DOCUMENTO Nº1: MEMORIA Y ANEJOS

ANEJO Nº22: CÁLCULOS DE LA ESTRUCTURA, ANCLAJE Y SISTEMA DE AMARRE

ÍNDICE

1.- OBJETO **1**
2.- ANTECEDENTES **1**
3.- ANÁLISIS DE DATOS DE PARTIDA **2**
4.- CRITERIOS DE DISEÑO **3**
5.- ANÁLISIS BATIMÉTRICO / GEOMÉTRICO **4**
6.- ACCIONES **6**
7.- CÁLCULO DE CARGAS **8**
7.1.- CARGAS GRAVITATORIAS *8*
7.2.- CARGAS DE VIENTO *8*
7.2.1.- PERIODO DE RETORNO *8*
7.2.2.- DIRECCIONES DEL VIENTO *9*
7.2.3.- CÁLCULO DEL VIENTO DE DISEÑO *9*
7.2.3.1.- Consideraciones y regulación *9*
7.2.3.2.- Velocidad básica del viento *9*
7.2.3.3.- Velocidad media del viento *10*
7.2.3.4.- Presión del viento *11*
7.2.3.5.- Velocidad máxima del viento *12*
7.3.- ANÁLISIS DE LAS FUERZAS DEL VIENTO SOBRE LA PLATAFORMA FLOTANTE *13*
7.3.1.- PLANTEAMIENTO DEL EUROCÓDIGO *13*
7.3.1.1.- Cálculo de esfuerzos del viento sobre paramentos verticales *13*
7.3.1.2.- Cálculo de esfuerzos del viento sobre cubiertas. Fuerzas de fricción. *16*
7.3.1.3.- Esfuerzos resultantes. *17*
7.4.- CÁLCULO DE LA FUERZA DE LA OLA SOBRE LA PLATAFORMA FLOTANTE *18*
7.4.1.- CÁLCULO AMPLITUD DE LA OLA *18*
7.4.1.1.- Criterio del Bureau of Reclamation 1992 ..... *18*
7.4.1.2.- Criterio del Beach Erosion Board *19*
7.4.2.- CÁLCULO DEL PERIODO *20*
7.4.3.- CÁLCULO DE LA LONGITUD DE ONDA *21*
7.4.4.- CÁLCULO DE LA CARGA DE OLEAJE RESULTANTE *22*
7.5.- CALCULO DE LA CARGA DE CORRIENTE *23*
7.6.- COMBINACIÓN DE LAS CARGAS HORIZONTALES *24*
8.- ANÁLISIS DE FLOTABILIDAD **24**
8.1.- PRINCIPIO TEÓRICO *24*
8.2.- CÁLCULO DE FLOTABILIDAD *26*
8.3.- CARGAS QUE AFECTAN A LA FLOTABILIDAD *28*
8.4.- EVALUACIÓN DE LA FLOTABILIDAD DEL SISTEMA *29*
9.- DISEÑO DEL AMARRE Y ANCLAJE **30**
9.1.- CÁLCULO DE NÚMERO DE ANCLAJES Y AMARRES *32*
9.2.- CALCULO DE ANCLAJES. *38*
9.2.1.- CÁLCULO DEL PERFIL DE ACERO *39*
9.2.2.- CÁLCULO DE LOS PILOTES *43*

9.2.3.- CÁLCULO DEL ARMADO DEL PILOTE *49*
9.2.4.- CÁLCULO DEL PERNO Y LA ARGOLLA *51*
9.2.5.- RESISTENCIA DEL HORMIGÓN *52*
9.3.- DIMENSIONADO DE CABOS DE AMARRE. *53*
9.3.1.- SECCIÓN DE CABOS DE AMARRE. *53*
9.3.2.- LONGITUD DE CABOS DE AMARRE. *54*
ANEXO. SIMULACIÓN CFD **57**
DIRECCIÓN Y ORIENTACIÓN DEL VIENTO *57*
NÚMERO DE MÓDULOS *58*
VOLUMEN DE CONTROL *58*
VELOCIDAD DEL VIENTO *59*
SIMULACIÓN *59*
RESULTADOS *60*
VIENTO A 0º Y A 180º *60*
VIENTO A 90º *62*

1.- OBJETO

El objeto del presente Anejo es determinar las cargas a la que va a estar sometida la estructura flotante (acciones constantes, acciones de viento y sobrecargas de nieve), verificar el comportamiento mecánico de la estructura sometida a las mismas y realizar el cálculo y el diseño del sistema de amarre y anclaje.

2.- ANTECEDENTES

El presente estudio corresponde a la **"Separata Nº2 Plantas Fotovoltaicas"** *del* **"Proyecto para la mejora de la calidad y del óptimo aprovechamiento de los recursos procedentes de aguas no convencionales y con incorporaciones de energías renovables en los regadíos de la Comunidad General de Riegos de Levante, Margen Izquierda del Segura (Alicante)"**. *Dichas plantas solares flotantes se ubicarán en tres balsas con emplazamientos diferentes que se detallan a continuación:*

DESCRIPCIÓN	UBICACIÓN
Filtración La Peña	*Parcela 88; Polígono 184; Elche (Alicante)*
Subestación Crevillente Tercera Elevación	*Parcelas 24 y 25; Polígono 19; Crevillente (Alicante)*
Subestación Crevillente Cuarta Elevación	*Parcela 94; Polígono 12; Crevillente (Alicante)*

Las plantas se instalarán en una única isla, con las potencias que se detallan a continuación:

RESUMEN POTENCIAS INSTALADAS Y UBICACIÓN		
DESCRIPCIÓN	**POTENCIA PICO**	**ZONA UBICACIÓN**
Filtración La Peña	*356,40 KWp*	*NORTE DE LA BALSA*
Subestación Crevillente Tercera Elevación	*356,40 KWp*	*CENTRO DE LA BALSA*
Subestación Crevillente Cuarta Elevación	*1.316,70 KWp*	*CENTRO DE LA BALSA*
TOTAL	**2.029,50 KWp**	

3.- ANÁLISIS DE DATOS DE PARTIDA

Se ha realizado un análisis de la información y documentación aportada por el promotor en cuanto a características de la balsa, tanto constructivas y estructurales como referentes a las variaciones de niveles de agua.

Los datos constructivos y estructurales proporcionados garantizan que la plataforma planteada puede instalarse con seguridad, ya que dispone de espacio suficiente en la masa de agua, y zonas estables donde instalar los anclajes.

Los taludes se definen a continuación:

DESCRIPCIÓN	TALUDES
Filtración La Peña	*Pendiente de 30º*
Subestación Crevillente Tercera Elevación	*Muros rectos de hormigón*
Subestación Crevillente Cuarta Elevación	*Combinación de taludes a 45º y muros rectos de hormigón*

Como se verá más adelante, para este tipo de instalaciones se suelen usar anclajes exteriores.

Los niveles de variación de nivel de agua en cada balsa se definen a continuación:

DESCRIPCIÓN	VARIACIÓN NIVEL DE AGUA
Filtración La Peña	*7 m*
Subestación Crevillente Tercera Elevación	*5 m*
Subestación Crevillente Cuarta Elevación	*8 m*

La variación de nivel de agua se ha definido en la tabla anterior, y según datos del cliente estos valores corresponden con las profundidades de las balsas, por lo que se tomará este valor como nivel máximo y el 0 como nivel mínimo, a efectos de cálculo.

En caso de que en fase de obra se detectaran variaciones en estos datos, bastaría con recalcular las longitudes de las cuerdas, ya que a balsa vacía la plataforma debería reposar en el fondo sin transmitir esfuerzos a los anclajes. Para ello las cuerdas se dimensionan con un sobrante para poder corregir su longitud.

4.- CRITERIOS DE DISEÑO

A continuación, se detallan los criterios básicos de diseño obtenidos a partir de la información proporcionada por el promotor, y de datos climatológicos propios de la ubicación del proyecto.

Filtración La Peña	
Tipo de masa de agua	*Balsa*
Nivel máximo de agua (m)	*7*
Nivel mínimo de agua (m)	*0*
Velocidad de viento para el diseño (m/s)	*30*
Carga de nieve (kN/m²)	*0,25*
Rango de temperatura ambiente (°C)	*2° a 34°*
Subestación Crevillente Tercera Elevación	
Tipo de masa de agua	*Balsa*
Nivel máximo de agua (m)	*5*
Nivel mínimo de agua (m)	*0*
Velocidad de viento para el diseño (m/s)	*30*
Carga de nieve (kN/m²)	*0,25*
Rango de temperatura ambiente (°C)	*2° a 34°*
Subestación Crevillente Cuarta Elevación	
Tipo de masa de agua	*Balsa*
Nivel máximo de agua (m)	*8*
Nivel mínimo de agua (m)	*0*
Velocidad de viento para el diseño (m/s)	*30*
Carga de nieve (kN/m²)	*0,25*
Rango de temperatura ambiente (°C)	*2° a 34°*

Tabla 1: Criterios de diseño

5.- ANÁLISIS BATIMÉTRICO / GEOMÉTRICO

Las balsas de la Filtración La Peña y la Subestación Crevillente Tercera Elevación están impermeabilizadas con una geomembrana de HDPE, y tienen unos taludes y un fondo lo suficientemente uniformes como para que la plataforma pueda reposar en ellos de forma segura en caso de que se produjera un vaciado completo.

Filtración La Peña

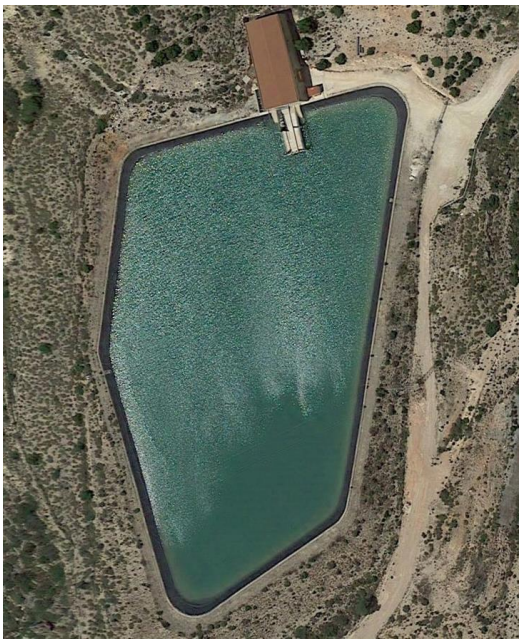


Ilustración 1: Ortofoto Filtración La Peña

La inclinación de los taludes es tal que, en caso de una descarga profunda, la plataforma reposaría en el talud este y en el fondo. Esto no supone un problema importante, pero sí debe tenerse en consideración a la hora diseñar los anclajes.

También se debe tener en cuenta que existe una construcción en la zona norte que afectará a los anclajes ubicados en esta orientación, como se verá en el apartado correspondiente.

Subestación Crevillente Tercera Elevación

Ilustración 2: Ortofoto Subestación Crevillente Tercera Elevación

Los muros son rectos, por lo que, en caso de una descarga profunda, la plataforma reposaría en el fondo.

Subestación Crevillente Cuarta Elevación

La balsa de la Subestación Crevillente Cuarta Elevación está construida con una combinación de taludes a 45° y muros verticales de hormigón, y tiene un fondo lo suficientemente uniforme como para que la plataforma pueda reposar en él de forma segura en caso de que se produjera un vaciado completo.

En la siguiente imagen pude verse esta distribución, estando representados los taludes por las líneas rojas y los muros verticales por las amarillas.

Ilustración 3: Ortofoto Subestación Crevillente Cuarta Elevación

Además, el entorno de todas las balsas está libre de obstáculos y se dispone de una superficie amplia y estable para instalar los anclajes.

6.- ACCIONES

La plataforma solar flotante está sometida a distintos tipos de cargas, que deben ser soportadas por la propia flotabilidad del sistema y por las estructuras de anclaje y amarre.

De forma simplificada, la flotabilidad del sistema será la responsable de soportar las acciones verticales, que básicamente estarán generadas por las cargas gravitatorias derivadas del peso propio de la unidad flotante, el peso de los paneles fotovoltaicos y el peso de la nieve, en su caso.

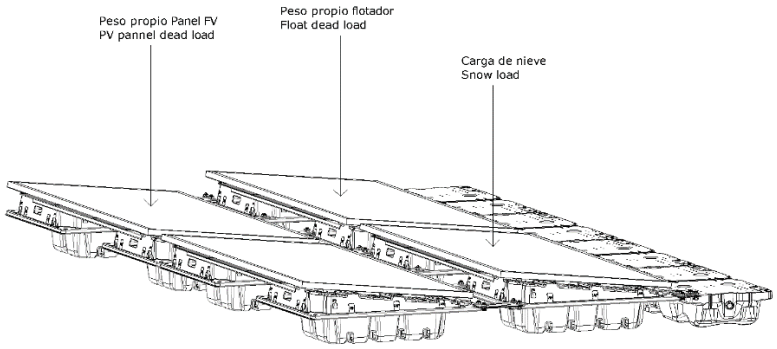


Ilustración 4: Cargas verticales

Por otro lado, los sistemas de anclaje y amarre deberán soportar las cargas con componente horizontal, que en este caso serán las cargas de viento, las cargas de oleaje y las cargas de corriente.

Por su parte, el viento generará dos efectos sobre la plataforma. Por un lado, asimilando el sistema a un paramento vertical, se obtiene una componente horizontal de empuje puro. Por otro lado, tomándolo como una cubierta se genera una componente horizontal de rozamiento, así como un empuje vertical, que se considera despreciable.

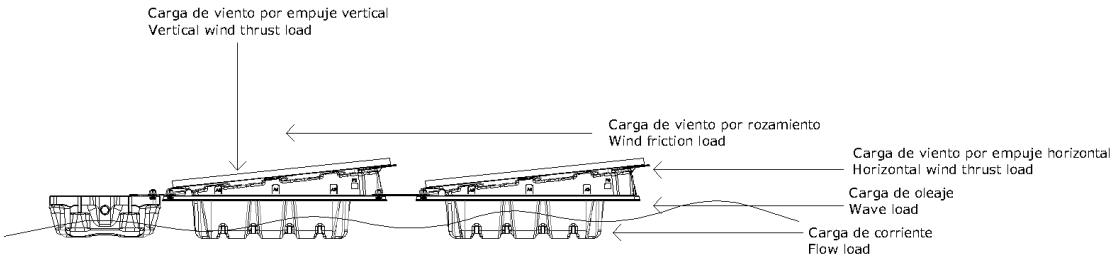


Ilustración 5: Cargas horizontales

A partir de aquí, los cálculos de las cargas correspondientes sobre la cubierta solar flotante se fundamentan en la siguiente normativa:

- *CTE-SE_AE, EC1: Acciones en las Estructuras.*
- *EUROCODIGO 1991-1-4: Viento.*
- *Bureau of Reclamation 1992 – Beach Erosion Board (cálculo de altura de ola)*

7.- CÁLCULO DE CARGAS

7.1.- CARGAS GRAVITATORIAS

Las acciones verticales que solicitan al conjunto de la plataforma flotante, así como su magnitud se recogen en la siguiente Tabla:

Peso propio Flotador	*0,08 kN*
Peso paneles FV	*0,275 kN*
Carga de nieve	*0,25 kN/m²*

Tabla 2: Cargas gravitatorias

El peso del flotador indica el peso total del sistema flotante, repercutido sobre el flotador principal (flotador, uniones, grapas, tornillos, tuercas).

El peso del panel es un peso de referencia sobre los módulos existentes en el mercado en el rango de potencias del panel del proyecto.

La carga de nieve es la carga indicada por el CTE para la zona donde se ubica el proyecto.

7.2.- CARGAS DE VIENTO

A partir de los datos climatológicos de las localizaciones concretas de cada instalación se calculan las fuerzas máximas de viento, teniendo en cuenta los procedimientos descritos en el EUROCÓDIGO 1991-4: Viento.

Se debe tener en cuenta que la acción del viento es variable dependiendo de la forma y de las dimensiones de la construcción, del entorno en el que se encuentre localizada y de las características propias del viento, por lo que para simplificar los cálculos y garantizar la seguridad, en general se estiman las situaciones más desfavorables.

7.2.1.- PERIODO DE RETORNO

Se ha adoptado un periodo de retorno de 35 años, a pesar de que la vida útil esperada de la plataforma es de 25 años. Este valor afecta al cálculo de la velocidad básica del viento, aplicando los valores de corrección que se indican en la siguiente tabla:

Periodo de retorno (años)	*1*	*2*	*5*	*10*	*20*	*50*	*200*
Coeficiente corrector	*0,41*	*0,78*	*0,85*	*0,90*	*0,95*	*1,00*	*1,08*

Tabla 3: Corrección de la velocidad básica del viento en función del periodo de retorno. Fuente: CTE

Para un periodo de retorno de 35 años estaríamos en un factor de corrección de entre 0.95 y 1. Se asume 0,973.

7.2.2.- DIRECCIONES DEL VIENTO

Aunque en cada localización el viento dominante será uno en concreto, se considera la misma velocidad máxima para todas las direcciones de viento.

7.2.3.- CÁLCULO DEL VIENTO DE DISEÑO

7.2.3.1.- CONSIDERACIONES Y REGULACIÓN

Para calcular la velocidad máxima del viento se ha utilizado el EUROCODIGO 1 (EN 1991-1-4:2005/A1:2010). No obstante, el cálculo de las fuerzas de viento no resulta sencillo y debido a la falta de normativa dedicada al sector de la energía solar flotante, se han tenido que realizar una serie de supuestos y aproximaciones para poder calcular las fuerzas resultantes sobre la plataforma.

Para ello se ha realizado un cálculo estático suponiendo que la plataforma es una estructura fija, a partir de las directrices establecidas en el EUROCÓDIGO, y posteriormente se han validado estos cálculos a través de una simulación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), obteniendo como resultado que las hipótesis adoptadas resultaban coherentes. Los datos de este estudio pueden verse en el Anexo final de este documento.

7.2.3.2.- VELOCIDAD BÁSICA DEL VIENTO

De acuerdo con el EUROCODE 1, se debe determinar la velocidad básica del viento en la localización de la planta solar flotante, a partir de la

velocidad básica fundamental. Esta es la velocidad media a lo largo de un periodo de 10 minutos en una zona plana y desprotegida frente al viento a una altura de 10 metros sobre el suelo, y se obtiene a partir de datos climatológicos.

La velocidad básica fundamental del viento correspondiente a la zonificación del proyecto es de 27m/s. Sin embargo, y para estar del lado de la seguridad, la velocidad básica fundamental del viento adoptada es de **30 m/s**.

A partir de ésta, se calcula la velocidad básica del viento (v_b) teniendo en cuenta el factor direccional (C_{dir}) y el factor estacional (C_{season}), tomando un valor recomendado de 1.

Se puede calcular la velocidad básica del viento a partir de la siguiente ecuación:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \rightarrow v_b = 1 \cdot 1 \cdot 30 = \mathbf{30\ m/s}$$

7.2.3.3.- <u>VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO</u>

La velocidad media del viento a una altura z sobre el terreno depende del factor de rugosidad y de la orografía. El factor de rugosidad del terreno (c_r) tiene en cuenta la altura sobre el nivel del suelo y la propia rugosidad. Depende de la categoría del terreno y, normalmente, para la zona II: Áreas con vegetación baja, como hierba, y obstáculos aislados (árboles, edificaciones) con separaciones de al menos 20 veces la altura de los obstáculos se toma c_r = 1.0.

El coeficiente orográfico o topográfico (c_o) incluye los efectos de aumento de la velocidad del viento en función de la orografía del terreno (colinas, escarpaduras, taludes, etc.) Normalmente se establece que c_o = 1.0, porque el cuerpo de agua no se encuentra en la cima de una colina o debajo de una cresta.

Con esto, la velocidad media del viento se calcula como:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \rightarrow 1 \cdot 1 \cdot 30 = \mathbf{30\ m/s}$$

7.2.3.4.- PRESIÓN DEL VIENTO

La presión del viento sobre la planta (q_p) depende de:

- *Coeficiente de exposición en la altura z (C_e)*
- *Presión básica del viento (q_b)*

Según el EUROCODE 1, la fórmula a aplicar es:

$$q_p(z) = C_e(z) \cdot q_b$$

La presión básica del viento (q_b) o presión dinámica se calcula teniendo en cuenta el valor básico de la velocidad y la densidad del aire.

Puede adoptarse un valor de la densidad del aire (δ) de 1,25 kg/m^3.

La fórmula que se aplica según el EUROCODE 1 es:

$$q_b = 0{,}5 \cdot \delta \cdot {v_b}^2 \rightarrow q_b = 0{,}5 \cdot 1{,}25 \cdot 30^2 = \mathbf{562{,}5}\,\frac{\boldsymbol{N}}{\boldsymbol{m^2}} = \mathbf{56{,}25}\,\frac{\boldsymbol{kN}}{\boldsymbol{m^2}}$$

En cuanto al coeficiente de exposición (C_e), se calcula a partir del grado de aspereza, que depende a su vez de la zona de ubicación de la planta y de la altura de coronación.

$$C_e = F \cdot (F + 7 \cdot k)$$

$$F = k \cdot Ln\left(\frac{max(z, Z)}{L}\right)$$

De la siguiente tabla se obtienen los parámetros necesarios para calcular el coeficiente de rugosidad (F):

Grado Aspereza	Descripción	Parámetros		
		k	L (m)	Z (m)
I	*Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5km de longitud*	*0,156*	*0,003*	*1,0*
II	*Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia*	*0,17*	*0,001*	*1,0*
III	*Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas*	*0,19*	*0,05*	*2,0*
IV	*Zona urbana en general, industrial o forestal*	*0,22*	*0,3*	*5,0*
V	*Centro de negocios de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura*	*0,24*	*1,0*	*10,0*

Tabla 4: Coeficientes para tipo de entorno. Fuente: CTE

Partiendo de que las ubicaciones corresponden con la Zona II: Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia, se aplican las fórmulas correspondientes para obtener C_e.

Para una altura de 1 metro:

$$F = k \cdot \ln\left(\frac{\max(z, Z)}{L}\right) = 0{,}17 \cdot \ln\left(\frac{1}{0{,}01}\right) = 0{,}7829$$

$$C_e = F \cdot (F + 7 \cdot k) = 0{,}7829 \cdot (0{,}7829 + 7 \cdot 0{,}17) = 1{,}54$$

Y por tanto, la presión del viento a 1 metro de altura será:

$$q_p = C_e \cdot q_b = 1{,}54 \cdot 562{,}5 = \mathbf{866{,}3}\ \frac{\boldsymbol{N}}{\boldsymbol{m^2}} = \mathbf{0{,}866}\frac{\boldsymbol{kN}}{\boldsymbol{m^2}}$$

7.2.3.5.- VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO

La velocidad máxima del viento se obtiene a partir del coeficiente de exposición, calculado en el apartado anterior. También se tiene en cuenta el factor de probabilidad (f_p) *que toma un valor de 0,97, correspondiente a la probabilidad de superación anual de 0,028 (es decir, 1 año cada 35 años). Esta velocidad es la que realmente está siendo aplicada sobre la planta solar flotante y la calculamos a partir de la fórmula:*

$$v_p\,(z) = \sqrt{C_e(z)} \cdot v_m \cdot f_p \rightarrow \sqrt{1{,}54} \cdot 30 \cdot 0{,}97 = \mathbf{36{,}11}\,\frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{s}} = \mathbf{130}\,\frac{\boldsymbol{km}}{\boldsymbol{h}}$$

7.3.- ANÁLISIS DE LAS FUERZAS DEL VIENTO SOBRE LA PLATAFORMA FLOTANTE

7.3.1.- PLANTEAMIENTO DEL EUROCÓDIGO

Al no existir una regulación concreta para el caso de plataformas flotantes, el cálculo de la acción del viento sobre el sistema se realiza tomando en consideración la normativa para edificaciones. Este cálculo se realiza mediante la combinación de dos tipos de esfuerzos: el esfuerzo sobre paramentos verticales, que generará una carga por empuje, y el esfuerzo sobre cubiertas, que generará una carga por rozamiento.

Para el caso de las cubiertas, el cálculo de las fuerzas de viento se realiza asimilando la planta a una cubierta plana rugosa, debido a su gran superficie, y a la baja inclinación de los módulos.

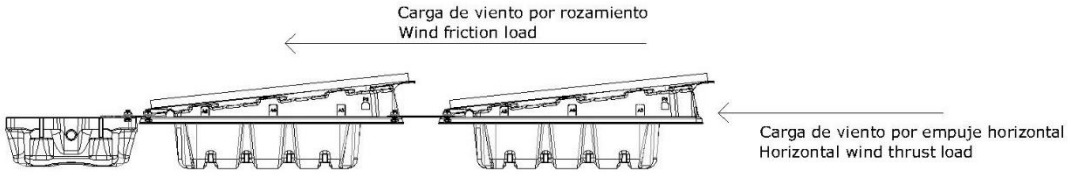


Ilustración 6: Acciones de viento

Finalmente se calcula la resultante de ambos esfuerzos, y se obtiene la acción final del viento sobre la plataforma.

7.3.1.1.- CÁLCULO DE ESFUERZOS DEL VIENTO SOBRE PARAMENTOS VERTICALES

En este apartado, se estudian los esfuerzos del viento sobre los paramentos verticales a barlovento y a sotavento.

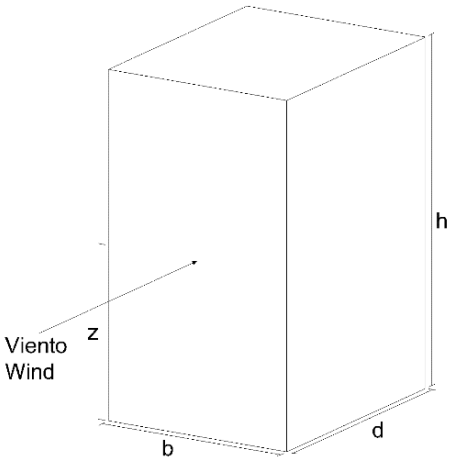


Ilustración 7:Paramento vertical

A partir de los valores indicado en la tabla 5, y partiendo de una relación h/d (altura expuesta al viento/anchura expuesta al viento) de 0,14 (relación altura del flotador/ancho de la unidad flotante), se pueden obtener los coeficientes de presión, sobre las zonas de exposición indicadas en la ilustración 8.

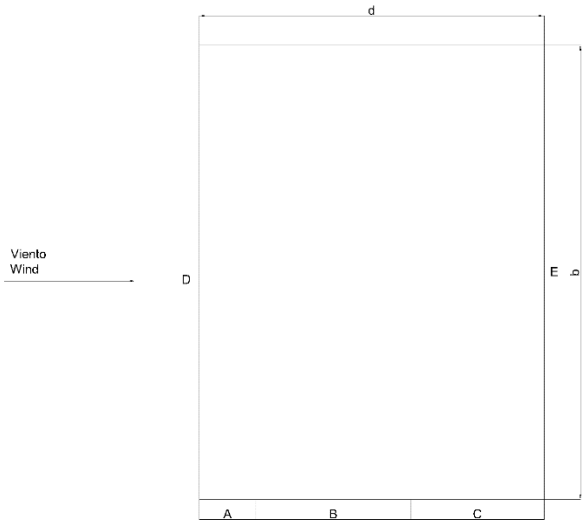


Ilustración 8: Zonas de exposición

Para el presente cálculo sólo se tienen en cuenta las zonas de exposición D y E, ya que las zonas A, B y C se generaría un efecto de succión, que resulta despreciable en comparación con las anteriores, y no se tiene en cuenta para facilitar los cálculos.

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

Tabla 5: Valores recomendados para coeficientes de presión sobre paramentos verticales.
Fuente: EUROCODIGO

De los valores de la tabla se considera el valor de C_{pe10}, que es el correspondiente a estructuras completas, frente al C_{pe1}, que corresponde a elementos simples. Según esto, se obtendrían los siguientes valores:

Dirección del viento	NORTE – SUR		ESTE - OESTE	
Zona de exposición	D	E	D	E
C_{pe}	0.7	-0.3	0.7	-0.3

Tabla 6: Coeficientes de presión

Una vez obtenidos los coeficientes de presión, se calculan las cargas del viento lateral sobre los paramentos verticales utilizando la expresión:

$$F_v = q_p \cdot \sum_i C_{pi} \cdot A_i$$

La presión del viento sobre paramentos verticales será la calculada en el punto anterior, aplicándole el coeficiente corrector por el periodo de retorno (0,973) calculado en el punto 7.2.1.

$$q_p = 866{,}3 \cdot 0{,}973 = \mathbf{843{,}1\ N/m^2}$$

El área A_i corresponde a la superficie total vertical expuesta al viento en cada una de las direcciones. Para su cálculo, se considera la altura máxima del flotador expuesta al viento a partir de un calado mínimo de 5cm. El flotador principal tiene una altura de 37 cm, por lo que la altura expuesta al viento será de 32cm, y la superficie total expuesta al viento será este valor por la longitud de la planta en cada una de las orientaciones.

Dirección del viento	NORTE – SUR		ESTE - OESTE	
Zona de exposición	D	E	D	E
C_{pe}	0.7	-0.3	0.7	-0.3
q_p (N/m²)	843,1			
Filtración La Peña				
Área exposición (m²)	19,52		11,84	
F_v (N)	16456,7		9981,9	
Subestación Crevillente Tercera Elevación				
Área exposición (m²)	19,52		12,16	
F_v (N)	16456,7		10251,7	
Subestación Crevillente Cuarta Elevación				
Área exposición (m²)	31,04		27,52	
F_v (N)	26168,9		23201,3	

Tabla 7: Carga de viento lateral

7.3.1.2.- CÁLCULO DE ESFUERZOS DEL VIENTO SOBRE CUBIERTAS. FUERZAS DE FRICCIÓN.

La baja pendiente del sistema (5°) y el gran tamaño de la planta flotante permiten calcular la acción del viento mediante fuerzas de fricción resultantes del rozamiento del viento en las superficies paralelas a las superficies exteriores.

En el apartado 7.5: Coeficientes de fricción del EUROCODE 1-4, encontramos los coeficientes de fricción (C_{fr}) utilizados en los cálculos:

Tipo de superficie	Coeficiente de fricción (C_{fr})
Suave (acero, hormigón pulido, etc)	0,01
Rugosa (hormigón rugoso, alquitrán, etc)	0,02
Muy rugosa (ondulaciones, nervios, pliegues, etc)	0,04

Tabla 8: Coeficientes de fricción por tipo de superficie. Fuente: EUROCODIGO

Puede considerarse que la superficie de la plataforma solar flotante se encuentra entre los tipos Suave y Rugosa, dependiendo de su tamaño.

Para instalaciones muy grandes puede aproximarse a una superficie suave, y para tamaños menores puede ser más parecido a una superficie rugosa. En cualquier caso, el coeficiente de fricción estará entre los valores de 0,01 y 0,02.

En este sentido, se ha realizado un estudio de fluidodinámica computacional (CFD) para su sistema flotante, obteniendo unos valores para estos coeficientes concordantes con los establecidos en la norma. Para este caso en concreto, los valores utilizados serán de 0,016 para la dirección Norte – Sur y de 0,011 para la dirección Este – Oeste. Los detalles del estudio pueden consultarse al final del presente documento, en el ANEXO SIMULACIÓN CFD.

Las fuerzas de fricción, una vez establecido dicho coeficiente, se calculan a partir de la siguiente ecuación, teniendo en cuenta que en este caso el área a considerar es la superficie total de la plataforma:

$$F_{fr} = C_{fr} \cdot q_p \cdot A_{fr}$$

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos para cada orientación.

Filtración La Peña			
q_p (N/m²)	**A_{fr} (m²)**	**NORTE-SUR**	**ESTE-OESTE**
		C_{fr}=0,016	**C_{fr}=0,011**
866,3	*2257*	*31,28 kN*	*20,85 kN*
Subestación Crevillente Tercera Elevación			
q_p (N/m²)	**A_{fr} (m²)**	**NORTE-SUR**	**ESTE-OESTE**
		C_{fr}=0,016	**C_{fr}=0,011**
866,3	*2318*	*32,127*	*21,418*
Subestación Crevillente Cuarta Elevación			
q_p (N/m²)	**A_{fr} (m²)**	**NORTE-SUR**	**ESTE-OESTE**
		C_{fr}=0,016	**C_{fr}=0,011**
866,3	*8342*	*115,62 kN*	*77,08 kN*

Tabla 9: Fuerzas de fricción

7.3.1.3.- ESFUERZOS RESULTANTES.

La resultante final de carga de viento se obtiene por la combinación de ambos esfuerzos. Los resultados se muestran a continuación:

Filtración La Peña		
Tipo de fuerza	**Norte-Sur**	**Este-Oeste**
Paramento vertical (kN)	*16,45*	*9,98*
Fricción (kN)	*31,28*	*20,85*
TOTAL (kN)	*47,73*	*30,83*
Subestación Crevillente Tercera Elevación		
Tipo de fuerza	**Norte-Sur**	**Este-Oeste**
Paramento vertical (kN)	*16,45*	*10,25*
Fricción (kN)	*32,12*	*21,41*
TOTAL (kN)	*48,58*	*31,67*
Subestación Crevillente Cuarta Elevación		
Tipo de fuerza	**Norte-Sur**	**Este-Oeste**
Paramento vertical (kN)	*26,16*	*23,20*
Fricción (kN)	*115,62*	*77,08*
TOTAL (kN)	*141,78*	*100,28*

Tabla 10: Carga de viento resultante

7.4.- CÁLCULO DE LA FUERZA DE LA OLA SOBRE LA PLATAFORMA FLOTANTE

Las cargas de oleaje se calculan a partir de la velocidad del viento y de la distancia máxima recorrida por el viento en un mismo tramo de agua sin obstáculos ó fetch (F). De ellos, podemos obtener la altura significativa de ola (Hs), el periodo (T) y la longitud de onda (L) para las diferentes direcciones. Una vez calculados estos factores, se puede obtener la carga de oleaje resultante.

Existen varias metodologías y criterios para realizar estos cálculos, de las cuales se han seleccionado las dos más utilizadas. Una vez determinada la amplitud de ola por estos dos métodos se selecciona el valor más alto, y se procede al cálculo de la fuerza de ola sobre la plataforma.

7.4.1.- CÁLCULO AMPLITUD DE LA OLA

7.4.1.1.- CRITERIO DEL BUREAU OF RECLAMATION 1992

El Bureau of Reclamation es una entidad que engloba la construcción y gestión de grandes embalses, centrales hidroeléctricas, presas y obras hidrológicas en general, en el oeste de Estados Unidos.

Además, ha desarrollado una serie de documentos técnicos para el diseño de dichas construcciones, de los que se extrae la siguiente fórmula para calcular la amplitud de ola:

$$A = \frac{V_M^{1,23} \cdot \sqrt{F}}{87,3}$$

Donde A es la amplitud de ola (m), F es el fetch (km) y V_M (m/s) es la velocidad media del viento horaria, calculada como la mitad de la velocidad básica del viento.

La siguiente tabla resume los valores de altura de ola para las distintas orientaciones:

Filtración La Peña								
V_M (m/s)	**NORTE**		**ESTE**		**SUR**		**OESTE**	
	F	**A**	**F**	**A**	**F**	**A**	**F**	**A**
15	*0,05*	*0,07*	*0,03*	*0,06*	*0,15*	*0,12*	*0,01*	*0,03*
Subestación Crevillente Tercera Elevación								
V_M (m/s)	**NORTE**		**ESTE**		**SUR**		**OESTE**	
	F	**A**	**F**	**A**	**F**	**A**	**F**	**A**
15	*0,006*	*0,02*	*0,004*	*0,02*	*0,006*	*0,02*	*0,004*	*0,02*
Subestación Crevillente Cuarta Elevación								
V_M (m/s)	**NORTE**		**ESTE**		**SUR**		**OESTE**	
	F	**A**	**F**	**A**	**F**	**A**	**F**	**A**
15	*0,009*	*0,03*	*0,011*	*0,03*	*0,015*	*0,04*	*0,012*	*0,04*

Tabla 11: Amplitud de ola según criterio de Bureau of Reclamation 1992

7.4.1.2.- CRITERIO DEL BEACH EROSION BOARD

El Beach Erosion Board es un organismo gubernamental, dependiente del Departamento de Defensa de los EEUU, cuya función principal es la protección frente a la erosión de las orillas en costas y lagos.

Para este organismo, la altura de ola se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$A = 0{,}0026 \cdot \frac{V_M^2}{g} \cdot \left(\frac{g \cdot F}{V_M^2}\right)^{0{,}47}$$

Y los valores por localización y orientación son los siguientes:

Filtración La Peña								
V_M (m/s)	**NORTE**		**ESTE**		**SUR**		**OESTE**	
	F	**A**	**F**	**A**	**F**	**A**	**F**	**A**
15	*50*	*0,09*	*30*	*0,07*	*150*	*0,14*	*10*	*0,04*
Subestación Crevillente Tercera Elevación								
V_M (m/s)	**NORTE**		**ESTE**		**SUR**		**OESTE**	
	F	**A**	**F**	**A**	**F**	**A**	**F**	**A**
15	*6*	*0,03*	*4*	*0,03*	*6*	*0,03*	*4*	*0,03*
Subestación Crevillente Cuarta Elevación								
V_M (m/s)	**NORTE**		**ESTE**		**SUR**		**OESTE**	
	F	**A**	**F**	**A**	**F**	**A**	**F**	**A**
15	*9*	*0,04*	*11*	*0,04*	*15*	*0,05*	*12*	*0,04*

Tabla 12: Amplitud de ola según el criterio del Beach Erosion Board

7.4.2.- CÁLCULO DEL PERIODO

El periodo de la ola, en segundos, se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$T = 0{,}556 \cdot V_M^{0{,}41} \cdot F^{1/3}$$

Los valores resultantes se muestran en la siguiente tabla:

Filtración La Peña								
V_M (m/s)	NORTE		ESTE		SUR		OESTE	
	F	T	F	T	F	T	F	T
15	50	0,62	30	0,52	150	0,9	10	0,36
Subestación Crevillente Tercera Elevación								
V_M (m/s)	NORTE		ESTE		SUR		OESTE	
	F	T	F	T	F	T	F	T
15	6	0,31	4	0,27	6	0,31	4	0,27
Subestación Crevillente Cuarta Elevación								
V_M (m/s)	NORTE		ESTE		SUR		OESTE	
	F	T	F	T	F	T	F	T
15	9	0,35	11	0,38	15	0,42	12	0,39

Tabla 13: Periodo de ola

7.4.3.- CÁLCULO DE LA LONGITUD DE ONDA

La longitud de onda, en metros, se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi}$$

Los valores resultantes se muestran en la siguiente tabla:

Filtración La Peña							
NORTE		ESTE		SUR		OESTE	
T	L	T	L	T	L	T	L
0,62	0,6	0,52	0,43	0,9	1,26	0,36	0,21
Subestación Crevillente Tercera Elevación							
NORTE		ESTE		SUR		OESTE	
T	L	T	L	T	L	T	L
0,31	0,15	0,27	0,11	0,31	0,15	0,27	0,11
Subestación Crevillente Cuarta Elevación							
NORTE		ESTE		SUR		OESTE	
T	L	T	L	T	L	T	L
0,35	0,19	0,38	0,22	0,42	0,27	0,39	0,23

Tabla 14: Longitud de onda

7.4.4.- CÁLCULO DE LA CARGA DE OLEAJE RESULTANTE

Una vez obtenidos los valores de amplitud de ola, se puede observar como el criterio del Beach Erosión Board arroja valores más altos, por lo que son estos los seleccionados para el cálculo de la carga de oleaje resultante, a partir de la siguiente fórmula:

$$F_o = A \cdot A_d \cdot \rho \cdot g \cdot c$$

Donde A es la amplitud de ola (m), ρ es la densidad del agua (T/m³), g es la aceleración de la gravedad, c es un factor de corrección (generalmente 0,85) y A_d es el área de la parte hundida del flotador (m²) calculada a partir del calado del flotador (d=0,06m) y de la longitud del lado de la plataforma perpendicular a la dirección del viento (L_p). Se calcula, en primer lugar, A_d para cada orientación:

$$A_d = d \cdot L_p$$

Filtración La Peña			
NORTE – SUR		**ESTE – OESTE**	
Lp (m)	**Ad (m²)**	**Lp (m)**	**Ad (m²)**
61	*3,66*	*37*	*2,22*
Subestación Crevillente Tercera Elevación			
NORTE – SUR		**ESTE – OESTE**	
Lp (m)	**Ad (m²)**	**Lp (m)**	**Ad (m²)**
61	*3,66*	*38*	*2,28*
Subestación Crevillente Cuarta Elevación			
NORTE – SUR		**ESTE – OESTE**	
Lp (m)	**Ad (m²)**	**Lp (m)**	**Ad (m²)**
97	*5,82*	*86*	*5,16*

Tabla 15: Área de la parte hundida del flotador

Tomando ahora los valores máximos de amplitud de ola para cada orientación, y con las áreas calculadas en la tabla anterior, se obtienen las cargas máximas de oleaje resultante en las direcciones principales:

Filtración La Peña											
NORTE			ESTE			SUR			OESTE		
A (m)	Ad (m²)	F_o (kN)	A(m)	Ad (m²)	F_o (kN)	A (m)	Ad (m²)	F_o (kN)	A (m)	Ad (m²)	F_o (kN)
0,09	3,66	2,62	0,07	2,22	1,25	0,14	3,66	4,39	0,04	2,22	0,74
Subestación Crevillente Tercera Elevación											
NORTE			ESTE			SUR			OESTE		
A (m)	Ad (m²)	F_o (kN)	A(m)	Ad (m²)	F_o (kN)	A (m)	Ad (m²)	F_o (kN)	A (m)	Ad (m²)	F_o (kN)
0,03	3,66	0,969	0,03	2,28	0,498	0,03	3,66	0,969	0,03	2,28	0,498
Subestación Crevillente Cuarta Elevación											
NORTE			ESTE			SUR			OESTE		
A (m)	Ad (m²)	F_o (kN)	A(m)	Ad (m²)	F_o (kN)	A (m)	Ad (m²)	F_o (kN)	A (m)	Ad (m²)	F_o (kN)
0,04	5,82	1,86	0,04	5,16	1,81	0,05	5,82	2,37	0,04	5,16	1,89

Tabla 16: Carga de oleaje resultante

7.5.- CALCULO DE LA CARGA DE CORRIENTE

La carga de corriente se calcula a partir de la siguiente fórmula, donde A_d es el área de la parte hundida del flotador, y V_c es la velocidad de la corriente, que para el caso de embalses es de 1m/s.

$$F_c = 0{,}59 \cdot A_d \cdot V_c^2$$

En la siguiente tabla, al igual que en los casos anteriores, se muestran los valores de carga de corriente para las distintas orientaciones:

Filtración La Peña			
NORTE – SUR		ESTE – OESTE	
Ad (m²)	F_c (kN)	Ad (m²)	F_c (kN)
3,66	2,15	2,22	1,31
Subestación Crevillente Tercera Elevación			
NORTE – SUR		ESTE – OESTE	
Ad (m²)	F_c (kN)	Ad (m²)	F_c (kN)
3,66	2,15	2,28	1,34
Subestación Crevillente Cuarta Elevación			
NORTE – SUR		ESTE – OESTE	
Ad (m²)	F_c (kN)	Ad (m²)	F_c (kN)
5,82	3,43	5,16	3,04

Tabla 17: Cargas de corriente

7.6.- COMBINACIÓN DE LAS CARGAS HORIZONTALES

A efectos del sistema de amarre y anclaje, se considera que las cargas de viento, oleaje y corriente actúan simultáneamente sobre la estructura solar flotante.

De esta forma se obtienen los siguientes valores de fuerzas resultantes finales:

Filtración La Peña				
CARGAS	**NORTE**	**ESTE**	**SUR**	**OESTE**
VIENTO (kN)	*47,73*	*30,83*	*47,73*	*30,83*
OLEAJE (kN)	*2,62*	*1,25*	*4,39*	*0,74*
CORRIENTE (kN)	*2,15*	*1,31*	*2,15*	*1,31*
TOTAL (kN)	**52,52**	**33,39**	**54,29**	**32,89**
Subestación Crevillente Tercera Elevación				
CARGAS	**NORTE**	**ESTE**	**SUR**	**OESTE**
VIENTO (kN)	*48,58*	*31,67*	*48,58*	*31,67*
OLEAJE (kN)	*0,969*	*0,498*	*0,969*	*0,498*
CORRIENTE (kN)	*2,159*	*1,345*	*2,159*	*1,345*
TOTAL (kN)	**51,712**	**33,514**	**51,712**	**33,514**
Subestación Crevillente Cuarta Elevación				
CARGAS	**NORTE**	**ESTE**	**SUR**	**OESTE**
VIENTO (kN)	*141,78*	*100,28*	*141,78*	*100,28*
OLEAJE (kN)	*1,86*	*1,81*	*2,37*	*1,89*
CORRIENTE (kN)	*3,43*	*3,04*	*3,43*	*3,04*
TOTAL (kN)	**147,08**	**105,14**	**147,59**	**105,21**

Tabla 18: Resultante de fuerzas viento, oleaje y corriente

8.- ANÁLISIS DE FLOTABILIDAD

8.1.- PRINCIPIO TEÓRICO

El buen comportamiento hidrostático de la estructura flotante radica en asegurar las condiciones de flotabilidad y estabilidad del sistema, considerado como un cuerpo parcialmente sumergido.

Las fuerzas de flotación son consecuencia de la presión hidrostática ejercida por el agua sobre las paredes exteriores del elemento flotante.

El empuje hidrostático es una fuerza proporcional a la profundidad a la que se encuentra sumergido el elemento a estudiar, y con dirección normal a la superficie sobre la que actúa.

Este estudio se fundamenta en el Principio de Arquímedes, por el cual un cuerpo sumergido en un líquido sufre un empuje vertical equivalente al peso del fluido desalojado por éste.

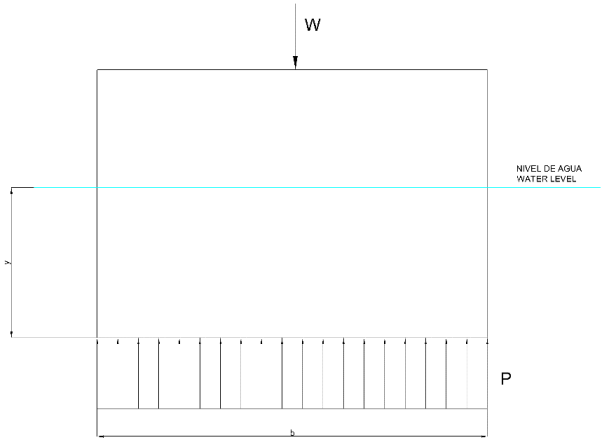


Ilustración 9: Esquema presiones – Cuerpo parcialmente sumergido

La ilustración anterior muestra el esquema de presiones a las que se ve sometido un cuerpo parcialmente sumergido en un fluido, sólo considerando las fuerzas verticales, ya que las horizontales no aplican al estudio de flotabilidad.

La fuerza W representa las cargas verticales y engloba el peso propio del sistema, incluyendo flotadores y paneles fotovoltaicos, y la carga de nieve. Por su parte la variable P representa el empuje vertical ejercido sobre la plataforma, y la "y" el calado, entendido como la altura de la parte del flotador que se encuentra sumergida.

De esta forma, la ecuación de equilibrio será la siguiente:

$$W = \rho_a \cdot V_a = \rho_a \cdot b \cdot a \cdot y$$

Donde ρ_a es la densidad del agua, b es el ancho del flotador, y a es el largo del flotador.

De esta ecuación se extrae que para que exista la flotabilidad, el peso del sistema debe de ser menor que el del agua que desplaza al sumergirse, alcanzándose el equilibrio para un calado determinado. Evidentemente, será el valor de este calado el que determine la estabilidad del sistema, ya que, para un determinado valor, la plataforma comenzará a hundirse.

8.2.- CÁLCULO DE FLOTABILIDAD

La determinación del calado es por tanto la variable fundamental para estimar la flotabilidad del sistema, pero este cálculo no resulta tan sencillo para geometrías complejas, como la del flotador a estudio. Es por esto que, a partir del diseño en 3D de dicho flotador, se han determinado los volúmenes correspondientes a varios calados para de esta forma poder establecer una relación entre ambos valores, que fuera extrapolable a todos los supuestos. Esta relación se muestra en la siguiente gráfica:

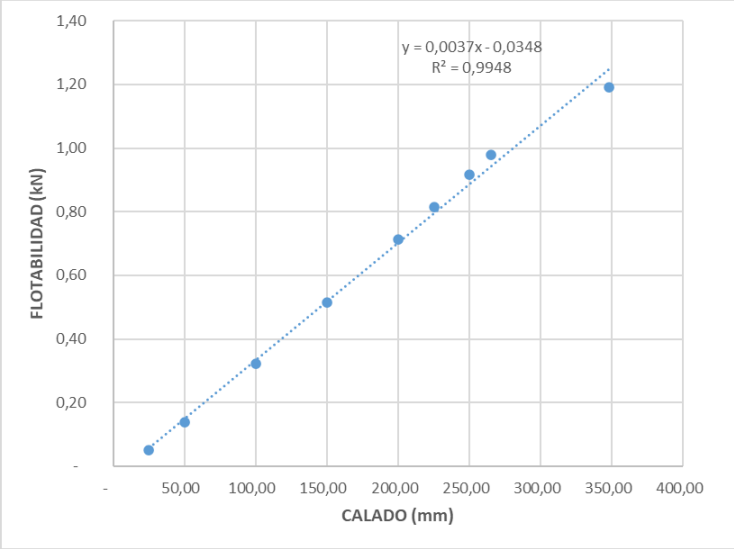


Ilustración 10: Relación entre calado y flotabilidad

A partir de aquí se obtienen los valores de flotabilidad para el flotador principal y el flotador secundario:

CONCEPTO	FLOTADOR PRINCIPAL	FLOTADOR SECUNDARIO
Flotabilidad total (kN)	*1,00*	*1,03*
Peso propio (kN)	*0,08*	*0,06*
Flotabilidad de servicio (kN)	*0,92*	*0,97*
Área (m²)	*1,10*	*0,67*
Flotabilidad de servicio (kN/m²)	*0,84*	*1,44*
Flotabilidad de servicio (kg/m²)	*84,01*	*144,44*
CALADO - PESO PROPIO (mm)	*20,00*	*20,00*

Tabla 19: Valores de flotabilidad - Flotadores principal y secundario

Una vez determinada la flotabilidad del flotador aislado, se debe calcular la flotabilidad de la unidad flotante, que como ya se ha explicado, está compuesta por dos flotadores y un panel fotovoltaico. Además, para este cálculo se ha tenido en cuenta también el peso de las uniones, tornillería y demás accesorios.

CONCEPTO	UNIDAD FLOTANTE
Flotabilidad total (kN)	*2,00*
Peso propio (kN)	*0,49*
Flotabilidad de servicio (kN)	*1,51*
Área (m²)	*3,25*
Flotabilidad de servicio (kN/m²)	*0,46*
Flotabilidad de servicio (kg/m²)	*46,38*
CALADO - PESO PROPIO (mm)	*76,00*

Tabla 20: Flotabilidad Unidad Flotante

Lo que esta tabla viene a decir es que una unidad flotante sometida a su peso propio estará sumergida 76 mm en el agua, y que podría soportar una carga adicional de 1,51 kN antes de hundirse.

Sin embargo, este último valor no es exacto si se considera la unidad flotante como parte de un conjunto, en el que además existen flotadores secundarios, por lo que se debe analizar de esta forma.

Filtración La Peña	
	ISLA
Nº Unidades Flotantes	*648*
Flotabilidad servicio UF (kN)	*1,51*
Nº Flotadores secundarios	*198*
Flotabilidad servicio FS (kN)	*0,97*
Flotabilidad servicio Total (kN)	**1170,54**
Área de la planta (m²)	*2257*
Flotabilidad servicio Total (kN/m²)	**0,518**
Subestación Crevillente Tercera Elevación	
	ISLA
Nº Unidades Flotantes	*648*
Flotabilidad servicio UF (kN)	*1,51*
Nº Flotadores secundarios	*258*
Flotabilidad servicio FS (kN)	*0,97*
Flotabilidad servicio Total (kN)	**1228,74**
Área de la planta (m²)	*2318*
Flotabilidad servicio Total (kN/m²)	**0,530**
Subestación Crevillente Cuarta Elevación	
	ISLA
Nº Unidades Flotantes	*2394*
Flotabilidad servicio UF (kN)	*1,51*
Nº Flotadores secundarios	*984*
Flotabilidad servicio FS (kN)	*0,97*
Flotabilidad servicio Total (kN)	**4596,42**
Área de la planta (m²)	*8342*
Flotabilidad servicio Total (kN/m²)	**0,547**

Tabla 21: Flotabilidad del sistema

8.3.- CARGAS QUE AFECTAN A LA FLOTABILIDAD

Una vez incluidas en el cálculo anterior las cargas derivadas del peso propio del sistema, y obtenida por tanto la flotabilidad de servicio, queda por determinar las cargas externas que deben ser soportadas por dicha flotabilidad de servicio. Éstas se reducen básicamente a la carga de nieve, que es un dato climatológico, y que para esta localización tiene un valor de 0,2kN/m².

Sin embargo, el EUROCODIGO establece que, para periodos de retorno diferentes a 50 años, la carga de nieve se modifica a través de la siguiente ecuación:

$$S_n = x \cdot S_k$$

Donde S_k es el valor característico de la carga de nieve para un periodo de retorno de 50 años, S_n es el valor de la carga de nieve para un periodo de retorno de "n" años, y "x" es un factor de corrección que se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$x = \frac{1 - V \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot [\ln(-\ln(1-p)) + 0{,}57722]}{1 + 2{,}5923 \cdot V}$$

Donde "p" es la probabilidad de excedencia anual (p=1/n) y "V" es el coeficiente de variación para la carga máxima anual de nieve (V=0,2, para periodos de retorno de hasta 100 años).

De esta ecuación se obtiene que x=0,92, y por tanto la carga de nieve corregida será:

Carga de nieve	Carga de nieve corregida
0,25 kN/m²	*0,23 kN/m²*

Tabla 22: Carga de nieve corregida

8.4.- EVALUACIÓN DE LA FLOTABILIDAD DEL SISTEMA

La siguiente tabla muestra los valores de flotabilidad del sistema y las cargas verticales a las que está sometido.

Filtración La Peña	
Flotabilidad servicio Total (kN/m²)	*0,518*
Resultante de cargas verticales (kN/m²)	*0,23*
Subestación Crevillente Tercera Elevación	
Flotabilidad servicio Total (kN/m²)	*0,530*
Resultante de cargas verticales (kN/m²)	*0,23*
Subestación Crevillente Cuarta Elevación	
Flotabilidad servicio Total (kN/m²)	*0,547*
Resultante de cargas verticales (kN/m²)	*0,23*

Tabla 23: Flotabilidad vs Cargas verticales

Como puede verse, la flotabilidad en servicio del sistema es superior a la resultante de cargas verticales, por lo que se garantiza la estabilidad de la plataforma a flotación.

9.- DISEÑO DEL AMARRE Y ANCLAJE

Dadas las características geotécnicas de la balsa y sus variaciones de nivel de agua, se considera que el sistema de amarre y anclaje debe estar compuesto por anclajes a exterior.

El sistema se dimensiona de forma que pueda soportar las cargas de viento, oleaje y corriente, calculadas en apartados anteriores, los desplazamientos horizontales derivados de las mismas, y los verticales fruto de las variaciones de nivel de agua. El sistema debe de ser capaz de asumir todas estas cargas y desplazamientos a todos los niveles de operación, e incluso permitir el asiento del sistema en el fondo de la balsa en caso de vaciado total.

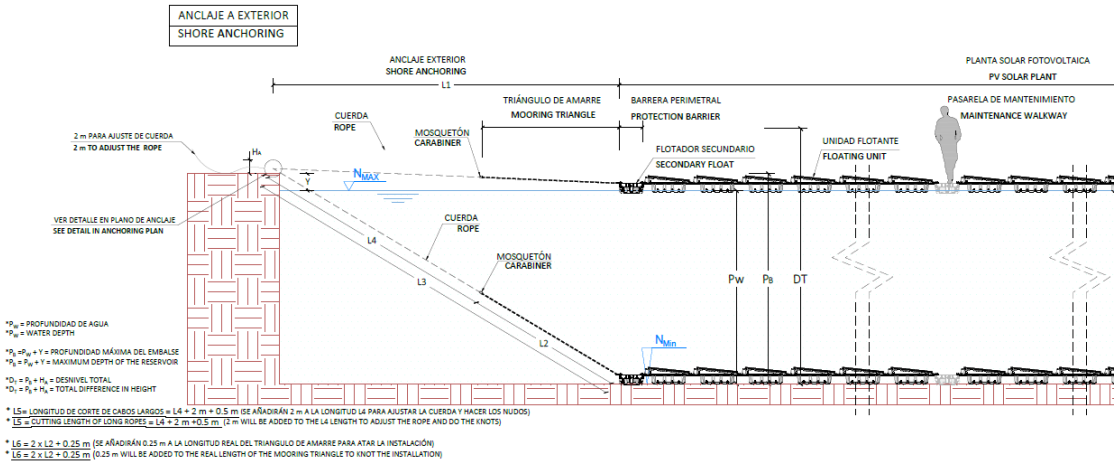


Ilustración 11: Anclaje a exterior

La imagen anterior muestra un esquema del funcionamiento del sistema. El anclaje debe soportar cargas horizontales máximas a nivel de agua máximo, mientras que según va bajando el nivel, estas cargas horizontales son cada vez menores, hasta que llegado a nivel mínimo el sistema reposa en el fondo y las cargas horizontales desaparecen. En este punto, las cuerdas no estarán en tensión, ya que se dimensionan con un margen suficiente para que esto suceda así.

Respecto a los anclajes, se disponen dos soluciones distintas. En el caso de la "Filtración la Peña", donde existen taludes de tierra, se plantea un anclaje tipo pilote, con un perfil de acero y una cimentación de hormigón armado.

En el caso de la "Subestación Crevillente Cuarta Elevación", se plantea una solución mixta, ya que la balsa tiene una combinación de zonas de talud y muro vertical. En las zonas Norte, Noreste y Noroeste se plantea la misma solución que en el caso anterior, mientras que en el Sur, Sureste y Suroeste, donde existe un muro vertical de hormigón, se dispondrá un sistema de pernos y argollas de acero a través de un agujero pasante en el muro de hormigón.

Para la "Subestación Crevillente Tercera Elevación", se dispondrá este sistema de pernos y argollas de acero en todo el perímetro, ya todo él está compuesto por muros de hormigón.

Los detalles de cada sistema pueden verse en los planos correspondientes.

9.1.- CÁLCULO DE NÚMERO DE ANCLAJES Y AMARRES

El número de anclajes y amarres para cada alineación se determina a partir de la carga máxima admisible en los puntos de amarre a la planta y teniendo en consideración la distancia máxima entre ellos para un correcto funcionamiento.

Se adopta un sistema de amarre a la planta tipo "triángulo", compuesto por dos cabos, que forman dos triángulos de amarre que se anuda a la plataforma flotante, mediante unas uniones de Poliamida reforzada con fibra de vidrio. Las longitudes y ángulos de cada uno de los triángulos pueden consultarse en los planos correspondientes.

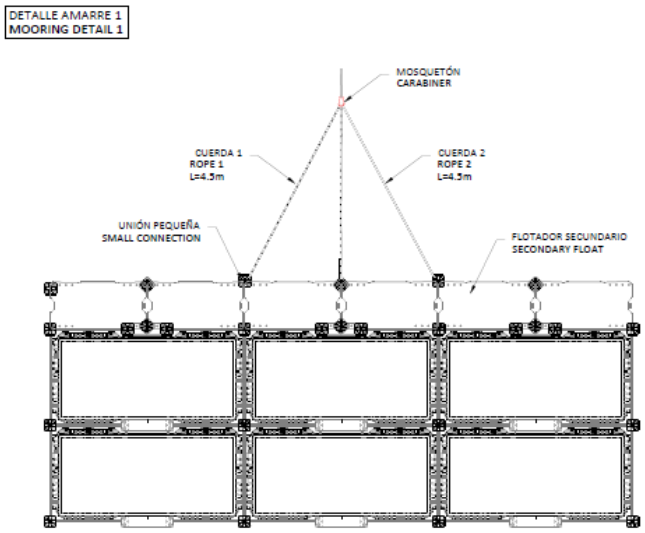


Ilustración 12: Sistema de amarre

La carga admisible de este tipo de amarre es de 14 kN, y la distancia máxima entre ejes de amarres se establece en 13,2 m para garantizar la estabilidad del sistema. Estas dos restricciones marcarán un número mínimo de anclajes cada una, de las que se seleccionarán las más restrictivas.

Para el cálculo de la carga máxima admisible se realizó un estudio por elementos finitos del flotador secundario (elemento al que van sujetos los amarres), que dio como resultado un valor de carga de "Estado Límite Último" de **14,195kN**. *Este valor se ratificó mediante ensayos internos realizados por ISIGENERE, obteniendo siempre valores superiores al de*

estudio. El mencionado estudio puede consultarse al final del presente documento.

Aplicando a este valor un coeficiente de seguridad de 2, se obtiene un valor de ELU de 7,09 kN, y teniendo en cuenta que el tipo de amarre seleccionado para el presente proyecto sujeta 2 flotadores secundarios, se determina un valor de carga máxima por amarre de 7,09 x 2 = **14,18 kN**.

Respecto a la distancia máxima entre ejes de amarres, se establecen unos valores máximos para contrarrestar las posibles deformaciones y desplazamientos que puedan darse en la plataforma debido a los efectos de succión generados por el viento.

Teniendo en cuenta estos valores, para las cargas anteriormente calculadas se determina el número de amarres (que será igual al número de anclajes) para cada alineación, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

	Filtración La Peña							
	NORTE		ESTE		SUR		OESTE	
	VALOR	AMARRES	VALOR	AMARRES	VALOR	AMARRES	VALOR	AMARRES
CARGA (kN)	52,52	4	33,39	3	54,29	4	32,89	3
LONGITUD (m)	61	6	37	4	61	6	37	4
	Subestación Crevillente Tercera Elevación							
	NORTE		ESTE		SUR		OESTE	
	VALOR	AMARRES	VALOR	AMARRES	VALOR	AMARRES	VALOR	AMARRES
CARGA (kN)	51,712	4	33,514	3	51,712	4	33,514	3
LONGITUD (m)	61	6	38	4	61	6	38	4
	Subestación Crevillente Cuarta Elevación							
	NORTE		ESTE		SUR		OESTE	
	VALOR	AMARRES	VALOR	AMARRES	VALOR	AMARRES	VALOR	AMARRES
CARGA (kN)	147,08	11	105,14	8	147,59	11	105,21	8
LONGITUD (m)	97	9	86	8	97	9	86	8

Tabla 24: Numero de amarres

Análisis del caso 'Filtración La Peña':

Como puede verse en la Tabla 24, la condición por distancia entre amarres resulta más restrictiva. Sin embargo, y como se mencionó en el

apartado 5, existen una serie de limitaciones que modificarán esta distribución.

Las siguientes imágenes muestran la situación aproximada del fondo de la balsa y la posición de la plataforma sobre la misma. Se puede apreciar cómo la existe una zona en la parte este donde, en caso de descarga profunda, la plataforma tocaría en el talud.

Ilustración 13: Fondo de la balsa, posición de la plataforma y detalle de la zona de contacto

Esta situación hace que los anclajes de la parte Este deban estar dimensionados de forma que puedan soportar el peso de la parte correspondiente de la plataforma que descansaría en el talud.

Como puede verse en la imagen anterior, un total de 3 columnas por 27 filas de paneles reposaría en el talud, con sus flotadores principales y secundarios correspondientes. La siguiente tabla muestra los pesos correspondientes a esta parte de la plataforma:

	CANTIDAD	PESO UNITARIO (kg)	PESO TOTAL (kg)
PANELES	81	27,5	2227,5
FLOTADORES PRINCIPALES	162	8	1296
FLOTADORES SECUNDARIOS	30	6	180
		TOTAL	3703,5

Tabla 25: Peso de la parte de la plataforma que reposaría en el talud

Por tanto, los amarres en la zona este deberán ser capaces de soportar 3703 kg (37,03 kN) de peso apoyados en el talud. Este peso está aplicado en la dirección vertical, por lo que habrá que descomponerlo de forma que se obtenga la fuerza aplicada en la dirección del amarre. Sabiendo que la pendiente del talud es 30º:

$$P_{talud} = P/sen30 = 37{,}03/sen30 = 74{,}07kN$$

A su vez el límite de carga por anclaje indicado en párrafos anteriores (14kN) se refiere a la carga horizontal, por lo que se debe obtener la componente horizontal de dicha fuerza:

$$P_x = P_{talud} \cdot cos60 = 74{,}07 \cdot cos60 = 64{,}15kN$$

Por lo tanto, la fuerza horizontal en los anclajes, debido al peso de la parte de la plataforma apoyada en el talud sería 64,15 kN. Dividiendo este valor por la carga máxima por anclaje se obtiene el número de anclajes necesario para soportar este peso. Se debe tener en cuenta que, al apoyar la plataforma en el talud, la carga por viento dejará de actuar, por lo que solamente se tendrá en cuenta la más restrictiva de las dos.

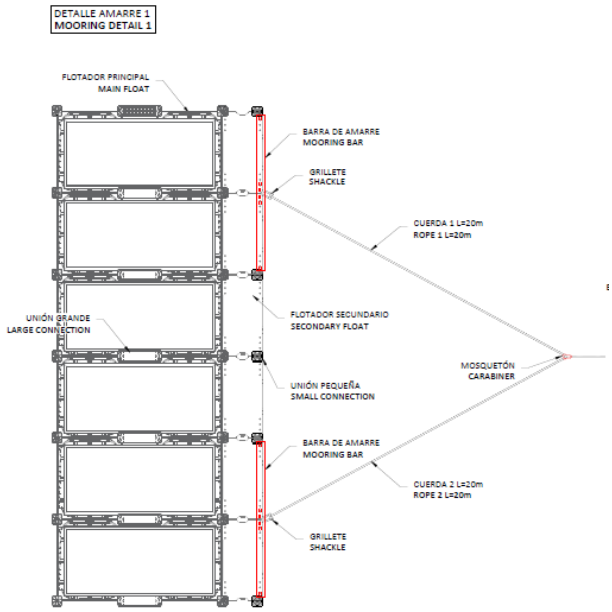
$$N_{anclajes} = \frac{64{,}15}{14} = 4{,}58\ anclajes \sim 5\ anclajes$$

Como puede verse, en la orientación Este, el número de amarres más restrictivo es de 5, por lo que será este el adoptado en esta orientación, y por una cuestión de simetría y linealidad de fuerzas, también lo será en la zona Oeste.

Por otro lado, existe el condicionante de la orientación Norte. La construcción existente hace que la distancia entre amarres no se pueda respetar, por lo que habría que utilizar un tipo de amarre diferente, que pueda trabajar a mayores distancias. Para ello se utiliza un amarre a barras, de forma que la carga se reparte de manera más uniforme, pudiendo ampliar la distancia entre los mismos.

Como puede verse en la siguiente imagen, este tipo de amarre sujeta un total de 4 flotadores secundarios, por lo que la carga máxima soportada será del doble de la establecida en el caso anterior.

Los detalles geométricos del amarre, así como su distribución en la planta se pueden ver en el plano correspondiente.



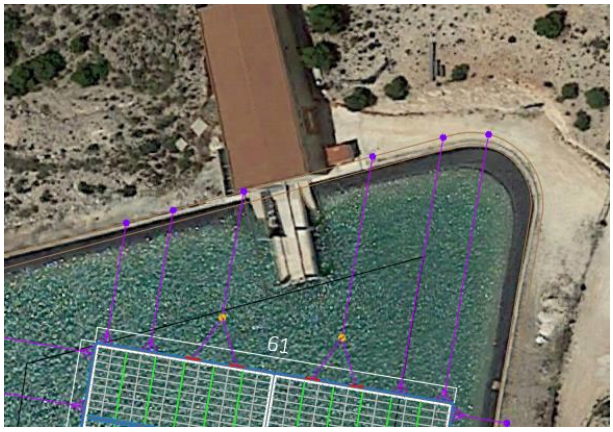


Ilustración 14: Detalle de amarre en zona Norte

En la imagen anterior puede observarse la limitación comentada y la solución que se ha adoptado para solventarla. En los cálculos anteriores se había obtenido un número de anclajes en esta zona de 6 unidades, pero la mencionada variación hace que el número también varíe.

Finalmente se adopta una solución de 4 amarres en triángulo, y dos amarres en barra (cada amarre en barra equivale a 2 amarres en triángulo a efectos de cálculo). A fin de preservar la simetría Norte- Sur, en la zona Sur se ha aumentado en una unidad el número de amarres, pasando de 6 a 8 amarres en triángulo.

La siguiente imagen muestra el número y la disposición definitiva de todos los amarres y anclajes.

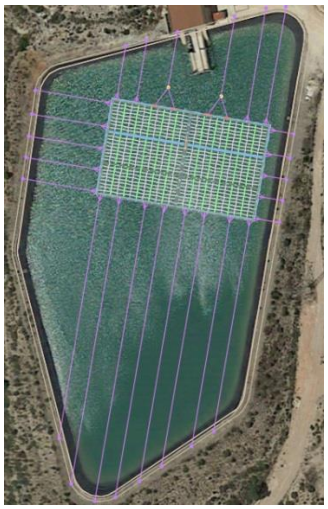


Ilustración 15: Disposición de amarres

Análisis del caso 'Subestación Crevillente Tercera Elevación':

Como puede verse la condición por distancia entre amarres resulta más restrictiva en las dos orientaciones, por lo que éste será el criterio seleccionado. La siguiente imagen muestra el número y la disposición de todos los amarres y anclajes.

Ilustración 16: Posición de la plataforma

Análisis del caso 'Subestación Crevillente Cuarta Elevación':

Como puede verse la condición por distancia entre amarres resulta más restrictiva en las dos orientaciones, por lo que éste será el criterio seleccionado. La siguiente imagen muestra el número y la disposición de todos los amarres y anclajes.

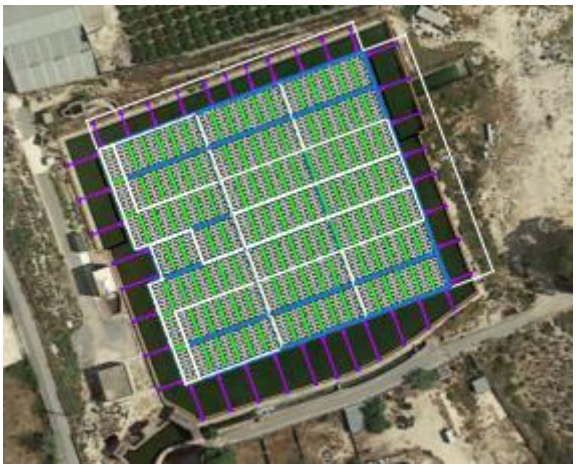


Ilustración 17: Posición de la plataforma

9.2.- CALCULO DE ANCLAJES.

Ya se ha establecido que los anclajes se realizarán a exterior.

Análisis del caso 'Filtración La Peña':

Este tipo de anclajes consisten en una serie de perfiles de acero anclados al suelo mediante una cimentación circular de hormigón armado, conformando a todos los efectos un pilote de hormigón.

Análisis del caso 'Subestación Crevillente Tercera Elevación':

Al tratarse de una balsa con muros de hormigón, el anclaje se realiza a través de unas argollas de acero, atornilladas a unos pernos pasantes, en cuyos extremos se disponen unas pletinas también de acero para repartir la tensión que se genera en punto de contacto entre argolla y muro de hormigón.

Análisis del caso 'Subestación Crevillente Cuarta Elevación':

Los anclajes serán de dos tipos:

- *Zonas Norte, Noreste y Noroeste: perfiles de acero anclados al suelo mediante una cimentación circular de hormigón armado, conformando a todos los efectos un pilote de hormigón.*
- *Zonas Sur, Sureste y Suroeste: argollas de acero, atornilladas a unos pernos pasantes, en cuyos extremos se disponen unas pletinas también de acero a ambos lados del muro.*

9.2.1.- CÁLCULO DEL PERFIL DE ACERO

Este cálculo solo aplica a los siguientes casos:

- *Filtración La Peña*
- *Subestación Crevillente Cuarta Elevación (Zonas Norte, Noreste y Noroeste)*

Los anclajes exteriores están sometidos a una carga horizontal igual a la resultante de las cargas de viento, oleaje y corriente. Una vez calculados el número de anclajes, y conociendo el valor de dicha resultante en cada orientación, se calcula la carga horizontal que debe soportar cada anclaje, y se le aplica un coeficiente de seguridad de 1,5.

	Filtración La Peña			
	CARGA (kN)	Nº AMARRES	C/A (kN)	C/A Mayorada (kN)
NORTE	52,52	8	6,56	9,84
ESTE	33,39	5	6,67	10,01
SUR	54,29	8	6,78	10,17
OESTE	32,89	5	6,57	9,86
	Subestación Crevillente Cuarta Elevación			
	CARGA (kN)	Nº AMARRES	C/A (kN)	C/A Mayorada (kN)
NORTE	147,08	11	13,371	20,056
ESTE	105,14	8	13,142	19,713
SUR	147,59	11	13,417	20,125
OESTE	105,21	8	13,152	19,728

Tabla 26: Carga soportada por cada amarre

Para el caso de la Subestación Crevillente Cuarta Elevación, ya se ha explicado que este tipo de anclajes sólo se instalarán en la zona Norte (11 anclajes), Noreste (3 anclajes) y Noroeste (3 anclajes).

Tomando como referencia un perfil HEA 100 de acero S275JR, se procede a realizar los cálculos necesarios para comprobar si es capaz de soportar los esfuerzos a los que estará sometido.

Las propiedades de la sección HEA 100 son las siguientes:

- *Sección: 2120 mm^2*
- *Sección del alma: 475 mm^2*
- *Momento de Inercia Iy: 3490000 mm^4*
- *Momento resistente Wy: 72800 mm^3*

Por su parte, en lo que se refiere al material, sus características mecánicas principales son las siguientes:

- *Módulo de Young E: 210 MPa*
- *Límite elástico fy: 275 MPa*

En primer lugar, se calcula el perfil a momento flector. Partiendo de las cargas mayoradas, y de una longitud de anclaje de 750 mm, el momento en la base del anclaje, por orientación será el siguiente:

	Filtración La Peña		
	C/A Mayorada (N)	*Longitud (mm)*	*Momento en la base (Nmm)*
NORTE	*9840*	*750*	*7380000*
ESTE	*10010*	*750*	*7507500*
SUR	*10170*	*750*	*7627500*
OESTE	*9860*	*750*	*7395000*
	Subestación Crevillente Cuarta Elevación		
	C/A Mayorada (N)	*Longitud (mm)*	*Momento en la base (Nmm)*
NORTE	*20056*	*750*	*15042000*
ESTE	*19713*	*750*	*14784750*
SUR	*20125*	*750*	*15093750*
OESTE	*19728*	*750*	*14796000*

Tabla 27: Momentos en la base del anclaje

La tensión en la base del anclaje, derivada del momento flector, se calcula dividiéndolo por el momento resistente de la sección:

	Filtración La Peña		
	Momento en la base (Nmm)	*Momento resistente (mm^3)*	*Tensión en la base (N/mm^2)*
NORTE	*7380000*	*72800*	*101,373626*
ESTE	*7507500*	*72800*	*103,125*
SUR	*7627500*	*72800*	*104,773352*
OESTE	*7395000*	*72800*	*101,57967*
	Subestación Crevillente Cuarta Elevación		
	Momento en la base (Nmm)	*Momento resistente (mm^3)*	*Tensión en la base (N/mm^2)*
NORTE	*15042000*	*72800*	*206,620*
ESTE	*14784750*	*72800*	*203,087*
SUR	*15093750*	*72800*	*207,331*
OESTE	*14796000*	*72800*	*203,241*

Tabla 28: Tensión a momento flector en la base de los anclajes

Sabiendo que el límite elástico del material es 275 N/mm^2, puede observarse como las tensiones generadas son inferiores, y por tanto el perfil cumple a momento flector.

Ampliación del Cálculo para el caso 'Filtración La Peña':

Se debe tener en cuenta que en la zona norte se han dimensionado dos amarres en barra, que asumirán, cada uno, la carga de dos amarres en triángulo, por lo que la carga que transmitirán al anclaje será del doble que las anteriores. Es por esto que el cálculo de estos anclajes debe analizarse por separado.

Ya se ha determinado que la carga mayorada en la orientación Norte es de 9,84 kN/amarre, por lo que, en este caso, los anclajes soportarían 19,68 kN cada uno.

Se procede a realizar la comprobación tomando como referencia el mismo perfil que en el caso anterior:

- *Carga mayorada: 19,68 kN*
- *Altura del perfil: 0,750m*

- *W_y: 72800 mm^3*
- *Momento en la base:*
  - $M = 19680 \cdot 750 = 14760000\ Nmm$
- *Tensión en la base:*
  - $T = \frac{M}{W_y} = 202{,}74\ N/mm^2$

Como el límite elástico del material es 275 N/mm², este perfil soportaría las cargas derivadas de utilizar este tipo de amarre.

Al tratarse perfiles normalizados, no sería necesario realizar la comprobación a esfuerzos cortantes, pero aun así se realiza para completar el procedimiento en posibles casos en los que no se usaran este tipo de perfiles.

La tensión generada por esfuerzo cortante se calcula simplemente dividiendo la carga paralela a la sección, por el área de dicha sección. En el caso de perfiles HEA, el área a considerar es el área del alma, ya que la tensión a cortante en las alas será cercana a cero. Se realiza la comprobación para el caso más desfavorable

	C/A Mayorada (N)	Área del alma (mm²)	Tensión a cortante (N/mm²)
NORTE	19680	475	41,43

Tabla 29: Tensión a cortante en la base del anclaje

De la misma forma que en el caso anterior, las tensiones generadas por el esfuerzo cortante son muy inferiores al límite elástico del material, por lo que también cumple a cortante.

En resumen, los anclajes utilizados serían perfiles HEA 100 S275JR de 750mm.

Ampliación del Cálculo para el caso 'Subestación Crevillente Cuarta Elevación':

Al tratarse perfiles normalizados, no sería necesario realizar la comprobación a esfuerzos cortantes, pero aun así se realiza para completar el procedimiento en posibles casos en los que no se usaran este tipo de perfiles.

La tensión generada por esfuerzo cortante se calcula simplemente dividiendo la carga paralela a la sección, por el área de dicha sección. En el caso de perfiles HEA, el área a considerar es el área del alma, ya que la tensión a cortante en las alas será cercana a cero.

	C/A Mayorada (N)	Área del alma (mm^2)	Tensión a cortante (N/mm^2)
NORTE	20056	475	42,223
ESTE	19713	475	41,501
SUR	20125	475	42,368
OESTE	19728	475	41,532

Tabla 30: Tensión a cortante en la base del anclaje

De la misma forma que en el caso anterior, las tensiones generadas por el esfuerzo cortante son muy inferiores al límite elástico del material, por lo que también cumple a cortante.

9.2.2.- CÁLCULO DE LOS PILOTES

Este cálculo solo aplica a los siguientes casos:

- *Filtración La Peña*
- *Subestación Crevillente Cuarta Elevación (Zonas Norte, Noreste y Noroeste)*

Una vez determinado el perfil metálico, se procede al cálculo del sistema que servirá de anclaje de este al suelo, a través de una cimentación en coronación mediante pilotes sometidos a cargas laterales.

Un pilote vertical resiste cargas laterales movilizando la presión pasiva del suelo circundante, dependiendo la reacción del suelo de la rigidez del pilote, la rigidez del suelo, y la inamovilidad en los extremos del pilote.

En situación extrema, un pilote solicitado por fuerzas transversales alcanza su estado de fallo según la siguiente clasificación:

- **Pilotes cortos o rígidos:** *El fallo se produce al excederse la resistencia lateral del suelo. Suele ocurrir en pilotes de escasa longitud, poco*

empotrados, o muy resistentes respecto a la propia resistencia lateral del terreno frente a sus empujes. El Estado Límite Último (ELU) correspondiente es de tipo geotécnico puesto que el límite de carga depende de la resistencia del terreno.

- **Pilotes largos o flexibles:** *El colapso se origina por la rotura del propio pilote tras someterse a grandes flexiones que originan la formación de rótulas plásticas a lo largo de la longitud del pilote. En este caso, el ELU viene condicionado normalmente por sobrepasar la resistencia estructural del propio pilote.*

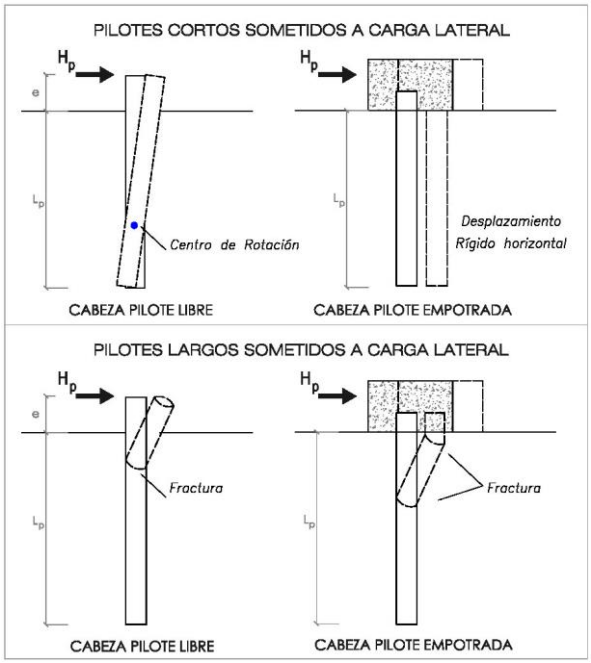


Ilustración 18: Métodos de fallo - Pilotes cortos vs. Pilotes largos

En el caso concreto del presente estudio, la clasificación corresponde al primer tipo, pilotes cortos o rígidos, con la cabeza libre.

Para el cálculo de los pilotes se utiliza el método de Broms, una solución analítica para pilotes cargados lateralmente que parte del supuesto de una falla por cortante del suelo. La siguiente figura esquematiza esta metodología.

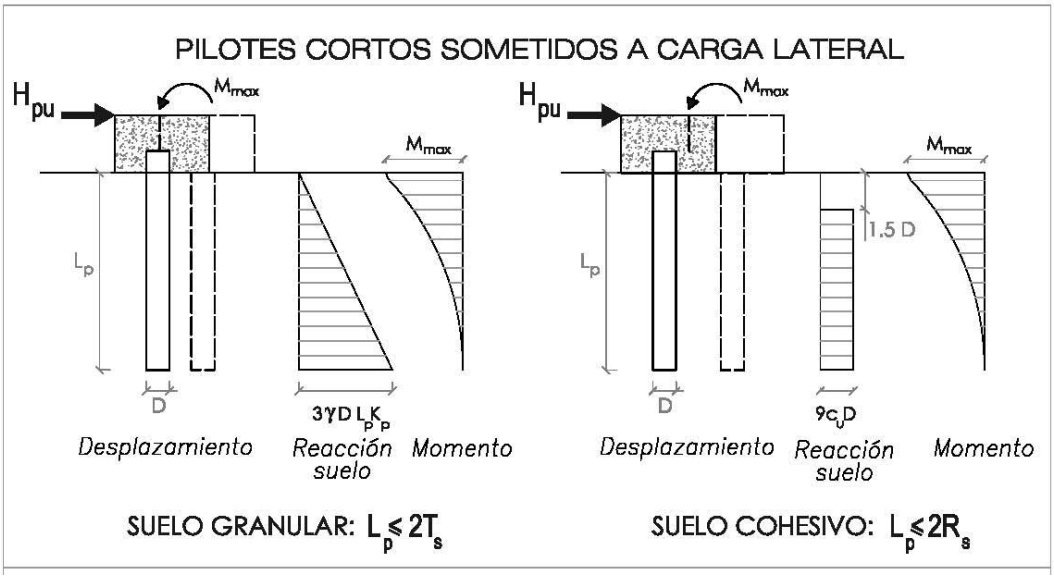


Ilustración 19: Esquema - Método de Broms

La nomenclatura del esquema es la siguiente:

- *L_p: Longitud del pilote*
- *D: Ancho del pilote (Secciones circulares de 0,2 a 1,00m de diámetro)*
- *T_s: Factor de rigidez del pilote en suelos granulares*
  - $T_s = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{n_h}}$
- *R_s: Factor de rigidez del pilote en suelos cohesivos*
  - $R_s = \sqrt[4]{\frac{E_p I_p}{K_h}}$
- *E_p: Módulo de elasticidad del material del pilote (Hormigón armado; Ep=25000MPa)*
- *I_p: Momento de inercia de la sección del pilote*
  - $Ip = \frac{\pi \cdot D^4}{64}$
- *K_h: Módulo de reacción horizontal del suelo*
- *n_h: Constante del coeficiente de reacción horizontal del suelo*
- *H_{pu}: Carga lateral última que resiste un pilote*
- *M_{max}: Momento flector máximo de la reacción del suelo en el pilote*

Estos dos últimos valores, H_{pu} y M_{max}, serán los que determinen las dimensiones finales del pilote, que deberá ser capaz de soportarlas con un coeficiente de seguridad de 3. Dichos valores se obtienen a partir de las siguientes fórmulas:

	PILOTES CORTOS	
	Granular	Cohesivo
H_{pu}	$1.5\gamma L_p^2 D K_p$	$9c'_u D(L_p - 1.5D)$
M_{max}	$\frac{2}{3} H_{pu} L_p$	$H_{pu}(0.5\, L_p + 0.75D)$

Tabla 31: Formulaciones de la solución de Broms según la naturaleza del suelo

La nomenclatura de las ecuaciones es la siguiente:

- *γ: peso específico efectivo del terreno*
- *K_p: Coeficiente de presión pasiva de Rankine*
  - $K_p = tan^2(45 + \frac{\emptyset_s}{2})$
- *Φ_s: Ángulo de rozamiento efectivo del suelo.*
- *C'_u: Resistencia al corte sin drenaje (cohesión no drenada efectiva)*

Al tratarse de una balsa de riego, las características del terreno no serán las propias del suelo de la zona, sino las del material utilizado para construir el talud. Según datos aportados por el cliente, las características mecánicas de los emplazamientos son las siguientes:

Filtración La Peña:

- *Ángulo de rozamiento Φ_s: 35*
- *Peso específico γ: 27 kN/m³*

Subestación Crevillente Cuarta Elevación:

- *Ángulo de rozamiento Φ_s: 30*
- *Peso específico γ: 23 kN/m³*

Con estos valores, y a partir de las ecuaciones anteriores se realiza un proceso de iteración que da como resultado unas dimensiones ideales del pilote de 1,25m de longitud y, 0,4m de diámetro. Cabe señalar que este proceso de iteración se realiza a partir de las cargas máximas, y por tanto, los casos más desfavorables, quedando el resto de anclajes del lado de la seguridad. A continuación, se muestra el procedimiento de comprobación de estos valores.

En primer lugar, se calcula la carga lateral que resiste el pilote (H_{pu}):

Filtración La Peña:

$$K_p = tan^2(45 + \frac{35}{2}) = 3{,}69$$

$$H_{pu} = 1{,}5 \cdot 27 \cdot 1{,}25^2 \cdot 0{,}4 \cdot 3{,}69 = 93{,}4\ kN$$

Subestación Crevillente Cuarta Elevación:

$$K_p = tan^2(45 + \frac{30}{2}) = 3$$

$$H_{pu} = 1{,}5 \cdot 23 \cdot 1{,}25^2 \cdot 0{,}4 \cdot 3 = 64{,}68\ kN$$

Y teniendo en cuenta el coeficiente de seguridad de 3, la H_{pu} de cálculo será:

Filtración La Peña:

$$H_{pu,cal} = \frac{H_{pu}}{3} = \mathbf{31{,}13\ kN}$$

Subestación Crevillente Cuarta Elevación:

$$H_{pu,cal} = \frac{H_{pu}}{3} = \mathbf{21{,}56\ kN}$$

Por otro lado, se calcula el momento flector máximo (M_{max}):

Filtración La Peña:

$$M_{max} = \frac{2}{3} H_{pu} \cdot L_p = \frac{2}{3} \cdot 93{,}4 \cdot 1{,}25 = \mathbf{77{,}83\ kN/m}$$

Subestación Crevillente Cuarta Elevación:

$$M_{max} = \frac{2}{3} H_{pu} \cdot L_p = \frac{2}{3} \cdot 64{,}68 \cdot 1{,}25 = \mathbf{53{,}9\ kN/m}$$

Y teniendo en cuenta el coeficiente de seguridad de 3, el M_{max} de cálculo será:

Filtración La Peña:

$$M_{max,cal} = \frac{M_{max}}{3} = \mathbf{25,94\ kNm}$$

Subestación Crevillente Cuarta Elevación:

$$M_{max,cal} = \frac{M_{max}}{3} = \mathbf{17,96\ kNm}$$

La siguiente tabla muestra las cargas horizontales y los momentos flectores a los que están sometidos los anclajes, por orientación, calculadas en puntos anteriores.

	Filtración La Peña	
	Carga / Anclaje (kN)	*Momento en la base (kNm)*
NORTE	*6,56*	*8,2*
ESTE	*6,67*	*8,33*
SUR	*6,78*	*8,47*
OESTE	*6,57*	*8,21*
	Subestación Crevillente Cuarta Elevación	
	Carga / Anclaje (kN)	*Momento en la base (kNm)*
NORTE	*13,37*	*16,71*
ESTE	*13,14*	*16,42*
SUR	*13,41*	*16,77*
OESTE	*13,15*	*16,44*

Tabla 32: Carga horizontal y momento en la base por anclaje

Como puede verse, tanto las cargas máximas como los momentos flectores máximos son superiores a los valores ejercidos sobre el anclaje, por lo que el pilote estaría bien dimensionado.

Ampliación del Cálculo para el caso 'Filtración La Peña':

Del mismo modo que en el cálculo de los perfiles de acero, los dos pilotes centrales de la orientación Norte deben de calcularse de manera separada, al soportar una carga mayor.

- *Carga por anclaje: 6,56 x 2 = 13,12 kN*
- *Momento en la base: 13,12 x 1,25 = 16,4 kNm*

Como puede verse ambos valores continúan por debajo de los valores límite, por lo que el diseño queda validado también para estos anclajes.

9.2.3.- CÁLCULO DEL ARMADO DEL PILOTE

Para el cálculo del armado del pilote se ha utilizado el PRONTUARIO INFORMÁTICO DEL HORMIGÓN, estableciendo los siguientes datos de partida:

- *Diámetro de la sección: 0,4 m*
- *Longitud: 1,25 m*
- *Hormigón: HA-25*
- *Número de barras: 6*
- *Diámetro de barras: 12 mm*
- *Material del armado: Acero pasivo B500S (límite elástico 500MPa)*
- *Momento máximo mayorado: 15,042 kNm (correspondiente a Subestación Crevillente Cuarta Elevación, orientación Norte)*

Las siguientes imágenes muestran los resultados devueltos por el programa de cálculo:

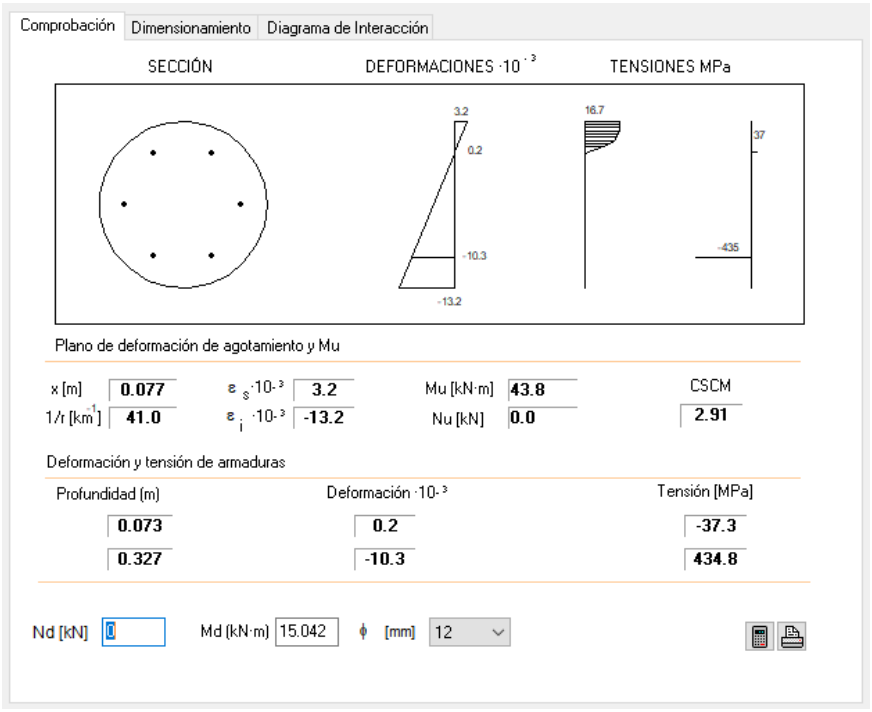


Ilustración 20: Prontuario informático del Hormigón – Comprobación Armado

De los resultados obtenidos se concluye que la armadura propuesta cumple con las solicitaciones de la estructura, al estar la Tensión del sistema por debajo del límite elástico del material, con un coeficiente de seguridad de 2,91.

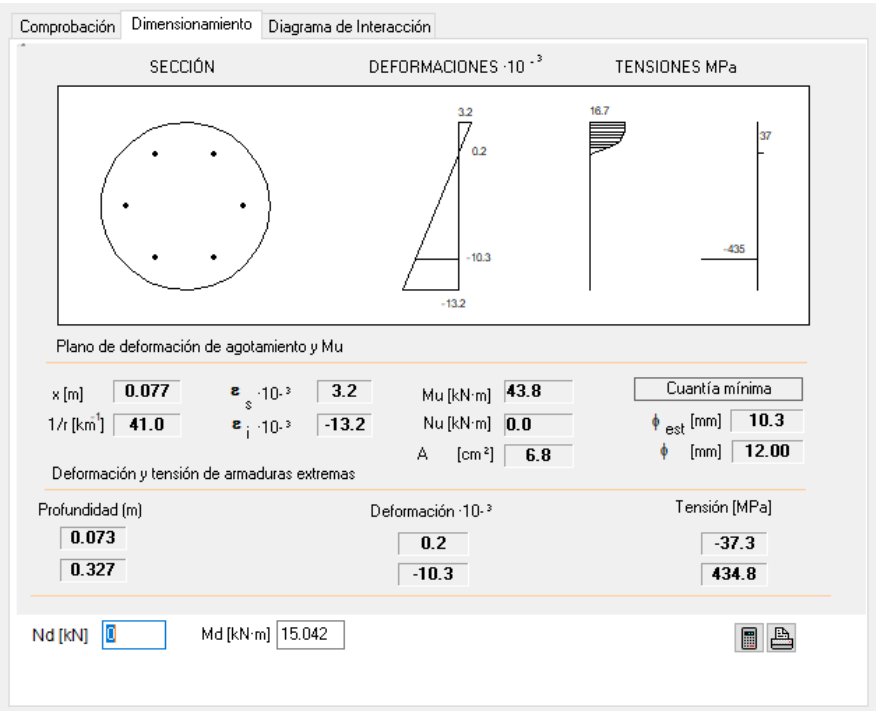


Ilustración 21: Prontuario informático del Hormigón – Dimensionamiento

Como puede verse en la anterior figura, el diámetro mínimo de la estructura sería de 10,3 mm, por lo que se toma 12mm (sección comercial).

Respecto a los estribos, se dimensionan por cuantía mínima, y por tanto se establecen barras de 8mm cada 15cm.

9.2.4.- CÁLCULO DEL PERNO Y LA ARGOLLA

Este cálculo solo aplica a los siguientes casos:

- *Subestación Crevillente Tercera Elevación*
- *Subestación Crevillente Cuarta Elevación (orientaciones Sur, Sureste y Suroeste)*

Los anclajes exteriores están sometidos a una carga horizontal igual a la resultante de las cargas de viento, oleaje y corriente. Una vez calculados el número de anclajes, y conociendo el valor de dicha resultante en cada orientación, se calcula la carga horizontal que debe soportar cada anclaje, y se le aplica un coeficiente de seguridad de 1,5.

	Subestación Crevillente Tercera Elevación			
	CARGA (kN)	Nº AMARRES	C/A (kN)	C/A Mayorada (kN)
NORTE	51,712	6	8,61	12,915
ESTE	33,514	4	8,37	12,555
SUR	51,712	6	8,61	12,915
OESTE	33,514	4	8,37	12,555
	Subestación Crevillente Cuarta Elevación			
	CARGA (kN)	Nº AMARRES	C/A (kN)	C/A Mayorada (kN)
NORTE	147,08	11	13,371	20,056
ESTE	105,14	8	13,142	19,713
SUR	147,59	11	13,417	20,125
OESTE	105,21	8	13,152	19,728

Tabla 33: Carga soportada por cada amarre

<u>Para el caso 'Subestación Crevillente Tercera Elevación':</u>

Tomando como referencia una argolla DIN 582 M12, se obtiene que ésta tiene una carga de rotura de 20 kN, por lo que podría soportar sobradamente todos los esfuerzos mayorados.

Un perno de cabeza hexagonal y ½ rosca, DIN 931 ISO 4014 M12, de acero de grado 4.6, y con un límite elástico de 240 N/mm², tendría el siguiente límite de carga axial:

$$F_{ax} = f_y \cdot S = 240 \cdot \pi \cdot 6^2 = 27143{,}36\ N = 27{,}143\ kN$$

Como puede verse el perno también presenta un límite de carga mucho mayor a los esfuerzos mayorados, por lo que el anclaje resistiría las solicitaciones máximas.

Al tratarse de elementos normalizados, sus propiedades mecánicas pueden consultarse en los prontuarios correspondientes.

Para el caso 'Subestación Crevillente Cuarta Elevación':

Tomando como referencia una argolla DIN 582 M16, se obtiene que ésta tiene una carga de rotura de 41,2 kN, por lo que podría soportar sobradamente todos los esfuerzos mayorados.

Un perno de cabeza hexagonal y ½ rosca, DIN 931 ISO 4014 M16, de acero de grado 4.6, y con un límite elástico de 240 N/mm², tendría el siguiente límite de carga axial:

$$F_{ax} = f_y \cdot S = 240 \cdot \pi \cdot 8^2 = 48254{,}86\ N = 48{,}254\ kN$$

Como puede verse el perno también presenta un límite de carga mucho mayor a los esfuerzos mayorados, por lo que el anclaje resistiría las solicitaciones máximas.

9.2.5.- RESISTENCIA DEL HORMIGÓN

Este cálculo solo aplica a los siguientes casos:

- *Subestación Crevillente Tercera Elevación*

- *Subestación Crevillente Cuarta Elevación*

Considerando que se trata de una balsa cuyos muros soportan un empuje de la masa de agua de un orden muy superior al esfuerzo de flexotracción al que puede someterle el anclaje a la plataforma flotante, se considera que no resulta necesario calcular este tipo de esfuerzo.

La única zona que podría ser susceptible de recibir sobrecargas sería la superficie alrededor del taladro pasante que se debe realizar para introducir el perno. En base a esta suposición, se colocan placas de acero de 20x20 y 8mm de espesor a ambos lados del muro, a fin de repartir los esfuerzos y evitar que se den concentraciones de tensiones en estos puntos.

9.3.- DIMENSIONADO DE CABOS DE AMARRE.

Los cabos de amarre son los elementos que unen la plataforma con el sistema de anclaje, y están fabricados con cuerdas de poliamida/poliester de alta resistencia.

9.3.1.- SECCIÓN DE CABOS DE AMARRE.

Volviendo a los datos de carga por anclaje, mayorándolas por 1,5 se obtiene una carga máxima de 19,68 kN (9,84 x 2) en el caso de 'Filtración La Peña', 12,915 kN en el caso de 'Subestación Crevillente Tercera Elevación' y 20,125 kN en el caso de 'Subestación Crevillente Cuarta Elevación'.

	Filtración La Peña	
	C/A (kN)	C/A Mayorada (kN)
NORTE	6,56	9,84
ESTE	6,67	10,01
SUR	6,78	10,17
OESTE	6,57	9,86
	Subestación Crevillente Tercera Elevación	
	C/A (kN)	C/A Mayorada (kN)
NORTE	8,61	12,915
ESTE	8,37	12,555
SUR	8,61	12,915
OESTE	8,37	12,555
	Subestación Crevillente Cuarta Elevación	
	C/A (kN)	C/A Mayorada (kN)
NORTE	13,371	20,056
ESTE	13,142	19,713
SUR	13,417	20,125
OESTE	13,152	19,728

Tabla 34: Cargas por anclaje mayoradas

Según datos del fabricante, se selecciona un cabo de nylon/poliester, de diámetro de 14mm, con una carga de rotura de 40,87 kN, capaz de soportar la carga máxima mayorada, con un coeficiente de seguridad de 2.

9.3.2.- LONGITUD DE CABOS DE AMARRE.

Para determinar la longitud de los cabos de amarre, se debe tener en cuenta la posición más desfavorable, esto es, con la balsa en el nivel mínimo de agua.

Partiendo de las longitudes de los anclajes en proyección horizontal (ver planos), y de los valores de desnivel total, se calcula la longitud que tendría el cabo de amarre cuando la plataforma se situara en la cota de nivel mínimo.

Filtración La Peña:

- *Nivel máximo de agua: 7m*
- *Nivel mínimo de agua: 0m*
- *Desnivel total: 7m*

Subestación Crevillente Tercera Elevación:

- *Nivel máximo de agua: 5m*
- *Nivel mínimo de agua: 0m*
- *Desnivel total: 5m*

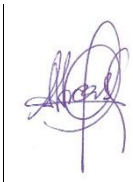
Subestación Crevillente Cuarta Elevación:

- *Nivel máximo de agua: 8m*
- *Nivel mínimo de agua: 0m*
- *Desnivel total: 8m*

También hay que tener en cuenta la longitud del triángulo de amarre, que es un dato constructivo.

Los valores de las longitudes individuales de cada cuerda, incluyendo las correspondientes a los triángulos de amarre se pueden consultar en los planos de detalle correspondientes.

Valencia, febrero de 2.022



Fdo.: Antonio Arcas Gay
Ingeniero Industrial
Nº Col: 4.758
3EPSILON solutions, s.l.u.

Fdo.: Alfonso Marsal Matoses
Ingeniero Agrónomo
Nº Col: 1.991
GLOBAL gestión técnica, s.l.

ANEXO. SIMULACIÓN CFD

Como se ha mencionado en puntos anteriores, no existe una normativa técnica relativa a la tecnología solar fotovoltaica flotante, por lo que muchos de los cálculos realizados se basan en hipótesis y aproximaciones, que se han confirmado como válidas durante los años de experiencia en el diseño de este tipo de plantas.

El caso concreto de las acciones provocadas por el viento es un caso particular, ya que tiene un comportamiento muy complejo y muy variable, por lo que requiere de un tratamiento muy cuidadoso. En este sentido, en colaboración con IDie, se realizó una simulación por ordenador en la que se trataba de verificar que los supuestos aplicados para el cálculo de las fuerzas de viento eran coherentes con la realidad. Este tipo de simulaciones son las denominadas CFD (Computational Fluid Dynamics) y se utilizan para analizar problemas complejos en las interacciones de fluidos con sólidos (o con otros fluidos).

Sin entrar a describir los detalles concretos del análisis, a continuación, se muestra un resumen del procedimiento y de los resultados obtenidos.

DIRECCIÓN Y ORIENTACIÓN DEL VIENTO

Con el objetivo de determinar las tensiones generadas, se estudiaron tres orientaciones de viento distintas, como se muestra en la siguiente ilustración.

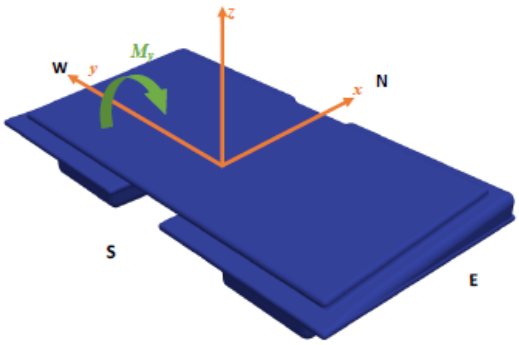


Ilustración 22: Direcciones de viento utilizadas en el CFD

- *Viento a 0º: aplicado en el lateral Sur del módulo, a lo largo del eje Norte-Sur, orientado hacia el Norte.*
- *Viento a 90º: aplicado en el lateral Este del módulo, a lo largo del eje Este-Oeste, oreintado hacia el Oeste.*
- *Viento a 180º: aplicado en el lateral Norte del módulo, a lo largo del eje Norte-Sur, orientado hacia el Sur.*

El viento a 270º no se estudió, ya que resulta un caso idéntico al de 90º debido a la simetría del módulo.

NÚMERO DE MÓDULOS

Debido a la gran complejidad de simular una planta completa, se realizaron algunas simplificaciones.

Se alinearon 15 módulos en la dirección del viento de forma que la longitud total de la columna asegurara que no se diera la singularidad por el efecto de los últimos módulos.

Perpendicularmente a la dirección del viento se simuló una única línea de módulos, ya que se observó que el viento sopla uniformemente en el frente de los módulos.

VOLUMEN DE CONTROL

El volumen de control es la abstracción matemática que representa el volumen de aire alrededor del cuerpo estudiado. Este valor debe ser definido correctamente para asegurar unos resultados lo más exactos posible.

Sin entrar en detalle, en este estudio el volumen de control se definió como un paralelepípedo con el ancho de un módulo, 20 veces la altura de un módulo y una longitud definida de tal forma que se evitaran los efectos de recirculación de aire.

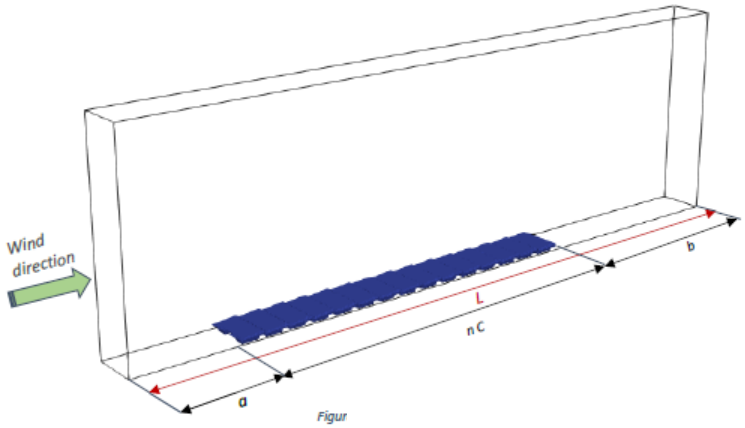


Ilustración 23: Volumen de control para CFD

La parte inferior del volumen de control se situó de forma que se respetara el calado del flotador.

Ilustración 24: Calado del flotador

La ilustración anterior muestra el volumen de control para una columna de módulos con la orientación del viento a 0°. Para la orientación a 90° el volumen de control se rotó 90°, y se simuló una fila de módulos, en lugar de una columna. Para el viento a 180° simplemente se rotaron los módulos 180°.

VELOCIDAD DEL VIENTO

El estudio se realizó para vientos de 15, 30, y 50 m/s. Más adelante se muestran los resultados para el caso de 30 m/s, al considerarse el más representativo.

SIMULACIÓN

Los detalles sobre el tamaño y tipo de malla, las condiciones de contorno, los modelos de turbulencia, número de iteraciones, etc… no se consideran relevantes para el alcance del presente anejo, sin embargo, se encuentran a disposición del cliente en caso de ser requeridos.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos son los siguientes:

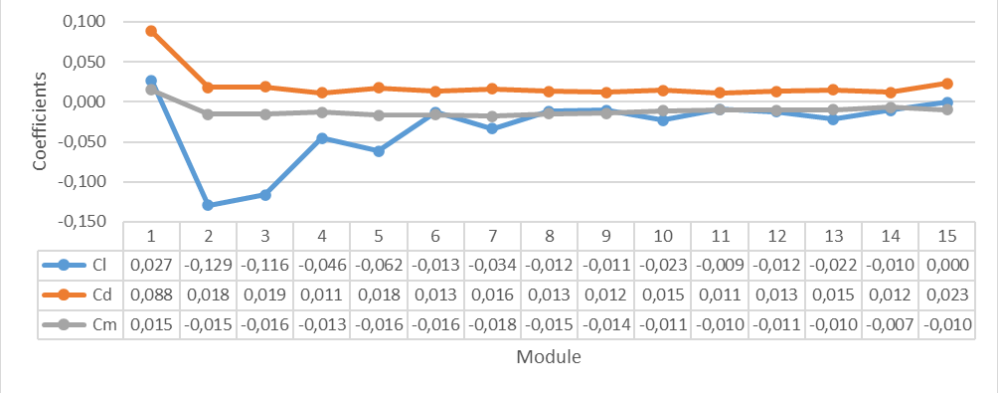
- *Fuerzas verticales y horizontales.*
- *Momentos*
- *Coeficientes adimensionales:*
- *Coeficiente de arrastre (C_D): cuantifica la resistencia que opone el objeto al fluido circundante. Cuanto mayor es el coeficiente, mayor es la resistencia.*
- *Coeficiente de sustentación (C_L): cuantifica la capacidad del objeto para contrarrestar la gravedad generada por el fluido circundante. Los valores positivos indican succión, mientras los negativos indican compresión. Cuanto mayor sea el coeficiente mayor será la succión, o la compresión.*
- *Coeficiente de momento (C_M): cuantifica la tendencia del objeto a girar respecto a su centro aerodinámico. Cuanto mayor sea el coeficiente, mayor será la tendencia a rotar.*
- *Presiones*
- *Velocidades*

A pesar de que todos ellos resultan interesantes, y hemos obtenido conclusiones importantes de los mismos, son los coeficientes adimensionales los que realmente resultan útiles para los cálculos concretos de cada proyecto, ya que no dependen de la geometría concreta de cada caso particular. Es por esto que los resultados que se presentan a continuación se resumen a estos coeficientes adimensionales y a su afectación a los proyectos.

VIENTO A 0º Y A 180º

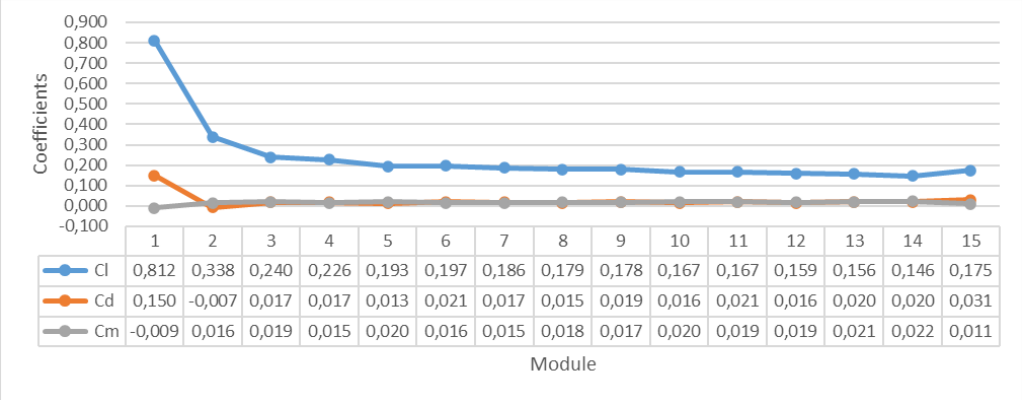
Los resultados para 0° y 180° se muestran de forma conjunta, ya que, al tratarse de la misma dirección, pero diferente sentido, lo lógico es tratarlos como uno sólo, adoptando los condicionantes de cálculo que resulten más restrictivos.

Las siguientes imágenes muestran los valores de dichos coeficientes para ambas orientaciones.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Cl	0,027	-0,129	-0,116	-0,046	-0,062	-0,013	-0,034	-0,012	-0,011	-0,023	-0,009	-0,012	-0,022	-0,010	0,000
Cd	0,088	0,018	0,019	0,011	0,018	0,013	0,016	0,013	0,012	0,015	0,011	0,013	0,015	0,012	0,023
Cm	0,015	-0,015	-0,016	-0,013	-0,016	-0,016	-0,018	-0,015	-0,014	-0,011	-0,010	-0,011	-0,010	-0,007	-0,010

Ilustración 25: Coeficientes adimensionales para viento a 0º



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Cl	0,812	0,338	0,240	0,226	0,193	0,197	0,186	0,179	0,178	0,167	0,167	0,159	0,156	0,146	0,175
Cd	0,150	-0,007	0,017	0,017	0,013	0,021	0,017	0,015	0,019	0,016	0,021	0,016	0,020	0,020	0,031
Cm	-0,009	0,016	0,019	0,015	0,020	0,016	0,015	0,018	0,017	0,020	0,019	0,019	0,021	0,022	0,011

Ilustración 26: Coeficientes adimensionales para viento a 180º

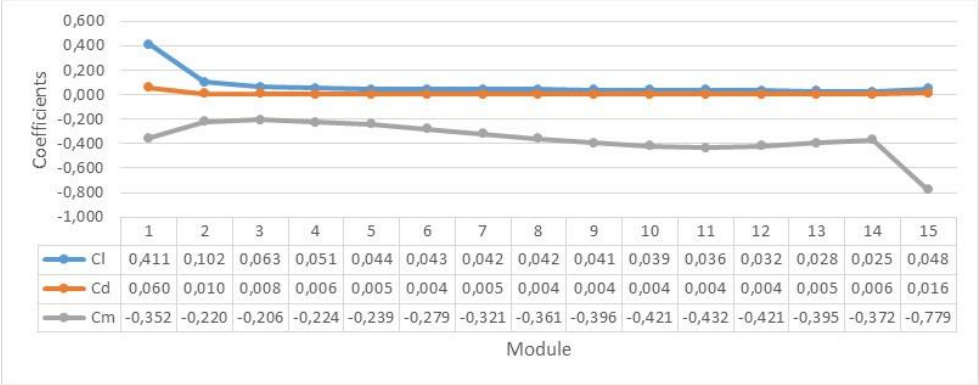
Puede observarse en ambos casos como casi todos los coeficientes muestran un valor inicial, correspondiente a la primera fila de módulos, relativamente alto y luego sufren una reducción más o menos importante. Esto confirma la existencia de un efecto de abrigo o protección de la primera fila sobre las siguientes, que va en concordancia con los criterios de cálculo establecidos en los puntos anteriores.

Respecto al coeficiente de arrastre (C_D), que es el más utilizado en los cálculos, vemos que en la situación más desfavorable (viento a 180°) presenta para la primera fila de módulos un valor de 0,15, muy superior al

establecido como coeficiente de rozamiento en los cálculos anteriores. Sin embargo, a partir de ahí reduce considerablemente su valor y varía entre 0,013 y 0,02, muy en concordancia con el 0,016 establecido en los cálculos.

VIENTO A 90º

La siguiente figura muestra los coeficientes adimensionales para la dirección del viento a 90º, relacionados con el efecto del viento Este – Oeste y Oeste – Este ya que ambas tienen el mismo efecto sobre la plataforma, al ser esta simétrica respecto a este eje. Como se puede observar, aunque la tendencia de comportamiento es similar al caso del viento a 0º y 90º (direcciones Norte – Sur y Sur – Norte) tanto para las fuerzas verticales de elevación (Cl) como para las cargas horizontales (Cd), su relevancia es significativamente menor con valores de aproximadamente la mitad.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Cl	0,411	0,102	0,063	0,051	0,044	0,043	0,042	0,042	0,041	0,039	0,036	0,032	0,028	0,025	0,048
Cd	0,060	0,010	0,008	0,006	0,005	0,004	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005	0,006	0,016
Cm	-0,352	-0,220	-0,206	-0,224	-0,239	-0,279	-0,321	-0,361	-0,396	-0,421	-0,432	-0,421	-0,395	-0,372	-0,779

Ilustración 27: Coeficientes adimensionales para viento a 90º

Por lo tanto, para una misma velocidad del viento, siempre se obtendrán valores de fuerza menores en la dirección E-O, lo que implica que el coeficiente de rozamiento a tener en cuenta será el obtenido para la dirección S-N.

CALCULO DE FLOTADORES ANÁLISIS CAE – ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

SISTEMA SOLAR FLOTANTE – ISIFLOATING DE ISIGENERE, S.L.

PROMOTOR:	ISIGENERE, S.L.
INGENIERO:	D. EMILIO PONS PUIG
Nº COLEGIADO	1.927
FECHA:	08/07/2020

C/CONSTITUCIÓN, Nº 19 – 03460 - BENEIXAMA (ALACANT)

ÍNDICE

ANEJO Nº 1. CALCULO DE FLOTADORES ANÁLISIS CAE – ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS 1

ÍNDIDE 2

1. OBJETO. 3

2. GEOMETRÍA DE LAS PIEZAS. 3

2.1. FLOTADOR PRINCIPAL. 3
2.2. FLOTADOR SECUNDARIO. 4

3. MALLADO DE PIEZAS. 5

3.1. MALLADO FLOTADOR PRINCIPAL. 5
3.2. MALLADO FLOTADOR SECUNDARIO. 5

4. MATERIALES. 6

5. CONDICIONES DE CONTORNO. 7

5.1. FLOTADOR PRINCIPAL. 7
5.2. FLOTADOR SECUNDARIO. 7

6. APLICACIÓN DE CARGAS. 8

6.1. FLOTADOR PRINCIPAL. 8
6.2. FLOTADOR SECUNDARIO. 8

7. RESULADOS. 9

7.1. FLOTADOR PRINCIPAL. 9
7.2. FLOTADOR SECUNDARIO. 12

1. OBJETO.

El objeto de presente Anejo Nº 1 es análisis de los distintos elementos de componen el sistema solar flotante ISIFLOATING de ISIGENRE, S.L. En concreto contemple el análisis del comportamiento de flotador principal (soporte de los paneles FV) y secundarios (destinados al tránsito del personal de mantenimiento y a albergar las canalizaciones eléctricas).

Se ha realizado un ÁNALISIS DE ELEMENTOS FINITOS de los dos flotadores mediante la utilización del módulo de Simulación CAE de SolidWorks.

2. GEOMETRÍA DE LAS PIEZAS.

2.1. FLOTADOR PRINCIPAL.

Se propone como flotador principal a utilizar en la estructura flotante una pieza plástica, de planta rectangular, de dimensiones 1160 x 935 mm, de geometría cóncava, que le confiere de flotabilidad y minimiza el uso de material termoplástico en su construcción. Con objeto de posibilitar el montaje inclinado de los paneles FV la pieza generará un plano inclinado a 5º sin la necesidad de utilizar elementos para sobre elevarlos.

Cada panel FV, dispuesto en posición horizontal, dispondrá de dos flotadores principales espaciados entre ellos y dispuesto en los extremos del mismo, de forma que se aumente la estabilidad del conjunto o unidad flotante (unidad básica de la estructura flotante).

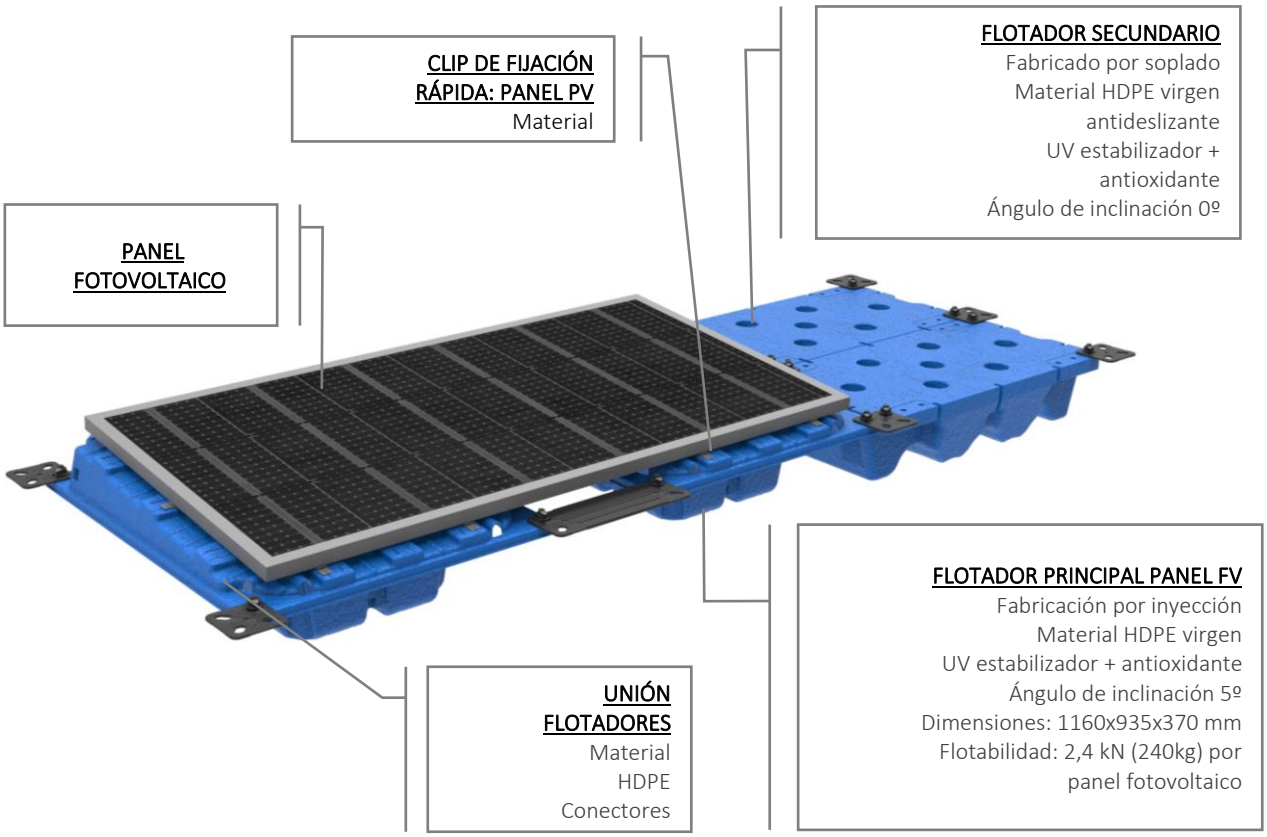


Ilustración 1. Unidad flotante, flotador principal y secundario

Para soportar las cargas a las que estará sometido, se construirá un flotador con espesores variables según zona. De forma general, dispondrá de (1) un espesor en su parte inferior de 3 mm, en la zona que le confiere de flotabilidad a la pieza y en contacto con el agua, (2) un espesor de su parte superior de 4 mm para soportar las cargas verticales y horizontales a las que va estar sometido, derivadas de las acciones de viento, nieve, corrientes, oleaje y sobrecargas de montaje, operación y mantenimiento y (3) espesores de 5 mm en la zona de esquinas para soportar la trasmisión de cargas de unos a otros.

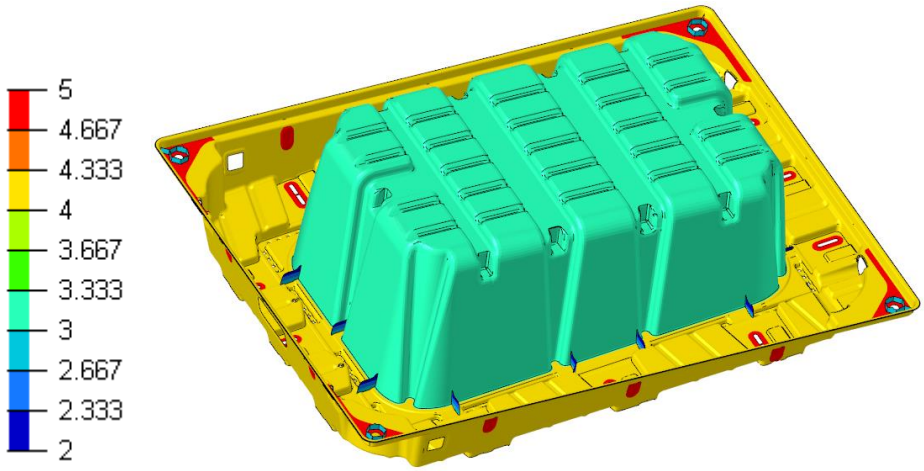


Ilustración 2. Mapeo de espesores del flotador principal.

2.2. FLOTADOR SECUNDARIO.

Se propone como flotador secundario a utilizar en la estructura flotante una pieza plástica prismática de planta rectangular, de dimensiones en planta de 1095 x 575 mm y 240 mm de altura. Las dimensiones propuestas permitirán la modularidad y compatibilidad con los principales y las unidades flotantes, tal y como se aprecia en la ilustración 1.

Para soportar las cargas a las que estará sometido, se construirá un flotador de espesor variable según zonas. La parte superior tendrá espesores superiores a 3,75 mm para soportar las cargas verticales y horizontales a las que va estar sometido, derivadas de las acciones de viento, nieve, corrientes, oleaje y sobrecargas de montaje, operación y mantenimiento, operación y mantenimiento. La parte inferior en contacto con el agua tendrá espesores superiores a 1,50 mm.

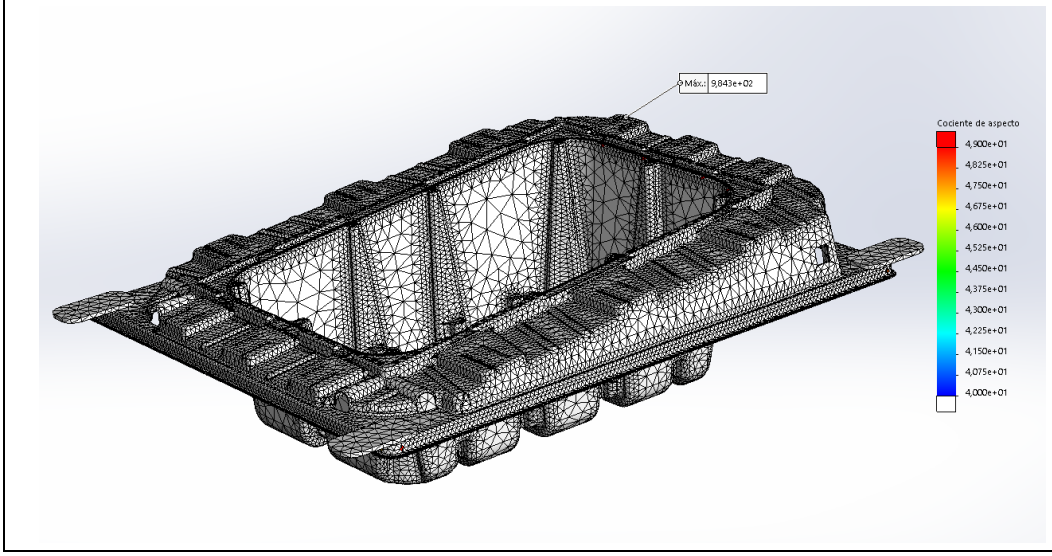
3. MALLADO DE PIEZAS.

Las piezas plásticas se modelizan con elementos triangulares de 3 nodos. El elemento tiene seis grados de libertad por nodo: desplazamientos en las direcciones nodales *x*, *y*, *z* y asimismo, rotaciones respecto a estos tres ejes. Su formulación permite realizar tanto un cálculo estático lineal como no lineal (material, geométrica).

En cuanto a la técnica de mallado automático, se utiliza un algoritmo de generación que interpola geometrías entre contornos con posibilidad de refinamiento de la malla en aquellos puntos que la geometría así lo exija. Para cada una de las mallas generadas los criterios automáticos de generación de la malla aseguran la calidad de la malla basándose en límites específicos del error.

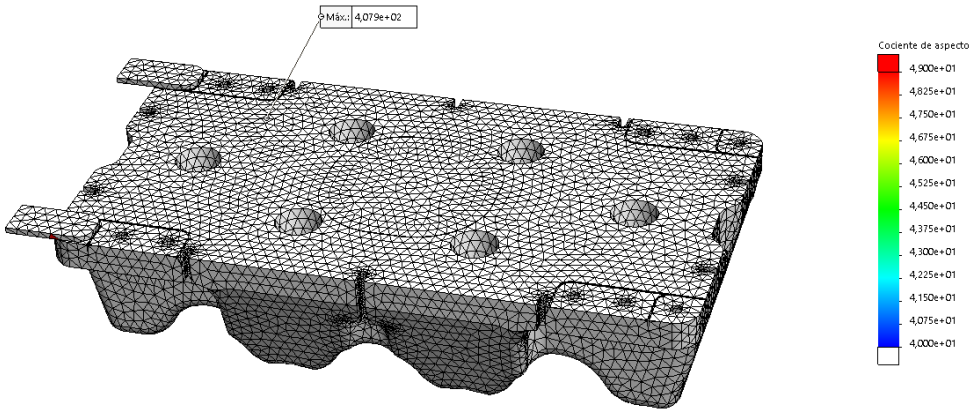
3.1. MALLADO FLOTADOR PRINCIPAL.

Modelo	Nº elementos	Nº nodos	Puntos Jacobianos	Tamaño max. elemento	Tamaño min. elemento
FLOTADOR PRINCIPAL	186.183	369.219	29	45 mm	9 mm



3.2. MALLADO FLOTADOR SECUNDARIO.

Modelo	Nº elementos	Nº nodos	Puntos Jacobianos	Tamaño max. elemento	Tamaño min. elemento
FLOTADOR SECUNDARIO	57.678	114.959	16	20 mm	4 mm



4. MATERIALES.

Para la construcción de los flotadores se han seleccionado materiales comerciales. Se utilizará polietileno de alta densidad (HDPE) con las siguiente características, según la pieza:

Propiedad mecánica		Flotador Principal (HDPE Inyección)	Flotador Principal (HDPE Soplado)
ρ_p	Densidad	960 kg/m^3	960 kg/m^3
σ_y	Tensión de fluencia	27 MPa	22.8 MPa
σ_r	Tensión última (rotura)	31 MPa	36.5 MPa
ε_y	Alargamiento punto de fluencia	5%	6%
E_m	Módulo de flexión	1400 MPa	855 MPa
μ	Coeficiente Poisson	0.40	0.40

5. CONDICIONES DE CONTORNO.

5.1. FLOTADOR PRINCIPAL.

En el análisis del flotador principal se ha introducido al modelo únicamente como condición de contorno la limitación de desplazamiento el eje X (dirección de aplicación de la las fuerzas de tracción) y desplazamiento en les eje Z la uniones en un extremo.

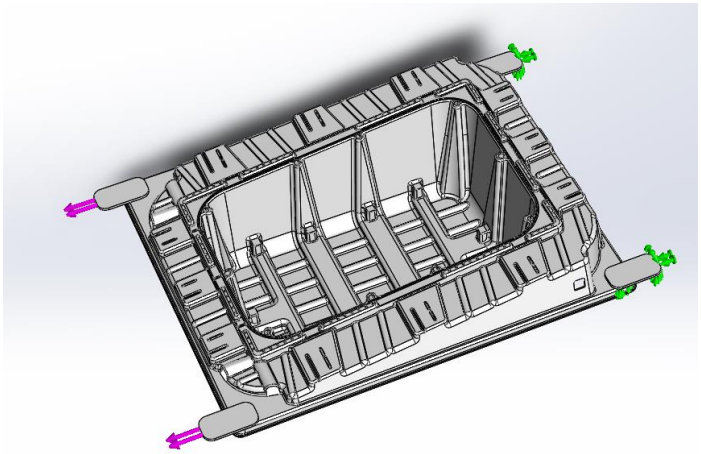


Ilustración 3. Condiciones de contorno y aplicación de cargas sobre flotador principal.

5.2. FLOTADOR SECUNDARIO.

En el análisis de flotador secundario se ha introducción al modelo como condiciones de contorno la limitación del desplazamiento de la base en el eje Z, y limitación de desplazamiento de el eje X (dirección de aplicación de las fuerzas de tracción) de los puntos de unión y desplazamiento en el eje Y de los laterales en la uniones donde se aplica la carga de tracción.

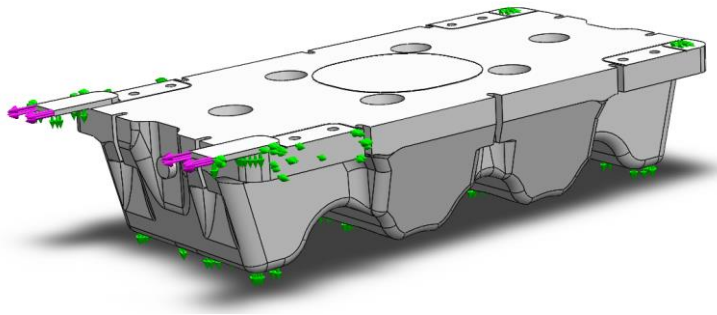


Ilustración 4. Condiciones de contorno y aplicación de cargas sobre flotador secundario.

6. APLICACIÓN DE CARGAS.

6.1. FLOTADOR PRINCIPAL.

Sobre el flotado principal se aplican cargas sobre las uniones opuestas a las que se ha limitado el desplazamiento en el eje X. Las cargas se aplicarán en la dirección X produciendo una tracción sobre la pieza y aplicarán en la misma cuantían en las dos esquinas de la pieza (flechas magenta de la Ilustración 3).

La magnitud de la carga se ha ido incrementando en análisis sucesivos hasta determinar la carga máxima que puede soportar de la pieza con el diseño y materiales propuesto.

6.2. FLOTADOR SECUNDARIO.

Sobre el flotador secundario se aplican

1. **Cargas de tracción.** las cargas tracción se aplicarán en las uniones opuestas a las que sea limitado el desplazamiento en el X. Las cargas se aplicarán en la dirección X produciendo una tracción sobre la pieza y aplicarán en la misma cuantían en las dos esquinas de la pieza (flechas magenta de la Ilustración 4).

   La magnitud de la carga se ha ido incrementando en análisis sucesivos hasta determinar la carga máxima que puede soportar pieza con el diseño y materiales propuesto

2. **Cargas compresión.** Se aplicará carga a compresión en el eje Z, centrada en el flotador y sobre una zona de diámetro 300 mm, equivalente al peso de una persona transitando sobre el mismo. Se establece como carga de diseño 100 kg.

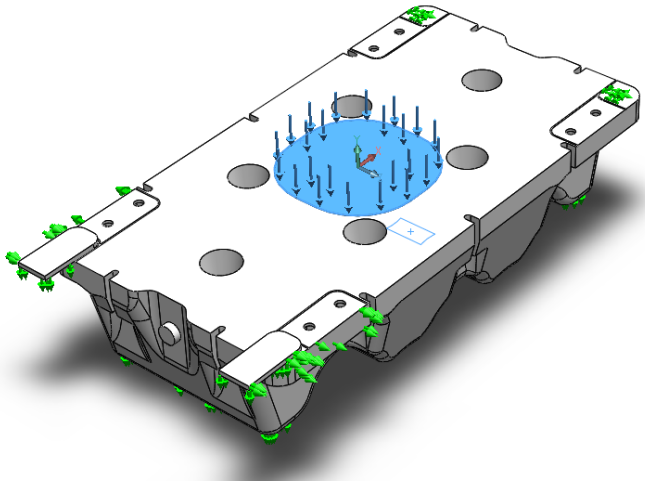


Ilustración 5. Zona de aplicación de la carga de compresión sobre flotadores secundarios.

7. RESULADOS.

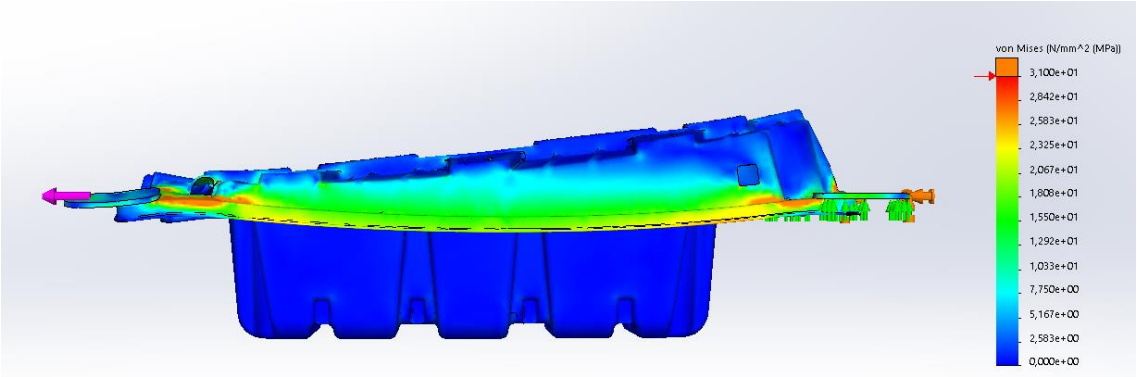
7.1. FLOTADOR PRINCIPAL.

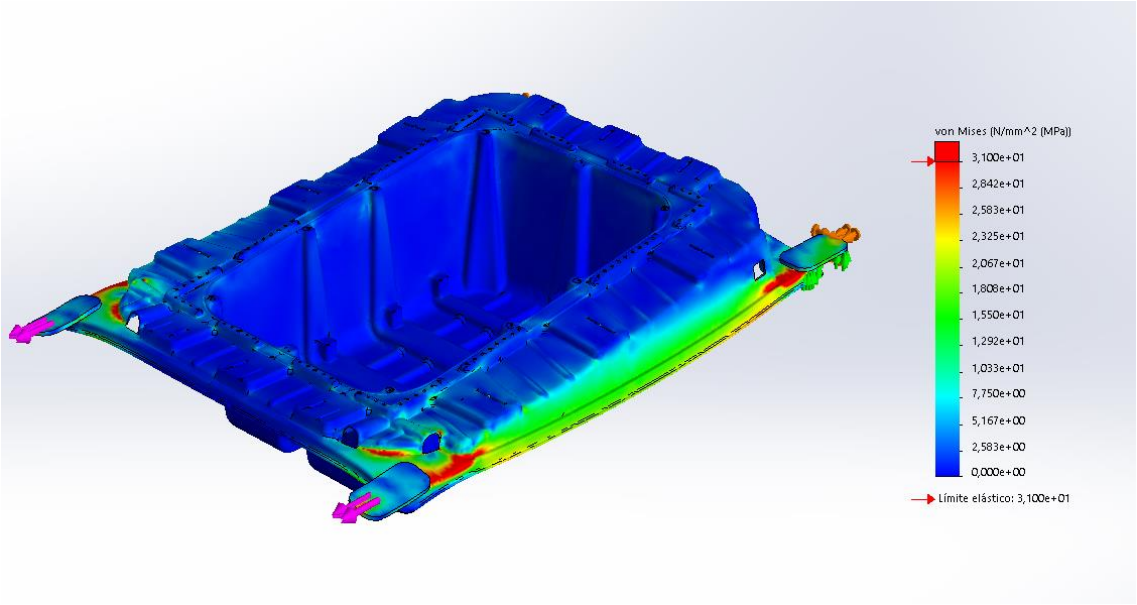
El flotador principal ha sido analizado con fuerza de tracción creciente hasta una carga de 2000 kg (20 kN). La pieza sometida a estar de tracción presenta tensiones de Von Mises puntualmente elevadas en las esquinas, donde se prevé empiecen efectos localizados de plastificación del material y redistribución de tensión.

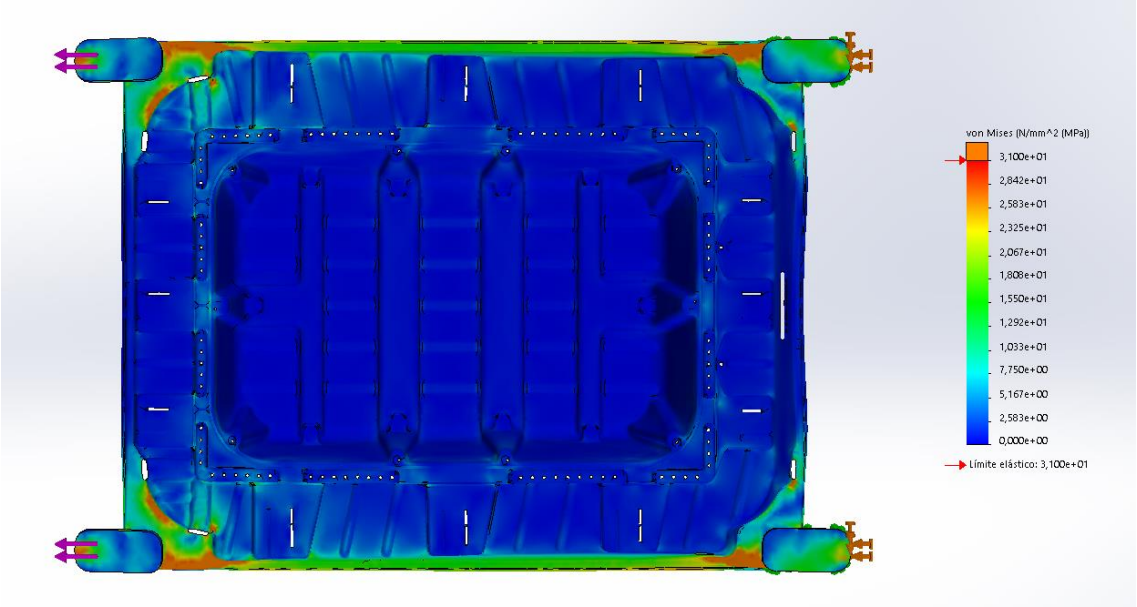
En cuanto a las deformaciones de pieza se observan deformaciones máximas bajo carga máxima de 18,54 mm. En la zona de anclaje del panel y bajo carga de 2000 kg se observan absolutas de 12,47 mm en la parte inferior del plano/marco de apoyo y d 12,40 mm en la parte superior del mismo, lo que supone una deformación de 0,07 mm del plano de apoyo, valor completamente aceptable dadas las holguras de diseño entre el marco de placa y los flotadores, y entre el marco de la placa y lo clips de fijación.

Esta carga de 2.000 kg (20 KN) a los efectos de diseño será considerada de rotura o carga máxima, utilizando como VALOR DE CALCULO EN ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS de 1.000 kg (10 KN), considerando un COEFICIENTE PARCIAL DE SEGURIDAD igual a 2, es decir, considerando una tensión de máxima de trabajo de 15,5 MPa. Este coeficiente parcial de seguridad del material tiene en consideración la degradación del material a lo largo de la vida útil perseguida para el producto (25 años para el diseño que nos ocupa) así como la variación de la tensión de fluencia del material a las distintas temperaturas.

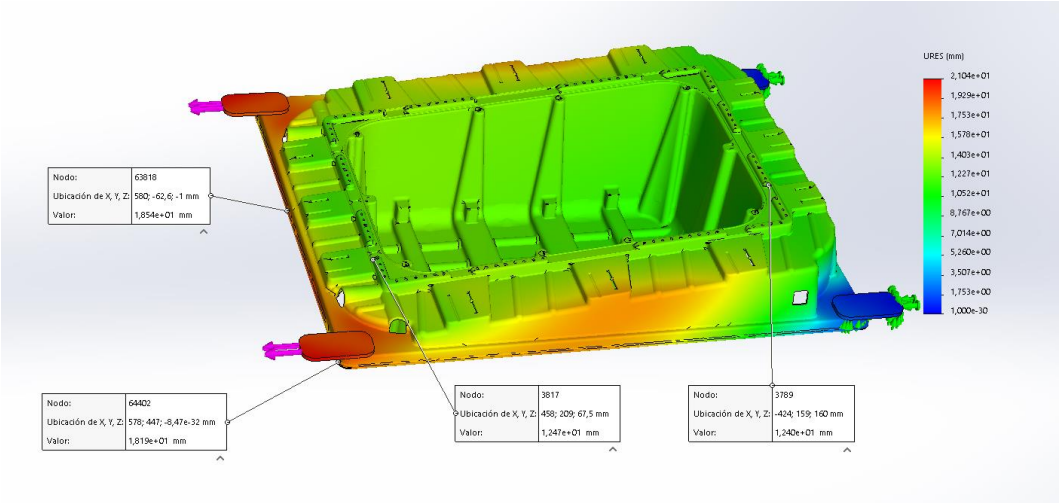
Análisis de esfuerzo – Tensiones Von Mises – Carga de tracción aplicada = 2.000 kg

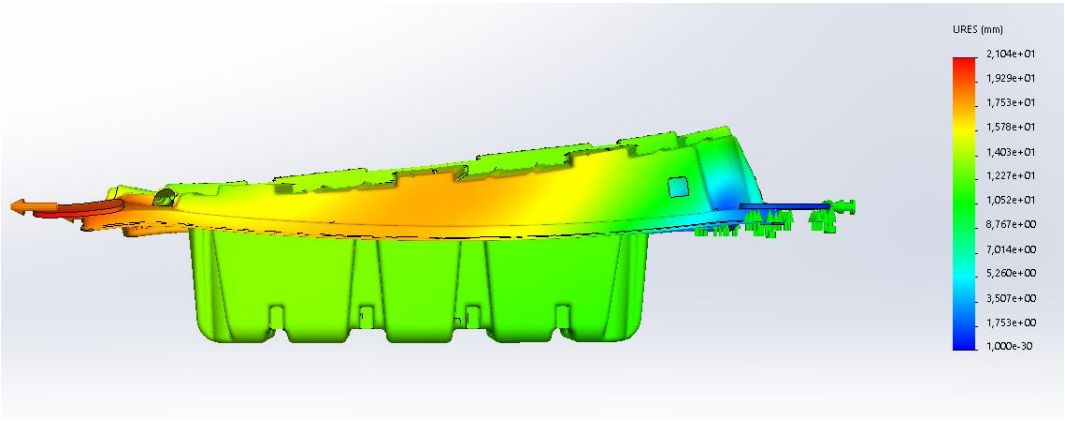


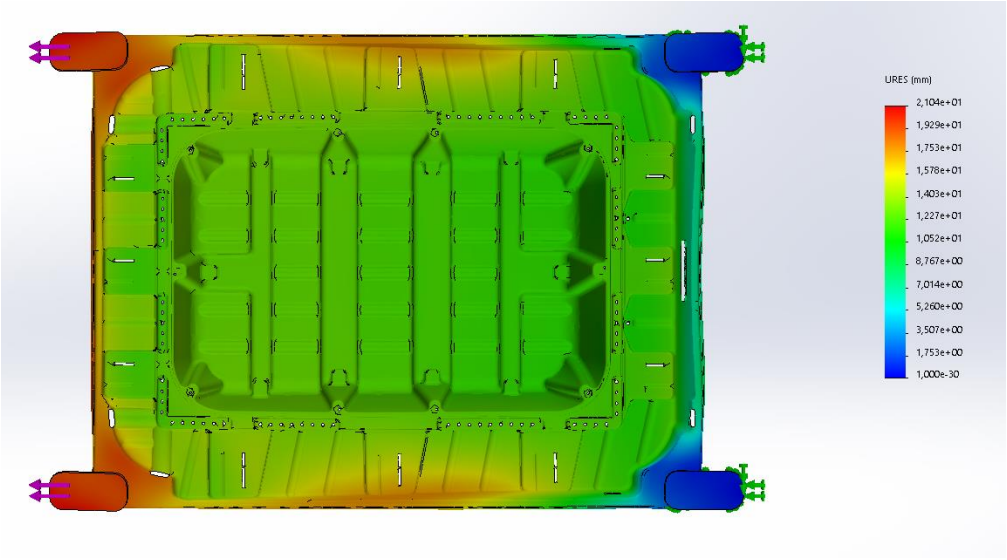

von Mises (N/mm^2 (MPa))
3,100e+01
2,842e+01
2,583e+01
2,325e+01
2,067e+01
1,808e+01
1,550e+01
1,292e+01
1,033e+01
7,750e+00
5,167e+00
2,583e+00
0,000e+00
Límite elástico: 3,100e+01


von Mises (N/mm^2 (MPa))
3,100e+01
2,842e+01
2,583e+01
2,325e+01
2,067e+01
1,808e+01
1,550e+01
1,292e+01
1,033e+01
7,750e+00
5,167e+00
2,583e+00
0,000e+00
Límite elástico: 3,100e+01

Análisis de deformaciones absolutas – Carga tracción aplicada 2.000 kg







7.2. FLOTADOR SECUNDARIO.

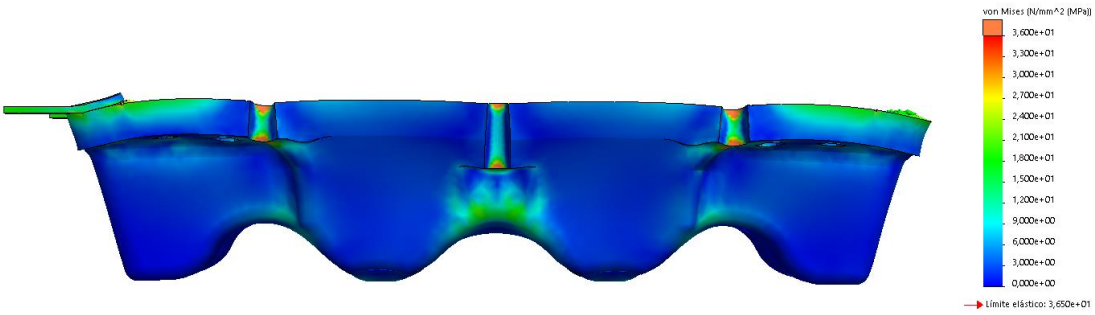
El flotador secundario ha sido analizado con fuerza de tracción creciente hasta una carga de 3000 kg (30 kN). La pieza sometida a estar de tracción presenta tensiones de Von Mises puntualmente elevadas en las esquinas, donde se prevé empiecen efectos localizados de plastificación del material y redistribución de tensión.

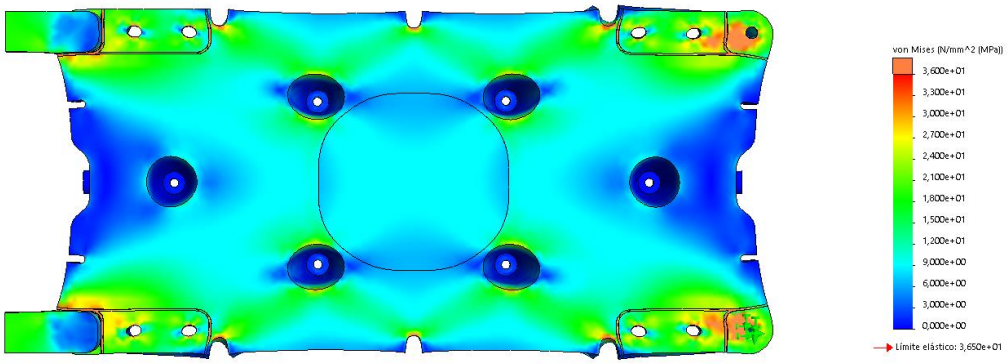
En cuanto a las deformaciones de pieza se observan deformaciones máximas bajo carga máxima de 21,31 mm. Esta deformaciones es completamente aceptable con las holguras con la que ha sido diseñado el sistema y sus componentes.

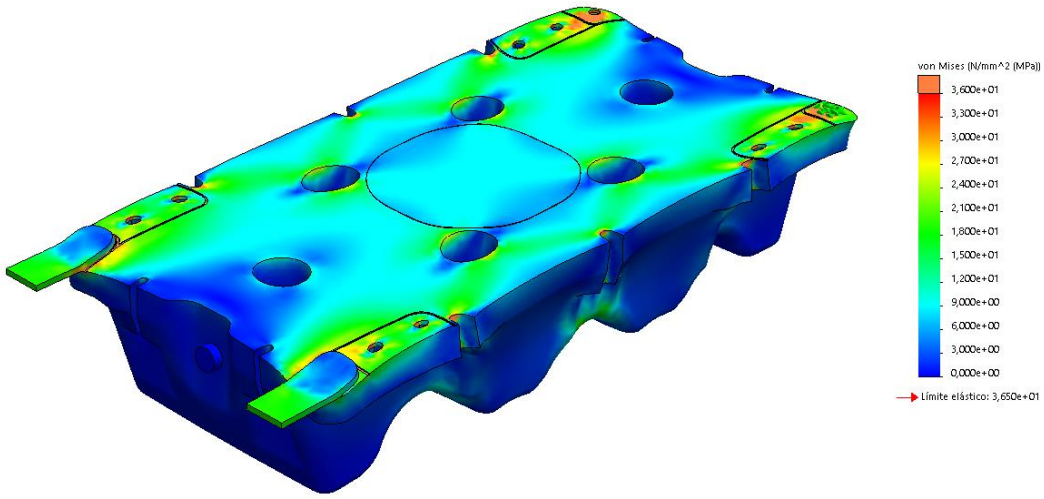
Esta carga de 3.000 kg (30 KN) a los efectos de diseño será considerada de rotura o carga máxima, utilizando como VALOR DE CALCULO EN ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS de 1.500 kg (15 KN), considerando un COEFICIENTE PARCIAL DE SEGURIDAD igual a 2, es decir, considerando una tensión de máxima de trabajo de 18,5 MPa. Este coeficiente parcial de seguridad del material tiene en consideración la degradación del material a lo largo de la vida útil perseguida para el producto (25 años para el diseño que nos ocupa) así como la variación de la tensión de fluencia del material a las distintas temperaturas.

Finalmente, el flotador secundario ha sido analizado a carga vertical de compresión en la zona central, en un circulo de 300 mm de diámetro y aplicando una carga de 100 kg. Es estado tensional de la pieza sometida a esta carga se encuentra muy por debajo de las tensiones máxima, del orden de 9 MPA. Las deformaciones máximas se concentran evidentemente en la zona central del área de aplicación de la carga, con un máximo de 21 mm, es decir 1/20 de la luz entre los apoyos centrales. Se considera este valor aceptable, ya que a la vista del estado tensional las deformaciones no serán permanentes tras dejar de someter la carga.

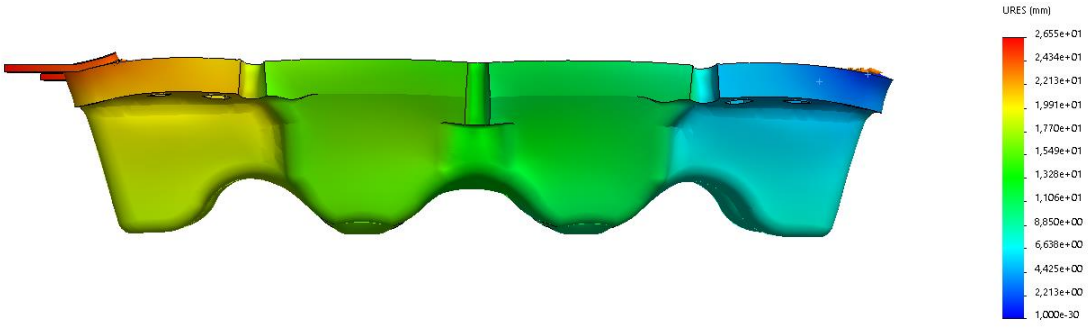
Análisis de esfuerzo – Tensiones Von Mises – Carga de tracción aplicada = 3.000 kg

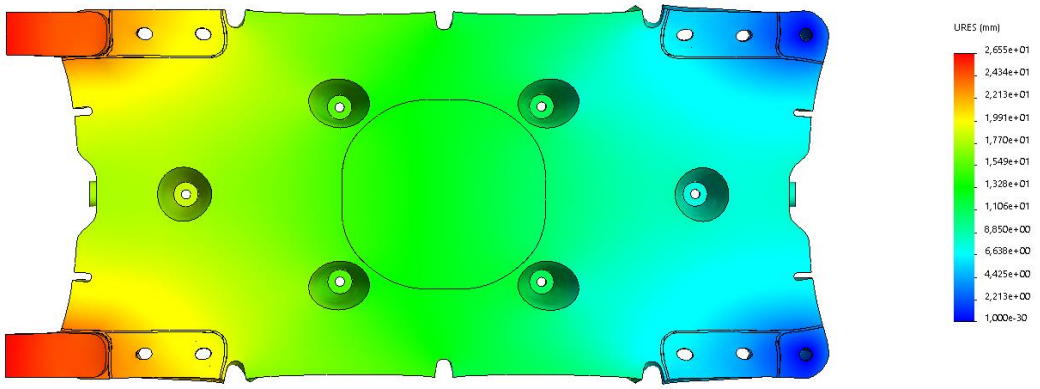


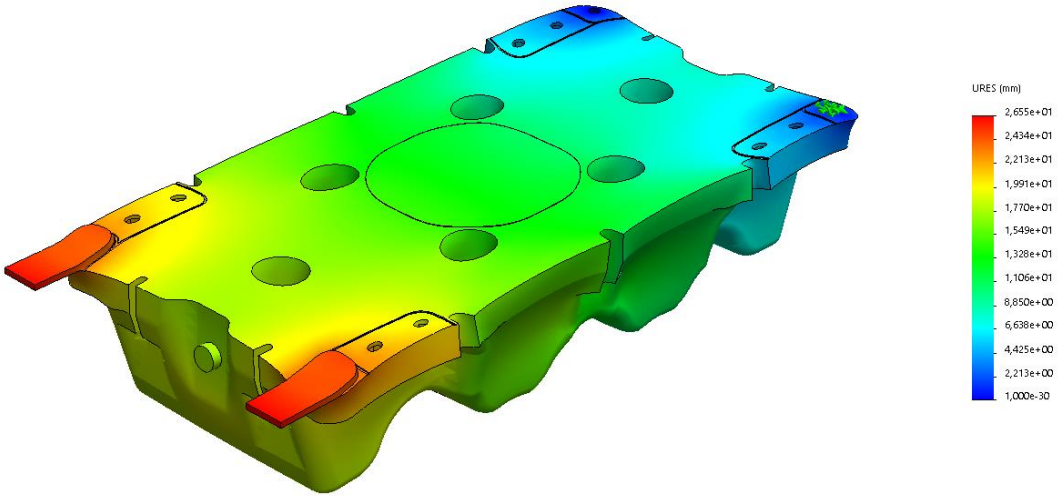


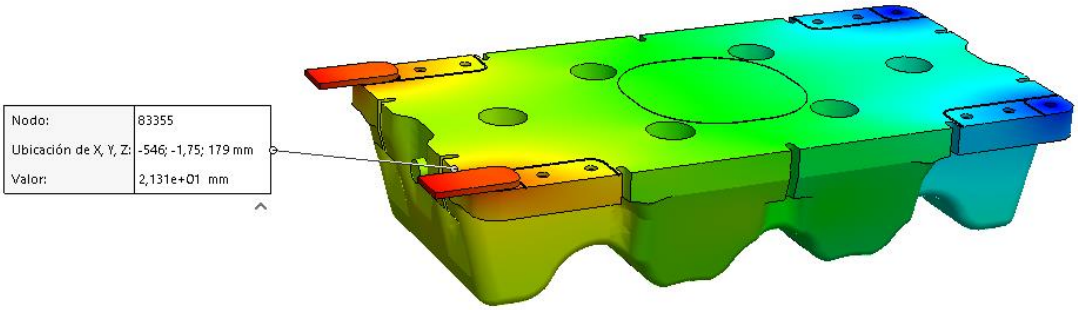


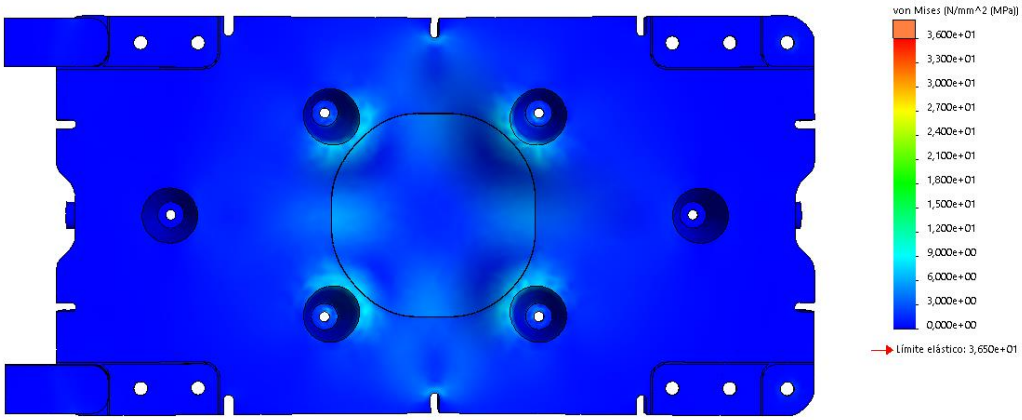
Análisis de deformaciones absolutas – Carga tracción aplicada 3.000 kg

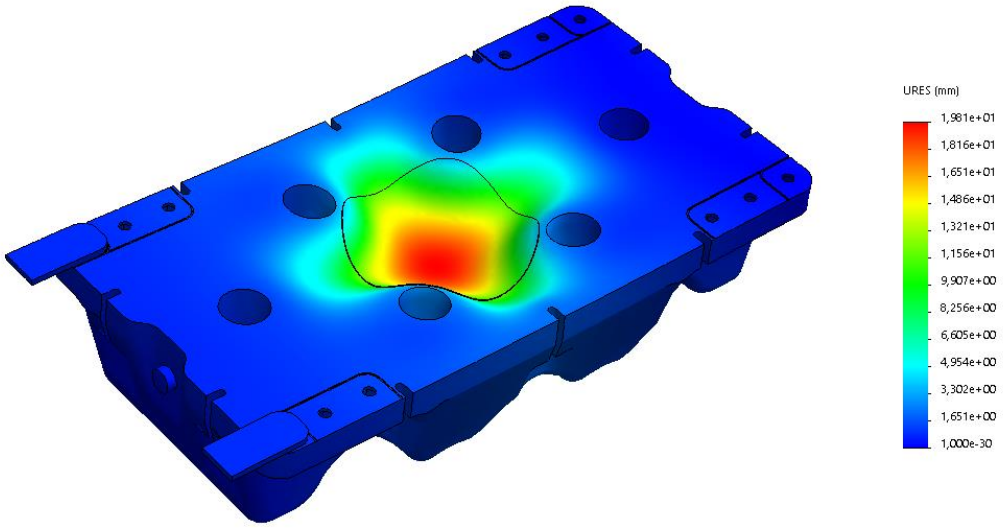



URES (mm)
2,655e+01
2,434e+01
2,213e+01
1,991e+01
1,770e+01
1,549e+01
1,328e+01
1,106e+01
8,850e+00
6,638e+00
4,425e+00
2,213e+00
1,000e-30


URES (mm)
2,655e+01
2,434e+01
2,213e+01
1,991e+01
1,770e+01
1,549e+01
1,328e+01
1,106e+01
8,850e+00
6,638e+00
4,425e+00
2,213e+00
1,000e-30


Nodo: 83355
Ubicación de X, Y, Z: -546; -1,75; 179 mm
Valor: 2,131e+01 mm





8. CONCLUSIONES.

Tras el análisis de elementos finitos realizados se puede establecer para cada una de las piezas las siguientes cargas máxima, valores de cálculo de estados límites últimos.

Pieza	Carga Máxima (kN)	Valor de Cálculo E.L.U (kN)
Flotador Principal	18,92	9,46
Flotador Secundario	28,39	14,195

***Coeficiente parcial de seguridad material = 2**