso de los tramos, se han realizado a la vez debido a la realización mediante las tablas de Excel. Ello permite ir variando y visualizar todos los valores de las dos configuraciones.

También se observa que existe un cambio a tener en cuenta. En un principio la combinación de hipótesis más restrictiva era la combinación de grúa en carga sin viento, pero a medida que la carga en la punta va tomando un valor inferior, la combinación de grúa en carga con viento se va haciendo más restrictiva que la anterior. Se entiende que se debe a que las fuerzas de la carga son menores y la fuerza del viento contiene valor más alto. Únicamente puede deberse a eso ya que lo único que se varía es la carga.

Teniendo en cuenta todo lo anterior mencionado, y obteniendo una **fuerza del cilindro** con un valor de compresión de **3299,85 kN**, se obtienen las siguientes medidas para cada uno de los tramos:

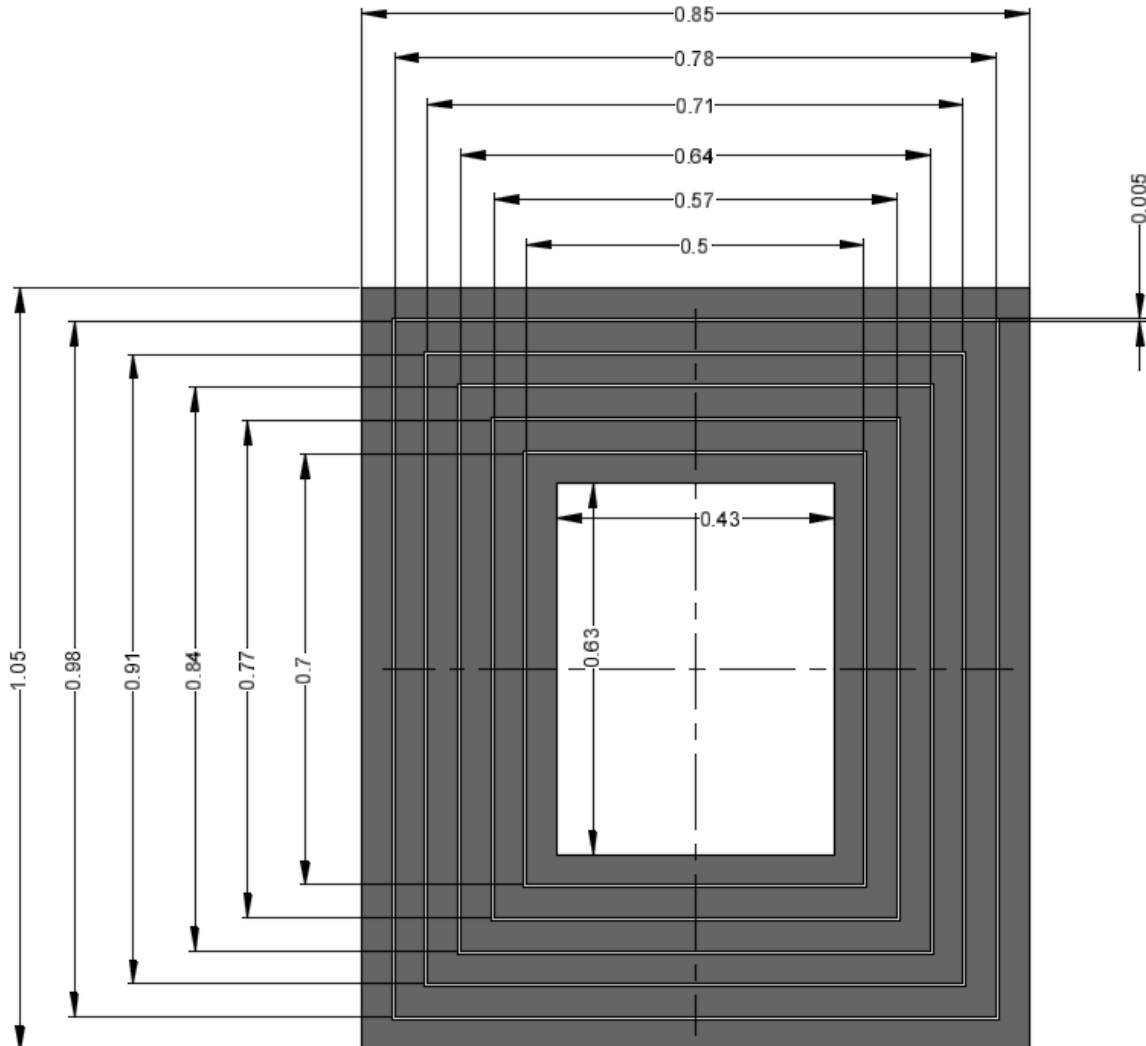


Figura 41: Medidas finales de la pluma

En la figura se pueden observar las medidas finales, así como la separación entre tramos y el hueco interior para el alojamiento del cilindro de telescopado, el cual tiene unas medidas de 0,63 x 0,43 metros. Los espesores no serán menores que 3 cm ya que sinó habría peligro de abollado por compresión.

A continuación se escriben unas tablas con tanto con las dimensiones como con los valores de las tensiones para las dos combinaciones a modo de resumen, ya que serán las dimensiones finales que tendrá la pluma telescópica.

Las medidas se refieren a (Alto x Ancho x Espesor).

Tramo 1	0,7 · 0,5 · 0,03 metros
Tramo 2	0,77 · 0,57 · 0,03 metros
Tramo 3	0,84 · 0,64 · 0,03 metros
Tramo 4	0,91 · 0,71 · 0,03 metros
Tramo 5	0,98 · 0,78 · 0,03 metros
Tramo fijo	1,05 · 0,85 · 0,03 metros

Tabla 2: Resumen de las dimensiones de los tramos

VALORES DE TENSIONES	Combinación sin viento	Combinación con viento
Tramo 1	53,09 MPa	72,41 MPa
Tramo 2	99,04 MPa	131,23 MPa
Tramo 3	135,27 MPa	176,98 MPa
Tramo 4	165,20 MPa	205,43 MPa
Tramo 5	190,85 MPa	222,96 MPa
Tramo fijo	194,87 MPa	217,05 MPa

Tabla 3: Resumen de las tensiones máximas en los tramos

Para el tramo fijo, la sección crítica estaba formada por dos partes, la parte izquierda y la parte derecha. En la tabla se muestra la más crítica de ellas, que en este caso es la parte derecha de la sección.

3.8.3 CÁLCULO DEL CILINDRO HIDRÁULICO DE ELEVACIÓN

Como se ha podido observar es más crítica la fuerza del cilindro que la sección en cualquier caso. Pero una vez obtenida la fuerza que deberá ejercer se analiza cómo serán los elementos del cilindro hidráulico. Para ello se utiliza un esquema en AutoCad con la altura exacta de la pluma para que las medidas sean lo más exactas posibles. Los anclajes de la pluma y el cilindro hidráulico se situarán a 30 cm de la pluma.

La fuerza con la que se realizan los cálculos es la más crítica de las obtenidas con un valor de 4839,808 KN a compresión. A parte de este dato también se habían decidido otros datos geométricos como el anclaje del cilindro a 2,7 metros del eje de giro y el segundo anclaje a 7 metros del mismo.

Con esos datos se puede dibujar un esquema como el siguiente:

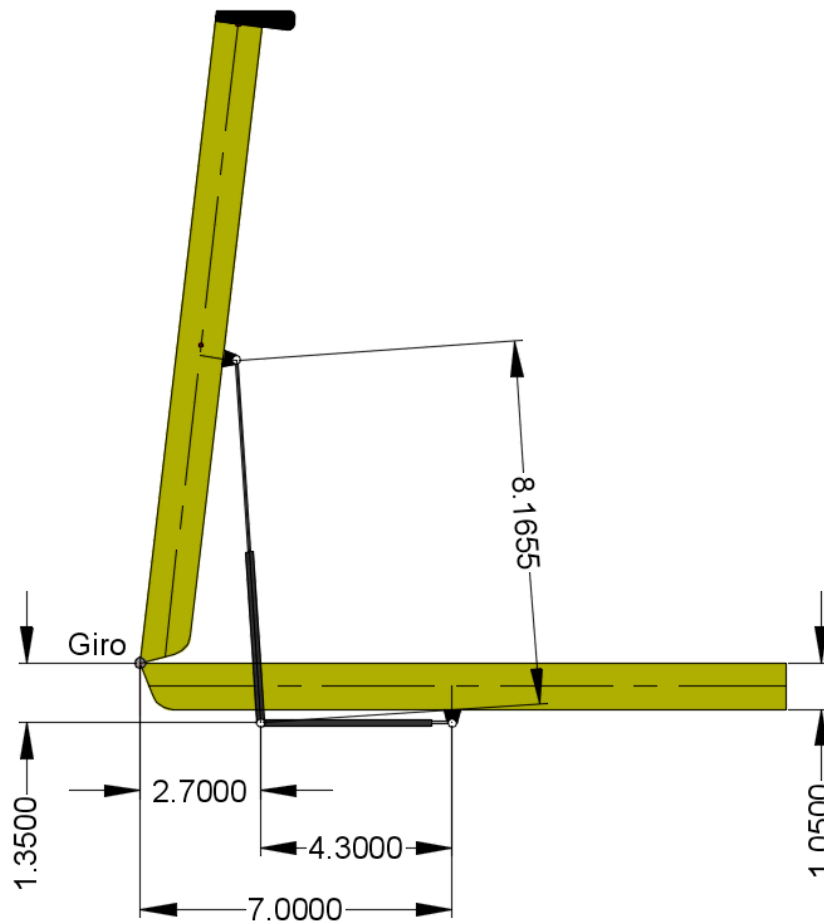


Figura 42: Esquema de medidas para situar el cilindro hidráulico

El cilindro en su posición de origen posee 4,3 metros. La carrera se obtiene restando a la longitud del cilindro en posición de elevación máxima, la longitud en la posición de inicio. El cálculo da como resultado **una carrera de 3,9 metros, 3.900 mm**. Sobra algo de espacio, necesario para el alojamiento de los elementos interiores del cilindro.

Con las fórmulas del apartado 3.5 se obtienen la presión y los diámetros del pistón y del vástago necesarios. Se irán variando los datos mencionados hasta conseguir una fuerza de choque, F_B , y una fuerza de compresión, F_C , mayores a la que necesita el cilindro objeto de cálculo.

La fuerza de choque se refiere a la fuerza que soporta el cilindro sin que falle por pandeo y la fuerza de compresión es la máxima fuerza que soportará el cilindro con las características calculadas. Por ello estas fuerzas deberán de ser mayores que la que soporta el cilindro, 4839,808 KN.

Las fórmulas son las siguientes:

$$F_B = (\pi \cdot E \cdot I) / (v \cdot L^2 \cdot 1.000) \rightarrow I = 0,0491 \cdot d$$

$$F_C = (p \cdot D^2 \cdot 0,785) / 10.000$$

Donde “E” es el módulo de elasticidad, 210.000 N/mm², “I” es el momento de inercia, “v” el factor de seguridad de choque, 3,6, y “L” es la longitud de instalación, 4300 mm, “d” se refiere al diámetro mínimo que deberá tener el vástago del cilindro, “D” el diámetro mínimo del pistón, ambos diámetros en mm, y “p” es la presión de operación a la que deberá funcionar, en bares.

Con un diámetro de vástago de 320 mm, un diámetro de pistón de 330 mm y una presión de operación de 600 bares se obtiene un valor de:

$$F_B = 5102,83 \text{ KN}$$

$$F_C = 5444,76 \text{ KN}$$

Valores aceptables desde el punto de vista geométrico y bastante ajustados a la fuerza de compresión necesaria.

Todas las características están dentro del marco de características que aporta el fabricante, el cual admite valores de presión de hasta 630 bares y carreras de hasta 8.000 mm.

El cilindro hidráulico diseñado, debido a la carga máxima que debe soportar, que conlleva una fuerza de compresión muy alta, tendrá que ser un cilindro con condiciones especiales. Los cilindros normalizados encontrados tienen una presión máxima de 350 bares, que de poco sirven para la pluma de la grúa diseñada.

CILINDRO HIDRÁULICO DE ELEVACIÓN DE LA PLUMA	
Presión de trabajo	600 Bares
Carrera	3900 mm
Diámetro del pistón	330 mm
Diámetro del émbolo	320 mm
Fuerza de compresión	5444,76 KN

Tabla 4: Resumen de medidas del cilindro hidráulico de elevación

3.8.4- DIMENSIONADO DE LA CELOSÍA

Se realiza el estudio de una celosía, un elemento opcional para la pluma para ciertos casos en los que se requiera un alzamiento de mayor altitud. La celosía es un elemento cuyo estudio se basa en el estudio de barras biarticuladas. Está compuesta por este tipo de barras cuya particularidad es que únicamente trabajan en su dirección, únicamente a tracción y a compresión. El diseño se realiza totalmente libre, teniendo como referencia una celosía de una grúa comercializada en el mercado.

La celosía aportará una longitud extra de 14,5 metros. El diseño de la celosía será el siguiente:

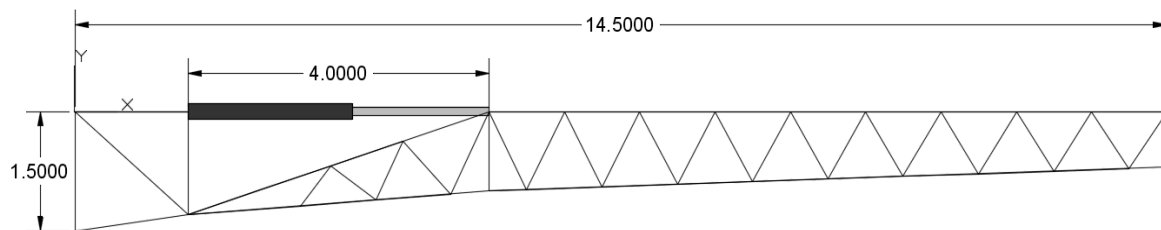


Figura 43: Diseño de la celosía

En la figura se observa el cilindro hidráulico para el movimiento de la inclinación de la celosía pero para su estudio se tratará como una barra normal. Para su estudio se utiliza en programa GIM de resolución de estructuras planas. La celosía trabajará en un intervalo desde su posición natural como extensión de la pluma, hasta un ángulo de 45 grados desde el eje de giro. Se estudiarán por tanto las dos posiciones extremas. Se estudia la celosía en el plano de la imagen, plano X-Y, porque es en este plano donde se tienen las fuerzas de mayor valor, y será donde se obtenga la fuerza más crítica. La celosía completa consta de dos celosías como la de la imagen unidas entre sí tanto por el cordón superior como por el inferior, por lo que las fuerzas en el sentido perpendicular las absorberán las barras en dicho plano. Las fuerzas que actúan en el eje Z son mucho más pequeñas por lo que se podrían considerar despreciables. Ésas barras a parte de soportar las fuerzas de inercia y viento, cumplen la función de acortar la longitud de pandeo y serán idénticas a las barras cruzadas de la celosía. Todas las barras que forman la celosía son de sección circular y huecas.



Figura 44: Vista superior de la celosía



Figura 45: Vista inferior de la celosía

A modo de facilitar las referencias a las barras, se numeran todas las barras de la celosía.

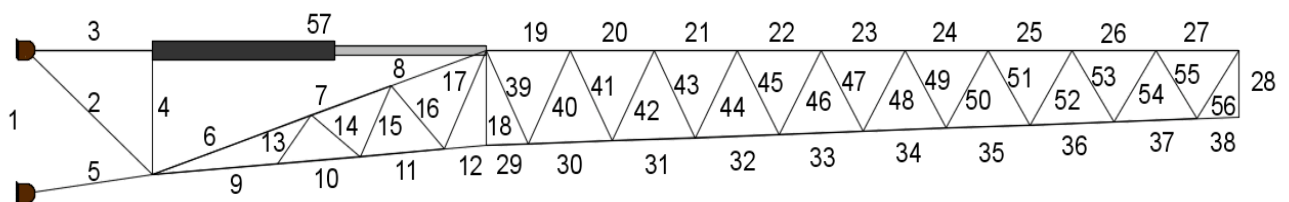


Figura 46: Numeración de las barras de la celosía

Se dimensionará la celosía en dos partes. Primero se dimensionarán el cordón superior e inferior de forma que las barras que lo componen sean del mismo diámetro. Después se dimensionarán las barras restantes que poseerán otro diámetro diferente. Las barras 2, 3, 4 y 5 serán del mismo diámetro que el cordón superior e inferior. De esta forma se trata de realizar un ahorro de material así como contribuir a que las barras que no necesitan soportar demasiada fuerza, estén sobredimensionadas. Se recuerda que el ahorro económico siempre compone una parte fundamental de un proyecto.

Conviene mencionar que la celosía **no será utilizada para configuraciones de carga máxima**, ya que ello supondría utilizar unas barras de un diámetro bastante elevado. La configuración de pluma con celosía únicamente se utilizará en ciertos casos especiales que requieran más altura o mayor radio de carga, y en los cuales el **peso a elevar no sea superior a 10 toneladas**.

En un primer estudio no se introducirán las fuerzas correspondientes a la celosía, únicamente se introducirán las correspondientes a la carga, aunque una vez obtenido el perfil necesario, se volverá a realizar el cálculo con los datos de peso y fuerza centrífuga correspondientes a la celosía.

Las disposiciones de la celosía a estudiar son las siguientes:

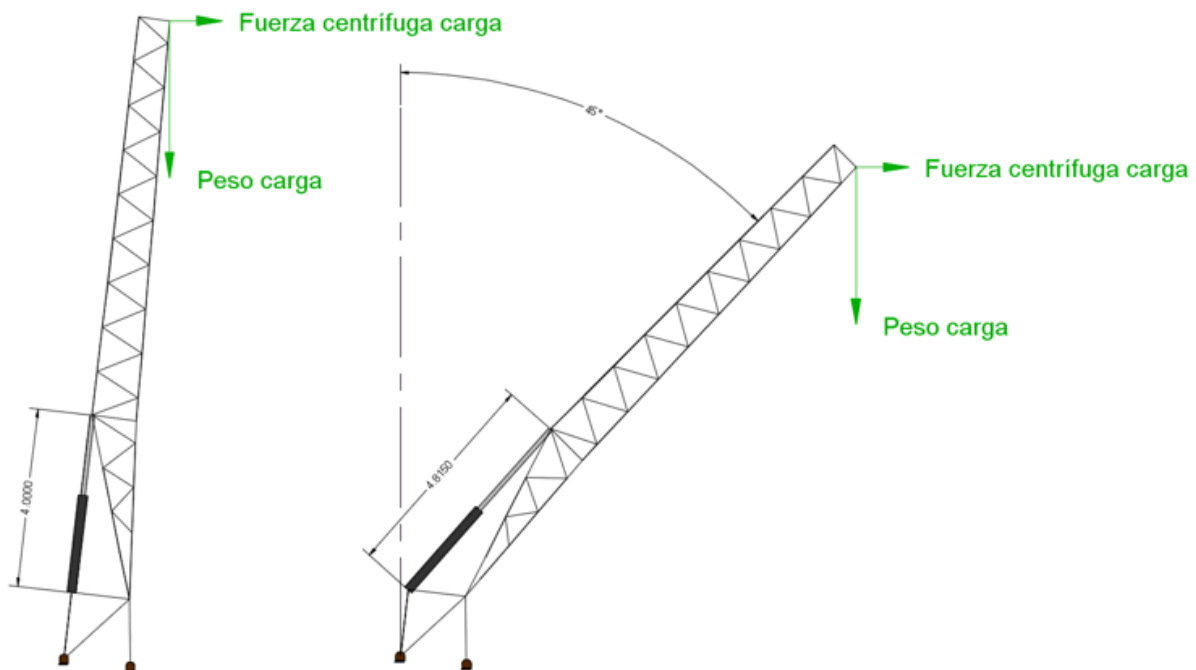


Figura 47: Disposiciones de la celosía

Los datos de las fuerzas a introducir deberán ser la mitad de lo calculado debido a que la celosía es una celosía cuadrada, por lo que se compone de dos tramos como los de la figura unidos entre sí tanto por el cordón superior como por el inferior. Las fuerzas se introducen multiplicadas por sus correspondientes coeficientes de mayoración. La combinación más crítica en este caso será la combinación de grúa en servicio sin viento, por tener coeficientes más altos y porque las fuerzas de inercia y viento no se tendrán en cuenta para este plano de estudio.

Se obtienen las fuerzas de la carga para el plano X-Y.

Peso de la carga = 208,36 KN → Para la celosía, 104,18 KN

Fuerza centrífuga de la carga = 0,65 KN → Para la celosía, 0,32 KN

Se dibuja la celosía en AutoCAD para obtener con mayor facilidad las coordenadas de todos los puntos y después se traslada al programa de resolución de estructuras planas, GIM, el cual visualizará todas las fuerzas de tracción y compresión de todas las barras. El dibujo en AutoCAD también ayuda a conocer las longitudes de las barras.

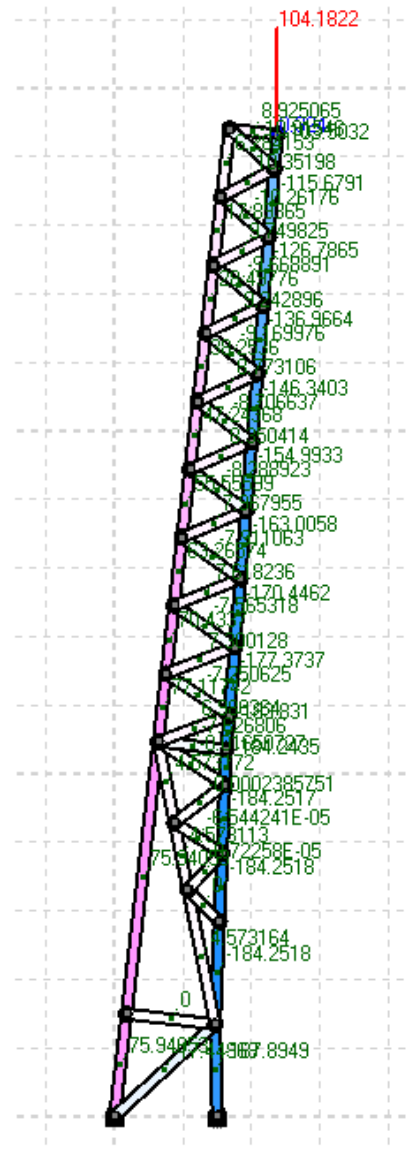


Figura 48: Fuerzas axiales en las barras de la celosía en configuración a $83,36^\circ$ (GIM)

La imagen corresponde al programa, donde se observa cómo se obtienen las fuerzas axiales de las barras. Las barras en color rosa son las barras que actúan a tracción y las barras en color azul, a compresión. La barra número 57 es el cilindro hidráulico de inclinación de la celosía, que se dibuja como una barra y así se obtiene la fuerza que tendrá que soportar.

Las barras que son objeto de estudio debido a la fuerza a soportar y su longitud son las siguientes:

- Barra 9 → 184,25 KN a compresión
- Barra 19 → 77,12 KN a tracción
- Barra 55 → 10,35 KN a tracción
- Barra 56 → 10,91 KN a compresión
- Cilindro hidráulico → 75,94 KN a tracción

Antes de dimensionar las barras, se elige el tipo de acero que se empleará para su construcción. Esta elección se hace en base a los aceros estructurales del código técnico de seguridad estructural-Acero (SE-A). En este caso se ha elegido el acero S275JR.

Tabla 4.1 Características mecánicas mínimas de los aceros UNE EN 10025

DESIGNACIÓN	Espesor nominal t (mm)				Temperatura del ensayo Charpy °C
	Tensión de límite elástico f_y (N/mm ²)		Tensión de rotura f_u (N/mm ²)		
	t ≤ 16	16 < t ≤ 40	40 < t ≤ 63	3 ≤ t ≤ 100	
S235JR					20
S235J0	235	225	215	360	0
S235J2					-20
S275JR					20
S275J0	275	265	255	410	0
S275J2					-20
S355JR					20
S355J0	355	345	335	470	0
S355J2					-20
S355K2					-20 ⁽¹⁾
S450J0	450	430	410	550	0

⁽¹⁾ Se le exige una energía mínima de 40J.

Figura 50: Características mecánicas del acero S275JR

Como se ha decidido antes, el perfil que se elige para la celosía es un perfil con una sección circular hueca, de la cual se facilita a continuación el prontuario:

SECCIÓN HUECA CIRCULAR

I → momento de inercia en los planos yy'/zz'.
 Wel, z → módulo resistente elástico en los planos yy'/zz'.
 Wpl, z → módulo resistente plástico en los planos yy'/zz'.
 Iy → radio de giro en los planos yy'/zz'.
 Av → área de cortante.
 It → módulo de torsión.
 De → diámetro exterior.
 Di → diámetro interior.
 e → espesor.

Perfil	Peso	Dimensiones	Área sección transv.	Propiedades de la sección									Clases de secciones					Resistencia de las secciones										
				ejes y-y/z-z									Flexión simple flexocompresión yy/zz					Comp. / tracc.										
				I_y	$W_{el,y}$	$W_{pl,y}$	I_z	A_v	C_t	I_t	Comp.	Flexión	Comp.	Flexión	Cortante													
	G	D	e	d	A	I_y	$W_{el,y}$	$W_{pl,y}$	I_z	A_v	C_t	I_t	S 235	S 275	S 355	S 235	S 275	S 355	S 235	S 275	S 355							
50	2	2,37	50	2	46	301,99	8,70	3,48	4,61	1,70	192	6,96	17,40	1	1	1	1	1	1	67,50	78,99	102,0	1,03	1,21	1,56	24,81	29,03	37,48
50	3	3,48	50	3	44	442,95	12,28	4,91	6,64	1,57	282	9,82	24,56	1	1	1	1	1	1	99,14	116,0	149,8	1,49	1,74	2,24	36,44	42,84	56,05
50	4	4,54	50	4	42	578,05	15,41	6,16	8,49	1,53	368	12,32	30,81	1	1	1	1	1	1	129,4	151,4	195,4	1,90	2,22	2,87	47,55	55,65	71,83
60	2	2,86	60	2	55	364,42	15,34	5,11	6,73	2,05	232	10,23	30,68	1	1	1	1	1	1	81,56	96,44	123,2	1,51	1,76	2,28	29,98	35,08	45,20
60	3	4,22	60	3	64	537,21	21,88	7,29	9,76	2,02	342	14,59	43,76	1	1	1	1	1	1	120,2	140,7	181,6	2,16	2,56	3,30	44,19	51,71	66,76
60	4	5,52	60	4	52	703,72	27,73	9,24	12,57	1,98	448	18,48	55,45	1	1	1	1	1	1	157,5	184,3	237,9	2,81	3,29	4,25	57,89	67,74	87,45
60	4,5	6,16	60	4,5	51	784,61	30,41	10,14	13,69	1,97	505	20,27	60,82	1	1	1	1	1	1	175,6	205,5	265,3	3,11	3,64	4,70	64,54	75,53	97,50
70	2	3,35	70	2	65	427,26	24,72	7,06	9,25	2,41	272	14,12	49,43	1	1	1	1	2	2	96,6	111,9	144,5	2,07	2,42	3,13	36,15	41,13	53,06
70	3	4,96	70	3	64	631,48	35,90	10,14	13,48	2,37	402	20,29	71,01	1	1	1	1	1	1	141,3	165,4	213,5	3,02	3,53	4,56	51,06	59,79	78,47
70	4	6,51	70	4	62	829,38	45,33	12,95	17,45	2,34	528	25,90	90,65	1	1	1	1	1	1	185,6	217,2	280,4	3,90	4,57	5,90	68,23	79,84	103,1
70	5	8,01	70	5	60	1021,02	54,24	15,50	21,17	2,30	660	31,00	106,48	1	1	1	1	1	1	228,5	267,4	345,2	4,74	5,54	7,16	83,99	98,29	126,9
75	2	3,60	75	2	71	458,67	30,58	8,15	10,66	2,58	292	16,31	61,15	1	1	1	1	2	2	102,7	120,1	155,1	2,30	2,79	3,60	37,73	44,15	57,00
75	3	5,33	75	3	69	678,58	44,05	11,75	15,56	2,55	432	23,49	88,10	1	1	1	1	1	1	151,9	177,7	229,4	3,48	4,08	5,26	55,82	65,32	84,33
75	4	7,00	75	4	67	892,21	56,40	15,04	20,19	2,51	568	30,06	112,80	1	1	1	1	1	1	199,7	233,7	301,7	4,52	5,29	6,82	73,39	85,89	110,9
75	5	8,53	75	5	65	1099,55	67,69	18,05	24,54	2,48	700	36,10	135,38	1	1	1	1	1	1	246,1	293,0	371,8	5,49	6,43	8,30	90,45	105,8	136,6
80	2	3,85	80	2	76	490,09	37,30	9,32	12,17	2,76	312	18,65	74,59	1	1	1	1	2	2	109,7	128,4	166,7	2,72	3,19	4,11	40,32	47,16	60,90
80	3	5,70	80	3	74	725,71	53,87	13,47	17,80	2,72	452	26,93	107,73	1	1	1	1	1	1	162,4	190,1	245,4	3,58	4,26	5,52	59,70	69,85	90,18
80	4	7,50	80	4	72	955,04	69,15	17,29	23,13	2,69	608	34,57	138,29	1	1	1	1	1	1	213,7	250,1	322,9	5,18	6,06	7,82	78,56	91,94	118,7
80	5	9,25	80	5	70	1178,10	83,20	20,80	28,17	2,66	750	41,60	166,41	1	1	1	1	1	1	263,7	308,5	398,3	6,30	7,38	9,52	96,91	113,4	146,4

Perfil	Peso	Dimensiones			Área sección transv.	Propiedades de la sección							Clases de secciones					Resistencia de las secciones									
						ejes y-y/z-z							Compresión		Flexión simple flexocompresión yy/zz			Comp. / tracc. (N _{t,Rd} ≤ N _{p,Rd}) (kN)			Flexión plástica (M _{pl,Rd}) o elástica (M _{el,Rd}) eje y-y/z-z (kNm)			Cortante (V _{ed,Rd}) (kN)			
						I ^y	W _{pl,y}	W _{pl,z}	i ^y	A _v	C _t	i ^z	S ₂₃₅	S ₂₇₅	S ₃₅₅	S ₂₃₅	S ₂₇₅	S ₃₅₅	S ₂₃₅	S ₂₇₅	S ₃₅₅	S ₂₃₅	S ₂₇₅	S ₃₅₅			
						(mm ⁴)	(mm ³)	(mm ³)	(mm)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)		
90	2	4,34	90	2	86	552,92	53,55	11,90	15,49	3,11	362	23,80	107,1	1	1	2	2	2	123,7	144,8	185,9	3,47	4,06	5,24	45,48	53,23	68,71
90	3	6,44	90	3	84	819,96	77,57	17,25	22,72	3,08	522	34,52	155,3	1	1	1	1	1	193,5	214,8	277,2	5,08	5,95	7,68	67,45	78,93	101,9
90	4	8,48	90	4	82	1080,71	100,1	22,25	29,61	3,04	688	44,50	200,3	1	1	1	1	1	241,9	283,0	365,4	6,53	7,75	10,01	88,90	104,0	134,3
90	5	10,48	90	5	80	1335,18	121,00	25,89	36,17	3,01	850	53,78	242,0	1	1	1	1	1	298,8	349,7	451,4	8,09	9,47	12,23	109,8	128,5	165,9
90	6	12,43	90	6	78	1583,36	140,4	31,19	42,41	2,98	1.008	62,38	280,7	1	1	1	1	1	354,4	414,7	526,3	9,49	11,11	14,34	130,3	152,4	196,8
100	2	4,83	100	2	96	615,75	74,0	14,79	19,21	3,47	392	29,59	147,9	1	1	2	2	3	137,8	151,3	208,2	4,30	3,87	5,00	50,65	58,27	75,52
100	3	7,18	100	3	94	914,20	107,6	21,52	28,24	3,43	582	43,05	215,2	1	1	1	2	2	204,6	230,4	309,1	6,32	7,40	9,55	75,20	86,00	113,6
100	4	9,47	100	4	92	1206,37	139,2	27,84	36,89	3,40	768	55,69	278,4	1	1	1	1	1	270,0	316,0	407,9	8,26	9,56	12,47	98,24	116,1	148,9
100	5	11,71	100	5	90	1492,25	169,8	33,75	45,17	3,36	950	67,52	337,5	1	1	1	1	1	334,0	390,8	504,5	10,11	11,83	15,27	122,8	143,7	185,4
100	6	13,91	100	6	88	1771,85	195,5	39,30	53,09	3,33	1.128	78,50	393,0	1	1	1	1	1	395,5	454,1	599,1	11,88	13,90	17,95	145,8	170,6	220,2
115	2	5,57	115	2	111	710,00	113,4	19,71	25,54	4,00	452	38,43	226,7	2	2	2	2	3	158,9	186,0	240,0	5,72	5,15	6,57	58,41	68,35	88,23
115	3	8,29	115	3	109	1055,58	165,6	28,81	37,84	3,96	672	57,61	331,3	1	1	1	2	2	235,2	275,5	356,9	8,42	9,86	12,73	86,83	101,6	131,2
115	4	10,95	115	4	107	1394,87	215,1	37,41	49,31	3,93	888	74,82	430,2	1	1	1	1	1	312,2	365,3	471,6	11,04	12,91	16,67	114,7	134,28	173,3
115	5	13,56	115	5	105	1727,88	261,9	45,94	60,54	3,89	1.100	91,09	523,8	1	1	1	1	1	395,7	452,5	594,2	13,55	15,86	20,47	142,1	166,3	214,7
115	6	16,13	115	6	103	2054,60	306,1	53,23	71,36	3,86	1.308	108,46	612,1	1	1	1	1	1	459,8	538,1	694,7	15,97	18,69	24,13	169,0	197,9	255,3
115	7	18,64	115	7	101	2375,04	347,7	60,48	81,76	3,83	1.512	120,95	695,5	1	1	1	1	1	531,5	622,0	803,0	18,30	21,41	27,84	195,4	228,6	295,1
125	3	9,03	125	3	119	1149,62	214,1	34,25	44,66	4,31	732	66,50	428,1	1	1	1	2	2	257,3	301,1	388,7	10,00	11,70	15,10	94,59	110,7	142,9
125	4	11,94	125	4	117	1520,53	278,5	44,57	58,59	4,28	968	89,1	557,2	1	1	1	1	1	340,3	398,2	514,1	13,11	15,34	19,81	145,4	168,0	189,0
125	5	14,80	125	5	115	1894,56	339,9	54,98	72,04	4,25	1.200	108,8	679,8	1	1	1	1	1	421,9	493,7	637,0	15,12	18,87	24,36	155,1	181,5	234,2
125	6	17,61	125	6	113	2243,10	398,1	63,69	85,04	4,21	1.428	127,4	796,1	1	1	1	1	1	502,0	597,5	756,4	19,03	22,27	28,75	184,5	215,9	278,7
125	7	20,37	125	7	111	2594,96	453,2	72,52	97,58	4,18	1.652	145,0	906,5	1	1	1	1	1	580,8	679,5	877,3	21,84	25,56	32,99	213,5	248,8	322,5
150	4	14,40	150	4	142	1834,69	489,2	55,23	85,29	5,16	1.168	130,5	878,4	1	1	1	2	2	410,6	490,5	620,3	19,09	22,34	28,83	150,9	176,6	228,0
150	5	17,88	150	5	140	2277,65	580,3	79,91	105,2	5,13	1.450	159,8	1199	1	1	1	1	1	509,8	596,5	770,1	23,54	27,54	35,56	187,4	219,3	283,0
150	6	21,31	150	6	138	2714,34	704,8	93,97	124,5	5,10	1.728	187,9	1490	1	1	1	1	1	607,5	710,9	917,7	27,86	32,60	42,09	223,3	261,3	337,3
150	7	24,69	150	7	136	3144,73	805,8	107,43	143,3	5,06	2.002	214,9	1.612	1	1	1	1	1	703,8	823,6	1.063	32,05	37,52	48,43	258,7	302,7	390,8
150	8	28,02	150	8	134	3568,85	902,4	120,32	161,5	5,03	2.272	240,6	1805	1	1	1	1	1	798,7	934,7	1.207	36,14	42,29	54,50	293,6	343,6	443,5

Figura 51: Prontuario de barras con sección hueca circular

El dimensionamiento de las barras se realiza según las fórmulas del código técnico de seguridad estructural del acero (SE-A) para compresión y tracción.

Primero se utilizan las fórmulas de compresión que indica el código técnico.

Se denomina esbeltez reducida $\bar{\lambda}$, a la raíz cuadrada del cociente entre la resistencia plástica de la sección de cálculo y la compresión crítica por pandeo, de valor

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$N_{cr} = \left(\frac{\pi}{L_k}\right)^2 \cdot E \cdot I$$

Donde A se refiere al área del perfil elegido, f_y es la tensión del límite elástico del material (275 N/mm²), E es el módulo de elasticidad del acero (210.000 MPa), I se obtiene del prontuario del perfil elegido y L_k es la longitud de pandeo de la barra.

La esbeltez reducida tendrá que tener un valor menor a 2. Para saber la longitud de pandeo el código técnico aporta una tabla según las condiciones del extremo de las barras.

Tabla 6.1 Longitud de pandeo de barras canónicas

Condiciones de extremo	biarticulada	biempotrada	empotrada articulada	biempotrada desplazable	en ménsula
Longitud L_k	1,0 L	0,5 L	0,7 L	1,0 L	2,0 L

Figura 52: Longitudes de pandeo según las condiciones de extremo

En el caso de la celosía para la grúa, las barras son biarticuladas por lo que la longitud de pandeo es la longitud de la barra.

A continuación se aplican las fórmulas para comprobar el pandeo lateral, causante de muchos de los fallos de barras a compresión. Una vez obtenida la esbeltez reducida, Se entra en la siguiente tabla y se obtiene el coeficiente de pandeo.

Tabla 6.3 Valores del coeficiente de pandeo (χ)

Esbeltez reducida	Curva de pandeo				
	a_0	a	b	c	d
Coefficiente (α) de imperfección	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76
$\leq 0,20$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,30	0,99	0,98	0,96	0,95	0,92
0,40	0,97	0,95	0,93	0,90	0,85
0,50	0,95	0,92	0,88	0,84	0,78
0,60	0,93	0,89	0,84	0,79	0,71
0,70	0,90	0,85	0,78	0,72	0,64
0,80	0,85	0,80	0,72	0,66	0,58
0,90	0,80	0,73	0,66	0,60	0,52
1,00	0,73	0,67	0,60	0,54	0,47
1,10	0,65	0,60	0,54	0,48	0,42
1,20	0,57	0,53	0,48	0,43	0,38
1,30	0,51	0,47	0,43	0,39	0,34
1,40	0,45	0,42	0,38	0,35	0,31
1,50	0,40	0,37	0,34	0,31	0,28
1,60	0,35	0,32	0,31	0,28	0,25
1,80	0,28	0,27	0,25	0,23	0,21
2,00 ⁽¹⁾	0,23	0,22	0,21	0,20	0,18
2,20 ⁽¹⁾	0,19	0,19	0,18	0,17	0,15
2,40 ⁽¹⁾	0,16	0,16	0,15	0,14	0,13
2,70 ⁽²⁾	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11
3,00 ⁽²⁾	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09

⁽¹⁾ esbeltez intolerable en los elementos principales
⁽²⁾ esbeltez intolerable incluso en elementos de arriostamiento

Figura 53: Valores del coeficiente de pandeo

Y para saber en que curva de pandeo se ha de entrar para obtener el coeficiente que corresponde a las barras elegidas, el código técnico aporta también una tabla con diferentes perfiles y la curva que corresponde a cada uno de ellos.

Tabla 6.2 Curva de pandeo en función de la sección transversal

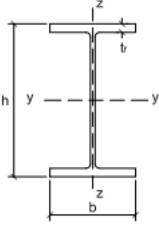

Tipo de sección	Tipo de acero		S235 a S355		S450	
	Eje de pandeo ⁽¹⁾		y	z	y	z
Perfiles laminados en I 	$h/b > 1,2$	$t \leq 40$ mm	a	b	a_0	a_0
		40 mm $< t \leq 100$ mm	b	c	a	a
	$h/b \leq 1,2$	$t \leq 100$ mm	b	c	a	a
		$t > 100$ mm	d	d	c	c
Tubos de chapa simples o agrupados 	laminados en caliente		a	a	a_0	a_0
	conformados en frío		c	c	c	c

Figura 54: Curvas de pandeo

Para el caso elegido la curva de pandeo es la curva a. Según la esbeltez reducida obtenida es muy posible que haya que interpolar para obtener el coeficiente de pandeo exacto.

Tras ello se obtiene el valor de fuerza máxima para el pandeo lateral.

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd}$$

Donde f_{yd} se define como resistencia de cálculo, y se refiere al cociente de la tensión de límite elástico, f_y , y el coeficiente de seguridad del material, γ . El coeficiente de seguridad del material es igual a 1,05 relativo a la plastificación del material. Para que la barra sea válida tendrá que cumplir que $N_{b,Rd} > N_{c,rd}$ (fuerza de compresión de la barra).

En cuanto a la tracción basta con comprobar la siguiente fórmula:

$$N_{t,Rd} \leq N_{pl,Rd} = A \cdot f_{yd}$$

Donde $N_{t,Rd}$ es la fuerza de tracción de la barra.

3.8.4.1- DIMENSIONADO DEL CORDÓN SUPERIOR E INFERIOR

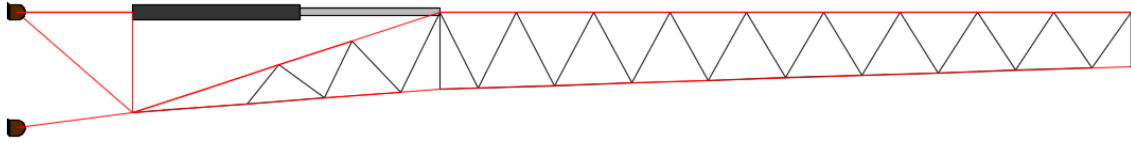


Figura 55: Cordón superior e inferior de la celosía

Para realizar los cálculos, como para todo lo anterior, se realiza una tabla de Excel para realizar todas las iteraciones de forma más rápida.

Las barras más críticas son las barras 9 y 19, con unos datos de partida:

$$\begin{aligned} N_{c,Rd} &= 718.530,7 \text{ N [Compresión]} \\ N_{t,Rd} &= 617.656,7 \text{ N [Tracción]} \\ L_K &= L = 1.500 \text{ mm} \\ L_K(\text{fuera del plano}) &= L = 1.500 \text{ mm} \\ E &= 2,1 \times 10^5 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Se elige una sección (Diámetro x espesor) **150 x 7** $\left\{ \begin{array}{l} A = 3.144,73 \text{ mm}^2 \\ I = 805,8 \times 10^4 \text{ mm}^4 \end{array} \right.$

$$N_{cr} = \left(\frac{\pi}{L_k} \right)^2 \cdot E \cdot I_z = \left(\frac{\pi}{1.500} \right)^2 \cdot 2,1 \times 10^5 \cdot 805,8 \times 10^4 = 7.422.732,08 \text{ N}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{3.144,73 \cdot 275}{7.422.732,08}} = 0,34 < 2 \text{ Cumple}$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{Tubos de chapa} \\ \text{laminados en caliente} \end{array} \right) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{(Figura)} \\ \lambda = 0,34 \\ \text{curva de pandeo - a} \end{array} \right\} \rightarrow \chi = 0,968$$

$$f_{yd} = \frac{275}{1,05} = 261,9 \text{ MPa}$$

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd} = 0,968 \cdot 3.144,73 \cdot 261,9 = 797.263,93 \text{ N} > 718.530,7 \text{ N Cumple}$$

Se comprueba si cumple a tracción:

$$\lambda < 3 \text{ Cumple}$$

$$A \geq \frac{N_{t,Rd}}{f_{yd}} \rightarrow 3.144,73 \geq \frac{617.656,7}{261,9} \rightarrow 3.144,73 \geq 2.358,37 \text{ Cumple}$$

3.8.4.2- DIMENSIONADO BARRAS INTERIORES

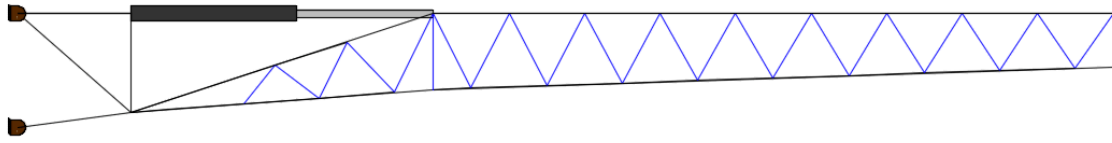


Figura 56: Barras interiores de la celosía

En esta ocasión las barras más críticas son las barras 55 y 56:

$$\begin{aligned}
 N_{c,Rd} &= 87.387,25 \text{ N [Compresión]} \\
 N_{t,Rd} &= 82.902,63 \text{ N [Tracción]} \\
 L_K &= L = 876,7 \text{ mm} \\
 L_K(\text{fuera del plano}) &= L = 876,7 \text{ mm} \\
 E &= 2,1 \times 10^5 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Se elige una sección (Diámetro x espesor) 60×2 $\left\{ \begin{array}{l} A = 364,42 \text{ mm}^2 \\ I = 15,34 \times 10^4 \text{ mm}^4 \end{array} \right.$

$$N_{cr} = \left(\frac{\pi}{L_K} \right)^2 \cdot E \cdot I_z = \left(\frac{\pi}{876,7} \right)^2 \cdot 2,1 \times 10^5 \cdot 15,34 \times 10^4 = 413.658,91 \text{ N}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{364,42 \cdot 275}{413.658,91}} = 0,49 < 2 \text{ Cumple}$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{Tubos de chapa} \\ \text{laminados en caliente} \end{array} \right) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{(Figura)} \\ \lambda = 0,49 \\ \text{curva de pandeo - a} \end{array} \right\} \rightarrow \chi = 0,923$$

$$f_{yd} = \frac{275}{1,05} = 261,9 \text{ MPa}$$

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd} = 0,923 \cdot 364,42 \cdot 261,9 = 88.094,20 \text{ N} > 87.387,25 \text{ N Cumple}$$

Se comprueba si cumple a tracción:

$$\lambda < 3 \text{ Cumple}$$

$$A \geq \frac{N_{t,Rd}}{f_{yd}} \rightarrow 364,42 \geq \frac{82.902,63}{261,9} \rightarrow 364,42 \geq 316,54 \text{ Cumple}$$

3.8.4.3- RESUMEN CELOSÍA

Tras comprobar numéricamente las barras que se necesitan para la celosía éstas han sido las obtenidas:

- Cordon superior e inferior: Barra de sección circular hueca **150 x 7**.
- Barras interiores de celosía: Barra de sección circular hueca **60 x 2**

Pero también conviene comprobar para los dos casos de celosía la fuerza a soportar por el cilindro hidráulico de elevación, ya que en anteriores ocasiones a resultado un dato bastante crítico. Se comprueba la fuerza de compresión para asegurar el correcto funcionamiento del sistema.

Se comprueba pero esta vez añadiendo el peso exacto de la celosía, ya que al dimensionar las barras ahora si se sabe ese dato exacto. Para ello del prontuario se obtiene que el peso de la barra de diámetro 150 es de 24,69 Kg/m y la de diámetro 60 obtiene un peso de 2,86 Kg/m. Una vez se obtiene este dato se utiliza el programa de AutoCAD para sumar los metros que corresponden a cada tipo de barra y tras ello se pasa todo a KN. Se cambia después en el programa de Excel para obtener los valores reales de fuerza que soportará el cilindro y realizar la comprobación. También habrá que realizar la comprobación de la nueva fuerza a soportar por las barras añadiendo ahora el peso de la celosía y su fuerza centrífuga.

Las nuevas fuerzas a soportar por las barras críticas 9 y 19 son:

$$\text{Compresión} = 757.261,5 \text{ N} < 797.263,93 \text{ N}$$

$$\text{Tracción} = 638.832,5 \text{ N} \rightarrow 3.144,73 \geq 2.439,22$$

Ambas fuerzas cumplen con la sección de barra dimensionada. Ahora se comprueba la fuerza del cilindro:

$$\text{Fuerza del cilindro para la celosía a } 83,36^\circ = 3.564,51 \text{ KN}$$

$$\text{Fuerza del cilindro para la celosía a } 45^\circ = 4.125,53 \text{ KN}$$

Con el cilindro hidráulico elegido cumple perfectamente las exigencias de la celosía, pudiendo soportar hasta 5444,76 KN a compresión.

3.8.5- CILINDRO HIDRÁULICO DE LA CELOSÍA

Del programa GIM contando el peso de la celosía se obtiene que el cilindro hidráulico para la inclinación de la celosía deberá soportar una fuerza de tracción de 943,6755 KN, la cual se aleja por muy poco del catálogo de cilindros hidráulicos de Liebherr con una presión de 380 bares. La fuerza máxima que soporta el ultimo cilindro normalizado de la serie soporta una fuerza de 859,54 KN, por lo que habrá que calcular las dimensiones del cilindro hidráulico nuevo con las fórmulas del catálogo y será necesario pedir un cilindro a medida.

La fórmula para calcular las dimensiones del cilindro hidráulico para soportar una fuerza a tracción es:

$$\text{Fuerza a tensión} = (p \cdot (D^2 - d^2) \cdot 0,785) / 10.000 \text{ (KN)}$$

Donde p es la presión de trabajo en bares y D y d el diámetro del pistón y émbolo respectivamente, en mm.

Para una presión de 380 bares, un diámetro de pistón de 240 mm y un diámetro de émbolo de 160 mm, se obtiene que dicho cilindro soportará una fuerza de tracción de 954,56 KN, mayor que la fuerza a soportar en la celosía.

En cuanto a la carrera, el cilindro con la configuración de la celosía a 45° posee una longitud de 4,815 metros y en su configuración inicial una longitud de 4 metros, por lo que la carrera será de 0,815 metros que se redondea a 0,9 metros para que nunca llegue al máximo de su extensión.

Este cilindro nunca trabajará a compresión.

CILINDRO HIDRÁULICO DE LA CELOSÍA	
Presión de trabajo	380 Bares
Carrera	900 mm
Diámetro del pistón	240 mm
Diámetro del émbolo	160 mm
Fuerza de tracción	954,56 KN

Tabla 5: Resumen de las dimensiones del cilindro hidráulico de la celosía

3.8.6- TABLAS DE CARGAS

Para que el operador de la grúa pueda operar en cualquier situación se realiza una tabla de cargas máximas que no podrá sobrepasar la pluma. Para ello se realiza un Excel variando los ángulos de inclinación y la longitud de la pluma y se realiza una aproximación. Se recuerda que el elemento más crítico es el cilindro hidráulico, en base a su capacidad máxima se realiza dicho cuadro de cargas.

ÁNGULO MÁXIMO		
METROS TELESCOPADO	RADIO (m)	CARGA TOTAL (Tn)
19,8	28,81	250
25	36,37	200
26	37,83	150
31,3	45,54	120
36,6	53,25	100
37,5	54,56	90
42,8	62,27	80
48,1	69,98	70
49	71,29	67
54,3	79,00	60
59,6	86,71	53
60,5	88,02	50
65,8	95,73	46
71,1	103,44	40
72	104,75	38

Tabla 13: Cargas máximas para ángulo máximo

60°		
METROS TELESCOPADO	RADIO (m)	CARGA TOTAL (Tn)
19,8	20,73	40
25	26,18	25
26	27,23	23
31,3	32,78	16
36,6	38,33	12
37,5	39,27	12
42,8	44,82	9
48,1	50,37	6
49	51,31	5
54,3	56,86	4
59,6	62,41	2
60,5	63,36	1,5

Tabla 14: Cargas máximas para 60° de inclinación

50°		
METROS TELESCOPADO	RADIO (m)	CARGA TOTAL (Tn)
19,8	17,28	30
25	21,82	18
26	22,69	16
31,3	27,31	10
36,6	31,94	7
37,5	32,72	5
42,8	37,35	2,3
48,1	41,98	1,5
49	42,76	1

Tabla15: Cargas máximas para 50° de inclinación

40°		
METROS TELESCOPADO	RADIO (m)	CARGA TOTAL (Tn)
19,8	13,82	20
25	17,45	12
26	18,15	11
31,3	21,85	6
36,6	25,55	2
37,5	26,18	1

Tabla 16: Cargas máximas para 40° de inclinación

3.8.7- ESTABILIDAD DEL CONJUNTO

En los vehículos grúa la comprobación de la estabilidad es muy importante puesto que tenemos cuatro apoyos pero con las posibilidades que dichos apoyos lleguen a levantarse, con lo que puede dar lugar al vuelco de la misma. Ahora la carga al variar el alcance da lugar a numerosas posibilidades las cuales tienen que ser analizadas. Por tanto las posibilidades de carga analizadas como críticas en los apartados anteriores se deberán estudiar para ver si cumple con los requisitos de estabilidad.

Se puede deducir una aproximación muy simplificada teniendo en cuenta el peso de la pluma como un objeto continuo, el peso de la estructura superior y el peso de la carga, así como sus distancias al eje de rotación. Pero si realizamos un análisis más detallado, considerando cada una de las partes de la grúa se obtienen resultados más aproximados a la realidad.

Es bastante elevado el número de datos requeridos para determinar la condición de estabilidad de un vehículo grúa, es por ello, por lo que para poder determinar correctamente el comportamiento de esta grúa frente a las cargas debe hacerse de análisis exhaustivo.

Asumiendo que conocemos los siguientes datos, vamos a analizar su estabilidad:

- Se conoce el peso del vehículo portante (S_{GC}) y la distancia horizontal de su centro de gravedad al eje de rotación (d_{GC})
- Estructura superior. Se conoce el peso de ésta, incluyendo el contrapeso y la distancia horizontal de su centro de gravedad al eje de rotación.
- Pluma. Se conoce el peso de cada tramo de la pluma (telescópica o en celosía) y las coordenadas de sus centros de gravedad, incluyendo los efectos de los tirantes, que en este caso no existen.
- Plumín. Se conoce el peso de cada tramo del plumín y sus coordenadas al centro de gravedad.

El esquema que se tiene es uno como este, para plumas y plumines (celosía):

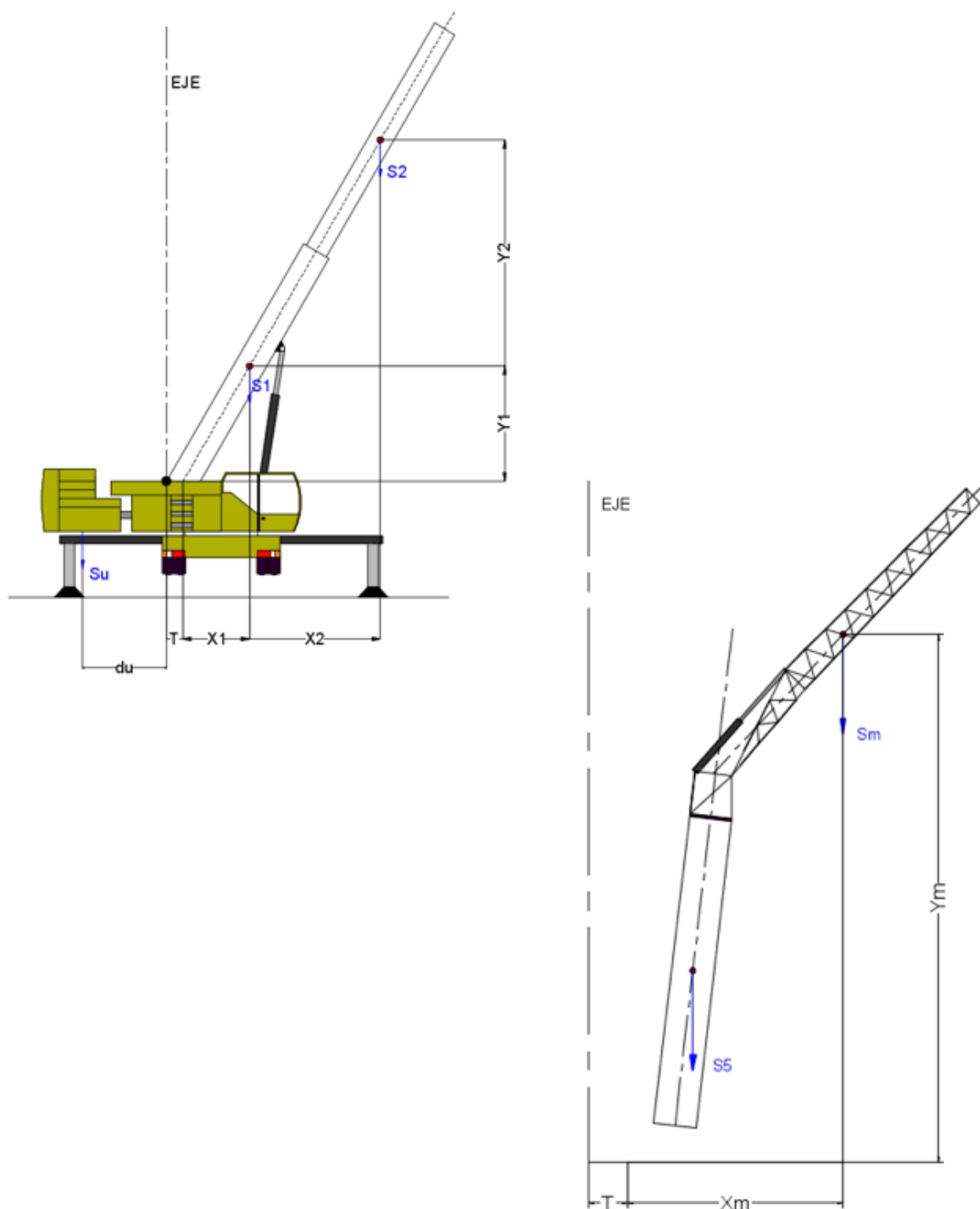


Figura 57: Posición de los centros de gravedad para plumas telescópicas y celosías

Se recuerda que se ha de comprobar la estabilidad para todos los casos estudiados; carga máxima con pluma recogida, pluma totalmente extendida con carga de 25 Tn, pluma extendida con celosía y carga de 10 Tn, y por último, pluma extendida con celosía a 45° del eje y carga de 10 Tn.

3.8.7.1- PLUMA EXTENDIDA CON CARGA DE 25 TN

Normalmente es conveniente transformar las posiciones de los centros de gravedad de plumas, plumines y tramos de plumas, de coordenadas cartesianas a polares:

$$\theta_{\text{TRI}} = \tan^{-1} (y_i / x_i) \quad L_{\text{TRI}} = (y_i^2 + x_i^2) \quad (i = 1, 2, 3 \dots)$$

En este caso en particular, el centro de gravedad (c.d.g) de todos los tramos se encontrará en el eje del mismo ya que la sección de la pluma es una sección rectangular. Esto lleva a que el ángulo θ de todos los tramos será 83,36, y se podría deducir que la L se refiere a la distancia directa entre la base y el c.d.g. La distancia T se refiere a la distancia entre el eje del tramo en su base y el eje de giro como se puede observar mejor en la imagen.

Se realiza una tabla con los datos conocidos, obtenidos del diseño en AutoCAD:

PESOS (KN)	
Carga (25 Tn)	245,25
Tramo fijo	123,27
Tramo 1	60,57
Tramo 2	68,01
Tramo 3	75,45
Tramo 4	82,89
Tramo 5	90,33
Vehículo portante (60 Tn)	588,6
Estructura superior (15 Tn)	147,15
Contrapeso (88 Tn)	863,28

Tabla 17: Resumen de los pesos de la grúa

DISTANCIAS (m)	<i>EJE X</i>	<i>EJE Y</i>
Carga	8,32	71,46
Tramo fijo	0,83	7,14
Tramo 1	7,65	65,75
Tramo 2	6,32	54,32
Tramo 3	4,99	42,90
Tramo 4	3,66	31,48
Tramo 5	2,33	20,05
T	0,52	
Distancia estructura superior y contrapeso a eje de rotación, du.	3,5	

Tabla 18: Resumen de las distancias de los elementos de la grúa

Tras ello, se puede expresar el momento que genera la pluma telescópica alrededor del eje de rotación como:

$$M_{TR1} = \sum_{i=1}^6 S_i [T + L_{TRi} \cos(\theta + \theta_{TRi})]$$

El sumatorio se realiza de 1 a 6 ya que son los 5 tramos de telescopado más el tramo fijo. Como se ha deducido antes no existe el ángulo θ_{TRi} ya que ese se refiere al ángulo que el c.d.g se desvía respecto del que se encuentra en la línea central de la pluma. S es el peso de cada tramo como se puede observar en las imágenes anteriores.

En este apartado $M_{TR} = 2.148,63 \text{ KN.m}$

La parte de la estructura de la grúa que está por encima de la giratoria se puede reemplazar matemáticamente por un momento y una carga vertical. Si se llama S_U al peso de la estructura superior menos los pesos de las plumas y plumines (estructura superior y contrapeso), y si su centro de gravedad está localizado horizontalmente a una distancia d_U (imagen) desde el eje de rotación, entonces el momento de esta estructura superior para el radio de operación R, incluyendo la carga que se está elevando (S_L), es:

$$M_U = M_{TR} + S_L \cdot R - S_U \cdot d_U$$

Y las cargas verticales serán para el caso de la pluma telescópica:

$$V_U = \sum_{i=1}^6 S_i + S_L + S_U$$

Tanto la carga vertical como el momento se supone aplicado en el eje de rotación. En algunas ocasiones se prefiere desligar el peso del contrapeso del peso de la estructura superior, por lo que en ese caso el término $S_U \cdot d_U$ y el término S_U se reemplaza cada uno por dos términos. Se ha decidido tomar este caso para el cálculo de la estabilidad debido a que será más exacto el cálculo. Pero se ha tomado la distancia del centro de gravedad de la estructura superior al eje de rotación como 0, por lo que S_U y d_U se referirán únicamente al peso y distancia de los contrapesos.

Se obtiene un momento y una fuerza de valor:

$$M_U = 1.167,21 \text{ KN.m}$$

$$V_U = 1.756,22 \text{ KN}$$

El estado normal de utilización de un vehículo grúa es con los estabilizadores totalmente desplegados. El vehículo grúa objeto de estudio posee cuatro estabilizadores. No hay razón para asumir que el centroide de los estabilizadores coincida con la proyección del eje de rotación sobre el suelo, aunque algunas grúas se realicen de esta manera. Para el caso que vamos a analizar se supone que dicho eje de rotación está a una distancia X_0 del centroide de

estabilizadores hacia la parte delantera, a lo largo del eje longitudinal como se puede apreciar en la figura:

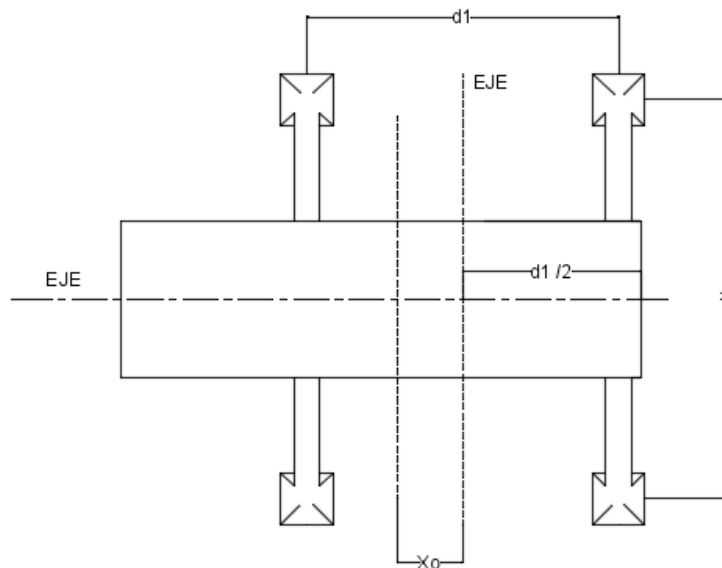


Figura 58: Dimensiones de posicionamiento de los estabilizadores

Se denominará S_{GC} al peso del vehículo y estando localizado su centro de gravedad a una distancia d_{GC} más allá del centroide de los estabilizadores sobre el eje longitudinal. A continuación se muestra una tabla con los valores de las distancias de la imagen:

DISTANCIAS ESTABILIZADORES (m)	
d_1	9,328
d_t	8,294
X_0	0,857
d_{GC}	2,244

Tabla 19: Valores de las distancias de los estabilizadores

El momento neto de todas las fuerzas alrededor del centroide de estabilizadores para operaciones que se realicen sobre la **parte trasera** de la grúa es:

$$M_{nt} = M_U - V_U \cdot X_0 - S_{GC} \cdot d_{GC}$$

$$M_{nt} = -1.658,39 \text{ KN.m}$$

Y para operaciones que se realicen **a un lado de la grúa** es:

$$M_{nl} = M_U = 1.167,21 \text{ KN.m}$$

Además de los momentos, los estabilizadores deben soportar la carga vertical:

$$V = V_U + S_{GC}$$

$$V = 2.344,82 \text{ KN}$$

Tomando como d_l la distancia longitudinal entre los estabilizadores y d_t la distancia transversal entre estabilizadores, como se ve en la figura anterior, para **operaciones sobre la parte trasera de la grúa, cada estabilizador soportará:**

$$P = V/4 \pm (M_{nt} / 2 \cdot d_l)$$

Donde el segundo término de la ecuación anterior se suma para las reacciones de los estabilizadores traseros y se resta para las reacciones de los estabilizadores delanteros.

$$P_{delanteros} = 675,10 \text{ KN}$$

$$P_{traseros} = 497,31 \text{ KN}$$

En caso de estar **realizando operaciones en un lado de la grúa**, la distribución no es uniforme, debido a la excentricidad tanto del peso del vehículo como de los pesos que están elevados. Se llamará P_{dp} a la reacción del estabilizador delantero en el lado de la pluma, y P_{dc} a la reacción del estabilizador delantero en el lado del contrapeso. De la misma manera las reacciones de los estabilizadores traseros en el lado de la pluma y del contrapeso los denominaremos P_{tp} P_{tc} respectivamente. En este caso se obtendrá:

$$P_{dp} = V/4 + (M_{nl} / 2 \cdot d_t) + [(S_{GC} \cdot d_{GC} + V_U \cdot X_0) / 2 \cdot d_l]$$

$$P_{dc} = V/4 - (M_{nl} / 2 \cdot d_t) + [(S_{GC} \cdot d_{GC} + V_U \cdot X_0) / 2 \cdot d_l]$$

$$P_{tp} = V/4 + (M_{nl} / 2 \cdot d_t) + [(S_{GC} \cdot d_{GC} + V_U \cdot X_0) / 2 \cdot d_l]$$

$$P_{tc} = V/4 - (M_{nl} / 2 \cdot d_t) + [(S_{GC} \cdot d_{GC} + V_U \cdot X_0) / 2 \cdot d_l]$$

$$P_{dp} = 808,03 \text{ KN}$$

$$P_{dc} = 667,30 \text{ KN}$$

$$P_{tp} = 808,03 \text{ KN}$$

$$P_{tc} = 667,30 \text{ KN}$$

El modelo por tanto expresa que cada estabilizador soporta un reparto equitativo de la carga vertical, una contribución del momento transversal y una contribución del momento longitudinal. Los valores numéricos de la contribución de cada momento permanecen constantes (para un caso particular de carga, radio de operación y posición de la pluma relativa al eje longitudinal), solo cambian los signos. El mismo tipo de distribución sucede durante el más complejo de los casos de operación, que ocurre cuando **la pluma está a un cierto ángulo del eje longitudinal de la grúa**. Sea α el ángulo horizontal entre la pluma y el eje longitudinal de la grúa medido desde la parte trasera. En este caso:

$$M_{nt} = M_U \cdot \cos \alpha - V_U \cdot X_0 - S_{GC} \cdot d_{GC}$$

$$M_{nl} = M_U \cdot \sin \alpha$$

Se ha comprobado a un ángulo intermedio $\alpha = 45^\circ$:

$$M_{nt} = -2.000,26 \text{ KN.m}$$

$$M_{nl} = 825,35 \text{ KN.m}$$

Donde M_{nt} es la porción del momento neto actuando sobre la parte trasera y M_{nl} es la porción del momento neto actuando sobre el lateral. Cuando estos momentos se distribuyen individualmente a los estabilizadores junto con la carga vertical, las reacciones de los estabilizadores llegan a ser:

$$P_{dp} = V/4 + 1/2 \cdot [(M_{nl} / d_t) - (M_{nt} / d_l)]$$

$$P_{dc} = V/4 - 1/2 \cdot [(M_{nl} / d_t) + (M_{nt} / d_l)]$$

$$P_{tp} = V/4 + 1/2 \cdot [(M_{nl} / d_t) - (M_{nt} / d_l)]$$

$$P_{tc} = V/4 - 1/2 \cdot [(M_{nl} / d_t) + (M_{nt} / d_l)]$$

$$P_{dp} = 743,18 \text{ KN}$$

$$P_{dc} = 643,67 \text{ KN}$$

$$P_{tp} = 743,18 \text{ KN}$$

$$P_{tc} = 643,67 \text{ KN}$$

Las ecuaciones anteriores dan las cargas sobre los estabilizadores para cualquier orientación de la pluma. Al manejar cargas con grandes radios, es usual que el valor que se obtiene al calcular, de una de las reacciones de los estabilizadores sea negativa, esto significa que la grúa se levanta libremente en uno de los estabilizadores, es decir pierde el contacto con el suelo (cuando el número de reacciones negativas en los estabilizadores es dos, significa que la grúa está en proceso de basculamiento, o lo que es lo mismo que puede pivotar y volcar). Por los datos obtenidos se observa que la grúa **cumple para este caso las condiciones de estabilidad**.

Los cálculos para los casos siguientes casos serán los mismos con alguna variación en cada caso que se comentarán a continuación.

3.8.7.2- PLUMA RECOGIDA CON CARGA MÁXIMA

Para calcular la estabilidad en este caso, al no estar la pluma extendida la distancia en desde el centro de rotación de la carga variará, siendo ahora de 1,68 m, así como su peso que en este caso se estará operando con 250 Tn, lo que serán 2.452,5 KN.

Para continuar ya no existen todas las distancias al centro de gravedad de todos los tramos, estando éstos recogidos, pero sí que se deben tener en cuenta sus pesos. Ello es equivalente a que solo exista el tramo fijo pero con el peso total de todos los tramos de la pluma.

En este caso el momento M_{TR} cambia de nombre a M_p . Realizando únicamente los cambios anteriores los datos para este caso son:

$$\begin{aligned}M_p &= 677,11 \text{ KN} \\M_U &= 1.767,49 \text{ KN} \\V_U &= 3.963,47 \text{ KN}\end{aligned}$$

- Operaciones sobre la parte trasera de la grúa:

$$\begin{aligned}M_{nt} &= -2.949,73 \text{ KN.m} \\V &= 4.552,07 \text{ KN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_{delanteros} &= 1.296,13 \text{ KN} \\P_{traseros} &= 979,91 \text{ KN}\end{aligned}$$

- Operaciones a un lado de la grúa:

$$\begin{aligned}M_{nl} &= 1.767,49 \text{ KN.m} \\V &= 4.552,07 \text{ KN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_{dp} &= 1.497,42 \text{ KN} \\P_{dc} &= 1.284,32 \text{ KN} \\P_{tp} &= 1.497,42 \text{ KN} \\P_{tc} &= 1.284,32 \text{ KN}\end{aligned}$$

- Operaciones a un ángulo de 45° del eje longitudinal de la grúa:

$$\begin{aligned}M_{nt} &= -3.467,41 \text{ KN.m} \\M_{nl} &= 1.249,81 \text{ KN.m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_{dp} &= 1.399,22 \text{ KN} \\P_{dc} &= 1.248,53 \text{ KN} \\P_{tp} &= 1.399,22 \text{ KN} \\P_{tc} &= 1.248,53 \text{ KN}\end{aligned}$$

Según los datos se puede deducir que en este caso **cumple** con mayor holgura que en el caso anterior.

3.8.7.3- PLUMA EXTENDIDA CON CELOSÍA Y CARGA DE 10 TN

Al actuar la celosía como una extensión de la pluma, basta con añadir la celosía como si se tratara de otro tramo más. Este tramo tendrá el mismo ángulo y una L un poco más grande ya que L se refiere a la distancia en línea recta desde la base hasta el c.d.g del tramo, en este caso de la celosía. Por supuesto la carga también se encontrará en otras coordenadas y en este caso únicamente se permiten 10 Tn, es decir, 98,1 KN.

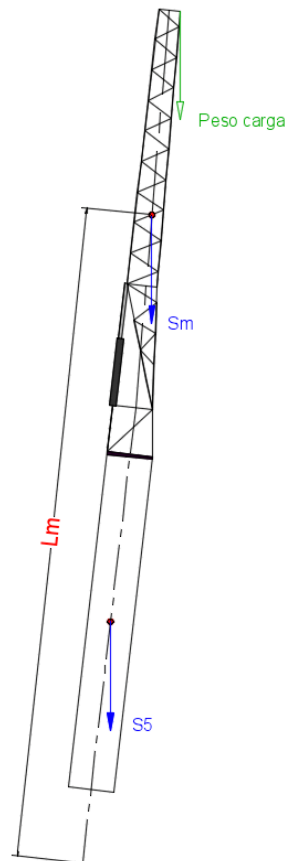


Figura 59: Valor Lm y pesos en configuración de celosía a 83,36°

Llamaremos M_{pm} al nuevo momento añadiendo el plumín/celosía. El nuevo momento se calculará de la misma manera que los anteriores añadiendo los datos de la celosía.

$$M_{pm} = M_p + S_m [T + L_m \cos \theta_m]$$

$$M_{pm} = 2.331,30 \text{ KN.m}$$

$$M_U = 290,33 \text{ KN}$$

$$V_U = 1.609,07 \text{ KN}$$

- Operaciones sobre la parte trasera de la grúa:

$$M_{nt} = -2.409,17 \text{ KN.m}$$

$$V = 2.197,67 \text{ KN}$$

$$P_{\text{delanteros}} = 678,55 \text{ KN}$$

$$P_{\text{traseros}} = 420,28 \text{ KN}$$

- Operaciones a un lado de la grúa:

$$M_{nl} = 290,33 \text{ KN.m}$$

$$V = 2.197,67 \text{ KN}$$

$$P_{dp} = 711,62 \text{ KN}$$

$$P_{dc} = 676,61 \text{ KN}$$

$$P_{tp} = 711,62 \text{ KN}$$

$$P_{tc} = 676,61 \text{ KN}$$

- Operaciones a un ángulo de 45° del eje longitudinal de la grúa:

$$M_{nt} = -2.494,20 \text{ KN.m}$$

$$M_{nl} = 205,29 \text{ KN.m}$$

$$P_{dp} = 695,49 \text{ KN}$$

$$P_{dc} = 670,74 \text{ KN}$$

$$P_{tp} = 695,49 \text{ KN}$$

$$P_{tc} = 670,74 \text{ KN}$$

Al no existir ningún estabilizador en negativo, en este caso la grúa también trabaja de forma estable.

3.8.7.4- PLUMA EXTENDIDA CON CELOSÍA A 45° Y CARGA DE 10 TN

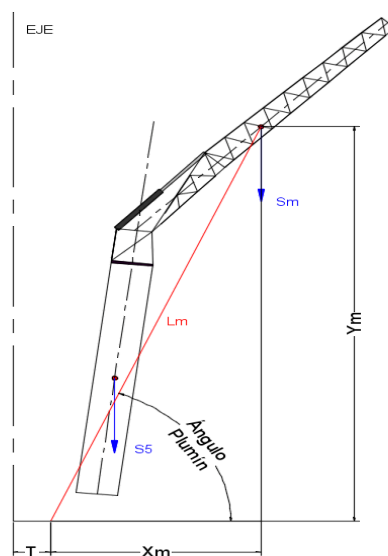


Figura 60: Valores Lm y pesos en configuración de celosía a 45°

El último caso es exactamente idéntico al caso anterior pero al estar la celosía inclinada 45° respecto del eje las coordenadas serán diferentes, obteniéndolas también del AutoCAD.

Los datos obtenidos son los siguientes:

$$M_{pm} = 2.412,37 \text{ KN.m}$$

$$M_U = 1.213,44 \text{ KN}$$

$$V_U = 1.609,07 \text{ KN}$$

- Operaciones sobre la parte trasera de la grúa:

$$M_{nt} = -1.486,06 \text{ KN.m}$$

$$V = 2.197,67 \text{ KN}$$

$$P_{delanteros} = 629,07 \text{ KN}$$

$$P_{traseros} = 469,76 \text{ KN}$$

- Operaciones a un lado de la grúa:

$$M_{nl} = 1.213,44 \text{ KN.m}$$

$$V = 2.197,67 \text{ KN}$$

$$P_{dp} = 767,27 \text{ KN}$$

$$P_{dc} = 620,96 \text{ KN}$$

$$P_{tp} = 767,27 \text{ KN}$$

$$P_{tc} = 620,96 \text{ KN}$$

- Operaciones a un ángulo de 45° del eje longitudinal de la grúa:

$$M_{nt} = -1841,47 \text{ KN.m}$$

$$M_{nl} = 858,03 \text{ KN.m}$$

$$P_{dp} = 699,85 \text{ KN}$$

$$P_{dc} = 596,40 \text{ KN}$$

$$P_{tp} = 699,85 \text{ KN}$$

$$P_{tc} = 596,40 \text{ KN}$$

Para este último caso también se **cumplen** las condiciones de estabilidad de un vehículo grúa.

3.8.8- BULONES

Los bulones (perno, pasador o eje) son piezas cilíndricas que sirven para articular dos piezas. Es una pieza que tiene que soportar muchísimo esfuerzo sobre todo de fuerzas cortantes. Generalmente posee rosca en un extremo y se fija mediante una tuerca. Para la pluma serán necesarios varios bulones: uno para el giro de la pluma de la grúa, dos para el anclaje del cilindro hidráulico de elevación, otros dos para el cilindro de inclinación de la celosía y cuatro para el anclaje de la celosía a la pluma.

Se puede definir las tensiones tangenciales generadas por una fuerza cortante en un perfil cilíndrico con la expresión:

$$\tau = \frac{4}{3} \cdot \frac{V}{A}$$

Para después realizar el estudio estático de ejes en materiales dúctiles donde se utiliza la teoría de la energía de distorsión máxima (Von Mises) para que no ocurra fallo. La ecuación que se debe cumplir en dicha teoría será:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} < \sigma_{yp}$$

Para los bulones se ha optado por el acero F-114 también, el cual para un coeficiente de seguridad de 2 tiene una tensión admisible de 350 MPa (σ_{yp}).

La forma en la que se trabajarán los bulones será obteniendo el diámetro mínimo necesario para soportar las fuerzas cortantes de los diferentes bulones. Para ello, teniendo en cuenta que la tensión σ es nula, y sabiendo la tensión admisible del material, se introduce la fórmula de la tensión tangencial en la ecuación de Von Mises y la única incógnita de la ecuación será el diámetro del área.

$$\sigma_{yp} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{V}{A} \right)^2}$$

3.8.8.1- BULÓN DE ELEVACIÓN DE LA PLUMA

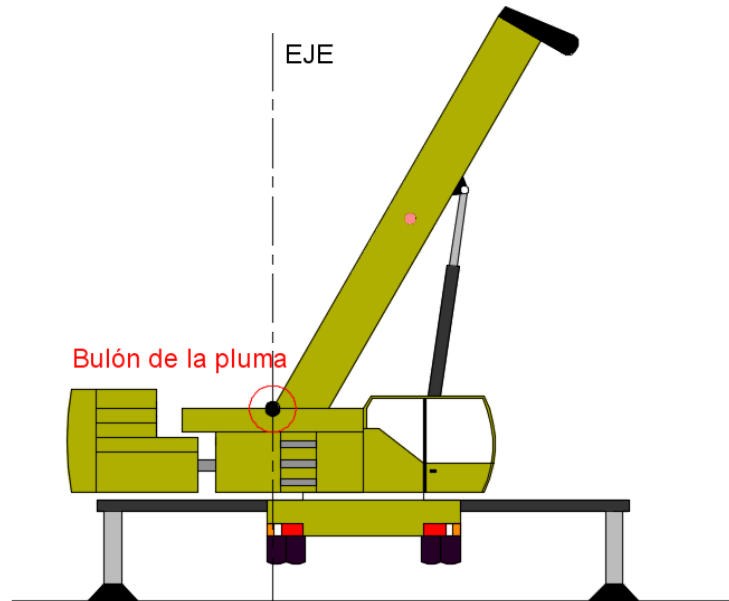


Figura 61: Bulón de elevación de la pluma

La fuerza de compresión que debe soportar este bulón se debe comprobar para las cuatro configuraciones de la pluma. En el Excel realizado previamente se han introducido la fuerza horizontal y vertical de este bulón. Se realiza la resultante para todos los casos y se obtiene que en el caso que más fuerza soporta es para la configuración de la pluma totalmente extendida y 25 tn, teniendo que soportar una fuerza total de 1883,69 KN. Pero la fuerza se divide debido a que al bulón le llegará mitad de la fuerza a un extremo y la mitad al otro extremo. Por tanto la fuerza que se debe comprobar será 941,85 KN (941.850 N).

$$\sqrt{0^2 + 3 \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{941.847}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}}\right)^2} = 350 \text{ MPa}$$

Donde se obtiene un diámetro mínimo $d_{\min} = 88,95 \text{ mm}$. Este es el mínimo necesario para que la sección no falle, pero se redondeará a **89 mm** para que sea una medida exacta.

3.8.8.2- BULÓN DEL CILINDRO HIDRÁULICO DE ELEVACIÓN

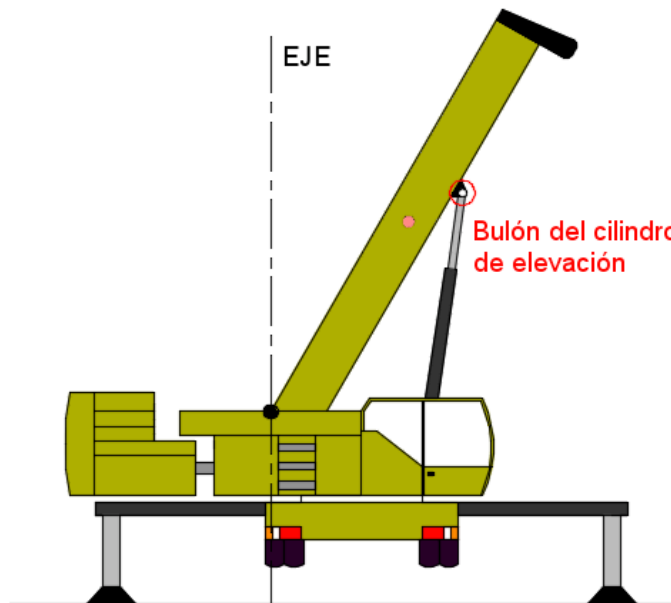


Figura 62: Bulón del cilindro hidráulico de elevación

En este caso la fuerza a soportar por este bulón es la mitad de la fuerza de compresión que tiene que soportar el cilindro hidráulico, es decir, 2.419,90 KN (2.419.900 N).

$$\sqrt{0^2 + 3 \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{2.419.904}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}}\right)^2} = 350 \text{ MPa}$$

Obteniéndose un diámetro mínimo $d_{\min} = 142,58 \text{ mm}$, lo que supondrá establecer un diámetro mínimo de **143 mm**.

3.8.8.3- BULONES DEL CILINDRO HIDRÁULICO DE LA CELOSÍA

Para obtener la fuerza a soportar por estos bulones se obtiene del programa GIM aunque, como en el caso anterior, será la mitad de la fuerza, de tracción en este caso, que soporta el cilindro hidráulico. La fuerza cortante que debe soportar es 471,84 KN (471.840 N)

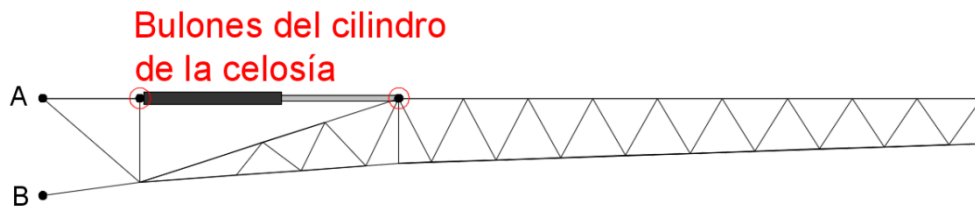


Figura 63: Bulones del cilindro hidráulico de la celosía

$$\sqrt{0^2 + 3 \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{471.838}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}}\right)^2} = 350 \text{ MPa}$$

Para los cuales el diámetro mínimo que deben tener es $d_{\min} = 62,96 \text{ mm}$. Por lo que los bulones serán de un diámetro mínimo de **63 mm**.

3.8.8.4- BULONES DE ANCLAJE DE LA CELOSÍA Y GIRO

Los bulones de anclaje de la celosía son los bulones que debe de colocar el operario de la grúa cuando necesite utilizar la configuración de pluma más celosía. Son cuatro anclajes, dos en un lado y otros dos en el opuesto, pero si los denominamos a los superiores A y a los inferiores B, se necesitarán dos bulones de tipo A y dos de tipo B. La fuerza de los bulones si obtiene del diagrama de sólido libre que aporta el programa GIM.

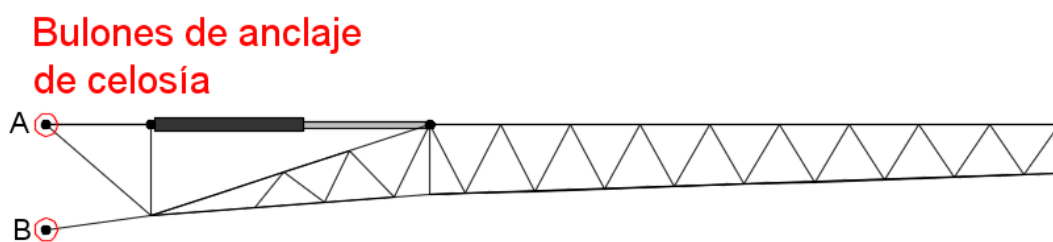


Figura 46: Bulones de anclaje de la celosía

Introduciendo la celosía en el programa, éste calcula que las fuerzas a la que serán sometidos los bulones son:

Bulones A: 655,35 KN → 327,68 KN (327.680 N)

Bulones B: 776,43 KN → 388,22 KN (388.220 N)

Una vez se saben las fuerzas se pasa a obtener las dimensiones de ambos bulones. Por lo tanto para los bulones del tipo A se obtiene un diámetro de:

$$\sqrt{0^2 + 3 \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{327.676}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}}\right)^2} = 350 \text{ MPa}$$

$$d_{\min} = 52,47 \text{ mm} \rightarrow d_{\min} = 53 \text{ mm.}$$

Así como para los bulones de tipo B para los que se obtiene un diámetro de:

$$\sqrt{0^2 + 3 \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{388.217}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}}\right)^2} = 350 \text{ MPa}$$

$$d_{\min} = 57,11 \text{ mm} \rightarrow d_{\min} = 58 \text{ mm.}$$

El bulón de giro tendrá la misma fuerza que este bulón, por lo que se elegirá del mismo diámetro aunque éste será roscado con una tuerca en el lado opuesto.

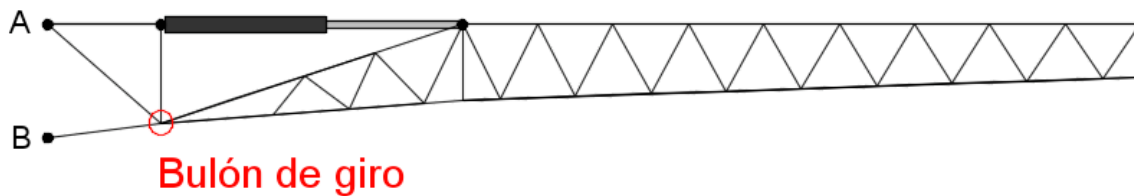


Figura 65: Bulón de giro

3.8.8.5- RESUMEN DE LOS BULONES

Se muestra una tabla con el resumen de los diámetros de todos los bulones anteriormente calculados:

DIÁMETRO DE LOS BULONES	
Bulón de elevación de pluma	89 mm
Bulón del cilindro hidráulico de la pluma	143 mm
Bulones del cilindro hidráulico de la celosía	63 mm
Bulones de anclaje de la celosía tipo A	53 mm
Bulones de anclaje de la celosía tipo B	58 mm
Bulón de giro	58 mm

Tabla 20: Resumen de los diámetros de los bulones

3.8.8.6- TUERCAS KM

Los diámetros de los bulones obtenidos en el apartado anterior hacen referencia al diámetro mínimo que deben tener para asegurar las condiciones de fuerzas y momentos a los que se ven sometidos. Algunos irán fijados mediante un pasador, y los más críticos se fijarán mediante tuercas. Los bulones que se fijarán mediante tuercas serán el bulón del cilindro hidráulico de elevación, el bulón del cilindro de la celosía, el bulón de giro y el bulón de anclaje de la pluma. Para éstos habrá que ajustarse también a las métricas de las tuercas seleccionadas, ya que éstas serán normalizadas.

Para este tipo de bulones las tuercas más utilizadas son las llamadas tuercas de bloqueo KM.

Se obtiene el catálogo de tuercas KM que se ajustan a los diámetros de los bulones necesarios.

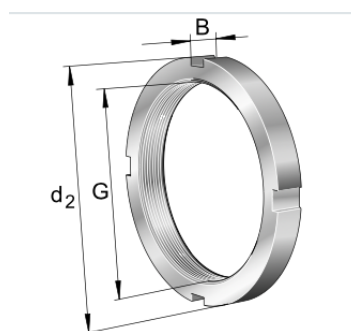


Figura 66: Tuerca KM

	G	d ₂ mm	B mm
KM0	M10x0,75	18	4
KM1	M12x1	22	4
KM2	M15x1	25	5
KM3	M17x1	28	5
KM4	M20x1	32	6
KM5	M25x1,5	38	7
KM6	M30x1,5	45	7
KM7	M35x1,5	52	8
KM8	M40x1,5	58	9
KM9	M45x1,5	65	10
KM10	M50x1,5	70	11
KM11	M55x2	75	11
KM12	M60x2	80	11
KM13	M65x2	85	12
KM18	M90x2	120	16
KM29	M145x2	190	24

Figura 67: Catálogo de tuercas KM

A la vista del catálogo los diámetros de los bulones finales serán:

DIÁMETRO DE LOS BULONES ROSCADOS	
Bulón de elevación de pluma	90 mm
Bulón del cilindro hidráulico de la pluma	145 mm
Bulones del cilindro hidráulico de la celosía	65 mm
Bulón de giro	60 mm

Tabla 21: Resumen de los diámetros de los bulones roscados

3.8.9- SOLDADURAS

Para colocar el cilindro hidráulico de elevación en la pluma, y que la unión sea mediante bulones, se diseña una pieza como la de la figura, la cual soportará las fuerzas de la pluma y las transmitirá al cilindro. La pieza deberá ir rígidamente unida a la pluma y para conseguirlo se realizará una unión mediante soldadura.

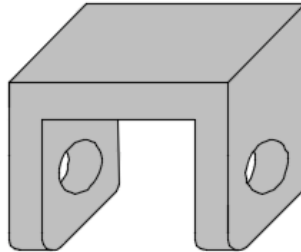


Figura 68: Pieza de unión pluma-cilindro

Las dimensiones de la pieza dependerán de las dimensiones de los cordones de soldadura, que deben soportar las fuerzas a las que serán sometidos. Se deberá realizar el estudio de los cordones de soldadura con las fuerzas correspondientes.

Antes de comenzar el estudio cabe destacar que el estudio se realizará de acuerdo con el Código Técnico de Seguridad Estructural del Acero (SE-A). Los cordones de soldadura se realizan con acero S275JR. El código técnico indica las siguientes fórmulas a cumplir para una soldadura en ángulo.

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}$$

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

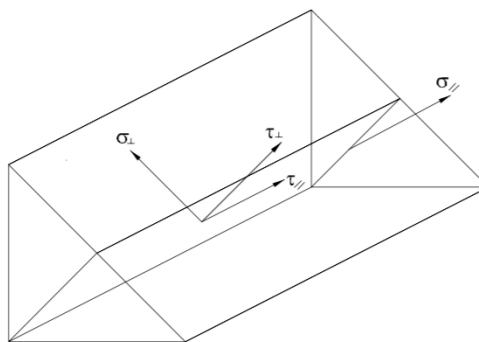


Figura 69: Representación de tensiones para soldaduras en ángulo

Se comienza por tanto obteniendo las fuerzas que afectan al elemento de unión. Al estar trabajando en ángulo se deberán descomponer las fuerzas para situarlas en los ejes que más convienen para su estudio.

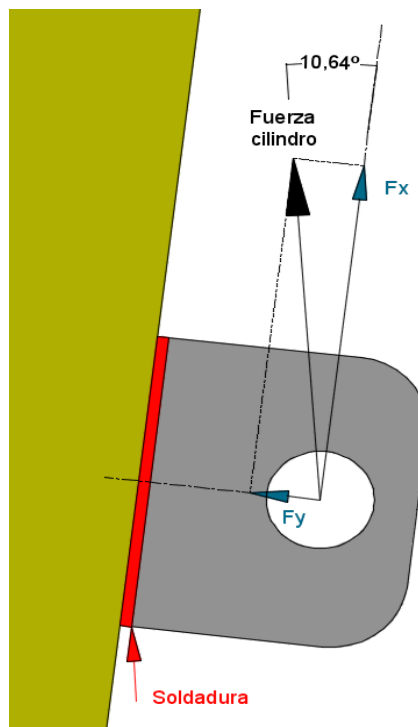


Figura 70: Descomposición de fuerzas para las soldaduras

La fuerza del cilindro se deberá dividir entre dos ya que como se ve la pieza está formada por dos orejas y cada una de ellas soportará la mitad de la fuerza, así como habrá una soldadura a cada lado. Tras obtener las fuerzas se estudia la sección más desfavorable, que debido a el sentido de las fuerzas será la sección inferior ya que lo más desfavorable para la soldadura es realizar la fuerza de manera de intentar soltarla.

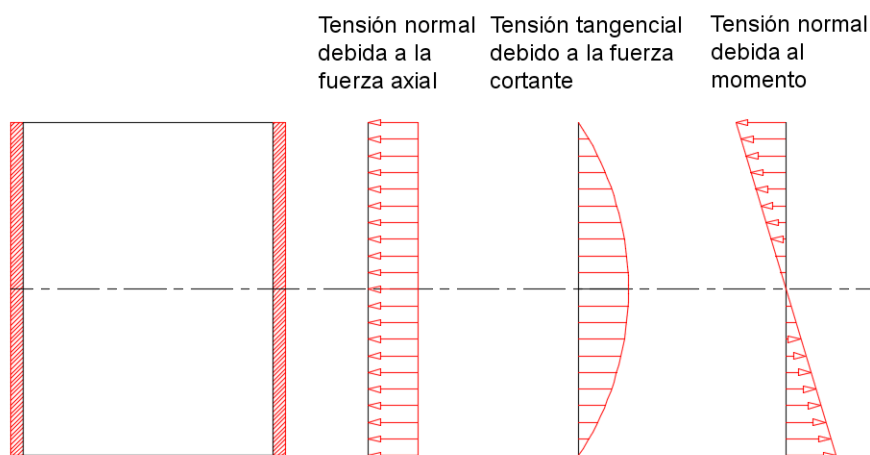


Figura 71: Tensiones en las soldaduras

En la figura se observa cómo la sección más crítica es la sección inferior por lo anteriormente descrito. En la sección superior las fuerzas actúan de manera favorable a la separación de la pieza y la pluma. Las fuerzas descompuestas se calculan de la siguiente manera:

$$F_x = F_c/2 \cdot \cos(10,64^\circ)$$

$$F_y = F_c/2 \cdot \sin(10,64^\circ)$$

Y se deberá calcular el momento de la sección inferior multiplicando la fuerza en el eje X (F_x) por la distancia desde ésta hasta la soldadura. La distancia según las medidas decididas es de 241,6 mm. Se muestran las medidas decididas para la pieza.

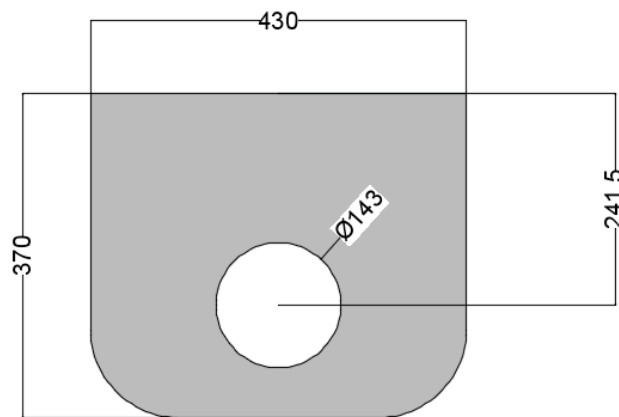


Figura 72: Dimensiones de la pieza de unión pluma-cilindro

Una vez se dispone de todas las fuerzas y momentos actuantes en la soldadura se pasa a obtener las tensiones necesarias para la aplicación de la fórmula que muestra el código técnico. Para ello se deberán de descomponer las fuerzas y momentos obtenidos para situarlos en el plano de la soldadura.

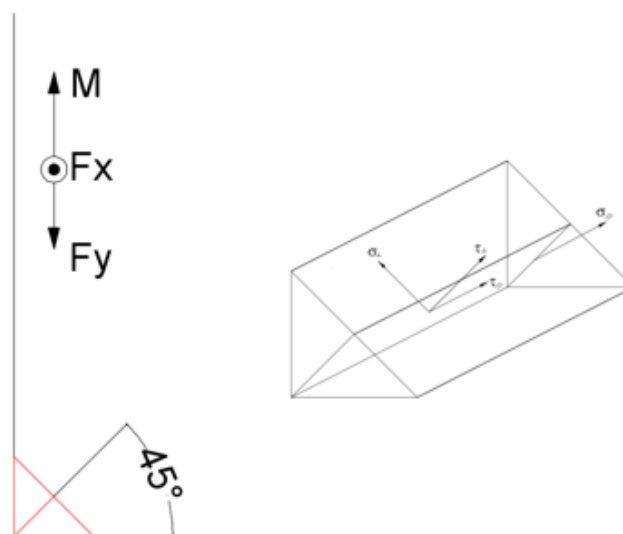


Figura 73: Descomposición de fuerzas al plano de la soldadura

Siendo:

- σ_{\perp} tensión normal perpendicular al plano de la garganta;
- $\sigma_{//}$ tensión normal paralela al eje del cordón. No actúa en el plano de comprobación ni se tiene en cuenta en las comprobaciones a realizar;
- τ_{\perp} tensión tangencial (en el plano de la garganta) perpendicular al eje del cordón;
- $\tau_{//}$ tensión tangencial (en el plano de la garganta) paralelo al eje del cordón.

Por último, se obtienen las tensiones mediante las fórmulas de resistencia de materiales y se comprueba si se cumplen las condiciones favorablemente.

$$\sigma_{\text{perpendicular}} = \left(\frac{M \cdot y}{Ix} - \frac{Fy}{A} \right) \cos(45^{\circ})$$

Donde I_x se refiere al momento de inercia de la soldadura según el plano de la **figura**. Ese plano se denomina plano de la garganta. El área se refiere también al área de la soldadura. Las medidas para la comprobación son:

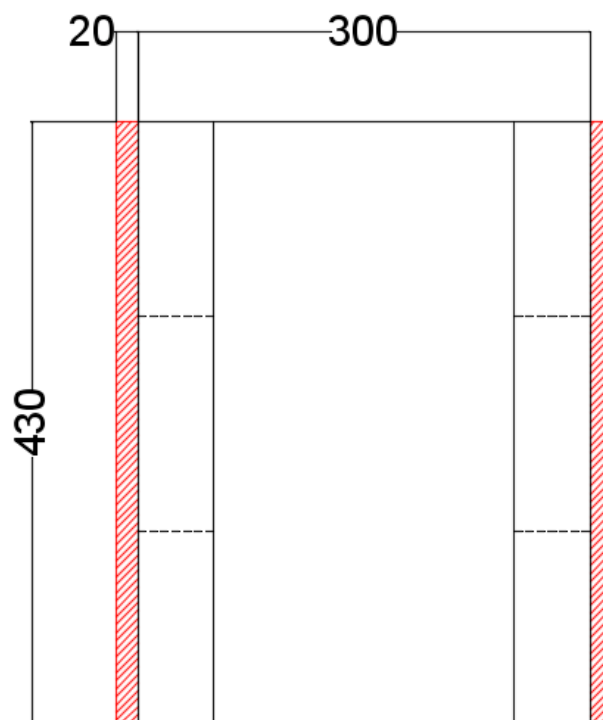


Figura 74: Dimensiones de las soldaduras

$$\tau_{\text{perpendicular}} = \left(\frac{M \cdot y}{Ix} - \frac{Fy}{A} \right) \cdot \text{sen}(45^\circ)$$

$$\tau_{\text{paralela}} = \frac{Fy}{A}$$

Para terminar con la comprobación se obtienen los datos restantes, los cuales son:

β_w = coeficiente de correlación para el acero elegido (0,85).

γ_{M2} = coeficiente de seguridad relativo a la resistencia última del material y a la resistencia de los medios de unión (1,25).

f_u = Tensión de rotura del material (430 N/mm²)

Acero	f_u (N/mm ²)	β_w
S 235	360	0,80
S 275	430	0,85
S 355	510	0,90

$\gamma_{M0} = 1,05$	coeficiente parcial de seguridad relativo a la plastificación del material
$\gamma_{M1} = 1,05$	coeficiente parcial de seguridad relativo a los fenómenos de inestabilidad
$\gamma_{M2} = 1,25$	coeficiente parcial de seguridad relativo a la resistencia última del material o sección, y a la resistencia de los medios de unión
$\gamma_{M3} = 1,1$	coeficiente parcial para la resistencia al deslizamiento de uniones con tornillos pretensados en Estado Límite de Servicio.
$\gamma_{M3} = 1,25$	coeficiente parcial para la resistencia al deslizamiento de uniones con tornillos pretensados en Estado Límite de Último.
$\gamma_{M3} = 1,4$	coeficiente parcial para la resistencia al deslizamiento de uniones con tornillos pretensados y agujeros rasgados o con sobremedida.

Figura 75: Tensión de rotura, coeficiente de correlación y coeficiente parcial para las soldaduras

En la comprobación de las soldaduras se obtiene que:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad \rightarrow \quad 400,4 < 404,7$$

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \quad \rightarrow \quad 54,78 < 344$$

Se verifica por tanto que las soldaduras cumplen con las sollicitaciones de fuerza a la que son sometidas.

3.8.10- DIMENSIONADO DEL GANCHO

El dimensionado del gancho se realiza según normativa. Los ganchos corresponden a las normas DIN 15401 y 15402 y se construyen en acero forjado de calidad AS-t 52 (clase P, la norma DIN 15400).

En la siguiente tabla tomaremos el valor de 250. El dato se refiere a la carga a soportar en daN/1000. La carga a soportar son 250 tn, 250.000 daN.

Dicho gancho tiene un peso de 6850 kg, o 6850 daN. Las demás unidades de la tabla se muestran en la siguiente figura.

Gancho N.º (1)	a ₁	a ₂ E	a ₂ D	b ₁	b ₃	b ₄	c	d ₃	d ₅ h _g	d ₆	s	u ₁	u ₃	v	Rodam.	Peso (Kg.)	Referencia
2,5	63	50	40	80	22,5	17	8	M 36	30	19	10	64		170	51108	9	001.2,5
4	71	56	45	90	25	19	8	M 42	35	23	12	71		190	51110	14	001.4
5	80	63	50	100	27,5	22	8	M 45	40	27	15	80		210	51112	20	001.5
6	90	71	56	125	30	24	10	Rd 50	45	32	15	95	95	240	51214	29	001.6
8	100	80	63	140	35	29	10	Rd 56	50	36	20	104	104	265	51216	40	001.8
10	112	90	71	160	35	29	10	Rd 64	55	40	20	110	116	280	51218	57	001.10
12	125	100	80	180	42,5	34	10	Rd 72	60	42	25	127	133	315	51220	85	001.12
16	140	112	90	190	42,5	36	12	Rd 80	70	50	25	136	143	370	51222	110	001.16
20	160	125	100	200	47,5	41	12	Rd 90	80	56	30	150	157	415	51224	160	001.20
25	180	140	112	220	49	41	12	Rd 100	90	64	30	166	173	460	51226	228	001.25
32	200	160	125	260	59	51	12	Rd 110	100	72	40	188	195	500	51232	312	001.32
40	224	180	140	285	65	58	14	Rd 125	110	80	45	208	215	565	51236	445	001.40
50	250	200	160	335	65	58	14	Rd 140	125	92	45	224	232	620	51244	612	001.50
63	280	224	180	380	71	63	14	Rd 160	140	104	50	260	267	700	51248	870	001.63
80	315	250	200	420	72,5	63	14	Rd 180	160	120	50	287	294	800	51256	1230	001.80
100	355	280	224	470	87,5	77	18	Rd 200	180	136	60	326	333	885	51260	1750	001.100
125	400	315	250	510	87,5	77	18	Rd 225	200	150	60	365	374	1000	51268	2520	001.125
160	450	355	280	550	100	87	18	Rd 250	220	164	70	406	416	1130	51272	3580	001.160
200	500	400	315	610	100	87	18	Rd 280	240	184	70	492	502	1270	51372	4850	001.200
250	560	450	355	700	110	97	18	Rd 320	260	200	80	552	562	1440	51384	6850	001.250

Figura 76: Ganchos según el peso a soportar

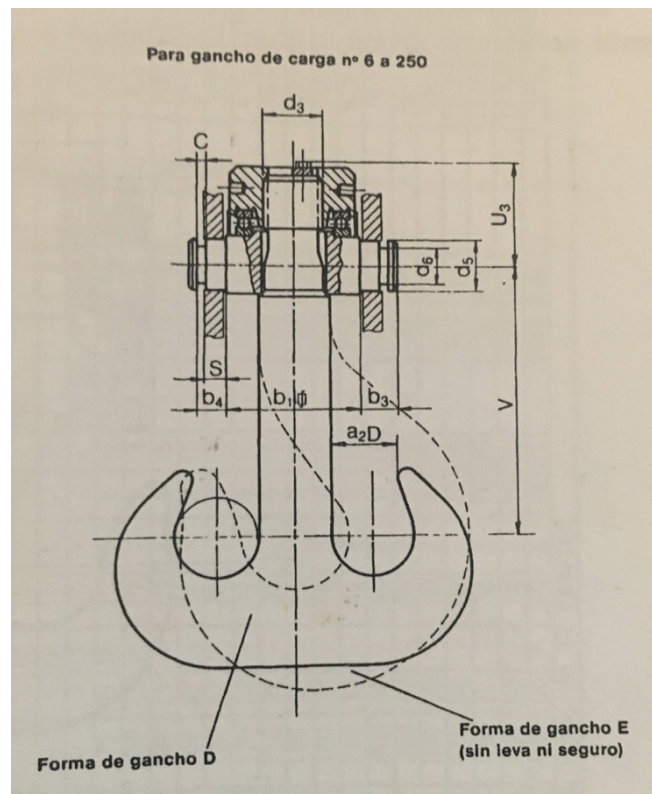


Figura 77: Tipo de gancho elegido

3.8.11- DIMENSIONADO DEL RODAMIENTO DE GIRO

Este tipo de grúas utiliza un rodamiento especial para efectuar el giro de 360° de la pluma. Dicho rodamiento recibe el nombre de rodamiento ROTHE ERDE y están normalizados. Para saber qué rodamiento se ha de elegir lo único que se debe de conocer es el momento total que tendrá que soportar y la fuerza axial. Para ello se realiza un cálculo con los contrapesos (88 toneladas), el peso de todos los tramos de la grúa (dato conocido) y la carga que soporta (dato conocido). Se realiza el cálculo para el caso más crítico, que en este caso particular es para el caso de carga máxima, 250 toneladas. Los radios para obtener los momentos son todos conocidos.

Radio de carga máxima: 2,20 m

Radio del c.d.g de la pluma: 1,1 m

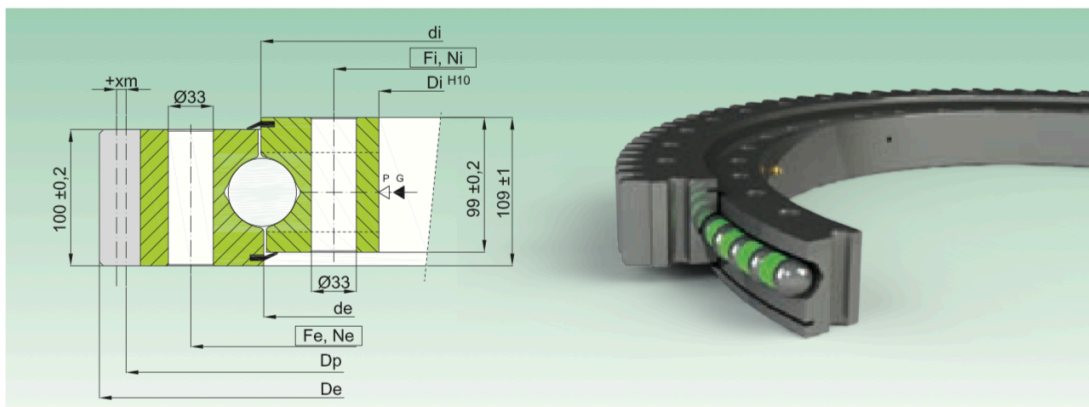
Radio de los contrapesos: 3,5 m

Del cálculo se obtiene que el rodamiento soporta un momento de 2.370 KN.m y una fuerza axial de 3.300 KN

EB1.50 S

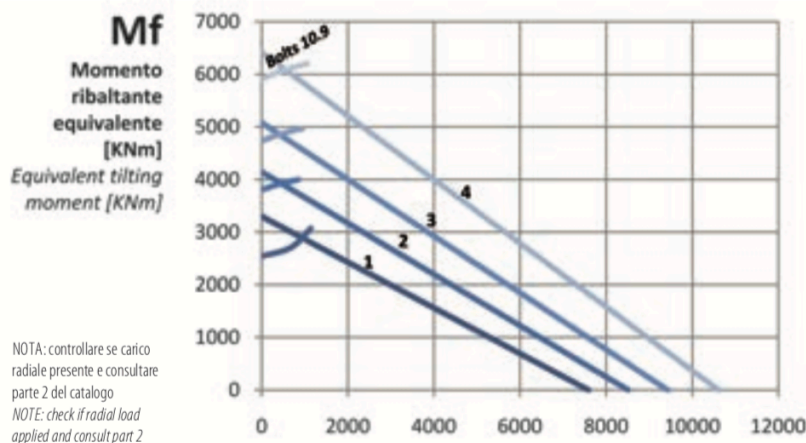
SERIE STANDARD

STANDARD SERIES



Codice Code	Curva Curve	Dimensioni Dimensions				Fori di fissaggio Fixing Holes				Dentatura Gear data				Peso Weight [kg]		
		De [mm]	de [mm]	di [mm]	Di [mm]	Fe [mm]	Ne [-]	Fi [mm]	Ni [-]	m [mm]	Z [-]	xm [mm]	Dp [mm]		fz norm [kN]	fz max [kN]
EB1.50.1900.401-1SPPN	1	2139,2	1898	1902	1729	2005	36	1795	36	14	150	+7	2100	128,5	257	820
EB1.50.2130.401-1SPPN	2	2380,8	2128	2132	1959	2235	48	2025	48	16	146	+8	2336	146,8	293,6	931
EB1.50.2355.401-1SPPN	3	2604,8	2353	2357	2184	2460	54	2250	54	16	160	+8	2560	146,8	293,6	1024
EB1.50.2645.401-1SPPN	4	2892,8	2643	2647	2474	2750	60	2540	60	16	178	+8	2848	146,8	293,6	1142

- Materiale: C45Q+T
- Gioco assiale riportato sul disegno tecnico
- Pieni di grasso, protetti da olio, e avvolti in resistente film plastico
- ▷ P=tappo inserimento sfere / filling plug ▶ G= ingrassatori / greasers
- Material C45 Q+T
- Axial/radial clearances are on the technical drawing
- Full of grease, protected by oil and wrapped in resistant plastic film



NOTA: controllare se carico radiale presente e consultare parte 2 del catalogo
 NOTE: check if radial load applied and consult part 2 of the catalogue

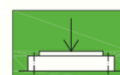
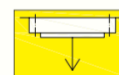


Diagramma di carico statico valido per sforzi compressivi
 Static load charts valid for compressive loads



Carico sospeso: occorre verifica specifica della bulloneria
 Suspended load: specific bolts calculation required

Figura 78: Rodamiento ROTHE ERDE

Estimación pluma TRAMO 2											
Largo (m) TRAMO 2	11,5		Momento de inercia IZ total // IY (cm ⁴)	216831,75	118832,75						
Alto (m)	0,77	38,5	Momento de inercia IZ - espesor // IY (cm ⁴)	152121,75	78485,75						
Ancho (m)	0,57	28,5	Momento de inercia IZ // IY (cm ⁴)	64790	66470						
Espesor (m)	0,03		Área pluma (cm ²)	768							
Altura pluma	72										
Superficie LATERAL pluma (m ²) Para C _d	8,855	b (alto)/c (ancho)	1,350877138	f (largo)/b (alto)	14,93505494						
Volumen pluma (m ³)	0,8852										
l _p pluma (Kg·m ³)	325412,392										
Masa pluma (Kg) / Peso (KN)	6933,12	68,0139072									
Masa pluma (Kg)	6,933										
Radio C.D.G pluma Tramo 2 (m)	6,85597970										
F _p pluma (N) / (KN)	373,0536414	0,373053641									
F _r pluma (N) / (KN)	170,9951935	1,709951935									
α _{pl} pluma (N.m) / (KN.m)	2555,78235	2,55578235	V _{max} (Kg)		Q _{max} (KN)						
Q viento en la pluma (Kg) / (KN)	380,4772125	3,732461455	1674,099735		16,4229184						
CON Cs = 1,5 (SIN VIENTO)					CON Cs = 1,33 (CON VIENTO)						
Q _u - M - Cs + plu	122,425033				Q _u - M - Cs + plu	108,5501959					
Q _w - M - Cs +					Q _w - M - Cs +						
Q _l - M - Cs + 3 inercia plu	0,67140515				Q _l - M - Cs + 3 inercia plu	0,505393612					
Q _l - M - Cs + 3 centrifugas plu	0,307791348				Q _l - M - Cs + 3 centrifugas plu	0,272598239					
Distr. Peso plu	10,64565004				Distr. Peso plu	9,439147469					
Distribuidas (KN/m)					Distr. Viento plu	0,431689994					
Tramo celsosa			Tramo extensible			Tramo celsosa			Tramo extensible		
EXTREMO SUPERIOR			EXTREMO SUPERIOR			EXTREMO SUPERIOR			EXTREMO SUPERIOR		
ZF Horizontales punta	ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes X-Y	ZF Horizontales punta	ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes X-Y	ZF Horizontales punta	ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes X-Y
2,766521495	629,346795	783,4128974		2,766521495	629,346795	783,4128974		2,766521495	629,346795	783,4128974	
ZF Horizontales punta	ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes Y-Z	ZF Horizontales punta	ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes Y-Z	ZF Horizontales punta	ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes Y-Z
3,840862036	0	40,06379442		3,840862036	0	40,06379442		3,840862036	0	40,06379442	
EXTREMO INFERIOR			EXTREMO INFERIOR			EXTREMO INFERIOR			EXTREMO INFERIOR		
FUERZAS X	FUERZAS Y	M. 2Fuerzas	M. Fuerzas Tramo 1	Z	FUERZAS X	FUERZAS Y	M. 2Fuerzas	M. Fuerzas Tramo 1	Z	FUERZAS X	FUERZAS Y
2,068312023	752,3708279	1724,355315	1724,355315	1724,355315	2,068312023	752,3708279	1724,355315	1724,355315	1724,355315	2,068312023	752,3708279
FUERZAS X	FUERZAS Y	M. 2Fuerzas	M. Fuerzas Tramo 1	(Y)	FUERZAS X	FUERZAS Y	M. 2Fuerzas	M. Fuerzas Tramo 1	(Y)	FUERZAS X	FUERZAS Y
4,51235859	0	44,16991341	3,861105189	88,09481302	4,51235859	0	44,16991341	3,861105189	88,09481302	4,51235859	0
M.FLECTOR Z			M.FLECTOR Z			M.FLECTOR Z			M.FLECTOR Z		
		o2						o2			
		1724,355315						1611,503334			
		M.FLECTOR Y						M.FLECTOR Y			
		oY						oY			
		88,09481302						669,2258816			
		ANAL						ANAL			
		747,0849765						692,310155			
		TOTAL						TOTAL			
		28,02882358						124,089849			

Estimación pluma TRAMO 3											
Largo (m) TRAMO 3	11,5		Momento de inercia IZ total // IY (cm ⁴)	3161088	1835008						
Alto (m)	0,84	42	Momento de inercia IZ - espesor // IY (cm ⁴)	223668	126228						
Ancho (m)	0,64	32	Momento de inercia IZ // IY (cm ⁴)	967420	566780						
Espesor (m)	0,03		Área pluma (cm ²)	851							
Altura pluma	72										
Superficie LATERAL pluma (m ²) Para C _d	9,978	b (alto)/c (ancho)	1,3125	f (largo)/b (alto)	13,69047619						
Volumen pluma (m ³)	0,978										
l _p pluma (Kg·m ³)	23448,3361										
Masa pluma (Kg) / Peso (KN)	7691,43	75,4520283									
Masa pluma (Kg)	7,691										
Radio C.D.G pluma Tramo 3 (m)	5,5215										
F _p pluma (N) / (KN)	333,5447043	0,333544704									
F _r pluma (N) / (KN)	152,8856307	1,528856307									
α _{pl} pluma (N.m) / (KN.m)	1841,667085	1,841667085	V _{max} (Kg)		Q _{max} (KN)						
Q viento en la pluma (Kg) / (KN)	407,27043	3,995322958	1793,969892		17,93942084						
CON Cs = 1,5 (SIN VIENTO)					CON Cs = 1,33 (CON VIENTO)						
Q _u - M - Cs + plu	135,8152709				Q _u - M - Cs + plu	120,4228736					
Q _w - M - Cs +					Q _w - M - Cs +						
Q _l - M - Cs + 3 inercia plu	0,600380468				Q _l - M - Cs + 3 inercia plu	0,532373748					
Q _l - M - Cs + 3 centrifugas plu	0,27519435				Q _l - M - Cs + 3 centrifugas plu	0,244005467					
Distr. Peso plu	11,81002356				Distr. Peso plu	10,47155422					
Distribuidas (KN/m)					Distr. Viento plu	0,462067791					
Tramo celsosa			Tramo extensible			Tramo celsosa			Tramo extensible		
EXTREMO SUPERIOR			EXTREMO SUPERIOR			EXTREMO SUPERIOR			EXTREMO SUPERIOR		
ZF Horizontales punta	ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes X-Y	ZF Horizontales punta	ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes X-Y	ZF Horizontales punta	ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes X-Y
2,088312023	572,3708279	1724,355315		2,088312023	572,3708279	1724,355315		2,088312023	572,3708279	1724,355315	
ZF Horizontales punta	ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes Y-Z	ZF Horizontales punta	ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes Y-Z	ZF Horizontales punta	ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes Y-Z
4,51235859	0	88,09481302		4,51235859	0	88,09481302		4,51235859	0	88,09481302	
EXTREMO INFERIOR			EXTREMO INFERIOR			EXTREMO INFERIOR			EXTREMO INFERIOR		
FUERZAS X	FUERZAS Y	M. 2Fuerzas	M. Fuerzas Tramo 1	Z	FUERZAS X	FUERZAS Y	M. 2Fuerzas	M. Fuerzas Tramo 1	Z	FUERZAS X	FUERZAS Y
5,112739058	883,1806989	1005,030825	91,87280991	2840,20222	5,112739058	883,1806989	1005,030825	91,87280991	2840,20222	5,112739058	883,1806989
FUERZAS X	FUERZAS Y	M. 2Fuerzas	M. Fuerzas Tramo 1	(Y)	FUERZAS X	FUERZAS Y	M. 2Fuerzas	M. Fuerzas Tramo 1	(Y)	FUERZAS X	FUERZAS Y
5,112739058	0	51,89212379	3,452187689	143,491245	5,112739058	0	51,89212379	3,452187689	143,491245	5,112739058	0
M.FLECTOR Z			M.FLECTOR Z			M.FLECTOR Z			M.FLECTOR Z		
		o2						o2			
		2840,20222						2642,279695			
		M.FLECTOR Y						M.FLECTOR Y			
		oY						oY			
		143,491245						1100,501168			
		ANAL						ANAL			
		881,974126						811,973055			
		TOTAL						TOTAL			
		189,273804						180,5417104			

Estimación pluma TRAMO 4											
Largo (m) TRAMO 4	11,5		Momento de inercia IZ total // IY (cm ⁴)	445828,417	2714158,417						
Alto (m)	0,91	45,5	Momento de inercia IZ - espesor // IY (cm ⁴)	332650,417	1945260,417						
Ancho (m)	0,71	35,5	Momento de inercia IZ // IY (cm ⁴)	1193118	788896						
Espesor (m)	0,03		Área pluma (cm ²)	936							
Altura pluma	72										
Superficie LATERAL pluma (m ²) Para C _d	10,465	b (alto)/c (ancho)	1,281690141	f (largo)/b (alto)	12,63782654						
Volumen pluma (m ³)	1,0764										
l _p pluma (Kg·m ³)	148487,5651										
Masa pluma (Kg) / Peso (KN)	8449,74	82,8919494									
Masa pluma (Kg)	8,450										
Radio C.D.G pluma Tramo 4 (m)	4,19200231										
F _p pluma (N) / (KN)	278,1996614	0,278199661									
F _r pluma (N) / (KN)	127,5173317	1,275173317									
α _{pl} pluma (N.m) / (KN.m)	1166,218609	1,166218609	V _{max} (Kg)		Q _{max} (KN)						
Q viento en la pluma (Kg) / (KN)	434,0725025	4,258251225	1906,919011		18,7363055						
CON Cs = 1,5 (SIN VIENTO)					CON Cs = 1,33 (CON VIENTO)						
Q _u - M - Cs + plu	149,2055089				Q _u - M - Cs + plu	132,2955512					
Q _w - M - Cs +					Q _w - M - Cs +						
Q _l - M - Cs + 3 inercia plu	0,500759391				Q _l - M - Cs + 3 inercia plu	0,44400666					
Q _l - M - Cs + 3 centrifugas plu	0,229531197				Q _l - M - Cs + 3 centrifugas plu	0,203517651					
Distr. Peso plu	12,97439208				Distr. Peso plu	11,0396098					
Distribuidas (KN/m)					Distr. Viento plu	0,492476014					
Tramo celsosa			Tramo extensible			Tramo celsosa			Tramo extensible		
EXTREMO SUPERIOR			EXTREMO SUPERIOR			EXTREMO SUPERIOR			EXTREMO SUPERIOR		
ZF Horizontales punta	ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes X-Y	ZF Horizontales punta	ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes X-Y	ZF Horizontales punta	ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes X-Y
2,343506958	888,1806989	2840,20222		2,343506958	888,1806989	2840,20222		2,343506958	888,1806989	2840,20222	
ZF Horizontales punta	ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes Y-Z	ZF Horizontales punta	ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes Y-Z	ZF Horizontales punta	ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes Y-Z
5,112739058	0	143,491245		5,112739058	0	143,491245		5,112739058	0	143,491245	
EXTREMO INFERIOR			EXTREMO INFERIOR			EXTREMO INFERIOR			EXTREMO INFERIOR		
FUERZAS X	FUERZAS Y	M. 2Fuerzas	M. Fuerzas Tramo 1	Z	FUERZAS X	FUERZAS Y	M. 2Fuerzas	M. Fuerzas Tramo 1	Z	FUERZAS X	FUERZAS Y
2,573038155	1037,391608	1207,836988	100,5141295	4148,671339	2,573038155	1					

Estimación pluma TRAMO 5									
Largo (m) TRAMO 5	11,5		Momento de inercia IZ total // IY (cm ⁴)	6117748	3875508				
Alto (m)	0,98	49	Momento de inercia IZ - espesor // IY (cm ⁴)	4672128	2861568				
Ancho (m)	0,78	39	Momento de inercia IY // IY (cm ⁴)	3446620	3028946				
Espesor (m)	0,03		Área pluma (cm ²)	1020					
Altura pluma	72								
Superficie LATERAL pluma (m ²) Para C ₁	11,27	b (alto)/c (ancho)	1,256410256	f (largo)/b (alto)	11,7349388				
Volumen pluma (m ³)	1,173								
I _p pluma (Kg·m ³)	75452,03148								
Masa pluma (Kg) / Peso (KN)	9208,05	90,3320705							
Masa pluma (Kg)	9,208								
Radio D.G pluma Tramo 2 (m)	2,862540462								
F _p pluma (N) / (KN)	207,2185128	0,207018513							
F _l pluma (N) / (KN)	94,8929654	0,09489297							
W _{pl} pluma (N·m) / (KN·m)	592,5988695	0,592598869	V _{max} (Kg)	2028,02523	Q _{max} (KN)	19,89492751			
Q Viento en la pluma (Kg) / (KN)	460,914825	4,521574433							
CON Cs = 1,5 (SIN VIENTO)					CON Cs = 1,33 (CON VIENTO)				
Q _u - M. Cs = plv	162,5957469				144,1882289				
Q _l - W. M. Cs =									
Q _l - M. Cs = 3 Inercia: plv	0,37263323				0,330401547				
Q _l - M. Cs = 3 centrifugas: plv	0,170802334				0,151444913				
Distr. Peso plv	14,1387606				12,55829673				
Distribuidas (KN/m)									
Tramo extensible	14,5	Tramo extensible	11,5						
EXTREMO SUPERIOR					EXTREMO SUPERIOR				
ZF Horizontales punta		ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes X-Y	ZF Horizontales punta		ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes X-Y
2,743840689		197,814608	4348,471389		1,871578482		700,970775	3696,376239	
ZF Horizontales punta		ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes Y-Z	ZF Horizontales punta		ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes Y-Z
5,613498449		0	205,1149902		35,12704467		0	1536,57451	
EXTREMO INFERIOR					EXTREMO INFERIOR				
FUERZAS X	FUERZAS Y	M. Fuerzas	M. Fuerzas Tramo 1	M.Tot.Cola Z	FUERZAS X	FUERZAS Y	M. Fuerzas	M. Fuerzas Tramo 1	M.Tot.Cola Z
2,743840689	1199,987355	1408,865247	109,0815542	5666,61814	1,819505734	732,8494551	980,0992485	96,71897803	4772,994466
FUERZAS X	FUERZAS Y	M. Fuerzas	M. Fuerzas Tramo 1	(Y)	FUERZAS X	FUERZAS Y	M. Fuerzas	M. Fuerzas Tramo 1	(Y)
5,986131772	0	64,55523216	2,142641698	271,8128639	35,36365939	0	403,9610137	36,47859397	1977,014074
M.FLECTOR Z	oZ				M.FLECTOR Z	oZ			
5666,61814	192,0728053				4772,994466	161,7829919			
M.FLECTOR Y	oY				M.FLECTOR Y	oY			
271,8128639	30,46499996				1977,014074	76,06760294			
AXIAL	o Ax				AXIAL	o Ax			
1191,620906	11,6812579				1086,485346	10,05181712			
TOTAL	294,842829				TOTAL	327,1746979			

3.9.2- HOJAS DE CÁLCULO PARA EL DIMENSIONADO DEL TRAMO FIJO

Se realiza en dos partes, una parte A para calcular las fuerzas hasta la unión del cilindro y otra parte para ver las fuerzas del tramo completo. También se muestran los datos de las fuerzas y tensiones en la parte izquierda de la unión, es decir, de la sección crítica.

Estimación pluma TRAMO FIJO A									
Largo (m) TRAMO FIJO A	7,5		Momento de inercia IZ total // IY (cm ⁴)	819943,75	5373591,75				
Alto (m)	1,05	52,5	Momento de inercia IZ - espesor // IY (cm ⁴)	6387801,75	4067571,75				
Ancho (m)	0,85	42,5	Momento de inercia IY // IY (cm ⁴)	1812042	1386024				
Espesor (m)	0,03		Área pluma (cm ²)	1104					
Altura pluma	72								
Superficie LATERAL pluma (m ²) Para C ₁	7,875	b (alto)/c (ancho)	1,235294118	f (largo)/b (alto)	7,142857143				
Volumen pluma (m ³)	0,828								
I _p pluma (Kg·m ³)	20231,69832								
Masa pluma (Kg) / Peso (KN)	6499,8	63,763038							
Masa pluma (Kg)	6,500								
Radio D.G pluma Tramo Fijo A (m)	1,764274566								
F _p pluma (N) / (KN)	90,06499896	0,090064999							
F _l pluma (N) / (KN)	41,28275458	0,041282755							
W _{pl} pluma (N·m) / (KN·m)	158,899387	0,158899387	V _{max} (Kg)	1449,4095	Q _{max} (KN)	14,2187072			
Q Viento en la pluma (Kg) / (KN)	329,41125	3,231524363							
CON Cs = 1,5 (SIN VIENTO)					CON Cs = 1,33 (CON VIENTO)				
Q _u - M. Cs = plv	114,7734684				101,7658086				
Q _l - W. M. Cs =									
Q _l - M. Cs = 3 Inercia: plv	0,162116998				0,143743738				
Q _l - M. Cs = 3 centrifugas: plv	0,074308958				0,065881276				
Distr. Peso plv	15,30312913				13,56877449				
Distribuidas (KN/m)									
Tramo extensible	14,5	Tramo extensible	7,5						
EXTREMO SUPERIOR					EXTREMO SUPERIOR				
ZF Horizontales punta		ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes X-Y	ZF Horizontales punta		ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes X-Y
2,743840689		1199,987355	5666,61814		1,819505734		732,8494551	4772,994466	
ZF Horizontales punta		ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes Y-Z	ZF Horizontales punta		ZF Verticales punta	M. Punta	Ejes Y-Z
5,986131772		0	271,8128639		35,36365939		0	3377,014074	
EXTREMO INFERIOR					EXTREMO INFERIOR				
FUERZAS X	FUERZAS Y	M. Fuerzas	M. Fuerzas Tramo 1	M.Tot.Cola Z	FUERZAS X	FUERZAS Y	M. Fuerzas	M. Fuerzas Tramo 1	M.Tot.Cola Z
2,818149647	1314,760823	1061,105449	50,04427005	6777,767859	1,733948097	690,4470349	649,1035749	44,37258611	5466,470627
FUERZAS X	FUERZAS Y	M. Fuerzas	M. Fuerzas Tramo 1	(Y)	FUERZAS X	FUERZAS Y	M. Fuerzas	M. Fuerzas Tramo 1	(Y)
6,14824877	0	44,80598829	0,607938743	317,316791	33,46123499	0	385,274454	16,65626678	2258,89786
M.FLECTOR Z	oZ				M.FLECTOR Z	oZ			
6777,767859	196,3711727			130,9432759	4519,518391				
M.FLECTOR Y	oY				M.FLECTOR Y	oY			
317,316791	10,32289593			0,14462487	4,4446312034				
AXIAL	o Ax				AXIAL	o Ax			
1305,615914	11,8321111			4,6846258	517,3854689				
TOTAL	194,670267			126,4014382	TOTAL	201,196267			

Estimación pluma TRAMO FIJO					
Largo (m) TRAMO FIJO	14,5		Momento de inercia IZ total // IY (cm ⁴)	8199843,75	5373593,75
Alto (m)	1,05	52,5	Momento de inercia IZ - espesor // IY (cm ⁴)	6387801,75	4067571,75
Ancho (m)	0,85	42,5	Momento de inercia IZ // IY (cm ⁴)	1812042	1306022
Espesor (m)	0,03		Area pluma (cm ²)	1104	
Altura pluma	72				
Superficie LATERAL pluma (m ²) Para C ₁	15,225	b (alto)/c (ancho)	1,235294118	f (largo)/b (alto)	13,80952381
Volumen pluma (m ³)	1,6008				
I _y pluma (Kg.m ⁴)	23230,6398				
Masa pluma (Kg) / Peso (KN)	12566,28	123,2752068			
Radio C.D. de pluma Tramo fijo (m)	13,95030289				
F _z pluma (N) / (KN)	194,1911971	0,134191137			
F _y pluma (N) / (KN)	61,50868644	0,061508686			
α _z pluma (N.m) / (KN.m)	182,4530184	0,182453018	V _{max} (Kg)	Q _z max (KN)	
Q viento en la pluma (Kg) / (KN)	636,86175	6,247613768	2802,1917	27,48950058	
CON Cs = 1,5 (SIN VIENTO)			CON Cs = 1,33 (CON VIENTO)		
Q _z - M. Cs = plu	221,8953722		Q _z - M. Cs = plu	196,7472301	
Q _y - M. Cs =			Q _y - M. Cs =		
Q _z - M. Cs = 3 inercia: plu	0,241544047		Q _z - M. Cs = 3 inercia: plu	0,214169055	
Q _y - M. Cs = 3 centrifugas: plu	0,110715636		Q _y - M. Cs = 3 centrifugas: plu	0,098167864	
Q _z - Cs = plu			Q _z - Cs = plu	8,309326311	
Distr. Peso plu	41,86705137		Distr. Peso plu	37,12211888	
Distribuidas (KN/m)			Distr. Viento plu	1,967797417	
Tramo celosia	14,5	Tramo extensible	5,3		

Izquierda de la sección crítica	
M.FLECTOR Z	αZ
4102,090992	118,8492193
M.FLECTOR Y	αY
317,316791	10,32598503
AXIAL	α Ax
2051,489968	18,58233667
α TOTAL	147,757541

3.9.3- HOJAS DE CÁLCULO PARA LA FUERZA DEL CILINDRO HIDRÁULICO

Se muestra la fuerza a soportar para las disposiciones de pluma completamente extendida y carga máxima respectivamente. También se muestran las fuerzas y momentos en la unión del tramo.

Fuerza del cilindro	3299,846161
Reacción vertical	1869,925175
Reacción horizontal	227,3310758
Momento en la unión del cilindro	2675,676866
Momento a la izquierda de la unión	4102,090992
Momento abajo del tramo	961,3669825
Axial izquierda de la unión	2051,489968
Cortante derecha de la unión	141,4807265
Cortante izquierda de la unión	-467,7946985

				Mayoradas
Carga	Radio TF	1,676644098		
	Peso carga			5209,11
	Centrifuga	150,8979688	0,15089797	0,27161634
	Inercia	329,2082988	0,3292083	0,59257494
Tramos	Radio CDG TF	0,838322049		
	Peso tramos	51023,43	500,539848	900,971727
	Centrifuga	153,986639	0,15398664	0,27717595
	Inercia	335,9467318	0,33594673	0,60470412
	Fuerza cilindro	4839,807718		
	Reacción vertical	-1282,063537		
	Reacción horizontal	337,0591277		

Y los valores máximos del cilindro en cuestión:

CILINDRO		
	Factor seguridad, V	3,6
mm	Longitud instalación, L	4300
N/mm ²	Modulo elasticidad, E	210000
mm ⁴	Momento inercia, I	514850816
mm	Diametro pistón, D	330
mm	Diametro vástago, d	320
bar	Presión de operación	600
	Fuerza pandeo, F _B	5102,830714
	Fuerza compresión, F _C	5129,19

3.9.4- HOJAS DE CÁLCULO PARA EL DIMENSIONADO DE LA CELOSÍA

Se realiza una hoja de cálculo para el cordón superior e inferior y para las barras interiores.

Comprobación compresión barra			
Longitud de pandeo (mm)	1500		
f _y	275		
f _{yd}	261,9047619		
E	210000		
N _{crd} (N)	718530,7		
A (mm ²)	3144,73	Diámetro	150
I _y (mm ⁴)	8058000	Espesor	7
Radio de giro	8,639091827		
N _{cr}	7422732,078		
A _y / Esbeltez	0,341331317	0,968	
N _{brd}	797263,9295		
	AGUANTA		
N _{trd}	617656,7		
N _{pl rd}	823619,7619		
	AGUANTA		

Comprobación compresión barra			
Longitud de pandeo (mm)	876,7		
f _y	275		
f _{yd}	261,9047619		
E	210000		
N _{crd} (N)	87387,25		
A (mm ²)	364,42	Diámetro	60
I _y (mm ⁴)	153400	Espesor	2
Radio de giro	5,049261203		
N _{cr}	413658,9132		
A _y / Esbeltez	0,492205266	0,923	
N _{brd}	88094,19667		
	AGUANTA		
N _{trd}	82902,63		
N _{pl rd}	95443,33333		
	AGUANTA		

3.9.5- HOJAS DE CÁLCULO PARA LA ESTABILIDAD

La estabilidad se recuerda que se calcula para cuatro configuraciones diferentes.

Estabilidad para 250 tn con pluma recogida									
Peso vehículo portante, Sgc	60	588,6							
Peso estructura	15	147,15							
Peso contrapeso	88	863,28							
ESTABILIDAD	En KN y metros	Distancias el CDG al eje en X		Distancias el CDG al eje en Y					
Peso vehículo portante, Sgc	588,6	2							
Peso estructura	147,15								
Peso contrapeso	863,28								
Peso estructura + contrapeso	1010,43	3,5							
Tramo fijo + suma de los anteriores	500,54	0,8313		7,1407	83,35967918	Lp	7,188925941	Suma θ	83,36
								radianes	1,454906464
									Mp
									677,110499
Peso carga	2452,5	1,6766							
T	0,5215								
θ	83,36								
Mu	1767,491999								
Vu	3963,47								
dgc	2,2435								
Xo	0,857								
d1	9,328								
dt	8,294								
Mnt	2949,725891								
Mnl	1767,491999								
V estabilizadores	4552,07								
P Parte trasera suma (traseros)	979,9061208								
P Parte trasera resta (delanteros)	1296,128879								
P De lado. Delantero pluma	1497,422356								
P De lado. Delantero contrapeso	1284,317641								
Angulo horizontal entre pluma y eje longitudinal	45	0,785398163							
Mnt	-3467,412312								
Mnl	1249,805578								
P Con angulo. Delantero pluma	1399,221896								
P Con angulo. Delantero contrapeso	1248,533979								

Estabilidad para 25 tn con la pluma extendida									
Peso vehículo portante, Sgc	60	588,6							
Peso estructura	15	147,15							
Peso contrapeso	88	863,28							
ESTABILIDAD	En KN y metros	Distancias el CDG al eje en X		Distancias el CDG al eje en Y					
Peso vehículo portante, Sgc	588,6	2							
Peso estructura	147,15								
Peso contrapeso	863,28								
Peso estructura + contrapeso	1010,43	3,5							
Tramo fijo	123,275	0,8313		7,1407	83,35967918	Lp	7,188925941	Suma θ	83,36
Tramo 5	90,331	2,3345		20,0535	83,35988068		20,18892648	83,36	1,454906464
Tramo 4	82,892	3,6642		31,4763	83,36000495		31,68885961	83,36	1,454906464
Tramo 3	75,453	4,994		42,8992	83,35994651		43,18890363	83,36	1,454906464
Tramo 2	68,014	6,3237		54,322	83,36000476		54,68883676	83,36	1,454906464
Tramo 1	60,575	7,6535		65,7449	83,35996672		66,18888078	83,36	1,454906464
Peso carga	245,25	8,3183		71,4563					2148,630381
T	0,5215								
θ	83,36								
Mu	1167,213456								
Vu	1756,22								
dgc	2,2435								
Xo	0,857								
d1	9,328								
dt	8,294								
Mnt	-1658,391184								
Mnl	1167,213456								
V estabilizadores	2348,82								
P Parte trasera suma (traseros)	497,211819								
P Parte trasera resta (delanteros)	675,098181								
P De lado. Delantero pluma	808,0281545								
P De lado. Delantero contrapeso	667,2982949								
Angulo horizontal entre pluma y eje longitudinal	45	0,785398163							
Mnt	-2000,26609								
Mnl	825,3445496								
P Con angulo. Delantero pluma	743,178577								
P Con angulo. Delantero contrapeso	643,667539								

Estabilidad para 18 tn con la pluma extendida + celosía 45°									
Celosía	1,924	18,87444							
Peso vehículo portante, Sgc	60	588,6							
Peso estructura	15	147,15							
Peso contrapeso	88	863,28							
ESTABILIDAD	En KN y metros	Distancias el CDG al eje en X		Distancias el CDG al eje en Y					
Celosía	18,87444	13,4519		76,5829			77,75534828	80,03754042	1,396918606
Peso vehículo portante, Sgc	588,6	2							
Peso estructura	147,15								
Peso contrapeso	863,28								
Peso estructura + contrapeso	1010,43	3,5							
Tramo fijo	123,275	0,8313		7,1407	83,35967918	Lp	7,188925941	Suma θ	83,36
Tramo 5	90,331	2,3345		20,0535	83,35988068		20,18892648	83,36	1,454906464
Tramo 4	82,892	3,6642		31,4763	83,36000495		31,68885961	83,36	1,454906464
Tramo 3	75,453	4,994		42,8992	83,35994651		43,18890363	83,36	1,454906464
Tramo 2	68,014	6,3237		54,322	83,36000476		54,68883676	83,36	1,454906464
Tramo 1	60,575	7,6535		65,7449	83,35996672		66,18888078	83,36	1,454906464
Peso carga	98,1	18,5785		81,7094					2148,630381
T	0,5215								
θ	83,36								
Mu	1213,441331								
Vu	1609,07								
dgc	2,2435								
Xo	0,857								
d1	9,328								
dt	8,294								
Mnt	-1486,055759								
Mnl	1213,441331								
V estabilizadores	2197,67								
P Parte trasera suma (traseros)	469,763826								
P Parte trasera resta (delanteros)	629,0731475								
P De lado. Delantero pluma	767,2678566								
P De lado. Delantero contrapeso	620,964343								
Angulo horizontal entre pluma y eje longitudinal	45	0,785398163							
Mnt	-1841,464496								
Mnl	858,0325937								
P Con angulo. Delantero pluma	699,8489802								
P Con angulo. Delantero contrapeso	596,3976845								

3.9.6- HOJAS DE CÁLCULO PARA TABLAS DE CARGAS

Aproximación cargas según altura y grados						
Grados	Radianes	Grados cilindro				
50	0,872664626	123,6				
Longitud pluma	48,1					
				Mayoradas		
	Radio TF	30,91808403				
Carga	Peso carga	1.000	11,5758	20,83644		
	Centrífuga	111,3051025	0,111305102	0,200349184	Distancia vertical punta	36,8467377
	Inercia	242,8300641	0,242830064	0,437094115	Distancia vertical mitad	18,4233689
	Radio CDG TF	15,45904201			Distancia horizontal punta	31,439584
Tramos	Peso tramos	51023,43	500,5398483	900,9717269	Distancia horizontal mitad	15,980542
	Centrífuga	2839,584053	2,839584053	5,111251295		
	Inercia	6195,011389	6,195011389	11,1510205		
	Fuerza cilindro	5783,824813				
	Reacción vertical	4847,92754				
	Reacción horizontal	398,1476232				

3.9.7- HOJAS DE CÁLCULO PARA RODAMIENTO

Rodamiento ROTHE ERDE		
Angulo	83,36	1,454906464
Peso Carga Kg/KN	250000	2452,5
Peso contrapeso KN	88000	863,28
Longitud pluma	14,5	
Distancia carga	2,1981441	
Distancia contrapeso	3,5	
MOMENTO TOTAL	2369,4684	
AXIAL TOTAL	3315,78	