

**Modelación computacional, utilizando el Método de los Elementos Finitos, de anclajes Tipo T Invertida para torres atirantadas de telecomunicaciones.**

*Computational modeling, using Finite Element Method, of T Type anchor for telecommunication guyed tower.*



**Mariela Paez Castillo**

Ingeniera Civil. Especialista  
Empresa de Producciones Metálicas, COMETAL, Ciudad de La Habana. Cuba



**Ingrid Fernández Lorenzo**

Ingeniera Civil. Máster en Ciencias. Profesora Asistente. Grupo de Investigación de Aerodinámica de las Construcciones.  
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría de La Habana Cuba.  
Teléfono: 72663814 E-mail: [ingridfl@civil.cujae.edu.cu](mailto:ingridfl@civil.cujae.edu.cu)



**Yoermes González Haramboure.**

Ingeniero Hidráulico. Master en Ciencias. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Asistente.  
Grupo de Investigaciones en Geotecnia y Cimentaciones.  
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría de La Habana Cuba.  
Teléfono: 72663777 E-mail: [yoermes@civil.cujae.edu.cu](mailto:yoermes@civil.cujae.edu.cu)

Recibido: 09-09-15  
Aceptado: 29-09-15

**Resumen:**

Las torres de telecomunicaciones son estructuras esbeltas de poco peso propio sometidas a esfuerzos laterales producto de las cargas horizontales. Debido a la magnitud que toman estos esfuerzos, se producen desplazamientos que llegan a ser máximos en su tope y pueden poner en riesgo su estabilidad o serviciabilidad. Para reducirlos se atirantan con cables de acero, tensados de forma radial al suelo. Las cimentaciones de estos cables se denominan anclajes. En Cuba la tipología más usada para anclajes es la de tipo bloque, sin embargo resulta muy costosa por el gasto de material que conlleva su construcción. El presente artículo realiza un estudio comparativo entre las tipologías, bloque y T invertida; esta última es un anclaje prefabricado que sustituye una parte considerable del volumen de hormigón por suelo, resultando mucho más económico. La comparación se realiza a partir de simulaciones utilizando el programa ABAQUS.

**Palabras clave:** Anclajes, Cimentaciones especiales, Torres atirantadas, Modelación matemática.

Mariela Paez Castillo, Ingrid Fernández Lorenzo, Yoermes González Haramboure. Modelación computacional, utilizando el Método de los Elementos Finitos, de anclajes Tipo T Invertida para torres atirantadas de telecomunicaciones.

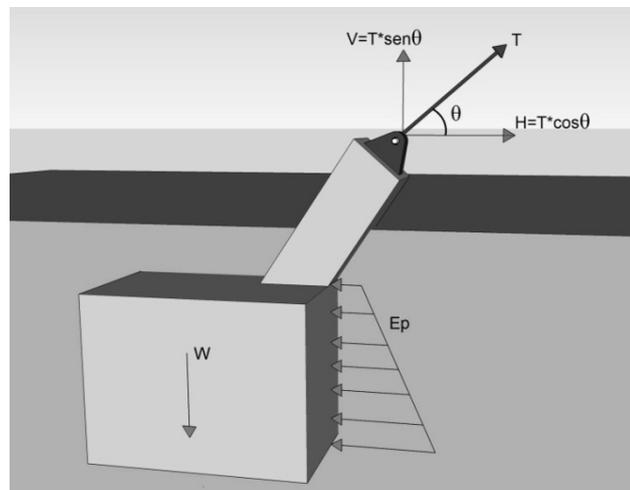
### **Abstract:**

Telecommunications towers are slender structures of small weight, subjected to lateral forces due to winds and earthquakes loads. Sometimes, the magnitude of these forces can put in risk the stability or serviceability of the tower. To reduce them the telecommunication towers are guyed with tightened steel cables in a radial way to the floor. The foundations of these cables are denominated anchorages. In Cuba the more common typologies of anchorages are the block type, that require great volume of concrete and steel, reason why others anchorages are been investigated in the world. In this work is carried out a qualitative and quantitative study of different typologies of anchorages, being centered in the comparison of the typologies block type and reversed T type. The comparison is carried out starting from simulations of the two types of anchorages using the program ABAQUS.

**Keywords:** Anchorages, Special foundation, Guyed tower, Mathematic modeling.

### **Introducción:**

El diseño de anclaje convencionalmente utilizado en el mundo para mástiles con altas tensiones en los tirantes es el tipo bloque, en el cual sólo el peso propio compensa la fuerza vertical de levantamiento a la que está sometido el anclaje; a la fuerza horizontal de deslizamiento se opone la presión pasiva desarrollada en la cara frontal del bloque (Fratelli, 1993) y una combinación de los efectos de ambas fuerzas para resistir el vuelco (figura 1).



**Figura 1.** Interacción de fuerzas en anclaje tipo bloque

Donde:

T: Fuerza de tracción transmitida.

$\theta$ : Ángulo de inclinación de la fuerza de tracción respecto a la horizontal.

W: Peso del anclaje.

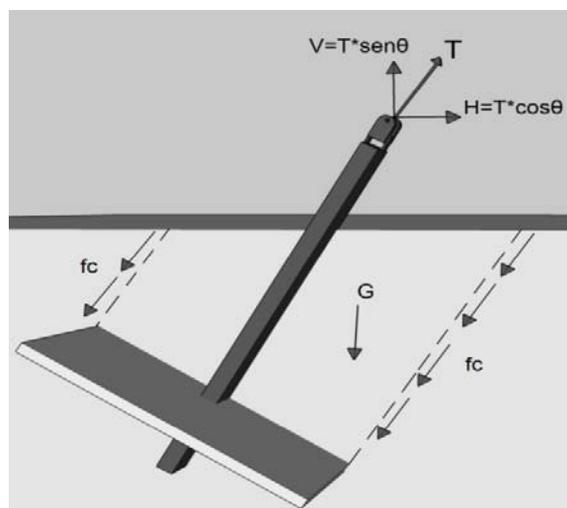
Ep: Empuje pasivo de tierra.

La gran desventaja es el elevado costo en material que conlleva su construcción. Por ejemplo, la fabricación de los anclajes para una torre de transmisión de radio y televisión de 300m de altura puede llegar a demandar de 250m<sup>3</sup> a 300m<sup>3</sup> de hormigón armado y cerca de 6 meses de trabajo para erigir el mástil de la torre con la precisión requerida (Smith 2007).

Mariela Paez Castillo, Ingrid Fernández Lorenzo, Yoermes González Haramboure. Modelación computacional, utilizando el Método de los Elementos Finitos, de anclajes Tipo T Invertida para torres atirantadas de telecomunicaciones.

Existen otras tipologías opcionalmente utilizadas con consumos de material mucho más bajo. Tal es el caso del anclaje de barra flexible o rígida, que consiste en un cimiento prefabricado metálico en el que la fuerza de tracción de los tirantes es contrarrestada por el peso de la losa de fondo y el peso del suelo comprendido sobre ella, que forma una especie de prisma truncado, así como por las fuerzas de fricción y cohesión que actúan sobre las superficies laterales de este volumen de suelo (figura 2).

Esta solución de cimentación usualmente es desechada por los proyectistas por lo complicada que puede resultar su instalación, o sea, el cuidado que se requiere para lograr la perfecta alineación entre la barra de amarre y el tirante de la torre, que implica un estricto control de ejecución y calidad de la obra. Además, su aplicación está limitada a cargas de tracción inferiores a 80 toneladas y debe tenerse en cuenta una protección frente a la corrosión en los elementos metálicos (resuelta comúnmente con recubrimiento de galvanizado de zinc).



**Figura 2.** Forma de trabajo de anclajes de losas de fondo

Donde:

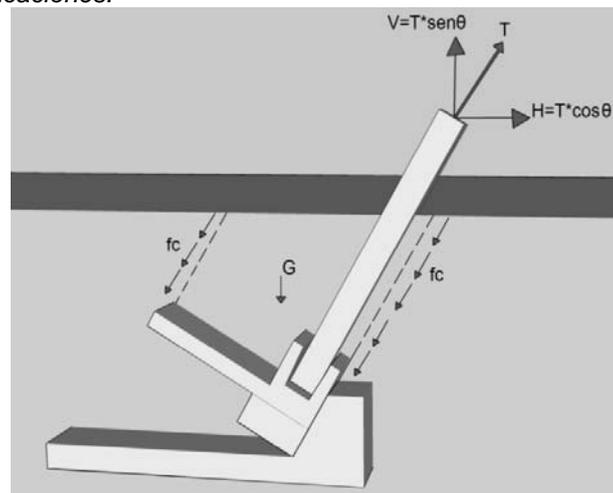
T: Fuerza de tracción transmitida.

G: Peso de la losa de fondo y el suelo contenido en ella.

fc: Fuerzas resistentes de fricción y cohesión.

El anclaje de diseño “Obydov” (figura 3) se puede considerar como una mejora del anclaje descrito anteriormente. La fuerza de tracción es contrarrestada bajo el mismo principio, pero su construcción presenta algunas ventajas: es prefabricado de hormigón armado, eliminando el peligro de corrosión, y la losa de fondo trabaja más efectivamente gracias a un simple desplazamiento en el punto de unión con el tirante.

Mariela Paez Castillo, Ingrid Fernández Lorenzo, Yoermes González Haramboure. Modelación computacional, utilizando el Método de los Elementos Finitos, de anclajes Tipo T Invertida para torres atirantadas de telecomunicaciones.



**Figura 3.** Forma de trabajo de anclajes “Obydov”

Donde:

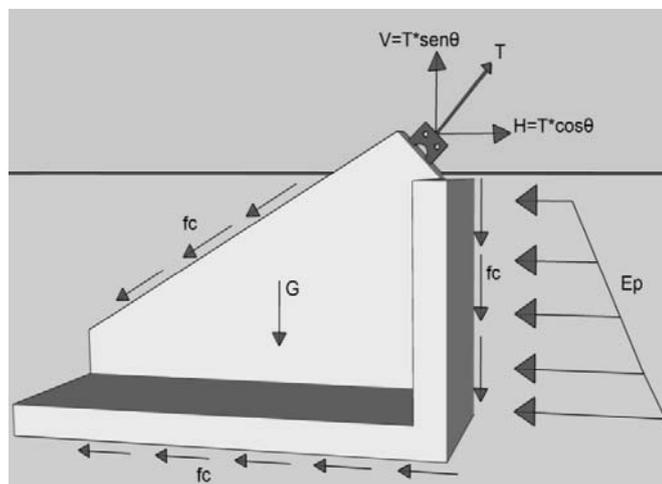
T: Fuerza de tracción transmitida.

G: Peso de la losa de fondo y del suelo contenido en ella.

fc: Fuerza de fricción y cohesión.

Esta tipología de anclaje soporta cargas de tracción de hasta 120 toneladas, aunque siguen siendo necesarios para su instalación equipos de izaje y un riguroso control sobre cada paso de la instalación para asegurar en cada elemento la posición prevista por el proyectista.

Otro tipo de anclaje que ha sido utilizado, pero en menor escala teniendo como premisa fomentar la utilización de estructuras económicas, de simple diseños y ejecución, es la tipología T invertida. Ver figura 4.



**Figura 4.** Forma de trabajo de anclajes tipo T invertida

Donde:

T: Fuerza de tracción transmitida.

G: Peso de la losa y del suelo contenido en ella.

Ep: Empuje de tierra pasivo.

fc: Fuerza de fricción y cohesión.

Mariela Paez Castillo, Ingrid Fernández Lorenzo, Yoermes González Haramboure. Modelación computacional, utilizando el Método de los Elementos Finitos, de anclajes Tipo T Invertida para torres atirantadas de telecomunicaciones.

Este tipo es precisamente el que se decidió emplear para realizar una comparación, desde el punto de vista geotécnico, con los anclajes tipo bloque que son tradicionalmente utilizados en Cuba y en la mayor parte de América.

La tipología escogida para su modelación se compone de tres losas de hormigón armado: losa horizontal o base, losa vertical o paramento y una tercera losa denominada "alma", alineada con los tirantes y colocada ortogonal en el centro de las dos anteriores (figura 4). En estos anclajes la componente vertical de las fuerzas de tracción, transmitida por los tirantes de la torre, es contrarrestada por el peso de las losas y el suelo contenido sobre la base. Por otra parte, a la componente horizontal se opone la presión pasiva del suelo generada sobre la losa vertical (Stottrup-Andersen, 1991). Es válido resaltar que durante esta investigación se tuvo en cuenta el aporte de la fuerza de fricción entre el suelo y las losas para contrarrestar la fuerza horizontal proveniente de los tirantes.

### Materiales y Métodos:

Para establecer un análisis comparativo entre las dos tipologías de anclajes en estudio se definieron 5 tipos de suelos friccionales con modelo de comportamiento elasto-plástico siguiendo el criterio Mohr-Coulomb, en los cuales se ejecutaron los modelos de anclajes tipo bloque y sus equivalentes en tipología T invertida. Las propiedades físicas y mecánicas fundamentales de estos suelos se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los suelos modelados.

Suelo	Ángulo de Fricción interna $\phi'$ (°)	Peso específico $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Ángulo de Dilatancia $\psi$ (°)	Módulo Elásticos E (MPa)	Coefficiente de Poisson $\mu$ (adim)
1	35	19,0	6	3,5	0,3
2	30	18,5	5	3,0	0,3
3	25	18,0	4	2,5	0,3
4	20	17,5	3	2,0	0,3
5	15	17,0	2	1,5	0,3

El hormigón que constituye las estructuras de los anclajes se definió con comportamiento lineal elástico (pues no es objeto de estudio su ruptura), con parámetros constantes Módulo de Young  $E=2,16 \cdot 10^4$  MPa, coeficiente de Poisson  $\mu=0.176$  y peso específico  $\gamma_{\text{horm}}=24.47 \text{ kN/m}^3$  (Haramboure, 2010).

Todos los anclajes modelados se supusieron soportando una torre atirantada de telecomunicaciones modelo típico cubano MAR 181, de 120m de altura, compuesta por un fuste de sección transversal triangular y reticular con 1,2m de ancho, arriostrado a diferentes alturas ("niveles de viento") por un sistema de cables anclados al suelo en tres direcciones radiales los cuales confieren estabilidad a la estructura bajo cargas laterales y de momento (Carrasco, 2009).

Teniendo en cuenta las características mencionadas, se definió la combinación de solicitaciones más desfavorables que puede llegar a un anclaje, a través de una modelación previa de la superestructura en el software SAP 2000. La fuerza extrema actuante resultó ser en este caso 273,9kN, con componentes horizontal de 186,7kN y vertical de 200,3kN. Estos valores de carga se consideraron en el diseño de las dos tipologías de anclajes, así como para su modelación matemática en ABAQUS.

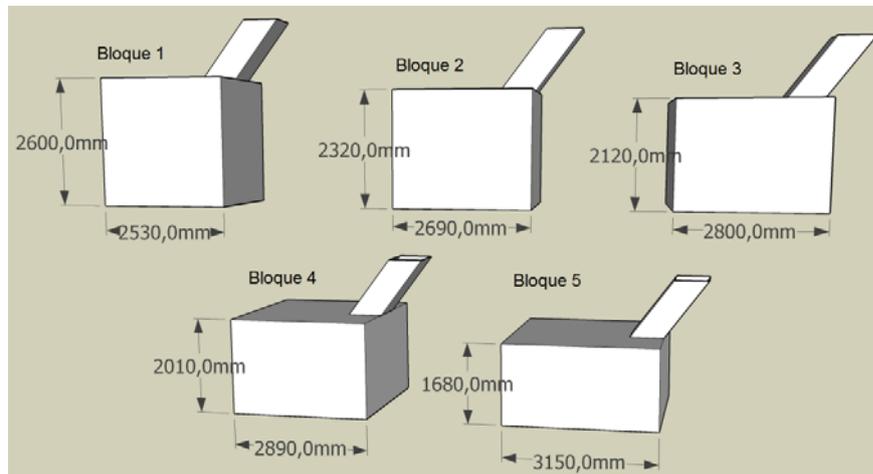
El diseño de los anclajes tipo bloque consistió en obtener sus dimensiones por el criterio de levantamiento y se revisaron luego por estabilidad al deslizamiento y al vuelco, según la metodología de (Fratelli, 1993). En todos los casos se consideró un Factor de Seguridad F.S.=2 (ANSI, 2005; CIRSOC, 1992; CSA 2001). La tabla 2 y la figura 5 ofrecen los resultados obtenidos.

Mariela Paez Castillo, Ingrid Fernández Lorenzo, Yoermes González Haramboure. Modelación computacional, utilizando el Método de los Elementos Finitos, de anclajes Tipo T Invertida para torres atirantadas de telecomunicaciones.

En el chequeo realizado de seguridad al deslizamiento se tuvo en cuenta el aporte de la suma del empuje pasivo de tierra sobre la pared vertical del bloque y de la fuerza de fricción en la base de los anclajes, similar al criterio de estabilidad horizontal en muros de contención (Das, 2009).

**Tabla 2.** Geometría de los anclajes tipo bloques  
**Dimensiones**

Suelo	L=B (m)	H=D <sub>f</sub> (m)
1	2,53	2,60
2	2,69	2,32
3	2,80	2,12
4	2,89	2,01
5	3,15	1,68



**Figura 5.** Anclajes tipo bloque diseñados en cinco tipos de suelos.

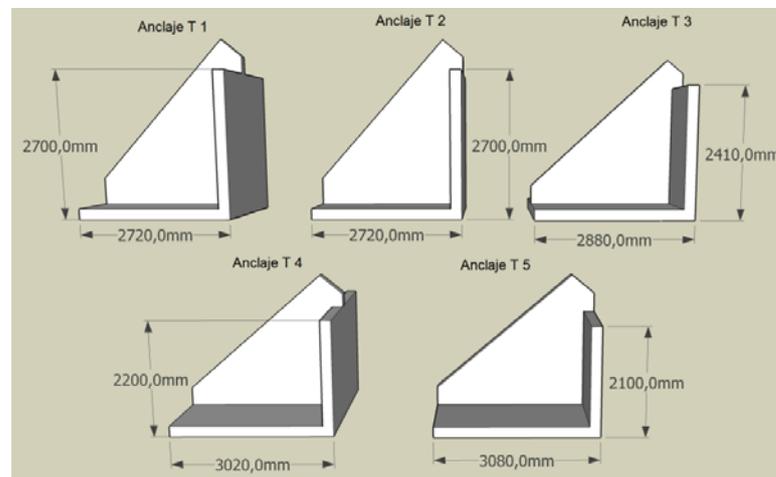
Para el diseño de los anclajes tipo T, se rebajó el peso específico utilizado en el tipo anterior, de  $24\text{kN/m}^3$ , a un peso específico promedio entre el hormigón y el suelo contenido a los lados del alma y sobre la losa base. Utilizando la misma metodología de diseño que en la tipología de bloque, se obtuvieron cinco volúmenes equivalentes de anclajes tipo T, cuyas dimensiones se resumen en la tabla 3 y figura 6.

Puesto que en el estudio de estos anclajes sólo se tiene en cuenta su comportamiento geotécnico se escogió un espesor de 20cm de todas las losas componentes del anclaje, para su modelación en el programa ABAQUS.

Mariela Paez Castillo, Ingrid Fernández Lorenzo, Yoermes González Haramboure. Modelación computacional, utilizando el Método de los Elementos Finitos, de anclajes Tipo T Invertida para torres atirantadas de telecomunicaciones.

**Tabla 3.** Geometría de los anclajes tipo T invertida.  
**Dimensiones**

Suelo	L=B (m)	H=Df (m)
1	2,72	2,70
2	2,72	2,70
3	2,88	2,41
4	3,02	2,20
5	3,08	2,10



**Figura 6.** Anclajes tipo T invertida obtenidos

En la modelación matemática del fenómeno, a través del programa ABAQUS, se establecieron dos pasos de análisis además del “inicial”, en el que el programa hace una lectura de los datos y las condiciones iniciales del fenómeno. En el primer paso se consiguió un estado tensional inicial del suelo a partir de su peso propio, y en el segundo se aplicaron las cargas del tirante en dos componentes, horizontal y vertical (“X” y “Y”), concentradas en un único nodo que representa el amarre de los cables al anclaje.

La interacción suelo-estructura se estableció mediante un coeficiente de fricción  $\mu = 2/3$ , valor típico en suelos friccionales (Ibáñez, 2001). En las dos tipologías de anclajes se consideró con fricción todo los pares de superficies de interacción en los que intervienen los materiales suelo y hormigón.

Para la aplicación de la carga por peso propio definida en el primer paso se adoptó como tipo de carga: gravitatoria. Bajo este concepto el programa es capaz de calcular, con el volumen de los cuerpos representados y la densidad definida para cada material, el valor de tensiones por peso propio en cualquier punto de las geometrías descritas en el modelo (ABAQUS, 2008).

La carga de tracción impuesta por el tirante (en sus dos componentes: horizontal y vertical) se modeló en el segundo paso como concentrada en el nodo de amarre de los cables.

Para la aplicación del Método de Elementos Finitos (M.E.F) se dividieron o “discretizaron” los espacios geométricos utilizando los métodos de mallado estructurado (structured) y de barrido (sweep), en función

Mariela Paez Castillo, Ingrid Fernández Lorenzo, Yoermes González Haramboure. Modelación computacional, utilizando el Método de los Elementos Finitos, de anclajes Tipo T Invertida para torres atirantadas de telecomunicaciones.

de la complejidad de las partes del modelo. Las geometrías más abruptas se partitionaron manualmente en figuras geométricas simples, que permitieran utilizar hexaedros (elementos C3D8) para el mallado.

### Resultados y Discusión:

Se determinó la magnitud de los desplazamientos verticales en las dos tipologías de anclajes en función de los parámetros geotécnicos de los suelos friccionales. En los anclajes tipo T invertida se detallaron las deformaciones de las losas que lo componen, las distribuciones de presiones laterales de tierra, y la influencia que sobre estas distribuciones tiene el Factor de Seguridad al Deslizamiento considerado en el diseño, en aras de minimizar el consumo de material.

#### Comparación de desplazamientos verticales entre las dos tipologías

Se comparó la magnitud de los desplazamientos verticales entre las dos tipologías de anclajes, en un punto (nodo) común a las dos geometrías (figura 7).

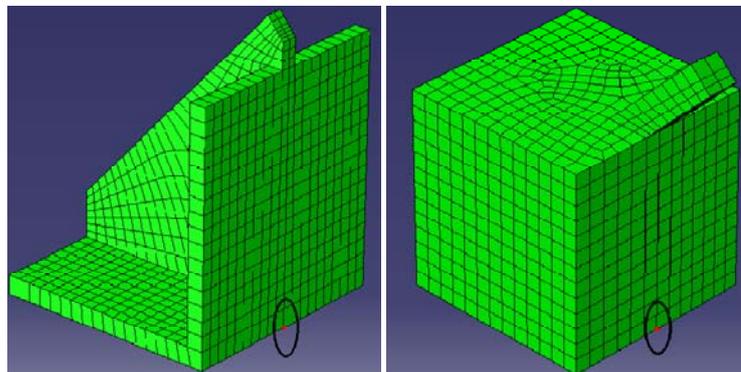


Figura 7. Nodos comunes seleccionados en las dos geometrías de anclajes

En los gráficos de la Figura 8 se pueden apreciar los valores de desplazamientos verticales obtenidos en este nodo para cada tipología de anclaje.

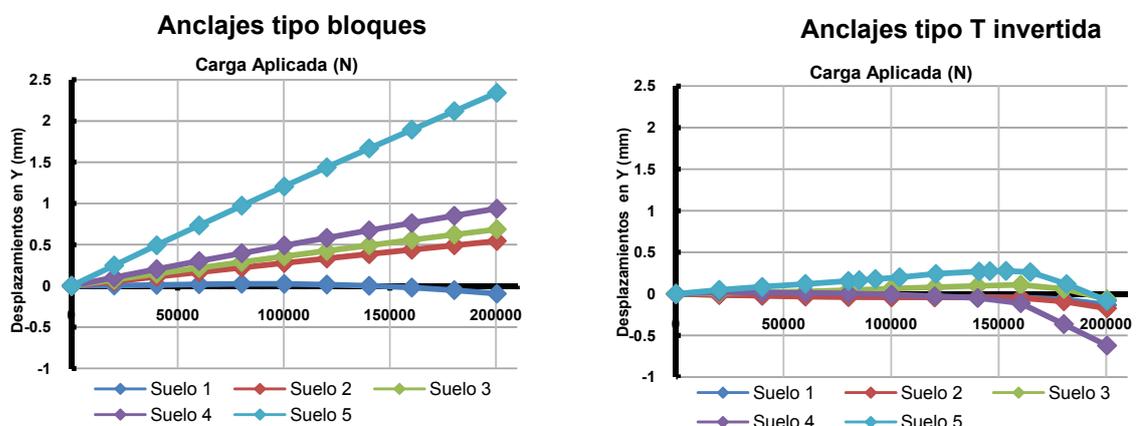


Figura 8. Resumen de desplazamientos verticales de cada tipología

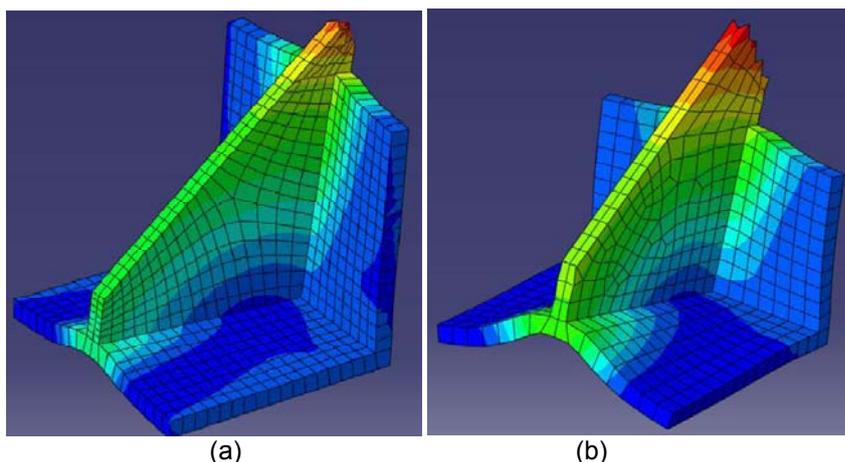
*Mariela Paez Castillo, Ingrid Fernández Lorenzo, Yoermes González Haramboure. Modelación computacional, utilizando el Método de los Elementos Finitos, de anclajes Tipo T Invertida para torres atirantadas de telecomunicaciones.*

Se determinó que en el suelo con mayores valores de los parámetros de resistencia a deformaciones y cortante, Suelo 1, es muy similar el comportamiento del anclaje tipo bloque y el tipo T, en términos de desplazamiento vertical. En este sentido, cuando los parámetros de resistencia del suelo disminuyen en valor (suelo 5), los anclajes tipo T tienen un comportamiento más estable, que resulta favorable para la permanencia de la tensión en los cables que atirantan la torre.

#### Distribuciones de desplazamientos en las losas del anclaje tipo T invertida

Como ya se ha descrito, el anclaje tipo T invertida está conformado por tres o dos losas, la horizontal que sirve de base al cimiento, la vertical o “paramento” que garantiza la estabilidad al deslizamiento a través del empuje pasivo, ambas unidas entre sí por una tercera losa o “alma” que funciona como tensor, colocada en la misma dirección que los tirantes de la torre de telecomunicaciones.

En la figura 9 se muestran los anclajes tipo T invertida, correspondientes a las condiciones extremas de rigidez de los suelos en los que fueron diseñados (suelos 1 y 5), con sus deformaciones unitarias aumentadas 50 veces para mejor visualización y una escala cromática que representa los mayores valores de deformación en rojo y los menores en azul.

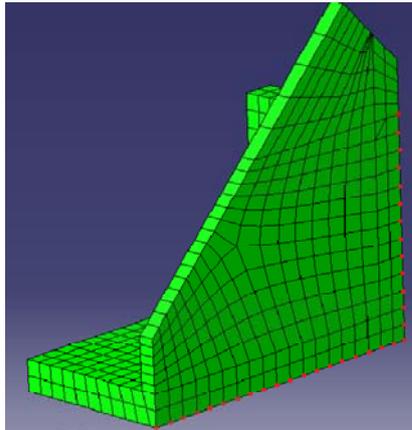


**Figura 9.** Deformaciones unitarias en los cinco anclajes T invertida diseñados: a) T invertida diseñada para suelo 1 ( $\varphi=35^\circ$ ); b) T invertida diseñada para suelo 5 ( $\varphi=15^\circ$ )

Analizando la figura anterior se puede concluir que en la losa base y en el paramento ocurren los mayores gradientes de deformación, entre los extremos que actúan como voladizos dentro del suelo y el centro donde están empotradas con el “alma”. Las deformaciones aumentan en valor a medida que disminuyen también en valor las propiedades resistentes del suelo confinante de las estructuras.

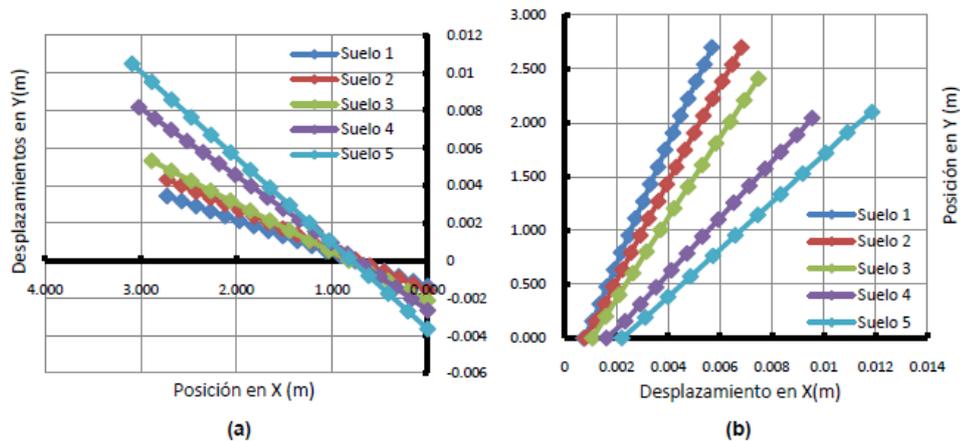
Para realizar un análisis de la distribución de deformaciones en cada losa se extrajeron datos de los puntos destacados en la figura 11 (sección longitudinal del anclaje) para la losa horizontal y la vertical en la zona de empotramiento.

Mariela Paez Castillo, Ingrid Fernández Lorenzo, Yoermes González Haramboure. Modelación computacional, utilizando el Método de los Elementos Finitos, de anclajes Tipo T Invertida para torres atirantadas de telecomunicaciones.



**Figura 11.** Puntos seleccionados en los anclajes (vista en sección longitudinal)

En la figura 12a se muestran los valores de desplazamientos verticales (en Y) de los puntos de la losa base y su posición (en X) respecto vértice o nodo común (figura 7, punto donde coinciden las tres losas ortogonales), para el estado de carga máxima en el tensor. Por su parte la figura 12b describe el comportamiento de la losa vertical (paramento), en el eje de las ordenadas se detalla la posición de los puntos según el mismo vértice de referencia, y en de las abscisas los valores de desplazamientos horizontales de cada uno de ellos.



**Figura 12.** Distribución de deformaciones: a) losa horizontal; b) losa vertical

La variación de los desplazamientos en las dos losas presenta un comportamiento lineal (como corresponde al empotramiento) aunque las pendientes de las rectas van creciendo a medida que disminuye el ángulo de fricción interna del suelo.

En la losa base se puede apreciar un punto de rotación cuya posición cambia sólo unos pocos centímetros con la variación de las dimensiones de los anclajes y las propiedades de los suelos. Analizando los datos que se utilizaron para la confección del gráfico de la figura 12a, se puede establecer una relación entre la longitud de la losa base de los anclajes y la posición de este eje de rotación. La tabla 4 muestra los resultados obtenidos.

En el gráfico referente a la losa vertical (figura 12b), se aprecia cómo a medida que disminuyen las propiedades resistentes del suelo las fuerzas aplicadas logran desplazar más al anclaje en el sentido horizontal, desplazamiento que es mayor en la parte superior de la losa e indica el giro de toda la estructura, y son comparables en magnitud a los máximos admisibles por este tipo de estructuras.

**Tabla 4.** Relación entre la longitud de los anclajes y posición del punto de rotación

Anclajes	Longitud de base(m)	Posición del "eje" de rotación (m)	Relación respecto a longitud (L)
T1, suelo 1 ( $\theta=35^\circ$ )	2.724	0.757	0.28L
T2, suelo 2 ( $\theta=30^\circ$ )	2.724	0.605	0.22L
T3, suelo 3 ( $\theta=25^\circ$ )	2.88	0.824	0.28
T4, suelo 4 ( $\theta=20^\circ$ )	3.018	0.670	0.22L
T5, suelo 5 ( $\theta=15^\circ$ )	3.089	0.618	0.20L

Como se observa en la cuarta columna de la tabla 4, los valores (prácticamente constantes) de posición del "eje" de rotación de la estructura respecto al vértice de empotramiento de las tres losas, están en el orden de  $1/4L$ , siendo L la dimensión de la base del anclaje en el sentido de la fuerza horizontal actuante.

#### Distribución de presiones laterales de tierra en tipología T invertida

Para el diseño de las dos tipologías de anclajes se tuvo en cuenta, durante el chequeo de la estabilidad horizontal, el aporte de la fricción en la base y la presión pasiva del suelo, calculada esta última según la teoría de Rankine para muros de contención de tierra.

El cálculo de las presiones laterales de tierra de Rankine es función de varios factores como son: el tipo de movimiento al que es sometida la estructura, los parámetros resistentes del suelo, su peso específico y las condiciones de drenado del terreno. El movimiento horizontal de los anclajes en estudio ocurre a expensas de confinar la masa de suelo en contacto con la losa vertical, por tanto las presiones que se generan son de tipo pasivas.

Las ecuaciones 1 y 2 son las propuestas por Rankine para el cálculo de estas presiones, según (Das 2009).

$$\sigma'_p = \sigma'_v * K_p + 2c'\sqrt{K_p} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:  $\sigma'_p$ : Presión pasiva ( $\text{kN/m}^2$ )

$\sigma'_v$ : Esfuerzo vertical del suelo a una profundidad Z ( $\text{kN/m}^2$ )

c': Cohesión efectiva del suelo ( $\text{kN/m}^2$ )

$K_p$ : Coeficiente de Rankine de presión pasiva de tierra

$$K_p = \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:  $\phi'$ : Ángulo de fricción interna efectivo del suelo ( $^\circ$ )

No obstante esta teoría simplifica otras variables como: la rigidez elástica del suelo, la interacción suelo-estructura expresada a través de la fricción entre el suelo y las paredes de los muros, que de tenerse en cuenta tomarían la metodología de cálculo manualmente muy engorrosa. Sin embargo es un hecho que estas variables aportan resistencia al suelo, por lo que la falla aparecería bajo una combinación de esfuerzos mayor, y es posible acotar las dimensiones de la estructura resistente en favor de una mayor economía de los recursos de construcción.

Mariela Paez Castillo, Ingrid Fernández Lorenzo, Yoermes González Haramboure. Modelación computacional, utilizando el Método de los Elementos Finitos, de anclajes Tipo T Invertida para torres atirantadas de telecomunicaciones.

Los gráficos de la figura 13 muestran la variación de las presiones laterales con el aumento de la profundidad en los suelos 1 y 5 (extremos, más y menos resistente, respectivamente) analizados para los anclajes tipo T invertida. En cada uno se muestran dos series: una calculada analíticamente por la teoría de Rankine y otra de valores de presiones en el eje "X" determinadas matemáticamente según el M.E.F, con asistencia de la herramienta computacional ABAQUS.

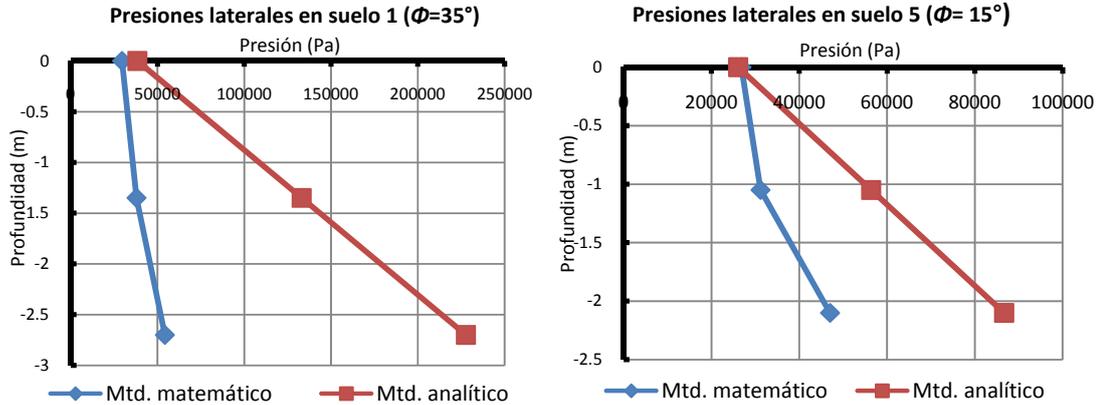


Figura 13. Presiones laterales de tierra en tipología T invertida en los suelos 1 y 5

Los valores determinados en la modelación matemática con aplicación del método numérico de solución son menores, y presentan un comportamiento menos lineal respecto a los pronosticados mediante la teoría de Rankine (método analítico). Esta conducta es resultado de incluir en la modelación matemática los parámetros que la teoría de Rankine no tiene en cuenta: fricción suelo-estructura y parámetros elásticos del suelo, lo que permite un acercamiento al fenómeno real. Además, el desplazamiento horizontal de los anclajes no alcanza en ningún caso la magnitud necesaria para generar la "cuña de falla" responsable de la distribución de tensiones de Rankine. Según (Das, 2009) en arenas firmes tal desplazamiento está en el orden de 0.01 veces la altura de la estructura, para llegar a provocar la falla del suelo bajo condiciones de tensión pasiva.

Comparación de distribución de presiones laterales con anclajes diseñados con factor seguridad 1.5

Analizando los resultados anteriores es posible establecer la hipótesis de que los anclajes tipo T diseñados según la metodología explicada en (Fratelli, 1993) para anclajes tipo bloque según las condiciones de suelo y carga planteadas en este artículo, están sobre-diseñados con el Factor de Seguridad al deslizamiento F.S.=2. Por tanto, es de interés someter a este mismo análisis a los anclajes utilizando un factor de seguridad menor para sus diseños y criterios de chequeos geotécnicos. Para ello se diseñaron dos modelos más de anclajes tipo T invertida con Factor de Seguridad al deslizamiento F.S.=1.5, conformados en la herramienta computacional con las propiedades del suelo 1 ( $\phi=35^\circ$ ) y el suelo 5 ( $\phi=15^\circ$ ). Las dimensiones resultantes de los dos nuevos anclajes se resumen en la tabla 5.

Tabla 5. Dimensiones de anclajes tipo T invertida diseñados con Factor de Seguridad 1.5 y 2.

Suelo	Dimensiones (F.S.=1.5)		Dimensiones (F.S.= 2)	
	L=B (m)	H=Df (m)	L=B (m)	H=Df (m)
1	2.45	2.50	2.72	2.70
5	2.81	1.90	3.09	2.10

Si se comparan estos valores, se puede apreciar una reducción en el volumen de excavación y de consumo de material resultante de la disminución del factor de seguridad. En la tabla 6 se especifica la reducción en cuanto a volumen de hormigón de los diseños de T invertida, además se agrega una serie de los anclajes tipo bloques diseñados para estos dos suelos.

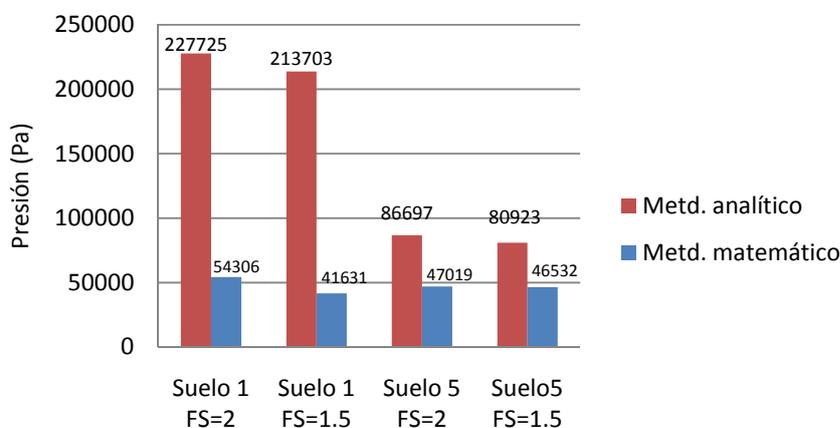
Mariela Paez Castillo, Ingrid Fernández Lorenzo, Yoermes González Haramboure. Modelación computacional, utilizando el Método de los Elementos Finitos, de anclajes Tipo T Invertida para torres atirantadas de telecomunicaciones.

**Tabla 6.** Volúmenes de hormigón de anclajes tipo T invertida y tipo bloque

	Suelo 1	Suelo 5
<b>Volumen del Bloque (m<sup>3</sup>)</b>	16,69	16,70
<b>Volumen de la T invertida con F.S=2 (m<sup>3</sup>)</b>	4,22	4,34
<b>Volumen de la T invertida con F.S=1,5 (m<sup>3</sup>)</b>	3,45	3,62

Como se puede observar la sustitución del anclaje tipo bloque por el tipo T invertida garantiza una reducción considerable en el consumo de hormigón estructural, si además se diseña el anclaje en estudio con un factor de seguridad de 1.5 se consigue a ahorrar hasta un 79% del volumen total de material.

La figura 14 muestra las variaciones entre las presiones calculadas manualmente, según la teoría de Rankine, y por el M.E.F., en los anclajes diseñados y revisados con F.S. = 1,5.



**Figura 14.** Variación de presiones laterales de tierra entre modelos con F.S. = 2 y F.S. = 1,5.

En la gráfica anterior se observa una reducción en los valores de presión lateral pasiva que intervienen en el diseño geotécnico siguiendo diferentes Factores de Seguridad, respecto al máximo calculado analíticamente (según método de Rankine) llegando a ser hasta de un 23% en el suelo 1, para el anclaje modelado matemáticamente y con solución numérica mediante el M.E.F. Entre los dos métodos (Rankine y M.E.F.) todavía es considerable la desigualdad, hasta un 57% en el suelo 5 para el diseño con F.S=1.5, causadas por los mismos motivos abordados en el epígrafe anterior. Por tanto, se continúa del lado de la seguridad en el diseño, y se ahorra material y volumen de excavación en el proceso de construcción y colocación del anclaje.

### Conclusiones:

Los resultados de la modelación y de las comparaciones realizadas entre dos tipologías de anclajes: bloque y Tipo T invertida, permiten arribar a las siguientes conclusiones.

La modelación de las dos tipologías de anclajes a partir del M.E.F. aplicado con la asistencia del software ABAQUS permite obtener nuevos criterios de seguridad en su diseño y revisión geotécnica. Con la aplicación del Factor de Seguridad F.S. = 2 los anclajes T invertida resultan sobre-diseñados bajo las condiciones de carga y en todos los suelos estudiados. Reduciendo el Factor de Seguridad hasta 1,5 se obtienen diseños más económicos e igualmente seguros.

En la comparación de desplazamientos verticales de las dos tipologías, los anclajes tipo T invertida resultan más estables que los tipo bloque, estabilidad que logran mediante el giro sobre un eje ubicado

*Mariela Paez Castillo, Ingrid Fernández Lorenzo, Yoermes González Haramboure. Modelación computacional, utilizando el Método de los Elementos Finitos, de anclajes Tipo T Invertida para torres atirantadas de telecomunicaciones.*

en el plano de la base a una distancia del paramento igual a la cuarta parte de la arista de la base en ese sentido.

Los anclajes tipo T invertida obtenidos con las condiciones de carga y suelo estudiados son más económicos en términos de consumo de material, y presentan un comportamiento tenso-deformacional más eficiente que la tipología utilizada actualmente en Cuba.

#### **Referencias:**

ABAQUS, S. (2008). Abaqus/Standard User's Manual. Version 6.8. Providence, USA.

ANSI (2005). TIA/EIA-222-G, "Structural standards for Steel Antenna Towers and Antenna Supporting Structures", 2005: Telecommunications Industry Association, USA.

Canadian Standards Association (2001). Antennas, towers, and antenna supporting structures, CSA S37-01. Rexdale, Canada.

Carrasco Luzardo, Abel. (2009). Efecto de la tensión inicial de los cables en el comportamiento estructural de una torre atirantada. Departamento de Ingeniería Civil. La Habana, Cuba, CUJAE: Tesis de Grado.

CIRSOC-306 (1992). Estructuras de acero para Antenas INTI-CIRSOC, Argentina.

Das, Braja. M. Principios de ingeniería de cimentaciones. La Habana, Cuba, Félix Varela, 2009. 768 p.

Fratelli, Maria Graciela. Suelos, fundaciones y Muros. Puerto Ordes, Estado Bolívar, Venezuela, 1993. 574 p.

Haramboure, Yoermes Glez, (2010). Estudios comparativos de cimientos laminares bajo carga axialsimétrica para torres de chimeneas de 74,5m en Cuba. Departamento de Ingeniería Civil. La Habana, Cuba, CUJAE. Tesis de Maestría.

Ibañez, Luis. (2001). Análisis del comportamiento geotécnico de las cimentaciones sobre pilotes sometidas a carga axial mediante la modelación matemática. Departamento de Ingeniería Civil. Santa Clara, Cuba, UCLV: Tesis de Doctorado.

Smith, Brian. W. Communication Structures. Thomas Telford Publishing. London, England, 2007. 352 p.

Stottrup-Andersen, U. TV 2. 300m High antenna mast. Teleteknik (Ramboll & Hanemann A/S), 1991.