

Comparación de Métodos de Análisis de Capacidad de Carga al Arranque de Cimentaciones Superficiales para Torres de Energía en Líneas de Transmisión

Ing. Yizel Andrea Castañeda Orjuela¹. Ing. Guillermo Pabón G².

¹Ingeniera Civil – Universidad La Gran Colombia

²Director de trabajo de grado - profesor de cátedra

RESUMEN

Se presenta la comparación de las metodologías para el cálculo de la capacidad al arranque, esto debido a que el método para el cálculo de capacidad al arranque actualmente es el cono de arranque, el cual ha sido utilizado en los últimos años debido a la experiencia de los ingenieros y debido a que el comportamiento en las obras de líneas de transmisión ha sido favorable; sin embargo, se han presentado diferentes tipos de metodologías que definen superficies de falla y fórmulas de capacidad al arranque diferentes a la que está siendo utilizada en el momento.

Este documento aportará información y orientación en el diseño y construcción en los proyectos que involucren las cimentaciones superficiales en líneas de transmisión; lo anterior, apoyado en metodologías de cálculo que sean compatibles con el suelo encontrado y así consecuentemente se optimice los materiales requeridos para su construcción, para así evitar un sobre diseño y por ende aumento costos en el desarrollo de estas cimentaciones.

ABSTRACT

The main subject of this document is the comparison of the methodologies for calculating the starting capacity. The current method for calculating the starting capacity is the starting cone, which has been used in recent years due to the experience of the engineers and because this method has had favorable result in the transmission line works; however, this work will show another types of methodologies to define fault surfaces and starting capacity formulas which differ from the one named before.

This document will provide information and guidance to the projects design and construction involving shallow foundations in transmission lines. This will be supported by calculation methodologies that are compatible with the soil found and thus consequently optimize the materials required for its construction, in order to avoid an over design and therefore elevated costs in the foundations development.

PALABRAS CLAVES

Transmission Tower = Torres de transmisión

Tension Load = Carga a Tensión

Shallow foundations = Cimentaciones superficiales

Uplift tests = Pruebas de tensión o arranque

1. INTRODUCCIÓN

En este documento se analizan las metodologías utilizadas para realizar los cálculos de la capacidad al arranque en cimentaciones superficiales donde se involucren torres eléctricas de alta tensión, que puedan tener algún tipo de cargas transversales como el viento sobre la estructura o el conductor y cargas longitudinales debido al tiro de conductores.

La capacidad al arranque es calculada de acuerdo con la experiencia del ingeniero de diseño. Actualmente la metodología que se utiliza para los diseños es el método de cono de arranque, donde se utiliza un valor de ángulo entre 15 y 30 grados; este método es usado para cualquier tipo de material.

De acuerdo con lo anterior, inicialmente se realiza una revisión de tres documentos que recopilan pruebas de carga realizadas donde se han medido las capacidades al arranque de zapatas a escala natural y que permiten revisar según las dimensiones de las zapatas y características del suelo, qué carga soportaron y cuál podría ser la superficie de falla que se produjo, con esto se procederá a realizar la modelación para comparar la carga de falla mediante un programa de elementos finitos.

Secuencialmente, se encuentra la verificación de cinco metodologías de cálculo donde se realiza la comparación entre ellas, y con respecto al cono de arranque, con el fin de determinar similitudes y diferencias en la predicción de la carga de falla, y cuál ó cuáles de éstas son más aplicables, dependiendo del tipo de suelo.

Seguido de esto, se realizará la modelación mediante el programa de RS3, donde con ayuda de las dimensiones de las zapatas que fueron ensayadas en escala natural, se realizará la modelación para determinar la carga de falla y así, realizar la comparación de la gráfica carga vs desplazamiento de tres zapatas seleccionadas de acuerdo a las pruebas de carga encontradas en el documento.

Por último, por medio de un diseño realizado para un proyecto por medio del método del Cono de Arranque, se toman las dimensiones de las zapatas indicadas por el diseñador, se aplica cada una de las metodologías, y de acuerdo con la carga de diseño, se determina el factor de seguridad correspondiente a cada una de las metodologías.

2. RESULTADOS

2.1. Comparación con variación paramétrica

Para realizar la variación paramétrica se generó la memoria de cálculo para el cono de arranque, fricción y cortante, Meyerhof y Adams, Balla, Matsuo y Biarez y Baraud. Los cálculos fueron generados en Excel y verificados de manera manual para evitar cual tipo de error en los resultados.

La variación paramétrica comenzó tomando diferentes medidas para las zapatas como anchos y profundidad de desplante, las mismas se asumieron cuadradas, es decir que tenían la misma medida en todos sus lados. Para esto fueron tomados valores de 2.5 m, 3.0m, 3.5 m y 4.0 m, adicionalmente, la profundidad de desplante a la cual

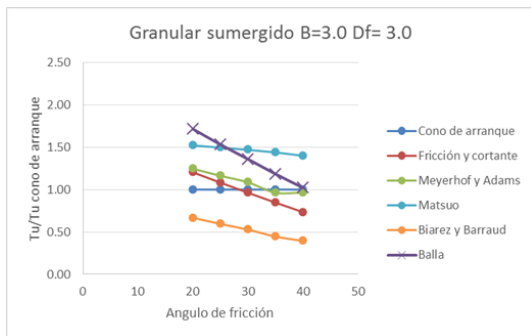
Comparación de Métodos de Análisis de Capacidad de Carga al Arranque de Cimentaciones Superficiales para Torres de Energía en Líneas de Transmisión

se apoyó la cimentación fueron variadas entre 2.5m, 3.0 m y 3.5 m.

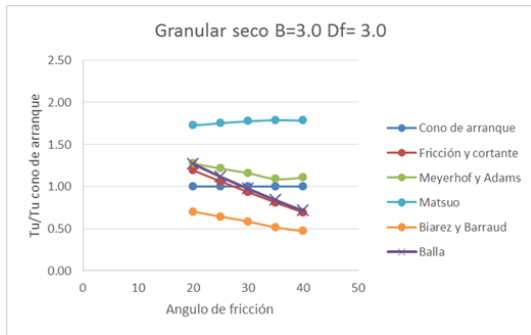
Para determinar la capacidad del cono de arranque se utilizó para el cálculo en suelos en condición seca un peso unitario de 16 kN/m³ y en condición sumergida de 10 kN/m³.

Por otro lado, se evaluó dos tipos de suelos, granulares y cohesivos, en condición seca se tomó el peso unitario total del suelo el cual tuvo un valor de 16 kN/m³ y en condición sumergida el valor tomado fue de la resta que se realiza entre el peso unitario total y el peso unitario del agua que da como resultado 6.19 kN/m³. Los suelos granulares se evaluaron con ángulos de fricción de 20, 25, 30, 35 y 40 grados y en suelos cohesivos se determinó tomar los ángulos de fricción de 15, 20, 25, 30 y 35 grados, para estos suelos la cohesión se varió de 10 kN/m², 20 kN/m² y 30 kN/m².

En la Gráfica 1 y Gráfica 2 se puede determinar que el método que se comporta de una manera promedio, que no es tan conservador y tampoco genera unos valores de capacidad muy altos, es el cono de arranque; de igual forma, se cuenta con una amplia experiencia en la utilización de este método en diseño.

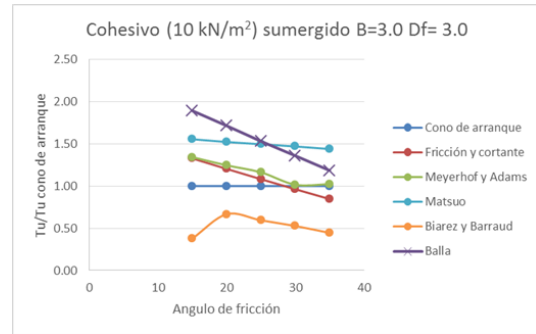


Gráfica 1. Muestra de graficas de material granular en estado sumergido.

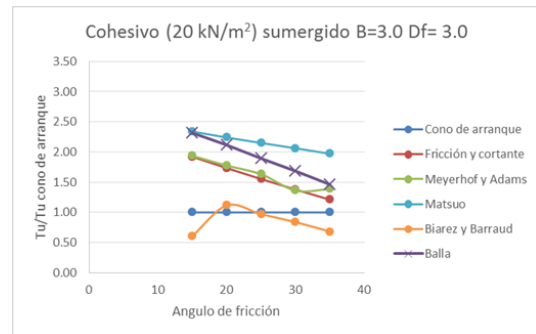


Gráfica 2. Muestra de graficas de material granular en estado seco.

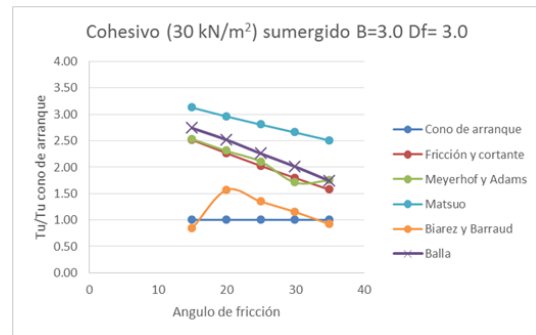
Para las Gráfica 3, Gráfica 4, Gráfica 5, Gráfica 6, Gráfica 7 y Gráfica 8 se puede concluir de esta variación paramétrica que el método que se tiene un comportamiento promedio es el de Meyerhof y Adams, debido a que tiende a comportarse similar en la variación paramétrica y siempre se encuentra en el promedio de los demás métodos



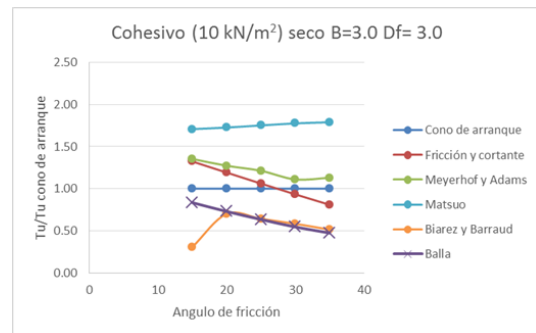
Gráfica 3. Muestra de graficas de material cohesivo de 10 kN/m² en estado sumergido.



Gráfica 4. Muestra de graficas de material cohesivo de 20 kN/m² en estado sumergido.

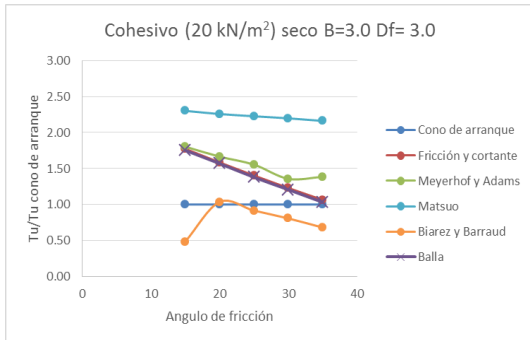


Gráfica 5. Muestra de graficas de material cohesivo de 30 kN/m² en estado sumergido.

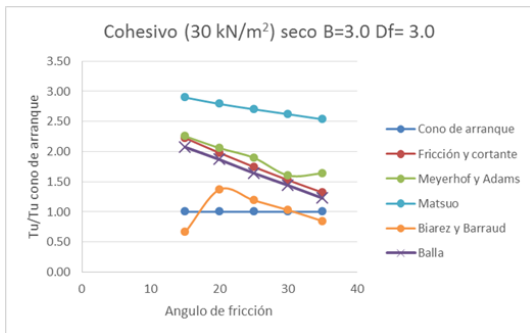


Gráfica 6. Muestra de graficas de material cohesivo de 10 kN/m² en estado seco.

Comparación de Métodos de Análisis de Capacidad de Carga al Arranque de Cimentaciones Superficiales para Torres de Energía en Líneas de Transmisión



Gráfica 7. Muestra de graficas de material cohesivo de 20 kN/m² en estado seco.



Gráfica 8. Muestra de graficas de material cohesivo de 30 kN/m² en estado seco.

2.2. Pruebas de cargas

Las pruebas de cargas analizadas se presentaron en tres documentos, de ellas fue extraída la información más relevante la cual serviría para hacer la comparación adecuada de cada una de ellas. Adicionalmente, se realizó el cálculo de la capacidad al arranque con los datos extraídos e introducidos en los cálculos de las diferentes metodologías a evaluadas.

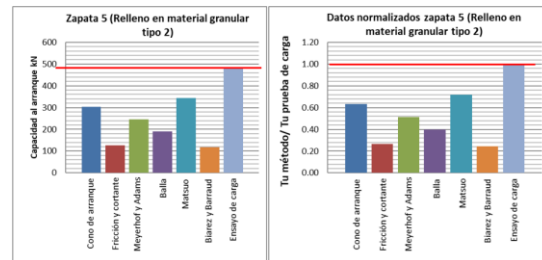
La investigación fue desarrollada en el año 2014 por el ingeniero Frederick Levy, como tesis de doctorado en la universidad de Southampton; el desarrollo de este trabajo se dio debido a la deficiencia de conocimiento respecto a la capacidad de carga al arranque de fundaciones, aplicable a líneas de transmisión. Adicionalmente, habla de la sobreestimación que se le da a las dimensiones de las fundaciones frente a las pruebas de carga; esto debido a que la construcción se vuelve costosa en las líneas de transmisión áreas.

Tabla 1. Cálculo de resistencia al arranque para el ensayo los cinco ensayos de carga - The Uplift of High Voltage Transmission Tower Foundations - Frederick Levy

Zapata/Método	1	2	3	4	5
	Tu kN/m²	Tu kN/m²	Tu kN/m²	Tu kN/m²	Tu kN/m²
Cono de arranque	296.03	292.50	291.03	293.80	303.54
Fricción y cortante	293.51	291.54	123.40	124.15	126.74
Meyerhof y Adams	324.24	321.88	237.11	239.23	246.67
Balla	568.06	562.55	414.20	186.03	190.74

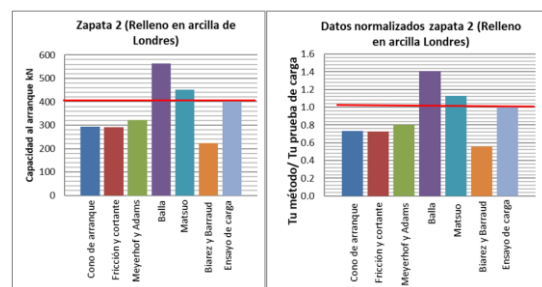
Zapata/Método	1	2	3	4	5
	Tu kN/m²	Tu kN/m²	Tu kN/m²	Tu kN/m²	Tu kN/m²
Matsuo	454.96	451.16	794.26	335.71	344.08
Biarez y Barraud	225.36	223.55	112.66	113.73	117.46
Ensayo de carga	440.00	400.00	280.00	300.00	480.00

En la Gráfica 9 Se realiza el cálculo de la capacidad por cada método que se está comparando y se decide graficar los valores; de la gráfica se debe tener en cuenta que el material sobre el que se realizó el ensayo fue un relleno de arcilla de Londres y al momento de ver la gráfica el método que se comporta o se encuentra cercano al valor de la prueba de carga es el método del matsuo, un poco mayor ($Tu_{Cono}/Tu_{PruebaCarga} = 1.03$); el valor más alto lo da el método de Balla ($Tu_{Cono}/Tu_{PruebaCarga} = 1.29$); el valor promedio lo da el método de cono de arranque ($Tu_{Cono}/Tu_{PruebaCarga} = 0.67$).



Gráfica 9. Valores de capacidad al arranque de diferentes métodos en comparación con ensayo de carga zapata 1.

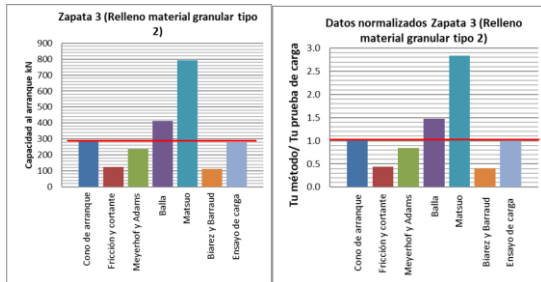
Los resultados que se muestran en la Gráfica 10 indican que el resultado que fue arrojado en la prueba de carga es de 400 kN; excepto para el método del cono de arranque, el valor de la prueba es menor a los datos reflejados por cada uno de los métodos; sin embargo, es importante tener en cuenta que el material sobre el cual fue realizada la prueba es un relleno de arcilla de Londres y revisando la gráficas se puede concluir que el método del cono de arranque al momento de normalizar los resultados se acerca a la unidad presentando un valor de $Tu_{Cono}/Tu_{PruebaCarga}$ de 0.73 por lo cual, es el más cercano, y un poco menor, al valor a la prueba de arranque. Así mismo, se puede indicar que el método de Balla arroja un valor de 1.41 por encima de los valores del ensayo realizado ($Tu_{Cono}/Tu_{PruebaCarga}$) y el método que da un valor promedio es el de Meyerhof y Adams ($Tu_{Cono}/Tu_{PruebaCarga} = 0.80$).



Gráfica 10. Valores de capacidad al arranque de diferentes métodos en comparación con ensayo de carga zapata 2.

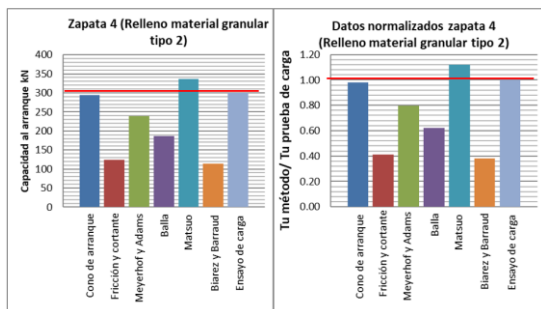
Comparación de Métodos de Análisis de Capacidad de Carga al Arranque de Cimentaciones Superficiales para Torres de Energía en Líneas de Transmisión

En la Gráfica 11 se muestran los resultados del cálculo realizado para la zapata que fue objeto de estudio; esta zapata quedó emplazada en material tipo 2 granular. El suelo que se ensayó es un suelo que no presenta cohesión y tiende a comportarse como un material granular, por lo cual, se puede concluir que el método que obtuvo (Tu método/ Tu prueba de carga) cercano a 1.0 fue el del Cono de Arranque y el más lejano fue el de Matsuo (TuMatsuo/TuPruebaCarga = 2.84).



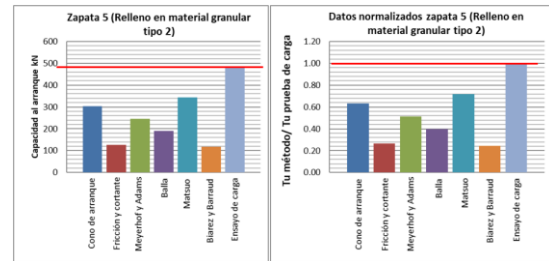
Gráfica 11. Valores de capacidad al arranque de diferentes métodos en comparación con ensayo de carga zapata 3.

En la Gráfica 12 se presentan los resultados calculados para el ensayo realizado de carga; en este ensayo la superficie de falla se desarrolló en el material de relleno granular tipo 2; como conclusión se puede observar que el método de Cono de Arranque se encuentra por debajo del valor generado en la prueba de carga y en los valores normalizados es muy cercano a la unidad (TuCono/TuPruebaCarga = 0.98), por otro lado, el método de Biarez y Barraud (TuCono/TuPruebaCarga = 0.38) y Fricción y Cortante (TuCono/TuPruebaCarga = 0.41) dan valores normalizados por debajo de la prueba de carga y alejados de la misma. El método de Meyerhof y Adams resulta en un valor de TuMeyerhof y Adams/TuPruebaCarga = 0.80, un poco inferior a 1.0.



Gráfica 12. Valores de capacidad al arranque de diferentes métodos en comparación con ensayo de carga zapata 4.

En la Gráfica 13 se muestran los valores de capacidad determinados por cada método que se está analizando; inicialmente se puede deducir que el valor de falla es de 480 kN y ésta fue desarrollada en el material de relleno granular tipo 2. En este material los métodos de fricción y cortante (TuFricciónCortante/TuPruebaCarga = 0.26) y, Biarez y Barraud (TuBiarez y Barraud/TuPruebaCarga = 0.24) se encuentran lejos y por debajo del valor indicado en la prueba de carga; por otra parte, el Cono de Arranque (TuCono/TuPruebaCarga = 0.60) está por debajo del valor de la prueba de carga y es el que se encuentra más cercano, conjuntamente con el de Matsuo (TuCono/TuPruebaCarga = 0.72).



Gráfica 13. Valores de capacidad al arranque de diferentes métodos en comparación con ensayo de carga zapata 5.

En el año 1985, Aureo Pinheiro Ruffier dos Santos realizó la investigación titulada "Análise de fundações submetidas a esforços de arrancamento pelo método dos elementos finitos", donde se generó el análisis del comportamiento de cimentaciones sometidas a esfuerzos de tracción; se utilizaron ensayos realizados sobre suelos residuales de Gneis; los resultados de estos ensayos fueron comparados con resultados obtenidos mediante diferentes metodologías y con la ayuda de un programa computacional de elementos finitos disponible en COPPE desarrollado por Halley Pacheco de Oliveira. Para usar el programa, se generó un retro análisis de los resultados obtenidos en las pruebas; como conclusión se dio que aunque los elementos finitos predicen bien algunos casos de ingeniería, para el caso de cimientos a tensión, los elementos finitos no predicen de una manera correcta el comportamiento suelo - cimiento y tampoco estima la capacidad de carga de los cimientos sometidos a esfuerzos de extracción.

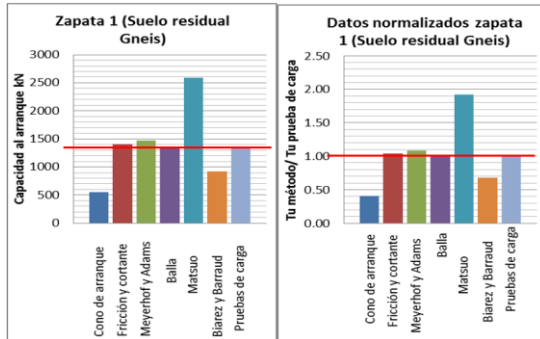
Tabla 2. Cálculo de resistencia al arranque para el ensayo los dos ensayos de carga - Análise de fundações submetidas a esforços de arrancamento pelo método dos elementos finitos

Zapata/Método	1	2	3	4
	Tu kN/m ²	Tu kN/m ²	Tu kN/m ²	Tu kN/m ²
Cono de arranque	704.87	700.14	208.15	401.83
Fricción y cortante	1694.05	1550.35	704.97	522.97
Meyerhof y Adams	1855.40	1723.65	743.28	982.30
Balla	1483.08	1360.38	549.97	759.95
Matsuo	2717.78	2552.35	1057.67	1441.64
Biarez y Barraud	1136.07	1029.66	495.67	599.80
Ensayo de carga	1350.00	1370.00	690.00	1250.00

En la Gráfica 14 se presenta los resultados de cada uno de los métodos evaluados para las condiciones del ensayo de prueba de carga, el suelo residual Gneis tiende a tener un comportamiento granular por lo cual, se puede deducir que de acuerdo a las gráficas mostradas el método que se comporta de una manera similar al valor de la prueba de carga es Balla (Tu método/ Tu

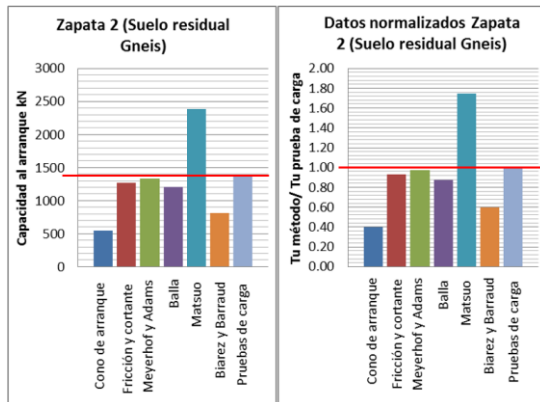
Comparación de Métodos de Análisis de Capacidad de Carga al Arranque de Cimentaciones Superficiales para Torres de Energía en Líneas de Transmisión

prueba de carga 0.99), seguido de Fricción y Cortante (Tu método/ Tu prueba de carga 1.04) y Meyerhof y Adams (Tu método/ Tu prueba de carga 1.09). Adicionalmente, el método que se encuentra alejado del valor de la prueba de carga es el de Matsuo (Tu método/ Tu prueba de carga 1.92).



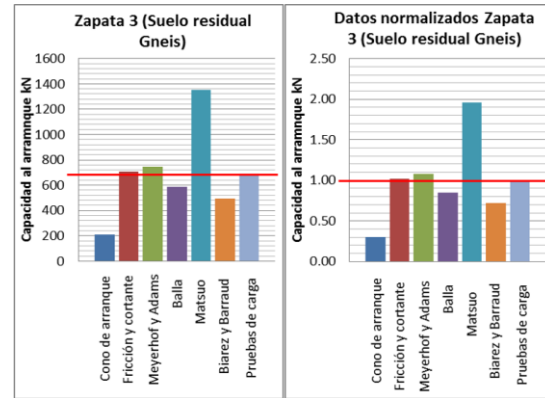
Gráfica 14. Valores de capacidad al arranque de diferentes métodos en comparación con ensayo de carga zapata 1.

La Gráfica 15 muestra los resultados dados por cada método que se evaluó las condiciones que tuvo la prueba de carga realizada, se muestra que los valores más bajos son arrojados por el cono de arranque (Tu método/ Tu prueba de carga 0.40), mientras que Matsuo (Tu método/ Tu prueba de carga 1.74) tiene el valor más alto, por lo cual, se puede concluir que el método más cercanos a la prueba de arranque es Meyerhof y Adams (Tu método/ Tu prueba de carga 0.98).



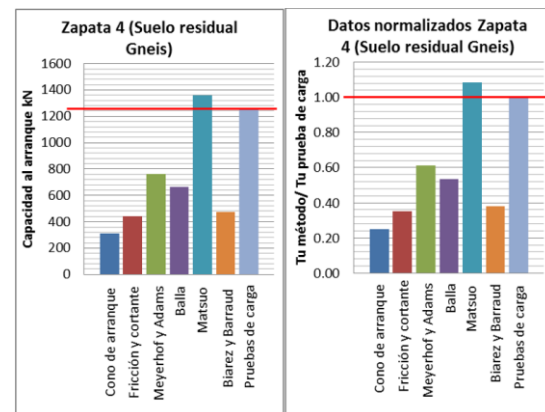
Gráfica 15. Valores de capacidad al arranque de diferentes métodos en comparación con ensayo de carga zapata 2.

En la Gráfica 16 se muestra los resultados de los métodos donde se evaluaron las condiciones en las cuales se realizó la prueba de carga, aquí se demuestra que el cono de arranque da resultados muy bajos con respecto a la prueba de carga, mientras que Matsuo (Tu método/ Tu prueba de carga 1.96) da valores muy elevados. El método de Fricción y arranque (Tu método/ Tu prueba de carga 1.02) da valores cercanos a la prueba de carga realizada.



Gráfica 16. Valores de capacidad al arranque de diferentes métodos en comparación con ensayo de carga zapata 3.

En la Gráfica 17 muestra los resultados dados por cada uno de los métodos a las condiciones que se tuvieron en la prueba de carga, esta grafica muestra que los valores más bajos con respecto a la prueba están dados por el método de cono de arranque (Tu método/ Tu prueba de carga 0.25), contrario a lo que pasa con el método de Matsuo (Tu método/ Tu prueba de carga 1.09) que en esta ocasión puede ser el valor más cercano a la prueba de carga realizada.



Gráfica 17. Valores de capacidad al arranque de diferentes métodos en comparación con ensayo de carga zapata 4.

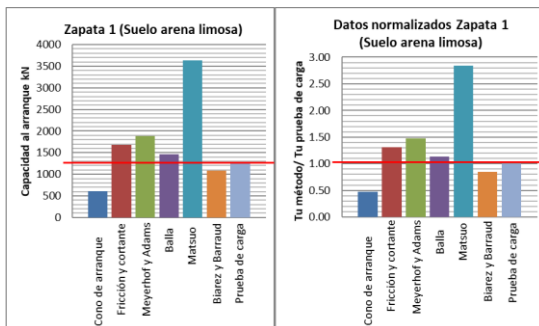
Para el año 1983 Fernando Artur Brasil Danziger, desarrolló la investigación que tiene como título "Capacidad de carga de cimentaciones sometidas a esfuerzos verticales de tracción" en donde se realizaron varias pruebas de carga de zapatas y pilares en suelos residuales Gneis, a lo largo del documento se realiza una descripción de las pruebas realizadas, caracterización de los materiales y se discuten los resultados. Adicionalmente, se realiza una comparación con diferentes metodologías incluyendo la metodología de Grenoble (Biarez y Barraud), la cual según esta investigación da un comportamiento más cercano a la superficie de falla que se obtiene mediante pruebas de carga.

Comparación de Métodos de Análisis de Capacidad de Carga al Arranque de Cimentaciones Superficiales para Torres de Energía en Líneas de Transmisión

Tabla 3. Cálculo de resistencia al arranque para el ensayo los dos ensayos de carga - Capacidade de carga de fundações submetidas a esforços verticais de tração

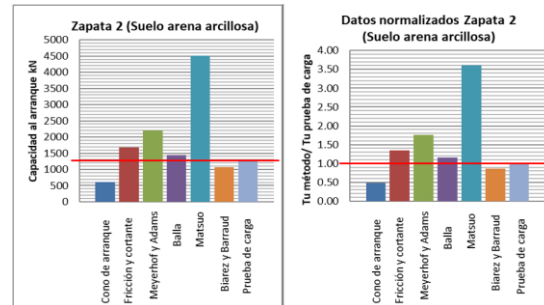
Método	Zapata 1	Zapata 2	Zapata 3	Zapata 4
	Tu kN/m ²	Tu kN/m ²	Tu kN/m ²	Tu kN/m ²
Cono de arranque	1069.20	1134.67	337.16	654.77
Fricción y cortante	1978.04	3251.57	1512.90	711.18
Meyerhof y Adams	2300.08	3654.99	1570.89	1345.17
Balla	2551.63	2551.67	1075.58	980.66
Matsuo	3532.45	5545.75	1039.52	1962.90
Biarez y Barraud	1307.29	2254.56	1094.00	838.81
Ensayo de carga	1280.00	1250.00	580.00	1100.00

La Gráfica 18 muestra los resultados que dan los métodos analizados en este documento en comparación con el valor determinado de la prueba de carga. El valor del cono de arranque es menor ($Tu_{\text{Fricción y Cortante}}/Tu_{\text{Prueba Carga}} = 0.47$) a la prueba de carga, mientras que Matsuo ($Tu_{\text{Fricción y Cortante}}/Tu_{\text{Prueba Carga}} = 2.84$) da el valor más alto; el método que da resultados más cercanos a la prueba de carga es el de Balla ($Tu_{\text{Balla}}/Tu_{\text{Prueba Carga}} = 1.14$), seguido de los métodos de fricción y cortante ($Tu_{\text{Fricción y Cortante}}/Tu_{\text{Prueba Carga}} = 1.31$) y Meyerhof y Adams ($Tu_{\text{Meyerhof y Adams}}/Tu_{\text{Prueba Carga}} = 1.47$).



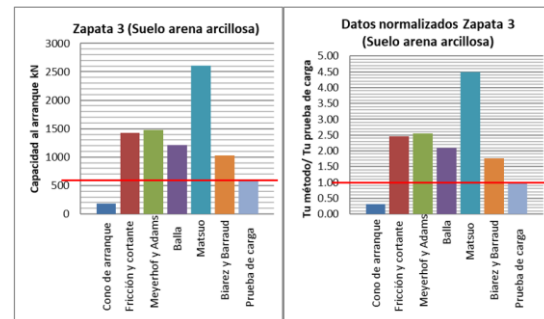
Gráfica 18. Valores de capacidad al arranque de diferentes métodos en comparación con ensayo de carga zapata 1.

En la Gráfica 19 se muestran los resultados obtenidos de los métodos con los valores utilizados en la prueba de carga, donde se muestra que el valor de Matsuo ($Tu_{\text{Método}}/Tu_{\text{Prueba de carga}} = 3.61$) sobrepasa hasta tres veces el valor dado en la prueba de carga, mientras que el método de cono de arranque ($Tu_{\text{Método}}/Tu_{\text{Prueba de carga}} = 0.48$) generó valores menores al de la prueba de carga. De esta prueba de carga se puede concluir que el método que tiene un comportamiento similar es el de Balla ($Tu_{\text{Método}}/Tu_{\text{Prueba de carga}} = 1.16$).



Gráfica 19. Valores de capacidad al arranque de diferentes métodos en comparación con ensayo de carga zapata 2.

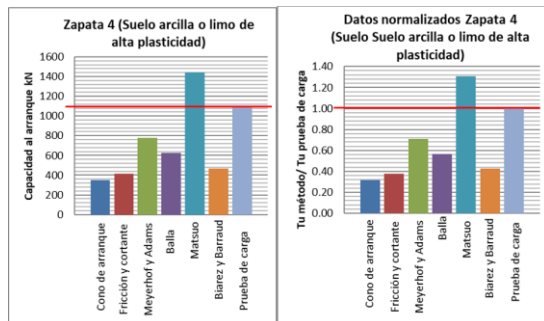
La Gráfica 20 presenta los valores arrojados por los métodos que se evaluaron con los parámetros determinados en la prueba de carga, se muestra que los valores más altos son dados por el método de Matsuo ($Tu_{\text{Método}}/Tu_{\text{Prueba de carga}} = 4.49$) este valor sobrepasa hasta tres veces el resultado de la prueba de carga. Como conclusión, se puede indicar que los métodos que se acercan a los valores de la prueba de carga es el Biarez y Barraud ($Tu_{\text{Método}}/Tu_{\text{Prueba de carga}} = 1.77$) y Balla ($Tu_{\text{Método}}/Tu_{\text{Prueba de carga}} = 2.09$).



Gráfica 20. Valores de capacidad al arranque de diferentes métodos en comparación con ensayo de carga zapata 3.

La Gráfica 21 muestra los resultados dados por cada uno de los métodos analizados en esta investigación, según los valores que se emplearon en la prueba de carga, para lo cual, se muestra que el método que da el valor más bajo, con respecto a la prueba de carga es el método del cono de arranque ($Tu_{\text{Cono}}/Tu_{\text{Prueba Carga}} = 0.32$), mientras que el método que da un valor cercano a la prueba de carga es el de Matsuo, pero un poco mayor ($Tu_{\text{Matsuo}}/Tu_{\text{Prueba Carga}} = 1.31$). El método de Meyerhof y Adams da un valor de $Tu_{\text{Meyerhof y Adams}}/Tu_{\text{Prueba Carga}} = 0.71$, un poco menor que el valor de la prueba de carga.

Comparación de Métodos de Análisis de Capacidad de Carga al Arranque de Cimentaciones Superficiales para Torres de Energía en Líneas de Transmisión



Gráfica 21. Valores de capacidad al arranque de diferentes métodos en comparación con ensayo de zapata 4.

2.3. Modelación con elementos finitos

Para realizar la modelación de las pruebas de carga, inicialmente se debe realizar la recopilación de parámetros que el programa solicita para generar las modelaciones adecuadamente; los parámetros solicitados son el criterio de falla y la rigidez, según el criterio de falla seleccionado se deberá indicar la resistencia del material.

Para ejecutar la modelación se estableció inicialmente las restricciones del modelo donde la superficie se encuentra libre (tiene movimiento en X, Y y Z), y para las caras del suelo se restringe el movimiento en X y Y, por último, para el suelo que queda en la parte inferior se restringe todas las tres direcciones, la malla adoptada fue de cuatro nodos (tetraedro), la precisión escogida fue de 0.001, el estimativo inicial del factor de reducción de fuerza adoptado es de 1 y el máximo de iteraciones escogido es de 500.

En la Figura 2-1 se presenta la gráfica carga vs desplazamiento donde se muestra que para la carga de 440 KN indicada como máxima en el ensayo de carga real tenemos un desplazamiento de 0.12 metros; la modelación mediante el programa RS3 con los parámetros iniciales del documento se presenta con la línea de color verde, esta línea muestra un comportamiento elástico muy parecido a la prueba de carga y la carga de falla es de 300 kN; después de una carga de 300 kN la curva elástica empieza a alejarse de la curva de comparación, al mismo tiempo que al ir aumentando la carga la misma no presenta una plasticidad adecuada que permita ser cercana a la de la prueba en escala natural.

Debido a lo anterior, se realiza un análisis de sensibilidad donde fueron variados los parámetros de cohesión 5, 10 y 15 kN/m² en el relleno y el material in situ tuvo modificaciones en su módulo de elasticidad el cual paso hacer de 15.000 KPa y una relación de Poisson de 0.35; cómo resultado se obtuvo que el parámetro que más se ajustaba a la curva de la prueba de carga en escala real es la variación de la cohesión a 15 kN/m² donde el desplazamiento máximo es 0.018 m.

Lo anterior, indica que el suelo in situ cuenta con parámetros altos que lo hacen comportarse de manera rígida sin permitir que dentro de él se generen deformaciones ocasionando que estas se den solamente en el material de relleno que para este caso es una arcilla, debido a la variación generada en el material in situ, el material de relleno arcilla debió tener al mismo

tiempo un aumento en su resistencia para asemejarse a la curva de la prueba.

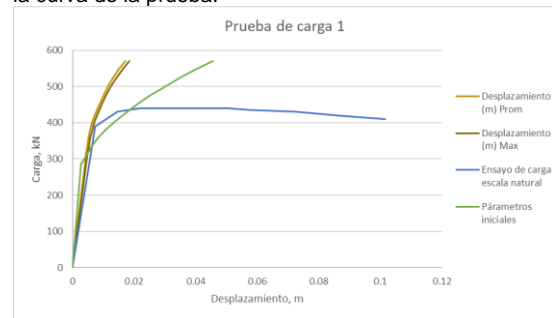


Figura 2-1. Gráfica carga vs desplazamiento.

Adicionalmente, de acuerdo a que el análisis de sensibilidad es apropiado cómo se muestra en la gráfica anterior, en la Figura 2-2 se muestra la superficie de falla para el esfuerzo de 1200 kN/m² donde se muestra que la superficie de falla de la izquierda es muy parecida a la que presenta el método de fricción y cortante; mientras, que cuando se realiza el análisis de sensibilidad de los parámetros, se selecciona el que más se acerca a la curva carga – desplazamiento la superficie de falla cambia y tiende a parecerse a la metodología de Biaz y Barraud para el tipo de suelo 2.

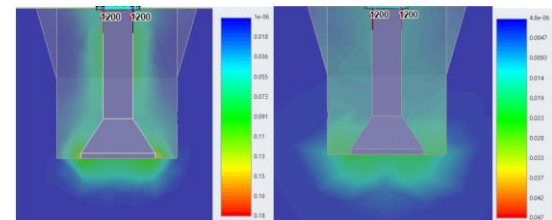


Figura 2-2. Vista del programa de la superficie de falla para el esfuerzo de 1200 kN/m² (378,45 kN) (izquierda parámetros iniciales de prueba de carga – derecha resultado de análisis de sensibilidad de parámetros)

En la Figura 2-3 se presenta la gráfica carga vs desplazamiento donde se muestra que para la carga de 400 KN (línea color azul) indicada como máxima en el ensayo de carga real tenemos un desplazamiento de 0.3 metros; la modelación mediante el programa RS3 con los parámetros iniciales del documento se presenta con la línea de color verde, esta línea muestra un comportamiento elástico muy parecido a la prueba de carga y la carga de falla es de 270 kN, sin embargo, cuando la carga es mayor a 300 kN la curva empieza alejarse de la zona elástica pero sin tener un comportamiento plástico similar al de la prueba en escala natural.

Debido a lo anterior, se realiza un análisis de sensibilidad donde fueron variados los parámetros de cohesión 5, 10 y 15 kN/m² en el relleno y el material in situ tuvo modificaciones en su módulo de elasticidad el cual paso hacer de 15.000 KPa y una relación de Poisson de 0.35; cómo resultado se obtuvo que el parámetro que más se ajustaba a la curva de la prueba de carga en escala real es la variación de la cohesión a 15 kN/m² donde el desplazamiento máximo es 0.0064 m.

Según el método de intersección tangente para la curva carga – desplazamiento del análisis de sensibilidad

Comparación de Métodos de Análisis de Capacidad de Carga al Arranque de Cimentaciones Superficiales para Torres de Energía en Líneas de Transmisión

paramétrico la carga será de 300 kN aproximadamente, se presentaría una disminución de 100 kN con respecto a la carga del ensayo de carga natural, lo que explica que al momento de aumentar la cohesión en el suelo y modificar los parámetros en el material in situ, haciendo este menos rígido, ambos materiales presentan deformaciones generando que la curva carga desplazamiento no tenga claramente un comportamiento plástico, pero se acerca un poco más al comportamiento elástico.

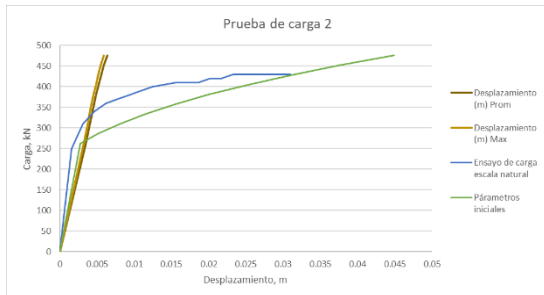


Figura 2-3. Gráfica carga vs desplazamiento para prueba de carga 2

Adicionalmente, de acuerdo a que el análisis de sensibilidad es apropiado cómo se muestra en la gráfica anterior, en la Figura 2-2 se muestra la superficie de falla para el esfuerzo de 1000 kN/m^2 donde se muestra que la superficie de falla donde la de la izquierda pertenece a la modelación de los parámetros iniciales de la prueba y la derecha al análisis de sensibilidad, ambas imágenes muestran una superficie de falla similar a la del método de fricción y cortante, el cual, a lo largo del documento a presentado un comportamiento favorable en materiales cohesivos.

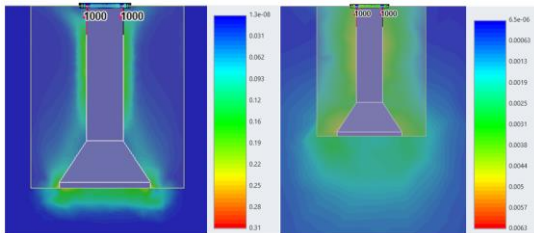


Figura 2-4. Vista del programa de la superficie de falla para el esfuerzo de 1000 kN/m^2 (378,45 kN) (izquierda parámetros iniciales de prueba de carga – derecha resultado de análisis de sensibilidad de parámetros)

En la Figura 2-5 se presenta la gráfica carga vs desplazamiento normalizado donde se muestra que para la carga de 480 kN indicada como máxima en el ensayo de carga real tenemos un desplazamiento de 0.08 m, la modelación mediante el programa RS3 con los parámetros iniciales del documento se presenta con la línea de color verde, esta línea muestra un comportamiento elástico muy parecido a la prueba de carga y la carga de falla es de 300 kN, sin embargo, al momento que la carga empieza a aumentar desde 300 kN la misma no presenta una plasticidad adecuada que permita ser cercana a la de la prueba en escala natural.

Debido a lo anterior, se realiza un análisis de sensibilidad donde fueron variados el valor de ángulo de

fricción entre 30 y 45 grados en el relleno y el material in situ tuvo modificaciones en su módulo de elasticidad el cual paso hacer de 15.000 KPa y una relación de Poisson de 0.35; cómo resultado se obtuvo que el parámetro que más se ajustaba a la curva de la prueba de carga en escala real es la variación del ángulo de fricción a 40 grados donde el desplazamiento máximo es 0.026 m.

Según el método de intersección tangente para la curva carga – desplazamiento del análisis de sensibilidad paramétrico la carga máxima seguiría siendo 400 kN, muy cercana al ensayo de escala natural, sin embargo, lo que explica que al momento de aumentar el ángulo de fricción del material de relleno y modificar los parámetros en el material in situ, haciendo este menos rígido, ambos materiales presentan deformaciones generando que la curva carga – desplazamiento se asemeje más en la parte elástica, pero en la parte plástica siga un poco lejos del ensayo de carga natural.

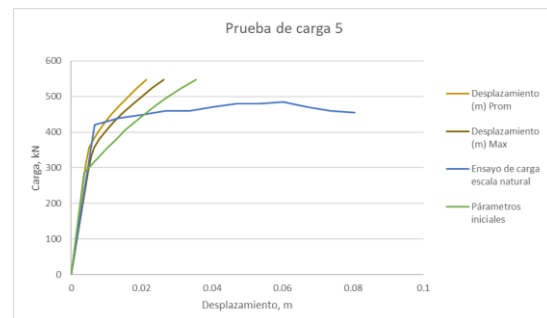


Figura 2-5. Gráfica carga vs desplazamiento con parámetros de la prueba de carga (Línea naranja prueba a escala natural, línea azul programa RS3)

Adicionalmente, de acuerdo a que el análisis de sensibilidad es apropiado cómo se muestra en la gráfica anterior, en la Figura 2-6 se muestra la superficie de falla para el esfuerzo de 1150 kN/m^2 donde se muestra que la superficie de falla de la izquierda es la realizada con los parámetros del ensayo a escala natural y la de la derecha presenta los resultados del análisis de sensibilidad, ambas imágenes muestran que la superficie de falla que se obtiene es la dada por el método de Fricción y cortante, que para este tipo de material no es el método que se recomienda, sin embargo, para algunos ángulos de fricción arroja resultados similares al método del cono de arranque que es el que mejor comportamiento presenta en este tipo de material.

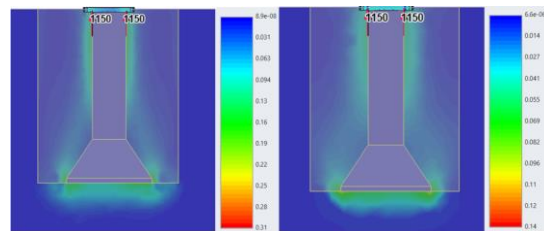


Figura 2-6. Vista del programa de la superficie de falla para el esfuerzo de 1150 kN/m^2 (546 kN) (izquierda parámetros iniciales de prueba de carga – derecha resultado de análisis de sensibilidad de parámetros)

Comparación de Métodos de Análisis de Capacidad de Carga al Arranque de Cimentaciones Superficiales para Torres de Energía en Líneas de Transmisión

2.4. 8. Aplicación de metodologías de cálculo en una línea de transmisión Colombiana

En este capítulo se presentará la comparación de metodologías de cálculo de capacidad al arranque a partir de los datos generados en un estudio geotécnico realizado por una empresa Colombiana, con los datos acogidos para el cálculo de la cimentación superficial tipo zapata en concreto sobre suelo y según el cálculo realizado de capacidad al arranque con el método de cono al arranque, donde el factor de seguridad es de 1.5; se utilizan los datos de los suelos, dimensiones de la cimentación y tipo de torre para el cálculo de los factores de seguridad por medio de los demás métodos tratados a lo largo de este documento.

Para la torre denominada A0.2 debido a que el peso de la misma es el más bajo del grupo, donde el material era cohesivo ya fuese sumergido o seco, el método de cono de arranque tiene un buen comportamiento con respecto a los diferentes métodos, sin embargo, los métodos que muestran valores de factor de seguridad promedio son los de fricción y cortante (1.5 – 2.7) y Meyerhof y Adams (1.5 – 3.1). Mientras que para los materiales granulares en esta torre los factores de seguridad son muy bajos con respecto al método de cono de arranque. En la

Tabla 4. Valores de factores de seguridad para material cohesivo en la torre tipo A0.2

Tipo A0.2				
Material cohesivo				
Sumergencia	Sumergido		Seco	
Consistencia	Rígida	Muy rígida	Muy rígida	Dura
Método	FS	FS	FS	FS
Cono de arranque	1.5	1.5	1.53	1.49
Fricción y cortante	1.04	1.76	1.82	2.78
Meyerhof y Adams	1.07	1.79	2.2	3.14
Balla	0.81	1.22	1.4	1.72
Matsuo	1.25	2.17	2.94	4.02
Biarez y Barraud	0.58	1.07	1.19	1.73

Tabla 5. Valores de factores de seguridad para material granular en la torre tipo A0.2

Tipo A0.2				
Material granular				
Sumergencia	Sumergido	seco		
Compacidad	Media	Muy baja	Media	Densa
Método	FS	FS	FS	FS
Cono de arranque	1.52	1.53	1.5	1.53
Fricción y cortante	0.97	0.96	0.99	0.92
Meyerhof y Adams	1.35	1.13	1.41	1.5
Balla	1.35	0.84	0.9	0.91
Matsuo	1.58	1.44	1.88	2.02
Biarez y Barraud	0.57	0.49	0.56	0.64

Tipo B.2				
Material cohesivo				
Sumergencia	Seco			
Consistencia	Blanda	Rígida	Muy rígida	Dura
Método	FS	FS	FS	FS
Cono de arranque	1.5	1.5	1.5	1.5
Fricción y cortante	1.42	1.39	1.51	1.79
Meyerhof y Adams	2.12	1.87	1.77	2.12
Balla	1.57	1.17	1.23	1.42
Matsuo	2.49	2.27	2.15	2.59

Biarez y Barraud	0.98	0.82	0.95	1.15
------------------	------	------	------	------

Para las torres denominada B.2, el método del cono de arranque tiene un buen comportamiento con respecto a los demás métodos, sin embargo, el método que se encuentra en la mayoría de caso cómo el promedio es el de Fricción y cortante (FS= 1.5, 1.7) y Meyerhof y Adams (1.7 – 2.1). Por otro lado, el cono de arranque en materiales granulares tiene un muy buen comportamiento debido a que las demás metodologías dan factores de seguridad por debajo de este.

Tabla 6. Valores de factores de seguridad para material granular en la torre tipo B.2

Tipo B.2		
Material granular		
Sumergencia	seco	
Compacidad	Muy baja	Media
Método	FS	FS
Cono de arranque	1.50	1.50
Fricción y cortante	0.94	0.97
Meyerhof y Adams	1.09	1.23
Balla	0.83	0.88
Matsuo	1.28	1.47
Biarez y Barraud	0.54	0.54

Por otro lado, para las torres denominada C.2 se tiene que para el material cohesivo el método de Fricción y Cortante (FS= 1.5 – 1.6) y Meyerhof y Adams (1.8 – 1.9), mientras, que para el material granular, el cono de arranque en condición seca o sumergida siempre se encuentra sobrepasando los demás métodos.

Tabla 7. Valores de factores de seguridad para material cohesivo y granular para la torre tipo C.2

Tipo C.2			
Material	Cohesivo		Granular
Sumergencia	Seco		Sumergido
Consistencia o compacidad	Rígida	Muy rígida	Media
Método	FS	FS	FS
Cono de arranque	1.5	1.5	1.5
Fricción y cortante	1.5	1.62	0.95
Meyerhof y Adams	1.84	1.9	1.28
Balla	1.15	1.22	1.14
Matsuo	2.23	2.3	1.41
Biarez y Barraud	0.92	1.01	0.53

Finalizando, se encuentra la torre denominada D.3, esta es la torre que tiene más peso dentro de las determinadas en el diseño, debido a su peso las profundidades de cimentaciones fueron altas, para lo cual, se encuentra que el método que se comporta cómo promedio es el de Fricción y Cortante (FS= 1.5 – 1.6) y Meyerhof y Adams (1.6 – 2.1), mientras que, para el material granular el cono de arranque tiende a ofrecer valores mayores a los demás métodos.

Tabla 8. Valores de factores de seguridad para material cohesivo y granular para la torre tipo D.3

Tipo D.3					
Material	Cohesivo		Granular		
Sumergencia	Seco		Sumergido	Seco	
Consistencia o	Muy	Dura	Densa	Me	Den

Comparación de Métodos de Análisis de Capacidad de Carga al Arranque de Cimentaciones Superficiales para Torres de Energía en Líneas de Transmisión

compacidad	rígida			dia	sa
Método	FS	FS	FS	FS	FS
Cono de arranque	1.46	1.46	1.53	1.5	1.46
Fricción y cortante	1.32	1.63	0.96	0.95	0.93
Meyerhof y Adams	1.66	2.12	1.13	1.28	1.34
Balla	1.27	1.48	0.84	1.14	1
Matsuo	1.94	2.49	1.44	1.41	1.51
Biarez y Barraud	0.84	1.12	0.49	0.53	0.69

3. CONCLUSIONES

1. La comparación de las metodologías se realizó con las metodologías de Cono de Arranque, Método de Fricción o cortante, Meyerhof's y Adams', Balla, Matsuo y Biarez y Barraud para el cálculo de capacidad al arranque de fundaciones superficiales (zapatas y parrillas), en la variación se tomaron diferentes dimensiones para las zapatas de anchos y profundidad de desplante, las mismas se asumen cuadradas, es decir que el ancho es igual al largo. El ancho se varió entre los siguientes valores: 2.5 m, 3.0m, 3.5 m y 4.0 m; adicionalmente, la profundidad de desplante fue variada entre 2.5m, 3.0 m y 3.5 m.

Para determinar la capacidad del cono de arranque, se utilizó para el cálculo en suelos en condición no sumergida un peso unitario de 16 kN/m³ y en condición sumergida se utilizó un peso unitario de 10 kN/m³. Para los demás métodos, se evaluaron dos tipos de suelos, granulares y cohesivos; en condición no sumergida se tomó el peso unitario total del suelo de 16 kN/m³ y en condición sumergida el valor fue de 6.19 kN/m³.

Los suelos granulares se evaluarán con ángulos de fricción de 20, 25, 30, 35 y 40 grados y en suelos cohesivos se determinó tomar los ángulos de fricción de 15, 20, 25, 30 y 35 grados; para estos suelos, el valor de la cohesión efectiva se tomó como 10 kN/m², 20 kN/m² y 30 kN/m².

De lo anterior y según lo presentado en el Capítulo 5. (Metodologías de cálculo de capacidad al arranque y análisis paramétrico) se concluye, que para las gráficas realizadas de materiales granulares en estado sumergido y seco, se puede indicar que el método que se comporta de una manera promedio es el cono de arranque; esto después de realizarse un análisis de cada una de las gráficas generadas para este tipo de material. Adicionalmente, para el análisis realizado del material cohesivo se concluye que el método de Meyerhof y Adams se comporta de manera promedio al realizar la comparación con respecto a los otros métodos, por lo cual se recomienda utilizar este método para realizar los cálculos de este tipo de suelos con las características que se trabajaron.

Adicionalmente, en este análisis se vio como resultado que el método de Biarez y Barraud y el de Matsuo en todos los análisis se encuentran muy por

debajo y sobrepasan los valores de los demás métodos, respectivamente.

2. Los resultados de pruebas de carga de diferentes investigaciones fueron comparados frente a la predicción de las metodologías de capacidad de carga al arranque analizadas en este documento. Cada una de las pruebas realizadas tiene un tipo de suelo propio del lugar donde fue realizado el ensayo; en el Capítulo 6 "Análisis de pruebas de carga" se generó el cálculo de la capacidad al arranque por medio de las diferentes metodologías expuestas teniendo en cuenta los parámetros del suelo y dimensiones de la zapata, con el fin de generar una comparación con respecto a la predicción de falla determinada mediante las gráficas de desplazamiento – carga.

De acuerdo con la comparación realizada según la carga de falla de cada uno de los ensayos de carga a escala natural, se tiene como conclusión general que para los materiales cohesivos las metodologías que mejor predicen la carga de falla son Meyerhof y Adams, Fricción y Cortante y en algunas ocasiones Balla, y para los materiales granulares el método que presenta un mejor comportamiento es el de Cono de arranque.

Por otro lado, la predicción de falla de los métodos de Biarez y Barraud es bajo y Matsuo siempre dieron valores altos, por lo tanto ambos métodos están alejados de la realidad por lo cual, se consideran que estos dos métodos no deben ser utilizados para predicciones de carga de falla.

3. El capítulo siete "Modelación con elementos finitos de zapatas sometidas a cargas de tensión" de este documento se hizo con la ayuda del programa de elementos finitos RS3 donde con una prueba de carga en escala real se realizó la modelación de las zapatas con sus respectivos parámetros de compresibilidad y resistencia empleando el modelo constitutivo de Mohr Coulomb.

De manera general, se puede concluir que al momento de modelar y generar las gráficas carga – desplazamiento y compararlas con las realizadas en el ensayo de carga a escala natural, éstas tienden a tener un buen comportamiento elástico, una buena predicción de carga de falla y la superficie de falla que muestra para materiales cohesivos y granulares es muy similar a la del método de Fricción y Cortante.

4. Para el capítulo ocho "aplicación de metodologías de cálculo en una línea de transmisión colombiana", teniendo en cuenta las comparaciones realizadas con el factor de seguridad FS de 1.5 para el Cono de Arranque, para suelos cohesivos se obtienen factores de seguridad para el Método de Meyerhof y Adams en un 55% entre 1.5 y 2.0, 33% entre 2.0 y 3.0 y un 11% entre 3.0 y 3.5, por lo anterior, para el Método de Meyerhof y Adams, se recomienda un factor de seguridad FS de 2.0, como equivalente al método del Cono de arranque.

Así mismo, para el método de Fricción o Cortante en un 87% de los casos el factor de seguridad se encuentra entre 1.5 y 2.0 y en un 13% entre 2.0 y 3.0, debido a lo anterior, para el Método de Fricción

Comparación de Métodos de Análisis de Capacidad de Carga al Arranque de Cimentaciones Superficiales para Torres de Energía en Líneas de Transmisión

o Cortante, se recomienda tomar un factor de seguridad FS de 2.0, como equivalente al método del Cono.

Para los suelos granulares en la mayoría de los métodos dan factores de seguridad menores que el método del cono; esto confirma que el método que tiene un mejor comportamiento es el del Cono de Arranque con un factor de seguridad FS de 1.5.

5. Se concluye que los análisis realizados y comparados con el método de cono de arranque demuestran que para materiales cohesivos el mismo es demasiado conservador y podría generar una valoración menor de la capacidad al arranque, por lo cual, según los análisis realizados en este documento se recomienda que sean utilizados los métodos de Meyerhof y Adams o el de Fricción y Cortante, los cuales trabajan y se comportan de una manera promedio con respecto a las demás metodologías, se comportan bien con respecto a la comparación de carga – desplazamiento con las pruebas de carga reales, la superficie de falla se asemeja a la de Fricción y cortante y el factor de seguridad que pueden ser utilizado es de 2.0.
6. El cono de arranque para materiales granulares es mostrado en todos los análisis como el que tiene mejor comportamiento, no es demasiado conservador y tiende a estar en el promedio de los demás métodos en el análisis paramétrico, presenta factor de seguridad FS= 1.5 que es adecuado de acuerdo a la experiencia, y predice bien la carga de falla en los análisis de pruebas de carga.
7. A lo largo del desarrollo del documento se obtuvieron resultados con valores muy conservadores que en la mayoría de casos se encontraban bajo los valores de los demás métodos, éste fue el método de Biarez y Barraud; caso contrario pasaba con el método de Matsuo que para la mayoría de casos se encontraba muy por encima de los valores de las demás metodologías.

4. RECOMENDACIONES

1. Es pertinente restringir el uso de las metodologías de Biarez y Barraud y Matsuo debido a que las mismas pueden subvalorar o sobrevalorar, respectivamente la capacidad al arranque.
2. Se recomienda realizar pruebas de centrifuga donde se puedan considerar suelos con propiedades mecánicas similares a los suelos de Colombia y este resultado compararlo con las predicciones de las metodologías encontradas a lo largo de este documento.
3. Realizar pruebas de carga a escala natural en un suelo colombiano y hacer su exhumación para confirmar las superficies de falla, con el fin de realizar una modelación en elementos finitos y comparar las curvas carga – desplazamiento y las superficies de falla. Así mismo, hacer la comparación de las cargas de falla con las predicciones de las metodologías consideradas en este documento.
4. Para el caso de suelos cohesivos, con relación a la equivalencia del factor de seguridad de las otras

metodologías con respecto al factor de seguridad de 1.5 usado para el método de cono de arranque, se recomienda realizar los cálculos correspondientes para otra línea en la cual se hayan realizado mediciones de los parámetros de resistencia en condición drenada de los materiales.

5. REFERENCIAS

1. Adams, J.I. & Klym, T.W. (1972). "A study of anchorages for transmission tower foundations". Canadian Geotechnical Journal, Vol 9, pp. 89 – 104.
2. Alvaro J. Gonzalez G. (2016). "Resistencia no drenada y comportamiento a corto vs largo plazo como malinterpretaciones en Ingeniería Geotecnia". XV Congreso Colombiano de Geotecnia & II Conferencia internacional especializada en rocas blandas. Cartagena 5 al 7 de octubre de 2016.
3. British Standards Institution (1997). BS EN61773:1997, Overhead lines - Testing of foundations for structures. BSI, London, UK.
4. CIGRÉ. (2002). "The design of transmission line support Foundations" – An overview.
5. CIGRÉ .(2017). "Study Committee B2. Overhead Lines".
6. Clark, M. Richards, D.J. & CLUTTERBUCK D. (2006) "Measured dynamic performance of electricity transmission towers following controlled broken wire events". Cigre. School of Civil Engineering & the Environment. University of Southampton. United Kingdom.
7. Cunha, O. (2005). "Influência da qualidade da compactação dos reaterros na capacidade de carga de fundações submetidas a esforços de tração". Tesis, Universidad Federal en Rio de Janeiro, Brasil.
8. DANZIGER, F.A.B. (1983). "Capacidade de carga de fundações submetidas a esforços verticais de tração". Tesis, Universidad Federal en Rio de Janeiro, Brasil.
9. De Souza, N. (1994). "Comportamento de estacas submetidas a esforços verticais de tração, em solo colapsível". Tese, Universidad de Sao Pablo.
10. K.K. Sorensen & N. Okkles. (2013). "Correlación entre la resistencia al corte no drenado y el índice de plasticidad de arcillas sobreconsolidadas". Universidad de Aarhus en Dinamarca.
11. Levy, F. (2014). "The Uplift of high voltage transmission tower foundations". Thesis for the degree of Engineering Doctorate. University of Southampton.
12. Levy F.M., Richards D.J. (2013). "Full scale rapid uplift tests on transmission tower footings". Geomechanics Research Group, Faculty of Engineering and the Environment, University of Southampton, UK, pp. 2791 – 2794.
13. Meyerhof, G.G. & Adams, J.I. (1968). "The ultimate uplift capacity of foundations". Canadian Geotechnical Journal, Vol 4, pp 225 – 244. Printed in Canadian.
14. Moller, H. (2015). "Comparativo de custo das fundações de uma linha de transmissão analisando duas propostas de realização de investigações geotécnicas". Tesis, Universidad federal en Rio de Janeiro, Brasil.
15. Pacheco, M.P, Danziger F.A.B, y Pereira Pinto, C. (2008). "Design of shallow foundations under tensile loading for transmission line towers: An overview." Published by Elsevier B.V.
16. Pereira Afonso, A.R. (2015). "Tipologia e dimensionamento estrutural das fundações de

Comparación de Métodos de Análisis de Capacidad de Carga al Arranque de Cimentaciones Superficiales para Torres de Energía en Líneas de Transmisión

- Torres de Linhas de Alta Tensão em diferentes condições geotécnicas". Técnico Lisboa.
17. Richards, D.J., White, D.J, and Lehane, B.M. (2010). "Centrifuge modelling of the pushover failure of an electricity transmission tower". Published by NRC Research Press.
 18. Santos, A.P.R. (1985). "Análise de fundações submetidas a esforços de arrancamento pelo Método dos elementos finitos". Tese. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
 19. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2001). IEEE Guide for Transmission Structure Foundation Design and Testing.
 20. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1985). IEEE Guide for Transmission Structure Foundation Design and Testing.
 21. Vanner, M.J., (1982). "Foundations uplift resistance: The effects of foundations type and of seasonal changes in ground conditions". IEE Proceedings on Electric Power Applications. Vol. 129, pp 295 – 305.