

Capacidad de carga de fundaciones gravitacionales para turbinas eólicas

Rafael Aranguiz¹

¹Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile. raranguiz@ucsc.cl

Abstract

The present work compares four methods used for foundations design, namely the Danish code, the Eurocode and the US Army's code with the procedures of Meyerhof and Vesic. The comparison is made by means of failure envelopes for a foundation of a offshore wind turbine. Two kinds of soil are considered in the analysis, sand and clay. The envelopes are made considering a constant vertical force, while the horizontal one varies from zero to failure. The results show that for a granular soil all methods converge when large values of horizontal forces are considered. On the contrary, for the case of cohesive soil, only two methods coincide, and the most conservative one is found to be the Vesic method.

Keywords: bearing capacity, failure envelopes, gravity foundations, wind turbines.

1. INTRODUCCIÓN

En general, el costo de la fundación de una estructura para turbinas de viento localizadas mar adentro, puede alcanzar hasta un 30% del costo total de toda la estructura, debido a que las sollicitaciones generadas por el viento y las olas son mayores mar adentro que en tierra firme. Es por ello que el método de diseño juega un rol fundamental en un proyecto de gran envergadura, ya que un método conservador implicará un costo excesivo si la cantidad de turbinas de viento a instalar es considerable.

El presente trabajo tiene como principal objetivo comparar cuatro métodos de diseño de fundaciones mediante capacidad de carga última. Estos métodos son los propuestos en el código europeo, el código danés, y el código del ejército de los Estados Unidos según los métodos de Meyerhof y Vesic.

Todos los métodos de diseño se basan en la clásica fórmula de Terzaghi (1943), pero con algunas consideraciones especiales que permiten aplicarla en casos más específicos. Son precisamente estas consideraciones especiales las que diferencian a los métodos, ya que cada uno propone factores de carga y/o coeficientes de corrección distintos.

La comparación se realiza mediante la construcción de la envolvente de falla de una fundación gravitacional de una turbina de viento ubicada mar adentro. Para ello se consideran dos tipos de suelos de fundación, arcilla y

arena. Este tipo de fundación gravitacional es común en las costas de Dinamarca donde la profundidad de sus aguas es de 15 a 20m.

2. ECUACIÓN DE CAPACIDAD DE CARGA

La ecuación general de capacidad de carga está dada por:

$$q_u = \frac{Q_u}{A'} = \frac{1}{2} \gamma' B' N_\gamma \zeta_\gamma + q' N_q \zeta_q + c N_c \zeta_c \quad (1)$$

que es la misma ecuación propuesta por Terzaghi en el año 1943, pero con coeficientes empíricos de corrección. Además, se considera la excentricidad de la carga vertical al incluir el concepto de área efectiva.

En la ecuación (1), A' y B' son el área y el ancho efectivos de la fundación, respectivamente. Los términos N_γ , N_q y N_c son los factores de capacidad de carga, los cuales dependen del ángulo de fricción del suelo: γ es el peso específico del suelo, q' es la presión efectiva al nivel de sello de fundación. Finalmente, ζ_γ , ζ_q y ζ_c son los coeficientes de corrección definidos como: $\zeta_\gamma = s_\gamma i_\gamma d_\gamma$, $\zeta_q = s_q i_q d_q$, $\zeta_c = s_c i_c d_c$ donde s , i y d indican corrección por forma de la fundación, inclinación de la carga, y profundidad del sello de fundación respectivamente.

2.1 Área efectiva de la fundación

El área efectiva de la fundación se determina considerando que su centro geométrico coincide con el

punto de aplicación de la carga (Hansen, 1970). La figura 1 muestra dos ejemplos de cálculo de áreas efectivas y equivalente, donde la dimensión más corta equivale a B' y la más larga a L' . Entonces, el área efectiva de la fundación es $A' = B' L'$.

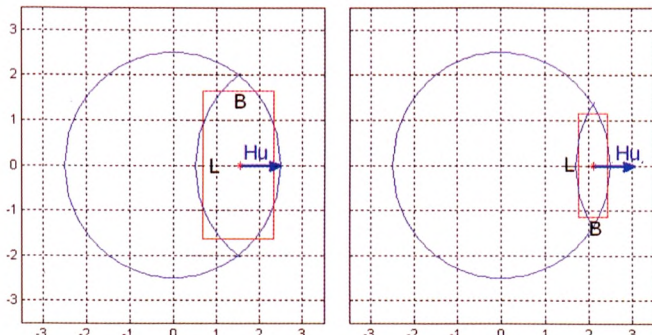


Figura 1: Área de fundación efectiva y equivalente para una fundación circular.

2.2 Factores de capacidad de carga

Los factores de capacidad de carga N_γ , N_q y N_c son funciones del ángulo de fricción del suelo, ϕ_d . La tabla 1 entrega las ecuaciones para el cálculo de dichos factores. Todos los métodos consideran que $N_c = \pi + 2$ para $\phi_d = 0$. Como se ve en la tabla 1, la principal diferencia entre los métodos es el factor de carga N_γ .

2.3 Coeficientes de corrección

Los coeficientes de corrección son términos principalmente

empíricos, que permiten usar la expresión general de Terzaghi (1943), en situaciones específicas. Estos coeficientes adimensionales dependen del método de diseño elegido y no están limitados únicamente a la forma de la fundación, la inclinación de la carga o la profundidad del sello de fundación, sino también existen para fundaciones horizontales sobre una pediente y sellos de fundación inclinados.

A modo de ejemplo, la tabla 2 muestra los coeficientes de corrección que actualmente utiliza el método de diseño danés (1998), y el código europeo (1992). Los coeficientes correspondientes a los métodos de Meyerhof y Vesic se pueden ver en (U.S Army corps of Engineers, 1992).

2.4 Factores de seguridad

Los métodos propuestos por Meyerhof (1963), y Vesic (1973), utilizan solamente un factor de seguridad global, mientras que los métodos danés y europeo utilizan factores de seguridad parciales tanto en los parámetros del suelo como en las cargas permanentes y vivas. Por tal razón, para comparar todos los métodos se define la ecuación (2) como la ecuación general que debe satisfacerse.

$$V_u \leq \frac{Q_u}{SF} \quad (2)$$

Los términos SF , Q_u y V_u dependen del método de

Model	N_c	N_γ	N_q
Código Danés	$(N_q - 1) \cot \phi_d$	$\frac{1}{4} N_c^{3/2}$	$\frac{1 + \sin \phi_d}{1 - \sin \phi_d} e^{(\pi \tan \phi_d)}$
Código Europeo	$(N_q - 1) \cot \phi_d$	$2(N_q - 1) \tan \phi_d$	$\tan^2(45 + \frac{\phi_d}{2}) e^{(\pi \tan \phi_d)}$
EE.UU Meyerhof	$(N_q - 1) \cot \phi_d$	$(N_q - 1) \tan 1.4 \phi_d$	$\tan^2(45 + \frac{\phi_d}{2}) e^{(\pi \tan \phi_d)}$
EE.UU Vesic	$(N_q - 1) \cot \phi_d$	$2(N_q + 1) \tan \phi_d$	$\tan^2(45 + \frac{\phi_d}{2}) e^{(\pi \tan \phi_d)}$

Tabla 1: Factores de capacidad de carga según diferentes métodos.

Model	s_q	s_γ	s_c	i_q	i_γ	i_c
Denmark	$1 + 0.2 \frac{B'}{L'}$	s_q	$1 - 0.4 \frac{B'}{L'}$	$(1 - R_{HV})^2$	i_q^2	i_q
Europe	$1 + \frac{B'}{L'} \sin \phi$	$1 - 0.3 \frac{B'}{L'}$	$\frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1}$	$(1 - 0.7 R_{HV})^3$	$(1 - R_{HV})^3$	$\frac{i_q N_q - 1}{N_q - 1}$

Tabla 2: Coeficientes de corrección por forma e inclinación de la carga.

Nota: En las ecuaciones $R_{HV} = \frac{H}{V + A' c_d \cot \phi}$, H : fuerza horizontal, V : fuerza vertical.

diseño, donde las solicitaciones se definen como:

$$V_u = \gamma_{p,p} V_{u,p} + \gamma_{p,v} V_{u,v} \quad (3)$$

en la cual $\gamma_{p,p}$ y $\gamma_{p,v}$ son factores seguridad parciales para las cargas permanentes y variables, respectivamente. SF es el factor de seguridad global y Q_u es la capacidad de carga última del suelo considerando los factores parciales de seguridad.

Los factores parciales de seguridad para los parámetros del suelo se definen como:

$$\phi_d = \text{atan} \left(\frac{\tan \phi}{\gamma_\phi} \right) \quad (4)$$

$$c_d = \frac{c}{\gamma_c} \quad (5)$$

Los valores de N_γ , N_q y N_c se calculan posteriormente con las ecuaciones dadas en la tabla 1 donde ϕ_d se calcula mediante la ecuación (4). Adicionalmente, el código danés considera un ángulo de fricción de diseño dado por $\phi = 1.1 \phi_{\text{triaxial}}$ (Hansen, 1970), mientras que los otros métodos utilizan simplemente $\phi = \phi_{\text{triaxial}}$.

Finalmente, los factores de seguridad globales y parciales

de cada método se resumen en la tabla 3. De esta manera, la ecuación (2) puede ser usada para todos los métodos.

3. PROCEDIMIENTO

La comparación de los cuatro métodos de diseño se realiza mediante la construcción de envolventes de falla, que corresponden al estado último de la combinación V_u - H_u . Para ello, las dimensiones de la fundación se mantienen constantes y se varían las cargas vertical y horizontal hasta alcanzar la falla según la ecuación (2).

Las dimensiones de la fundación se muestran en la figura 2, la cual compara una fundación real diseñada por la consultora de ingeniería Carl Bro A/S en Dinamarca y el modelo utilizado en el presente análisis.

Para efectos de cálculo se asume que las fuerzas actúan a una distancia de 20 m desde el sello de fundación.

El análisis es separado en dos partes, la primera considera el suelo de fundación como una arena con un ángulo de fricción $\phi = 30^\circ$ y cohesión $c = 0$. El segundo caso utiliza un suelo de fundación de arcilla con $\phi = 0$ y cohesión $c = 75$ kPa.

Model	SF	$\gamma_{p,p}$	$\gamma_{p,v}$	γ_{phi}	$\gamma_{c'}$	γ_{c_u}
Código Danés	1	1	1.5	1.2/1.3	1.8/2.0	1.8/2.0
Código Europeo	1	1	1.3	1.25	1.6	1.4
EE.UU Vesic	3	1	1	1	1	1
EE.UU Meyerhof	3	1	1	1	1	1

Tabla 3: Factores de seguridad globales y parciales para cada método de diseño

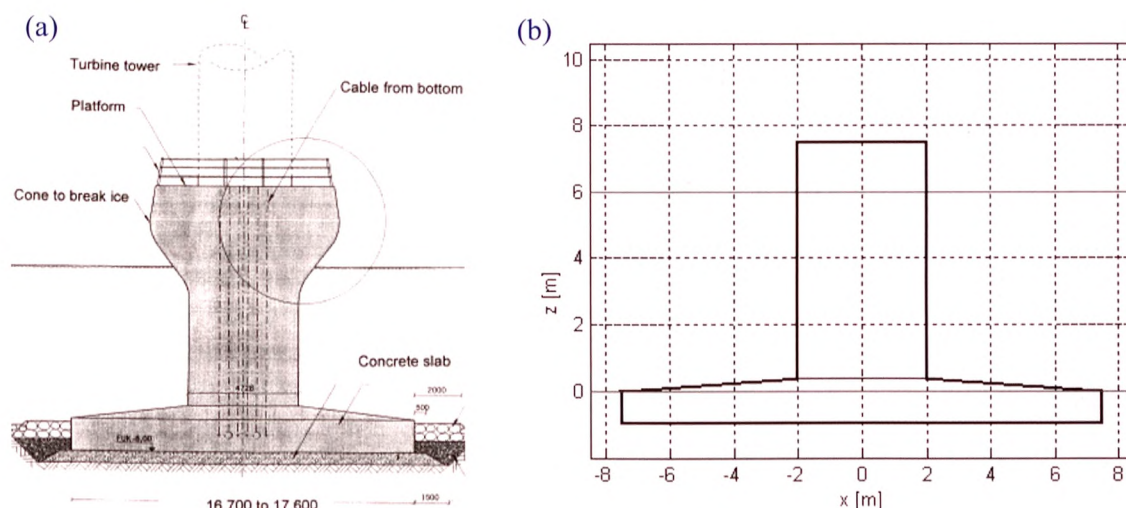


Figura 2: Fundación gravitacional de una turbina de viento. (a) Tamaño real de una fundación, Carl Bro AS (b) Modelo utilizado en el análisis.

4. RESULTADOS

4.1 Envolventes de falla para zapatas sobre arena

La envolvente de falla para el caso en que el suelo es arena se muestra en la figura 3. En la parte superior de la figura 3a se encuentra la envolvente cuando sólo se consideran cargas permanentes, esto es, los factores parciales de seguridad corresponden a $\gamma_p=1$ según el código danés y el código europeo. Por el contrario, la figura 3b muestra la envolvente de falla cuando la fuerza horizontal es considerada variable, por lo tanto, la falla se alcanza para valores menores de H_u . En ambos casos, los métodos de Meyerhof y Vesic tienen las mismas curvas debido a que $\gamma_p=1$. Los resultados incluyen también dos categorías de seguridad recomendadas por el código danés; estas son la categoría normal, indicada con línea segmentada, y la categoría alta, graficada con línea continua.

Para el caso de fundaciones de turbinas de viento, el código danés recomienda utilizar la categoría alta de seguridad, es decir, un factor parcial de seguridad $\gamma_f = 1.3$ y $\gamma_c = 2$, como se indica en la tabla 3.

Por otro lado, como las cargas horizontales son principalmente variables debido al viento y las olas, el análisis debe centrarse en la figura 3b. En tal

caso, el método de Meyerhof y el código europeo muestran un comportamiento muy similar, tanto para valores pequeños de la fuerza horizontal como para valores más grandes. En la misma figura 3b se observa que el método de Vesic es el más conservador para valores pequeños de la fuerza horizontal, sin embargo, al incrementar dicha fuerza este método converge a un valor similar a los métodos nombrados anteriormente, es decir, a $H = 3\text{ MN}$. El método danés con la categoría alta de seguridad muestra ser el método más conservador.

Finalmente, como las fuerzas horizontales son generalmente grandes en este tipo de estructuras, es posible concluir que todos los métodos muestran similares envolventes de falla, excepto por el método danés que es un 10% más conservador que los anteriores. Es importante destacar además, que todos los métodos utilizan diferentes factores de seguridad globales y parciales, como se mostró en la tabla 3.

4.2 Envolventes de falla para zapatas sobre arcilla

Para el caso en que el suelo de fundación es arcilla, el resultado es completamente distinto al caso de arena, como se puede ver en la figura 4. Se puede observar que el método de Vesic es extremadamente sensible al tipo de suelo, y es el método más conservador de todos. Por el contrario, el método del código europeo no presenta

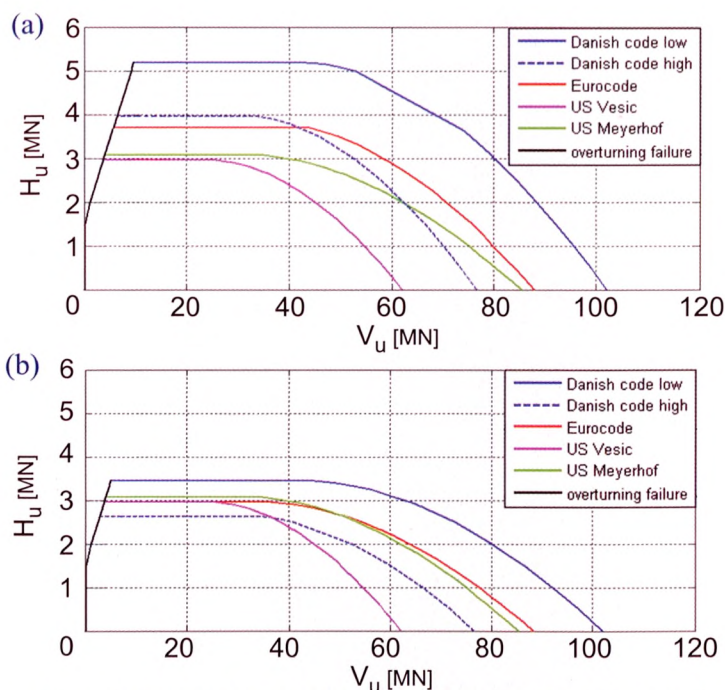


Figura 3: Envolventes de falla para arena con $\phi = 30^\circ$ y $c = 0$. (a) Sólo cargas permanentes y (b) Carga horizontal variable.

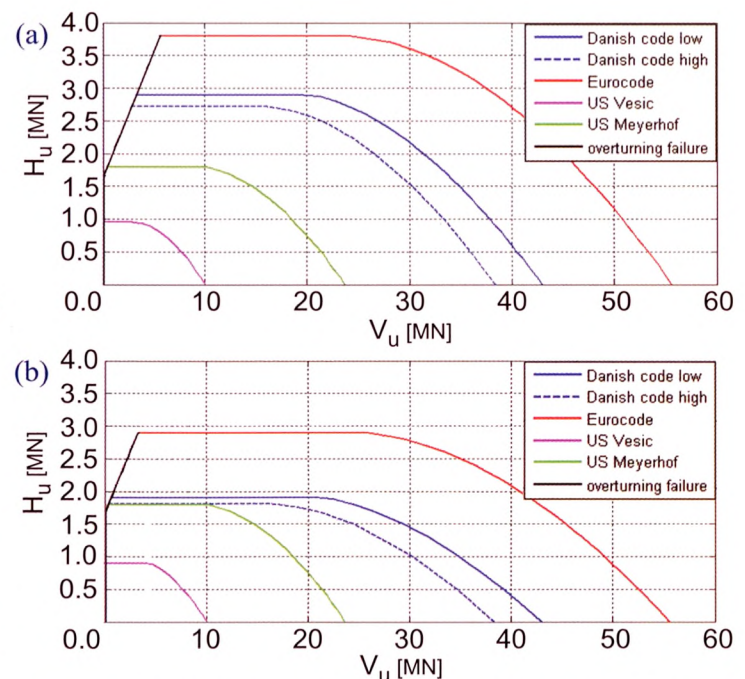


Figura 4: Envolventes de falla para arcilla con $\phi = 0$ y $c = 75 \text{ kN/m}^2$. (a) Sólo cargas permanentes y (b) Carga horizontal variable.

grandes diferencias en relación a los resultados para el caso de arena.

La respuesta a tal resultado está en los factores parciales de seguridad que utiliza el código europeo, es decir, $\gamma_c=1.4$ y $\gamma_p=1.3$. Como los coeficientes asociados a la cohesión son los más importantes en la capacidad de carga cuando el suelo es cohesivo, y si la fuerza horizontal es sólo variable, el factor global de seguridad sería equivalente a 1.8, el cual es bastante menor que el usado por el código de Estados Unidos que es 3.

Se puede observar además que el método de Meyerhof converge al resultado del método danés para valores grandes de fuerza variable horizontal. Esto se debe principalmente a que el método danés utiliza factores parciales de seguridad dados por $\gamma_c=2$ y $\gamma_p=1.5$, los cuales corresponden a un factor global equivalente cercano a 3. Además, los coeficientes de corrección tienen el mismo orden de magnitud. Sin embargo, para valores pequeños de fuerza horizontal se observan mayores diferencias en ambos métodos. Este resultado es obvio debido a que como la fuerza horizontal es variable, el factor parcial γ_p en el método danés es menos importante, por lo tanto el factor global de seguridad sería sólo equivalente a 2.

Finalmente, se observa también que el método danés tiene similares resultados para ambas categorías de seguridad, donde ambas envolventes convergen a un valor cercano a 1.8 MN para valores grandes de fuerza horizontal.

CONCLUSIÓN

En general se puede observar que para el caso de suelo granular con cargas horizontales importantes, todos los métodos presentan similares resultados, aún cuando unos utilizan factores de seguridad parciales y otros globales, además de los distintos coeficientes de corrección y factores de carga. Este resultado se observa con claridad para el caso de fuerzas variables, donde los métodos europeo y danés utilizan factores de mayoración de las cargas.

Para el caso de suelos cohesivos, sólo el método danés, con sus dos categorías de seguridad, coincide con el método de Meyerhof, mientras que el código europeo entrega valores más altos de falla de fuerza horizontal.

Por su parte, el método de Vesic es extremadamente conservador comparado con los demás métodos. Finalmente, para otro tipo de estructuras donde la fuerza horizontal es menos importante, los métodos analizados proporcionan distintos resultados, y en todos los casos, el más conservador es el método de Vesic.

REFERENCIAS

- 415 Practice for fundering, (1998). Danmark.
Eurocode, (1992). Geotechnical design – Part 1: General rules.
Hansen J. B. (1970). Bulletin No 28 Geoteknisk Institut, Copenhagen.
Meyerhof, G. (1963). Some recent research on the bearing capacity of foundations. Canadian Geotechnical Journal, Vol 1, pp 16-31.
Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, Inc., New York.
U.S. Army corps of Engineers (1992). Bearing Capacity of Soils. Department of the Army, Washington.
Vesic, A. (1973). Analysis of ultimate loads of Shallow Foundations. Journal of soil mechanics and Foundation Division ASCE, 96, N° SM1.

GEO SOIL DRILL

Somos una empresa emergente que se ha consolidado a través de un servicio basado fundamentalmente en el alto compromiso de su personal con nuestros clientes, lo que nos ha permitido brindar un servicio de calidad.



- Estudios de mecánica de suelos
- Sondajes geotécnicos (diamantina rotatoria, SPT)
- Agotamiento de napas
- Gestión total de derechos de aguas subterráneas

Tel: (56-41)2828522 -2986954
Movil: 82196856
E-Mail: lparra@vtr.net
Eyzaguirre 8730, Hualpén Talcahuano