

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS DE SUBSIDENCIAS EN SUELOS GRANULARES COMO
CONSECUENCIA DE LA EJECUCIÓN DE EXCAVACIONES
APANTALLADAS Y SU INFLUENCIA EN EL ENTORNO**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Alonso Martín Rodríguez Arrau

ASESOR:

Salvador Sobrecases Martí

Lima, diciembre, 2024


Informe de Similitud

Yo, Salvador Sobrecases Martí, docente de la Facultad de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis/el trabajo de investigación titulado ANÁLISIS DE SUBSIDENCIAS EN SUELOS GRANULARES COMO CONSECUENCIA DE LA EJECUCIÓN DE EXCAVACIONES APANTALLADAS Y SU INFLUENCIA EN EL ENTORNO del autor Alonso Martín Rodríguez Arrau,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 10%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 25/11/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 9 de diciembre de 2024

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Sobrecases Martí, Salvador.</u>	
CE: 001115226	Firma
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5625-7468	 Firmado digitalmente por SALVADOR SOBRECASES MARTI Fecha: 2025.01.24 17:26:01 +01'00'



Resumen

Cuando se realiza una excavación en un terreno, el suelo experimenta un cambio en su estado de tensiones. Es por ello por lo que se debe colocar una estructura de contención de tierras para prevenir derrumbes y poder trabajar en la zona excavada. Entre las diferentes técnicas de contención de tierras se encuentra la colocación de muros pantalla. Estos muros, debido a su flexibilidad lateral, permiten al suelo penetrar en su plano (consecuencia del empuje activo). Consecuentemente, la superficie de terreno sufre deformaciones debido a los reajustes entre las partículas. Estas deformaciones se conocen como subsidencias.

Décadas atrás se intentó analizar si la magnitud de las subsidencias que se producen en el trasdós de una excavación apantallada y su zona de influencia estaban relacionados con características de la pantalla, de la excavación o del suelo. Esto permitiría poder anticipar y controlar los daños que sufran edificaciones cercanas al corte apantallado, ya que estas se ven expuestas a solicitaciones adicionales a las contempladas en sus respectivos diseños. El resultado de esto fueron diferentes familias de métodos para estimar subsidencias: empíricos, semiempíricos y de cálculo numérico con elementos finitos.

En el presente documento se intenta comparar entre sí algunos métodos empíricos y se busca observar cuánto se asemeja lo que predicen a un perfil de asientos obtenido con elementos finitos. Para esto se consultó bibliografías sobre investigaciones acerca del tema y se modeló, utilizando el programa Plaxis 2D, una excavación apantallada en arenas sin napa freática. Esto último, para comparar resultados basados en elementos finitos con resultados basados en métodos empíricos.

Al terminar la investigación se concluyó que existen diferencias en los resultados obtenidos mediante los diferentes métodos de cálculo empleados. De manera general, en los métodos empíricos se obtuvo asientos verticales mayores que en los obtenidos mediante métodos con elementos finitos, posiblemente porque los primeros son más conservadores.

En etapas tempranas de un proyecto se dispone de poca información geotécnica, por lo que conviene emplear los métodos empíricos más conservadores. En etapas más avanzadas se dispone de más información geotécnica; por ello se suele recurrir a métodos con elementos finitos que, alimentados con data de mayor calidad, generalmente, ofrecen resultados más cercanos a la realidad.

Tabla de contenidos

1. Introducción	1
1.1. Presentación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general:	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Justificación e hipótesis	2
1.3.1. Justificación	2
1.3.2. Hipótesis	3
1.4. Metodología	3
2. Marco teórico	5
2.1. Muros de contención	5
2.1.1. Muros pantalla	6
2.2. Subsidiencias	12
2.3. Influencia en el entorno	20
2.3.1. Bjerrum (1963)	20
2.3.2. Burland & Wroth (1975)	21
2.3.3. Boscardin & Cording (1989)	21
2.3.4. RNE (2019)	22
2.4. Medidas correctivas	23
2.5. Diseño de pantallas	27
2.5.1. Método de Blum (1950)	27
2.5.2. Cálculo de pantallas con apoyos	30
2.6. Métodos de análisis de subsidiencias	32
2.6.1. Métodos empíricos	32
2.6.1.1. Método de Peck (1969)	33
2.6.1.2. Método de Bowles (1988)	34
2.6.1.3. Método de Clough & O'Rourke (1990)	36
2.6.1.4. Método de Hsieh & Ou (1993)	37
2.6.1.5. Método de Long (2001)	40
2.6.1.6. Método de Oteo (2003)	42
2.6.1.7. Ventajas y desventajas	44
2.6.2. Métodos semiempíricos	46
2.6.2.1. Método de Winkler (1867)	46
2.6.3. Métodos numéricos	47
3. Análisis de subsidiencias	48
3.1. Modelo Plaxis	48
3.2. Análisis comparativo entre distintos espesores de pantalla	53
3.3. Análisis con método de Oteo (2003)	55
3.4. Análisis con método de Peck (1969)	57

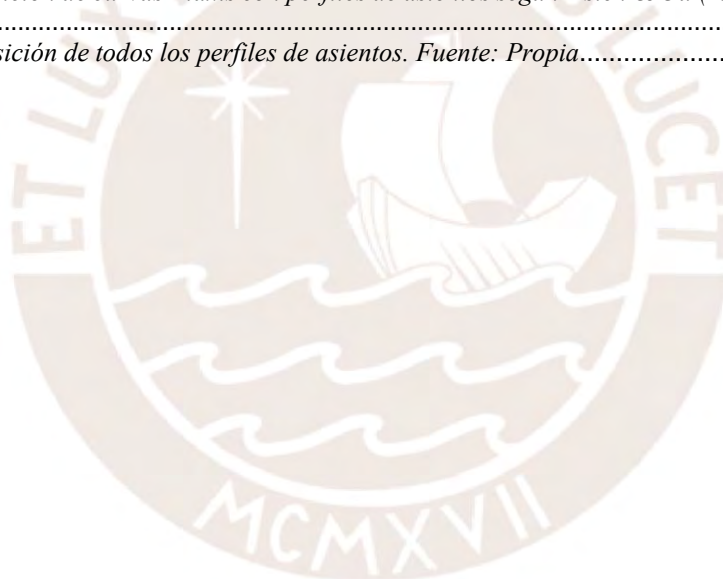
3.6. Análisis con método de Clough & O'Rourke (1990)	65
3.7. Análisis con método de Hsieh & Ou (1993)	68
3.8. Superposición de todas las curvas	70
4. Conclusiones	71
Referencias.....	74



Índice de figuras

Figura 2.1. Tipos de muros de contención. Fuente: Das (2011).....	5
Figura 2.2. Partes de un muro de contención. Fuente: Calavera (1989).....	6
Figura 2.3. Pantallas continuas. Fuente: https://ingeniero-de-caminos.com/muros-pantalla/	7
Figura 2.4. Muro de pilotes. Fuente: https://www.archiexpo.es/prod/franki-foundations-belgium/product-61404-2159903.html	7
Figura 2.5. Pantallas de pilotes. Fuente: Rodríguez Ortiz (2004)	8
Figura 2.6. Proceso constructivo de un muro pantalla. Fuente: http://www.peru.generadordeprecios.info/obra_nueva/Cimentaciones/Contenciones/Muros_pantalla/CCP020_Muro_pantalla_de_concreto_armado_c.html	9
Figura 2.7. Tipos de muro pantalla por su forma de trabajo. Fuente: Propia	10
Figura 2.8. Empujes activo y pasivo en un muro pantalla empotrada. Fuente: Propia	10
Figura 2.9. Flexibilidad lateral y asentamiento del suelo. Fuente: Das (2001)	12
Figura 2.10. Relación entre el máximo desplazamiento horizontal de la pantalla por unidad de profundidad excavada y el factor de seguridad frente al levantamiento de fondo en arcillas blandas y compactas. Fuente: CIRIA (2017)	15
Figura 2.11. Movimientos asociados por cambios en condiciones hidrogeológicas. Fuente: Clough & O'Rourke (1990).....	16
Figura 2.12. Relación entre la máxima deflexión lateral de la pantalla y la profundidad de excavación vs. rigidez del sistema arriostrado expresada para distintos factores de seguridad del sistema. Fuente: CIRIA (2017).....	17
Figura 2.13. Movimiento lateral del suelo en una excavación profunda. Fuente: Peck (1969)	19
Figura 2.14. Daños en estructuras según la distorsión angular. Fuente: Bjerrum (1963)	20
Figura 2.15. Clasificación de daños. Fuente: Burland et al (1977).....	21
Figura 2.16. Clasificación de daños. Fuente: Boscardin et al (1989)	22
Figura 2.17. Descripción de daños en edificaciones. Fuente: RNE E.050 (2019).....	22
Figura 2.18. Grieta por asiento diferencial. Fuente: https://reformacoruna.com/grieta-asiento-diferencial-edificio/	24
Figura 2.19. Grieta por asiento diferencial. Fuente: https://reformacoruna.com/grieta-asiento-diferencial-edificio/	25
Figura 2.20. Emparrillado. Fuente: https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/01/15/emparrillados-de-cimentacion/	26
Figura 2.21. Observación de Blum en pantallas empotradas y sin arriostres. Fuente: Propia	27
Figura 2.22. Equilibrio. Fuente: Propia.....	28
Figura 2.23. Pantalla con arriostre en la cabeza. Fuente: Propia	30
Figura 2.24. Equilibrio y comportamiento de una pantalla con varios niveles de arriostramiento. Fuente: García (2015).....	31
Figura 2.25. Deformación en pantallas y movimientos inducidos en el trasdós. Fuente: Peck (1969).....	32
Figura 2.26. Relación de subsidencias con distancia a excavación. Fuente: Peck (1969)	33
Figura 2.27. Subsidencias vs distancia a excavación. Fuente: Peck (1969)	34
Figura 2.28. Subsidencias en el trasdós de un corte apantallado. Fuente: Propia.....	36
Figura 2.29. Subsidencias en arenas y arcillas. Fuente: Clough & O'Rourke (1990).....	36
Figura 2.30. Perfil de asentamientos. Fuente: Hsieh & Ou (1993).....	37
Figura 2.31. Deflexiones de pantallas. Fuente: Ou et al. (1993).....	38
Figura 2.32. Asientos para pantalla con arriostre. Fuente: Hsieh & Ou (1993).....	39
Figura 2.33. Asientos para pantalla sin arriostre. Fuente: Ou et al. (1998).....	39
Figura 2.34. Relación entre máximo asiento vertical y máxima deflexión horizontal. Fuente: Ou et al. (1998)	40
Figura 2.35. Máxima deflexión horizontal vs rigidez de sistema de soporte. Fuente: Long (2001)	41
Figura 2.36. Subsidencias ocasionadas por excavaciones apantalladas. Fuente: Oteo (2003)	42
Figura 2.37. Movimientos horizontales en cortes apantallados. Fuente: Oteo (2003).....	43
Figura 2.38. Simplificación de Winkler (1867). Fuente: Propia	46
Figura 3.1: Caso base a modelar. Fuente: Propia.....	48
Figura 3.2: Propiedades del modelo. Fuente: Propia.....	49
Figura 3.3: Propiedades generales del material de suelo. Fuente: Propia	50
Figura 3.4: Propiedades elásticas y cohesivas del suelo. Fuente: Propia.....	50
Figura 3.5: Modelo en Plaxis. Fuente: Propia.....	52
Figura 3.6: Asientos de terreno según espesores de pantalla. Fuente: Propia.....	53
Figura 3.7: Distancia a excavación vs asiento vertical. Fuente: Propia.....	55

<i>Figura 3.8: Perfil de asientos. Fuente: Propia</i>	55
<i>Figura 3.9: Superposición de rango de Oteo (2003) con asientos de modelos con distintas pantallas. Fuente: Propia</i>	56
<i>Figura 3.10: Asientos verticales en arenas según Peck (1969) para una excavación de 6 m. Fuente: Propia</i> ...	57
<i>Figura 3.11: Superposición de la curva de Peck (1969) con asientos de modelos con distintas pantallas. Fuente: Propia</i>	57
<i>Figura 3.12: Asientos verticales según Bowles (1988) para un ancho de excavación de 30 m. Fuente: Propia</i>	60
<i>Figura 3.13: Asientos verticales según Bowles (1988) para un ancho de excavación de 60 m. Fuente: Propia</i>	60
<i>Figura 3.14: Asientos verticales según Bowles (1988) para un ancho de excavación de 100 m. Fuente: Propia</i>	61
<i>Figura 3.15: Superposición de curvas de Bowles (1988). Fuente: Propia</i>	61
<i>Figura 3.16: Superposición de curva de Bowles (1988) y curva de Plaxis para anchos de excavación de 30 m. Fuente: Propia</i>	62
<i>Figura 3.17: Superposición de curva de Bowles y curva de Plaxis para anchos de excavación de 60 m. Fuente: Propia</i>	63
<i>Figura 3.18: Superposición de curva de Bowles (1988) y curva de Plaxis para anchos de excavación de 100 m. Fuente: Propia</i>	63
<i>Figura 3.19: Perfil de asientos según Clough & O'Rourke (1990). Fuente: Propia</i>	65
<i>Figura 3.20: Superposición de perfil de asientos según Clough & O'Rourke (1990) y curva según Plaxis. Fuente: Propia</i>	66
<i>Figura 3.21: Superposición de las curvas de Clough & O'Rourke (1990) con asientos de modelos con distintas pantallas. Fuente: Propia</i>	67
<i>Figura 3.22: Perfil de asientos según Hsieh & Ou (1993). Fuente: Propia</i>	68
<i>Figura 3.23: Superposición de curvas Plaxis con perfiles de asientos según Hsieh & Ou (1993). Fuente: Propia</i>	69
<i>Figura 3.24: Superposición de todos los perfiles de asientos. Fuente: Propia</i>	70



Índice de tablas

<i>Tabla 2.1: Valores de λ. Fuente: Oteo (2003)</i>	43
<i>Tabla 2.2: Ventajas y desventajas de métodos empíricos. Fuente: Propia</i>	45
<i>Tabla 3.1: Propiedades del terreno del modelo. Fuente: Propia</i>	51
<i>Tabla 3.2: Características de las pantallas con distintos espesores. Fuente: Propia</i>	54

Índice de ecuaciones

<i>Ecuación 2.1</i>	11
<i>Ecuación 2.2</i>	11
<i>Ecuación 2.3</i>	28
<i>Ecuación 2.4</i>	28
<i>Ecuación 2.5</i>	29
<i>Ecuación 2.6</i>	29
<i>Ecuación 2.7</i>	29
<i>Ecuación 2.8</i>	30
<i>Ecuación 2.9</i>	30
<i>Ecuación 2.10</i>	35
<i>Ecuación 2.11</i>	35
<i>Ecuación 2.12</i>	35
<i>Ecuación 2.13</i>	35
<i>Ecuación 2.14</i>	35
<i>Ecuación 2.15</i>	38
<i>Ecuación 2.16</i>	43
<i>Ecuación 2.17</i>	46



1. Introducción

1.1. Presentación

La realización de excavaciones para poder construir infraestructuras bajo el nivel del suelo es una necesidad hoy en día. Las ciudades solían desarrollarse en el plano horizontal, pero, debido a diferentes factores tales como la preservación de zonas verdes y cercanía de las viviendas a zonas de comercio, se hizo necesario modificar este modelo.

Cada vez son más las personas que residen en núcleos urbanos y, para el 2050, se tiene proyectado que el 75% de la población mundial resida en ciudades, lo cual traerá consigo una mayor demanda de vivienda e infraestructura relacionada con los servicios básicos y la movilidad (Neoarquitectos, 2017).

El desarrollo vertical de las ciudades implica su desarrollo en altura, ocupando poca área de suelo. Esto permite optimizar terrenos ya que se pueden tener en edificaciones mixtas los servicios de las urbes clásicas como oficinas, viviendas, autoservicios y centros de salud. Se obtienen, además, ciertas ventajas que en un grandísimo desarrollo horizontal de las urbes no las habría tales como reducción de tiempos de traslado, y mayor preservación de jardines, parques y áreas verdes. Ante esta necesidad, se requiere cimentar edificaciones y construir sótanos.

Cuando esto se realiza, es necesario colocar estructuras de contención de tierras con la finalidad de que las paredes de suelo no se derrumben, lo cual ocasionaría accidentes e interferiría con los trabajos. Las estructuras de contención de tierras pueden ser muros de pilotes, muros de gravedad, muros pantalla, entre otras. Al excavar para ser colocadas, ocurre una alteración en el estado de esfuerzos del terreno, lo cual conduce a que el suelo se desplace lateralmente. Tras ser desplazado, el suelo experimentará deformaciones en su superficie que podrían perjudicar a las edificaciones cercanas a la excavación (dependiendo de la magnitud de asentamientos y de las características de la estructura). A estas deformaciones se les conoce como subsidencias.

Más adelante se explicará qué es lo que origina dichas subsidencias, cuáles son los daños que podrían ocurrirle a las edificaciones cercanas, a qué se deben esos daños, qué medidas correctoras podrían tomarse, y qué características del terreno y de la estructura de contención se ven involucradas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general:

- Comparar entre sí métodos empíricos de análisis de subsidencias y ver cuánto se asemejan, respecto a resultados, a métodos de cálculo con elementos finitos

1.2.2. Objetivos específicos:

- Revisar bibliografías de métodos que permiten calcular subsidencias en el trasdós de excavaciones apantalladas, su influencia en el entorno y maneras de controlar este fenómeno
- Realizar cálculos acerca del comportamiento de la superficie del suelo en presencia de un corte apantallado mediante elementos finitos y comparar los resultados frente a los que se obtuvo con métodos empíricos

1.3. Justificación e hipótesis

1.3.1. Justificación

Se considera útil poder conocer acerca del tema para poder prever cómo se verán afectadas las edificaciones que se encuentren cercanas a una zona de corte, qué magnitud de asentamientos sufrirán y en qué radio de acción. Debido a esto, podría originarse desde fisuras leves hasta considerables daños estructurales.

Dado que cada tipo de edificación tiene un máximo movimiento permitido, se podrá amoldar el trabajo geotécnico en excavaciones, tal que las subsidencias que se produzcan en las zonas del trasdós no excedan lo admisible para las edificaciones cercanas. Esto se lograría modificando ciertos parámetros o características del muro pantalla o mediante la aplicación de medidas correctivas (mejoramiento de suelo, mejoramiento de la estructura afectada o algún mecanismo que controle la propagación de las subsidencias por el terreno).

A veces, se requerirá estimar rápidamente las subsidencias, por lo que se recurrirá a métodos empíricos. Ante esto, se considera útil el tener en cuenta qué métodos se asemejan más, en cuanto resultados, a métodos de cálculo con elementos finitos, para poder realizar las estimaciones cuando no se cuenta con mucha data geotécnica.

1.3.2. Hipótesis

La magnitud de los asientos y la zona de alcance de estos tendrían alguna relación con las propiedades del suelo (tipo de terreno, cohesión, ángulo de fricción interna, entre otras) y las características de la pantalla y la excavación (espesor de pantalla, profundidad de excavación, profundidad de empotramiento, entre otras).

Para analizar subsidencias los métodos de cálculo numérico consideran gran cantidad de características y variables que influyen en el comportamiento de este fenómeno, a diferencia de los empíricos.

1.4. Metodología

La presente tesis buscará estudiar la posible relación que tengan la profundidad de excavación, profundidad de empotramiento de pantalla, rigidez de esta y las características del suelo de excavación con el alcance de la zona de subsidencias y, además, con la magnitud de asientos en el terreno. También, se explicará por qué las edificaciones cercanas a un corte apantallado pueden verse afectadas con pequeñas rajaduras, grietas de importancia o, incluso, severos daños estructurales.

Para poder lograr esto, se realizó el siguiente procedimiento:

- 1) Se consultó diferentes bibliografías de libros y artículos de investigación que tienen relación con la temática de estudio.
- 2) Se expuso el mecanismo de acción de estructuras de contención en general y los tipos de estas. Luego se entró en detalle acerca de los muros pantalla y las características que les son propias.
- 3) Se explicó qué son las subsidencias y qué las causa.
- 4) Se expuso cómo podrían verse afectadas edificaciones circundantes a una zona de excavación, se sugirió algunos mecanismos que controlen los movimientos del terreno y se propuso algunas medidas correctoras a fin de mantener los movimientos dentro del rango admisible para las estructuras cercanas.
- 5) Se analizó las familias de métodos que hay para diseñar muros pantalla y las familias de métodos que hay para poder analizar las subsidencias generadas por excavaciones apantalladas.

- 6) Se diseñó un caso base, con algunas variaciones, y se estudió las subsidencias (magnitud y radio de alcance) por medio del método de cálculo numérico basado en elementos finitos.
- 7) Se comparó resultados obtenidos por diferentes métodos empíricos. También se compararon con los resultados del modelo elaborado con elementos finitos.
- 8) Se interpretó los resultados obtenidos y se presentó las conclusiones a las que se llegó al final de la presente tesis.



2. Marco teórico

2.1. Muros de contención

Los muros de contención brindan apoyo lateral permanente a taludes verticales o casi verticales. También se utilizan en excavaciones requeridas para trabajos de construcción, por ejemplo, sótanos de edificios o túneles de transporte. Tienen como principal objetivo contener el empuje de tierras y así evitar derrumbes, en especial cuando se trabaja en suelos con condiciones geotécnicas pobres.

Das (2011) distingue los siguientes muros de contención: muro de gravedad, muro de semigravedad, muro en voladizo y muro con contrafuertes. La Figura 2.1 los ilustra.

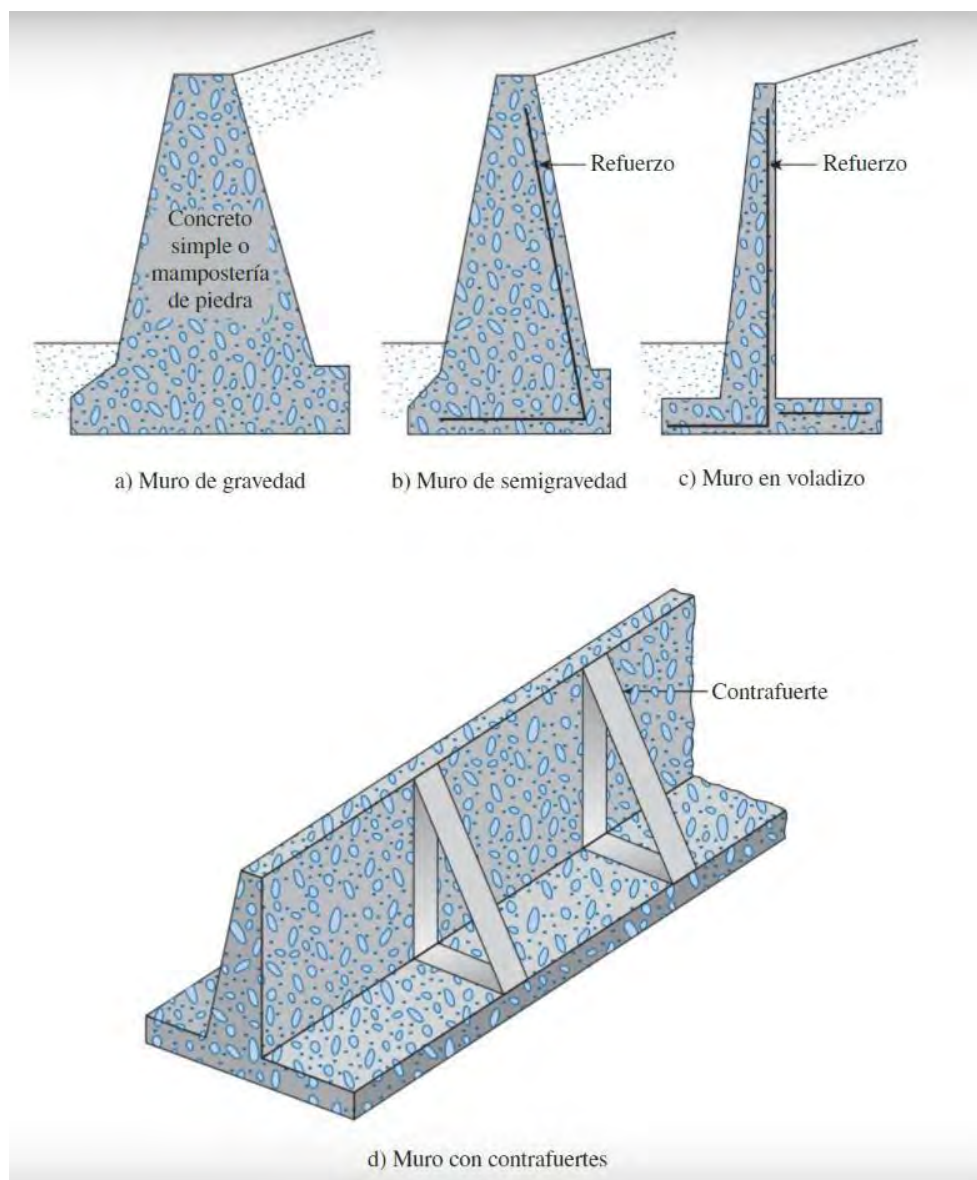


Figura 2.1. Tipos de muros de contención. Fuente: Das (2011)

Los muros de gravedad se construyen con concreto simple y hacen depender su estabilidad de su peso propio, debido a sus grandes dimensiones, y al suelo que reposa sobre ellos, debido a la pendiente de su cara en contacto con el suelo retenido. Los muros de semigravedad trabajan de una manera parecida a los muros de gravedad, pero se reducen sus dimensiones y se construyen con acero de refuerzo para compensar en resistencia a estas reducciones. Los muros en voladizo se construyen con concreto armado y consisten en un cuerpo delgado con una losa de base. Los muros con contrafuertes se asemejan a los muros en voladizo, pero a intervalos regulares se anclan con delgadas losas verticales de concreto (contrafuertes) a fin de reducir momentos flectores y fuerzas cortantes. Se reconoce también a los muros de tierra mecánicamente estabilizada con geosintéticos, los cuales pueden ser geotextiles o geomallas, pero no se profundizará en ellos ya que escapan al alcance de estudio de la presente tesis. En la Figura 2.2 se muestra las partes de un muro de contención.

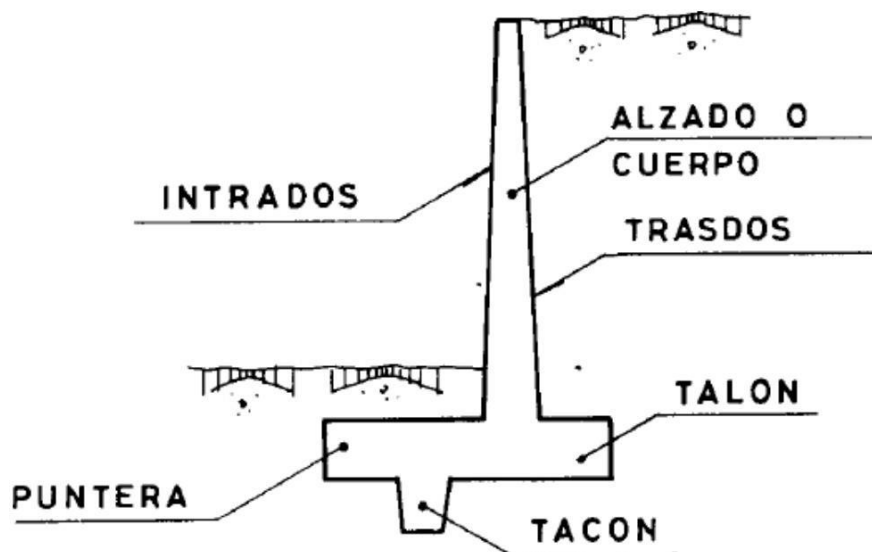


Figura 2.2. Partes de un muro de contención. Fuente: Calavera (1989)

2.1.1. Muros pantalla

También denominados pantallas de hormigón in situ (Yepes, 2014), son estructuras de contención flexibles. Esto se debe a que experimentarán deformaciones como consecuencia de los empujes del suelo. Consisten únicamente en un delgado cuerpo de sección rectangular de concreto armado vaciado in situ.

Lo más común es utilizar pantallas continuas, las cuales consisten en un vaciado uniforme y continuo por paneles (como se muestra en la Figura 2.3), pero, se puede utilizar pantallas de pilotes en suelos con algo de cohesión y sin nivel freático. En la Figura 2.4 se

aprecia una serie de pilotes adyacentes contruidos para formar una estructura de retención de tierra como un voladizo. Los pilotes deben llevar una viga de recubrimiento instalada en la parte superior para unirlos.



Figura 2.3. Pantallas continuas. Fuente: <https://ingeniero-de-caminos.com/muros-pantalla/>



Figura 2.4. Muro de pilotes. Fuente: <https://www.archiexpo.es/prod/franki-foundations-belgium/product-61404-2159903.html>

La siguiente imagen (Figura 2.5) muestra una vista en planta de diferentes maneras de armar pantallas de pilotes. Estos pueden colocarse tangentes, separados, secantes o se les puede poner una cobertura de hormigón.

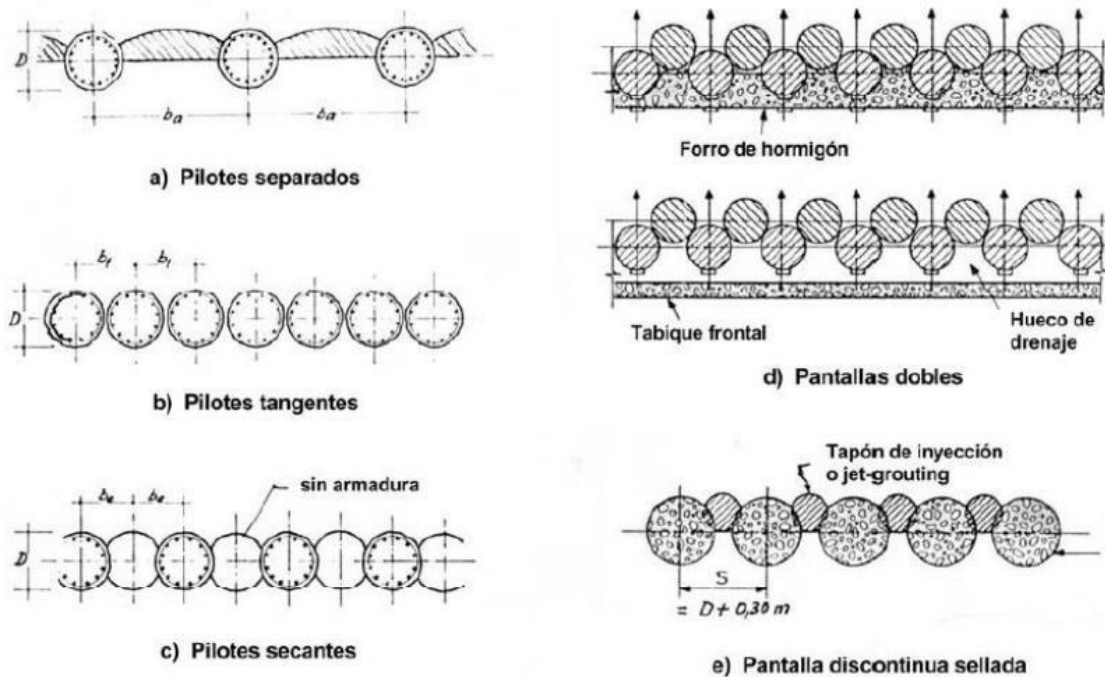


Figura 2.5. Pantallas de pilotes. Fuente: Rodríguez Ortiz (2004)

Para construir muros pantalla, se sigue el siguiente proceso:

- Inicia con el replanteo respectivo.
- Se colocan los muretes guías y se excava la zona donde se colocará la armadura del muro
- Una vez colocada la armadura, se procede a realizar el vaciado de abajo a arriba (cuidando de que no se segregue la mezcla).
- Se retiran los muretes.

La Figura 2.6 muestra, resumidamente, las etapas constructivas de una pantalla continua. De izquierda a derecha: excavación en terreno, colocación de armadura y vaciado de concreto.

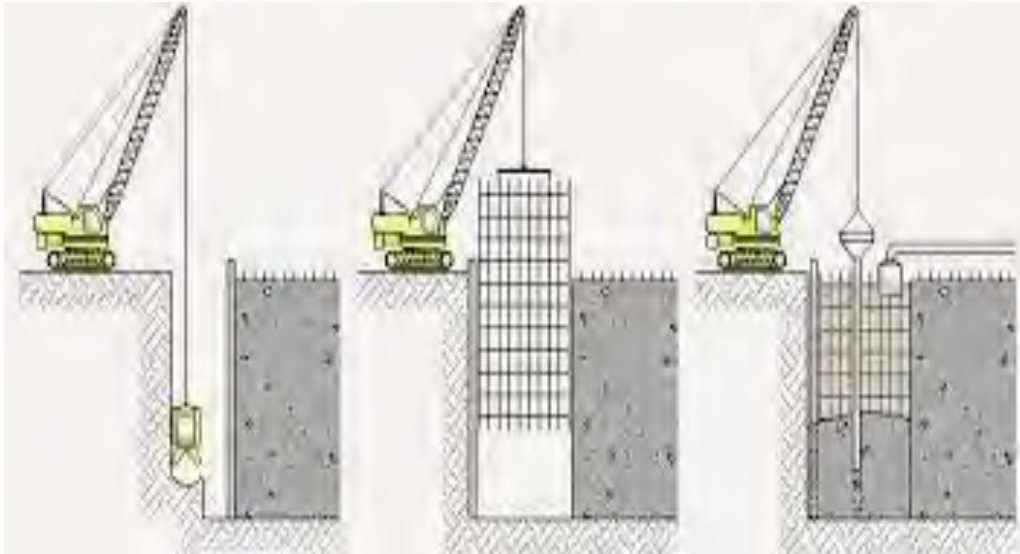


Figura 2.6. Proceso constructivo de un muro pantalla. Fuente:

http://www.peru.generadordeprecios.info/obra_nueva/Cimentaciones/Contenciones/Muros_pantalla/CCP020_Muro_pantalla_de_concreto_armado_c.html

Luego de construirse el muro pantalla, puede realizarse de dos maneras la construcción de la estructura que se alberga en su interior. La primera es mediante el sistema descendente (top down), el cual consiste en construir la losa superior e ir excavando bajo ella mientras se van construyendo las demás losas hacia abajo. La segunda, mediante el sistema ascendente (bottom up), el cual consiste en excavar por completo y construir la losa de fondo primero, para después continuar con las demás losas de abajo hacia arriba.

Los muros pantalla pueden clasificarse en dos tipos según su mecanismo de trabajo. En primer lugar, están las pantallas en voladizo, también llamadas empotradas (o hincadas, en caso se trate de muros prefabricados); en segundo lugar, los muros arriostrados. Los arriostres actúan como apoyos simples, brindando unas fuerzas perpendiculares al plano de la pantalla que permitirán reducir momentos flectores y, por tanto, deformaciones. La Figura 2.7 muestra a la izquierda una pantalla en voladizo o empotrada y, a la derecha, una pantalla con arriostres.

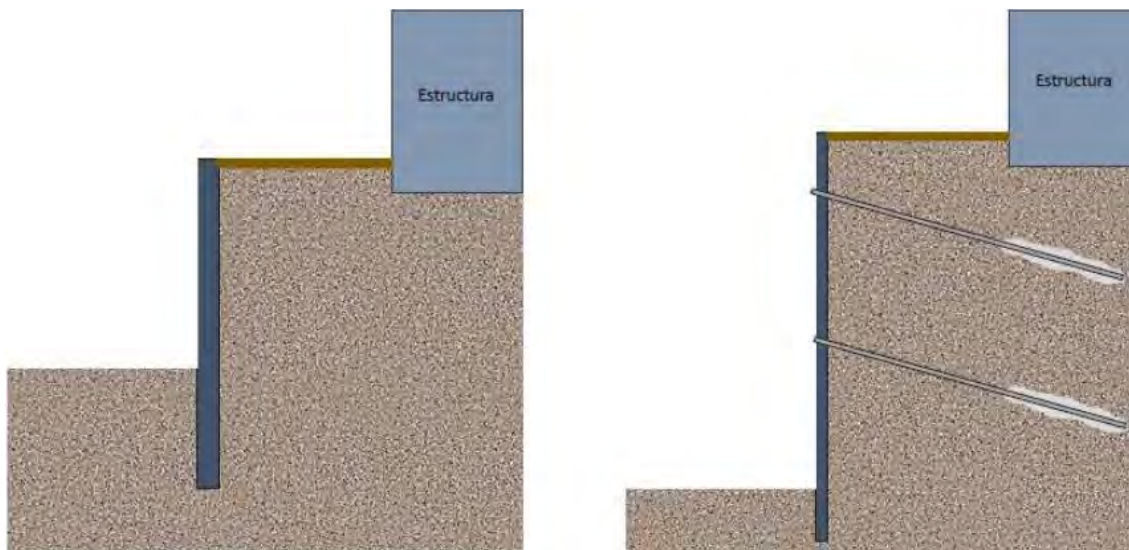


Figura 2.7. Tipos de muro pantalla por su forma de trabajo. Fuente: Propia

Las pantallas empotradas resisten los empujes de la tierra retenida solo por el empuje pasivo que se genera en el empotramiento. Este empuje es una reacción del suelo en el intradós, la cual evita el desplazamiento del muro. Las pantallas apoyadas añaden el efecto de niveles de arriostramiento que pueden ser anclajes. La Figura 2.8 ilustra la ley de empujes.

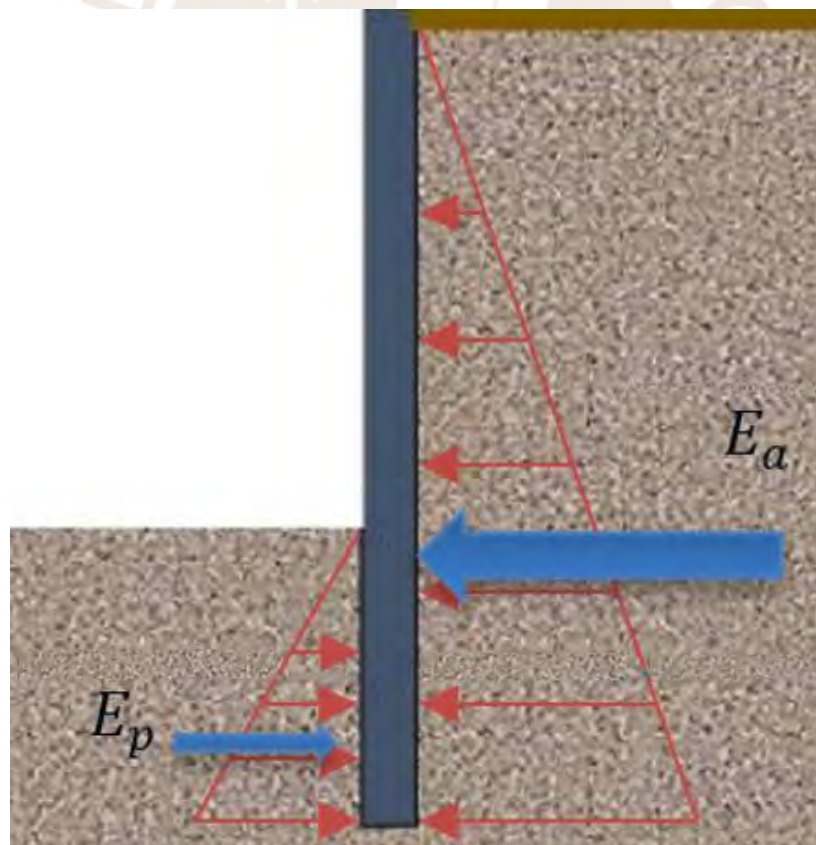


Figura 2.8. Empujes activo y pasivo en un muro pantalla empotrada. Fuente: Propia.

Calavera (1989) expone la ley de empujes basándose en la teoría de Rankine. El empuje activo se calcula como la resultante de una distribución de esfuerzos en el trasdós del corte.

Ecuación 2.1

$$E_a = \frac{1}{2} \times K_a \times \gamma \times H^2 \times$$

El valor de K_a corresponde al coeficiente de empuje activo del suelo (el cual depende del ángulo de fricción interna), el valor de γ equivale al peso específico del suelo retenido y el valor H representa a la altura del muro pantalla.

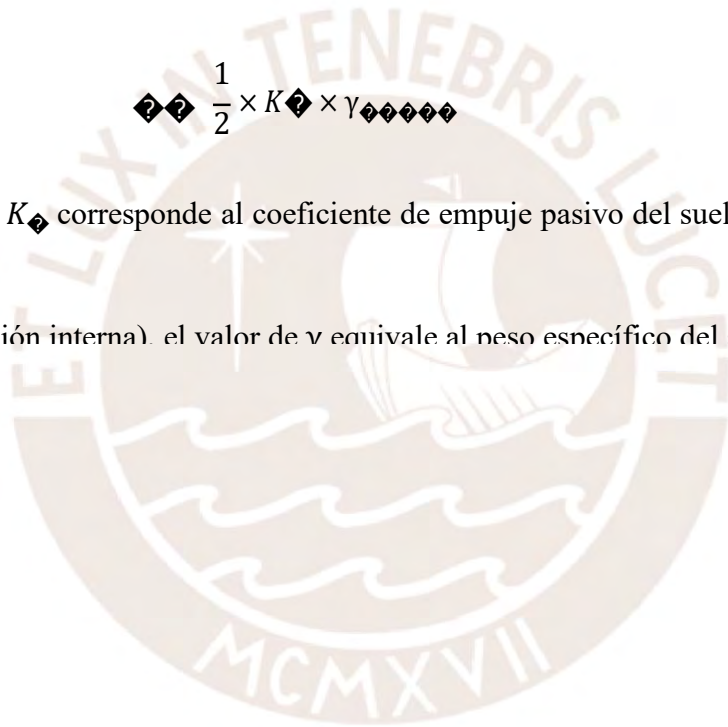
El empuje pasivo, por su parte, se calcula como la resultante de los esfuerzos del suelo en el intradós.

Ecuación 2.2

$$E_p = \frac{1}{2} \times K_p \times \gamma \times H^2 \times$$

El valor de K_p corresponde al coeficiente de empuje pasivo del suelo (el cual depende

del ángulo de fricción interna), el valor de γ equivale al peso específico del suelo retenido y el



2.2. Subsidiencias

Das (2001) menciona que la flexibilidad lateral de los muros pantalla es lo que induce a los asentamientos del terreno alrededor de una excavación. A esto se le llama pérdida del suelo.

Los muros pantalla son estructuras lateralmente flexibles, por tanto, sufren cierto grado de deformación lateral. Consecuencia de esto es que el suelo se desplace lateralmente y, finalmente, se produzcan los asentamientos en su superficie. Esto se puede apreciar claramente en la siguiente Figura 2.9.

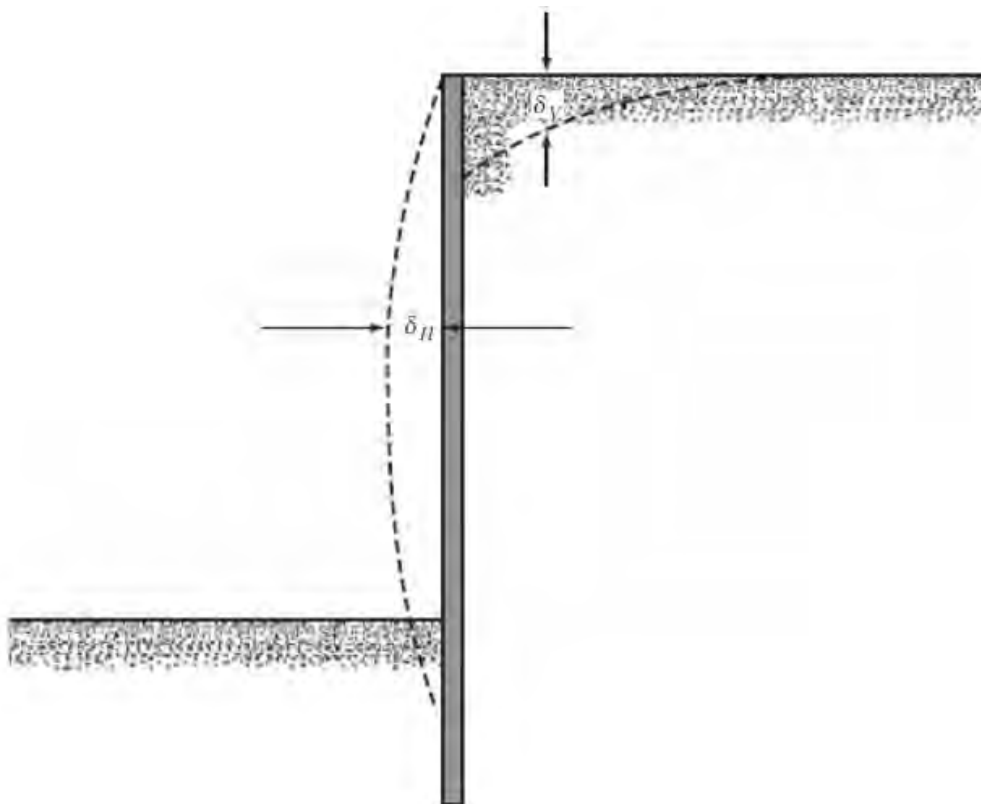


Figura 2.9. Flexibilidad lateral y asentamiento del suelo. Fuente: Das (2001)

El suelo experimenta un cambio en su estado de tensiones debido a la pérdida de confinamiento, lo cual conlleva a que intente desplazarse hacia la zona de vacío. Dado que las pantallas son estructuras lateralmente flexibles, ceden al empuje de tierras y se deforman. El suelo que entra en la zona deformada del muro dejará vacíos que el suelo de más arriba ocupará. Por tanto, habrá asentamientos.

Los principales factores que rigen los movimientos del terreno, según Sanhueza (2008), son los siguientes:

- Ancho y profundidad de excavación
- Rigidez de la pantalla
- Espaciamiento entre apoyos de la pantalla
- Rigidez y pretensado de los arriostres
- Profundidad a la que se encuentra el suelo duro
- Características tenso-deformacionales de los estratos involucrados
- Operaciones para rebajar el nivel freático
- Presencia de sobrecargas adyacentes
- Condiciones de fluencia y consolidación de suelos blandos
- Condiciones de ejecución de la obra

Según CIRIA (2017), los movimientos del terreno surgen de:

- La instalación del muro pantalla
- La excavación frente al muro
- El flujo de agua subterránea, que resulta en una pérdida de suelo y consolidación causado por variaciones en la presión de poros debidas a filtraciones a través y/o alrededor del muro
- Otras fuentes de movimiento como construcción de pilotes perforados de gran diámetro dentro o alrededor de la excavación propuesta, instalaciones de mejora del terreno (como lechada), instalación de rampas de acceso a la excavación, varias excavaciones poco profundas (por ejemplo, desagües), remoción de tablestacas temporales, instalación de anclajes temporales, entre otras

La instalación de pantallas puede alterar el estado de tensiones en el que el suelo se encuentra. La construcción de muros puede implicar clavar o perforar pilotes o muros pantalla o excavar paneles en el suelo. Lo primero puede causar vibraciones y lo segundo puede implicar la pérdida de apoyo en el suelo.

La influencia que ejerza la excavación depende de factores como:

- La geometría de la excavación
- La rigidez y resistencia del terreno
- Tipo y rigidez del muro y de su sistema de soporte
- Secuencia constructiva
- Calidad de los operarios

La forma geométrica, el área en planta y la profundidad de excavación tienen una influencia crítica en la magnitud y distribución de los movimientos del suelo alrededor de una excavación. Por ejemplo, en el caso de que los muros forman una caja cerrada, el movimiento tenderá a restringirse en las esquinas.

Los movimientos en suelos competentes como arenas densas o arcillas rígidas son generalmente mucho menores que en suelos menos competentes, como arenas sueltas o arcillas blandas. Las arcillas blandas y firmes pueden ser susceptibles a grandes movimientos, incluso a profundidades de excavación pequeñas, debido al potencial de falla por capacidad de carga no drenada en el pie del muro. El requisito de que el esfuerzo vertical en el suelo a la profundidad excavada no debe exceder la capacidad de carga del suelo da un límite superior teórico a la profundidad de excavación.

La Figura 2.10 muestra cómo se relacionan el máximo desplazamiento horizontal de la pantalla por unidad de profundidad de excavación y el factor de seguridad ante el levantamiento de fondo en arcillas blandas y compactas. Se aprecia que, al disminuir el factor de seguridad por levantamiento de fondo, la razón desplazamiento horizontal máximo entre profundidad excavada se incrementa.

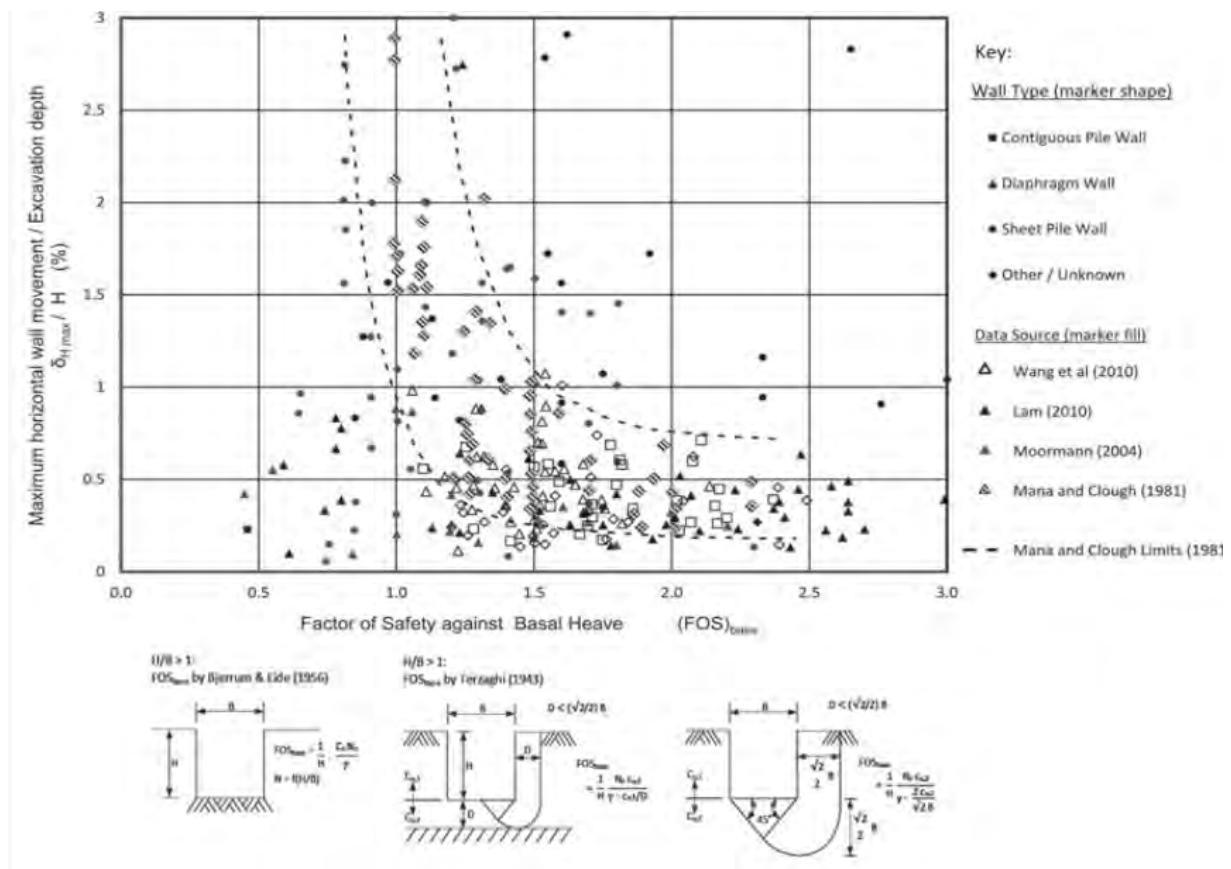


Figura 2.10. Relación entre el máximo desplazamiento horizontal de la pantalla por unidad de profundidad excavada y el factor de seguridad frente al levantamiento de fondo en arcillas blandas y compactas. Fuente: CIRIA (2017)

Los cambios en condiciones hidrogeológicas, cuando se excava bajo el nivel freático, se producen debido a que, al excavar y apantallar, se inicia un flujo por debajo de la pantalla desde el trasdós hacia el intradós. Este flujo, a menos que alguna recarga de otra fuente exista, conlleva a una depresión del nivel freático en el trasdós. Debido a esto, según el postulado de Terzaghi sobre los esfuerzos efectivos en el suelo, los esfuerzos efectivos serán alterados y el suelo experimentará deformaciones.

También puede ocurrir desplazamientos verticales del terreno debido a consolidación o hinchamiento (tratando con suelos finos) y desplazamientos horizontales de este relacionados al movimiento lateral de la pantalla. La siguiente imagen (Figura 2.11) muestra algunos problemas debidos al flujo de agua en el terreno por debajo del muro pantalla.

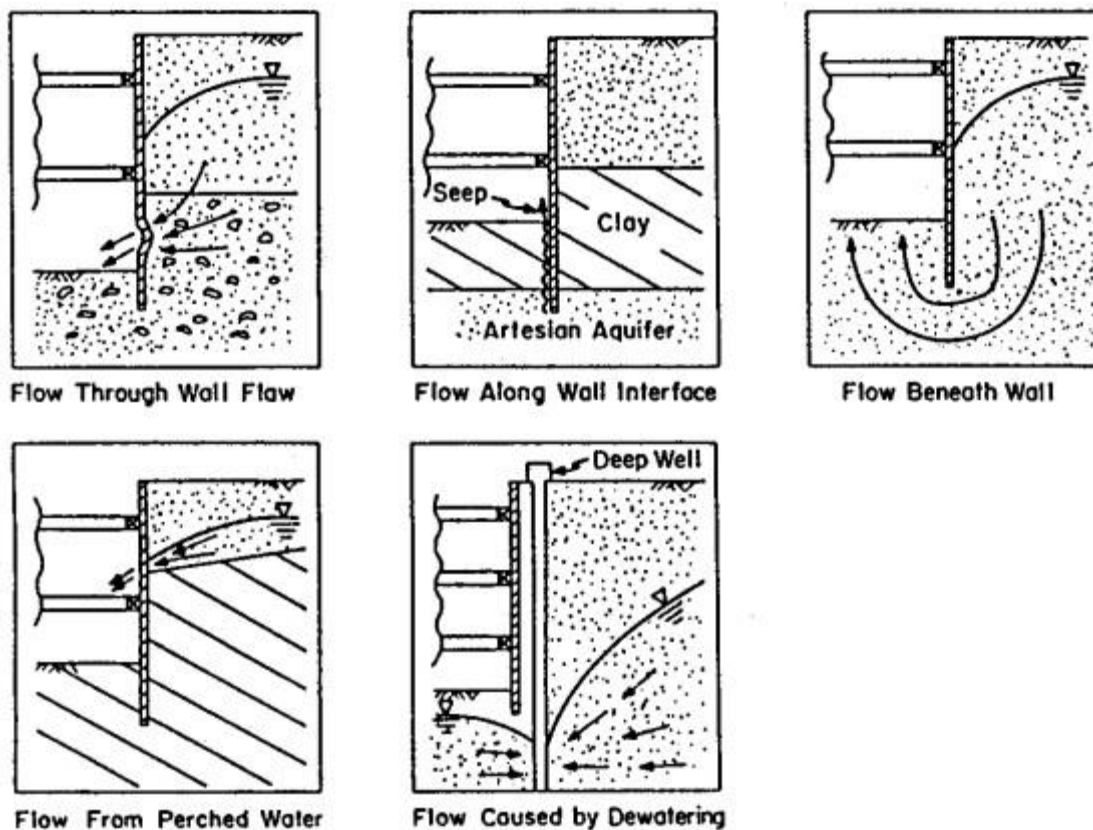


Figura 2.11. Movimientos asociados por cambios en condiciones hidrogeológicas. Fuente: Clough & O'Rourke (1990)

El tipo de pantalla y método constructivo de excavación influye de manera significativa en los movimientos del terreno y de la pantalla. Es sabido que las paredes más rígidas atraen momentos de flexión más grandes que las paredes más flexibles con las mismas condiciones de suelo y arriostramiento. Las pantallas flexibles redistribuyen mejor los esfuerzos, reduciéndolos, a costa de inducir mayores movimientos en la propia pantalla y en el terreno. Es habitual que pantallas flexibles con muchos arriostramientos tengan desplazamientos similares a pantallas rígidas con pocos arriostramientos. Sin embargo, el costo del apuntalamiento adicional puede ser mayor que el costo beneficio de usar una pantalla flexible.

La Figura 2.12 muestra una relación entre la rigidez (expresada en función del módulo de elasticidad, el momento de inercia de la sección de la pantalla y la distancia entre arriostramientos) y el desplazamiento lateral máximo de la pantalla por unidad de profundidad excavada, para distintos factores de seguridad del sistema.

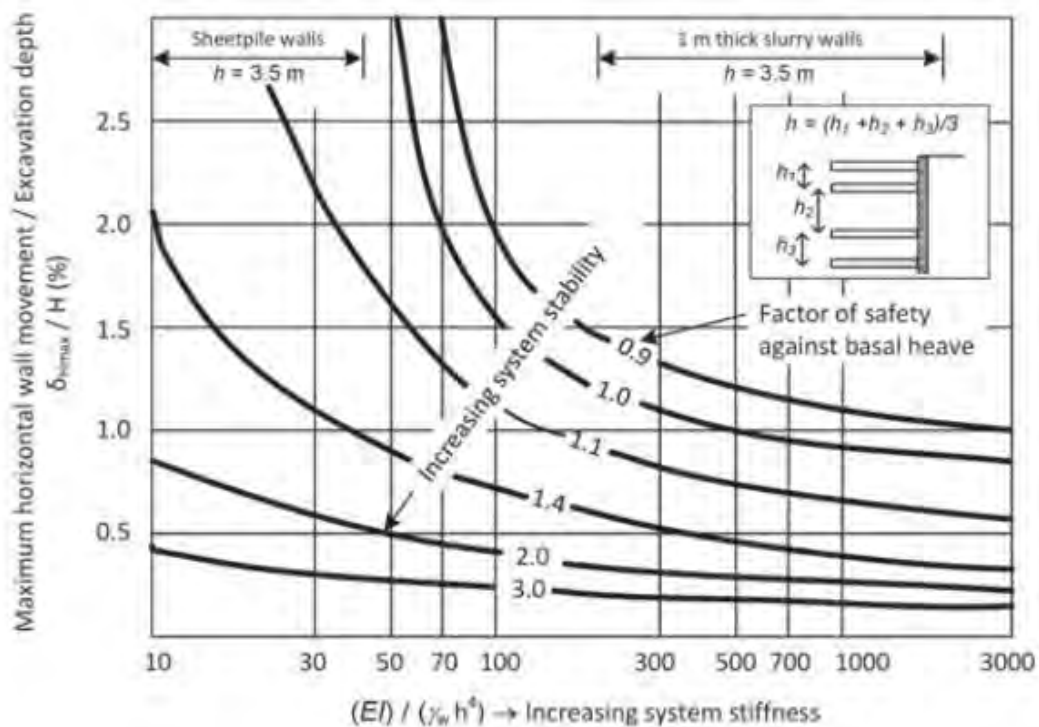


Figura 2.12. Relación entre la máxima deflexión lateral de la pantalla y la profundidad de excavación vs. rigidez del sistema arriostrado expresada para distintos factores de seguridad del sistema. Fuente: CIRIA (2017)

La elección del tipo de muro, su instalación, la secuencia general de construcción de la excavación y la duración de esta influyen significativamente en los movimientos del suelo alrededor. En general, se asume que el método *top down* ayuda a minimizar los desplazamientos en el terreno porque aplica de manera temprana un arriostramiento en cabeza desde el interior de la zona excavada. Sin embargo, la regularidad del apoyo proporcionado por los pisos subsiguientes en cada altura de piso de la estructura puede no proporcionar necesariamente apoyo a la pared en niveles óptimos.

CGS (2006) indica que los movimientos en pantallas ancladas pueden ser menores que aquellas arriostradas con puntales debido a las siguientes razones:

- Los anclajes pueden ser tensados parcialmente a la carga de diseño antes de que se complete la excavación.
- Generalmente, es suficiente una pequeña excavación por debajo del nivel de anclaje para permitir su instalación, a diferencia de un puntal o losa estructural que requieren de mayor espacio. Esto reduce la distancia libre de pantalla que

se encuentra sin apoyo y por lo tanto reduce los movimientos inducidos en el terreno.

- La conexión entre puntales, vigas de atado y pantalla, a menudo es imperfecta, ocasionando que los arriostramientos puedan no entrar en carga de manera eficiente, lo que puede conducir a mayores deformaciones.
- Después de completar la construcción de las estructuras en un sistema bottom up, los puntales generalmente son retirados mientras que los anclajes pueden permanecer durante más tiempo si es necesario, siempre que no existan restricciones por ocupación de servidumbres.

Actitudes poco profesionales o inapropiadas, falta de prevención de riesgos y no adherirse a los estándares reconocidos de buena mano de obra puede conducir un terreno a movimientos descontrolados, falla local o hasta un colapso progresivo. Según Puller (2003), existen numerosos ejemplos de malas prácticas:

- Tardía instalación de soportes
- Sobreexcavación no planificada
- Mal hincado de pilotes
- Filtración de agua o pérdida de suelo a través de orificios para amarres o juntas entre muros pantalla
- Remodelado y socavado de bermas de arcilla
- Sobrecargas excesivas por montones de escombros o equipos y maquinarias pesados
- Falta de rigidez de puntales

Peck (1969) recomienda tener cuidado con realizar excavaciones profundas en suelos cohesivos. En el caso de arcillas plásticas saturadas podría resultar en un hinchamiento del suelo en la zona del corte, ya que, al excavar, el suelo perderá su carga de confinamiento y las partículas de arcilla se intentarán separar.

Las subsidencias no alcanzan sus máximos instantáneamente; esto se logra de manera gradual con el paso del tiempo, conforme se vaya dando la deformación de la estructura de contención como consecuencia del empuje del suelo. La Figura 2.13 permite apreciar los valores de los movimientos laterales que se dieron en el suelo conforme el avance del tiempo tras su colocación en una excavación profunda realizada en la ciudad de Chicago.

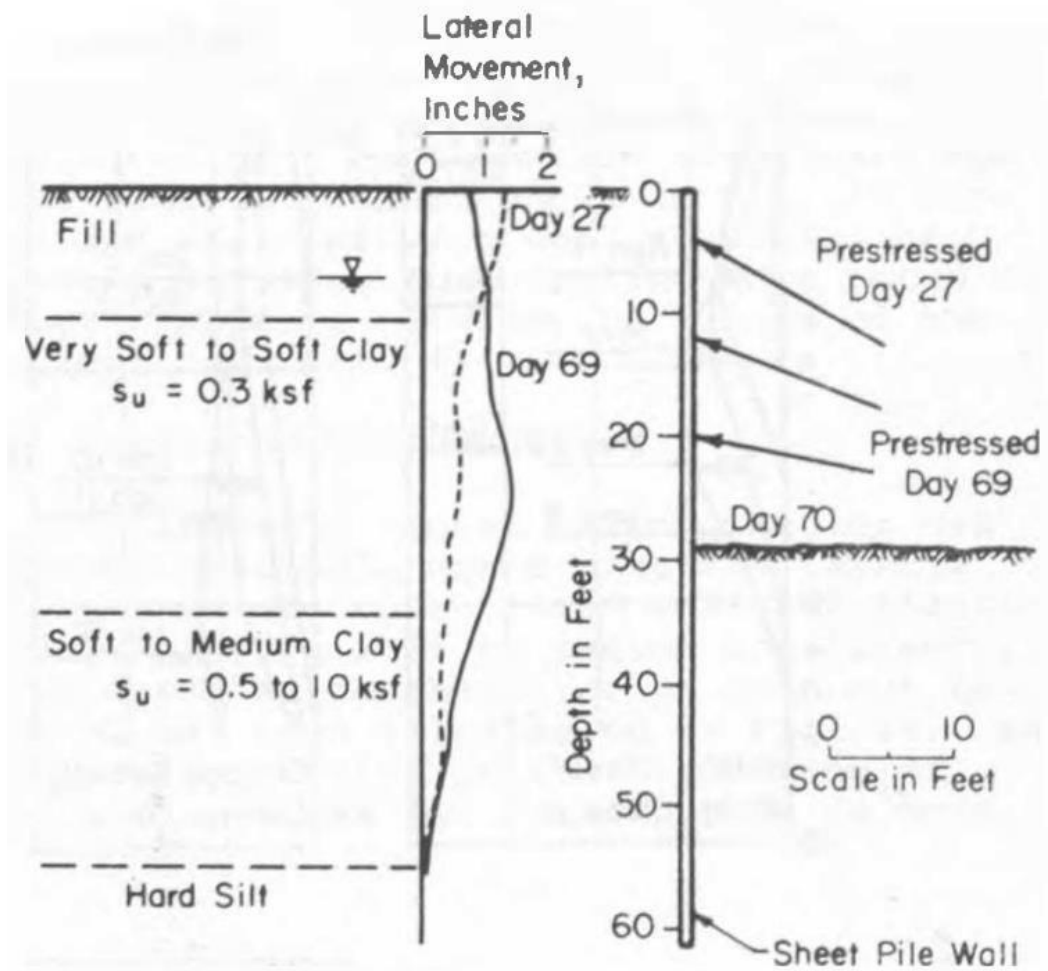


Figura 2.13. Movimiento lateral del suelo en una excavación profunda. Fuente: Peck (1969)

2.3. Influencia en el entorno

Alva (2007) explica que existen tres razones por las que los asentamientos son importantes en cuanto a las edificaciones: aspecto, condiciones de servicio y daños a la estructura. Define, también, tres tipos de asentamiento: asentamiento uniforme, inclinación y asentamiento no uniforme.

El asentamiento uniforme puede no impactar demasiado ya que, si el edificio se asentase como un sólido rígido (podría ser el caso de una platea de cimentación), no habría desplazamiento relativo entre partes de la estructura y, por tanto, no habría daño. La inclinación, al igual que el asentamiento uniforme, puede no tener gran impacto si es que la edificación rotase como un sólido rígido. El asentamiento diferencial (no uniforme) tiene mayor importancia ya que, en este último, los elementos de la edificación se dañarán a causa del movimiento relativo entre partes de la estructura. Debido a esto, surge la necesidad de cuantificar la máxima deformación que pueden sufrir las estructuras, podrá medirse como distorsión angular (deflexión relativa entre dos puntos, dividida por la longitud que los separa).

2.3.1. Bjerrum (1963)

Una cuantificación sobre los daños a esperar en edificaciones que sufren asentamientos diferenciales fue dada por Bjerrum (1963). La Figura 2.14 especifica, en base a distorsiones angulares, cuál sería el daño por esperar que sufriera una edificación.

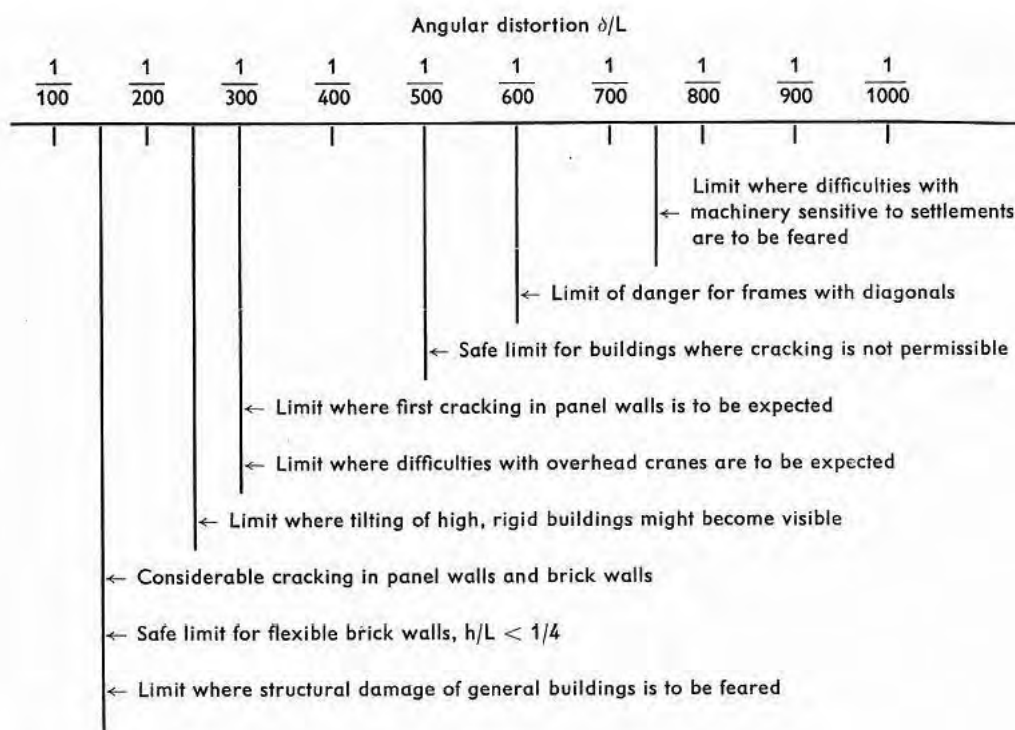


Figura 2.14. Daños en estructuras según la distorsión angular. Fuente: Bjerrum (1963)

2.3.2. Burland & Wroth (1975)

Burland & Wroth (1975) estudiaron la interacción estructura – suelo de fundación en las etapas constructiva y de servicio. Concluyeron que esta interacción depende de diversos factores, tales como el asiento elástico del suelo cargado con el peso de la estructura (corto tiempo), la consolidación a largo plazo del suelo de fundación y la redistribución de cargas y esfuerzos dentro de la estructura debido a los asientos diferenciales.

La siguiente imagen (Figura 2.15) muestra las clasificaciones de daño que Burland & Hancock (1977) propusieron. Estas formas de clasificar la intensidad de daño, que se asemejan mucho a la Escala de Mercalli para determinar la intensidad de un sismo, se basan en una descripción del daño observable y así asignar un nivel de severidad de daño recibido por parte de la estructura, que va desde 0 (inapreciable) hasta 5 (muy severo).

CATEGORÍA DE DAÑO	CLASES DE DAÑOS	DESCRIPCION DE LOS DAÑOS	ANCHURA APROXIMADA DE LAS GRIETAS [mm]*
0	Inapreciables	Fisuras casi imperceptibles	<0.1
1	Muy Ligeros	Grietas finas fácilmente reparables con pintura y decoración normal, ocasionalmente grietas mayores. Grietas en fachadas o muros de carga visibles en una inspección cuidadosa.	<1.0
2	Ligeros	Grietas que se pueden rellenar sin problemas. Grietas recurrentes pueden taparse con tratamientos específicos. Fracturas ligeras en el interior de los edificios y visibles en el exterior. Las puertas y ventanas cierran con dificultad.	<5.0
3	Moderados	La reparación de las grietas supone trabajos importantes, se deben picar y rellenar con mortero, se pueden presentar tanto en el interior como en el exterior. Las puertas y ventanas cierran difícilmente. La utilización del edificio debe ser interrumpida hasta la reparación.	<5 a 15 (muchas grietas con abertura superior a 3mm)
4	Severos	Intensas reparaciones en los tabiques. Distorsión en los marcos por lo que las puertas y las ventanas no cierran y los suelos tienen apreciables inclinaciones. En algunos casos pérdida de resistencia de las vigas. El edificio debe ser desalojado.	15 a 25
5	Muy Severos	La reparación puede suponer la reconstrucción parcial o completa del edificio. Las grietas afectan la estructura, pérdida de carga en las vigas, paredes inclinadas que requieren apeos, se rompen los marcos de ventanas. Riesgo de inestabilidades, Peligro de colapso.	>25.0

Figura 2.15. Clasificación de daños. Fuente: Burland et al (1977)

2.3.3. Boscardin & Cording (1989)

Boscardin & Cording (1989) establecieron un método para cuantificar daño en elementos estructurales horizontales que cumplan lo siguiente:

- Edificios con paredes de carga de mampostería
- Modelo basado en el análisis de viga equivalente

- El eje neutro de dicha viga coincide con uno de los bordes
- La relación entre longitud y altura es igual a la unidad

Tras calcular los parámetros de distorsión angular β y la deformación axial horizontal ϵ_h para las longitudes del edificio, se obtienen las coordenadas del punto a localizar en la siguiente figura. De acuerdo con la zona a la que pertenece el punto, se puede evaluar el riesgo de daños. La siguiente figura (Figura 2.16) permite apreciar la evaluación de daño según el criterio explicado.

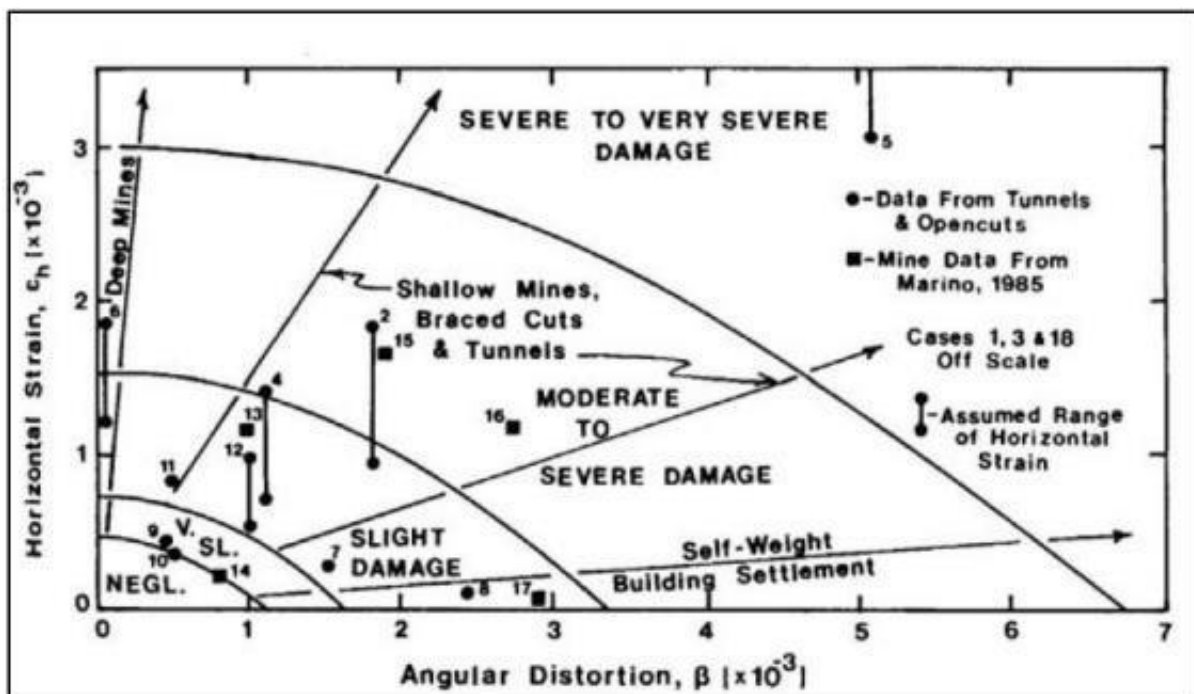


Figura 2.16. Clasificación de daños. Fuente: Boscardin et al (1989)

2.3.4. RNE (2019)

Por su parte, el Reglamento Nacional de Edificaciones (2019), Norma E.050 brinda la siguiente tabla para permitirnos saber qué esperar en cuanto a daños, según la distorsión angular que se dé. La siguiente imagen (Figura 2.17) explica el criterio del RNE.

$\alpha = \delta/L$	DESCRIPCIÓN
1/150	Límite en el que se debe esperar daño estructural en edificios convencionales.
1/250	Límite en que la pérdida de verticalidad de edificios altos y rígidos puede ser visible.
1/300	Límite en que se debe esperar dificultades con puentes grúas.
1/300	Límite en que se debe esperar las primeras grietas en paredes.
1/500	Límite seguro para edificios en los que no se permiten grietas.
1/500	Límite para cimentaciones rígidas circulares o para anillos de cimentación de estructuras rígidas, altas y esbeltas.
1/650	Límite para edificios rígidos de concreto cimentados sobre un solado con espesor aproximado de 1,20 m.
1/750	Límite donde se esperan dificultades en maquinaria sensible a asentamientos.

Figura 2.17. Descripción de daños en edificaciones. Fuente: RNE E.050 (2019)

2.4. Medidas correctivas

En CIRIA (2017) se recomienda las siguientes medidas que permiten minimizar los movimientos del terreno en excavaciones:

- Haber un adecuado empotramiento por parte de la pantalla en un estrato competente, tal que se satisfaga la estabilidad lateral y vertical
- Tras empezar la excavación, instalar el primer arriostramiento lo más pronto posible
- Reducir al mínimo la profundidad de excavación bajo los niveles de arriostramiento, antes de ser instalados
- Evitar retrasos entre la construcción del muro de contención y el sistema de arriostres
- Pretensar los arriostramientos
- Evitar que los bombeos para rebajar el nivel freático laven los finos que haya en el suelo

Algunas recomendaciones adicionales para proteger estructuras cercanas a una zona de corte podrían ser las siguientes:

- Reforzar la estructura tal que resista los esfuerzos adicionales que le inducen las subsidencias en el terreno.
- Instalar una barrera física entre la estructura y la zona de corte para que la magnitud de los asentos se vea reducida.

Reforma Coruña (2014) sugiere cómo reconocer si los daños en la estructura se deben a un asiento diferencial. Se debe analizar las fisuras y grietas de las paredes y ver si conforman un arco cuyo centro es la esquina de la pared. Este debería ser más ancho cerca al piso e ir afinándose al desplazarse hacia arriba. Las Figuras 2.18 y Figura 2.19 muestran, a continuación, dos ejemplos de grietas debidas a un asiento diferencial.



Figura 2.18. Grieta por asiento diferencial. Fuente: <https://reformacoruna.com/grieta-asiento-diferencial-edificio/>



Figura 2.19. Grieta por asiento diferencial. Fuente: <https://reformacoruna.com/grieta-asiento-diferencial-edificio/>

Ante daños de este tipo se recomienda, entre otras, las siguientes técnicas de reforzamiento de terreno:

- Recalces de cimentaciones con micropilotes: se deben ejecutar unas perforaciones profundas, pero de pequeño diámetro y colocare en ellas una armadura de acero para luego ser llenadas con mortero o lechada de cemento.
- Inyecciones de jet grouting: se inyecta cemento a gran presión para consolidar el terreno se recomienda mejor para grandes edificaciones que para pequeñas.
- Inyecciones de resinas expansivas: se aumenta la presión y resistencia en el suelo para estabilizar la cimentación.

Ingeniero de caminos (2011) recomienda algunas técnicas más para controlar los asientos:

- Emparrillados: para terrenos con baja capacidad de carga y alta deformabilidad se puede recoger los pilares de la estructura en una cimentación única que consista en zapatas corridas entrecruzadas en malla ortogonal y de gran rigidez, tal como se muestra en la Figura 2.20. Se consigue así atenuar asientos diferenciales, ya que este gran bloque actuará como un sólido rígido.



Figura 2.20. Emparrillado. Fuente: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/01/15/emparrillados-de-cimentacion/>

- Cimentación compensada: para terrenos con baja capacidad portante se puede reemplazar un volumen de suelo bajo los cimientos por un volumen equivalente de un material de menor densidad. De esta manera se reduce el peso del terreno y se compensa parcialmente las cargas transmitidas por la edificación.

2.5. Diseño de pantallas

Para el diseño de pantallas han sido sugeridos y empleados distintos métodos a lo largo de los años. Justo, Rodríguez & Jaramillo (1994) clasificaron estos métodos en los siguientes grupos:

- Métodos de equilibrio límite: se basan en las ecuaciones mencionadas en el ítem 2.1.1. pero no consideran las deformaciones en el muro (método de Blum).
- Métodos semiempíricos: son métodos de equilibrio límite a los que se les añade modificaciones empíricas basadas en la experiencia.
- Métodos del coeficiente de balasto: consideran que el suelo interactúa con el muro y que la reacción del suelo en un punto de la pantalla depende únicamente del desplazamiento de dicho punto.
- Métodos de elementos finitos: surgieron para suplir las deficiencias de los métodos anteriores.

2.5.1. Método de Blum (1950)

El método de Blum (Zigurat, 2019) ejemplifica un método de diseño de pantallas por equilibrio límite. Se propone que en el trasdós del muro se produce el empuje activo y en el intradós, el pasivo. Las cargas distribuidas de los empujes desaparecen a partir de un punto determinado dentro de la parte empotrada; Blum nota que en dicho punto aparece simplemente una contrarreacción, es decir, una fuerza que proviene desde el trasdós. Puede intuirse que este punto actuará como un pivote o rótula en un modelo idealizado.

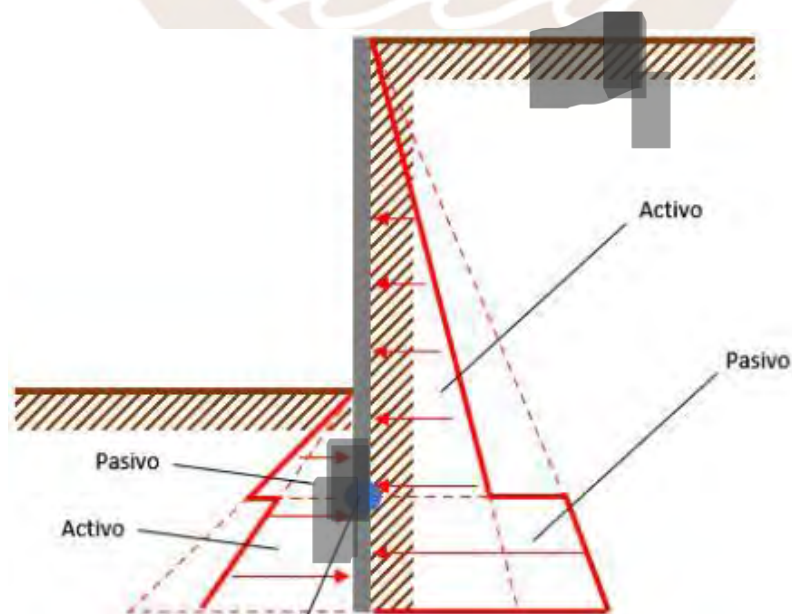


Figura 2.21. Observación de Blum en pantallas empotradas y sin arriostres. Fuente: Propia

La Figura 2.21, antes mostrada, permite notar que el punto azul actúa como un centro de rotación respecto al cual la pantalla gira, esto se debe a las fuerzas de empuje mostradas en la Figura 2.8. Por su parte, en la Figura 2.22 se muestra la distribución de fuerzas en una pantalla empotrada (se incluye la contrarreacción) que reemplaza a las cargas distribuidas bajo el punto pivote.

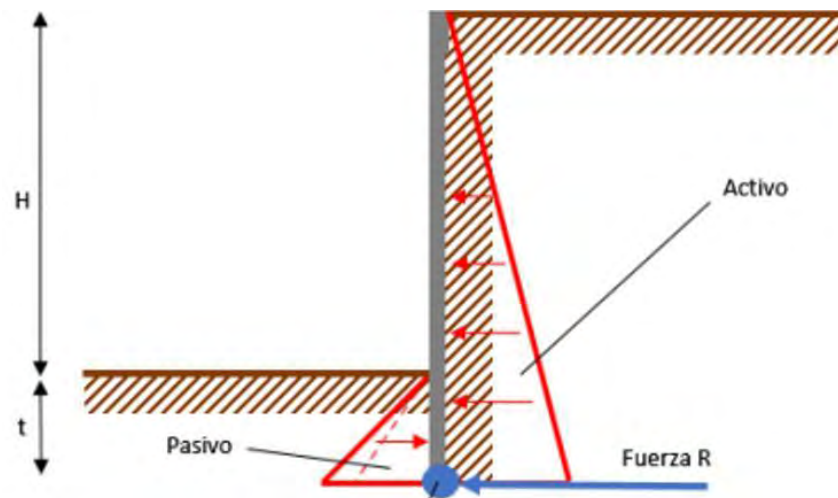


Figura 2.22. Equilibrio. Fuente: Propia

Al considerar las ecuaciones de la ley de empujes y al realizar un análisis de equilibrio de momentos respecto al punto C se obtiene la distancia desde el fondo de excavación hasta el punto de rotación de la pantalla. La Ecuación 2.3 es una simplificación en la que se considera terreno homogéneo, sin cohesión y sin agua, se obtuvo tras realizar el análisis estructural de la pantalla.

Ecuación 2.3

$$a = \frac{K_0 - 1}{3} \frac{K_0}{a}$$

Blum (1950) propone aumentar en un veinte por ciento la longitud a_0 para que

Ecuación 2.4

$$a' = 0.2 \times$$

Al sumar ambos valores se obtendrá la profundidad de empotramiento.

Ecuación 2.5

$$z_{\text{á}} = z + z' = 1.2 \times$$

De lo anterior, se puede deducir que la longitud de empotramiento de la pantalla depende de la profundidad de excavación y de los coeficientes de empuje del suelo (los cuales, por su parte, dependen del ángulo de fricción interna).

Luego de realizar el análisis estructural del muro pantalla, puede obtenerse los siguientes valores que se debe tener en cuenta en el diseño:

El máximo momento flector está dado por:

Ecuación 2.6

$$M_{\text{má}} = \frac{1}{6} \times \gamma \times K_{\text{a}} \times z_{\text{á}}^2 \times \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{K_{\text{p}}}{K_{\text{a}}}} - 1\right)}$$

La profundidad a la que se encuentra este máximo momento ($z_{\text{á}}$) está dada

Ecuación 2.7

$$z_{\text{á}} = z \frac{1}{K_p - 1}$$

2.5.2. Cálculo de pantallas con apoyos

El primer caso es una pantalla con un único arriostre en la cabeza. La siguiente imagen (Figura 2.23) muestra el efecto del arriostre sobre la pantalla y las reacciones del suelo sobre esta.

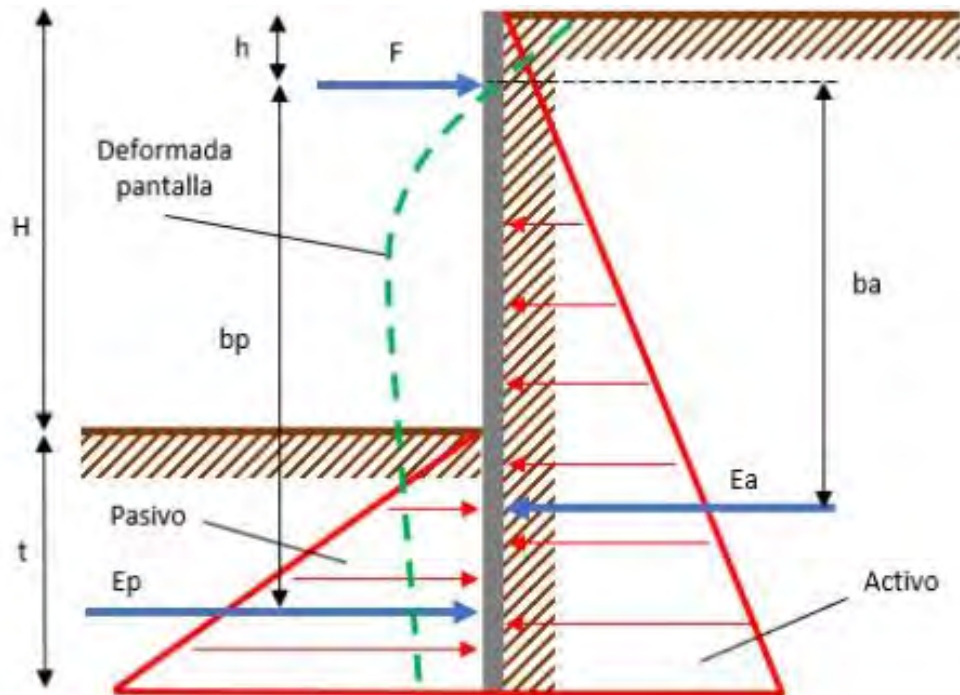


Figura 2.23. Pantalla con arriostre en la cabeza. Fuente: Propia

Realizando el análisis estructural de la pantalla y asumiendo terreno homogéneo, sin fricción con el muro y que los empujes se determinan con la teoría de Rankine se obtiene la ecuación para calcular el mínimo empotramiento:

Ecuación 2.8

$$\frac{1}{2} \times \gamma \times (H + t)^2 \times K_a \times \left(\frac{2}{3} \times (z_0 + z_1) - a \right) = \frac{1}{2} \times \gamma \times z_0^2 \times K_a \times \left(\frac{2}{3} \times z_0 + z_1 - \right.$$

La profundidad a la que se da el máximo momento flector, desde la cabeza de la pantalla, está dada de la siguiente manera:

Ecuación 2.9

$$z_0 = \sqrt{\frac{2 \times}{\gamma \times K_a}}$$

El valor F en la Figura 2.23 es la fuerza que ejerce el arriostre, se calcula como la diferencia entre magnitudes del empuje activo y el pasivo.

El siguiente caso se trata de pantallas con más de un arriostre. En estos casos, ya no se requiere satisfacer la condición de estabilidad de la pantalla y del terreno contenido.

Caquot (1937) propuso no considerar fijas las posiciones de los arriostres y que su posición dependa del mejor aprovechamiento de la resistencia a flexión de la pantalla tal que las reacciones de los anclajes sean iguales. Esto posee la ventaja de aplicarse a cualquier condición de terrenos, pero se complica en que la separación entre anclajes varía y se reduce cuando la profundidad aumenta.

Magnel (1948) propuso asumir al empuje pasivo como el doble del activo (bajo el punto de rotación de la pantalla), suponer un apoyo ficticio bajo el fondo de excavación y considerar a la pantalla como una viga apoyada, la cual es afectada por los empujes pasivos del trasdós. Esto, siempre que no exista rozamiento entre pantalla y terreno ni cohesión en este último. Este método posee la ventaja de su simplicidad, sin embargo, los resultados son excesivamente conservadores.

La siguiente imagen (Figura 2.24) muestra una pantalla con varios apoyos y las reacciones del terreno sobre ella.

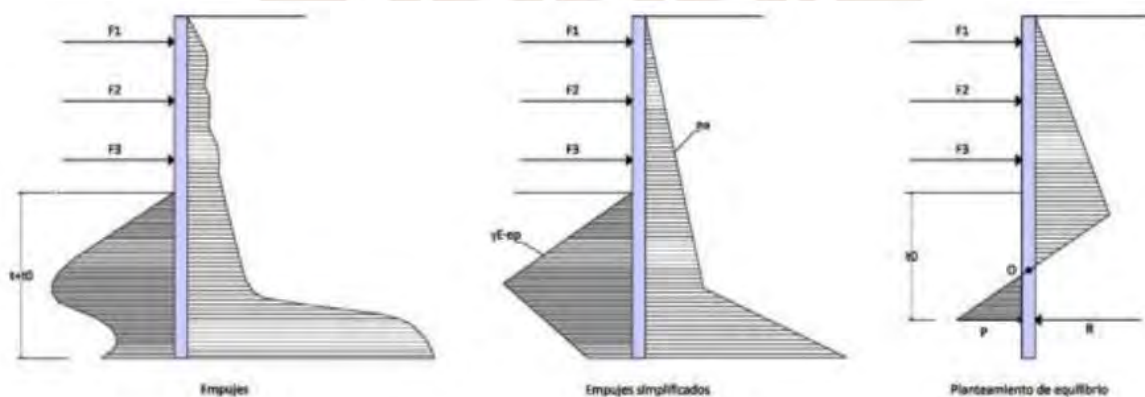


Figura 2.24. Equilibrio y comportamiento de una pantalla con varios niveles de arriostramiento. Fuente: García (2015)

2.6. Métodos de análisis de subsidencias

De manera análoga a la clasificación de métodos de diseño de pantallas se reconoce una clasificación de métodos de estimación de movimientos del terreno. Respecto a los movimientos producidos podría decirse que dependen de muchas variables y no se pueden predecir de manera exacta. Sin embargo, los movimientos pueden estimarse de manera cuantitativa por medio de las siguientes familias de métodos:

- Métodos empíricos: están basados en experiencias reales en obras de las que se extrajo datos de campo.
- Métodos semiempíricos: consisten en relaciones empíricas obtenidas de la deflexión del muro pantalla.
- Métodos numéricos: son modelos computacionales que consideran la deformación del muro pantalla.

2.6.1. Métodos empíricos

Los efectos que puede ocasionar una excavación en el terreno y sobre estructuras próximas han sido estudiados por diversos autores a lo largo de la historia. Los primeros criterios sobre movimientos esperables en los contornos de recintos de excavaciones apantalladas fueron establecidos por Peck (1969). Desde entonces ha habido diversos intentos de predecir los desplazamientos horizontales y verticales que pueden tener lugar en este tipo de construcciones. La siguiente ilustración (Figura 2.25) muestra el primer intento de predecir deformadas de pantallas y subsidencias en el terreno.

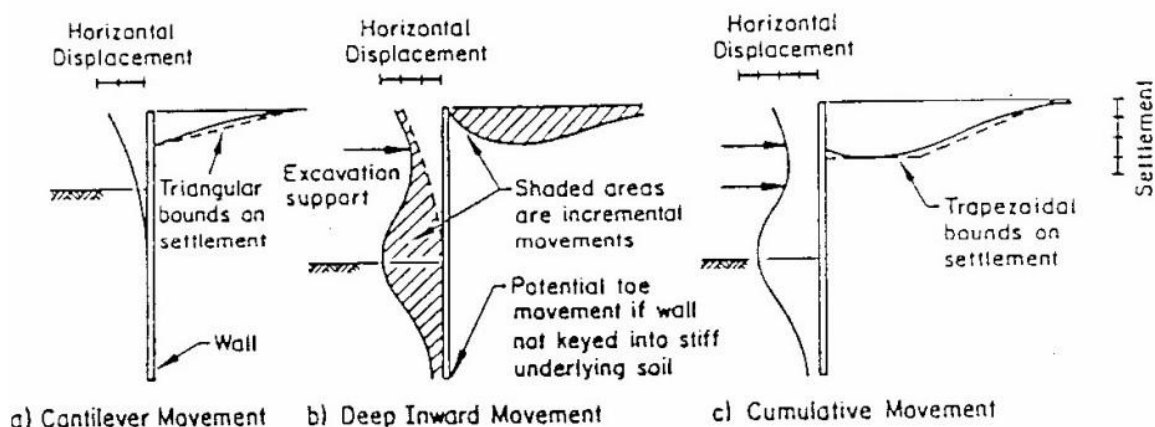


Figura 2.25. Deformación en pantallas y movimientos inducidos en el trasdós. Fuente: Peck (1969)

2.6.1.1. Método de Peck (1969)

Entre los métodos empíricos se encuentra el método de Peck. Basándose en observaciones y mediciones en cortes apantallados para relacionar el cociente que resulta de la relación entre asentamiento y la máxima profundidad de excavación (en %) con la relación de la distancia a la excavación y la máxima profundidad de excavación, se obtuvo una gráfica en la que se aprecia la curva de asientos según el tipo de suelo estudiado.

Así, tal como se muestra en la Figura 2.26, los asentamientos y la zona de influencia son menores en suelos arenosos (Zona 1) que en suelos de arcillas blandas.

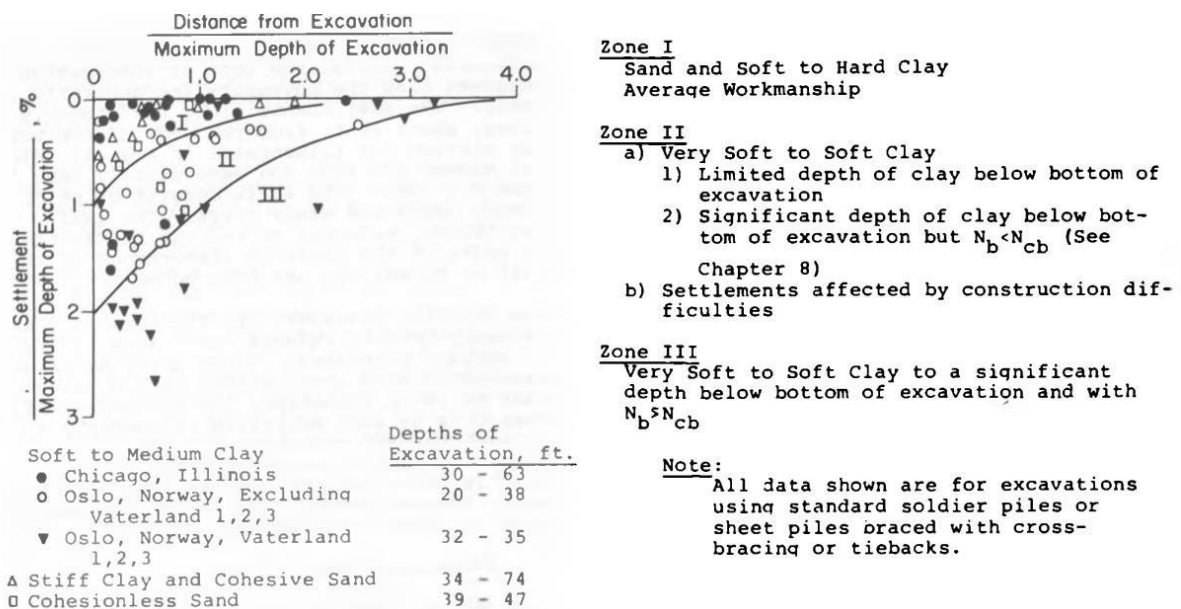


Figura 2.26. Relación de subsidencias con distancia a excavación. Fuente: Peck (1969)

La siguiente imagen (Figura 2.27) muestra magnitudes de subsidencias frente a la distancia a zona de excavación para edificaciones con uno o más sótanos construidos sobre suelo denso; esta vez sin relacionar con la profundidad de excavación. Se aprecia que la magnitud de las subsidencias se intensifica cuanto mayor es el número de sótanos.

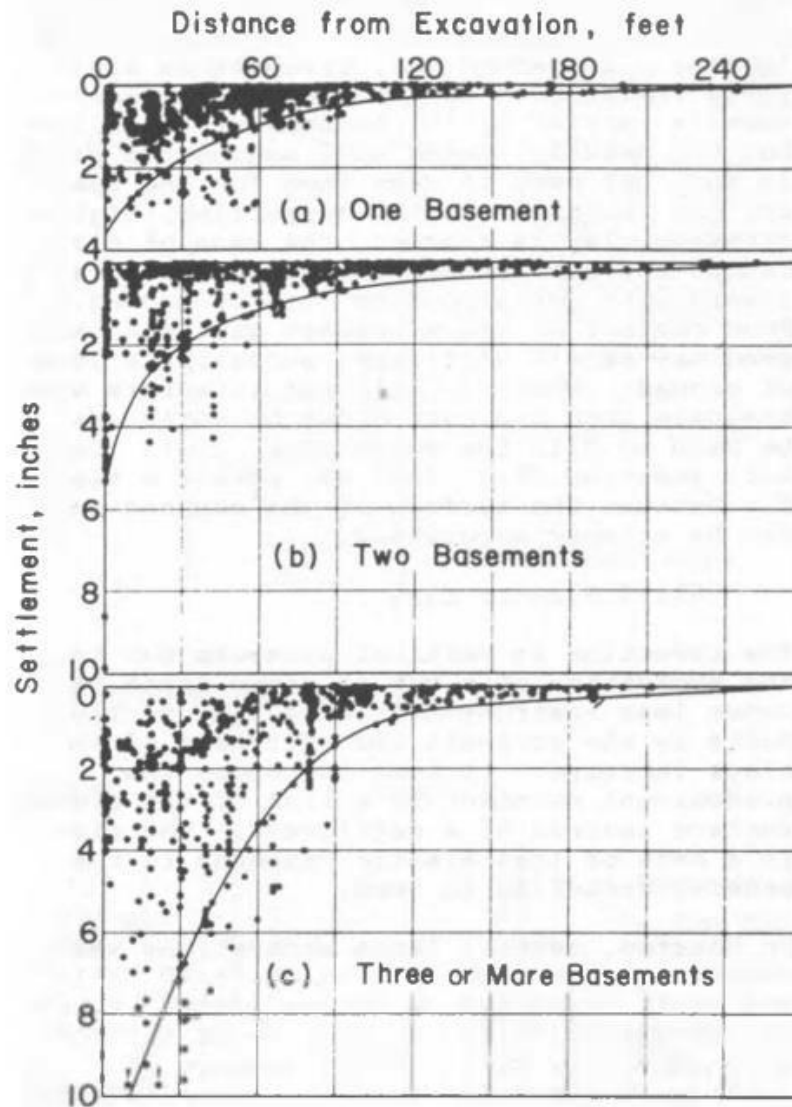


Figura 2.27. Subsidiencias vs distancia a excavación. Fuente: Peck (1969)

2.6.1.2. Método de Bowles (1988)

Bowles (1988) propone lo siguiente:

- 1) Calcular el volumen del suelo que se desplaza
- 2) (V_d) Estimar la distancia lateral de la zona de influencia
- 3)

Para esto se considerará H como la altura de la pared a la línea de dragado, también

llamada profundidad de excavación, y D como una profundidad adicional a H . En

Ecuación 2.10

$$\delta_{\phi} =$$

Ecuación 2.11

$$\delta_{\phi} = 0.5 \times \delta \times \tan(45 - \frac{\phi}{2})$$

Con estos dos parámetros se puede calcular el alcance de la zona de influencia (D) por medio de la siguiente ecuación.

Ecuación 2.12

$$D = (\delta_{\phi} + \delta_{\phi}) \times \tan(45 + \frac{\phi}{2})$$

Para calcular el asentamiento de la superficie en el borde del muro de excavación se utiliza la Ecuación 2.13

Ecuación 2.13

$$\delta_{\phi} = \frac{2 \times \delta_{\phi}}{D}$$

Para calcular los asientos verticales del suelo a cualquier distancia de la excavación se asume una distribución parabólica como la mostrada en la Ecuación 2.14

Ecuación 2.14

$$\delta_i = \delta_{\phi} \times \frac{x^2}{D^2}$$

El valor “x” es la distancia desde el límite de D en el trasdós hasta el punto en el que se desea conocer el asentamiento del terreno.

En la figura mostrada a continuación (Figura 2.28) se aprecia la longitud D y la distancia x para un punto determinado, en el cual se desea conocer la magnitud del asiento. También, se aprecia δ_{ϕ} en el límite del terreno al alcanzarse la zona de corte y δ_i como el asiento que

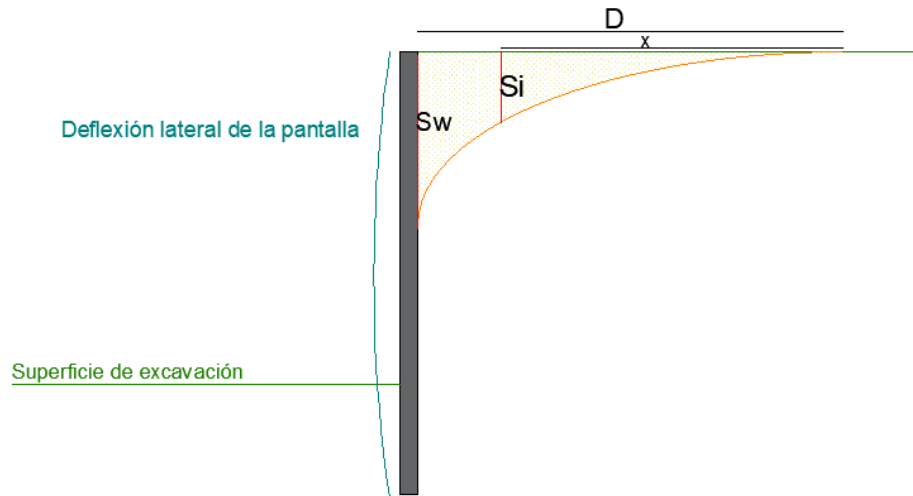


Figura 2.28. Subsidiencias en el trasdós de un corte apantallado. Fuente: Propia.

2.6.1.3. Método de Clough & O'Rourke (1990)

Clough & O'Rourke (1990) proponen una distribución diferente para excavaciones en arenas y arcillas; una distribución poligonal. En su propuesta, el máximo asiento vertical se da justo tras el muro de contención y, dependiendo del tipo de suelo, el perfil de asientos tendrá forma triangular o trapezoidal. La Figura 2.29 muestra la propuesta de los autores.

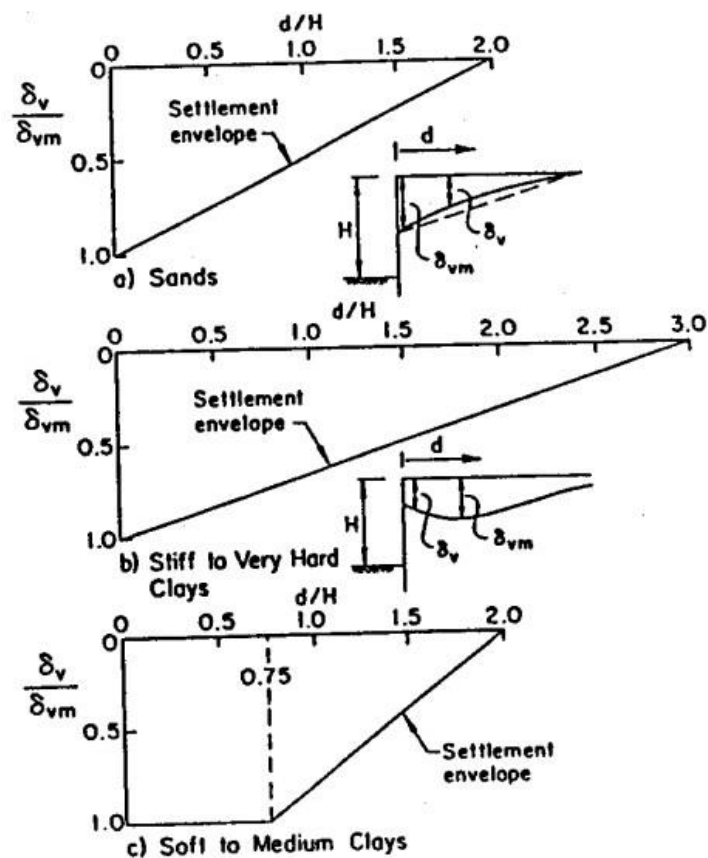


Figura 2.29. Subsidiencias en arenas y arcillas. Fuente: Clough & O'Rourke (1990)

2.6.1.4. Método de Hsieh & Ou (1993)

Basados en diez casos históricos en Taipei, Taiwán, Hsieh & Ou (1993) observaron que los movimientos verticales del suelo pueden extenderse hasta una considerable distancia. Notaron que los asentamientos tras el muro no son uniformes y que aumentan con la profundidad de excavación.

En la imagen mostrada a continuación (Figura 2.30), se muestran dos tipos generales de asentamientos: tipo cóncavo (la máxima subsidencia se da cerca a la pantalla) y tipo cóncavo (la máxima subsidencia se da a una cierta distancia de la pantalla). En el caso de una pantalla en voladizo, el suelo suele deformarse de manera cóncava. En cambio, la presencia de algún arriostre en la cabeza puede hacer que se genere deformación cóncava del terreno.

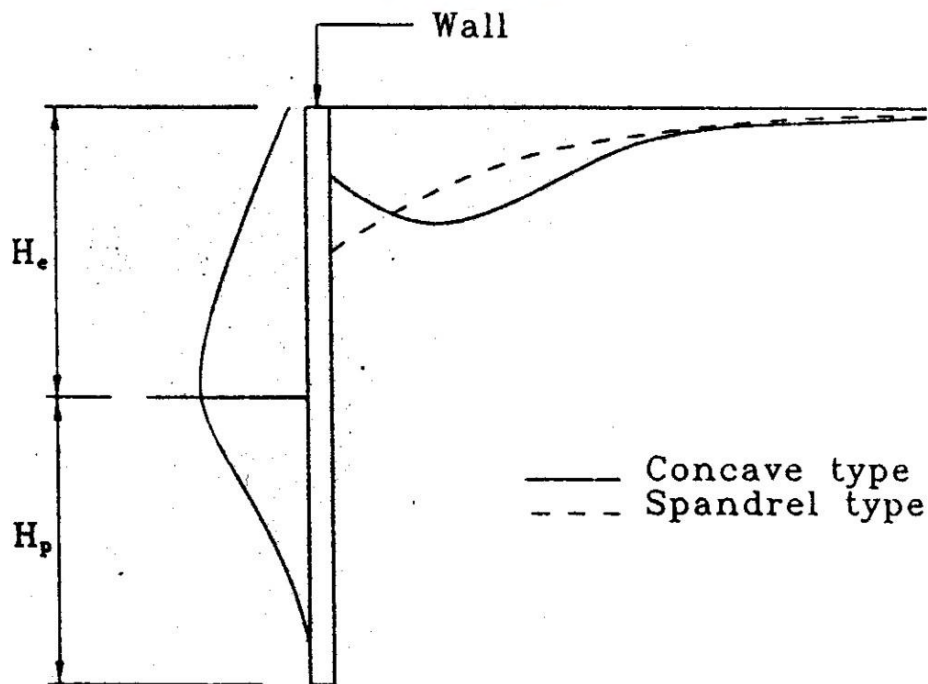


Figura 2.30. Perfil de asentamientos. Fuente: Hsieh & Ou (1993)

En la Figura 2.31 se permite ver cómo se deformarán las pantallas. La imagen de la izquierda representa a una pantalla en voladizo (corresponde a una deformada cóncava del terreno en el trasdós) y la de la derecha, a una pantalla con arriostre en cabeza (corresponde a una deformada cóncava del terreno).

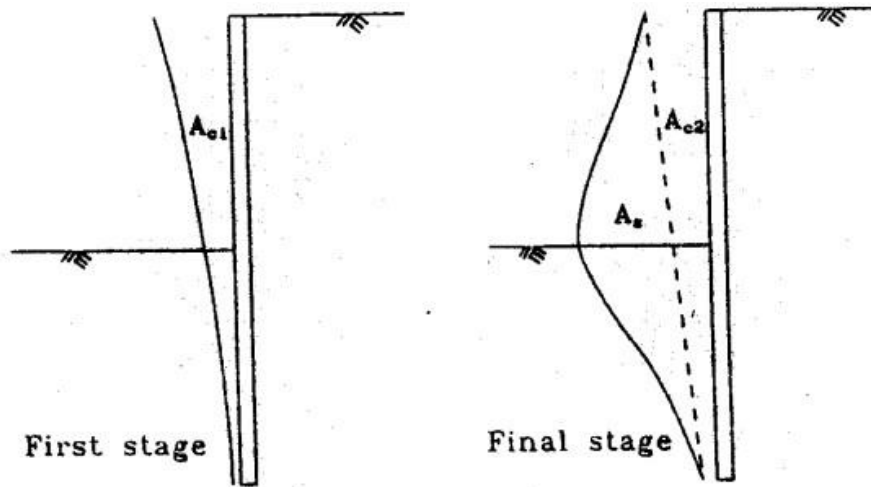


Figura 2.31. Deflexiones de pantallas. Fuente: Ou et al. (1993)

La zona de asientos se define como *apparent influence range* (AIR). Los asientos fuera de este rango son despreciables y no afectan a las estructuras presentes. Se emplea la Ecuación 2.15 para calcular este rango aparente de influencia.

Ecuación 2.15

$$Z_{AIR} = (Z_1 + Z_2) \times \tan(45^\circ - \frac{\psi}{2}) \leq Z_1$$

Donde Z_1 es la profundidad de excavación y Z_2 , la profundidad de empotramiento.

La siguiente figura (Figura 2.32) muestra lo que se propone para deformadas cóncavas de terreno (muros arriostrados). En esta imagen, los números en el eje de las ordenadas se corresponden a la relación que tenga un asiento determinado con el asiento máximo producido.

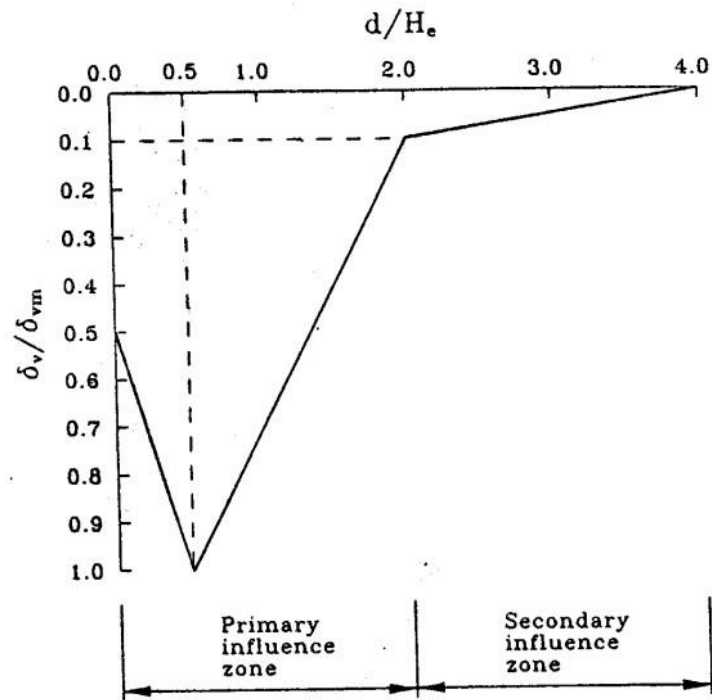


Figura 2.32. Asientos para pantalla con arriostre. Fuente: Hsieh & Ou (1993)

Además, se propone la siguiente gráfica (Figura 2.33) para asientos con una pantalla empotrada:

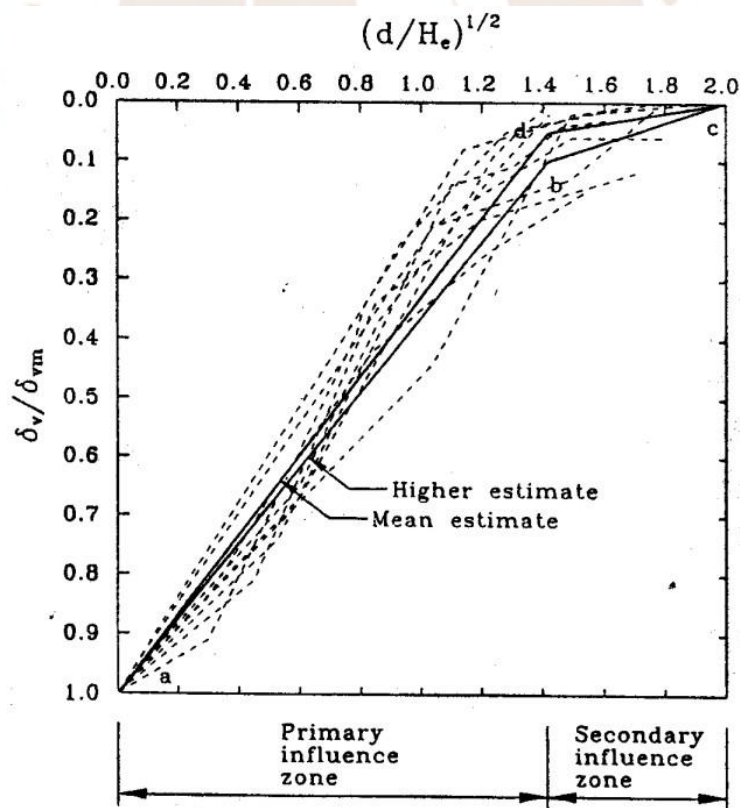


Figura 2.33. Asientos para pantalla sin arriostre. Fuente: Ou et al. (1998)

También sugirieron una relación entre las máximas deflexiones horizontales y los asentamientos máximos verticales, ambos normalizados a la profundidad excavada (Figura 2.34):

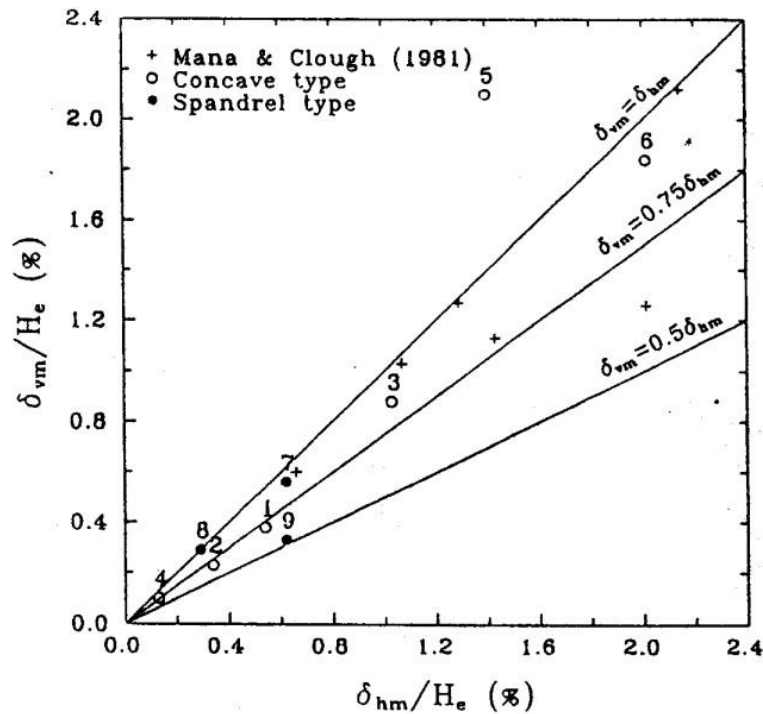


Figura 2.34. Relación entre máximo asiento vertical y máxima deflexión horizontal. Fuente: Ou et al. (1998)

2.6.1.5. Método de Long (2001)

Long (2001) analizó deflexiones laterales en pantallas empotradas. En diferentes casos de estudio, hizo variar la rigidez del sistema y los espesores de las capas de suelo blando del trasdós de las excavaciones. Para factores de seguridad ante levantamiento de fondo mayores a 3, la proporción deflexión horizontal máxima sobre profundidad de excavación y la rigidez del sistema guardan relaciones lineales. Además, estas relaciones dependen del espesor de suelo blando del trasdós. A continuación, se observan dichas relaciones (Figura 2.35).

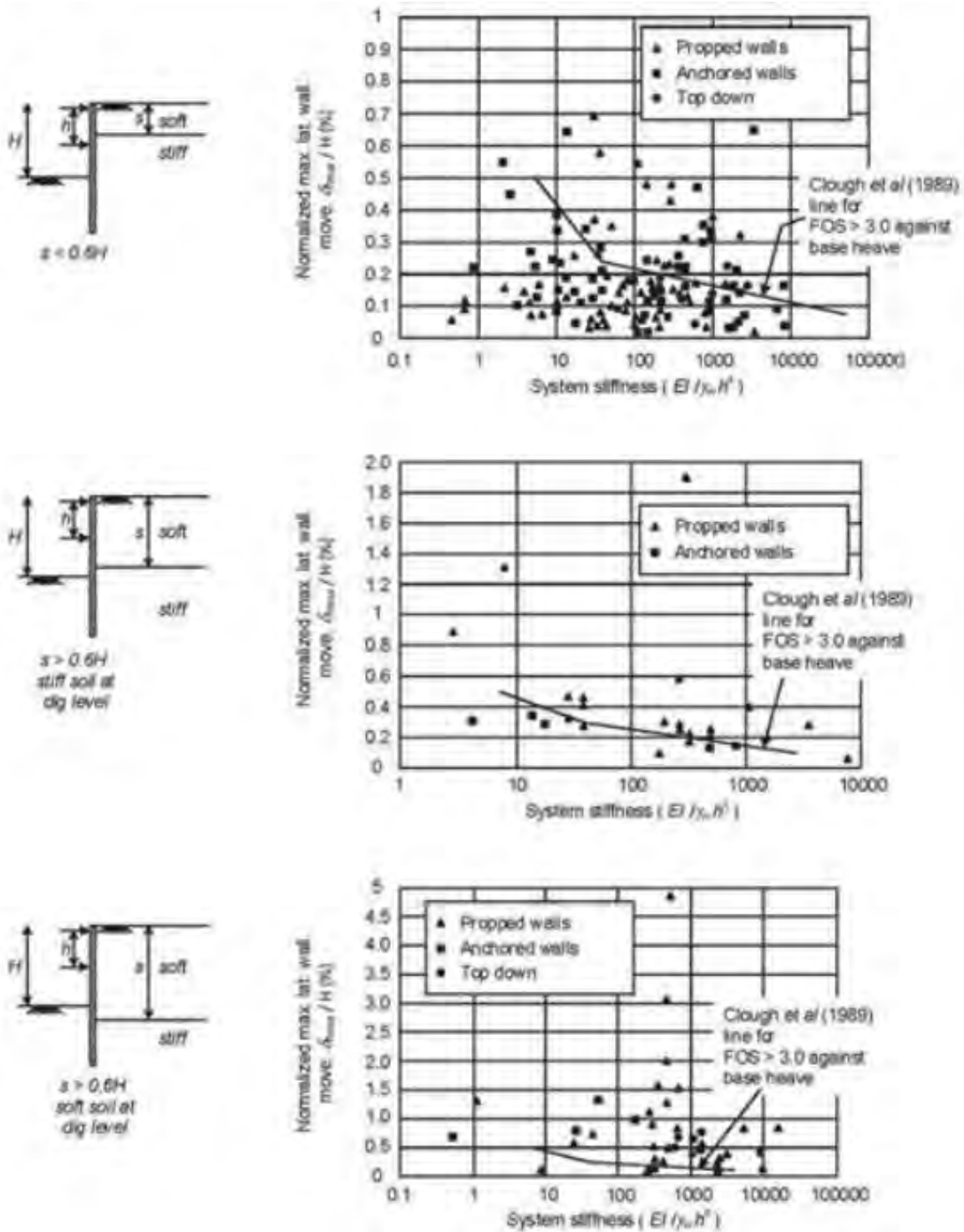


Figura 2.35. Máxima deflexión horizontal vs rigidez de sistema de soporte. Fuente: Long (2001)

2.6.1.6. Método de Oteo (2003)

Los resultados publicados por Oteo (2003) guardan similitudes con Peck (1969) y O'Rourke (1990). La siguiente ilustración (Figura 2.36) muestra la relación que puede tener la proporción Δ/H con el tipo de terreno (Δ corresponde a la máxima subsidencia). Además, a esto está relacionada la longitud de la zona de influencia de subsidencias.

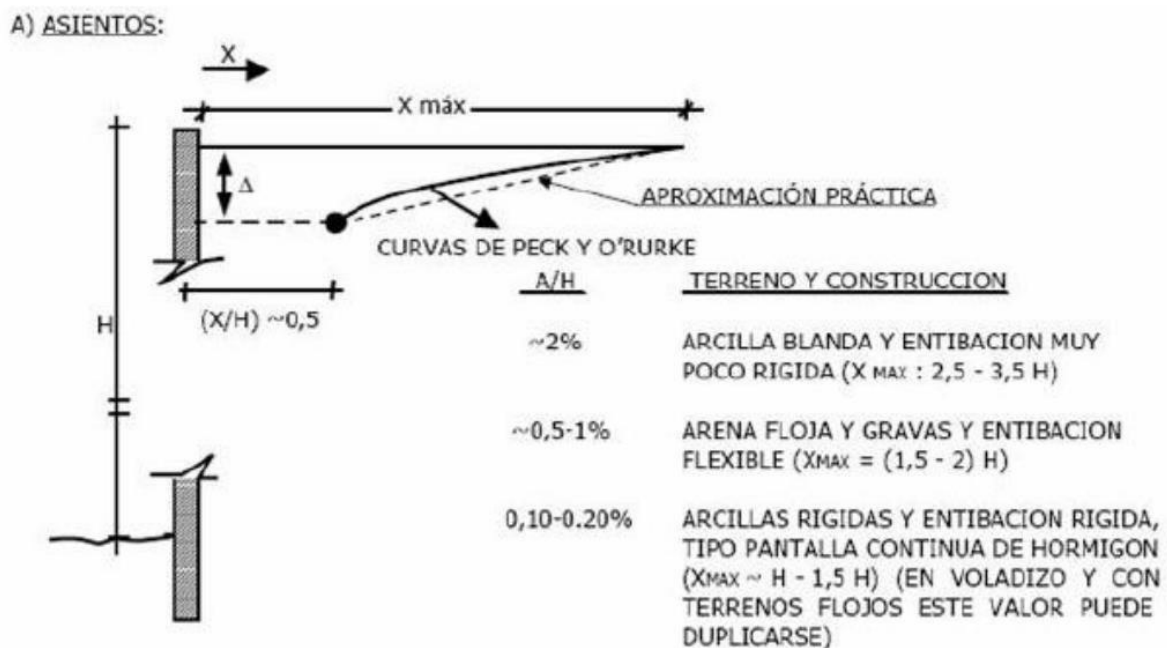


Figura 2.36. Subsidencias ocasionadas por excavaciones apantalladas. Fuente: Oteo (2003)

A continuación, se muestra una geometría aproximada de desplazamientos horizontales debidos a la flexibilidad lateral de los muros de contención en la Figura 2.37. El punto de máximo desplazamiento variará dependiendo de la presencia o no de arriostres.

B) MOVIMIENTOS HORIZONTALES:

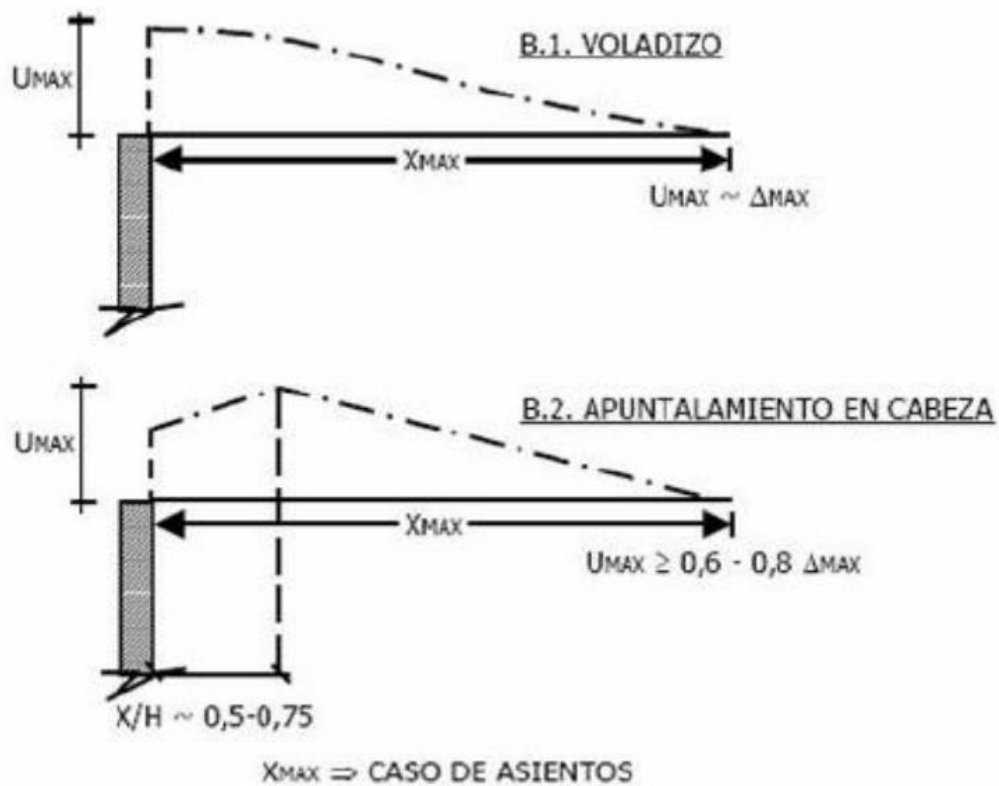


Figura 2.37. Movimientos horizontales en cortes apuntallados. Fuente: Oteo (2003)

Si se adopta lo propuesto en las dos figuras anteriores y si se considera que el volumen de movimientos verticales se corresponde con el de movimientos horizontales, se cumplirá la siguiente ecuación:

Ecuación 2.16

$$\delta_{a} = \delta_h \times \lambda$$

Esta ecuación relaciona al máximo asiento con el máximo desplazamiento horizontal por medio de un parámetro, el cual depende de la distancia del punto de medida al borde de excavación. La siguiente tabla muestra los valores que podría tomar λ :

Tabla 2.1: Valores de λ . Fuente: Oteo (2003)

Pantalla	Distancia a excavación	λ
Arriostre en cabeza	1.5H	0.50
	H	0.60
	0.5H	0.75
Voladizo	1.5H	0.25
	H	0.30
	0.5H	0.375

2.6.1.7. Ventajas y desventajas

A continuación, se procede a mostrar una tabla que resume las ventajas y desventajas que tiene cada método antes expuesto.



Tabla 2.2: Ventajas y desventajas de métodos empíricos. Fuente: Propia

Método	Ventajas	Desventajas
Peck (1969)	Sus cálculos para determinar la zona de influencia y el asiento máximo son muy sencillos de efectuar.	Es demasiado conservador: exagera el asiento máximo.
Bowles (1988)	Se puede calcular el asiento a cualquier distancia dentro de la zona de influencia, no solo el máximo asiento en el trasdós, reemplazando la variable en la ecuación de la parábola.	Sus cálculos son más elaborados. No es tan sencillo calcular el volumen de suelo desplazado (considerando que el cálculo se haga manualmente). Considera el ancho de excavación (a diferencia de los demás autores), un parámetro que hace variar mucho los resultados que se puedan obtener.
Clough & O'Rourke (1990)	Sus cálculos para determinar la zona de influencia y el asiento máximo son muy sencillos de efectuar.	El perfil de asientos que brinda es simplificado: lo basa en una línea recta (en caso de suelos granulares) y trapecios para otro tipo de suelos.
Hsieh & Ou (1993)	El perfil de asientos que brinda permite obtener una zona primaria de influencia y una secundaria. Permite, a diferencia de los antes mencionados, estimar también subsidencias para muros arriostrados en la cabeza.	Se requiere el máximo asiento vertical del suelo, el cual se debe hallar en función de la máxima deflexión horizontal de la pantalla.
Oteo (2003)	Brinda un rango entre valores máximos y mínimos para la máxima subsidencia y la extensión de la zona de influencia. Sus cálculos son sencillos de realizar. Brinda una aproximación de lo que podría ser la deformada del muro pantalla: empotrado o arriostrado. Se tiene también una relación entre el máximo asiento vertical y la máxima deflexión horizontal.	Su perfil de asientos es simplificado, a comparación con otros métodos como Bowles y Hsieh.

2.6.2. Métodos semiempíricos

2.6.2.1. Método de Winkler (1867)

Los métodos semiempíricos, como el método de Winkler (1867), estiman la deflexión de la pantalla. Por ello, consisten en obtener las deformaciones del terreno a partir de los desplazamientos que se obtienen de la pantalla.

Winkler (1867) supone que la deformación en un punto del terreno es directamente proporcional a la presión aplicada en dicho punto (de manera similar a un resorte). Se obtendría lo siguiente:

Ecuación 2.17

$$q(x) = K \times w(x)$$

El valor de “q” equivale a la carga aplicada a lo largo del muro, w equivale a los desplazamientos de la pantalla y K es el coeficiente de balasto.

Determinar el valor del coeficiente de balasto presenta cierto grado de dificultad. Este valor depende de la magnitud de esfuerzos y de las dimensiones del área; no es intrínseco al material y puede variar en el tiempo. Existen algunos softwares que permiten calcular pantallas por este método. La Figura 2.38 muestra la simplificación que este método hace al considerar al suelo como un conjunto de muelles elásticos.

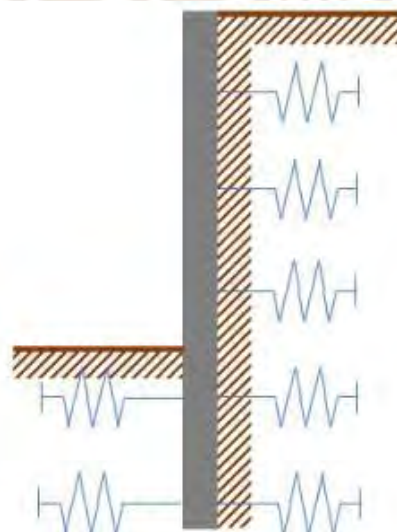


Figura 2.38. Simplificación de Winkler (1867). Fuente: Propia

2.6.3. Métodos numéricos

Estos métodos permiten modelar situaciones complejas con gran cantidad de variables que los demás métodos no consideran. Es por esto por lo que se requiere definir una mayor cantidad de datos de entrada.

Además de las propiedades geotécnicas, estos métodos toman en cuenta los cambios de tensiones internas en el terreno y la deformación de la pantalla. Se considera, asimismo, al terreno como un medio continuo pero discretizado con una malla de triángulos y nodos.

Estos métodos permiten obtener parámetros como esfuerzos, empujes, deformaciones de la pantalla y asientos verticales. Son bastante útiles, pero requieren programas de ordenador especializados en ello y operadores de gran experiencia en estos métodos.



3. Análisis de subsidencias

Se procederá, a continuación, a utilizar elementos finitos para verificar la similitud con algunos métodos empíricos, que anteriormente se mencionaron en el ítem 2.6.1, y compararlos, además, entre ellos.

El caso base a analizar será una excavación de 6 m de profundidad contenida por una pantalla de 13 m de longitud. No hay presencia de nivel freático ni se consideran arriostres.

3.1. Modelo Plaxis

Se modeló la excavación mostrada en la Figura 3.1:

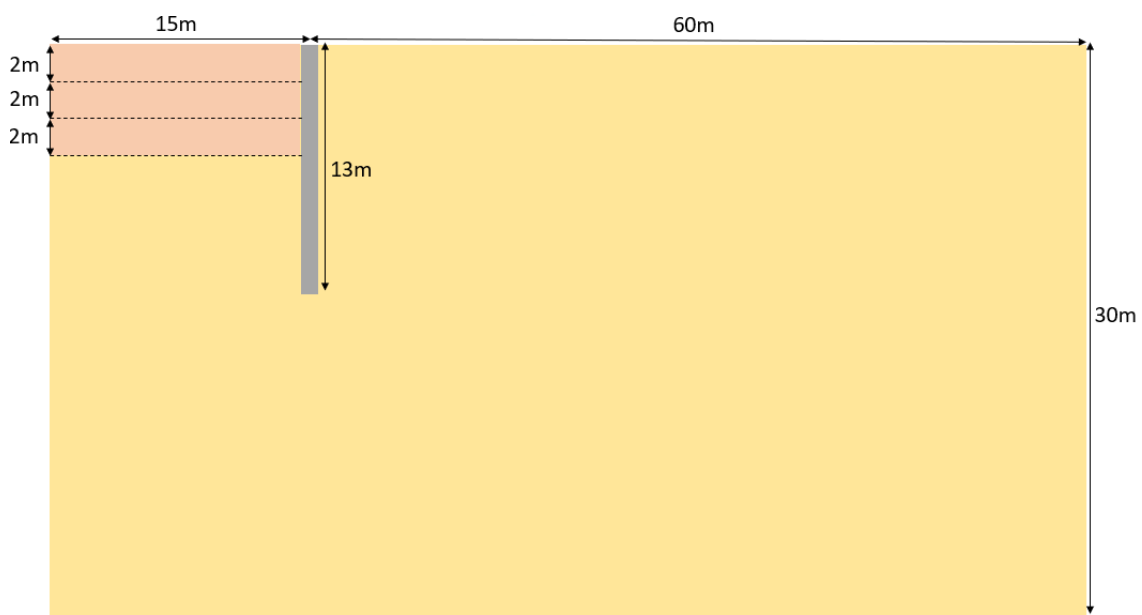


Figura 3.1: Caso base a modelar. Fuente: Propia

El modelo de la excavación fue de la siguiente manera:

- El origen del sistema cartesiano se colocó en la ubicación de la pantalla, en la superficie.
- Se modeló una pantalla de 13 m: 6 m de profundidad de excavación (dividida por tres etapas de 2 m cada una) y 7 m de empotramiento.
- El terreno abarcó horizontalmente desde -15 hasta +60 m y verticalmente desde -15 hasta 0 m.
- La excavación abarcó horizontalmente desde -15 hasta 0 m y se realizó en fases de 2 m de profundidad, cada una.

- Se consideró un modelo de tipo Hardening soil porque permitió ingresar un módulo de deformación en carga y uno en recarga, esto controla el rebote elástico del fondo de excavación y es más adecuado para este tipo de problemas.

En esta imagen (Figura 3.2) se muestra las propiedades del proyecto:

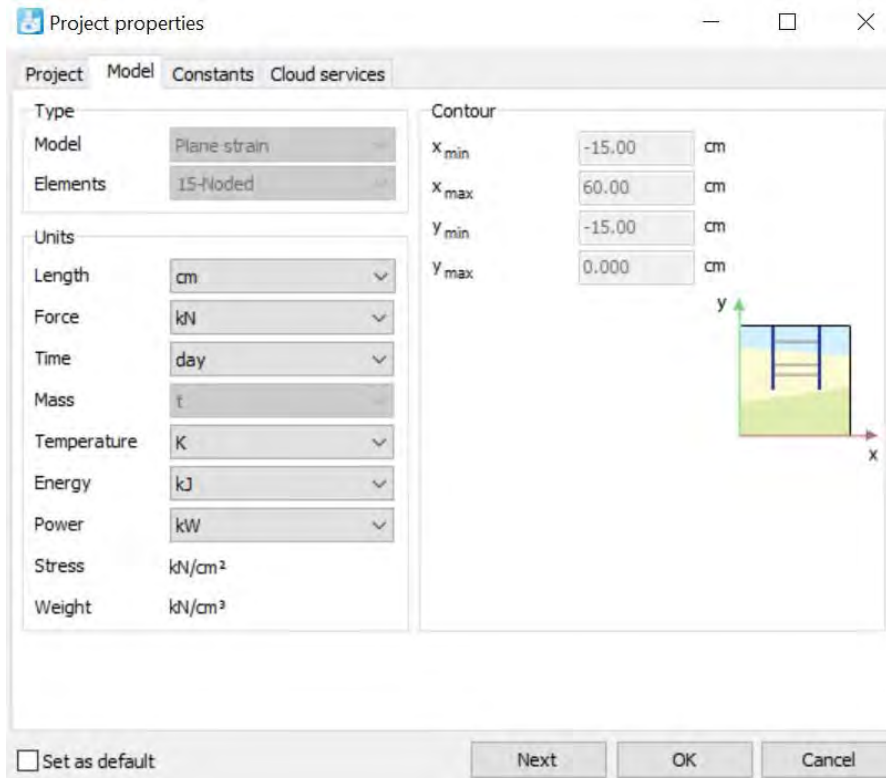


Figura 3.2: Propiedades del modelo. Fuente: Propia

Las características que se le dio al terreno son las mostradas en las siguientes imágenes (Figura 3.3 y Figura 3.4).

Material set		
Identification	Arena	
Material model	Hardening soil	
Drainage type	Drained	
Colour	RGB 222, 234, 134	
Comments		
General properties		
γ_{unsat}	kN/m ³	19.00
γ_{sat}	kN/m ³	22.00

Figura 3.3: Propiedades generales del material de suelo. Fuente: Propia

Property	Unit	Value
Stiffness		
E_{50}^{ref}	kN/m ²	120.0E3
E_{oed}^{ref}	kN/m ²	40.00E3
E_{ur}^{ref}	kN/m ²	420.0E3
power (m)		0.5000
Alternatives		
Use alternatives		<input type="checkbox"/>
C_c		8.625E-3
C_s		0.7393E-3
e_{init}		0.5000
Strength		
c'_{ref}	kN/m ²	0.1000
φ' (phi)	°	35.00
ψ (psi)	°	0.000

Figura 3.4: Propiedades elásticas y cohesivas del suelo. Fuente: Propia

El valor de E_{50} equivale al módulo de elasticidad en recarga, el valor de E_{oed} refiere al módulo de deformación en carga (la relación entre estos se consideró de 1 a 3, como normalmente se da). Respecto a los parámetros alternativos, los valores C_c y C_s equivalen al

relación de vacíos inicial. Finalmente, se tienen los valores de la cohesión del suelo (c') y el ángulo de fricción interna (ϕ).

Esta tabla resume las propiedades que se le dio al terreno:

Tabla 3.1: Propiedades del terreno del modelo. Fuente: Propia

Tipo de terreno	Condición	Peso específico (kN/m^3)	Ángulo de fricción interna ($^\circ$)	Cohesión (kN/m^2)	Módulo de deformación carga (MPa)	Módulo de deformación recarga (MPa)
Arena	Drenado	19	35	0.1	40	120

El alcance del estudio abarca solo suelos sin cohesión. Sin embargo, un valor nulo conllevaría errores al ejecutar el modelo porque en la realidad no existe suelos con cohesión igual a cero. Por ello se tomó como dato de entrada una cohesión muy baja, de 0.1 kPa

La pantalla se analizó a diferentes espesores: se probó con 100 cm, 80 cm y 60 cm; esto varía solo en los parámetros EA (producto del módulo de elasticidad y el área de la sección) y EI (producto del módulo de elasticidad y el momento de inercia de la sección), que son datos de entrada del modelo.

La Figura 3.5 muestra el modelo geotécnico elaborado en Plaxis. Se aprecian las etapas de excavación y muro pantalla en voladizo. Estas fueron las siguientes:

- La primera etapa es el terreno inalterado, aún no se aplica ningún esfuerzo o alteración.
- La segunda etapa es la construcción de la pantalla, se modeló la pantalla y se aplicó una interfaz por ambas caras para que el programa la separe del terreno.
- La tercera etapa es la primera fase de excavación de dos metros de profundidad, en el intradós.
- La cuarta etapa es la segunda fase de excavación de dos metros de profundidad.
- La quinta etapa es la última fase de excavación de dos metros de profundidad.
- La sexta etapa es aquella en la que se analizará el factor de seguridad del sistema.

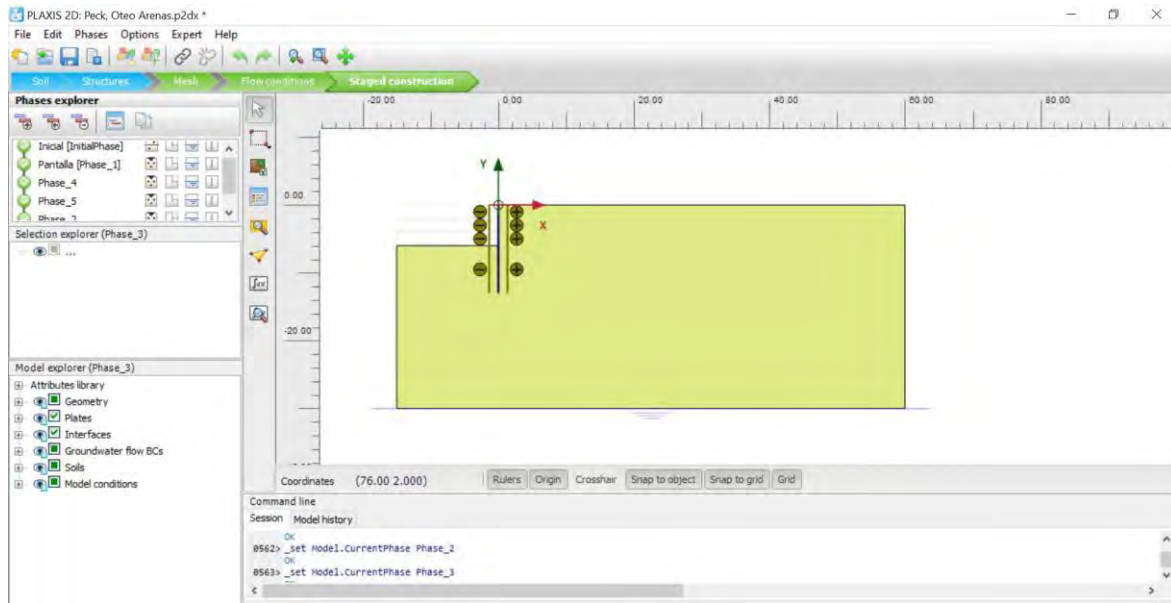


Figura 3.5: Modelo en Plaxis. Fuente: Propia



3.2. Análisis comparativo entre distintos espesores de pantalla

Se analizaron los asientos verticales a 5 cm de profundidad en el trasdós de la pantalla. Se realizó esto para los tres espesores de pantalla y se tabularon los datos. La Figura 3.6 muestra una gráfica con las subsidencias según los espesores de pantalla. Estos asentamientos fueron medidos tras la etapa de la última fase de excavación.

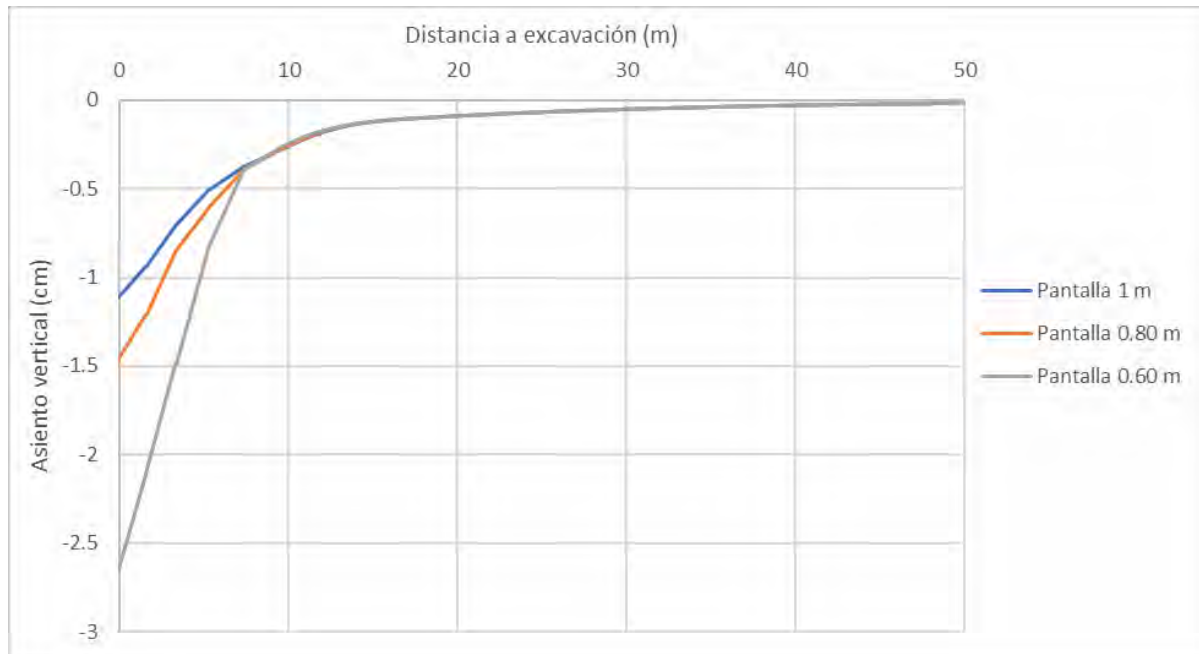


Figura 3.6: Asientos de terreno según espesores de pantalla. Fuente: Propia

Se aprecia una semejanza entre curvas a partir de 9 m (1.5 veces la profundidad de excavación), pero, a distancias menores las curvas difieren. Al ser la pantalla más rígida (mayor espesor) los asientos se reducen; se puede deducir que, debido a la menor flexibilidad y, por tanto, menor deformación del muro, es menos el suelo que penetra la posición del muro y, por ello, menos el suelo que se asienta.

A continuación, una tabla resumen acerca de los distintos espesores de pantalla:

Tabla 3.2: Características de las pantallas con distintos espesores. Fuente: Propia

Tipo	Espesor (cm)	Tipo de material	EA (kN/m ² .)	EI (kN/m ² / m ² · m ⁴)	Máximo asiento vertical (cm)	FS de la excavación
Tipo 1	100	Elástico	2×10^7	1.667×10^6	1.1	1.703
Tipo 2	80	Elástico	1.6×10^7	8.535×10^5	1.5	1.579
Tipo 3	60	Elástico	1.2×10^7	3.601×10^5	2.6	1.392

3.3. Análisis con método de Oteo (2003)

respecto a la Figura 2.55, y siendo H igual a 0 m, se obtuvo lo siguiente para los valores referentes al menor valor de asientos: $A = 0,03$ m y $X_{\text{á}} = 9$ m. A continuación, en la

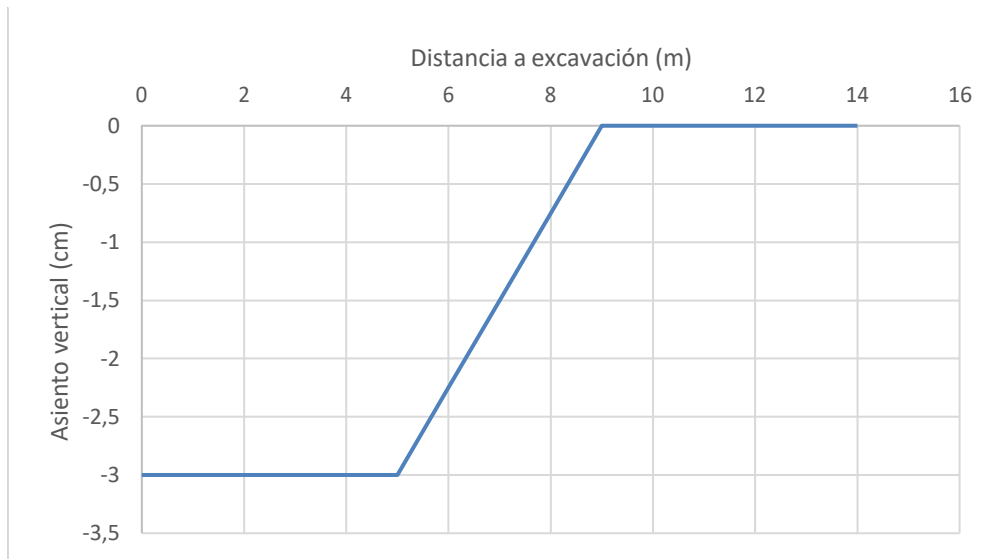


Figura 3.7: Distancia a excavación vs asiento vertical. Fuente: Propia

Luego, se obtuvo los valores de asentamientos más altos. Son los siguientes:

$A = 0,06$ m y $X_{\text{á}} = 12$ m. En la Figura 3.8 se muestra estos

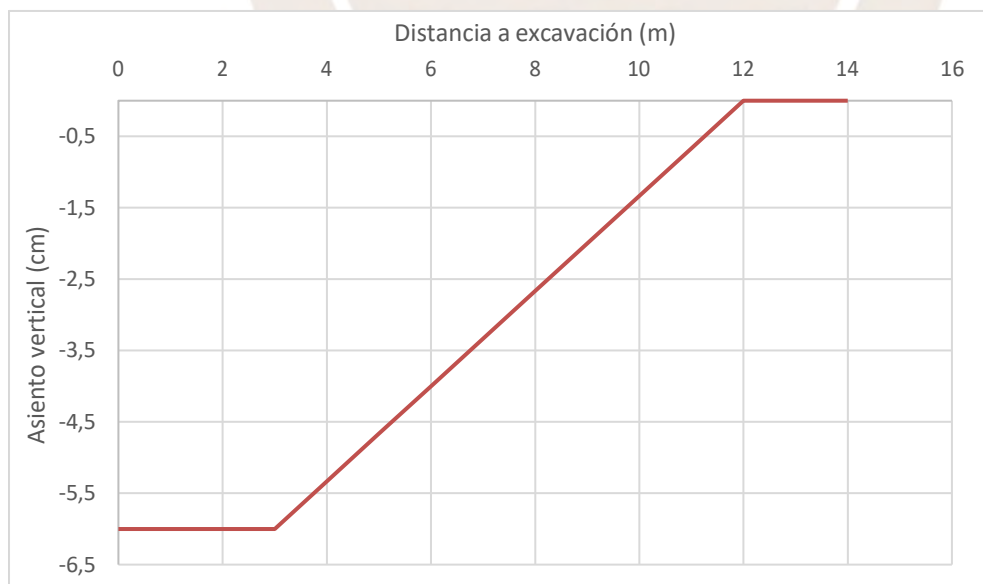


Figura 3.8: Perfil de asentamientos. Fuente: Propia

A continuación, en la Figura 3.9 una superposición de las curvas de subsidencias según Oteo (2003) con las curvas obtenidas por elementos finitos.

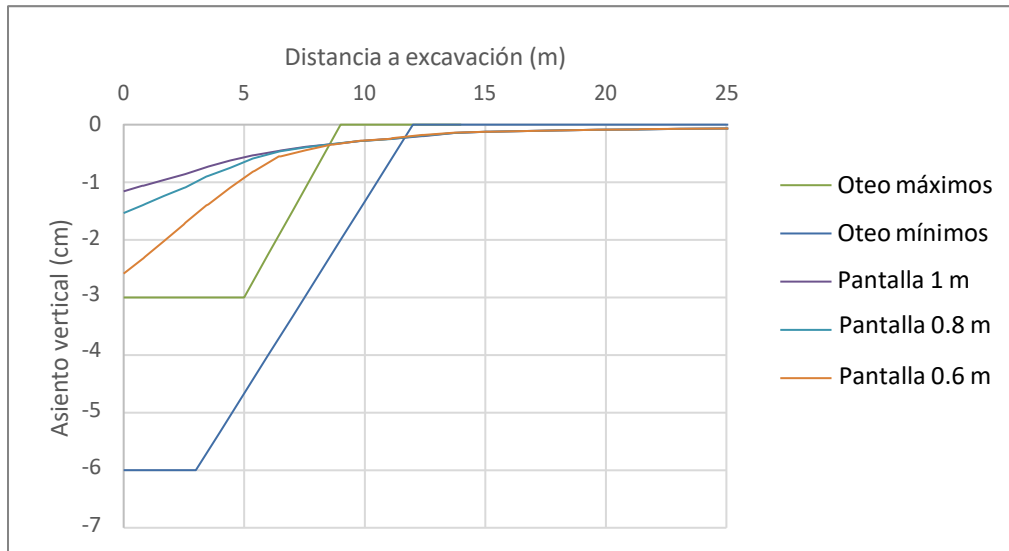


Figura 3.9: Superposición de rango de Oteo (2003) con asientos de modelos con distintas pantallas. Fuente: Propia

Se aprecia que las curvas según el método de elementos finitos no encajaron en el rango de Oteo (2003), por lo que se interpreta que este último exagera valores. Se aprecia, también, que la pantalla más flexible se acerca más a estar dentro del rango que las otras. Esto último da a entender que el método de Oteo (2003) se trabajó para pantallas flexibles.

3.4. Análisis con método de Peck (1969)

Teniendo en cuenta la zona 1 (arenas) de la Figura 2.25, la curva (por simplicidad aproximada a recta) según Peck (1969) será la mostrada a continuación en la Figura 3.10:

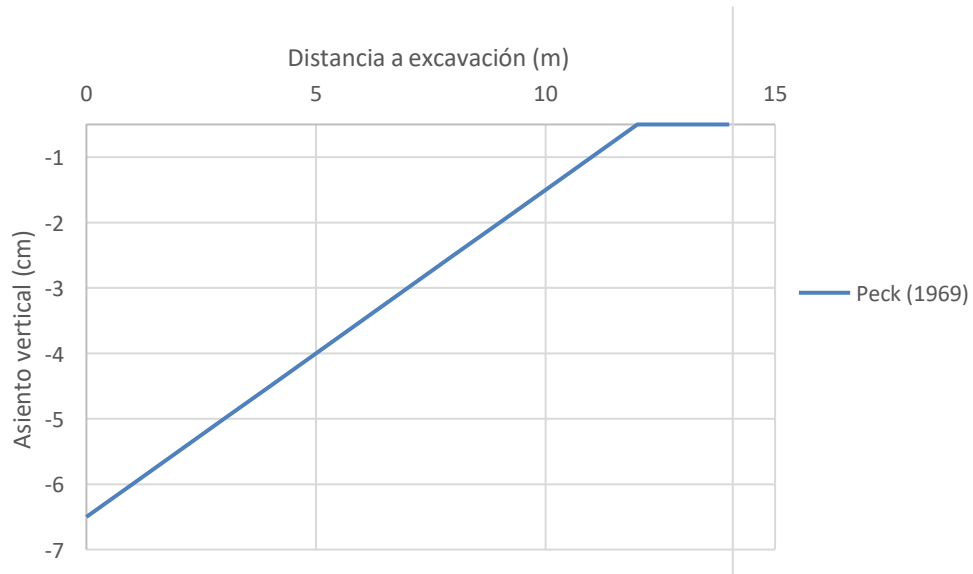


Figura 3.10: Asientos verticales en arenas según Peck (1969) para una excavación de 6 m. Fuente: Propia

A continuación, la Figura 3.11 permite apreciar una superposición de la curva de Peck con los perfiles de asentamientos determinados por elementos finitos.

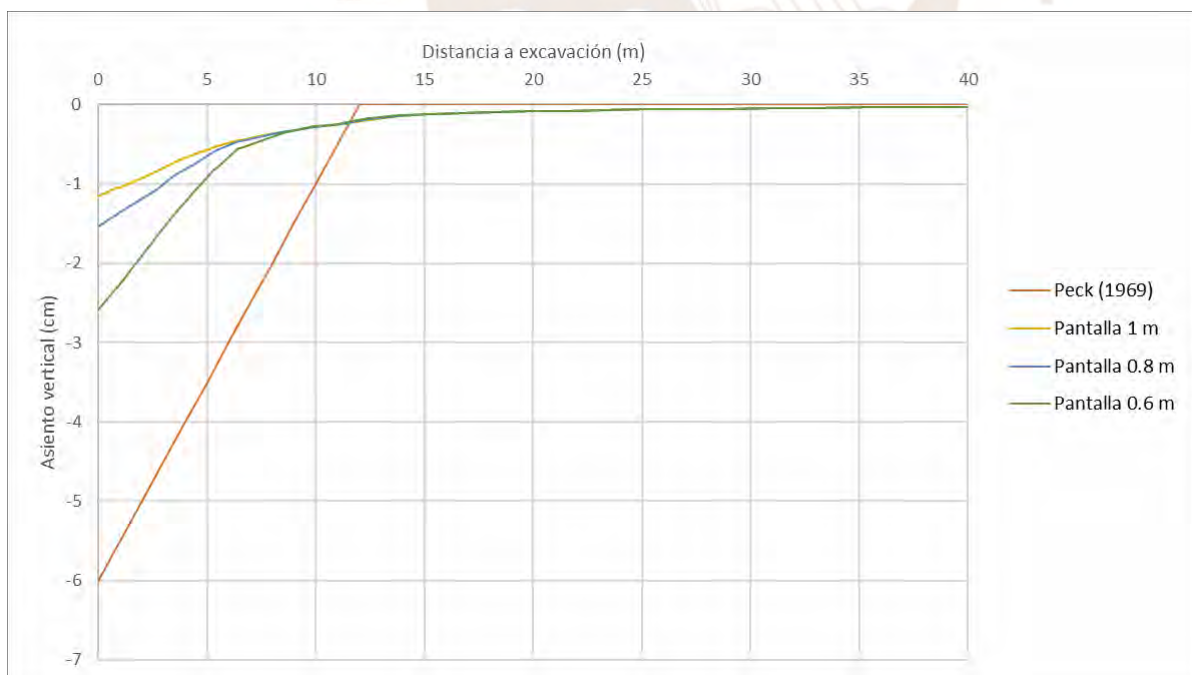


Figura 3.11: Superposición de la curva de Peck (1969) con asentamientos de modelos con distintas pantallas. Fuente: Propia

Se aprecia que el método de Peck (1969) exagera el máximo asiento. Es recién a partir de los doce metros (el doble de la profundidad excavada) que ambos perfiles convergen de manera parecida. Se visualiza que, de manera similar al método de Oteo (2003), el perfil según Peck (1969) es más semejante al de la pantalla más flexible. Puede decirse, por tanto, que este método también se elaboró para pantallas flexibles.



3.5. Análisis con método de Bowles (1988)

El ancho de excavación (B) equivale a 30 m (esto se debe a que Plaxis considera una simetría en el modelo, y este tiene 15 m excavados a lo ancho). Este dato se tomó del caso base y se consideró a la pantalla de espesor de 100 cm para realizar un primer cálculo.

Luego de reemplazar valores en la Ecuación 2.11, se tuvo que $\diamond_p = 7.81 \text{ m}$ y, tras

Para el siguiente paso, se calculó el suelo desplazado debido a la deflexión de la pantalla. Se asumió un volumen equivalente al suelo que se asentaría, ya que no puede haber pérdida alguna de suelo. Esto se calculó por medio de la gráfica de Peck (1969) (se asume para 1 m de profundidad perpendicular al plano que contiene a la gráfica).

De la Figura 2.25, se consideró una profundidad de 1% de la profundidad de excavación (1% de 6 m equivale a 0.06 m) y una distancia de dos veces la profundidad de excavación (el doble de 6 m, que sería 12 m). Por simplificar cálculos, se consideró la curva de Peck como una parábola cuadrática, por ello el área se calcularía como $V_S = \frac{1}{3} \times 12 \times 0.06 = 0.24$

A continuación, se reemplazó ese valor en la Ecuación 2.13 y se obtuvo un valor $\diamond_w =$

0.067 m (máximo asiento, cercano a la excavación). Teniendo esto en cuenta y aplicando la Ecuación 2.14 se graficó la siguiente curva de asientos (Figura 2.14), tomando de referencia



Figura 3.12: Asientos verticales según Bowles (1988) para un ancho de excavación de 30 m. Fuente: Propia

Luego, se realizó una variación en el ancho de excavación para observar cómo cambiaría el perfil de asentamientos. Se consideró $\diamond = 60 \text{ m}$ y se volvió a calcular los parámetros. Se obtuvo lo mostrado en la Figura 3.13, donde se aprecia una disminución del S_w de casi 2 cm y un incremento en el alcance de la zona de influencia de casi 3 m.



Figura 3.13: Asientos verticales según Bowles (1988) para un ancho de excavación de 60 m. Fuente: Propia

Seguido de ello, se cambió el ancho de excavación a 100 m. El máximo asiento se redujo aún más y la zona de influencia se incrementó a más del doble que se tuvo cuando el ancho excavado era de 30 m. La Figura 3.14 muestra el resultado.



Figura 3.14: Asientos verticales según Bowles (1988) para un ancho de excavación de 100 m. Fuente: Propia

A continuación, se muestra una superposición de los tres perfiles de asientos:

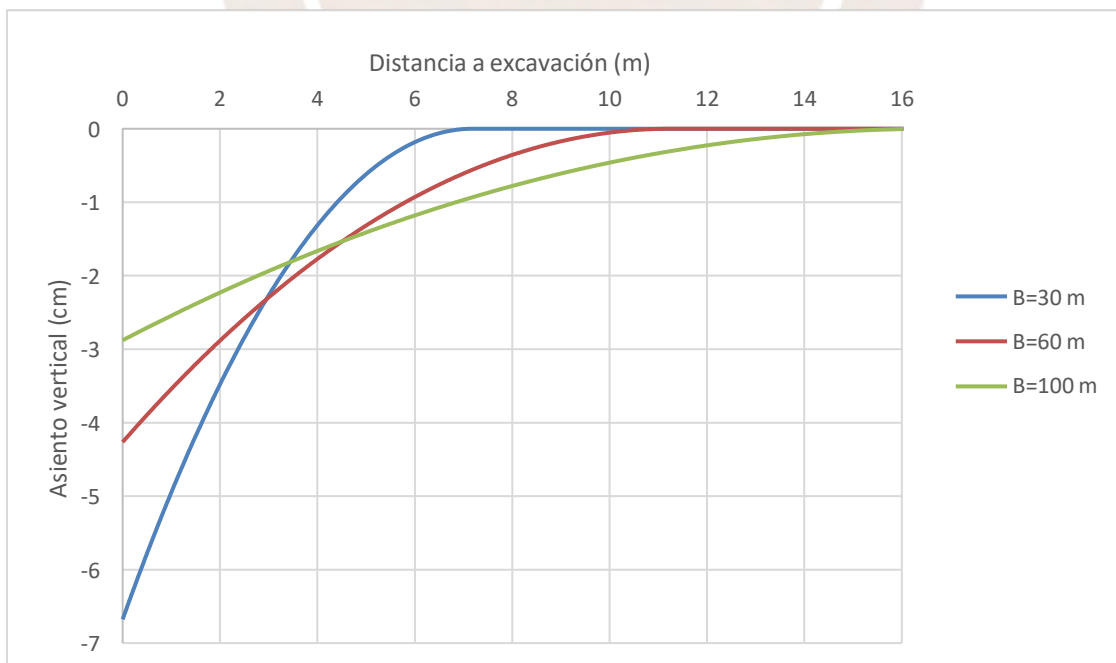


Figura 3.15: Superposición de curvas de Bowles (1988). Fuente: Propia

Lo que se aprecia es que, mientras menor sea el ancho de excavación empleado en este método, mayor será el máximo asiento vertical y menor será la zona de influencia. A mayor ancho de excavación, menor resultó el asiento tras la pantalla, pero se extendió por una mayor zona de influencia.

Posteriormente, se realizó una superposición de cada una de las curvas de Bowles (1988) con lo obtenido en el modelo por elementos finitos, variando los anchos de excavación también en el Plaxis. Se utilizó en los tres casos solo la pantalla de espesor 100 cm, para no tener muchas gráficas. Con las tres gráficas a continuación se puede obtener conclusiones de la comparación entre métodos.

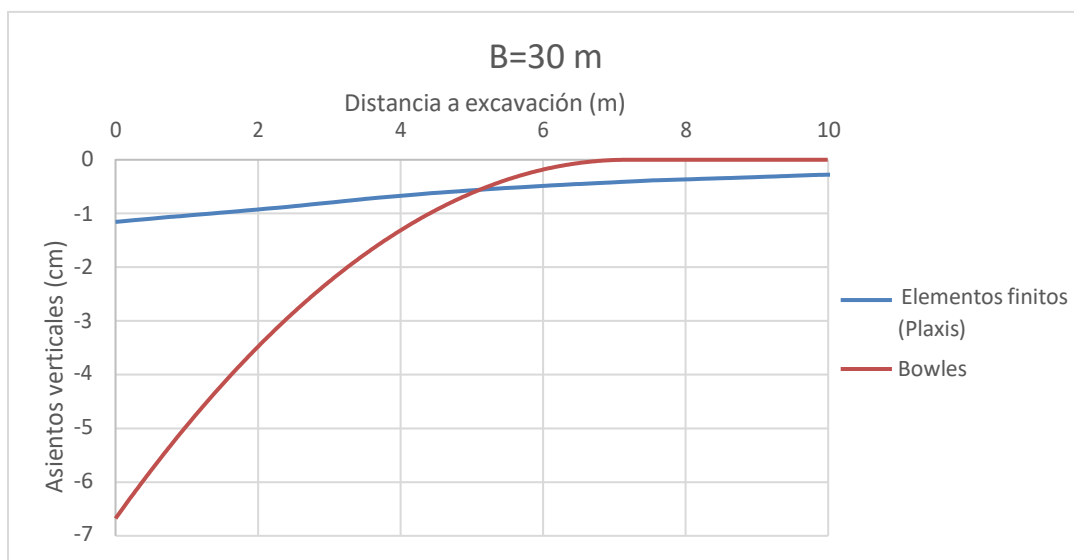


Figura 3.16: Superposición de curva de Bowles (1988) y curva de Plaxis para anchos de excavación de 30 m.

Fuente: Propia

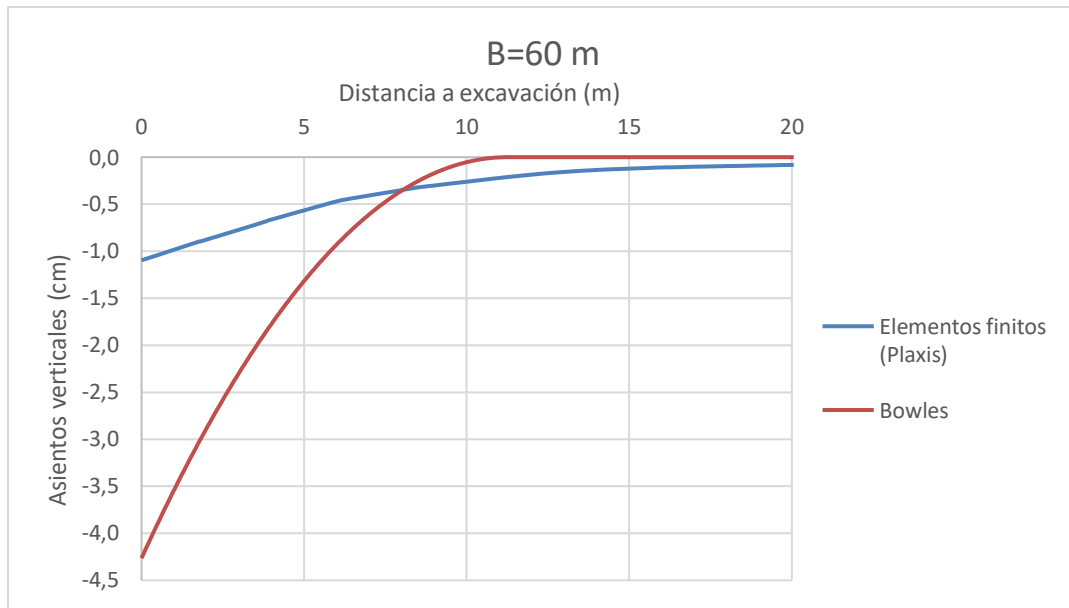


Figura 3.17: Superposición de curva de Bowles y curva de Plaxis para anchos de excavación de 60 m. Fuente: Propia

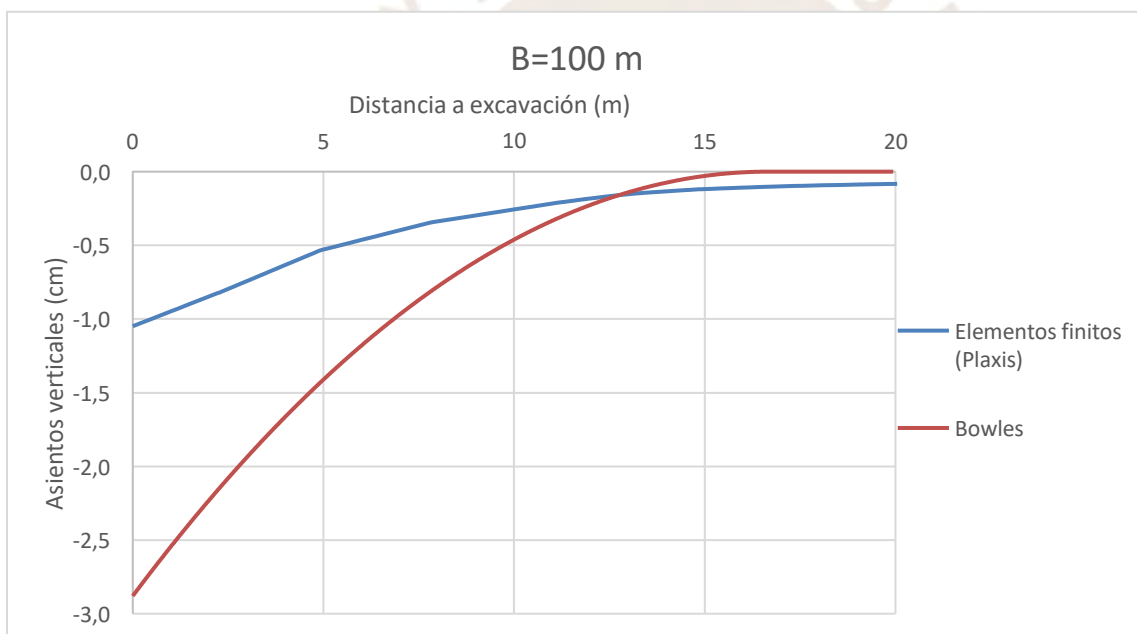


Figura 3.18: Superposición de curva de Bowles (1988) y curva de Plaxis para anchos de excavación de 100 m. Fuente: Propia

En los tres casos se aprecia que, mientras las curvas de Bowles varían significativamente, las curvas de elementos finitos no lo hacen. Esto se debe a que Bowles (1988) considera el ancho de excavación como un parámetro de entrada; al variarlo, se altera el valor de ϕ_p . Ergo, se altera el valor D y, finalmente, el valor de los ϕ_i . Sin embargo, el ancho

método de Bowles, la zona de influencia se extendería indefinidamente y la magnitud de los asientos sería imperceptible. Sin embargo, luego de modelar con elementos finitos, se observó que no hay un impacto perceptible del ancho de la excavación en la magnitud de los asientos ni en el alcance de la zona de influencia.

Se nota, además, que mientras menor fue el ancho de excavación menor fue la distancia desde la zona de corte en que ambas curvas empezaron a asemejarse. También, se ve que el máximo asiento según Bowles (1988) es tal que pareciera elaborado para pantallas más flexibles (como ya se sabe, con estas se producen mayores asientos verticales).



3.6. Análisis con método de Clough & O'Rourke (1990)

Para realizar cálculos se utilizó la Figura 2.29. Dado que se necesitaba el máximo asiento vertical y que, además, este dependía de conocer la máxima deflexión horizontal de la pantalla, según la Figura 2.34 se consideró la máxima deformación del muro pantalla de espesor 1 m en Plaxis (este espesor y no los demás para partir desde un dato en concreto) y se obtuvo un valor de 9 mm para la deflexión. Dado que el valor $\delta_{h\text{max}}/H$ (%) resultó ser

$0.009/6$
 $= 0.15\%$ no hubo mayor diferencia en intersecar con una u otra recta puesto que el valor obtenido está cercano al origen, y se consideró como 80% a la relación entre el máximo asiento vertical del terreno y la máxima deflexión horizontal de la pantalla. Se obtuvo un máximo

Luego, el valor del asiento tras el muro resultó ser igual a la máxima subsidencia y la distancia a la que el asiento vertical es nulo resultó, según la gráfica de Clough & O'Rourke (1990), el doble de la profundidad de excavación (es decir 12 m).

Entonces, se obtiene un perfil como el mostrado en la Figura 3.19:

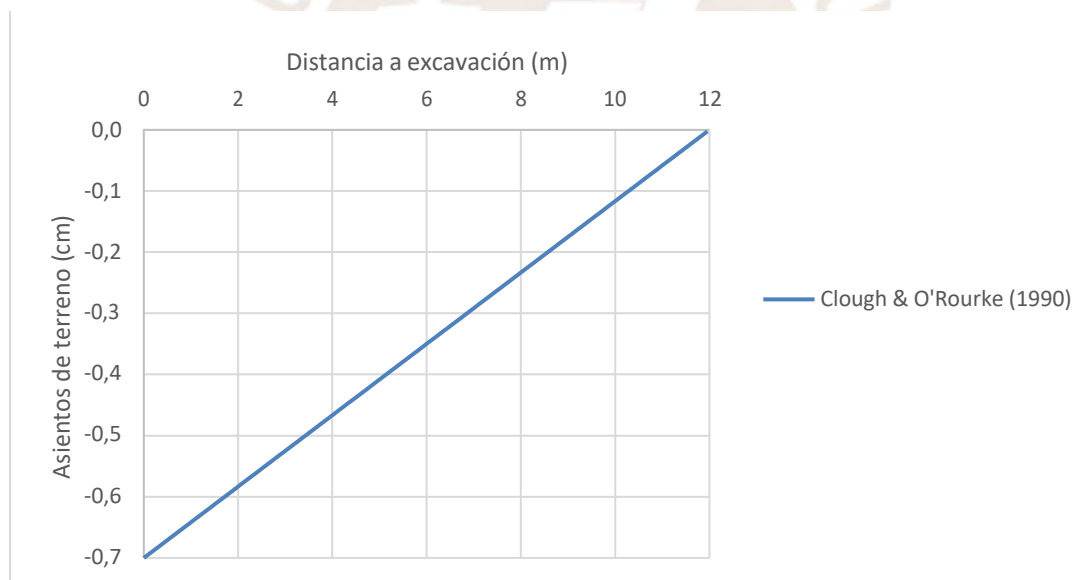


Figura 3.19: Perfil de asientos según Clough & O'Rourke (1990). Fuente: Propia

Este método reduce considerablemente el valor del asiento máximo. Mientras en los métodos anteriores el asiento máximo era mayor o igual a 3 cm (en algunos perfiles se observó hasta 6 cm), en este método el asiento máximo se aproxima a 8 mm. Podría influir el hecho de haber partido de un dato obtenido con elementos finitos.

A continuación, se procedió a superponer la Figura 3.21 con la curva de elementos finitos para un muro de 1 m de espesor. Se consideró a este espesor de pantalla para poder

realizar una primera comparación entre los métodos. La Figura 3.20 muestra que el perfil según Clough & O'Rourke (1990) no calza muy bien con el perfil de asientos por elementos finitos: considera al asiento máximo como 0.75 cm, mientras en Plaxis el asiento máximo es casi 1.2 cm, además, limita la zona de influencia hasta los 12 m de distancia a la zona de corte, mientras que, en el Plaxis, esta se extiende mucho más. Sin embargo, podría decirse que, aproximando en el rango de 0 a 12 m de distancia al corte, las pendientes son casi aproximadas.

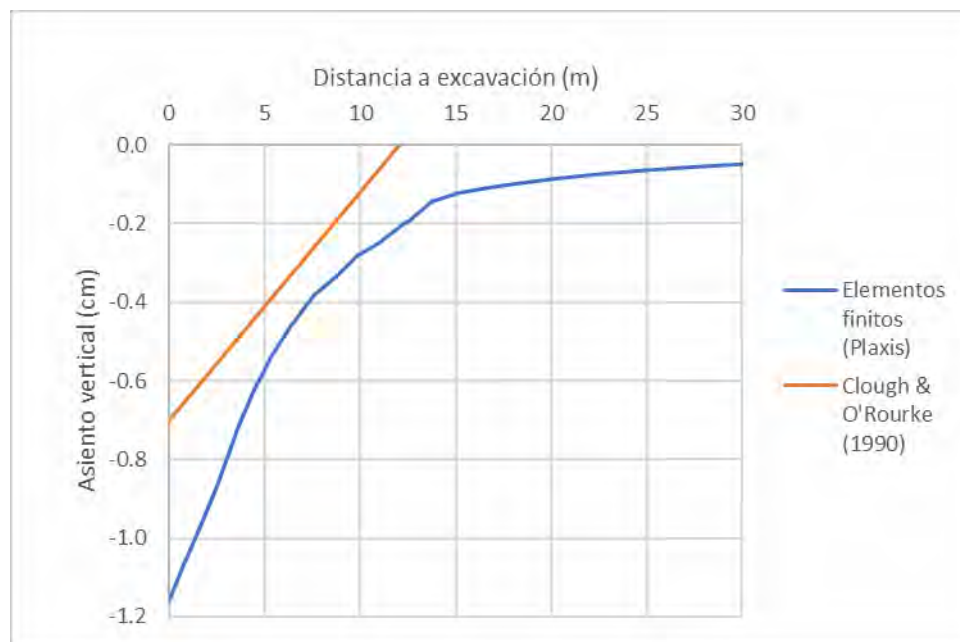


Figura 3.20: Superposición de perfil de asientos según Clough & O'Rourke (1990) y curva según Plaxis.

Fuente: Propia

Seguidamente, se realizó un comparativo entre los diferentes espesores de pantallas con sus respectivos perfiles de asientos según Clough & O'Rourke (1990). Se volvió a considerar las máximas deflexiones horizontales de las pantallas según Plaxis, las cuales fueron 12 mm y 22 mm para los espesores de 80 cm y 60 cm respectivamente. Luego, dado que el porcentaje de la deformación máxima horizontal dividida por profundidad de excavación siguió siendo pequeño, se consideró multiplicar por el factor 0.8 para obtener los máximos asientos verticales. Así se construyó las gráficas de Clough & O'Rourke (1990) para los tres espesores de pantallas.

Se plasmaron en la Figura 3.21 las tres curvas según Clough & O'Rourke (1990) y las tres curvas según elementos finitos. Se observa que las tres rectas parten desde un mismo punto ubicado a 12 m (el doble de la profundidad de excavación) y divergen conforme se acercan a la superficie de excavación tal que el asiento máximo con la pantalla más flexible es aproximadamente el triple del obtenido con la pantalla más rígida. Se observa, además,

que si se calcula la razón del asiento máximo según Clough & O'Rourke (1990) con el asiento máximo por elementos finitos para cada pantalla se obtiene que en la pantalla de 1 m tienen una relación de 54%, en la pantalla de 80 cm tienen una relación aproximada de 66.7% y en la pantalla de 60 cm tienen una relación de casi 69%. Siendo que con la pantalla más flexible se obtiene mayor cercanía de valores, se puede deducir que el método de Clough & O'Rourke (1990) se diseñó considerando pantallas más flexibles que rígidas.

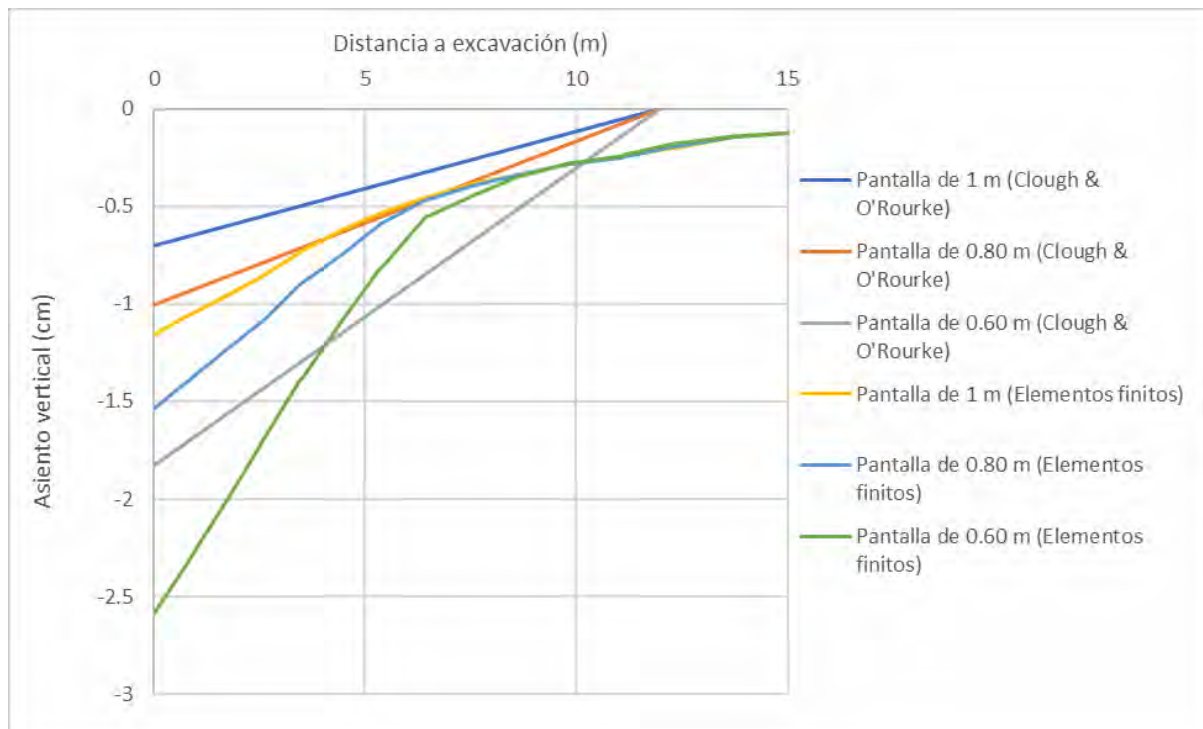


Figura 3.21: Superposición de las curvas de Clough & O'Rourke (1990) con asientos de modelos con distintas pantallas. Fuente: Propia

3.7. Análisis con método de Hsieh & Ou (1993)

Manteniendo la profundidad de excavación de 6 metros, el valor del máximo asiento vertical como 7 mm (tal como se obtuvo en el ítem anterior) y teniendo en cuenta que la pantalla está en voladizo, se analizó la Figura 2.33. Se obtuvo que la zona primaria de influencia parte desde el inicio del trasdós, con una subsidencia de 7 mm, hasta una distancia de 11.76 m. La zona secundaria de influencia abarcó hasta la distancia de 24 m.

Se consideró en este y en el anterior análisis la máxima deflexión horizontal de la pantalla según el modelo con elementos finitos porque no se tenía a la mano una data geotécnica de campo. Los análisis que se vienen realizando son para estimar asientos verticales del terreno, para calcular de flexiones en la pantalla habría que recurrir al análisis estructural. Sin embargo, dada la gran cantidad de factores que intervienen en el modelo computacional con elementos finitos, se considera válido considerar esta variable que es la deflexión máxima horizontal del muro pantalla obtenida.

La Figura 3.22 muestra el perfil de asientos según Hsieh & Ou (1993) para una excavación apantallada por un muro en voladizo (con el asiento máximo obtenido para la pantalla de 1 m, para poder obtener una primera gráfica de análisis) con la profundidad de excavación que se le dio al caso base.



Figura 3.22: Perfil de asientos según Hsieh & Ou (1993). Fuente: Propia

Seguidamente, se repitió el procedimiento para los asientos del terreno con las diferentes pantallas. Se elaboraron los demás perfiles de asientos según Hsieh & Ou (1993) y se colocaron en un mismo gráfico con las curvas según elementos finitos.

La Figura 3.25 muestra que hay similitud entre el perfil de asientos de Hsieh & Ou (1993) y el perfil de asientos por elementos finitos para la pantalla más rígida. Sin embargo, las curvas referentes a la pantalla más flexible no encajan de la manera en que lo hacen para la pantalla más rígida. Por ello se puede intuir que este método va mejor con pantallas rígidas, además de que en los tres casos el método empírico brindó menores asientos que el modelo computacional. El método de Hsieh & Ou (1993), respecto al caso de pantalla rígida, es el que mejor ha calzado con la curva de Plaxis hasta el momento. Aparentemente, es el método empírico que mejor se aproxima a un análisis con elementos finitos.

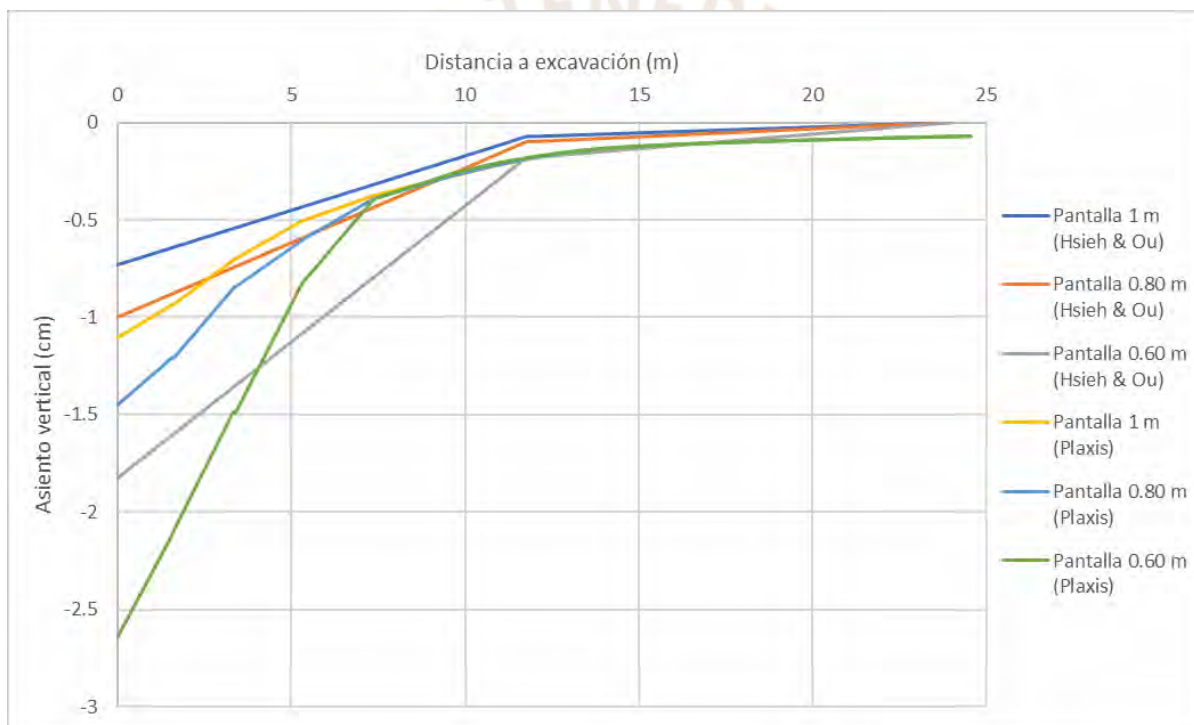


Figura 3.23: Superposición de curvas Plaxis con perfiles de asientos según Hsieh & Ou (1993). Fuente: Propia

3.8. Superposición de todas las curvas

Una vez hecho todo lo anterior, se procedió a realizar un solo gráfico con todas las curvas. En este se superpuso las curvas obtenidas mediante los métodos empíricos a la curva obtenida mediante elementos finitos en Plaxis, todo el análisis con el muro pantalla de 1 m, para obtener analizar sin cargar con muchas curvas la gráfica.

En la Figura 3.26 se aprecia cómo, a partir de una distancia del doble de la profundidad de excavación, los perfiles se aproximan mucho entre sí. Antes de esa distancia, solo las gráficas de Hsieh & Ou (1993) y Clough & O'Rourke (1990) se aproximan a la curva de elementos finitos, Clough & O'Rourke (1990) en su único tramo y Hsieh & Ou (1993) en sus dos tramos. La curva según Bowles se asemeja un poco en su concavidad, pero el valor que brinda para el asiento máximo es casi el doble que el obtenido según Plaxis. Los valores según el método de Oteo (2003) brindan el rango por el que la curva de asientos pasaría, de una manera muy conservadora; los asientos verticales son considerablemente mayores que en los otros métodos. El perfil según Peck (1969), por su parte, brindaría una curva similar, en cuanto a su concavidad, a las curvas de Bowles (1988) y la de elementos finitos; sin embargo, se la aproximó a una línea recta (por simplificar), así, terminó pareciéndose a la línea de Clough & O'Rourke (1990) pero con un mucho mayor asiento máximo. Esta última se ajustó, además, dentro del rango de Oteo (2003).

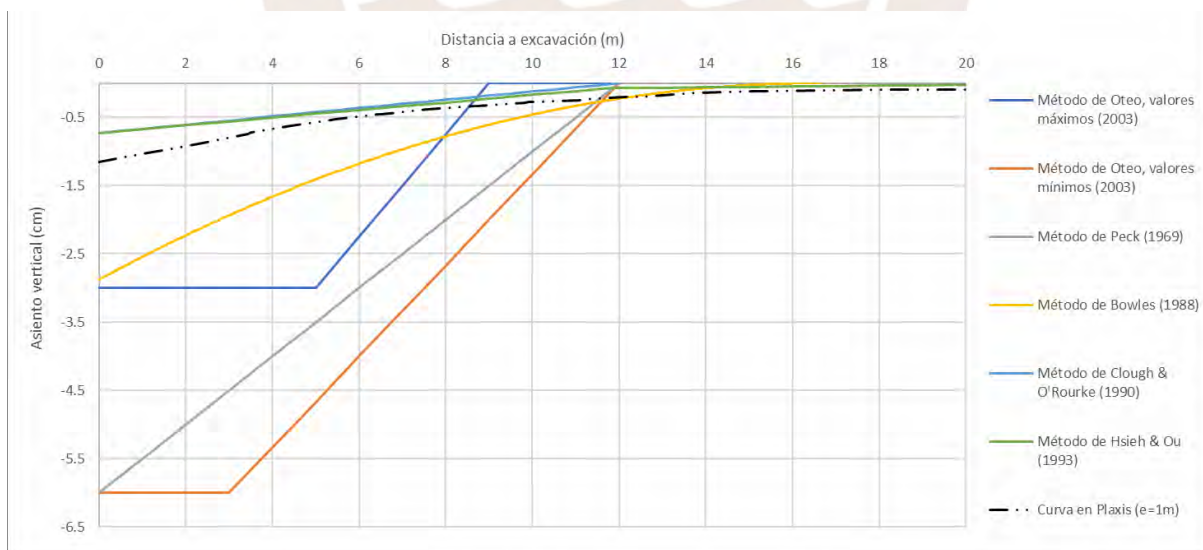


Figura 3.24: Superposición de todos los perfiles de asentamientos. Fuente: Propia

4. Conclusiones

Lo que se elaboró para la presente tesis fue una indagación sobre métodos empíricos de análisis de subsidencias en suelos granulares y un modelo computacional por elementos finitos para compararlo con los resultados que se obtuviesen de los primeros. A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente:

- Según lo mostrado en la Figura 3.26, se observa que la curva de Peck (1969) no se asemeja a la curva de elementos finitos. El asiento vertical máximo, según Peck (1969), sería de 6 cm, mayor que los asientos máximos de los casos de los tres espesores de pantalla que se analizó. Se concluyó de esto que este método empírico es conservador. De la Figura 3.11 se concluyó, además, que este método aplica mejor para pantallas flexibles.
- Oteo (2003) no proporciona una curva sino un rango. En ese rango, se supone, debería calzar la curva de asientos, sin embargo, la curva obtenida según elementos finitos se encuentra por arriba de este (menores asientos) hasta los 8.5 m de distancia a la zona de corte; esto equivale a casi 1.5 veces la profundidad excavada. A partir de ese punto y hasta una distancia de poco más de dos veces la profundidad de excavación, los perfiles de asientos según elementos finitos se asemejan ligeramente a la línea horizontal que resulta de Oteo (2003), la cual termina en 14 m (dos y un tercio veces la profundidad excavada). Pudo concluirse que este método es conservador y aplica mejor para pantallas flexibles.
- La curva estimada por el método de Bowles (1988) tiene una forma mucho más parecida a la que brindó el análisis con elementos finitos. Sin embargo, la máxima subsidencia obtenida triplica el valor de la curva obtenida por elementos finitos; según Plaxis, el máximo asiento es de poco más de 1 cm mientras que, según Bowles (1988), este sería de casi 3 cm. Para un análisis visual más simple, se optó por solo analizar la pantalla más rígida en vez de las tres. Se recuerda, también, que en este método se consideró al ancho de excavación como un parámetro que influye en el cálculo de los asientos, mientras que los modelos con distintos anchos excavados no presentaron considerables variaciones en sus asientos (verificado en Plaxis). Se concluye que este método empírico es conservador también, pero la curva que describe se asemeja, por su figura, a la obtenida con elementos finitos. Dado que el asiento máximo obtenido con este método es mayor que el obtenido con elementos finitos, se dedujo que este aplica mejor para pantallas flexibles al igual que los métodos de Peck (1969) y Oteo (2003).

- La línea de Clough & O'Rourke (1990) se asemeja en valores a la curva obtenida en el modelo computarizado para la pantalla más rígida hasta 12 m de distancia al corte (lo equivalente a dos veces la profundidad excavada). Luego de ello, este método ya no considera presencia de asientos (lo cual no ocurre según el modelo en Plaxis). Pese a esto último, el valor del asiento máximo obtenido por elementos finitos (casi 1.15 cm) se asemeja mejor a este método (casi 0.7 cm) que a los métodos comentados antes. En el caso de los demás espesores no hubo gran semejanza. Se concluyó que este método calza mejor para aquella zona que Hsieh & Ou (1993) denominaron "primaria" y que se aplica mejor para pantallas rígidas. Se debe tener en cuenta que en este método se recurrió a considerar la máxima deflexión de la pantalla obtenida del modelo con elementos finitos únicamente como punto de partida para poder desarrollar los cálculos con los que se graficó el perfil de asientos según el método empírico. Esto último fue porque, dado que el programa Plaxis considera gran cantidad de parámetros a ser ingresados, se le otorga cierto grado de confianza a lo que resulte del modelo computacional.
- El perfil de asientos según Hsieh & Ou (1993) fue lo que mejor se asemejó al perfil de asientos que se determinó con elementos finitos, en el caso de la pantalla más rígida, tanto en valores como en forma de la curva. Esto no se observó así en los otros dos casos. Se concluyó que la curva de Hsieh & Ou (1993) es, de entre los métodos empíricos analizados, la más cercana a un perfil de asientos obtenido con elementos finitos y que aplica mejor para pantallas rígidas. Se debe tener en cuenta que, al igual que con el método de Clough & O'Rourke (1990), se consideró como punto de partida la máxima deflexión horizontal del muro pantalla calculada con el modelo computacional. Esto fue porque se le otorga cierto grado de credibilidad al cálculo con elementos finitos por la gran cantidad de datos de entrada que tiene en cuenta al momento de computar resultados.
- Puede decirse que los métodos empíricos son métodos generalmente simplificados, que no consideran multitud de variables que, como se verificó en Plaxis, tuvieron impacto en los asientos verticales del terreno. Por su similitud con el perfil de asientos obtenido con elementos finitos para pantallas rígidas, podría recomendarse utilizar el método de Hsieh & Ou (1993) para intentar predecir los asientos verticales que se vayan a generar cerca de una zona de excavación cuando no se tenga aún una data geotécnica. Así se podrá tomar las medidas de prevención necesarias ante los posibles daños a las

edificaciones vecinas que puedan ocurrir. Para el caso de pantallas flexibles podría recomendarse el método de Oteo (2003) ya que se observó que su línea de menores asientos se asemeja un poco al perfil de asientos de la pantalla de 60 cm.

- No se dio respuesta a la hipótesis de la superioridad de que los métodos de elementos finitos dan resultados más cercanos a la realidad que los métodos empíricos ya que no se contó con una data de mediciones de campo contra la cual comparar; sin embargo, estos últimos consideran una gran cantidad de variables que influyen en la magnitud de asientos y en la extensión de la zona de influencia de estos. Por esto, se reconoce una cierta preferencia hacia emplear esta familia de métodos, ya que los métodos empíricos, por lo general, resultaron conservadores.



Referencias

- Alva, J. (2007). Cimentaciones superficiales. *Diseño de Cimentaciones*. (pp. 60-61). Lima: Fondo Editorial ICG
- Bjerrum, L. (1963). Technical reports - announcement of a new NGI publication series. *Norwegian Geotechnical Inst*, 53(1), Oslo.
- Blum, H. (1950). Beitrag zur Berechnung von Bohlwerken. *Die Bautchenik*, 27(2), Berlín.
- Boscardin, M. & Cording, E. (1989). Building Response to Excavation-Induced Settlement. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(1), Noida.
- Bowles, J. (1988). Walls for excavations. *Foundation analysis and design*. (pp. 803-805). Nueva York: McGraw-Hill Book Company
- Burland, J. B. & Wroth, C. P. (1975). Summary and concluding remarks. *Settlement of buildings and associated damage*. (pp. 38-40). Londres: Imperial College London.
- Burland, J. B. & Hancock, R. J. (1977). Underground car park at the House of Commons London: Geotechnical aspects. *The structural engineer*, 55(2), Londres.
- Canadian Foundation Engineering Manual* (cuarta edición) (2006). Ottawa, Canadá: Canadian Geotechnical Society.
- Calavera, J. (1987). Método semiempírico de Terzaghi y Peck para el cálculo del empuje activo en muros de pequeña altura. *Muros de contención y muros de sótano*. (pp. 135-141). Madrid: INTEMAC.
- Caquot, A. (1948). *Tables for the calculation of passive pressure, active pressure and bearing capacity of foundations*. (pp. 85-97). París: Gautier-Villars
- CIRIA (2016). *Guidance on embedded retaining wall design*. Recuperado de https://www.ciria.org/CIRIA/Navigation/Events/Event_Display.aspx?EventKey=E16255
- Clough, G. W., & O'Rourke, T. (1990). Construction induced movements of in situ walls. *Design and Performance of Earth Retaining Structures*. (pp. 439-455). Nueva York: ASCE
- Das, B. (2001). Muros de contención y cortes apuntalados. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. (pp. 471-473). México D.F.: Thomson Editores
- Das, B. (2011). Muros de retención. *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones*. (pp. 375-377). México D.F.: Thomson Editores

Hsieh, P., & Ou, C. Y. (1998). Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(1), (pp. 1004-1016). doi: 10.1139/t98-056

Ingeniero de caminos (2011). *Asentamientos en suelos*. Recuperado de <https://ingeniero-de-caminos.com/asentamientos-en-suelos/>

Justo, J. L., Rodríguez, C., & Jaramillo, A. (1994). Un programa de ordenador para el cálculo de pantallas. *Revista de la Ingeniería Civil*, 95(1), pp. 47-52

Long, M. (2001). Database for Retaining Wall and Ground Movements due to Deep Excavations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(3)

Magnel, G. (1948). *Cours de stabilité des constructions*. (pp. 96-115). París: Rombaut-Fecheyr

Neoarquitectos (2017). *Modelo de expansión vertical en ciudades*. Recuperado de <https://www.neoarquitectos.es/modelo-de-expansion-vertical-en-las-ciudades/>

Oteo, C. (2003). Sobre los sistemas y parámetros geotécnicos de diseño en la Ampliación del Metro de Madrid. *Revista de obras públicas*, 3429(1), doi: 0034-8619

Peck, R. (1969). Deep excavation and tunneling in soft ground. *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 263-269, México D.F.

Puller, M. (2003). Open excavation: side slopes and soil retentions. *Deep excavations – a practical manual*. (pp. 5-8). London: ICE Publishing

Reforma Coruña (2014). *Asentamientos diferenciales en los cimientos de un edificio – Causas y soluciones*. Recuperado de <https://reformacoruna.com/grieta-asiento-diferencial-edificio/>

Reglamento Nacional de Edificaciones, Norma E.050 (2019). Lima: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

Sanhueza, C. (2008). Control de movimientos reales producidos en pantallas continuas en Madrid. *Revista de la Construcción*, 8(2), Madrid.

Winkler, E. (1867) Allgemeine Theorie der Elasticität. *Die Lehre von Elastizität und Festigkeit*. (pp. 79-118). Praga: Verlag Von Dominicus.

Yepes, V. (2014). *Muros pantalla*. Recuperado de <https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/03/04/muros-pantalla/>

Zigurat (s.f.). Muro pantalla sin anclajes método de Blum vs cálculo con Cype.

Recuperado de <https://www.e-zigurat.com/blog/es/muro-pantalla-sin-anclajes-metodo-blum-calculo-cype/>

