

Diseño de mástiles y torres

Luis C. Pérez Tato



Figura 1: Colapso del mástil de 646.38 metros de altura de radio Varsovia (1991).

1. Introducción

En el presente documento se exponen los procedimientos y métodos de cálculo a emplear en el diseño de mástiles y torres de acero.

Como se verá en la siguiente exposición, el diseño de este tipo de estructuras presenta algunas dificultades poco corrientes en la práctica de la ingeniería estructural. Prueba de ello es que el número de colapsos que se producen en este tipo de estructuras es sensiblemente superior a la media¹.

2. Normas y documentos de referencia

2.1. Normativa específica

La normativa específica que ha de servir como marco en el diseño de este tipo de estructuras es la siguiente:

- Eurocódigo 3: Parte 3.1 Torres, mástiles y chimeneas.

¹Véase por ejemplo la relación dada en este enlace

- TIA/EIA-222: Structural Standards for Steel Antenna Towers and Antenna Supporting Structures.
- BS-8100-1: Lattice Towers and Masts.
- DIN 4131: Steel Radio Towers Analysis and Structural Design.

2.2. Otras normas

Otras normas, de carácter más general, que deberán tenerse en cuenta son:

- Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras.
- Eurocódigo 3: Diseño de estructuras de acero.
- Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico.
- Eurocódigo 8: Diseño sísmico de estructuras.
- EAE: Instrucción de acero estructural.
- EHE: Instrucción de hormigón estructural (cementaciones,...).

2.3. Documentos de referencia

Por último, como documentos de referencia se pueden citar:

- Manual de tirantes. Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural.
- Los cables de acero y sus aplicaciones. Serrano Núñez et al. Universidad de Cantabria.

3. Documentación de partida

Al iniciarse las labores de diseño y durante su desarrollo es necesario establecer en colaboración con el cliente los requisitos básicos que debe cumplir

la estructura. Estos requisitos dependerán fundamentalmente de la función (o funciones) que desempeñará la torre (antenas de UHF o VHF, soporte para parábolas de microondas, telefonía móvil, soporte para anemómetros², iluminación,...) y en menor medida del entorno en que se va a construir: zona despoblada o urbana, características geotécnicas del terreno, clima,...).

Como resultado de este trabajo inicial deberán quedar determinados los siguientes aspectos:

- Definición geométrica, masa, posición y orientación de todos los elementos que irán fijados a la torre.
- Rotaciones admisibles (acimut y elevación) de cada uno de los elementos anteriores.
- Necesidad de establecer accesos a dichos elementos (escaleras de pates,...).
- Previsión de necesidades futuras en lo relativo a la instalación de equipos.
- Características climáticas de la zona, en particular en lo que se refiere al viento, al hielo y a la simultaneidad de ambos.
- Las dimensiones de la parcela en la que se construirá la torre y las características del acceso a la misma.
- Las características geotécnicas del terreno (informe geotécnico).
- Condiciones a cumplir impuestas por las normas urbanísticas o de otro tipo que deban respetarse en la ubicación de la torre. Aspecto estético de la misma.

4. Criterios de diseño

4.1. Selección del tipo estructural

El primer paso para diseñar la estructura consistirá en elegir el tipo estructural a emplear (monoposte, torre en celosía, mástil atirantado,...).

Esta selección se suele basar en la consideración de cuatro condiciones principales:

1. Carga a soportar. Resistencia al viento.

²Las necesidades que, respecto al conocimiento del régimen de vientos, imponen los estudios de viabilidad de los parques eólicos han hecho más frecuente el uso de este tipo de torres.

2. Ocupación en planta.

3. Altura de la torre.

4. Presupuesto.

4.1.1. Carga a soportar. Resistencia al viento

Vendrá determinada por los equipos que se vayan a instalar en la estructura. Como se ha indicado en el apartado anterior, además del peso, influirán la superficie expuesta al viento, orientación, etcétera. Como la carga que domina el problema es la debida al viento, es importante seleccionar un diseño que presente la menor resistencia posible.

4.1.2. Ocupación en planta

El espacio necesario para instalar la estructura variará según el tipo de estructura que adoptemos. La presencia de tirantes hace aumentar la superficie ocupada.

4.1.3. Altura de la torre

Algunos tipos de estructura son más adecuados que otros dependiendo de la altura. Para alturas muy grandes es obligado el uso de mástiles atirantados.

4.1.4. Presupuesto

Como criterio general puede decirse que cuanto menos espacio pueda ocupar la estructura en planta más cara será su instalación. Además el coste dependerá de la maquinaria que se requiera para su instalación.

4.2. Diseño preliminar

Una vez seleccionado el tipo estructural se deberán establecer algunos diseños preliminares como pueda ser la sección transversal de la torre, la configuración del arriostamiento, los perfiles a emplear para las barras (laminados o tubulares),...

El diseño de las uniones y del tipo de perfiles a emplear está estrechamente relacionado y tiene especial repercusión sobre el coste de la estructura.

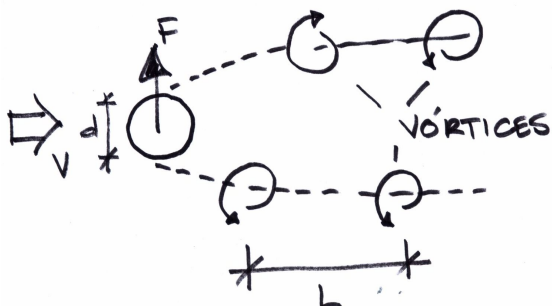


Figura 2: Desprendimiento de vórtices en un cilindro sometido a viento.

5. Acciones

Se exponen aquí las consideraciones más importantes acerca de las cargas de viento, hielo, rotura de un tirante y sismo. Los criterios a adoptar para la evaluación de las demás acciones (peso propio, ...) no difieren sustancialmente de los empleados para otras estructuras de uso corriente.

5.1. Viento

Estas estructuras, tan esbeltas, son especialmente sensibles a las cargas dinámicas y el viento lo es. Esta sensibilidad se debe a su flexibilidad y su bajo amortiguamiento. En torres (estructuras exentas) cuyos modos propios están generalmente bien diferenciados la respuesta dinámica de la estructura está gobernada por el modo fundamental de vibración. Por el contrario cuando se trata de mástiles (estructuras atirantadas), la acción del viento sobre los propios tirantes y el comportamiento no lineal de éstos complica la solución del problema. En consecuencia, salvo que la escasa importancia de la estructura o su simplicidad justifiquen la introducción de simplificaciones, la respuesta de la estructura a la acción del viento se obtendrá mediante integración directa en el tiempo del problema dinámico planteado para la estructura sometida a la acción de una ráfaga de viento. Las características de dicha ráfaga (intensidad, duración, ...) se determinarán a partir de la información climatológica obtenida de la documentación de partida y de las especificaciones de las normas.



Figura 3: Hielo adherido a las barras de una torre en celosía.

5.2. Hielo

El hielo, como para el resto de estructuras, supone una carga gravitatoria adicional sobre la misma (y sobre los tirantes cuando existen) pero, además, tiene en estas estructuras los siguientes efectos:

- En determinadas circunstancias la distribución de la carga de hielo puede ser asimétrica respecto al eje de la estructura. Esto debe ser tenido en cuenta tanto al considerar los estados límite de equilibrio como los esfuerzos que introduce esta asimetría.
- Aumenta la superficie expuesta al viento de los elementos de la estructura y, por tanto, la fuerza que resulta de la presión del viento sobre los mismos.
- Aumenta la masa por unidad de longitud de estos elementos, alterando por tanto los modos propios de la estructura. Esto ha de tenerse en cuenta al calcular la respuesta dinámica.

5.3. Rotura de un tirante

Cuando se trata de mástiles atirantados es necesario comprobar la respuesta de la estructura a la rotura de alguno de los tirantes. Como en los casos anteriores se trata de una carga dinámica de tipo impulsivo con las mismas implicaciones que ya se han comentado.

5.4. Sismo

Ya se ha hablado de la sensibilidad de este tipo de estructuras frente a acciones dinámicas por lo que aquí bastará recordar lo ya dicho en el apartado correspondiente al viento y la modificación de la respuesta dinámica que produce el hielo.

6. Análisis

Como ya se ha indicado en el apartado referido a las acciones al tratarse de estructuras muy esbeltas los fenómenos dinámicos y los de inestabilidad cobran especial importancia. Para que los resultados del análisis permitan establecer que el diseño presenta la suficiente seguridad frente a estos fenómenos se emplearán las técnicas específicas que se indican a continuación.

6.1. Análisis de pandeo linealizado

Mediante esta técnica se obtendrán las imperfecciones que se introducirán en la geometría de la estructura de modo que la geometría imperfecta resultante presente una tendencia al pandeo igual o superior a la que tendrá la estructura real. Dicho de otro modo, se trata de responder a la pregunta ¿de qué modo deberían disponerse las imperfecciones en la ejecución de manera que resultaran lo más desfavorables posible respecto al pandeo?. Para ello se procede del siguiente modo:

- Se obtienen los primeros modos de pandeo lineal de la estructura.
- Se considera como geometría inicial de la estructura la que resulte de combinar linealmente los modos de pandeo obtenidos en el punto anterior de modo que se obtenga un valor máximo de «imperfección» igual al impuesto por la normativa.
- Consideración en el análisis de la no linealidad geométrica del problema.

6.2. Integración directa de la ecuación de equilibrio dinámico

Como ya se ha comentado en problemas de este tipo en los que las deformaciones no pueden considerarse infinitesimales (no linealidad geométrica) no es aplicable (al menos directamente) el análisis

modal para realizar el cálculo dinámico. En consecuencia dicho cálculo se realizará por integración directa en el tiempo.

6.3. Modelización del contacto cimiento-terreno

La mayor o menor rigidez de la cimentación influirá en los resultados obtenidos en los análisis citados anteriormente por lo que deberá ajustarse todo lo posible a la realidad. En general no deberá considerarse la cimentación como un empotramiento.

6.4. Fatiga

Para la comprobación a fatiga de los nudos de la estructura se empleará el método de clasificación según se especifica en la norma EN-1993-1-9 (Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-9: Fatiga.).

El método se basa en la clasificación de los detalles estructurales de diferentes tipos de nudos en varias categorías de detalle. Cada categoría corresponde a una carrera de tensiones nominales bajo la cual se producirá la rotura tras sufrir 2 millones de ciclos.