



Cúpula

TITULO

**Análisis de resistencia de la estación
motriz superior de la cúpula**

Código : RPT/EDIF/0349-R
Edición : 1.A
Fecha : 05/08/2008
Nº de pág. : 20

Gran Telescopio de Canarias, S.A.

Instituto de Astrofísica de Canarias
Vía Láctea s/n
38200 - LA LAGUNA, TENERIFE, Islas Canarias
Tfno +34 922 315 031 Fax +34 922 315 032

Centro Común de Astrofísica de La Palma
Cuesta de San José s/n
38712 BREÑA BAJA, LA PALMA, Islas Canarias
Tfno +34 922 425 720 Fax +34 922 425 701

Control de aprobación

Preparado por	Benjamin Siegel Grupo de Nuevos Desarrollos	Firmado en el original
Autorizado por	Pedro Álvarez Director	Firmado en el original
	Fecha: 20/12/11	

Documentos de referencia

Nº	Nombre del documento	Código	Edición
R 1	Proyecto Constructivo de la Cúpula del GTC	EXT/GMU/0755-R	1.A
R 2	Cúpula del GTC. Documentación de Producto.	EXT/GMU/1266-R	1.A
R 3	Cúpula. Diseño, Fabricación y Montaje. Planos.	EXT/GMU/0467-R	1.B

INDICE

1. RESUMEN	5
2.CARGAS EN CADENAS Y ESTACIONES MOTRICES.....	5
2.1 CADENAS	5
2.2 ESTACIONES MOTRICES.....	9
3.MODELO ELEMENTOS FINITOS.....	11
3.1 CONDICIONES DE CONTORNO Y CASOS DE CARGA	12
3.2 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	13
4.RESISTENCIA DE LOS TORNILLOS DE FIJACIÓN DE LA CAJA DE PIÑONES..	14
5.RESULTADOS.....	16
5.1 CONCLUSIONES.....	17
5.1.1 Par motor requerido	17
5.1.2 Seguridad rotura cadenas.....	18
5.1.3 Caja de piñones.....	18
5.1.4 Ejes de piñones.....	18
5.1.5 Tornillos de fijación.....	18
5.2 COMENTARIO.....	19
6. ANEXOS	20

1. RESUMEN

En el presente documento se describen los cálculos de resistencia, con sus respectivos resultados, de la estación motriz superior de la cúpula en contexto con la implementación de una nueva reductora con mayor relación.

Los cálculos se realizaron para una reductora con relación $i=280$ y un peso de compuerta de 90t. Para comparar también se hicieron cálculos con la relación de la reductora actual, $i=123$, y un peso de la compuerta de 45t, algo mayor que las 41t indicadas en los documentos R 1 y R 2.

En el capítulo 2 se describe el modelo de las cadenas para calcular las cargas de las propias cadenas y de las cajas de piñones en función del ángulo de apertura de las compuertas. El capítulo 3 trata la construcción del modelo de elementos finitos y el capítulo 4 recoge las ecuaciones del cálculo de resistencia de los tornillos de fijación de la caja de piñones al soporte de la viga arco. Finalmente el capítulo 5 presenta un resumen de los resultados y conclusiones.

2. CARGAS EN CADENAS Y ESTACIONES MOTRICES

En las pestañas *Compuerta Grande* y *Compuerta Pequeña* de las hojas *Compuertas-Jul2008-3.xls* se calculan las cargas de las cadenas y las cajas de piñones en función del ángulo de apertura de las compuertas basándose en el modelo mostrado en la Imagen 1.

2.1 Cadenas

En dicho modelo los muelles representan las cadenas, los extremos a la derecha y la izquierda los puntos de entrada y salida del piñón motriz y el punto central el punto fijo en la compuerta (compara con la Imagen 2).

Las cadenas reciben una precarga inicial por lo que se alargan Δl_1 y Δl_2 . En este momento las cadenas tiran del punto fijo en la compuerta con la precarga F_{pc} . La carga introducida por la compuerta F_c cambia la tensión en las cadenas en función de la posición de la compuerta. Cuando un tramo de la cadena llega a destensarse por completo toda la carga adicional se lleva el tramo en el otro lado del punto fijo de la compuerta.

Este planteamiento no tiene en cuenta las variaciones de las cargas en las cadenas al pasar por diferentes cantidades de bastidores de piñones de guiado.

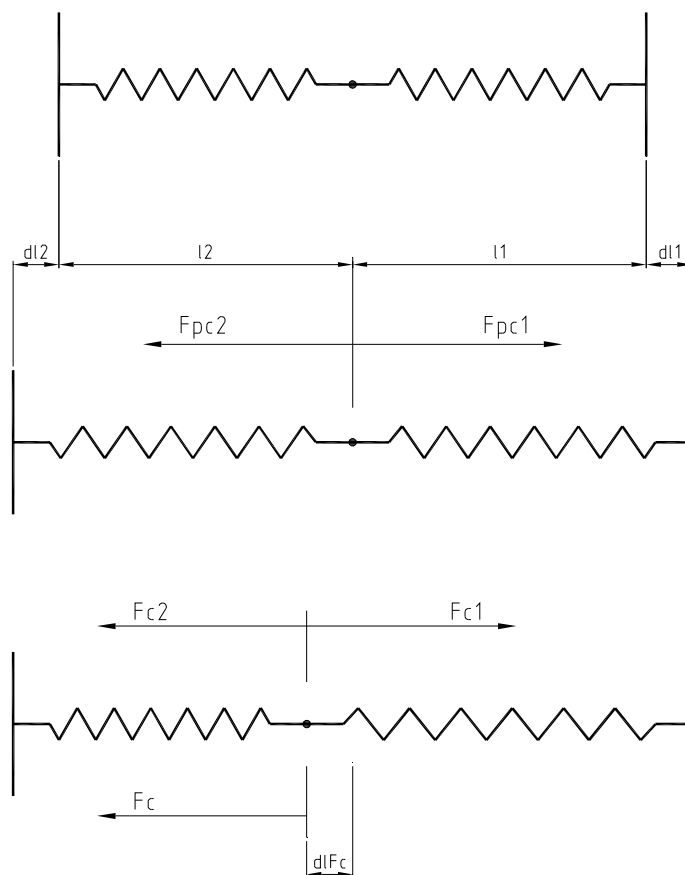


Imagen 1 Modelo base de las cadenas.

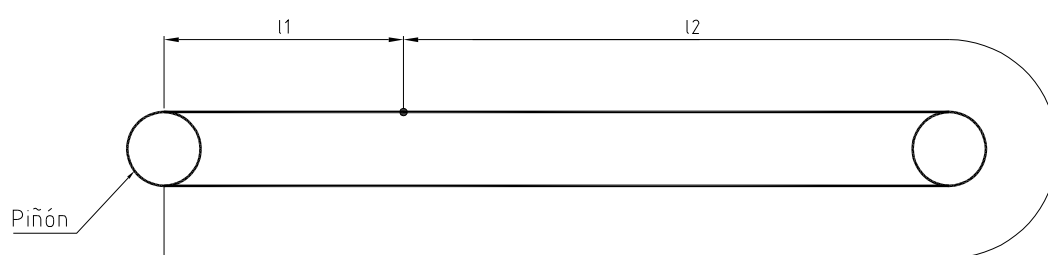


Imagen 2 Asignación de longitudes usadas en las ecuaciones.

Las siguientes ecuaciones salen de acuerdo con la Imagen 1 y pueden encontrarse en las hojas de cálculo *Compuertas-Jul2008-3.xls* en las celdas llamadas “cálculos intermedios” de las pestañas *Compuerta Grande* y *Compuerta Pequeña*.

$$F_{pc1} = \Delta l_1 \cdot k_1 \quad \text{con } k_1 = \frac{1000000}{l_1 \cdot 0,028}$$

y

$$F_{pc2} = \Delta l_2 \cdot k_2 \quad \text{con } k_2 = \frac{1000000}{l_2 \cdot 0,028}$$

$$F_{c1} = F_{c2} + F_c$$

$$\text{con } F_{c1} = (\Delta l_1 + \Delta l_{F_c}) k_1$$

$$\text{y } F_{c2} = (\Delta l_2 - \Delta l_{F_c}) k_2$$

$F_{pc1/2}$	Precarga cadena
F_c	Carga por compuerta
$F_{c1/2}$	Carga cadena
$k_{1/2}$	Constante cadena
$l_{1/2}$	Longitud tramo cadena

Resolviendo se llega a

$$F_{c1} = F_{pc} + \frac{F_c}{l_1 \cdot \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \right)}$$

y

$$F_{c2} = F_{pc} - \frac{F_c}{l_2 \cdot \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \right)}$$

Nota: Las longitudes l_1 y l_2 se pueden componer por un tramo superior y el inferior según el caso (Imagen 2).

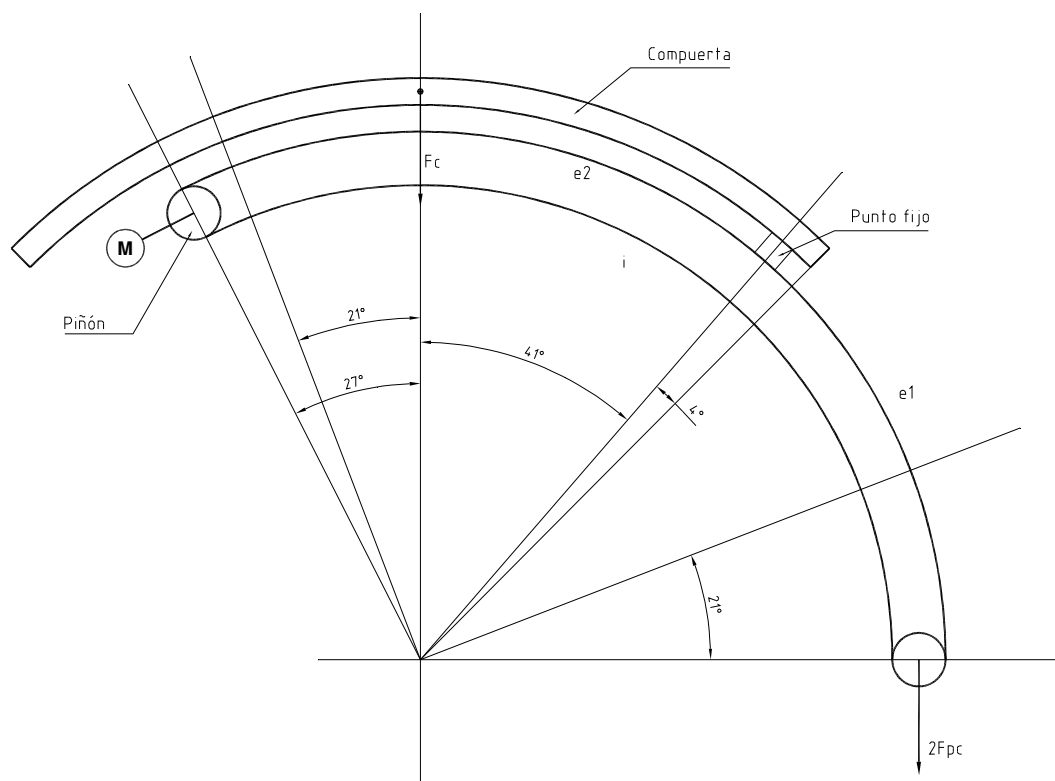


Imagen 3 Ángulos entre piñones y punto fijo de la compuerta (aquí solamente se muestra la transmisión superior).

En la Imagen 3 se pueden ver los ángulos usados para calcular las longitudes de los tramos de las cadenas.

El tramo i es el tramo interior de la cadena comprendido entre el piñón motriz y el piñón libre. El tramo $e1$ es el tramo exterior de la cadena comprendido entre el punto fijo en la compuerta y el piñón inferior, sea motriz o no. El tramo $e2$ es el que queda entre el punto fijo en la compuerta y el piñón superior.

2.2 Estaciones Motrices

La Imagen 3 también es útil para comprender cómo se calculan las fuerzas totales que tienen que soportar las cajas de piñones (estaciones motrices) en condiciones normales o de emergencia. Hay que tener en cuenta que hay dos juegos de cadenas en cada lado de la compuerta, uno con piñón motriz en la estación superior (transmisión superior) y otro con el piñón motriz en la estación inferior (transmisión inferior).

Existen tres casos distintos de operación:

- 1) Funcionamiento normal (todos los motores trabajan)
- 2) Funcionamiento de emergencia funcionando solamente el motor superior y
- 3) Funcionamiento de emergencia funcionando solamente el motor inferior.

Funcionamiento normal

En la caja superior se suman las fuerzas del tramo $e2$ y del tramo i de la transmisión superior, mas dos veces la fuerza del tramo $i/e2$ de la transmisión inferior, ya que da la vuelta sobre el piñón libre de la estación superior.

En la caja inferior las fuerzas de las cadenas de la compuerta grande se suman de manera equivalente.

Funcionamiento de emergencia funcionando solamente el motor superior

En la caja superior se suman las fuerzas del tramo $e2$ y del tramo i de la transmisión superior, más dos veces la precarga de la cadena de la transmisión inferior, ya que da la vuelta sobre el piñón libre de la estación superior.

En la caja inferior se suma dos veces la fuerza del tramo $i/e1$ de la transmisión superior ya que da la vuelta sobre el piñón libre de la estación inferior, más dos veces la precarga de la cadena de la transmisión inferior.

Funcionamiento de emergencia funcionando solamente el motor inferior

En la caja superior se suma dos veces la fuerza del tramo $i/e2$ de la transmisión inferior ya que da la vuelta sobre el piñón libre de la estación superior, más dos veces la precarga de la cadena de la transmisión superior.

En la caja inferior se suman las fuerzas del tramo $e1$ y del tramo i de la transmisión inferior, más dos veces la precarga de la cadena de la transmisión superior, ya que da la vuelta sobre el piñón libre de la estación inferior.

En todos los casos de la caja superior se añade la fuerza máxima introducida por las cadenas de la compuerta pequeña que se compone por dos veces la fuerza del tramo $e2$ mas dos veces la fuerza del tramo i ya que son dos cadenas en cada lado de la compuerta.

En todos los casos de la caja inferior se añade cuatro veces la fuerza del tramo *i/el* de las cadenas de la compuerta pequeña ya que éstas dan la vuelta sobre los piñones libres de la estación inferior.

Descripción de la pestaña *Compuerta Grande* del fichero *Compuertas-Jul2008-3.xls*

En las casillas D5 a D14 se introducen datos generales mientras a su derecha se calculan las seguridades de las cadenas y los pares requeridos; más acerca de este tema se puede encontrar en el capítulo 5.

En las filas 16 a 22 se calculan las longitudes de los diferentes tramos de cadenas en función de la apertura de la cúpula (compara también con la Imagen 3). Para ello se midieron los ángulos entre el punto fijo en la compuerta y los planos centrales de las cajas de piñones, es decir que habrá ligeras diferencias con las longitudes reales.

En las filas 27 y 28 se calculan las fuerzas en las cadenas sin precarga (s/pc) en funcionamiento normal (N) y funcionamiento de emergencia (E), es decir, cuando solamente funciona la transmisión superior o inferior. Las filas 31 a 33 recogen los alargamientos que sufren las cadenas por la carga de la compuerta. En la fila 35 se puede introducir la precarga deseada para la cadena de la transmisión superior.

A continuación en las filas 40 a 46 aparecen las fuerzas de las cadenas y sus respectivos alargamientos con la precarga (c/pc) definida en la fila 35 para un funcionamiento normal y en las filas 51 a 57 para un funcionamiento de emergencia.

Mientras las filas 25 a 57 representan los valores para la transmisión superior, las filas 62 a 94 lo hacen para la transmisión inferior de igual manera.

Las filas 99 a 121 recogen las fuerzas tangenciales resultantes para las cajas de piñones superior e inferior en funcionamiento normal y en emergencia, sin y con las fuerzas introducidas por la compuerta pequeña.

Lo mismo se repite en la pestaña siguiente para la compuerta pequeña de forma reducida ya que la misma cuenta con solamente una transmisión en la parte superior.

3. MODELO ELEMENTOS FINITOS

El modelo FEM representa un sector corto de la viga arco alrededor de la estación superior y la caja de piñones. Para la modelación se emplearon mayoritariamente elementos SHELL63 con los espesores indicados en el conjunto de planos R 3. Solamente para las vigas IPE140 dentro de la viga arco, los ejes de piñones y los tornillos que une la caja de piñones al soporte, se usaron elementos BEAM4.

Los extremos de los ejes de piñones solo transmiten traslaciones, las rotaciones están libres, de acuerdo con el tipo de rodamiento empleado. Ésta condición se realizó con sets acoplados (coupled sets) entre dos nodos muy cercanos de los cuales uno pertenece al rodamiento, modelado con un espesor de pared mayor que el de la caja de piñones, y el otro al extremo del eje.

Los tornillos que unen la caja de piñones al soporte están modelados con un solo elemento con la misma constante real que el eje secundario de la caja (diámetro 75mm). Los nodos inferiores coinciden con la capa media de la chapa superior del soporte de la viga arco y los nodos superiores con la capa media del fondo de la caja de piñones.

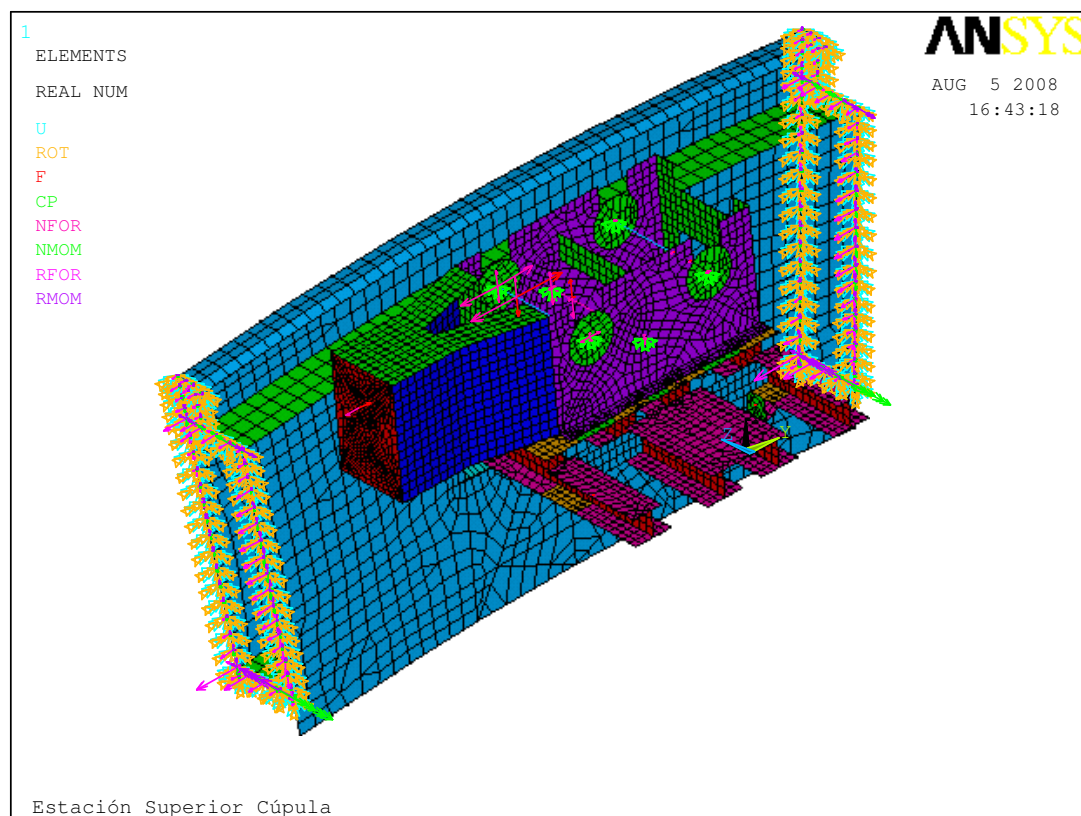


Imagen 4 Modelo FEM del sector de la viga arco con el soporte de la estación motriz superior y la caja de piñones.

3.1 Condiciones de contorno y casos de carga

El sector modelado de la viga arco está completamente restringido en sus dos extremos a lo largo de todas las líneas que forman las secciones extremas (véase Imagen 4).

Las cargas de las cadenas se aplican directamente sobre el centro de los ejes respetando las posiciones laterales de los piñones. En caso de la cadena que pasa por el piñón libre con tensor la carga se aplica sobre un punto clave situado en el extremo de la caja de piñones coincidiendo con el eje del tensor (véase Imagen 5)

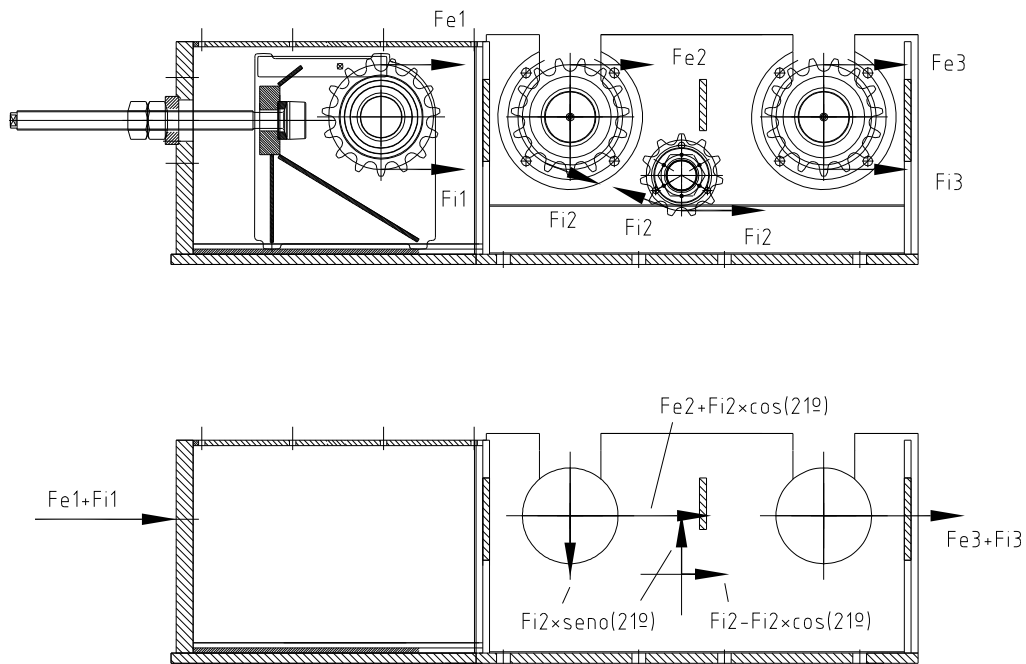


Imagen 5 Cargas reales de las cadenas (arriba) y cargas correspondientes en el modelo FEM (abajo).

Tabla 1 muestra las condiciones de los casos de carga calculados. Los valores se cogen de la pestaña *Compuerta Grande* del fichero *Compuertas-Jul2008-3.xls*, casillas D114 y D120. Los componentes de los valores totales se pueden extraer de la misma hoja de cálculos.

Para cada caso se creó un fichero de texto para la función *Read Input* de ANSYS, *Estación-Superior-Caso*.txt. (*1-4)*

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Caja Piñones	Inferior	Superior	Inferior	Superior
Tipo Emergencia	solo transmisión superior funcionando			
Peso Compuerta	45t		90t	
Precarga	Compuerta grande 80kN, compuerta pequeña 60kN			
Fuerzas aplicadas [N]				
F _{e1} +F _{i1}	- ¹	265405	-	265405
F _{e2} +F _{i2} *cos(21°)	154686	235312	154686	470623
F _{i2} *seno(21°)	28669	90328	28669	180655
F _{i2} -F _{i2} *cos(21°)	5314	16741	5314	33483
F _{e3} +F _{i3}	744968	160000	1249074	160000
Suma tangencial	904968	677458	1409074	929511

Tabla 1 Condiciones de los casos de carga. Las fuerzas se calcularon en base de las composiciones de las celdas D114 y D120 del fichero *Compuertas-Jul2008-3.xls*.

3.2 Interpretación de los resultados

Dado que tanto los tornillos que fijan la caja al soporte como los ejes de piñones solamente llevan un nodo en cada extremo, las tensiones indicadas en el modelo no son representativas en estos sitios. Se puede obtener una idea aproximada mirando las tensiones en las inmediaciones de estos puntos.

Para los tornillos se realiza un cálculo aparte en el capítulo 4 usando las reacciones de los elementos que los presentan.

El modelo FEM creado representa la estación motriz superior, sin embargo hay casos de carga de la estación inferior que se le aplica a la superior. Los resultados en estos casos solo pueden ser de manera orientativa.

¹ En caso de la caja inferior las cadenas de la compuerta pequeña pasan todas por piñones con tensores por lo que éstas fuerzas se suman a las fuerzas $F_{e3} + F_{i3}$.

4. RESISTENCIA DE LOS TORNILLOS DE FIJACIÓN DE LA CAJA DE PIÑONES

Los tornillos que unen la caja de piñones al soporte de la viga arco están modelados con vigas de un solo elemento. Las reacciones en los dos nudos de estos elementos se usan para el cálculo de los tornillos (las reacciones se pueden encontrar fácilmente ya que son los últimos 10 elementos del programa *Estación-Superior-Caso*.txt*).

* 1-4

Se emplean las siguientes ecuaciones:

Constante de las piezas atornilladas

$$c_p = \frac{E_p \cdot A_{ers}}{l_k}$$

$$\text{con } A_{ers} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\left(d_k + \frac{l_k}{a} \right)^2 - D_B^2 \right)$$

Constante de los tornillos

$$\frac{1}{c_s} = \frac{1}{E_s} \cdot \left(2 \cdot \frac{l_{m/sk}}{A_0} + \frac{l_{sr}}{A_0} + \frac{l_r}{A_s} \right)$$

Relaciones fuerzas

$$F_{\max} = F_{pc} + \Delta F_s$$

$$\Delta F_s = F_c \cdot \Phi$$

$$\Phi = 0,5 \cdot \frac{1}{1 + \frac{c_p}{c_s}}$$

$$F_{kl} = F_{\max} - F_c$$

c_p	Constante piezas
E_p	Módulo elasticidad piezas
A_{ers}	Área sustitutivo
d_k	Diámetro cabeza tornillo
l_k	Longitud fijación
a	Constante material (10 para acero)
D_B	Diámetro agujero pasante
c_s	Constante tornillo
E_s	Módulo elasticidad tornillo
A_0	Sección nominal tornillo
A_s	Sección tensión tornillo
$F_{\max}$	Fuerza máxima tornillo
F_{pc}	Precarga tornillo
ΔF_s	Fuerza adicional tornillo
F_c	Carga exterior
F_{kl}	Precarga restante
Φ	Factor para la realización constructiva de la unión atornillada (valor medio de 0,5)

Nota: Los cálculos en el fichero *Compuertas-Jul2008-3.xls* no tienen en cuenta las tensiones de torsión que se introducen al apretar el tornillo.

La numeración de los tornillos se puede ver en la Imagen 6.

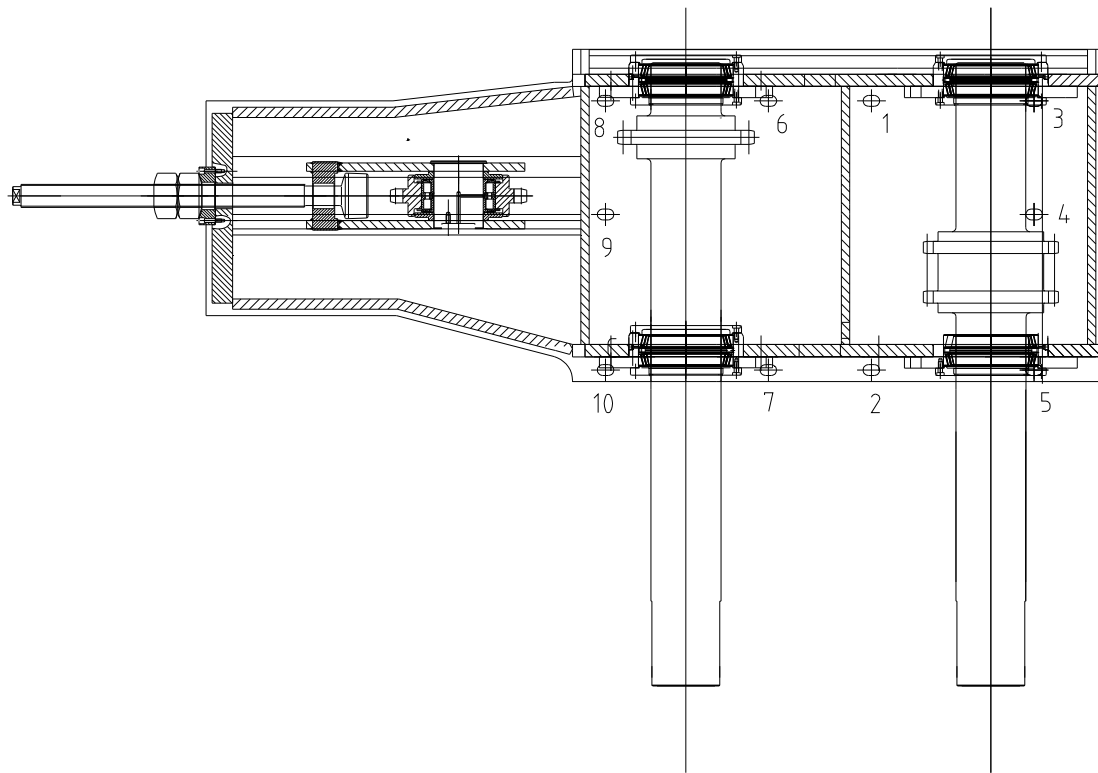


Imagen 6 Numeración de los tornillos de la caja de piñones.

Las pestañas Tornillos Caso 1 a Tornillos Caso 4 contienen todas las ecuaciones presentadas arriba calculando las fuerzas máximas que aparecen en los tornillos (Fila 8), la precarga restante (fila 9), la seguridad con el límite elástico (fila 11) y la seguridad contra desplazamiento lateral de la caja de piñones (fila 17).

5. RESULTADOS

		Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
1	Peso compuerta	45t		90t	
2	Carga lateral total caja piñones	905kN	677kN	1410kN	930kN
3	Par requerido por motor (i=123; r=0,94)	332Nm (E) 166Nm (N)		665Nm (E) 333Nm (N)	
4	Par requerido por motor (i=280; r=0,94)	146Nm (E) 73Nm (N)		292Nm (E) 146Nm (N)	
5	Seguridad rotura cadena (por carga compuerta)	2,1 (E) 4,2 (N)		1,1 (E) 2,1 (N)	
6	Estructura caja piñones	~350N/mm ² (1)	~180N/mm ² (2)	~580N/mm ² (1)	~250N/mm ² (2)
7	Tensión máx. por tensor (M56)	265N/mm ²	84N/mm ²	530N/mm ²	84N/mm ²
Visto desde el motor					
8	Seguridad rotura cadena (por par nominal motor de 209Nm)	3,3 (i=123) 1,5 (i=280)			
9	Seguridad rotura cadena (por par máximo motor de 586Nm)	1,2 (i=123) 0,5 (i=280)			
Tornillos M24 – 12.9					
10	Fmax	322kN (3)	307kN (3)	356kN (3)	316kN (3)
11	Seguridad rotura	1,2	1,2	1,1	1,2
12	Seguridad desplazamiento lateral caja	1,2	1,7	0,8	1,2

Tabla 2 Resumen de los resultados de los casos de carga 1 a 4 (todos los casos son casos de emergencia, véase 3.1).

(E) Emergencia

(N) Funcionamiento normal

(1) Inmediaciones del tensor (éstas tensiones no son representativos ya que se trata de la caja inferior que tiene tres tensores que repartirían la carga)

(2) Inmediaciones del tornillo nº 8

(3) Tornillo nº 8

5.1 Conclusiones

5.1.1 Par motor requerido

El par nominal del motor actual (209Nm), en conjunto con la reductora actual ($i=123$), es suficiente para un funcionamiento normal y con un peso de compuerta de 45t. En caso de emergencia el par motor no sería suficiente para arrancar, el par de arranque de 215Nm está muy por debajo de los 332Nm requeridos.

Calculando con un peso de compuerta de 90t el par nominal del motor actual sería suficiente en conjunto con la reductora nueva ($i=280$). En caso de emergencia el par de arranque del motor tampoco sería suficiente quedándose lejos de los 292Nm necesarios. Sin embargo, el peso de 90t para la compuerta no está justificado de ninguna manera y por lo tanto no tiene sentido de calcular con este valor.

La desventaja en las características de los motores actualmente montados para las compuertas reside en las relaciones M_A/M_N y M_K/M_N que se encuentran en 1 y 2,8, respectivamente (véase Imagen 7). Haría falta un limitador de par que corte el pico de la curva para que quede un factor de seguridad adecuado para las cadenas (por lo menos 1,5).

También existe la posibilidad de cambiar el motor por otro con relaciones M_A/M_N y M_K/M_N más similares como 1,8 y 2, respectivamente. La curva sería mucho más plana, los motores arrancarían con mayor carga en caso de emergencia y se obtendría al mismo tiempo un mayor factor de seguridad para las cadenas.

Otra opción serían servomotores que cuentan con una curva de par completamente plana hasta ciertas revoluciones por encima de las cuales caería proporcionalmente. Estos motores son capaces de trabajar temporalmente por encima de su par nominal entregando un par mucho más elevado. En este caso también haría falta un limitador de par para la seguridad de las cadenas.

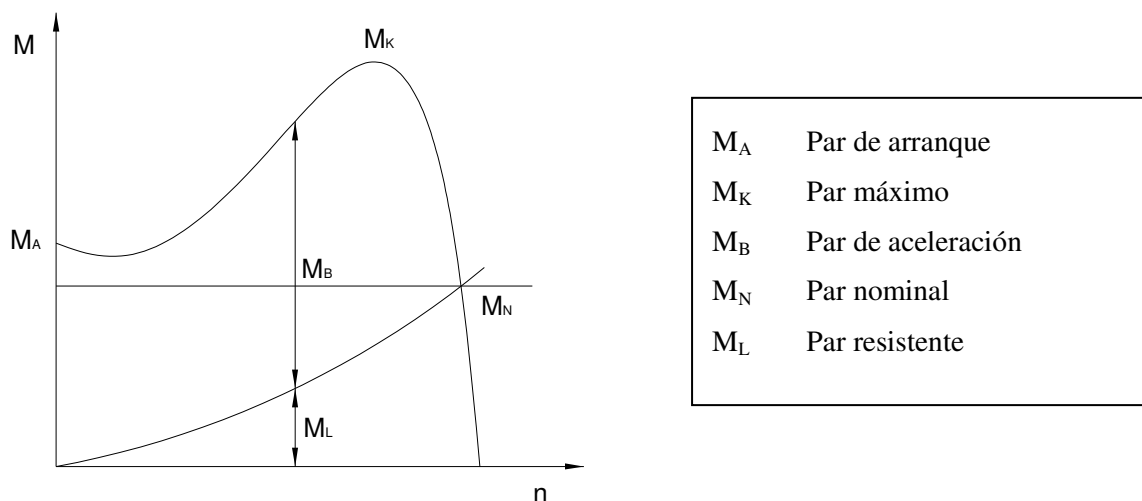


Imagen 7 Curva típica de par de un motor de inducción y el par resistente.

5.1.2 Seguridad rotura cadenas

El para máximo del motor actual en conjunto con la reductora nueva ($i=280$) resultaría en una carga de cadena mayor que la carga mínima de rotura (punto 9 en la Tabla 2), el accionamiento sería inseguro mecánicamente y no debería ser realizado en esta configuración (véase también 5.1.1).

5.1.3 Caja de piñones

La zona de los tensores es probablemente la más solicitada en caso de la caja inferior (caso 1 y 3). No se puede sacar un valor exacto del modelo ya que la carga de tres tensores se aplica en un solo punto. El modelo representa la caja superior y no la inferior.

En caso de la caja de piñones superior (caso 2 y 4) la zona más solicitada es la que está cerca del tornillo nº 8. Se puede conseguir un reparto mejor de la carga colocando cartelas y sobre todo suplementando los tornillos con placas gordas con agujero pasante ajustado lo que también mejoraría la propia unión atornillada (subiría la constante de las piezas, el tornillo se llevaría menos carga). Se recomienda también reforzar el soporte de la viga arco en las zonas de los tornillos más solicitados.

5.1.4 Ejes de piñones

No se realizaron cálculos de resistencia de los ejes de los piñones.

5.1.5 Tornillos de fijación

En caso de la estación inferior, suponiendo que la configuración de los tornillos es la misma que en la estación superior, los tornillos, si son M24 – 12.9, no podrían evitar un desplazamiento lateral de la caja de piñones calculando con un peso de la compuerta de 90t y en modo emergencia.

Con la nueva reductora se podrían introducir en el mecanismo cargas aún mayores por lo que habría que aumentar la cantidad de tornillos. Además sería recomendable un tope en sentido tangencial para la caja de piñones.

Hay que recordar además que las tensiones de torsión introducidas por el apriete de los tornillos no se tuvieron en cuenta en los cálculos.

5.2 Comentario

Lo primero que habría que hacer es verificar las características del motor, del amplificador y de las limitaciones de corriente instalados actualmente para conocer cuales son los valores de par de arranque, par nominal y par máximo que tiene el sistema.

Luego habría que volver a calibrar las células de carga. Montadas de nuevo y las cadenas tensadas, hay que apuntar las cargas en las cadenas y el par de motor entregado en función del ángulo de apertura de la compuerta. En base de estos datos se puede elegir un nuevo accionamiento comprobando todos sus elementos (punto fijo de las cadenas en la compuerta, bastidores de piñones de guiado, etc.) y determinando modificaciones necesarias.

Hay que considerar seriamente la opción de cambiar no solamente la reductora sino también el motor (véase 5.1.1). Un motor con una entrega de par más homogénea y una reductora adaptada al caso (seguramente no haría falta una relación de 280 sino una menor) optimizarían considerablemente el accionamiento. Otra posibilidad es cambiar solamente el motor con el amplificador correspondiente lo que incluso saldría más barato ya que la reductora siempre es más cara que el motor. En cualquier caso, la selección de los nuevos componentes tiene que cumplir con dos requerimientos esenciales:

- a) que el par de arranque del motor sea suficiente para vencer la carga en caso de emergencia y
- b) que nunca se alcancen valores de carga peligrosos para las cadenas.

El último punto se aplica también a todos los demás componentes implicados en la apertura y cierre de la compuerta.

En el lado opuesto se podría investigar como optimizar la rodadura de la compuerta comprobando también si existe algún tipo de fricción extraño.

6. ANEXOS

Compuertas-Jul2008-3.xls

Hojas de cálculo para las cargas de las cadenas y los tornillos de unión entre soporte y caja de piñones.

Estación-Superior-Caso*.txt

Fichero para “Read Input” en ANSYS, caso de carga *.

* 1-4