



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS



# Anejo Nº2- Análisis y cálculos estructurales.

## Parte 1 – Condicionantes, bases de cálculo y acciones

---

Diseño y análisis estructural de helipuerto de aluminio sobre la cubierta de un buque de apoyo marítimo en alta mar.

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Trabajo Final de Máster

ANEJO Nº2

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y CÁLCULOS ESTRUCTURALES.

PARTE 1- CONDICIONANTES, BASES DE CÁLCULO Y ACCIONES

ÍNDICE

1. OBJETO DEL DOCUMENTO.....	3
2. LOCALIZACIÓN Y UBICACIÓN .....	3
3. HELICÓPTERO DE DISEÑO .....	3
4. CONDICIONANTES DE LOS HELIPUERTOS A BORDOS DE BUQUES .....	4
4.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	4
4.2. REQUISITOS DE LIMITACIÓN DE OBSTÁCULOS.....	4
5. BASES DE CÁLCULO .....	6
5.1. NORMATIVA APLICADA.....	6
5.2. MATERIALES .....	6
5.3. MÉTODO DE LOS ESTADOS LÍMITE .....	7
5.3.1. Estados límite últimos .....	7
5.3.2. Estados límite de servicio .....	8
5.4. COEFICIENTES DE SEGURIDAD .....	9
6. ACCIONES.....	9
6.1. SITUACIÓN DE HELICÓPTERO ATERRIZANDO .....	9
6.1.1. Acciones permanentes.....	9
6.1.2. Acciones variables .....	9
6.2. SITUACIÓN DE HELICÓPTERO EN REPOSO .....	11
6.2.1. Acciones permanentes.....	11
6.2.2. Acciones variables .....	11

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Alzado y planta del buque de apoyo marítimo para instalación del helipuerto. ....	3
Figura 2 - Eurocopter EC225 aterrizando. Fuente: Airbus .....	3
Figura 3 - Dimensiones del EC225. Fuente: Airbus.....	4
Figura 4 - Sectores y superficies limitadores de obstáculos en helipuertos para una FATO y TLOF coincidente. 5	
Figura 5 - Sector despejado de obstáculos de cualquier tipo de helipuerto. Fuente: Anexo14 VII OACI .....	5

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Coeficientes parciales para las acciones, aplicable para ELU. Fuente: Propia.....	8
Tabla 2 - Coeficientes de simultaneidad para las diferentes cargas posibles. Fuente: CTE DB-SE.....	8
Tabla 3 - Coeficientes parciales para las acciones aplicables para ELS. Fuente: Propia. ....	9
Tabla 4 - Coeficientes parciales para la resistencia de los materiales. Fuente: Propia. ....	9
Tabla 5 - Valores del coeficiente de exposición $c_e$ . Fuente: CTE DB-SE .....	10

## 1. Objeto del documento

Uno de los objetivos del presente anejo establecer los condicionantes y limitaciones necesarias para realizar un correcto diseño del helipuerto y poder ubicarlo en una zona apta sobre la cubierta de la embarcación. Para ello, se describirá primeramente le tipo de embarcación y el helicóptero de diseño utilizado para su posterior modelado estructural y dimensionamiento.

Cabe destacar que se trata de una embarcación ideal con carácter docente, pero que al igual que sucedería en un caso real, donde se nos impusieran unas condiciones de contorno iniciales, las limitaciones principales, salvo la ubicación, se establece en la normativa vigente, la cual se señala en el apartado correspondiente de este mismo anejo.

También se pretende en este documento justificar, definir y calcular las estructuras que confirman la estructura del helipuerto. En este aspecto, se centra en justificar la elección de los materiales y las dimensiones de los elementos, escogiendo los coeficientes de seguridad que equilibren el funcionamiento seguro y duradero de la obra en su conjunto, así como de todos los elementos estructurales.

Para concluir, el presente documento se ha dividido en dos partes diferenciadas que son las siguientes:

- Parte 1 – Condicionantes, bases de cálculo y acciones.
- Parte 2 – Análisis y dimensionamiento de la estructura del helipuerto.

## 2. Localización y ubicación

La embarcación sobre la que irá instalado la estructura de aluminio que conforma el helipuerto, se trata de un buque de apoyo marítimo en alta mar de 95,5 metros de eslora y 20 metros de manga. Dispone de una grúa de pluma única a estribor y el puente de mando junto con otras instalaciones queda ubicado en la proa de la embarcación. Dispone de una superficie libre de 479 m<sup>2</sup> en la popa, lugar donde ira ubicado el helipuerto, cumpliendo las limitaciones de obstáculos que se establecen en los siguientes apartados.

El helipuerto ira ubicado sobre 21 perfiles metálicos HEB260 de acero S275 existentes en la embarcación pensados durante diseño del buque por la naviera para la posterior instalación del helipuerto. Dichos perfiles están integrados en los elementos estructurales que dotan de resistencia transversal y longitudinal al buque, como las cuadernas y las longitudinales de costado respectivamente. La zona de donde nacen los perfiles que llegan hasta cubierta irán reforzadas con bulárcamas, que son elementos de resistencia transversal, que forman secciones reforzadas.

Es importante mencionar que el diseño de estos perfiles sobre los que apoyara el helipuerto no son objeto de estudio en este trabajo final de máster, debido a que el comportamiento de estos es influenciado por el diseño estructural del buque, por lo que es competencia de ingenieros navales. Se diseñará el helipuerto teniendo en cuenta que la embarcación ha sido dimensionada teniendo en cuenta las cargas que produce.

A continuación, se muestra en la figura 1, el alzado y la planta del buque para la instalación del helipuerto, con la superficie libre sombreada en rojo:

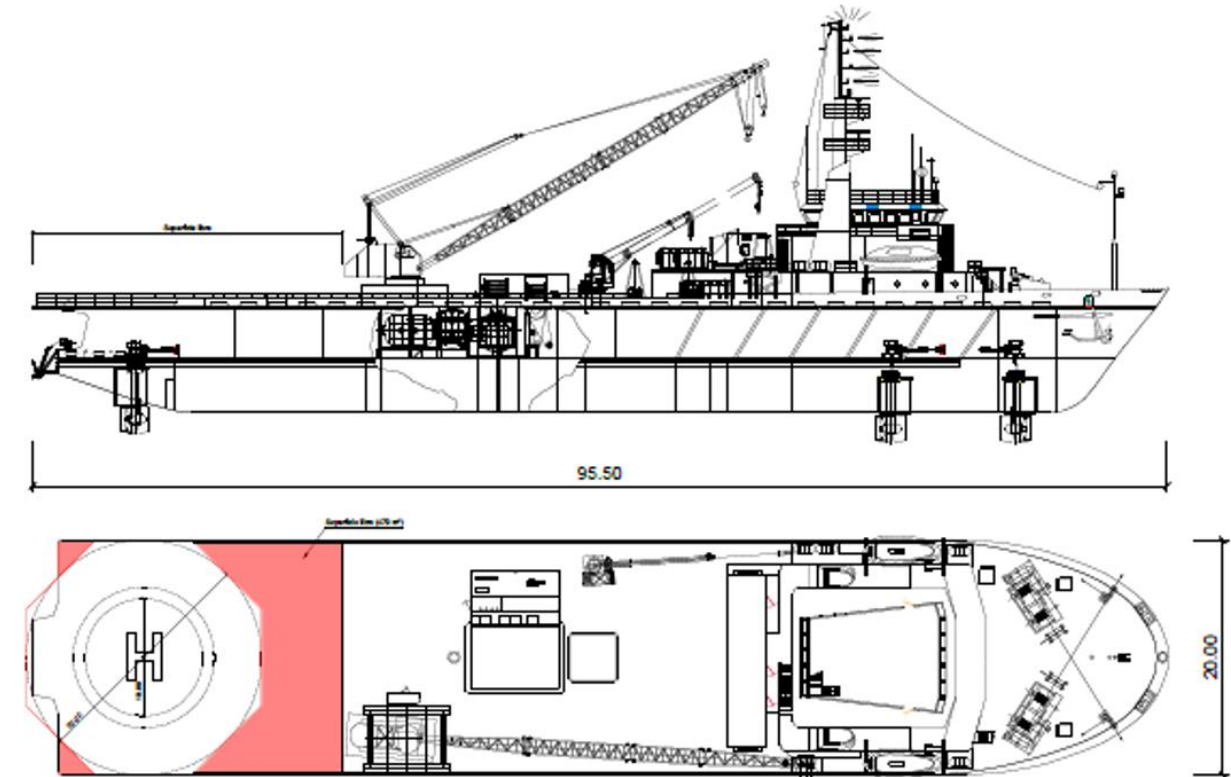


Figura 1 - Alzado y planta del buque de apoyo marítimo para instalación del helipuerto.

## 3. Helicóptero de diseño

Por las características y dimensiones del buque donde irá instalado el helipuerto, y basándonos en la tabla de helicópteros de diseño que propone la normativa CAP437 – *Standars for offshore helicopters landing areas*, se ha decidido utilizar es el Eurocopter EC225 el cual está disponible en diferentes modelos en función de la aplicación, desde salvamento marítimo, hasta transporte de pasajeros y cargas.



Figura 2 - Eurocopter EC225 aterrizando. Fuente: Airbus

El EC225 posee una longitud de 16,79 metros y una anchura máxima de 4,10 metros. La envergadura total del helicóptero con las aspas en rotación es de un diámetro de 19,5 metros. La altura total desde el tren de aterrizaje hasta la parte mas alta del rotor de cola es de 4,97 metros. Es importante señalar, que la distancia entre las dos ruedas traseras del tren de aterrizaje es de 3 metros. Todas estas medidas quedan recogidas en la siguiente figura:

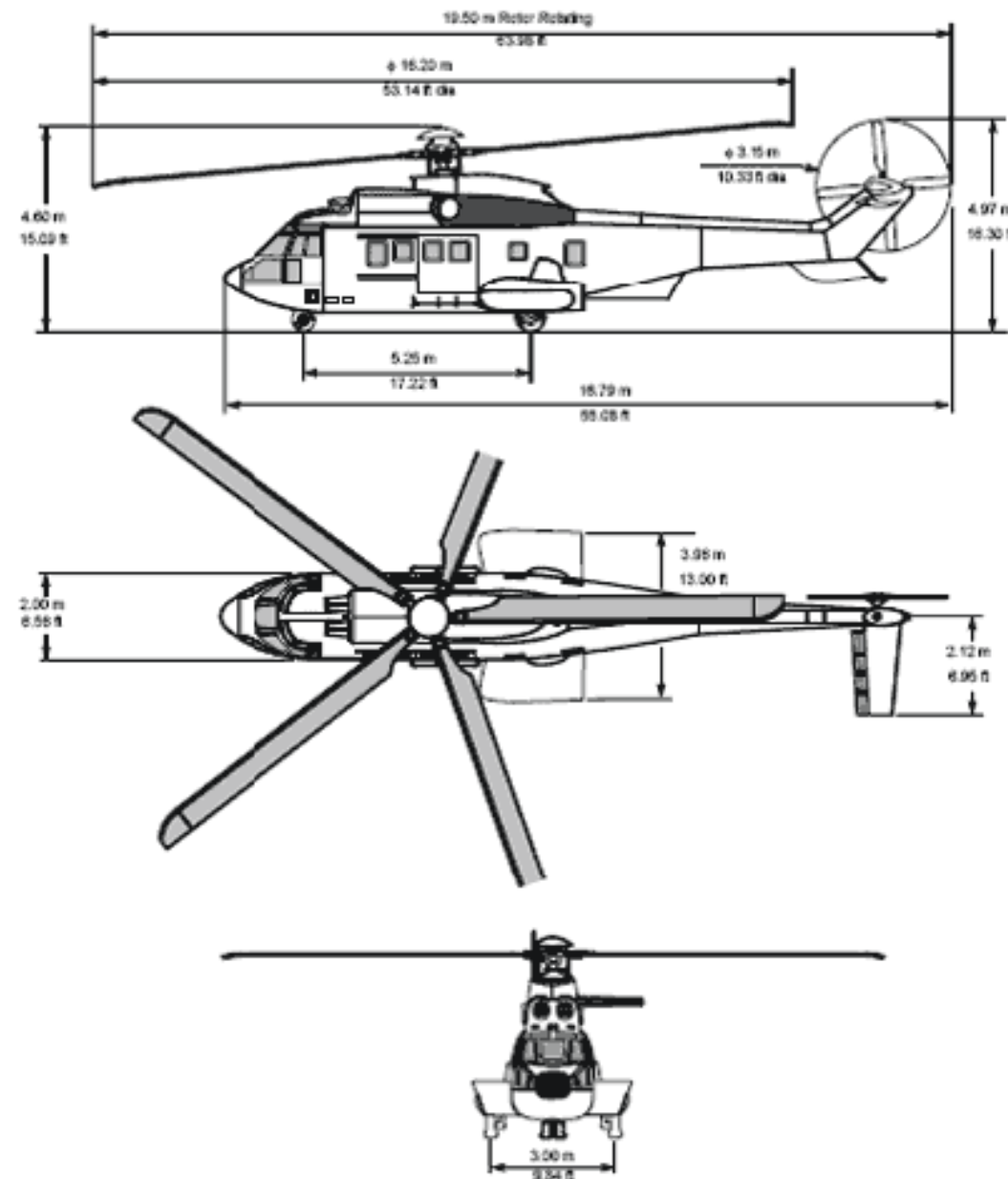


Figura 3 - Dimensiones del EC225. Fuente: Airbus.

Las características de este modelo de helicóptero son las que se muestran a continuación:

- Autonomía de vuelo: 5 horas y 40 minutos.
- Velocidad máxima: 324 km/h
- Carga máxima: 11000 kg
- Capacidad de combustible: 2297 kg + 474 kg
- Capacidad: 2 pilotos y 19 pasajeros

#### 4. Condicionantes de los helipuertos a bordos de buques

A continuación, se establece la terminología principal que recoge el anexo 14 – Volumen II de la OACI relativos a los helipuertos, en concreto a la superficie de aterrizaje, con el fin de definir correctamente los condicionantes físicos para un correcto diseño de la superficie.

- **Área de aproximación final y de despegue (FATO):** Área definida en la que termina la fase final de la maniobra de aproximación hasta el vuelo estacionario o el aterrizaje y a partir de la cual empieza la maniobra de despegue.
- **Área de toma de contacto y de elevación inicial (TLOF):** Área que permite la toma de contacto o la elevación inicial de los helipuertos.
- **D:** Máxima dimensión total del helicóptero cuando los rotores están girando medida a partir de la posición mas adelantada del plano de trayectoria del extremo del rotor principal a la posición mas atrasada del plano de trayectoria del rotor de cola o estructura del helicóptero.

##### 4.1. Características físicas

Los helipuertos a bordo de buques están provistos de una FATO y una TLOF que coincide en el mismo lugar. Estas zonas podrán ser de cualquier forma geométrica, siempre y cuando su tamaño sea suficiente para contener un área en la que quepa un círculo inscrito igual al valor D.

En el caso de este helipuerto se ha decidido que el helipuerto tenga forma octogonal, al ser la forma geométrica que más se adapta a una circunferencia, por lo que el aprovechamiento de la superficie es mayor que si fuese cuadrada, por ejemplo. Podría tratarse perfectamente de un helipuerto circular, pero la tendencia en el mercado de helipuertos a bordo de buques es la de realizarlos octogonales, por ahorro en materiales y facilidad constructiva al tratarse de perfiles rectos, que permiten uniones y disposiciones más sencillas.

##### 4.2. Requisitos de limitación de obstáculos

Los requisitos para las superficies limitadoras de obstáculos se basan en el uso de la FATO. Desde cualquier punto de la periferia del círculo D, debe existir un sector de despegue y aproximación sin obstáculos que abarque toda esta área y que se extienda sobre un sector de al menos 210°. Dentro de este sector, se debe considerar la inexistencia de obstáculos a una distancia de la periferia de la zona de aterrizaje que permita una ruta de salida sin obstrucciones apropiada para el helicóptero. Únicamente los siguientes elementos, esenciales para las operaciones de aterrizaje y despegue, pueden exceder la altura del área de aterrizaje, pero no más de 15 centímetros para cualquier helipuerto don de el valor D sea mayor de 16 metros, es decir, en este caso.

Estos elementos esenciales incluyen:

- La canalización para el drenaje.
- La iluminación.
- Los monitores de espumógeno contra incendios.
- Los pasamanos y otros elementos asociados con el área de aterrizaje que no puedan retirarse completamente.

Todos los objetos que a su vez requieren ser instalados en la superficie del helipuerto, como las redes de aterrizaje, los puntos de amarre y los sistemas de iluminación del círculo y la H, no deben superar una altura de 25 milímetros.



La figura 4 muestra los sectores y superficies limitadoras de obstáculos par helipuertos don de la zona FATO y TLOF coinciden. La bisectriz del sector despejado de obstáculos de  $210^\circ$  debe pasar por el centro del círculo D, y podrá oscilar has  $15^\circ$ . En la figura también se aprecia el sector de obstáculos sujeto a restricciones de  $150^\circ$ , medido desde el perímetro del área de aterrizaje. El primer segmento (área sombreada) se extiende  $0,62D$  desde el centro del círculo o  $0,12D$  desde la marca del perímetro del área de aterrizaje, y no se permiten obstáculos de mas de 15 centímetros. El segundo segmento del área sujeta a restricciones no permite que los obstáculos penetren en una pendiente 1:2 la cual empieza a una altura de  $0,05D$  sobre la superficie del helipuerto y se extiende  $0,83$  desde el centro del círculo D. La extensión de los segmentos libres de obstáculos, serán líneas paralelas a la línea del perímetro del área de aterrizaje y seguirán los límites del perímetro de la zon de aterrizaje.

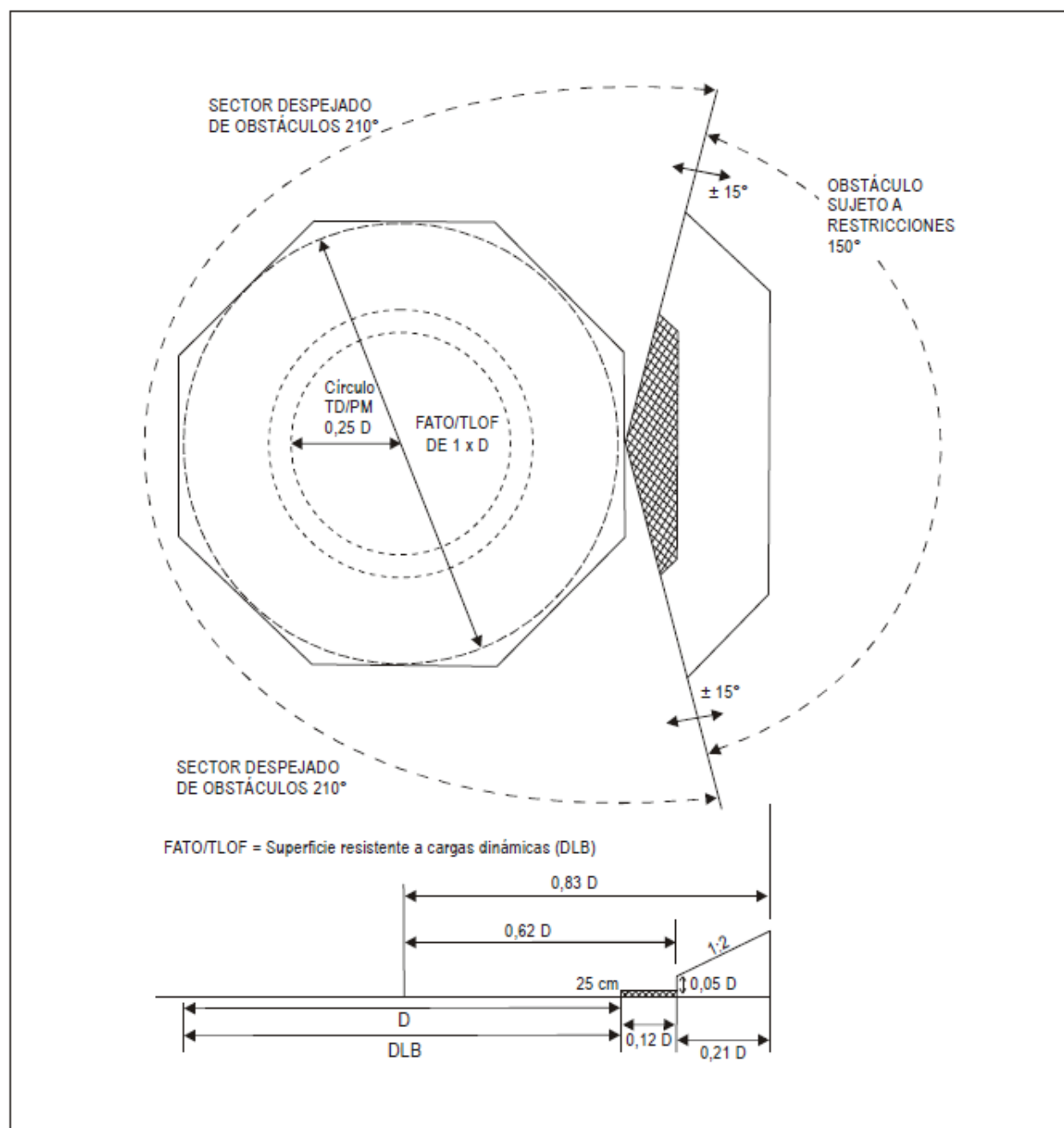


Figura 4 - Sectores y superficies limitadores de obstáculos en helipuertos para una FATO y TLOF coincidente.

También es necesario considerar la posibilidad de pérdida de altura del helicóptero debido a un fallo de la aeronave durante la maniobra de aterrizaje o despegue. Se debe proporcionar una zona despejada por debajo del nivel del área de aterrizaje en todas las instalaciones fijas y móviles entre el helipuerto y el mar. El gradiente descendente 5:1 debe ser de al menos  $180^\circ$  con origen en el centro del círculo D y debe cubrir en su totalidad los  $210^\circ$  de la zona libre de obstáculos. Debería extenderse hacia afuera una distancia que permita un espacio seguro y libre de los obstáculos que se encuentran por debajo de la instalación. En la siguiente figura se muestra a modo de esquema los diferentes sectores y distancias libres de obstáculos:

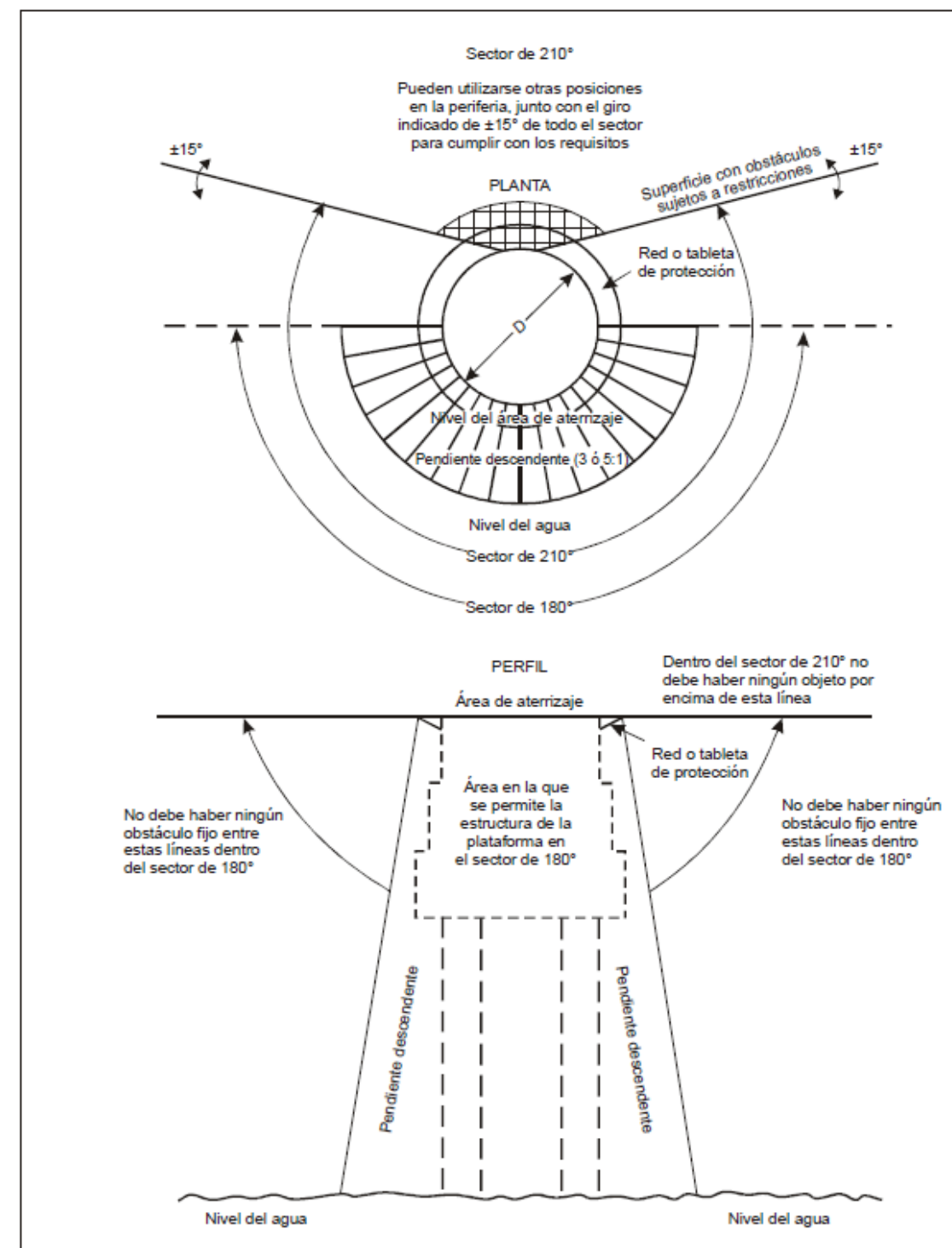


Figura 5 - Sector despejado de obstáculos de cualquier tipo de helipuerto. Fuente: Anexo14 VII OACI

## 5. Bases de cálculo

### 5.1. Normativa aplicada

El marco normativo en el que España contempla el diseño y la planificación de los helipuertos se recoge en el Real Decreto 862/2009, de 14 de mayo, por el que se aprueban las normas técnicas de diseño y operación de aeródromos de uso público y se regula la certificación de los aeropuertos de competencia del estado. Estas normas técnicas se basan, con las necesarias adaptaciones, en el anexo 14 del Convenio sobre Aviación Civil Internacional, el cual se compone de dos volúmenes, el volumen I para aeródromos, y el volumen II, de aplicación en este trabajo, para helipuertos.

El Volumen II – Helipuertos del anexo 14 al Convenio sobre Aviación Civil es publicado en julio de 2013, por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), y complementa las especificaciones del volumen I, aplicándolas a los helipuertos. Las disposiciones establecen las características físicas y superficies limitadas por obstáculos requeridas para las operaciones de los helicópteros, para todo tipo de helipuertos. Se incluyen también en el volumen II, todo lo relativo a señalización y balizamiento, y los requisitos básicos de salvamento y extinción de incendios.

En el caso del diseño y análisis del helipuerto objeto de este trabajo, se trata de un helipuerto situado sobre un buque de apoyo marítimo, que navegará no solo en el territorio español sino por aguas internacionales. En este caso es lógico que se apliquen normativas de carácter internacional como podría ser el Volumen II, del Anexo 14 del Convenio sobre Aviación Civil Internacional publicado por la OACI, pero es importante señalar que existe una normativa en el Reino Unido, la CAP 437 – *Standards for offshore helicopter landing areas*, que se ha convertido en una normativa de referencia a nivel mundial.

Las CAP 437, es una ampliación de los requisitos internacionales que se especifican en el Volumen II, del Anexo 14 de la OACI anteriormente explicado. Esta normativa ha ido evolucionando desde su publicación en 1981 hasta la actualidad a expensas de las recomendaciones de la OACI, la Agencia de Seguridad de Aviación Europea (EASA), la Organización Marítima Internacional (IMO), y los principales comités y asociaciones con amplia experiencia en labores operacionales y de mantenimiento.

Adicionalmente presenta los criterios requeridos por la *Civil Air Authority (CAA)* para las operaciones de helicópteros en áreas marítimas registrados en el Reino Unido. Estas áreas de aterrizaje podrían ser:

- Instalaciones fijas en el mar.
- Instalaciones móviles en el mar.
- Embarcaciones de explotación minera.
- Parques eólicos marinos.
- Otras embarcaciones, como yates, cargueros, buques contenedores, pesqueros, de pasajeros, etc.

Por los motivos expuestos anteriormente, se decide que la normativa referencia para el diseño y análisis del helipuerto objeto de este trabajo será la CAP 437 – *Standards for offshore helicopter landing areas*, al reunir todas las directrices necesarias para tal fin, y con una sólida justificación en cuanto a aplicación de esta normativa.

La CAP 437 incluye diferentes capítulos de diseño donde se incluyen las acciones sobre el helipuerto y los criterios de diseño de la estructura, a su vez que desarrolla detalladamente equipamientos importantes como son las ayudas visuales y la seguridad en caso de incendio. Estos puntos se reflejarán suficientemente detallados en sus respectivos anejos. También incluye capítulos donde se desarrollan estándares operacionales o ayudas en el

diseño, construcción y mantenimiento del fuselaje de helicópteros, apartado que no se tendrá en cuenta al no ser objeto de este trabajo.

A estas normativas, hay que sumarle la sociedad de clasificación del buque, que se trataría de una organización no gubernamental, con el objetivo de comprobar el correcto diseño de buques que doten de seguridad a la estructura y las instalaciones, y protejan el entorno marino. Estas sociedades de clasificación han de cumplir unas reglas de clasificación, aplicadas a los buques mediante inspecciones durante el proceso de construcción, y el periodo de vida útil. Estas reglas en muchas ocasiones coinciden con lo establecido en las normativas de aplicación, y otras veces establecen estándares más restrictivos.

En este caso al tratarse de un proyecto académico y no poder acceder a estas reglas de clasificación, no se contemplan en el diseño y análisis estructural del helipuerto, ya que no suman un valor añadido a la dificultad del proyecto, sino simplemente pequeñas variaciones, quedando igualmente definido el helipuerto y sus instalaciones basándonos en la normativa vigente.

Para definir las acciones que actúan sobre la estructura de la piscina, los coeficientes parciales de seguridad, los coeficientes de simultaneidad y las combinaciones de acciones para los diferentes estados límites últimos y de servicio se han utilizado las siguientes normativas:

- CAP 437 – *Standard for offshore helicopter landing areas*.
- Convenio sobre Aviación Civil (OACI) – Anexo 14. Volumen II – Helipuertos
- UNE EN 1990 – Bases de cálculo en estructuras.
- UNE EN 1991 – Eurocodigo 1: Acciones en estructuras.

Para el dimensionado y cálculo de la estructura metálica y el soporte de vigas del panel de aluminio y resto de perfiles metálicos utilizados en equipamientos se ha utilizado la siguiente normativa:

- UNE EN 1999-1-1 – Eurocodigo 9: Proyecto de estructuras de aluminio – Parte 1-1: Requisitos generales.

Para definir la geometría del helipuerto y la disposición de los equipamientos para un correcto funcionamiento y operación de la estructura se han utilizado los capítulos específicos de las siguientes normativas:

- CAP 437 – *Standard for offshore helicopter landing areas*.
- Convenio sobre Aviación Civil (OACI) – Anexo 14. Volumen II – Helipuertos
- Catálogos específicos de equipamientos para helipuertos.

### 5.2. Materiales

En este apartado se definen las propiedades mecánicas del aluminio como material estructural que se usará para el correcto diseño de la estructura del helipuerto.

Para la estructura en celosía y la estructura soporte de los paneles de aluminio objeto de cálculo se utilizarán perfiles normalizados de aluminio extruido de la serie EW 7020 T6 los cuales presentan las siguientes propiedades físicas y mecánicas:

- Densidad ( $\rho$ ): 2780 kg/m<sup>3</sup>
- Tensión en límite elástico ( $f_0$ ): 275 N/mm<sup>2</sup>
- Tensión en límite elástico con zona afectada por soldaduras: ( $f_0$ ,  $f_{0, haz}$ ): 205 N/mm<sup>2</sup>
- Tensión de rotura elástica ( $f_u$ ): 350 N/mm<sup>2</sup>

- Tensión de rotura elástica con zona afectada por soldaduras: ( $f_u, h_{az}$ ): 280 N/mm<sup>2</sup>
- Módulo de elasticidad o de Young (E): 71500 N/mm<sup>2</sup>
- Módulo de elasticidad transversal (G): 27000 N/mm<sup>2</sup>
- Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ): 0,3
- Coeficiente de dilatación térmica ( $\alpha$ ): 23·10<sup>-6</sup> °C
- Resistencia a tracción (R<sub>m</sub>): 350 N/mm<sup>2</sup>

El acero de los perfiles metálicos que conformaran la unión con los perfiles metálicos que nacen de la cubierta de la embarcación, presenta las siguientes propiedades físicas y mecánicas:

- Densidad ( $\rho$ ): 7850 kg/m<sup>3</sup>
- Tensión en límite elástico ( $f_y$ ): 275 N/mm<sup>2</sup>
- Tensión de rotura ( $f_u$ ): 430 N/mm<sup>2</sup> <  $f_u$  < 580 N/mm<sup>2</sup>
- Módulo de elasticidad o de Young (E): 210000 N/mm<sup>2</sup>
- Módulo de elasticidad transversal (G): 81000 N/mm<sup>2</sup>
- Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ): 0,3
- Coeficiente de dilatación térmica ( $\alpha$ ): 1,2·10<sup>-5</sup> °C<sup>-1</sup>
- Conductividad eléctrica ( $\sigma$ ): 3·10<sup>6</sup> Ω<sup>-1</sup> · m<sup>-1</sup>
- Resistencia a tracción (R<sub>m</sub>): 410 – 560 N/mm<sup>2</sup>

### 5.3. Método de los estados límite

Se define como estados límite aquellas situaciones para las que, de ser superadas, puede considerarse que la estructura no cumple alguna de las funciones para la que ha sido proyectada.

De forma general, los estados límite se clasifican en:

- Estados límite últimos.
- Estados límite de servicio.
- Las situaciones de proyecto a considerar son las siguientes:
- Situaciones persistentes, que corresponden a las condiciones de uso normal de la estructura.
- Situaciones transitorias, como son las que se producen durante la construcción o reparación de la estructura.
- Situaciones accidentales, que corresponden a condiciones excepcionales aplicables a la estructura.

Debe comprobarse que una estructura no supere ninguno de los estados límite anteriormente definidos en cualquiera de las situaciones de proyecto indicadas anteriormente, considerando los valores de cálculo de las acciones, de las características de los materiales y de los datos geométricos.

El procedimiento a seguir para la comprobación, consiste en deducir, el efecto de las acciones aplicadas a la estructura y la respuesta de la estructura para la situación límite en estudio. El estado límite quedara garantizado si se verifica, con una fiabilidad aceptable, que la respuesta estructural no es inferior al efecto de las acciones aplicadas.

La definición de las acciones actuantes en la estructura se establece en la normativa aplicada, mencionada anteriormente, relativa a acciones. A continuación, se fijan reglas para la definición de los valores de cálculo de las acciones y sus combinaciones, siempre que no se haya indicado otra cosa en su correspondiente normativa para una acción determinada.

#### 5.3.1. Estados límite últimos

El método de los estados límite últimos engloba todos aquellos estados que producen el fallo de la estructura, por colapso o rotura de la misma o de una parte de ella.

Como estados límite últimos deben considerarse los debidos a:

- La pérdida del equilibrio de la estructura o parte de ella, considerada como un sólido rígido.
- El fallo por pérdida de la estabilidad de la estructura o parte de ella, o de algún o algunos elementos estructurales que constituyen la estructura.
- El fallo por agotamiento de la resistencia de la estructura o de las secciones de los elementos estructurales que constituyen la misma.
- El fallo por agotamiento de la resistencia de las uniones.

En la comprobación de los estados límite últimos que consideran el colapso o rotura de una sección o elemento estructural, se debe satisfacer, la condición:

$$E_d \leq R_d$$

donde

R<sub>d</sub> Valor de cálculo de la respuesta de la estructura.

E<sub>d</sub> Valor de cálculo del efecto de las acciones.

Para la evaluación del estado límite de equilibrio se debe satisfacer la siguiente condición:

$$E_{d,estab} \geq E_{d,desestab}$$

donde

E<sub>d,estab</sub> Valor de cálculo de los efectos de las acciones estabilizadoras.

E<sub>d,desestab</sub> Valor de cálculo de los efectos de las acciones desestabilizadoras.

Para cada una de las situaciones estudiadas se establecerán las posibles combinaciones de acciones. Cada combinación estará formada por las acciones permanentes, una acción variable determinante y una o varias acciones variables concomitantes, pudiendo ser cualquiera de las acciones variables determinante.

Para las distintas situaciones de proyecto, las combinaciones de acciones se definen con las siguientes expresiones:

En situaciones persistentes o transitorias:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G^*,j} G^*_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$$

En situaciones accidentales:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G^*,j} G^*_{k,j} + \gamma_A A_k + \gamma_{Q,1} \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

En situaciones en las que actúa la acción sísmica:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G^*,j} G^*_{k,j} + \gamma_A A_{E,k} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Donde

$G_{k,j}$  Valor característico de las acciones permanentes..

$G^*_{k,j}$  Valor característico de las acciones permanentes de valor no constante.

$Q_{k,1}$  Valor característico de la acción variable determinante.

$\Psi_{0,i} Q_{k,i}$  Valor representativo de combinación de las acciones variables que actúan simultáneamente con la acción variable determinante.

$\Psi_{1,1} Q_{k,1}$  Valor representativo frecuente de la acción variable determinante.

$\Psi_{2,i} Q_{k,i}$  Valor representativo cuasi-permanente de las acciones variables que actúan simultáneamente con la acción variable determinante y la acción accidental, o con la acción sísmica.

$A_k$  Valor característico de la acción accidental.

$A_{E,k}$  Valor característico de la acción sísmica.

Los coeficientes parciales para las acciones, aplicables para la evaluación de los estados límite últimos quedan recogidos en la siguiente tabla:

Tipo de acción	Situaciones persistentes o transitorias		Situaciones accidentales	
	Efecto favorable	Efecto desfavorable	Efecto favorable	Efecto desfavorable
Permanente	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,35$	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,00$
Variable	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,50$	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,00$
Accidental	-	-	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,00$

Tabla 1 - Coeficientes parciales para las acciones, aplicable para ELU. Fuente: Propia.

En el estado límite de equilibrio para la parte favorable se adoptará un coeficiente  $\gamma_G = 0,9$  y para la parte desfavorable se adoptará un coeficiente  $\gamma_G = 1,1$ , para situaciones de servicio, o  $\gamma_G = 0,95$  para la parte favorable y  $\gamma_G = 1,05$  para la parte desfavorable.

Los coeficientes de simultaneidad se han extraído del CTE - DB de Seguridad Estructural, debido a que no se consideran acciones concomitantes sobre la estructura la sobrecarga de uso con la acción del viento o la nieve. Estos coeficientes se pueden observar en la siguiente tabla:

	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
Sobrecarga superficial de uso (Categorías según DB-SE-AE)			
• Zonas residenciales (Categoría A)	0,7	0,5	0,3
• Zonas administrativas (Categoría B)	0,7	0,5	0,3
• Zonas destinadas al público (Categoría C)	0,7	0,7	0,6
• Zonas comerciales (Categoría D)	0,7	0,7	0,6
• Zonas de tráfico y de aparcamiento de vehículos ligeros con un peso total inferior a 30 kN (Categoría E)	0,7	0,7	0,6
• Cubiertas transitables (Categoría F)	(1)		
• Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (Categoría G)	0	0	0
Nieve			
• para altitudes > 1000 m	0,7	0,5	0,2
• para altitudes ≤ 1000 m	0,5	0,2	0
Viento	0,6	0,5	0
Temperatura	0,6	0,5	0
Acciones variables del terreno	0,7	0,7	0,7

Tabla 2 - Coeficientes de simultaneidad para las diferentes cargas posibles. Fuente: CTE DB-SE

### 5.3.2. Estados límite de servicio

El método de los estados límite de servicio incluye todas aquellas situaciones para las que no se cumplen los requisitos de funcionalidad, de comodidad, de durabilidad o de aspecto requeridos.

En la comprobación de los estados límite de servicio se debe satisfacer la siguiente condición:

$$C_d \geq E_d$$

donde

$C_d$  Valor límite admisible para el estado a comprobar (deformaciones, vibraciones, etc).

$E_d$  Valor de cálculo del efecto de las acciones (tensiones, nivel de vibración, etc.).

Como estados límite de servicio deben considerarse los siguientes:

- Estado límite de deformaciones. Es el producido por deformaciones que pueden afectar a las acciones aplicadas o a la apariencia o al uso de la estructura o causar daños en elementos no estructurales.
- Estado límite de vibraciones. Es el que se produce por vibraciones que pueden ser desagradables o causar inquietud a los usuarios, o provocar daños en la estructura o equipos.
- Los daños y el deterioro que pueda afectar desfavorablemente a la apariencia, a la durabilidad o a la funcionalidad de estructura.

Para estos estados límite se consideran únicamente las situaciones de proyecto persistentes y transitorias. En estos casos, las combinaciones de acciones se definirán de acuerdo con las siguientes expresiones:



Combinación poco probable

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G^*,j} G^*_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Combinación frecuente:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G^*,j} G^*_{k,j} + \gamma_{Q,1} \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Combinación cuasi-permanente:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G^*,j} G^*_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Donde los coeficientes quedan definidos en el apartado anterior.

Los coeficientes parciales para las acciones, aplicables para los estados límite de servicio quedan recogidos en la siguiente tabla:

Tipo de acción	Efecto favorable	Efecto desfavorable
Permanente	$\gamma_G = 1,00$	$\gamma_G = 1,00$
Variable	$\gamma_Q = 0,00$	$\gamma_Q = 1,00$

Tabla 3 - Coeficientes parciales para las acciones aplicables para ELS. Fuente: Propia.

Los coeficientes de simultaneidad para las diferentes combinaciones de carga quedan definidos en la tabla N°2 del apartado anterior.

#### 5.4. Coeficientes de seguridad

Los valores de los coeficientes parciales para la resistencia en la comprobación de los estados límite últimos son los que se indican en la siguiente tabla:

Material	Coeficientes de seguridad materiales ( $\gamma$ )
Acero S275	1,05
Aluminio EW 7020 T6	1,05
Uniones	1,25/1,10

Tabla 4 - Coeficientes parciales para la resistencia de los materiales. Fuente: Propia.

Los valores de los coeficientes parciales para la resistencia en la comprobación de los estados límite de servicio son todos iguales a la unidad.

## 6. Acciones

En este apartado se establecerán las diferentes acciones que actúan sobre el helipuerto en dos casos diferenciados: uno cuando el helicóptero se encuentra en reposo y otro en caso de que el helicóptero se encuentre en situación de aterrizaje. Para el cálculo de las acciones características de los helipuertos se aplica lo estipulado en la CAP 437 en el capítulo dedicado para este fin.

### 6.1. Situación de helicóptero aterrizando

#### 6.1.1. Acciones permanentes

Las acciones permanentes (G) son aquellas que actúan en todo momento sobre la estructura con una posición constante.

##### Peso propio

El peso propio a tener en cuenta es de todos los elementos estructurales, que en este caso son la estructura en celosía sobre la que apoyara el soporte al que se anclaran los paneles de aluminio. El peso propio de los perfiles se determinará con el programa de cálculo CYPE 2016, donde se define el tipo de aleación de aluminio utilizado, en este caso la EW 7020 T6. También se tendrá en cuenta el peso propio de los perfiles de acero laminado HEB S275 a los que se une la estructura completa del helipuerto.

##### Carga muerta

Para tener en cuenta cualquier equipamiento que pudiese encontrarse sobre la superficie del tablero, como podría ser la red de seguridad perimetral, las luces, los elementos de protección en caso de incendio, se aplicara una carga muerta de 0,5 kN/m<sup>2</sup> en toda el área del helipuerto.

#### 6.1.2. Acciones variables

Las acciones variables son las que pueden actuar en la estructura o no en determinadas ocasiones. Se consideran acciones variables las sobrecargas, la acción del viento, la acción térmica y la nieve.

##### Sobrecarga de uso

La carga debida al impacto del aterrizaje del helicóptero debe contemplar un aterrizaje con el helicóptero cargado al máximo equivalente a:

$$Q_{imp} = 1,5 \cdot MTOM = 1,5 \cdot 11000 \text{ kg} = 16500 \text{ kg} = 161,8 \text{ kN}$$

Para la transmisión de la carga al helipuerto según la normativa se asume que se aterrizará sobre las dos ruedas traseras, por lo que se contempla que  $Q_{imp}$  se dividirá en dos cargas puntuales en el sentido de la gravedad aplicadas a una distancia de 3 metros, siendo esta la distancia entre las ruedas del tren de aterrizaje.

Para un aterrizaje de emergencia, en el que el helicóptero se estrella contra el helipuerto la carga será equivalente a:

$$Q_{eme} = 2,5 \cdot MTOM = 2,5 \cdot 11000 \text{ kg} = 27500 \text{ kg} = 269,77 \text{ kN}$$

Sin embargo, existe una respuesta de la plataforma al aterrizar, la cual se tiene en cuenta incrementando la carga dinámica por un factor que depende de la frecuencia natural de la estructura del helipuerto. Para ello se recomienda el factor 1,3 por lo que la sobrecarga de uso debida al aterrizaje del helicóptero sería:

$$Q'_{eme} = 1,3 \cdot Q_{eme} = 350,71 \text{ kN}$$

A su vez debido a la trayectoria de aterrizaje del helicóptero, se ha de contemplar una fuerza lateral considerada como una carga puntual equivalente a:

$$Q_{lat} = 0,5 \cdot MTOM = 0,5 \cdot 11000 = 5500 \text{ kg} = 53,95 \text{ kN}$$

Esta carga se distribuirá de manera puntual en el punto medio entre las dos ruedas del tren de aterrizaje de manera simultánea con la sobrecarga debida al impacto del helicóptero  $Q'_{eme}$

### Viento

En primer lugar, es lógico entender que la acción del viento sobre la estructura no será muy determinante para el dimensionado de esta, puesto que se trata de una estructura en celosía que deja pasar el aire y no contiene elementos que formen pantallas que aumentase la superficie de presión sobre la estructura. No obstante, se decide calcular la presión dinámica del viento de acuerdo con el procedimiento establecido en el DB – SE – Acciones en la edificación.

La distribución y el valor de las presiones que ejerce el viento sobre una estructura y las fuerzas resultantes dependen de la forma y de las dimensiones de la construcción, de las características y de la permeabilidad de su superficie, así como de la dirección, de la intensidad y del racheo de viento.

La acción del viento en general es una fuerza perpendicular a la superficie de cada punto expuesto, o presión estática,  $q_e$  puede expresarse como:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p$$

donde:

$q_b$  Presión dinámica del viento

$c_e$  Coeficiente de exposición

$c_p$  Coeficiente eólico o de presión exterior

### Presión dinámica del viento

En el anejo D del DB de Seguridad Estructural – Acciones en la edificación, se pueden obtener el valor de la presión dinámica del viento. El valor básico puede obtenerse con la expresión:

$$q_b = 0,5 \cdot \delta \cdot v_b^2$$

Siendo

$\delta$  Densidad del aire

$v_b$  Valor básico de la velocidad del viento.

El CTE ya tiene calculados estos valores en función de la situación geográfica de la localidad donde tenga lugar la actuación. Dado que la embarcación siempre estará en alta mar se ha escogido el valor mas desfavorable que es el de la zona C, al que le corresponde un valor de la presión dinámica de 0,52 kN/m<sup>2</sup>.

### Coeficiente de exposición

El coeficiente de exposición tiene en cuenta los efectos de las turbulencias originadas por el relieve y la topografía del terreno. Su valor se puede tomar de la tabla 3.4. extraída del DB – SE – Acciones en la Edificación, siendo la altura del punto considerado la media respecto a la rasante media de la fachada de barlovento.

Tabla 3.4. Valores del coeficiente de exposición  $c_e$

Grado de aspereza del entorno	Altura del punto considerado (m)							
	3	6	9	12	15	18	24	30
I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	2,4	2,7	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,7
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	2,1	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5
III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	1,6	2,0	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1
IV Zona urbana en general, industrial o forestal	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6
V Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,6	1,9	2,0

Tabla 5 - Valores del coeficiente de exposición  $c_e$ . Fuente: CTE DB-SE

El helipuerto al encontrarse en una embarcación no se encuentra en ninguno de los grados de aspereza de la tabla, por lo que, al encontrarse a una altura de 13 metros sobre el nivel del mar, para el coeficiente de exposición  $c_e$  se cogerá el valor mas desfavorable que es el que se corresponde con un grado de aspereza I a una altura de 15 metros que se corresponde con el valor de 3,7.

### Coeficientes de presión exterior o eólico

Los coeficientes de presión exterior o eólico,  $c_p$ , dependen de la dirección relativa del viento, de la forma de la estructura, de la posición del elemento considerado y de su área de influencia. Al tratarse de una estructura en celosía donde el área de influencia es pequeña y simétrica no tiene sentido aplicar el mismo procedimiento que se realizaría en un edificio con cubierta y fachada sujetos a presiones y succiones debido a la gran superficie de influencia que le dotaría la fachada. Por este motivo, se supone un coeficiente de presión exterior eólico igual a la unidad.

Se concluye que la acción del viento sobre la estructura es igual a:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p = 0,52 \cdot 3,7 \cdot 1 = 1,9 \text{ kN/m}^2$$

Tal y como se introducía al principio se trata de una carga de valor muy inferior a la sobrecarga de uso en el caso de aterrizaje de emergencia, puesto que se tendrá en cuenta, pero apenas influirá en el dimensionamiento de la estructura.

### Nieve

Al tratarse de una estructura que ira ubicada en una embarcación a nivel del mar, la normativa no contempla la acción de la nieve ya que se trataría de un valor muy bajo e incluso insignificante comparado con la sobrecarga de uso.

## 6.2. Situación de helicóptero en reposo

### 6.2.1. Acciones permanentes

#### **Peso propio**

Se consideran los mismos valores que se han descrito en el apartado anterior en el caso de aterrizaje de emergencia.

#### **Carga muerta**

Para tener en cuenta cualquier equipamiento que pudiese encontrarse sobre la superficie del tablero, como podría ser la red de seguridad perimetral, las luces, los elementos de protección en caso de incendio, se aplicara una carga muerta de 2 kN/m<sup>2</sup> en toda el área del helipuerto. Esta carga es mayor que en el caso de aterrizaje de emergencia porque considera personal echando combustible al helicóptero y labores de mantenimiento con maquinaria específica.

### 6.2.2. Acciones variables

#### **Sobrecarga de uso**

La carga debida al helicóptero en reposo es igual a:

$$Q_{rep} = MTOM = 11000 \text{ kg} = 107,9 \text{ KN}$$

Para la transmisión de la carga al helipuerto según la normativa se asume que se aterrizará sobre las dos ruedas traseras, por lo que se contempla que  $Q_{imp}$  se dividirá en dos cargas puntuales en el sentido de la gravedad aplicadas a una distancia de 3 metros, siendo esta la distancia entre las ruedas del tren de aterrizaje.

#### **Viento**

Se consideran los mismos valores que se han descrito en el apartado anterior en el caso de aterrizaje de emergencia.

#### **Nieve**

Al igual que se ha justificado en el apartado anterior no se tendrá en cuenta la sobrecarga debida a la posible presencia de nieve.

Se puede observar que las cargas debidas al helicóptero en reposo son muy inferiores, como es lógico, a las debidas a un aterrizaje de emergencia que en la mayoría de los casos serán mas desfavorables. Las cargas de un helicóptero en reposo pueden ser las predominantes principalmente debido a que el valor de la carga muerta es mayor en estructuras con una longitud de vano notable. Al no ser el caso de este helipuerto como se comprobará mas adelante, ya que se prevé diseñar una estructura con longitudes de vano entorno a los 5 metros, únicamente se dimensionará para la hipótesis de cargas de aterrizaje de emergencia del helicóptero.