

CENTRO DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

III JORNADAS NACIONALES DE CIMENTACIONES

Madrid, 14 a 25 de Abril de 1.975

**PANTALLAS PARA EXCAVACIONES
PROFUNDAS**

Fernando MUZÁS LABAD

Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
 2. PROBLEMÁTICA GENERAL
 3. PROYECTO
 4. CÁLCULO DE PANTALLAS
 5. MOVIMIENTOS
 6. COMENTARIOS FINALES
- BIBLIOGRAFÍA

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la necesidad de aprovechar al máximo las disponibilidades del suelo urbano, principalmente en áreas congestionadas, viene obligando a efectuar excavaciones profundas tanto en obras de edificación como de ingeniería civil. Esta necesidad se agudizará en el futuro debido al crecimiento demográfico y económico, por lo que el tema que nos ocupa tiene, evidentemente, gran interés, no sólo técnico sino también económico y social.

Una solución, en cierto modo ya clásica, para resolver los problemas que plantean las excavaciones profundas, la constituyen las pantallas de hormigón armado, moldeadas "in situ" o prefabricadas, cuya ejecución puede justificarse por la dificultad de conseguir taludes estables, la presencia de edificios o estructuras próximas, o el tener que excavar por debajo del nivel freático.

Con todo, las obras de pantalla presentan problemas delicados y complejos que constituyen hoy día un amplio campo de investigación. Parece claro, pues, que la calidad de proyecto y ejecución de este tipo de obras demanda con urgencia la existencia de una normativa, bien entendido que ella sola no dará la calidad deseada, ya que esta se obtiene como resultado de un proceso en el que juega papel importante la contratación y en el que no están bien definidas las responsabilidades.

A nuestro juicio, la calidad de las obras de cimentación requiere una colaboración estrecha de numerosos especialistas y una conciencia colectiva que nos permitan llegar a definir las líneas correctas de actuación ante lo que la Sociedad espera y exige de nosotros.

2. PROBLEMÁTICA GENERAL

Creemos que para poder sentar las bases de una normativa y definir el tipo, alcance y contenido mas convenientes es preciso analizar, aunque sea brevemente, todo la problemática que plantea la ejecución de excavaciones profundas mediante la ayuda de pantallas.

Limitaremos nuestra exposición a contemplar exclusivamente el caso de pantallas construidas previamente a la excavación, a la cual han de servir de protección.

Estas pantallas pueden definirse como las paredes construidas mediante la perforación en el terreno de zanjas profundas y alargadas, sin necesidad de entibación, y el relleno posterior de hormigón o de elementos prefabricados, constituyendo una estructura prácticamente impermeable y capaz de resistir los empujes laterales del terreno e incluso cargas verticales que le puedan transmitir otros elementos estructurales.

Recordaremos, en primer lugar, el proceso constructivo de una obra de este tipo, que se resume en el cuadro siguiente:

PROCESO CONSTRUCTIVO DE UNA EXCAVACION PROTEGIDA CON UNA PANTALLA DE HORMIGÓN

1. EJECUCION DE LA PANTALLA

1.1 - HORMIGONADA "IN SITU"

a.- PERFORACIÓN

b.- COLOCACIÓN DE ARMADURAS

c.- HORMIGONADO

1.2 - PREFABRICADA

a.- PERFORACIÓN

b.- COLOCACIÓN DE LOS PANELES

2. VACIADO Y DISPOSICIÓN DE LOS ARRIOSTRAMIENTOS PROVISIONALES Y DEFINITIVOS

a.- MÉTODO

b.- FASES DE EJECUCIÓN

c.- CONTROL

No vamos a entrar en detalles sobre la tecnología de ejecución de la pantalla, suficientemente conocida.

En la pantalla hormigonada "in situ" las paredes de la perforación se mantienen estables gracias a la utilización de lodos bentoníticos, mientras que en las prefabricadas se utiliza un lodo autoendurecible a base de bentonita-cemento, que es el que posteriormente enlaza al terreno los elementos prefabricados.

Las pantallas se pueden clasificar en los siguientes tipos:

TIPOS DE PANTALLA DE HORMIGÓN

- 1. POR SU DISPOSICIÓN**
 - a.- CONTINUAS
 - b.- DISCONTINUAS
- 2. POR SU EJECUCIÓN**
 - a.- HORMIGONADAS "IN SITU"
 - b.- PREFABRICADAS
 - c.- MIXTAS
- 3. POR SU FUNCIONAMIENTO ESTRUCTURAL**
 - a.- EN VOLADIZO (SECCIÓN CONSTANTE O CON CONTRAFUERTE)
 - b.- ARRIOSTRADA (CON UNO O VARIOS APOYOS)

Aclaremos que la pantalla continua se define así, por su aspecto aparente, aunque como su ejecución se efectúa por paneles existen juntas de construcción entre ellos.

La pantalla discontinua es aquella que no cubre la totalidad del paramento de excavación futuro, por lo que solo puede aplicarse en terrenos algo coherentes y sin presencia de agua.

Denominamos pantalla en voladizo a la que constituye un elemento autoportante. Cuando los empujes son grandes o la altura de excavación es importante hay que proceder a arriostrarla.

Los tipos de arriostramiento se resumen en el cuadro adjunto que no requiere comentario alguno, salvo la distinción entre anclajes pasivos y activos, según exijan o no una deformación de la cabeza para entrar en funcionamiento.

TIPOS DE ARRIOSTRAMIENTO DE LAS PANTALLAS

1. PROVISIONALES

a.- TORNAPUNTAS Y APEOS PROVISIONALES O INCLINADOS

b.- BANQUETAS

c.- ANCLAJES ACTIVOS O PASIVOS

2. DEFINITIVOS

a.- ELEMENTOS DE LA PROPIA ESTRUCTURA (FORJADOS, VIGAS)

b.- ANCLAJES PROTEGIDOS CONTRA LA CORROSIÓN

La ejecución de las pantallas tiene algunas limitaciones que, en líneas generales, se recogen a continuación:

LIMITACIONES DE EJECUCION DE UNA PANTALLA DE HORMIGÓN.

1. PROXIMIDAD A EDIFICIOS MEDIANEROS

a.- DISTANCIA MÍNIMA 0.20 A 0,25 M NECESARIA PARA EL MURETE GUÍA

2. PLATAFORMA DE TRABAJO

a.- SENSIBLEMENTE HORIZONTAL

b.- ANCHURA SUFICIENTE PARA EL TRABAJO DE LA MAQUINARIA

c.- POR ENCIMA DEL NIVEL FREÁTICO (1,0 A 1,5 M)

c.- POR ENCIMA DE LAS CIMENTACIONES COLINDANTES

3. PROFUNDIDAD

a.- CARACTERÍSTICAS DE LA MAQUINARIA

b.- NATURALEZA DEL TERRENO)

El murete guía no solo tiene como misión servir de guía al útil de perforación, sino que colabora muy eficazmente en la estabilidad de las zanjas.

La plataforma de trabajo debe de estar por encima del nivel freático y de las cimentaciones (según su distancia), con objeto de conseguir una presión efectiva adecuada de los lodos de perforación.

La naturaleza del terreno impone limitaciones de ejecución de las pantallas, bien por dificultades de perforación o por la posibilidad de pérdida del lodo.

Un aspecto muy importante -por no decir el fundamental- en toda excavación cuando hay edificaciones próximas, es la repercusión que en ellas puede tener la obra.

Por ello, en cuanto a la forma de efectuar el vaciado y de disponer los arriostramientos provisionales y definitivos conviene advertir que, aunque los métodos son muy diversos, debe elegirse el más adecuado, mediante un compromiso entre la economía y los riesgos.

Cualquier obra de cimentación puede producir daños en las estructuras cercanas, debido a una serie de causas que pueden ser las siguientes:

POSIBLES CAUSAS DE DAÑOS EN ESTRUCTURAS CERCANAS.

- 1.- **DESCALCE DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES.**
- 2.- **MOVIMIENTOS DEL TERRENO DEBIDOS A EXCAVACIONES.**
- 3.- **REDUCCIÓN DE LA CAPACIDAD PORTANTE DEL TERRENO POR AUMENTO DE PRESIONES INTERSTICIALES.**
- 4.- **INCREMENTO DE ASIENTOS POR AUMENTO DE PRESIONES EFECTIVAS O COMPACTACIÓN.**
- 5.- **EROSIÓN DEL TERRENO.**
- 6.- **TRANSMISIÓN DE CARGAS.**
- 7.- **ARRASTRE POR ASIENTO DEL NUEVO EDIFICIO.**

Esos daños normalmente están provocados por alguna de las siguientes operaciones que, en general, se requieren para hacer la obra:

OPERACIONES QUE PUEDEN PRODUCIR DAÑOS EN ESTRUCTURAS CERCANAS

- 1.- EXCAVACIÓN
- 2.- MODIFICACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO
- 3.- TRANSMISIÓN DE VIBRACIONES

En una obra de pantalla pueden coincidir las dos primeras operaciones, que no deben efectuarse, cuando hay riesgo de daños, sin un cuidadoso estudio previo y un adecuado control.

Cualquier excavación tiene sobre el medio circundante un efecto que se ilustra en la Figura 1.

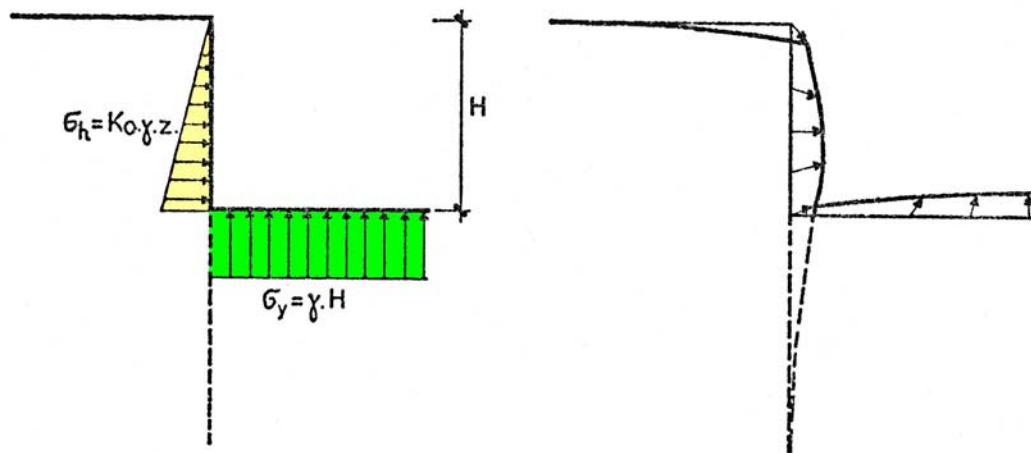


Fig. 1. Efecto de una excavación en un medio elástico

En una obra de pantalla el efecto de la excavación es análogo, provocando unos movimientos en el terreno, que se resumen en el cuadro siguiente:

MOVIMIENTOS INDUCIDOS POR LA EXCAVACIÓN

1. VERTICALES

- a.- **DESCENSO DEL TERRENO POR DETRÁS DE LA PANTALLA**
- b.- **ELEVACIÓN DEL FONDO DE LA EXCAVACIÓN**

2. HORIZONTALES

- a.- **DESPLAZAMIENTO DEL TERRENO HACIA LA EXCAVACIÓN POR ENCIMA Y POR DEBAJO DEL NIVEL EXCAVADO**

La modificación del nivel freático (normalmente rebajamiento del mismo) puede producir asentamientos por aumento de las presiones efectivas en el terreno o por erosión interna.

Los efectos de estas dos operaciones deben ser admisibles para los edificios y estructuras cercanas, salvo que no importe la producción de daños y su posterior reparación.

Como resumen de toda esta breve panorámica general, puede decirse que una misión importante de las pantallas es la de limitar los movimientos del terreno y, por tanto, las funciones que se les pueden encomendar son:

FUNCIONES DE UNA PANTALLA

- 1.- **CONTENER EL TERRENO**
- 2.- **LIMITAR LOS MOVIMIENTOS DEL TERRENO**
- 3.- **IMPERMEABILIZAR LA EXCAVACIÓN**
- 4.- **SOPORTAR CARGAS VERTICALES**

3 - PROYECTO

El proyecto de cualquier pantalla debe contemplar, además de los factores económicos, una serie de aspectos técnicos comunes a toda obra de cimentación, que, en líneas generales, se resumen a continuación:

ASPECTOS QUE DEBE CONTEMPLAR UN PROYECTO DE CIMENTACIÓN

- 1.- CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO.
- 2.- SOLICITACIONES.
- 3.- CONDICIONES DE LA CIMENTACIÓN.
- 4.- TIPOS DE SOLUCIÓN.
- 5.- MÉTODOS DE EJECUCIÓN.
- 6.- INFLUENCIA EN ESTRUCTURAS CERCANAS,
- 7.- ELECCIÓN DE LA SOLUCIÓN.
- 8.- COMPROBACIONES Y CONTROLES EN OBRA.

Deliberadamente se ha destacado, como punto 7, la **“elección de la solución”** para indicar que el acierto de ésta es consecuencia del correcto análisis y estudio de todos los aspectos anteriores. El punto 8, **“comprobaciones y controles en obra”**, no se refiere exclusivamente al clásico control de materiales y ejecución, sino que incluye una serie de previsiones, que conviene establecer en el proyecto, sobre la necesidad de comprobar en obra determinadas hipótesis y sobre el comportamiento que se espera de la cimentación.

El proyecto debe partir del conocimiento de una serie de datos básicos, que resumimos en el cuadro de la página siguiente.

Estos datos son necesarios para decidir, en primer lugar, sobre la necesidad de la construcción de la pantalla y, en caso necesario, sobre la elección del tipo más conveniente, su dimensionamiento y el sistema de sujeción y el proceso constructivo más adecuados.

El perfil estratigráfico, elaborado a partir de los cortes de los sondeos, debe extenderse fuera del solar al terreno que realmente va a empujar sobre la pantalla y donde, en caso necesario, habrá que efectuar los anclajes. Las características geotécnicas del terreno deben estar orientadas al método de cálculo que se vaya a utilizar.

DOCUMENTACIÓN BÁSICA PARA EL PROYECTO DE PANTALLAS

- 1. DEL TERRENO**
 - a.- **PERFIL ESTRATIGRÁFICO**
 - b.- **- CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LAS DISTINTAS CAPAS**
 - c.- **NIVELES FREÁTICOS**
 - d.- **- AGRESIVIDAD DEL AGUA Y DE LOS SUELOS**
- 2. DE LOS EDIFICIOS PRÓXIMOS**
 - a.- **ESTADO DE CONSERVACIÓN**
 - b.- **TIPO DE ESTRUCTURA**
 - c.- **SITUACIÓN TIPO Y CARGAS DE LAS CIMENTACIONES**
- 3. DE OBRAS SUBTERRÁNEAS PRÓXIMAS**
 - a.- **SITUACIÓN Y CARACTERÍSTICAS (CONDUCCIONES, POZOS, OBSTÁCULOS)**
 - b.- **CONDICIONANTES ESPECIALES)**
- 4. DE LA OBRA QUE SE PROYECTA**
 - a.- **PROFUNDIDAD DE EXCAVACIÓN**
 - b.- **ACCIONES DE LA ESTRUCTURA**
 - c.- **CONDICIONANTES CONSTRUCTIVOS Y FUNCIONALES**

La información sobre los edificios próximos es precisa, no sólo por los empujes que puedan transmitir, sino para definir de alguna manera los movimientos admisibles, cosa siempre difícil, pues desconocemos los que ya han sufrido.

Las condiciones generales que debe satisfacer la solución pantalla son análogas a las de cualquier obra de cimentación, y se resumen en el cuadro de la página siguiente.

La resistencia estructural está relacionada con los esfuerzos a que vaya a estar sometida la pantalla y las características del material. Conviene decir que en el caso de pantallas hormigonadas "in situ", no es aplicable plenamente la Instrucción de Hormigón, pues la técnica especial de hormigonado que se utiliza exige unas características del material fresco y una separación de armaduras incompatibles con dicha norma. Aclararemos que en la EH-73 se han introducido algunas cláusulas que dan entrada a los sistemas especiales de hormigonado, como es el caso de las pantallas.

CONDICIONES GENERALES DE UNA PANTALLA

1. **SITUACIÓN ADECUADA EN PLANTA Y ALZADO**
2. **RESISTENCIA ESTRUCTURAL.**
3. **SEGURIDAD FRENTE AL HUNDIMIENTO O ROTURA DEL TERRENO.**
4. **ASIENTOS Y MOVIMIENTOS DE LA PANTALLA COMPATIBLES CON LA PROPIA ESTRUCTURA.**
5. **MOVIMIENTOS DEL TERRENO CIRCUNDANTE ADMISIBLES PARA LAS EDIFICACIONES PRÓXIMAS.**

Para asegurar la estabilidad de la obra se debe efectuar una serie de comprobaciones, contemplando las situaciones pésimas durante las diversas fases de excavación o de la construcción del edificio. Estas comprobaciones son las siguientes:

COMPROBACIONES PARA EL PROYECTO Y LA EJECUCIÓN DE UNA PANTALLA

1. **ESTABILIDAD DE LAS ZANJAS DURANTE LA EJECUCIÓN DE LA PANTALLA.**
2. **ESTABILIDAD DE LA PANTALLA EN SÍ, FRENTE A EMPUJES Y CARGAS VERTICALES.**
3. **ESTABILIDAD DE LOS ELEMENTOS DE ARRIOSTRAMIENTO.**
4. **ESTABILIDAD DEL CONJUNTO,**
5. **ESTABILIDAD DEL FONDO DE LA EXCAVACIÓN POR ROTURA O SIFONAMIENTO**
6. **RIESGO DE DAÑOS EN LAS EDIFICACIONES PRÓXIMAS.**

La estabilidad de las zanjas durante la ejecución de la pantalla decidirá el peso específico del lodo de perforación, la altura sobre el nivel freático o sobre las cimentaciones colindantes y, fundamentalmente, el tamaño de los paneles a perforar.

A continuación trataremos con más detalle del cálculo de la pantalla en sí frente a los empujes que le pueda transmitir el terreno, y del que se obtiene un primer dimensionamiento; pero antes comentaremos brevemente el resto de las comprobaciones de estabilidad, aunque cronológicamente sean posteriores.

El estudio de la pantalla frente a posibles cargas verticales es análogo al de una cimentación profunda mediante pilotes, con las diferencias propias que se derivan de su configuración.

La estabilidad del fondo de la excavación puede exigir mayores profundidades de empotramiento de la pantalla en el terreno, que las requeridas para la estabilidad propia de la pantalla.

Análogamente, esta profundidad de empotramiento puede verse aumentada por exigencias de la estabilidad del conjunto, principalmente en suelos arcillosos en los que, como sabemos, a corto plazo el círculo péximo de deslizamiento es profundo. Por otro lado, cuando se utilizan anclajes como sistema de arriostramiento, la estabilidad del conjunto define la situación correcta de los bulbos o zonas de anclaje en el terreno, que deben estar más allá de todas las posibles curvas de deslizamiento, cuyo coeficiente de seguridad sea igual o menor que el estipulado.

4 - CÁLCULO DE PANTALLAS

Los métodos para el cálculo de pantallas se pueden resumir en los siguientes tipos:

MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE PANTALLAS

- 1.- DE ESTADO LÍMITE**
- 2.- SEMI - EMPÍRICOS**
- 3.- DE TENSION - DEFORMACIÓN**

Los primeros son los que contemplan una situación en la que el terreno ha alcanzado su estado límite de resistencia alejándonos de dicha situación mediante adecuados coeficientes de seguridad. De este tipo son el método de BLUM (1931) y de BRINCH HANSEN (1953).

El segundo tipo podríamos decir que es análogo al anterior, pero con modificaciones basadas en ensayos en modelo (TSCHEBOTARIOFF 1949, ROWE 1952), ensayos a gran escala o en la experiencia práctica (Normas Danesas 1937, TERZAGHI y PECK 1948, 1967, 1972).

Los métodos del tercer tipo se diferencian de los anteriores en que tienen en cuenta la deformación del terreno en la determinación de los empujes sobre la pantalla. Entre estos métodos cabe distinguir unos que estudian la pantalla como viga flotante sobre apoyos elásticos o elasto-plásticos (RIFAAT 1935, BRETTING 1948, TURABI y BALLA 1968, HALLIBURTON 1968, CASTILLO RON 1973) y los más modernos por elementos finitos que permiten analizar el problema con toda generalidad, aunque con las dificultades propias de representar la naturaleza mediante un modelo matemático.

Si bien estos últimos métodos son, en principio, más perfectos y, sobre todo, permiten cuantificar los movimientos de la pantalla, las dificultades prácticas de aplicación general, hacen que se sigan utilizando los primeros que, por otro lado, están suficientemente sancionados por la práctica.

En los métodos de estado límite se supone que, al efectuar la excavación, el terreno que inicialmente se encontraba en un estado de empuje al reposo pasa a los estados límites de empuje activo o pasivo, según sea el sentido del movimiento. Para ello se requieren unas deformaciones que pueden ser del orden del 2 al 5 ‰ para llegar al empuje activo y del 2% o más para llegar a movilizar el empuje pasivo. Hagamos lo observación de que la situación de empuje activo se alcanza con relativa facilidad en el caso de pantallas de hormigón, ya que la perforación de los paneles permite un movimiento del terreno constatado en la realidad (DIBIAGIO, 1972).

Estos diferentes empujes, para el caso habitual de terreno horizontal, se resumen en la tabla siguiente:

1.- AL REPOSO

$$e_o = \gamma h K_o$$

$$K_o = 1 - \text{SEN } \varphi' \quad (\text{JAKI SUELOS NORMALMENTE CONSOLIDADOS})$$

2.- ACTIVO

$$e_a = (\gamma h + q) K_a - c \cdot A$$

$$K_a = \frac{1 - \text{SEN } \varphi}{1 + \text{SEN } \varphi} \quad (\text{RANKINE } \delta = 0)$$

$$A = (1 - K_a) : \text{TG } \varphi$$

3.- PASIVO

$$e_p = (\gamma h + q) K_p + c \cdot A'$$

$$K_p = \frac{1 + \text{SEN } \varphi}{1 - \text{SEN } \varphi} \quad (\text{RANKINE } \delta = 0)$$

$$A' = (K_p - 1) : \text{TG } \varphi$$

$$e_p = \gamma h K_p^y + q K_p^q + c \cdot A'$$

$$(\text{CAQUOT } -\frac{2}{3} \varphi \leq \delta \leq 0)$$

Es habitual tomar como coeficiente de empuje activo el de RANKINE, que supone rozamiento nulo entre pantalla y terreno ($\delta = 0$) por haber pocas diferencias y quedar del lado de la seguridad.

En cuanto al empuje pasivo, el considerar nulo dicho rozamiento queda también del lado de la seguridad al obtenerse coeficientes de empuje menores; pero bien es verdad que, en la práctica, se moviliza el rozamiento entre pantalla y terreno como

consecuencia del descenso de la primera y la elevación del fondo de la excavación. Esta movilización es mayor cuanto menor es la rigidez de la pantalla.

La formula de CAQUOT y KERISEL tiene una estructura análoga a la que se utiliza para determinar la carga de hundimiento en cimentaciones superficiales. Como ángulo de rozamiento (δ) entre terreno y pantalla es usual tomar valores comprendidos entre 0 y $-2/3 \varphi$. Para superficie de terreno horizontal, el coeficiente de empuje horizontal, debido a la acción de una sobrecarga q , viene dado por la expresión;

$$K_p^q = \cos \delta \frac{\cos \delta + \operatorname{sen} \varphi \cdot \cos \lambda}{1 - \operatorname{sen} \varphi} e^{-(\lambda + \delta) \operatorname{tg} \varphi}$$

siendo:

$$\lambda = \operatorname{arc} \operatorname{sen} \left(\frac{\operatorname{sen} \delta}{\operatorname{sen} \varphi} \right) \quad (\lambda \leq 0, \text{ pues } \delta \leq 0)$$

El coeficiente de empuje debido a la cohesión vale:

$$A' = \frac{K_p^q - 1}{\operatorname{tg} \varphi}$$

Finalmente, el coeficiente de empuje horizontal debido al peso del terreno fue obtenido mediante cálculos en ordenador, pero puede determinarse mediante la expresión:

$$K_p^\gamma = K_p^q \cdot e^{-\frac{\delta}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi}$$

a la que hemos llegado buscando una formula suficientemente aproximada y que da resultados muy concordantes.

Algunos autores admiten que el empuje pasivo puede alcanzar valores iguales a dos veces el de RANKINE, al que luego se le aplican un coeficiente de seguridad comprendido entre 1 y 2, volviendo en este ultimo caso al empuje de RANKINE.

La influencia de la cohesión se traduce en una disminución de los empujes activos y aumento de los pasivos, por lo que, caso de tenerse en cuenta, debe ser con adecuados coeficientes reductores. En los empujes activos, por otra parte, debe considerarse como sobrecarga el espesor de terreno, en el que aparecerían empujes negativos.

Además de los empujes del terreno o de las sobrecargas uniformemente repartidas (recogidas en la tabla anterior) deben considerarse los empujes del agua de acuerdo a leyes análogas a las de la figura 2, según que haya o no circulación de agua (en este caso, se ha supuesto que no hay circulación por encima del nivel de excavación). En la práctica es más frecuente utilizar el primer esquema, que queda del lado de la seguridad.

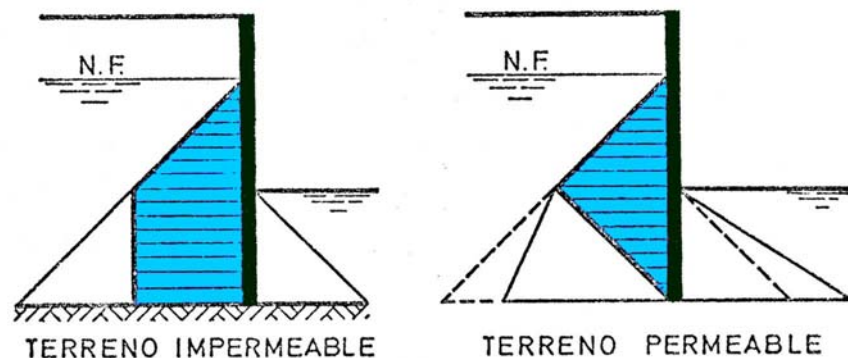


Fig.2. Empuje del agua en pantallas

La influencia de las cimentaciones próximas puede tenerse en cuenta según la teoría de BOUSSINESQ o con leyes reducidas de las teorías de empuje sobre muros, tal como se indica en la figura 3.

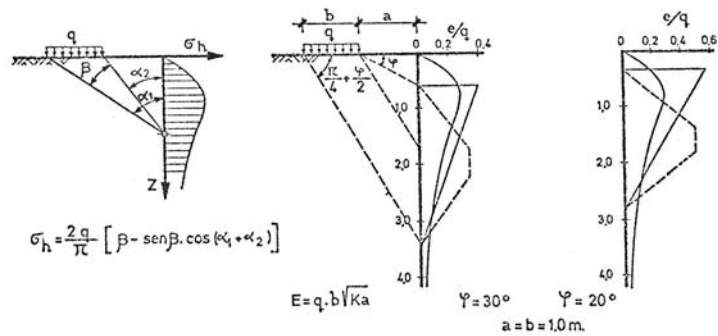


Fig. 3. Carga en faja

La teoría de BOUSSINESQ parece confirmada en la práctica (REHNMAN y BROMS, 1972 y CHENG e ISEUX, 1972), pero conviene observar las diferencias notables con los otros métodos en cuanto a empuje total y en cuanto a distribución de empujes, cuando el ángulo de rozamiento es bajo. La recomendación que admite una ley triangular está del lado de la seguridad cuando se estudia la estabilidad general, por quedar la resultante más alta; pero no puede decirse lo mismo respecto a los esfuerzos en la pantalla que dependerán de la posición de los apoyos.

4.1 Pantalla en voladizo

El cálculo de una pantalla en voladizo se efectúa por el método de BLUM, que se esquematiza en la figura 4.

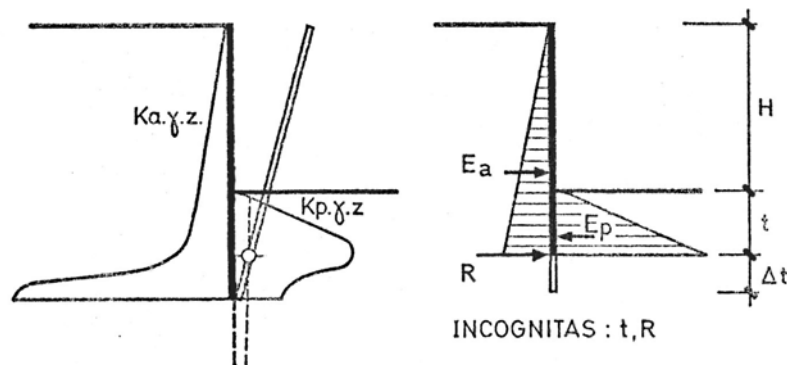


Fig. 4. Pantalla en voladizo

Para que pueda existir equilibrio entre los empujes a ambos lados de la pantalla, es preciso, que se produzca un giro de la misma alrededor de un punto profundo y aparezcan unos empujes en la zona inferior del trasdós de la pantalla, representados por la fuerza (**R**).

Las incógnitas en el método de BLUM son la fuerza (**R**) y la profundidad de empotramiento (**t**), que luego se aumenta en la práctica con un valor (Δt) igual o superior a 0,2 t.

En la figura 5 se recoge, en primer lugar, un resultado del cálculo efectuado por el método de BLUM. Se observa que el mayor esfuerzo cortante se obtiene en la base de la pantalla con un valor igual a la fuerza (**R**). Como no es conveniente disponer armaduras para absorber el esfuerzo cortante, y en el caso de pantallas en voladizo dicho esfuerzo puede determinar el espesor de la pantalla, se han incluido dos casos de pantalla más larga para ver qué influencia tiene dicha prolongación. El cálculo se ha hecho por un método de viga flotante, de forma que únicamente se movilice el empuje pasivo hasta la profundidad del momento máximo o hasta la de empuje nulo. Se observa que mientras el momento flector máximo prácticamente no varía, el esfuerzo cortante máximo aproximadamente se reduce a la mitad, con una prolongación de la pantalla del orden de 0,2 t.

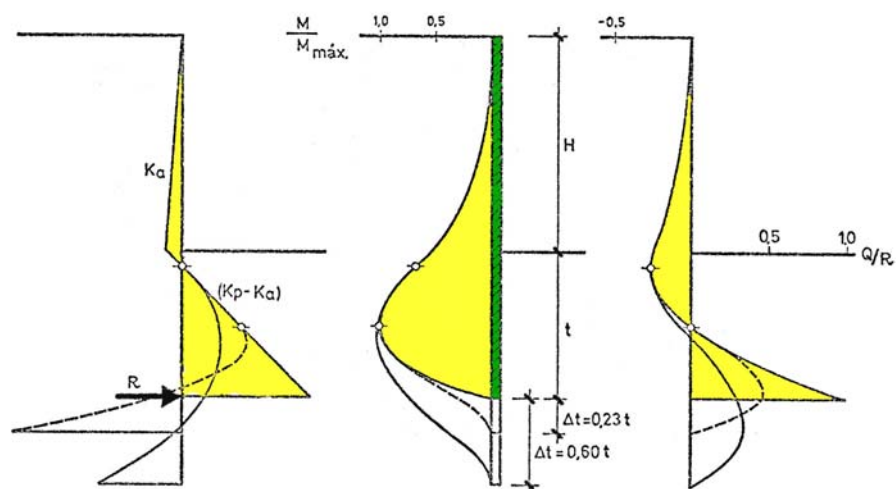


Fig. 5. Empujes, Momentos Flectores y Esfuerzos Cortantes

El cálculo puede resultar más claro mediante la teoría de BRINCH HANSEN, según la cual los empujes totales y su punto de aplicación dependen del punto de giro de la pantalla. Las leyes de empujes se esquematizan en la figura 6, en la que se aprecia cómo se pasa del empuje activo al pasivo al moverse el centro de giro de la pantalla y cómo los puntos de aplicación de la resultante descienden o ascienden según el sentido del giro.

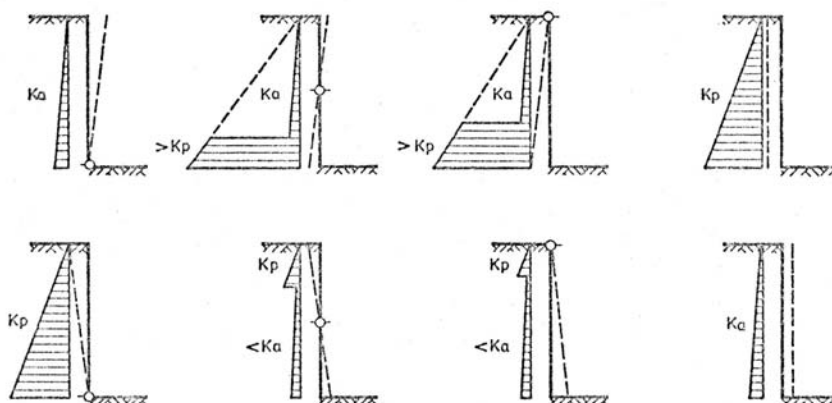


Fig. 6. Esquema de empujes de tierras según Brinch Hansen

De acuerdo con esta teoría, el cálculo de una pantalla en voladizo (figura 7) se reduce a determinar la profundidad de empotramiento (t) y la altura del punto de giro (x) mediante el planteamiento de las ecuaciones de equilibrio.

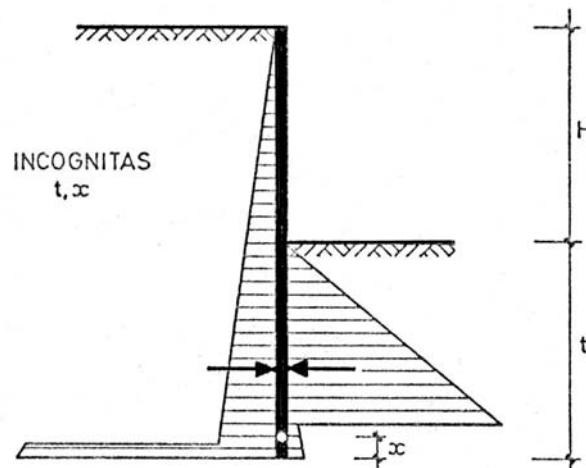


Fig. 7. Pantalla en voladizo según Brinch Hansen

Habría que discutir unos criterios para adoptar los coeficientes de seguridad. El incremento de la profundidad de empotramiento ya supone un determinado coeficiente general. Por otro lado, la disminución de los parámetros resistentes y la reducción de los empujes pasivos conducen a mayores longitudes de empotramiento, pero también a mayores momentos flectores que luego no se van a dar en la realidad. Por ello, esta discusión de criterios debe contemplar también los coeficientes de mayoración de cargas a utilizar para determinar las armaduras de flexión.

Conviene indicar, finalmente, que el aumento de la profundidad de empotramiento, así como de la rigidez de la pantalla reducen los movimientos de la misma tal como se refleja en la figura 8. Por ello, si hay interés en reducir los movimientos, la solución es adoptar pantallas de gran espesor, o incluso con contrafuertes, y con longitudes de empotramiento mayores que las estrictamente necesarias. Puede pensarse para ello en utilizar empujes mayores que los activos.

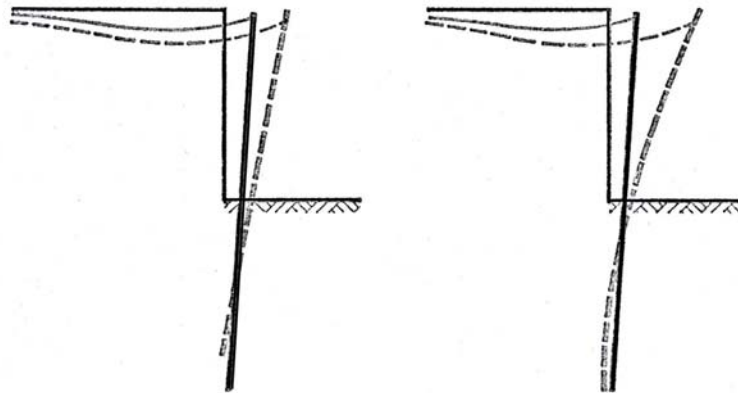


Fig. 8. Influencia de la longitud y rigidez de la pantalla

4.2 Pantalla con un apoyo

La pantalla arriostrada resulta más económica por disminuir la longitud necesaria de empotramiento y los esfuerzos en la misma; pero además es más conveniente cuando hay edificaciones próximas, pues experimenta, en general, menores movimientos.

Para el cálculo de pantallas con un apoyo existen dos métodos clásicos denominados de "**soporte libre**" y de "**soporte empotrado**".

El primero de ellos (figura 9) está estáticamente determinado, ya que tiene dos incógnitas - la profundidad de empotramiento (**t**) y la reacción en el apoyo (**F**) - y disponemos de dos ecuaciones de equilibrio - sumas de fuerzas horizontales y de momentos iguales a cero -.

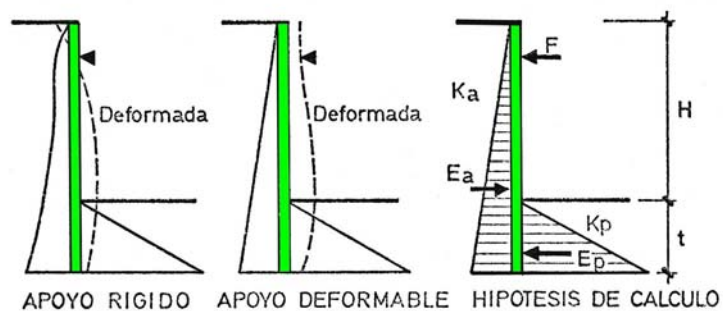


Fig. 9. Pantalla con un apoyo. Método de soporte libre

El segundo método, en la forma de aplicación indicada en la figura 10, se basa en la comprobación experimental de que el momento flector es nulo, aproximadamente, donde se equilibran los empujes (punto de empuje nulo). En este caso aparece una incógnita más, la fuerza (**R**) en la base de la pantalla, pero tenemos como condición adicional la anulación del momento en el punto A.

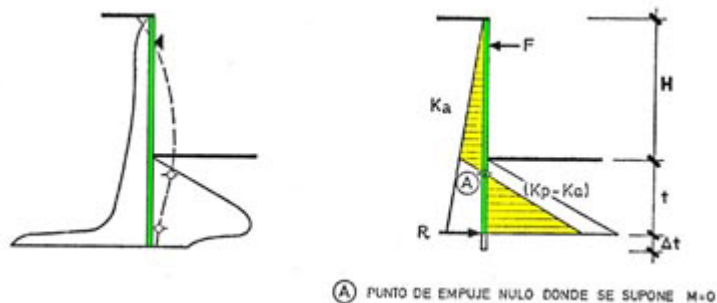


Fig. 10. Pantalla con un apoyo. Método de soporte empotrado

La diferencia entre ambos métodos consiste en que con el segundo se obtiene mayor profundidad de empotramiento, menor reacción en el apoyo y menor momento flector máximo. En realidad, no puede hablarse de dos métodos distintos de cálculo, sino de distintas situaciones, ya que, en principio, el cálculo es análogo al de la pantalla en voladizo si partimos como dato de cualquier reacción en el apoyo. Las situaciones extremas son el voladizo (reacción F nula en el apoyo) y la pantalla con soporte libre (fuerza R nula en la base de la pantalla). Cada una de estas situaciones exigirá un

determinado movimiento del apoyo para que de verdad actúen los empujes activos. En otro caso, los empujes serán mayores en la proximidad del apoyo, tal como se ha indicado en las figuras 9 y 10.

En la práctica, es difícil conseguir una situación correspondiente al método de **"soporte libre"**, ya que el incremento de la profundidad de empotramiento que se toma como coeficiente de seguridad nos aproxima a la situación de **"soporte empotrado"**. El aumento progresivo de dicha profundidad de empotramiento conduce con la teoría de BRINCH HANSEN a esquemas distintos de calculo, tal como se indican en la figura 11, en la que los círculos representan puntos de giro equivalentes a rotulas plásticas coincidentes con los puntos de momento flector máximo.

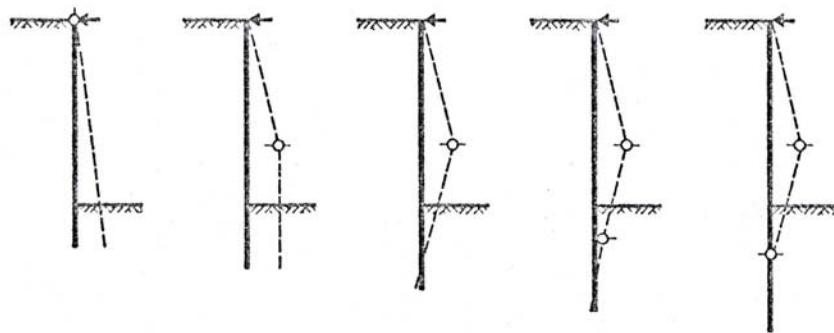


Fig. 11. Esquemas de movimiento de una pantalla apoyada según Brinch Hansen

La teoría de BRINCH HANSEN tiene en cuenta el hecho de que en la parte superior de la pantalla los empujes superan los valores activos. Además, la flexibilidad de la pantalla influye en el valor del empuje pasivo que aparece en la zona de la excavación, pues en función de ella se moviliza en mayor o menor grado el rozamiento entre ella y el terreno.

Este problema de la pared con un apoyo ha sido estudiado desde hace muchos años experimentalmente, primero por TSCHEBOTARIOFF en 1948, y luego por ROWE en 1952. Está comprobado que si el apoyo cede lo suficiente se da la ley triangular de empujes activos en el trasdós de la pantalla. Si no ocurre así, existe un efecto arco y

una redistribución de empujes que es responsable de una reducción de momentos en relación con los resultados del método de **"soporte libre"**.

Según ROWE existen tres fuentes reductoras de momentos:

1. Aumento de empujes por debajo del nivel de excavación que produce un momento de empotramiento de la pantalla.
2. Aumento de empujes por encima del apoyo que produce un momento mayor en dicho punto que con la ley de empujes activos.
3. Reducción de empujes en el resto, con lo que se reduce también el momento flector máximo.

De estos tres factores reductores de los momentos obtenidos por el método de **"soporte libre"** el primero es el más confiable, ya que si cede el apoyo desaparece el efecto de los otros dos. La reducción es tanto mayor cuanto más flexible es la pantalla, pues se favorece la aparición del efecto arco.

Modernamente, diversos autores han desarrollado programas para ordenador que permiten calcular las tensiones y deformaciones en la interacción terreno-pantalla flexible, pero no se han concretado, como sería de desear, en recomendaciones prácticas sobre la ley de empujes que conviene adoptar.

A título de ejemplo presentarnos en la figura 12 un caso sencillo de cálculo efectuado por los dos métodos expuestos y ley triangular de empujes (curvas 1 y 2) y por el método de **"soporte empotrado"**, pero con una ley de empujes análoga a la recomendada por TERZAGHI y PECK para entibaciones arriostradas (curva 3).

Se observa que la ley empírica de empujes da, lógicamente, mayores reacciones en el apoyo y mayores momentos mientras el apoyo está alto, pero no serviría para apoyos relativamente bajos.

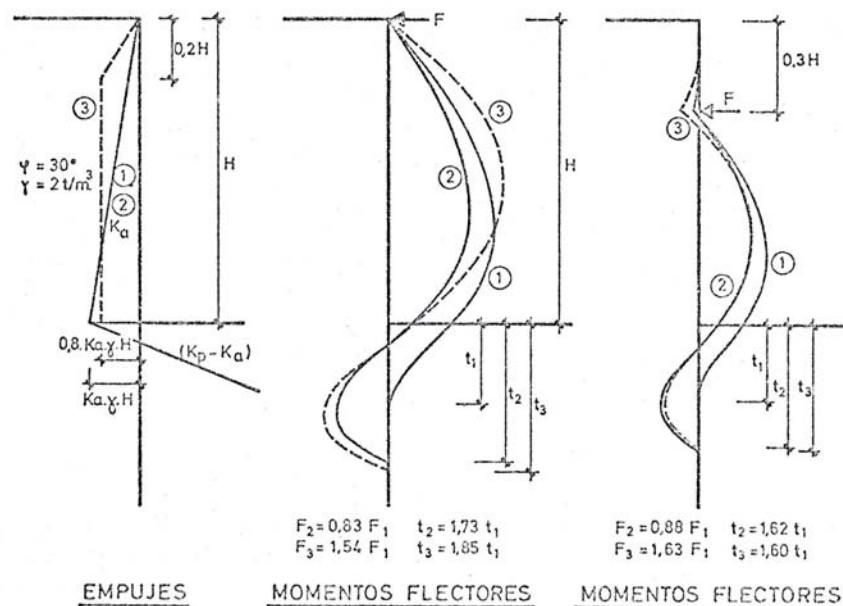


Fig. 12. Comparación de algunos métodos de cálculo

A efectos prácticos, y con objeto de conseguir menores movimientos de la pantalla, quizá fuera recomendable efectuar el cálculo por el método de **"soporte empotrado"**, mayorando mediante coeficientes elevados la reacción y el momento flector en el apoyo.

Punto especial de meditación, en este caso sencillo de pantalla con un apoyo, lo constituye la influencia de las cimentaciones próximas, según la ley que se adopte para los empujes. Cuanto más alta quede la resultante es evidente que estamos del lado de la seguridad en cuanto a la determinación de la profundidad de empotramiento; pero no puede decirse lo mismo en cuanto a los momentos flectores que dependerán de la posición relativa entre esa resultante y el punto de apoyo de la pantalla.

4.3 Pantalla con varios apoyos

En este caso el problema se encuentra estáticamente indeterminado y se complica, además, al no desarrollarse exactamente las leyes teóricas de empuje que dependen de los movimientos absolutos y relativos de los apoyos. Todo ello está influenciado fundamentalmente por el proceso constructivo de excavación y colocación de arriostramientos, proceso que no puede evitar el movimiento del terreno.

Resulta, pues, muy difícil dar normas empíricas sobre el método de cálculo. En la figura 13 se resumen algunas recomendaciones de empujes efectivos del terreno sobre entibaciones arriostradas.

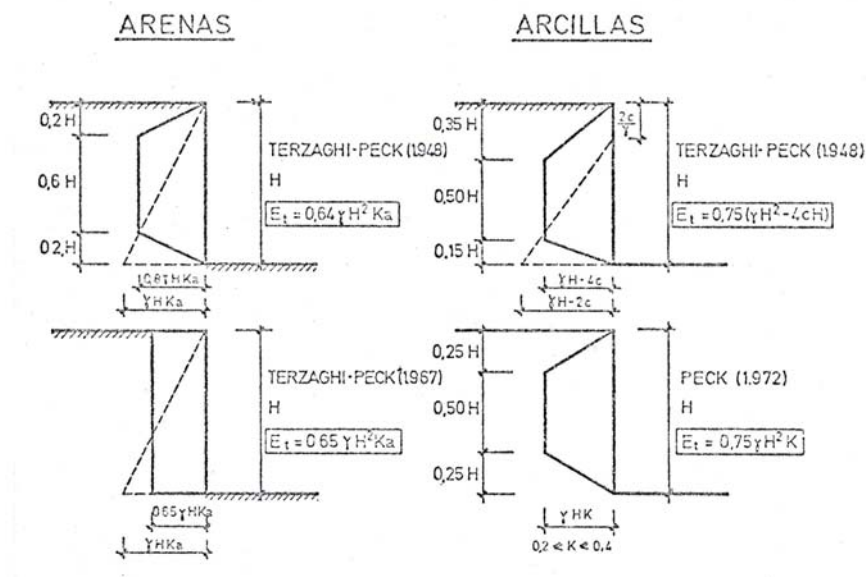


Fig. 13. Empujes sobre entibaciones

Obsérvese que, en arenas, las recomendaciones suponen un aumento del 30% sobre el empuje activo total, En arcillas, puede verse también que en la última recomendación de PECK (1972) no interviene la cohesión.

Es frecuente realizar una comprobación de la pantalla como viga continua, lo que supone que existe alineación de los apoyos. Si estos fueran muy flexibles y

mantuvieran la carga constante, podría casi afirmarse que la pantalla se deformaría hasta que el terreno empujara con la ley supuesta en el cálculo.

Durante el proceso constructivo los desplazamientos que se van produciendo hacen que la pantalla adopte una deformada general, que, desde la excavación, resulta cóncava en la zona superior y convexa en la inferior, deformada influenciada en gran manera por el movimiento que el terreno pueda experimentar por de bajo del nivel de excavación. Los empujes se ajustarán a esa deformada de tipo general.

Según BJERRUM (1972) el empuje total resulta análogo al de RANKINE y su distribución se aleja más o menos de la triangular, según sean mayores o menores los movimientos que se producen por debajo del plano de excavación.

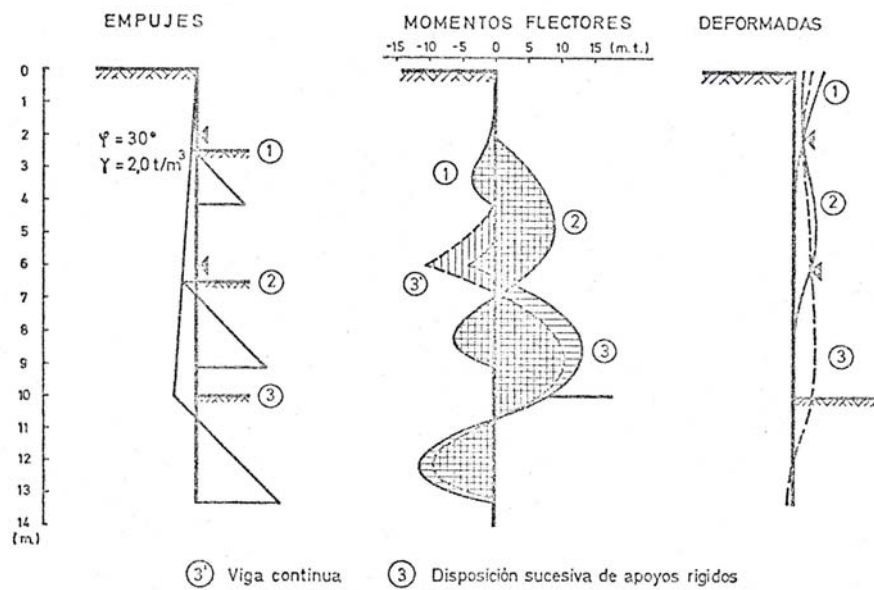


Fig. 14. Pantalla con dos apoyos

A título de ejemplo, en la figura 14, y partiendo por comodidad de una ley triangular de empujes, se comparan unos resultados de cálculo obtenidos como viga continua con otros modificados, teniendo en cuenta los momentos flectores producidos en las fases previas de excavación y suponiendo que los apoyos dispuestos sucesivamente fueran

rígidos, es decir, no permitieran movimientos al tomar la carga. Se observa cómo aumentan las tracciones del lado de la excavación y disminuyen del lado terreno.

Aunque la bibliografía es muy extensa, para ilustrar el comportamiento de pantallas con varios apoyos, hemos creído oportuno comentar dos trabajos aparecidos recientemente.

En el primero de ellos (HANNA y KURDI, 1974) se resumen los resultados de unos ensayos efectuados en modelo con suelos arenosos.

Inicialmente, HANNA y colaboradores estudiaron las pantallas rígidas ancladas, y últimamente se han ocupado de las pantallas flexibles, delimitando las variables que controlan su comportamiento.

Entre sus conclusiones queremos destacar:

- Los movimientos aumentan rápidamente con la profundidad de excavación y son mayores cuanto más flexible es la pantalla y más inclinados se disponen los anclajes.
- La subsidencia estuvo de acuerdo con el movimiento lateral de la pared, extendiéndose hasta una distancia igual a 2 H.
- El uso de una ley de empujes rectangular parece razonable. - Los empujes debidos al movimiento de la pared se redistribuyen por efecto arco y se concentran cerca de los niveles de anclaje, tanto más cuanto más flexible es la pantalla.
- Los momentos decrecen, por tanto, con la flexibilidad de la pared.

El segundo trabajo debido a WAYNE CLOUGH y YUET TSUI (1974) recoge unos estudios realizados por elementos finitos sobre el comportamiento de pantallas en arcillas y a corto plazo ($\varphi = 0$).

Han analizado pantallas arriostradas con anclajes o con puntales, haciendo variar la rigidez de todos los elementos. Del estudio se deduce que, aunque el funcionamiento

de los puntales es mejor que el de los anclajes (para una misma rigidez), ya que el movimiento viene influenciado por el que experimentan los bulbos, el uso de anclajes tiene la ventaja de que se pueden dar esfuerzos de pretensado.

En el estudio se han aplicado esfuerzos de este tipo, según leyes análogas a las de PECK (1972), y que se recogen en la figura 15.

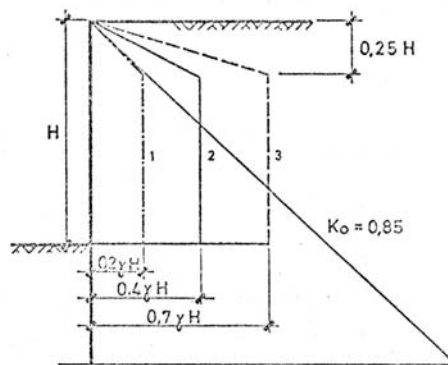


Fig. 15. Diagramas de pretensado en arcillas (Wayne Clough-Yuet Tsui-1.974)

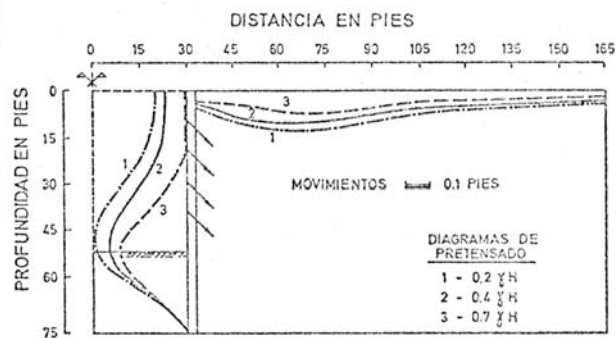
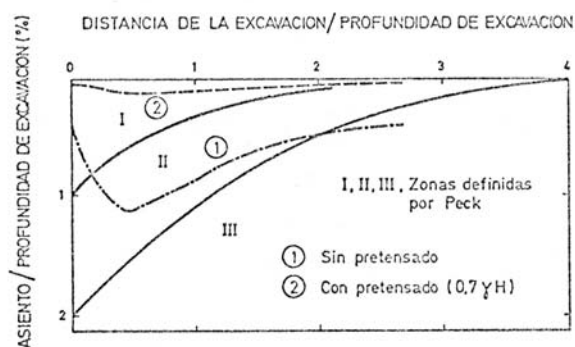


Fig. 16. Efectos del pretensado (Wayne Clough -Yuet Tsui - 1.974)

En la figura 16 se aprecia cómo el esfuerzo de pretensado reduce los movimientos de la pantalla y la subsidencia del terreno. Puede observarse también el aspecto general de lo deformada indicado anteriormente, cóncavo en la parte superior y convexo en la inferior respecto a la excavación.

En la figura 17 se recoge la diferencia entre los asientos experimentados por el terreno con y sin esfuerzo de pretensado. Las zonas I, II y III separadas por las curvas de línea llena fueron definidas por PECK, según el tipo de terreno, y se comentan más adelante.



**Fig. 17. Asientos por detrás de la pantalla
(Wayne Clough-Yuet Tsu1 -1.974)**

Finalmente, en la figura 18 puede verse cómo la distribución de empujes, para un mismo esfuerzo de pretensado, varía con la rigidez de la pantalla o con el número y la separación entre anclajes. En dicha figura las curvas de trazos corresponden a una pantalla más flexible, y puede verse cómo en éste caso la concentración de empujes en los niveles de apoyo es mayor, y, por tanto, disminuirán los momentos flectores.

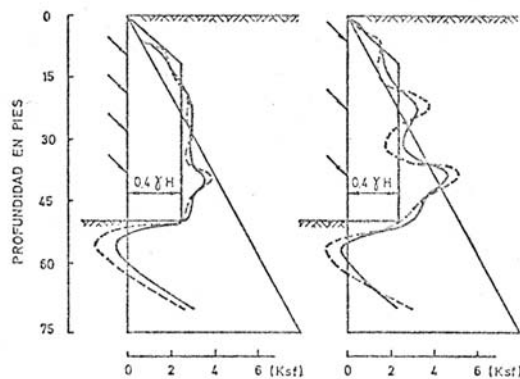


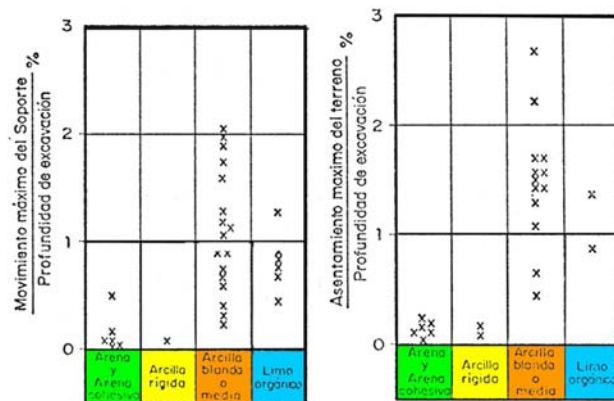
Fig. 18. Presiones según rigidez de la pantalla y disposición de anclajes (Wayne Clough – Yuet-Tsui – 1.974)

5 - MOVIMIENTOS

El análisis de los movimientos de una pantalla y del terreno circundante es un problema que únicamente puede abordarse en ordenador mediante cálculos de difícil acceso en general y que únicamente se justifican en casos excepcionales.

Es de esperar que, basándose en dichos cálculos y en la experiencia, vayan surgiendo recomendaciones empíricas que garanticen un razonable riesgo de daños en las edificaciones próximas.

En la figura 19 se presenta la recopilación efectuada por PECK y D'APPOLONIA de observaciones llevadas a cabo en obras con diversos tipos de suelo. La correlación entre asentamientos máximos del terreno y desplazamientos máximos de la pantalla es notable.

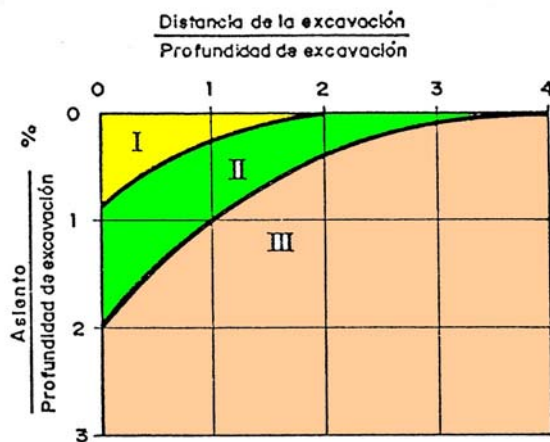


— Distribución de la frecuencia de los movimientos máximos del suelo, causados por excavación entibada con puntales metálicos y tableros o tablestacas.

Fig. 19. Recopilación de Peck y D'Appolonia

En arenas, los movimientos máximos son del orden del 1 al 2 ‰ de la altura de excavación, mientras que en arcillas pueden llegar, e incluso rebasar, el 2%, según las características del suelo.

En la figura 20 se recogen las curvas de pronóstico de asientos debidas a PECK para excavaciones en arcillas, que ya hemos visto anteriormente en la figura 17. La subsidencia se puede extender a distancias del orden de 2 a 4 veces la profundidad de excavación.



ZONA I

Arcilla blanda a dura.
Mano de obra promedio.

ZONA II

a) Arcilla muy blanda a blanda.

- 1) Profundidad limitada de arcilla, debajo del fondo de la excavación.
- 2) Profundidad considerable de arcilla debajo del fondo de la excavación.

b) Asentamientos son afectados por dificultades en la construcción.

ZONA III

Arcilla muy blanda a blanda a profundidad considerable, debajo del fondo de la excavación.

— Asentamientos adyacentes a excavaciones a cielo abierto en arcillas.

Fig. 20. Pronósticos de asentamientos formulados por Peck

En la figura 21 se recogen, asimismo, las recomendaciones de PECK sobre asentamientos admisibles para los edificios próximos.

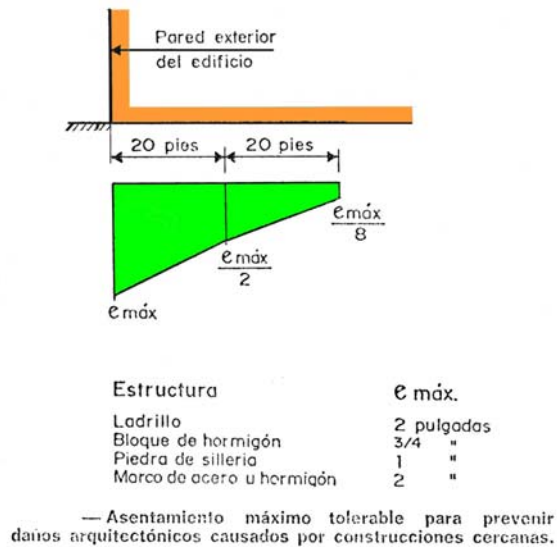


Fig. 21.- Recomendaciones de Peck sobre asentamientos admisibles

Para terminar, recordaremos que en los movimientos influyen numerosos factores que conviene analizar con detalle, dado que mediante su control se puede tratar de reducir al máximo el riesgo de que se produzcan daños. Estos factores pueden ser:

FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS MOVIMIENTOS DE UNA PANTALLA Y DEL TERRENO CIRCUNDANTE

1. CONFIGURACION Y DIMENSIONES DE LA EXCAVACIÓN.
2. CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO.
3. MODIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL AGUA SUBTERRÁNEA.
4. CONFIGURACIÓN Y RIGIDEZ DEL CONJUNTO PANTALLA - SISTEMA DE ARRIOSTRAMIENTO
5. SECUENCIA CONSTRUCTIVA,
6. CONDICIONES LOCALES (SOBRECARGAS Y EDIFICIOS PROXIMOS).
7. PLAZO DE EJECUCIÓN, PARTICULARMENTE EL TIEMPO TRANSCURRIDO PARA LA INSTALACIÓN DE LOS APOYOS DEFINITIVOS. □

Es evidente que todo lo que sea aumentar la rigidez del conjunto se traducirá en menores movimientos. A veces se tiende a efectuar los cálculos con empujes mayores que los activos, pensando que de esta forma se van a obtener menores deformaciones; pero conviene advertir que para ello es preciso que el método de ejecución garantice las hipótesis de partida. En nuestra opinión, la secuencia constructiva, y particularmente el tiempo transcurrido para la instalación de los apoyos definitivos (que quizá convendría pretensar), es fundamental en la disminución de movimientos, y, por tanto, en el riesgo de que se produzcan daños en las edificaciones y estructuras próximas.

6 - COMENTARIOS FINALES

Con esta exposición; necesariamente incompleta, hemos tratado de presentar las dificultades que entraña el proyecto y la ejecución de una obra de pantalla, en general comunes a toda obra de cimentación urbana. De esas dificultades y de la calidad que la sociedad exige, y nosotros debemos conseguir como técnicos responsables, creo se desprende la importancia de regular los diferentes aspectos.

No podemos ignorar las limitaciones que se derivan del estado de nuestros conocimientos técnicos, a pesar del avance experimentado en los últimos años. Existen numerosos puntos que hay que discutir y orientar, en cuya labor todos debemos colaborar.

Podrá extrañar que no hayamos hecho referencia a la Normativa que actualmente se encuentra en fase de redacción, y en cuya elaboración participamos hace tiempo. Creemos que la orientación que entonces se le dio, como catálogo de modelos más o menos elaborados, no responde a lo que el país necesita y dudamos que actúe a favor de la calidad. Por otro lado, con esa orientación, el campo de aplicación de la norma ha de resultar prácticamente nulo, pues se comprende que ante las numerosas

variables que intervienen en una obra de este tipo resulta extremadamente difícil establecer modelos de aplicación general. Únicamente se pueden contemplar casos tan sencillos que no se van a dar en la realidad, pues la naturaleza y las condiciones particulares de cada caso serán siempre bastante más complejas.

Consideramos que es urgente la elaboración de una normativa de tipo general que abarque todo el proceso del proyecto y la ejecución de las obras, con una concepción dinámica para que pueda adaptarse con facilidad a la evolución y progreso de la técnica. Es una labor difícil que no puede improvisarse. Por ello, y la experiencia internacional así lo indica, resulta práctico comenzar por definir las hipótesis básicas y los aspectos fundamentales que hay que contemplar y estudiar en cada fase para ir enriqueciendo y completando las normas poco a poco, con recomendaciones sobre métodos de cálculo de comprobación y de control.

Con ello no debe pensarse que vaya a quedar despejado el camino que conduce a la calidad. Es preciso, además, delimitar responsabilidades y regular actuaciones que se escapan del ámbito de una normativa. Entre estas actuaciones, de no poca importancia, se encuentran las fases de adjudicación y de contratación de las obras con una situación actual tan grave que, en ciertos casos, y por una economía mal entendida, se está jugando con los coeficientes de seguridad.

Madrid, 3 de mayo de 1975

BIBLIOGRAFÍA

- BRINCH HANSEN (1953): - "Earth pressure calculation" The Institution of Danish Civil Engineers.
- BJERRUM, FRIMANN y DUNCAN (1972): - "Earth pressures on flexible structures. A state of the art report". V Congreso Europeo de Mecánica del Suelo y Cimentaciones - Madrid.
- CASTILLO (1973): - "Sobre la influencia de las deformaciones en el comportamiento de pantallas de hormigón". Tesis doctoral en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.
- DIBIAGIO y MYRVOLL (1972): - "Full scale field of a slurry excavation in soft clay" V Congreso Europeo de Mecánica del Suelo y Cimentaciones - Madrid,
- DIBIAGIO y ROTI (1972): - "Earth pressure measurements on braced slurry trench in soft clay". V Congreso Europeo de Mecánica del Suelo y Cimentaciones - Madrid.
- EGGER (1972): - "Influence of wall stiffness and anchor prestressing on earth pressure distribution". V Congreso Europeo de Mecánica del Suelo y Cimentaciones - Madrid.
- HANNA y KURDI (1974): - "Studies on anchored flexible retaining walls in sand". Journal of the Geotechnical Engineering Division Vol. 100, n° GT 10.
- REHNMANN y BROMS (1972): - "Lateral pressures on basement wall. Results from full-scale tests". V Congreso Europeo de Mecánica del Suelo y Cimentaciones - Madrid.
- TCHENG e ISEUX (1972): - "Essais de butée en vraie grandeur of contraintes engendrées par une surcharge rectangulaire sur un mur vertical". V Congreso Europeo de Mecánica del Suelo y Cimentaciones - Madrid.
- WAYNE CLOUGH y YUET TSUI (1974): - "Performance of tied-back wall in clay". Journal of the Geotechnical Engineering Division, vol. 100, no. GT 12.
- XANTHAKOS (1974): - "Underground construction in fluid trenches". Seminario de la Universidad de Illinois.