

Sólido indeformable. Estabilidad global.

OBJETIVO

El monolito publicitario de la figura es una estructura relativamente ligera, formada por una celosía metálica que sostiene los paneles que definen sus caras. Su cimentación, de hormigón, debe diseñarse para asegurar su estabilidad global frente a su propio peso y la acción horizontal del viento.

DATOS

La geometría está a la vista en la figura. Se sugiere diseñar una cimentación prismática de planta cuadrada cuyo centro coincida con el de la base del monolito; en todo caso, la cara superior de la cimentación debe contener los tres vértices de la base del monolito, a través de los que éste se ancla en aquélla. La altura o *canto* de la cimentación debiera ser al menos de 0,5 m, por consideraciones de ejecución y de resistencia; la cimentación se yergue sobre el suelo, no requiriendo excavación (salvo la necesaria para la limpieza del terreno).

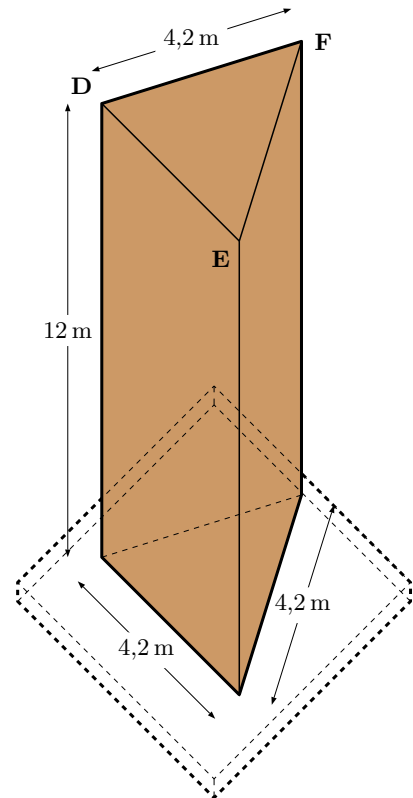
El peso del monolito es el de sus tres caras verticales y su cara superior, con un peso superficial estimado en $0,5 \text{ kN/m}^2$ (incluyendo el peso propio de la celosía metálica de la estructura portante).

La acción horizontal del viento se modelará mediante presiones *normales* a las superficies *verticales*¹ del monolítico. En principio, el viento puede actuar en cualquier dirección horizontal y con cualquier sentido. La intensidad de la presión eólica w varía con el ángulo α que forme la dirección del viento con la normal a la superficie considerada, y con la posición de la superficie respecto al sentido del viento: en las superficies a sotavento, la presión w es negativa (succión), de valor constante, $-0,4 \text{ kN/m}^2$; en las superficies a barlovento el valor de w se tomará de la siguiente tabla.²

Presión en superficies a barlovento

| α (°) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|------|------|
| w (kN/m ²) | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 0,2 | 0 | -0,2 | -0,4 |

Valores intermedios pueden interpolarse linealmente



El peso específico del hormigón se estima en 23 kN/m^3 . La presión media que el terreno puede resistir con seguridad es de 100 kN/m^2 . El coeficiente de rozamiento entre hormigón y suelo se estima en 0,25. A los efectos de la estabilidad global, se requiere un coeficiente de seguridad γ de 4.

RESULTADOS

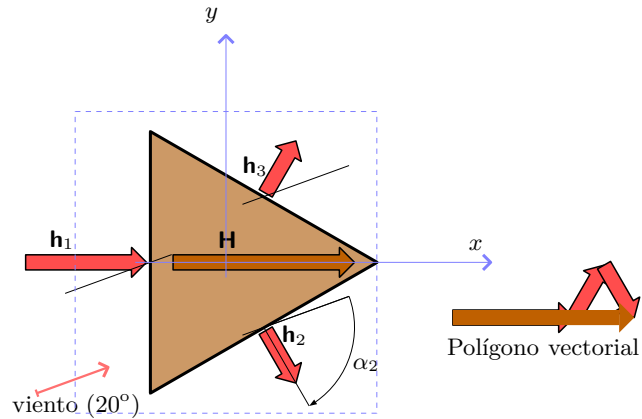
- Definición geométrica de la cimentación y dimensiones globales del conjunto, con indicación del peso total de la construcción. Descripción de los criterios empleados en el diseño.
- Descripción de las hipótesis de carga *pésimas* a efectos de la estabilidad global respecto al vuelco, el deslizamiento y el hundimiento, indicando la dirección y sentido con que actúa el viento en cada hipótesis, así como su resultante estática global sobre el monolito (indicando su módulo, dirección y sentido). Justificación de la elección de esas hipótesis.
- Para cada una de las hipótesis *pésimas* y para la cimentación diseñada: la comprobación de la seguridad al vuelco y al deslizamiento, así como la estimación del valor máximo previsible de la presión media sobre el terreno.

¹Las superficies horizontales también sufren la acción del viento, aunque aquí prescindimos de ella para evitar complicaciones innecesarias. Pero, ¡jojo!, en otras formas puede tratarse de acciones más importantes que aquellas otras sobre las caras verticales. Por el mismo motivo, no se considera la acción del viento sobre la cimentación, que también la sufre.

²El modelo aquí descrito *no es* el modelo vigente en España, el CTE.

PAUTAS

1. La fuerza equivalente a la acción del viento en cada cara i se obtiene como producto de la presión que corresponda (dependiente del ángulo α_i), por el área de la cara, $w_i \cdot A_i$. Este conjunto de fuerzas puede manejarse tal cual, o empaquetándolo en una resultante, \mathbf{H} , de la que hay que calcular su módulo, dirección y sentido. La dirección de la fuerza resultante de la acción del viento *no tiene por qué coincidir* con la del viento (interviene la aerodinámica de la forma de la construcción, incluso en modelos estáticos como el empleado aquí).



2. El requisito estructural de estabilidad exige, para cada condición de equilibrio, coeficientes de seguridad de *al menos* el valor especificado, γ (en este caso, 4). Coeficientes mayores son, naturalmente, bienvenidos, siempre que no lleguen con menoscabo de otra condición (el coste, por ejemplo). En general, no resulta razonable pretender ni que ambos coeficientes (al vuelco y al deslizamiento) sean iguales ni que sean exactamente iguales a γ . En lo que respecta a la estabilidad global, el *coeficiente de seguridad de la construcción* es el menor de ellos.
3. Si el esquema de la cimentación es un prisma de base cuadrada, y se acepta la sugerencia de que su canto sea de *al menos* 0,5 m, se tiene un conjunto de tres incuaciones y dos incógnitas (el canto y el lado de la cimentación) que admite infinitas soluciones. Incluso si no se admite la sugerencia antedicha, al tratarse de incuaciones las soluciones son infinitas. Es decir que, como cabía esperar, el problema de diseño es de naturaleza *estética* y no puede resolverse *sólo* con argumentos mecánicos (aunque la consideración de condiciones adicionales, como limitar el máximo valor de la presión media sobre el terreno, puede ayudar a restringir el campo de soluciones viables).

Algunas soluciones

Peso del monolito: 79,4 kN. Superficie necesaria de la cimentación para soportar el monolito con seguridad: 0,794 m², un cuadrado de unos 90 cm de lado. Lado mínimo de una cimentación de base cuadrada para cumplir con los requisitos geométricos: > 4,2 m. Si la cara superior (**DEF**) del monolito se apoya en su perímetro, ¿cuál es la reacción de éste sobre aquella por unidad de longitud? 0,30 kN/m.

Viento. Fuerza total sobre una cara a sotavento: -20,2 kN (succión). Fuerza máxima sobre una cara a barlovento: 40,3 kN. Fuerza mínima sobre una cara a barlovento: la misma que en una cara a sotavento. Resultante total del viento en la dirección x : 60,5 kN a media altura del monolito en la dirección x . Máximo ángulo del viento con el eje x para el que la resultante total sigue siendo de 60,5 kN: 30°. Máximo ángulo del viento para el que la resultante total sigue actuando en la dirección x : 30°. ¹

Viento a 60° respecto al eje x . Ángulo del viento respecto a la normal de la cara 1: 60°; fuerza total del viento en esa cara: 10,1 kN. Resultante total del viento: 30,24 kN, a media altura y formando 60° con el eje x .

Viento a 45° respecto al eje x . Ángulo del viento respecto a la normal de la cara 1: 45°; fuerza total del viento en esa cara: 25,2 kN. Ángulo del viento respecto a la normal de la cara 2: 75°; fuerza total del viento en esa cara: -5,04 kN (succión). Resultante total del viento: 40,0 kN, a media altura, formando 19,1° respecto al eje x .

Cimentación de 50 cm de canto y 500 cm de lado. ² Presión media sobre el suelo sin viento: 14,7 kN/m². Fuerza total del viento en la dirección x que ocasionaría el vuelco del monolito: 141 kN. Coeficiente de seguridad a vuelco: 2,33. Fuerza total del viento que causaría el deslizamiento y seguridad al mismo: 91,7 kN y 1,51. Presión media sobre el terreno cuando sopla el viento en la dirección x : 25,7 kN/m² (con una excentricidad de la reacción de 1,07 m respecto al centro de la base de la cimentación). Si todos estos cálculos son correctos (¿lo son?), la solución no es suficientemente segura ni a vuelco ni a deslizamiento.

Una cimentación segura a partir de la anterior. Peso mínimo de la cimentación para que la seguridad al deslizamiento sea 4: > 888 kN, es decir, más de 8,79 m de lado si mantenemos el canto. Con un lado de 8,80 m, la seguridad a vuelco sería ahora de 10,86 y la presión media con viento x de 13,8 kN/m². Serían necesarios un poco más que 38 m³ de hormigón (unos 890 kN, más de 10 veces el peso del monolito).

¿Habría cimentaciones de este estilo con menor gasto de material? No, pues el problema es el deslizamiento, que requiere peso, sea cual sea su forma. Pero habría soluciones con distinta forma igual de seguras. Si el coste se considera excesivo habría que acudir a otros esquemas (cimentación enterrada, atirantamiento en anclajes al terreno) que movilizarán pesos menos costosos, por ejemplo, el del propio terreno. También podría reducirse la seguridad (si el valor 4 no proviene de una norma gubernamental que hay que cumplir), pues a fin de cuentas la primera solución es segura (no vuelca, desliza o hunde), pero no en la medida exigida.

¹Esta coincidencia numérica en el valor de ambos ángulos, es eso, una coincidencia por las propiedades geométricas del triángulo equilátero. ¿Pasaría lo mismo si la base no fuera equilátera o si fuera cuadrada? No, ambos ángulos tendrían distintos valores.

²El lado de 500 cm permite que la base de la zapata sea cobaricéntrica con la base del monolito, y con holgura. Esta circunstancia no es imprescindible, pero resulta en un diseño más fácil de analizar.