

ICEUBI2015

University of Beira Interior
Faculty of Engineering Covilhã | Portugal



December 2 3 4

International
Conference on Engineering
Engineering for Society

The Organizing Committee of

ICEUBI2015

**INTERNATIONAL CONFERENCE ON
ENGINEERING UBI2015**

Engineering for Society

organized by the Faculty of Engineering, University of Beira Interior, which took place in Covilhã, Portugal, 2-4 December 2015, certifies that the paper

Estudio comparativo de modelos de cálculo para el diseño de muros pantalla

by:

Ricardo Rio; Miguel Paula; Manuel Braz-César

was presented and included in the Conference documentation.

Covilhã, UBI, 2 December 2015

Mário Marques Freire

President of Faculty of Engineering

João Carlos Lanzinha

Chairman of the Organizing Committee



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Covilhã | Portugal



ORDEM
DOS
ENGENHEIROS



ICEUBI2015

University of Beira Interior
Faculty of Engineering Covilhã | Portugal



December 2 3 4

International
Conference on Engineering
Engineering for Society

The Organizing Committee of

ICEUBI2015

**INTERNATIONAL CONFERENCE ON
ENGINEERING UBI2015**

Engineering for Society

organized by the Faculty of Engineering, University of Beira Interior, which took place in Covilhã, Portugal, 2-4 December 2015, certifies that

Ricardo González Rio

attended this Conference.

Covilhã, UBI, 2 December 2015

Mário Marques Freire

President of Faculty of Engineering

João Carlos Lanzinha

Chairman of the Organizing Committee



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Covilhã | Portugal



ORDEM
DOS
ENGENHEIROS



Estudio comparativo de modelos de cálculo para el diseño de muros pantalla

1. Introducción

Cuando se desea ejecutar un muro pantalla existen numerosas cuestiones a tener en cuenta. No se trata de una estructura común que pueda calcularse fácilmente y esperar un comportamiento similar a lo largo de su construcción y puesta en funcionamiento. Un muro pantalla es una compleja y elaborada sucesión de cálculos y fases que se redefinen y adaptan a medida que se ejecuta la estructura.

En este artículo se va a estudiar cuál es la manera más adecuada y segura de poder elaborar un muro pantalla de forma que se pueda garantizar su puesta en funcionamiento, previendo los esfuerzos va a tener que soportar en cada momento de forma que su comportamiento sea el esperado.

Para poder estudiar el comportamiento de un muro pantalla y la manera de abordar su diseño y posterior ejecución, en este artículo se ha querido evaluar un caso teórico con datos y características perfectamente posibles de manifestarse en un caso práctico.

El muro pantalla de estudio estará encajado en un macizo arcilloso con tres zonas diferenciadas en su composición y por consiguiente en su comportamiento con la estructura. A su vez se incluirá un nivel freático a 2 m de profundidad. Las tres zonas mencionadas antes presentarán las características enumeradas en la Tabla 1.

Tabla 1- Características geotécnicas del terreno

	Zona Geotécnica		
	Tierra vegetal ZG 1	Arcilla limosa ZG 2	Arcilla fuerte sobreconsolidada ZG 3
Peso específico (kN/m ³)	20	16,8	23,2
Espesor (m)	4	25	5
Ángulo de rozamiento interno (°)	40,1	32,8	43,6
Diámetro medio de partículas (mm)	0,35	0,0025	0,0019
Índice de compacidad (%)	15	20	92

La ley que establece la resistencia al corte no drenada de la ZG 2, la zona predominante y con mayor potencia, es la siguiente:

$$C_u = 20 + 0.17\sigma_{v0} \quad (1)$$

Esta ecuación corresponde a la ley de resistencia al corte no drenada de ZG2.

En este caso teórico se pretenden incorporar cuatro niveles de acodamiento para la ejecución de la estructura. En la Figura 1 se muestra un esquema del muro pantalla, indicando las diferentes zonas geotécnicas (Tabla 1) y las posiciones de los puntos de acodamiento.

A la hora de abordar el cálculo del muro pantalla, es preciso elaborar un detallado seguimiento de las diferentes fases a las que va a estar sometida el mismo; siendo ese el objetivo de este artículo se van a comparar los distintos resultados obtenidos con dos principales métodos de cálculo.

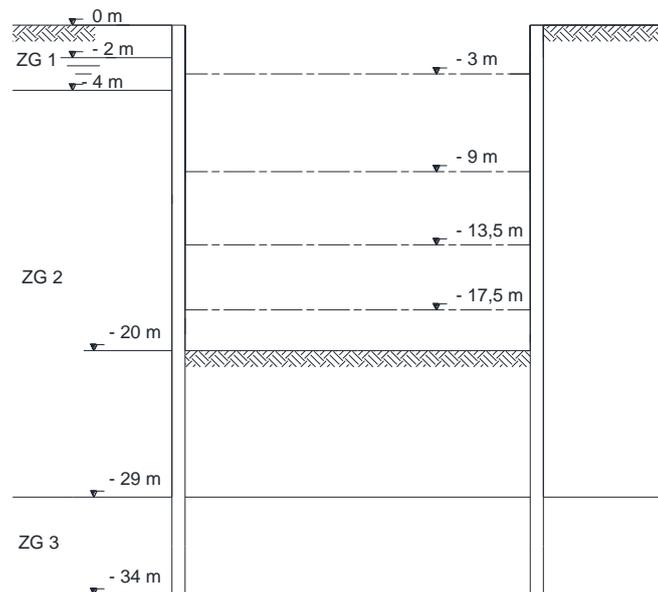


Figura 1-Esquema del muro pantalla.

2. Métodos de Cálculo

La pantalla de hormigón se diseña una vez determinados los esfuerzos que sufrirá en cada momento de su ejecución y los lugares donde se producen, por lo que la primera fase es crítica. Debido a que la pantalla es el primer elemento constructivo, no puede existir la más mínima duda respecto a su comportamiento, es por eso que se hace imprescindible la elección de un correcto método de cálculo.

Para el análisis se tienen en cuenta las características geotécnicas del terreno, así como la existencia de una sobrecarga uniforme debido al posible tránsito de vehículos una vez finalizada la obra.

2.1 Modelos analíticos simplificados

En este grupo se estudiarán tres variantes dentro del mismo método: Áreas de Influencia, Cálculo de esfuerzos simples con Ftool y simulando apoyos elásticos con Ftool (diagramas de Terzaghi-Peck). En cualquiera de ellas se determinan los esfuerzos en la que puede considerarse fase más desfavorable, correspondiente a la fase definitiva. En cualquier caso, posteriormente se analizarán los resultados.

Con este cálculo se consiguen los resultados más rápidos y sencillos, que como se verá a continuación solo servirán para hacerse una idea de la magnitud total del esfuerzo que el terreno va a producir sobre la estructura [1,2]. Este método consiste en dividir los esfuerzos transmitidos por el terreno a la pantalla por medio de los puntales proporcionalmente al área que soporta cada uno, y de esta manera calcular los mismos y diseñar posteriormente la pantalla. El axil transmitido a cada puntal es el resultado de multiplicar la tensión soportada en un tramo de la pantalla por la longitud de dicho tramo. En esta simulación se supondrá la pantalla apoyada a una profundidad de 29 metros.

Ftool es un software de cálculo estructural, para calcular los esfuerzos soportados en este caso, se introduce el diagrama de tensiones determinado a partir de la geotecnia y la geometría de la pantalla, especificando la situación de los apoyos.

En el punto donde acaba la pantalla se diseña un apoyo doble, suponiendo que no hay desplazamientos horizontal y vertical; no será completamente cierto pero como punto de partida es una buena referencia.

En este caso, se pretende ganar mayor precisión en los cálculos. Para ello, se puede emular el terreno y discretizarlo como apoyos elásticos que a efectos de cálculo se simularán como barras cuyas propiedades (Módulo de elasticidad, Área y longitud) sean las correspondientes al propio terreno. Se debe abstraer la pantalla para considerarla de igual forma que una cimentación superficial, y relacionar el efecto y proceso de los asentamientos de la misma como si la cimentación fuese la pantalla, y el terreno bajo la cimentación, el terreno tras la pantalla continua, respectivamente.

$$\Delta l = \frac{Nl}{E_{barras} A} \quad (2)$$

Siempre que se cumpla la fórmula anterior se están simulando barras adecuadas, de forma que se puede definir un módulo de elasticidad del terreno a partir de sus características y abstraerlo a las barras, consiguiendo un modelo más realista.

A diferencia de los dos anteriores métodos, en este caso se diseña la estructura como empotrada a 35 metros de profundidad, donde se considera que la pantalla no va a tener desplazamientos debido al estrato competente.

Una vez propuestos los tres escenarios, se procede al cálculo de los esfuerzos en la pantalla. Con el método de áreas de influencia se desarrollan los puntos más desfavorables, estos son, los lugares donde se sitúan los puntales, y el apoyo de la pantalla en el terreno. Con Ftool se extraen las leyes de esfuerzos, mostrando los diagramas de axiles y momentos.

Los resultados se pueden ver en la Tabla 2, en la que se representan los valores lineales de los axiles, sin tener en cuenta la distancia que los separará.

Tabla 2-Resultados de axiles de los puntales, Métodos Analíticos

Nº Puntal	Profundidad (m)	Según áreas de influencia	Ftool , Método Simple	Ftool , Apoyos Elásticos
		Esfuerzo Axial (kN/m)	Esfuerzo Axial (kN/m)	Esfuerzo Axial (kN/m)
Nivel 1	3	707	645	646
Nivel 2	9	1032	1210	1196
Nivel 3	13,5	835	551	621
Nivel 4	17,5	1557	1577	1284

Para una mejor visualización y comprensión del esfuerzo a soportar por cada puntal se construye el gráfico de barras presentado en la Figura 2.

Respecto al momento flector máximo positivo y negativo, para el caso de los apoyos elásticos se registró un momento de 2045 y 1126 kN.m/m, respectivamente. Se pueden extraer varias conclusiones, la primera es la diferencia entre el método de áreas de influencia y cualquiera de los métodos por Ftool, está claro la dispersión entre los resultados debido a que en el primer caso, al trabajar con áreas de influencia, no se está teniendo en cuenta las condiciones de contorno reales de la pantalla.

Los esfuerzos dependen de la geometría de la pantalla, que a efectos prácticos se asemeja a una viga continua, hecho que no se considera mediante líneas de influencia. De este modo existe gran diferencia entre los niveles 2 y sobretodo 3 de puntales.

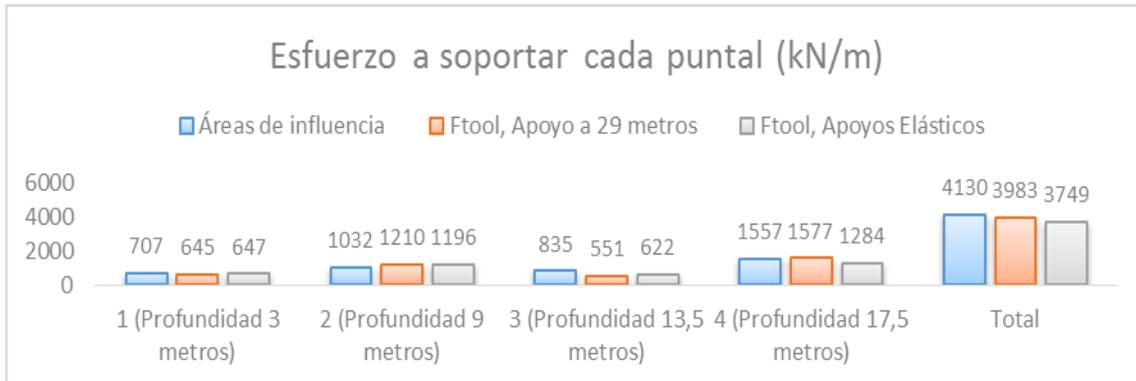


Figura 2- Resultados de axiles de los puntales, Métodos Analíticos

Entre los dos métodos calculados por medio del programa también existe dispersión, pero menos acusada, esto es porque a pesar de tener en cuenta todo el terreno adyacente a la pantalla en el segundo caso, esa influencia comienza a tener peso solo en los últimos niveles de puntales.

Esto produce que a efectos prácticos, las reacciones de los dos primeros niveles de apuntalamiento se mantengan prácticamente iguales, pero en los últimos se vea reflejada esa interacción.

Aunque no sea muy significativa, la reducción de las reacciones que se produce al considerar el terreno hasta el fin de la pantalla es un claro ejemplo de que estos métodos están sobrestimando los esfuerzos reales, a los que hay que sumar el efecto arco tan importante de este tipo de estructuras.

De esta forma se podría realizar un pre dimensionamiento de los elementos estructurales a partir de estos cálculos, pero antes se deben realizar cálculos con software especializado para obtener más información.

2.2 Cálculo automático con software

Como gran parte de la obra civil, las estructuras de contención se comportan de diferente forma según la fase de ejecución en la que se encuentren, sufriendo una serie de esfuerzos que varían mucho a medida que avanza la obra, y no necesariamente se alcanza el punto crítico en la última fase.

La principal diferencia entre emplear cálculos analíticos o utilizar un software específico reside en las fases constructivas, es decir, por estos modelos se va a poder calcular la estructura a medida que se avanza en su ejecución, para un posterior dimensionamiento en base a los esfuerzos más graves que va a sufrir la estructura a lo largo de su construcción.

Los resultados obtenidos mediante áreas de influencia o el software Ftool suponen que la estructura es construida en un instante y pasan de no trabajar a trabajar todos al mismo tiempo, absorbiendo todas las tensiones del terreno. En la realidad no es así, porque el terreno también se asienta y reparte las propias tensiones al terreno adyacente, disipando parte de los esfuerzos. El modo de trabajar de la estructura estará directamente relacionado con el proceso constructivo, las fases de excavación, la altura excavada en cada fase, etc.

Se ha escogido Cype como software de comparación porque es un programa que proporciona resultados rápidamente, permite trabajar con él y probar diferentes modelos de suelo para comparar resultados. Una característica muy útil es su interfaz gráfica, lo que facilita su uso, y por medio de su asistente se puede elaborar plan de obra correcto [3].

El modo de trabajo de Cype y sus comprobaciones se rigen por medio de la legislación española más actual, por lo que todos los resultados están ya verificados.

El modelo de cálculo a está basado en los métodos de interacción terreno-pantalla, donde la magnitud de los empujes del terreno sobre la pantalla depende del desplazamiento de la misma. En los cálculos de las acciones y reacciones del terreno sobre la pantalla se que éste tiene una ley de comportamiento elastoplástico (no-lineal), obtenida de la aproximación del comportamiento real del terreno que incluye la plastificación del mismo.

El rango lineal de comportamiento se asocia al concepto del módulo de balasto lateral del terreno, y el rango plástico al concepto de empuje activo o pasivo según el sentido del desplazamiento. Así mismo, los elementos de apoyo (anclaje, puntales y forjados) introducen una serie de coacciones y acciones adicionales. Se trata de un proceso iterativo que fianliza cuando la situación de equilibrio “n” es lo suficientemente aproximada a la iteración “n+1”.

Si bien con los métodos analíticos no era preciso especificar el material, y la geometría era un compromiso entre los requerimientos mínimos y la solución óptima, para trabajar con Cype se hace necesario definir cuidadosamente todos estos parámetros. Por ello, y por medio de diferentes intentos y cálculos se llegó a la conclusión de que la pantalla debía tener una profundidad de 34 metros. En este caso, el hormigón será un C30/35 y el acero de las armaduras un B 500 S, con un recubrimiento mínimo de 7 cm, a determinar por Cype. El espesor de la pantalla, para un primer cálculo fue de 80 cm, que posteriormente se modificó por otras especificaciones pero que para el caso teórico que se trata, no es de mayor importancia.

Como ya se explicó en líneas anteriores, Cype realiza los cálculos para cada fase constructiva definida por el usuario, proporcionando valores y resultados en cada una de ellas. De esta manera se puede observar donde se producen los máximos esfuerzos a medida que avanza la obra. Para poder estudiar las diferencias entre este método y los analíticos, en la Figura 3 se representan las diferentes leyes de cortante que se producen en la pantalla según se suceden las diferentes fases constructivas.

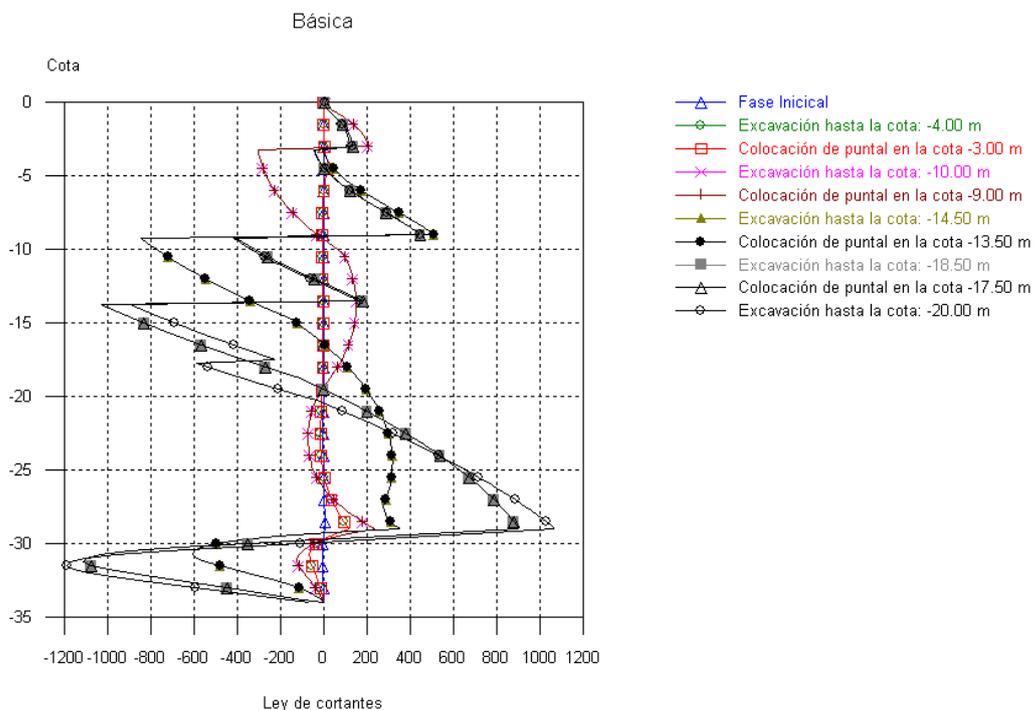


Figura 3- Leyes de cortantes calculadas por Cype.

Tabla 3-Resultados de axiles de los puntales (Cype)

Nº Puntal	Profundidad (m)	Cype
		Esfuerzo Axial (kN/m)
Nivel 1	3	512
Nivel 2	9	1373
Nivel 3	13,5	1251
Nivel 4	17,5	418

A la vista de este resultado se hace presente la variación de valores de cortantes en cualquier punto determinado a lo largo del tiempo. Esto hace que se haga imprescindible diseñar una pantalla que pueda resistir a los diferentes esfuerzos sufridos en cada fase constructiva. De forma que la información sea comparable con los métodos anteriores, se presenta la Tabla 3, que reúne los resultados de axiles máximos sufridos en cada puntal. Respecto al momento flector máximo positivo y negativo, se registró un momento de 3028 y 2561 kN.m/m, respectivamente.

2.3 Comparación de resultados

Sin importar que método se emplee en el cálculo, el empuje de las tierras es siempre igual, con las pequeñas variaciones propias de cada modelo. De esta forma, los esfuerzos calculados por los diagramas de Terzaghi-Peck en Ftool se representaron como una sobrecarga actuante en una viga continua y deben ser muy similares a los obtenidos por Cype.

A continuación se muestra un gráfico (Figura 4) con las reacciones de los apoyos, que si bien pueden presentar diferencias al considerar las fases constructivas o no, el sumatorio debe ser prácticamente idéntico. Al considerar este estudio como objeto principal el estudiar las diferencias en cuanto a utilizar uno u otro método, no se hace necesario el comparar los resultados de Cype con los tres modelos analíticos, basta con tomar uno como referencia, siendo el más preciso y trabajado el proporcionado por Ftool y el modelo elástico.

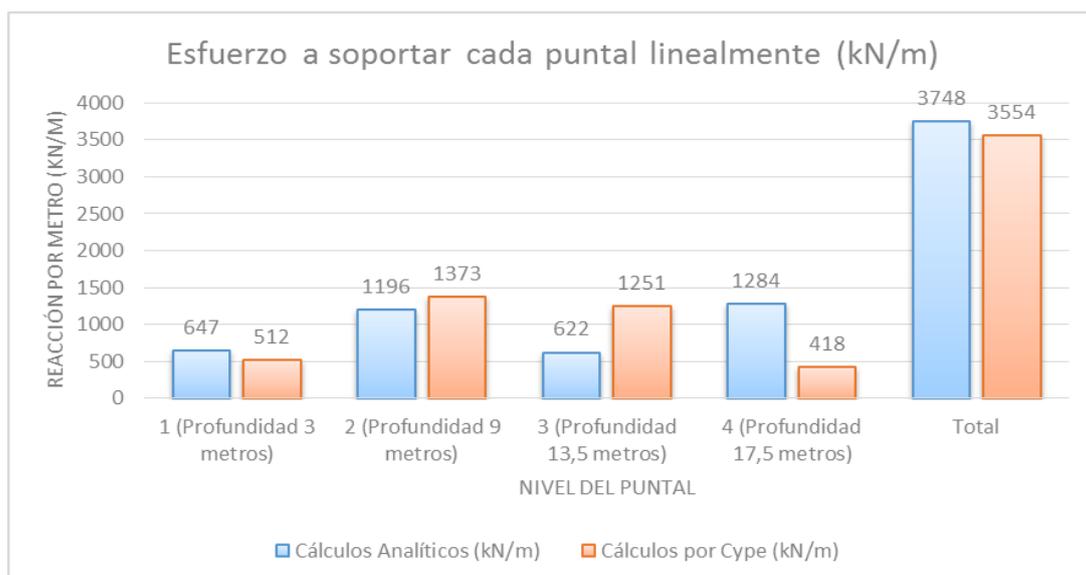


Figura 4- Axiles calculados para cada puntal, ambos métodos.

Se puede observar gran disparidad entre la distribución de esfuerzos para los dos últimos puntales, pero es perfectamente comprensible.

Mediante el método analítico, las reacciones son fruto de unos cálculos que garantizan el equilibrio de la pantalla respecto de los empujes de las tierras para soportar todo el esfuerzo al mismo tiempo. Sin embargo, Cype calcula los esfuerzos que van apareciendo a medida que progresa la obra. A cada tramo excavado parecen nuevas tensiones que se traducen en movimientos de las leyes de esfuerzos.

Tabla 4- Comparativa Analítico-Cype. Esfuerzos en los puntales (lineales)

Profundidad del puntal (m)	Cálculos Analíticos (kN/m)	Cálculos por Cype (kN/m)	Diferencia respecto a analíticos
3	647	512	-20,86%
9	1196	1373	14,82%
13,5	622	1251	101,24%
17,5	1284	418	-67,46%
Total	3748	3552	-5,16%

En la Tabla 4 aparecen los esfuerzos máximos que soportarán los puntales, que si bien en los cálculos analíticos son invariables, en un modelo real como el que proporciona Cype varían cada fase en la que se excava más terreno del interior del recinto. De hecho los esfuerzos máximos de cada puntal no se producen en la última fase, se producen en la fase de excavación siguiente a su puesta en obra. Por ello aunque las tensiones del terreno a soportar son las mismas, la distribución es totalmente diferente, y es mucho más realista el modelo utilizado en Cype.

Respecto a la reacción del primer apoyo, la diferencia es de casi un 21% menor en Cype, y la del segundo apoyo casi un 15% mayor. Son diferencias pero no son muy significativas. La mayor disparidad se produce entre las dos últimas reacciones. Los puntales son elementos pasivos que solo trabajan cuando son solicitados por medio de los empujes de las tierras. Por este motivo, el último puntal recibe tan poca reacción, porque una vez instalado, sólo se excava un metro y medio de terreno y aunque se movilice parte del esfuerzo del tercer puntal hacia el cuarto, no posee tanta magnitud.

De esta forma, los puntales menos solicitados son el primero (porque las tensiones son menores cuanto menor en la profundidad) y el cuarto (porque el terreno excavado tras su instalación es muy inferior que en el resto de casos). Los puntales que soportan los mayores esfuerzos son los centrales, aunque según los cálculos analíticos sean el segundo y el cuarto, porque no consideran el faseamiento constructivo.

Tabla 5- Comparativa Analítico- Cype. Momentos flectores máximos (linealmente).

	Cálculos Analíticos (kN*m/m)	Cálculos por Cype (kN*m/m)	Diferencia
Máximo positivo (kN*m)	2045	3028	48,08%
Máximo negativo (kN*m)	1126	2561	127,46%

En la Tabla 5 se puede observar que los momentos que calcula Cype son muy superiores a los obtenidos por medio de Ftool, independientemente de la distribución de los mismos, que de por sí es muy diferente. Esta diferencia tiene una explicación muy lógica, y es el hecho de los desplazamientos. Como ya se indicó anteriormente, Ftool supone unos apoyos fijos que no pueden sufrir desplazamientos en ningún momento y su efecto sobre la ley de momentos es muy considerable.

Se realizó la prueba de inducir los desplazamientos en los apoyos que proporciona Cype a la estructura de Ftool, y aunque no es representativo puesto que los desplazamientos son progresivos, se observó que el momento máximo de Ftool prácticamente doblaba de valor, por lo que es una muestra más de la necesidad de emplear métodos que consideran varias fases constructivas para este tipo de obras [4].

3. Conclusiones

De este estudio se pueden extraer dos consideraciones:

- Por un lado, que el modelo de Terzaghi-Peck, en cuanto al cálculo de esfuerzos de los terrenos es muy preciso, apto a nivel académico y como medio para llegar a un resultado real;
- Por otro lado, el realizar este tipo de estudio comparativo es un proceso que permite ver el increíble efecto que tiene el terreno sobre cualquier estructura, y hace necesario considerar siempre su evolución para poder prever su comportamiento y que no surjan imprevistos;
- Por último, señalar la eficacia de Cype en la resolución de elementos de contención, sin duda no sería posible ejecutar este tipo de obra sin programas o cálculos que consideren las diferentes fases en la ejecución de la obra.

Referencias

- [1] Terzaghi, K.; Peck, R.B. "Soil mechanics in engineering practice", Second edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1967.
- [2] Bjerrum, L.; Clausen, C.; Duncan, J., "Stability of flexible structures", proceedings of the 5th European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1972.
- [3] Cype, "Muros pantalla - Manual del usuario", Cype Ingenieros, S.A., 2014.
- [4] Rio, R. "Estructuras contención de la estación de metro Avenida Infante Dom Enrique, Proyecto final de ingeniería civil, Universidad de Burgos, 2014.