



GERDAU

CORSA

El futuro se moldea



MURO BERLÍN

Gerdau Corsa. El futuro se moldea.

Contenido

1. Descripción del sistema

- 1.1 Componentes principales
- 1.2 Secuencia constructiva típica
 - Preliminares
 - Hincado de vigas de acero
 - Primer nivel de excavación
 - Colocación del primer nivel de puntales (o anclajes)
 - Etapas de excavación sucesiva
 - Recolocación de puntales (alternativa)
- 1.3 Aplicaciones principales

2. Métodos de análisis

- 2.1 Aspectos geotécnicos
 - Arqueo 1
 - Empuje de tierras
 - Análisis en el estado límite (ELF)
 - Método del módulo de reacción
 - Análisis geotécnicos adicionales
 - Elemento finito
- 2.2 Revisión estructural
 - Vigas de acero
 - Tablones
 - Puntales / Vigas de reparto

3. Ejemplo de diseño

- 3.1 Geometría y cargas
- 3.2 Resistencia del terreno
- 3.3 Coeficientes de presión de tierras
- 3.4 Diagrama de presiones
- 3.5 Empujes del suelo
- 3.6 FS del pie
- 3.7 Reacción del arriostramiento
- 3.8 Momento flector máximo
- 3.9 Módulo de sección requerido
- 3.10 Determinación de tablones

4. Conclusiones

5. Referencias



Muros Berlín

1 Descripción del sistema

Si bien se tiene evidencia de que los sistemas adermados con vigas de rigidez verticales han sido utilizados desde por lo menos el siglo XVIII en ciudades como París, Londres y Berlín, fue esta última ciudad la que le otorgó el nombre al sistema. Hacia finales del siglo XIX se inició la construcción del sistema de ferrocarril urbano *U-Bahn* (*Untergrundbahn*, tren subterráneo) en la ciudad de Berlín, Alemania, donde el 80% de sus 151.7 km son tramos subterráneos. Fue en este proyecto donde se consolidó la técnica de contención de excavaciones donde el adermado se realizaba con vigas de acero tipo I y tabloncillos de madera entre ellas (Weissenbach, Hettler, & Simpson, 2003).

La gran versatilidad del sistema y facilidad de adaptación a las condiciones locales del proyecto, hicieron desde entonces al sistema en una herramienta clásica de la Ingeniería civil.

1.1 Componentes principales

Los muros Berlín pueden definirse a partir de dos componentes básicos:

- Vigas de acero, colocadas de manera vertical, a intervalos regulares (1.2 a 3.0 m), y que brindan la rigidez del sistema.

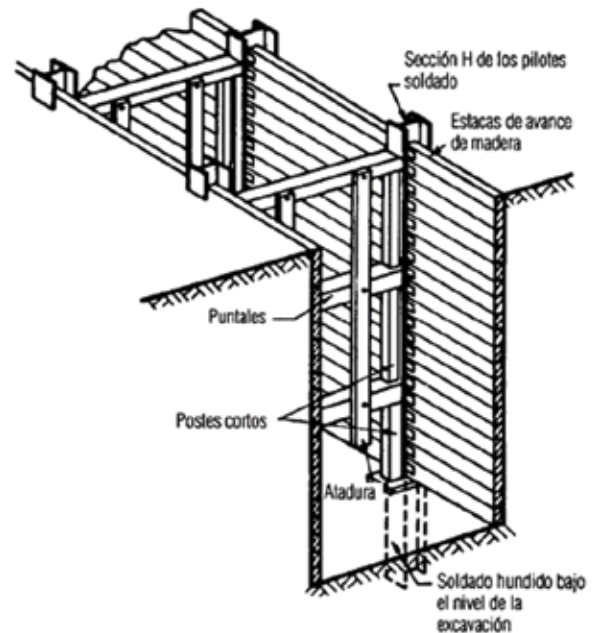


Fig. 1 Componentes principales del muro Berlín

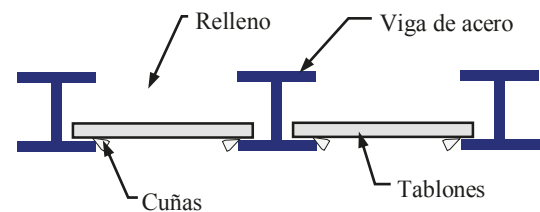


Fig. 2 Vista en planta de un Muro Berlín típico

- Tabloncillos, fabricados de materiales diversos como madera, acero, PVC, etc. Conforman los elementos de contención secundarios que garantizan la estabilidad local del terreno.



Fig. 3 Tablones de concreto prefabricado, madera y PVC en muros Berlín

Y, dependiendo de las necesidades del proyecto, pueden ser acompañados de:

- Troqueles (puntales) y anclajes. Brindan, en conjunto con las vigas de acero, la resistencia básica y estabilidad del sistema de contención.
- Sistemas de abatimiento de aguas superficiales.
- Vigas de reparto (madrinas), que transmiten las fuerzas horizontales del muro a los elementos de apuntalamiento.

1.2 Secuencia constructiva típica

Normalmente los muros de contención tipo Berlín son arriostrados lateralmente para asegurar la estabilidad general de la excavación. La colocación de puntales o anclajes son cuidadosamente especificadas en los estudios geotécnicos para cumplir cabalmente con las hipótesis de cálculo y la seguridad de la obra. El proceso constructivo comúnmente incluye la siguiente secuencia constructiva:

1. Preliminares

- Preparación de la superficie en donde se hará la excavación (demolición de cimentaciones existentes en caso de existir) y excavación de limpieza (<1.5 m)
- Recalce de cimentaciones colindantes (cuando aplique).

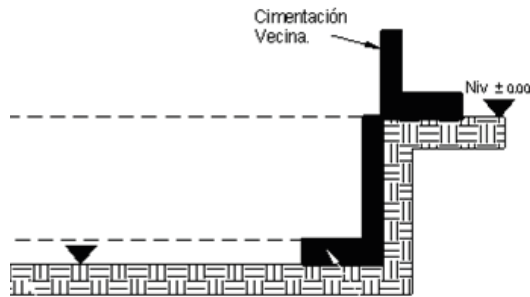


Fig. 4 Etapa preliminar: limpieza del predio y recalce de cimentaciones vecinas.

2. Hincado de vigas de acero

- Señalar la ubicación de las vigas de acero, con separación y posición de acuerdo con el proyecto.
- Hincado de vigas por medio de martillo de impacto, vibrohincador o colocándolas con perforaciones previas.
- En caso de hacer una perforación previa, rellenar con un lodo fraguante (cemento-bentonita) o relleno fluido.

3. Primer nivel de excavación

- Se realiza la primera excavación general del predio. La profundidad de excavación en esta etapa deberá garantizar la seguridad de las excavaciones vecinas, deformaciones en el muro berlín y altura libre no ademada (condición de muro en voladizo).
- Se colocan los tabloncillos de contención secundaria entre las vigas de acero.
- Colocación de protección adicional en las colindancias.

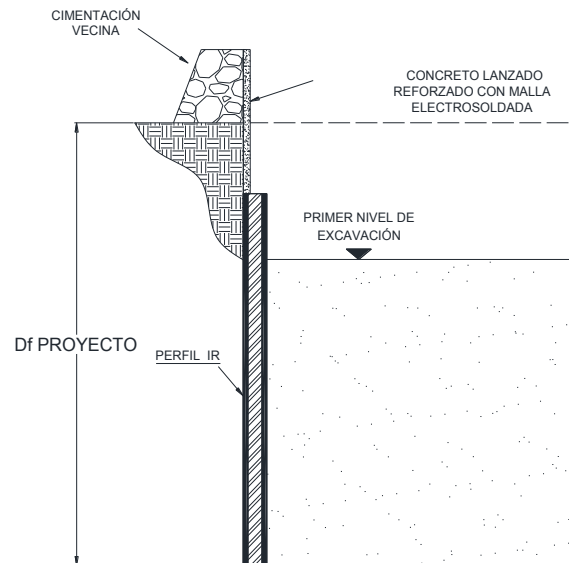


Fig. 5 Primer nivel de excavación sin apuntalamiento.

4. Colocación del primer nivel de puntales (o anclajes)

- Se instalan vigas de reparto (madrinas), puntales o anclajes (según corresponda con el diseño) en todo el perímetro del muro Berlín.
- La instalación de estos elementos de troquelamiento será en apego al proyecto estructural.

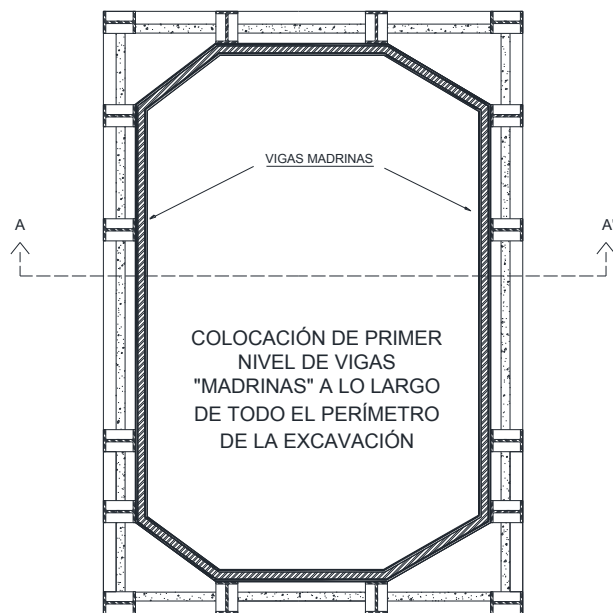


Fig. 6 Primer nivel de apuntalamiento del muro Berlín

5. Etapas de excavación y apuntalamiento

- El predio podrá ser dividido en fases conforme al proyecto geotécnico para continuar con avances de excavación. La excavación será alternada con la colocación de tablonés.
- No se realizará una nueva etapa de excavación hasta haber colocado el nivel de arriostamiento de la etapa correspondiente.
- La secuencia continuará hasta llegar al máximo nivel de la excavación del proyecto.

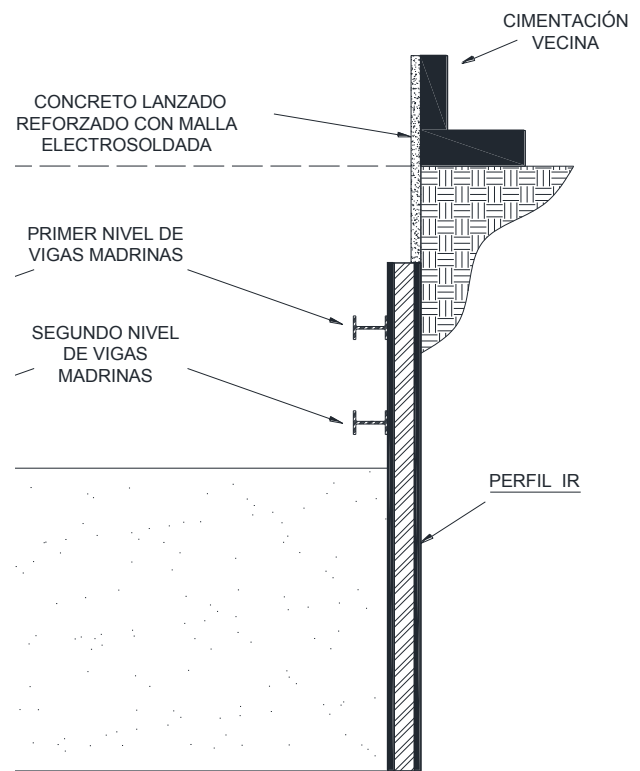


Fig. 7 Excavación en etapas colocando puntales (o anclajes)

6. Recolocación de puntales (alternativa)

- En caso de requerir prescindir de los troqueles horizontales para liberar áreas de trabajo, será posible la recolocación de puntales o cambio por troqueles inclinados, siguiendo la secuencia constructiva establecida en el proyecto ejecutivo.

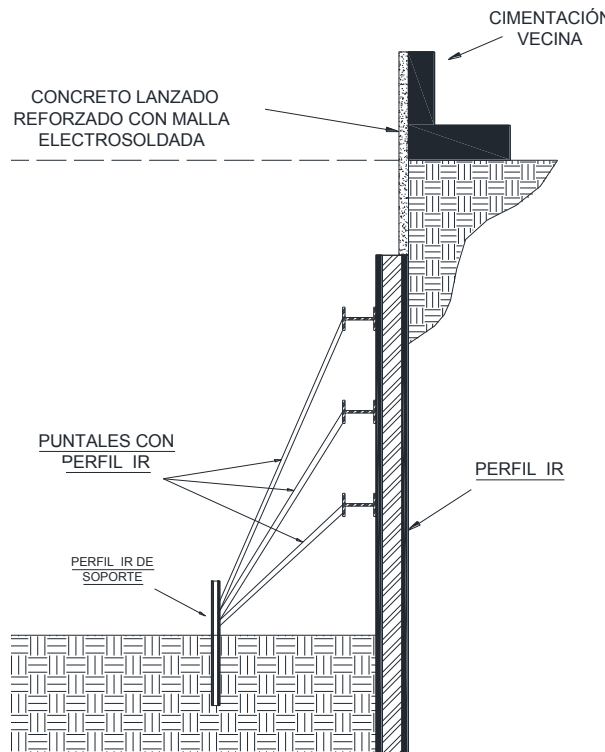


Fig. 8 Troqueles inclinados

En términos generales, el proceso constructivo está dominado por la secuencia alternada de colocación de puntales y excavación, mientras que la colocación de tablonos es simultánea con esta última actividad.

Tabla 1-1 Fases de la secuencia constructiva típica apuntalada

Fase	Hitos
I. Hincado de vigas	- Colocación de vigas de acero mediante vibración, impacto o perforación previa
II. Excavación inicial	- Excavación hasta descubrir el primer nivel de puntales/anclajes - Colocación simultánea de tablonos de contención en etapas de máximo 1.2 m
III. Colocado del arriestre	- Instalación de puntales/anclajes y vigas de reparto
IV. Repetición de secuencia II y II	- Repetición de secuencia constructiva hasta alcanzar el nivel máximo de excavación

En el caso de obras lineales, esta secuencia constructiva es seguida de la colocación de rellenos finales luego del fin de los trabajos de las obras hidráulicas. Una vez que se terminan dichos rellenos, las vigas de acero son extraídas y recolocadas en un nuevo frente de avance.

1.3 Aplicaciones principales

Dentro de las fortalezas que han hecho que este sistema de contención sea preferido entre los constructores, podemos destacar que:

- es sencillo, económico y de rápida instalación
- las vigas de acero pueden ser extraídas y reusadas con relativa facilidad
- la punta de las vigas puede ser reforzada para el hincado en materiales gruesos (gravas, rocas suaves).

- los tablonces de contención secundarios no son necesarios en el caso de arcillas duras, rocas suaves y suelos cementados (Goldberg, Jaworski, & Gordon, 1976) debido al arqueo de suelos cuando el espaciamiento entre vigas es menor a los 2.0 m.

Por sus características inherentes, las limitaciones del sistema están dadas por

- que son muros permeables, por lo que se requiere usar un sistema de bombeo durante el proceso constructivo.
- la colocación de los tablonces que requiere de una buena cantidad de mano de obra.
- Los suelos deben exhibir suficiente capacidad de arqueo para permitir la colocación de los tablonces.



Fig. 9 Ademado de una excavación para una línea de conducción (Yepes Piqueras, 2015).



Fig. 10 Contención secundaria formada de concreto colado y malla electrosoldada. Proyecto Viaducto 52, colonia Atenor Salas, CdMx



Fig. 11 Muro Berlín apuntalado en una nueva fase de excavación parcial (Yepes Piqueras, 2015)

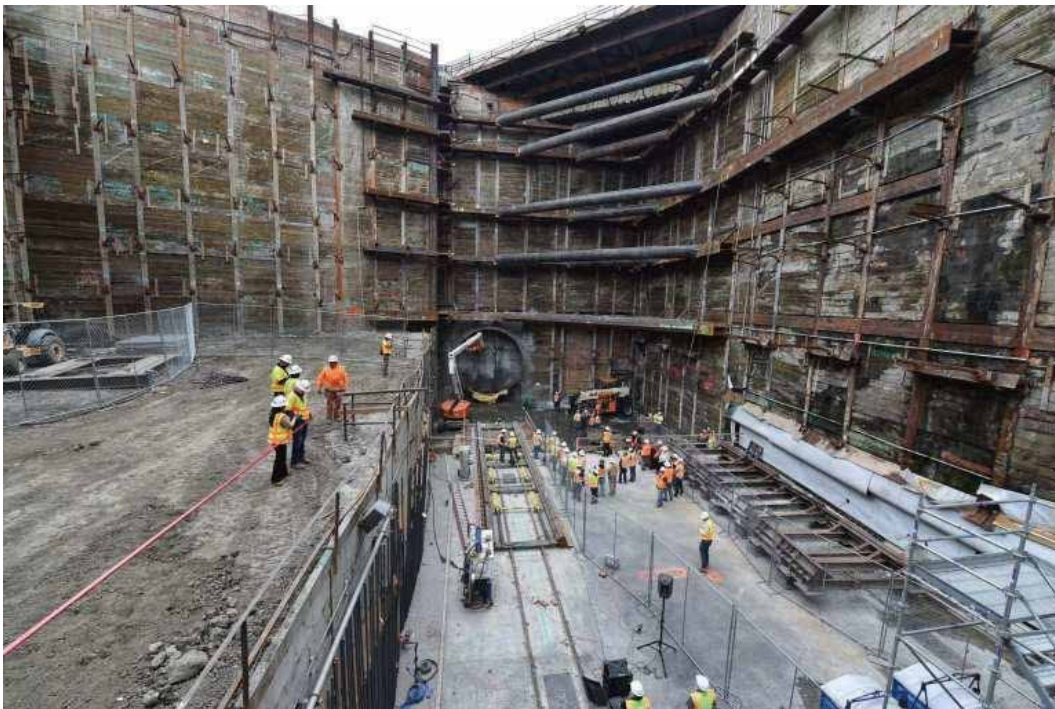


Fig. 12 Estación Bunker Hill, Metro de Los Ángeles, CA, EEUU (Jager, 2017)

2 Métodos de análisis

2.1 Aspectos geotécnicos

Arqueo

Un requisito fundamental para la aplicación del sistema constructivo, es que el suelo deberá tener suficiente capacidad de arqueado para poder colocar los tablonos de contención secundaria. El arqueado es la capacidad del suelo para transmitir cargas a los puntos de mayor rigidez, de manera similar a la que hacen los puentes hacia sus apoyos. Este comportamiento es más evidente en suelos granulares (arenas, y gravas) y en menor grado en suelos cohesivos (arcillas y limos). En un muro Berlín, esto implica una redistribución de presiones de tierra hacia las vigas de acero. Este arqueado se presenta típicamente entre 2 y 3 veces el ancho del elemento de acero (Caltrans, 2011)

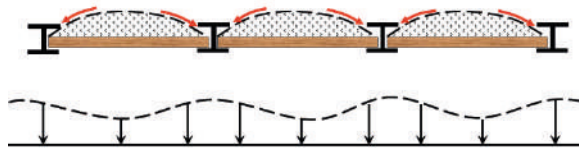


Fig. 13 Redistribución de presiones en el trasdós del muro Berlín por efecto del arqueado del suelo

Empuje de tierras

Cualquier excavación o talud provoca un desequilibrio de fuerzas internas en la masa de suelo, el cual, cuando no se halla en equilibrio con la resistencia del material, deriva en la falla y movimiento del terreno. Hacia finales de la década

de 1920, Terzaghi reportó los resultados de una serie de experimentos de modelos de muros de contención, donde encontró que la distribución de la presión horizontal debido al empuje del terreno era aproximadamente lineal (Clayton, Milititsky, & Woods, 1993). Es entonces cuando introduce el concepto de *coeficiente de presión de tierras*, definido como el cociente de la presión horizontal (σ'_h) y la vertical (σ'_v) efectiva del terreno:

$$K = \sigma'_h / \sigma'_v$$

Para una condición donde se permite un pequeño desplazamiento en el sentido del intradós de la excavación, el empuje puede alcanzar una presión mínima antes de la falla (resistencia activa). En el caso de ejercer una presión en dirección del trasdós, la resistencia del suelo llega a una presión máxima (resistencia pasiva). Estos dos estados son representados por los coeficientes de presión de tierras K_a y K_p .

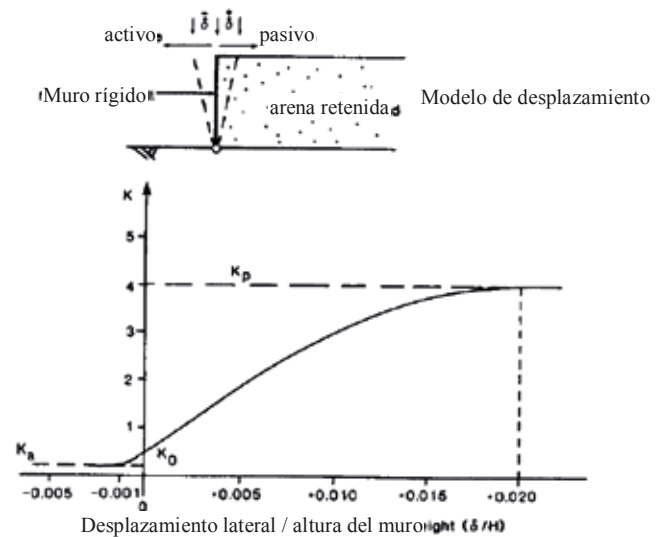


Fig. 14 Desplazamientos relativos del muro y coeficientes de presión de tierras K_a y K_p (Clayton, Milititsky, & Woods, 1993)

Estos coeficientes de empujes han sido relacionados con los parámetros de resistencia del terreno, de las cuales resaltamos algunas de las más usadas (y nombradas en honor a sus autores):

- Rankine (1857)
- Coulomb (1776)
- Método gráfico de Culmann (1866)
- Caquot y Kerisel (1948)
- Terzaghi y Peck (1967)

Formalmente hablando, los muros Berlín pertenecen al grupo de sistemas de contención llamados *pantallas flexibles*. Estos, requieren de puntales o anclajes para poder garantizar la estabilidad del sistema cuando el empotre dentro del suelo no es suficiente por sí mismo o no es económico de alcanzar. Además, se presentan deflexiones en la propia pantalla que ayudan a redistribuir las cargas hacia las zonas de mayor rigidez (puntales, anclajes y/o vigas de rigidez). En cualquier caso, se debe garantizar que las cargas del sistema (presión de tierras, cargas superficiales, presión de agua) sean soportados por la resistencia dada por el empotramiento de las vigas y el sistema de arriostramiento.

Análisis en el estado límite (ELF)

Los análisis en el estado límite de falla (ELF) son muy populares para estructuras de contención relativamente pequeñas (<10 m). Se asume que el muro se encuentra en el límite de la falla, como su nombre lo indica, y que el equilibrio de momentos o fuerzas pueden ser usados para comparar acciones (cargas aplicadas) con las reacciones

(resistencias del sistema). Se asume que el muro tiene un movimiento relativo suficiente para desarrollar los estados activos y pasivos del suelo (Bowles, 1972).

Existen tres casos y grupos principales de análisis dependiendo del sistema de arriostramiento que tenga el muro Berlín:

- i. Muros en voladizo, donde el empotramiento de las vigas de acero es suficiente para brindar estabilidad a todo el sistema. El análisis se centra entonces en resolver los elementos mecánicos en el muro usando:
 - a. Equilibrio de momentos (motores y resistentes) respecto a un punto arbitrario
 - b. Equilibrio de fuerzas (horizontales y verticales) que intervienen en el sistema.
 - c. Determinar la longitud de empotramiento mínima requerida. Este empotramiento es hallado por iteraciones y finalmente aumentado en un 20% al 40% del obtenido analíticamente.

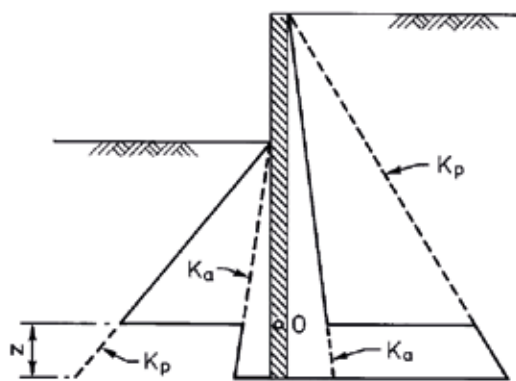


Fig. 15 Diagrama de presiones idealizadas de tierras para el cálculo de un muro en voladizo. K_a – ley de presión activa, K_p – ley de presión pasiva, O – punto de análisis

para la determinación del equilibrio de momentos (GCO, 2003)

ii. Muros con un nivel de arriostre, donde la estabilidad es garantizada puntales o anclajes, además del empotramiento de las vigas de acero del muro Berlín. El sistema puede ser resuelto por cualquiera de los siguientes métodos (Das, 2008):

a. Apoyo libre. La longitud de empotramiento es poca y se presentan giros en la base del muro.

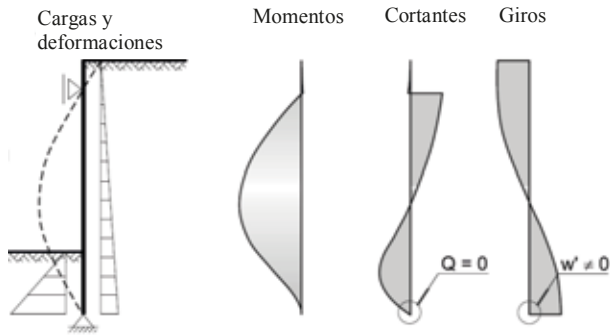


Fig. 16 Muro de apoyo libre: diagrama de momentos, cortantes y rotaciones

b. Apoyo fijo. La longitud de empotramiento es suficiente como para no presentar giros en la base del muro, los momentos flectores y deformaciones del claro libre disminuyen.

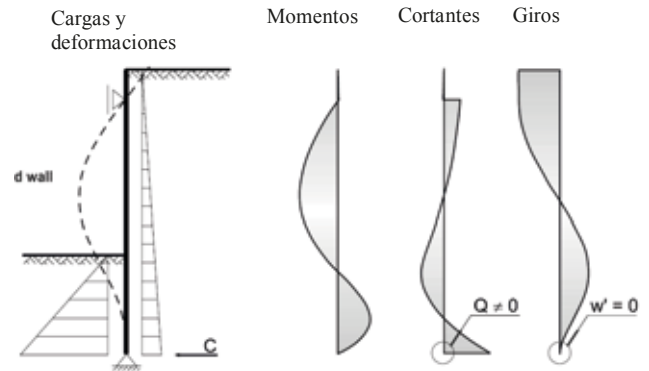


Fig. 17 Muro de apoyo fijo: diagrama de momentos, cortantes y rotaciones

iii. Muros con múltiples niveles de arriostramiento. Cuando se colocan dos o más puntales/anclajes en una sección del muro, se ha observado que los empujes del terreno se redistribuyen por el efecto de la rigidez del arriostramiento.

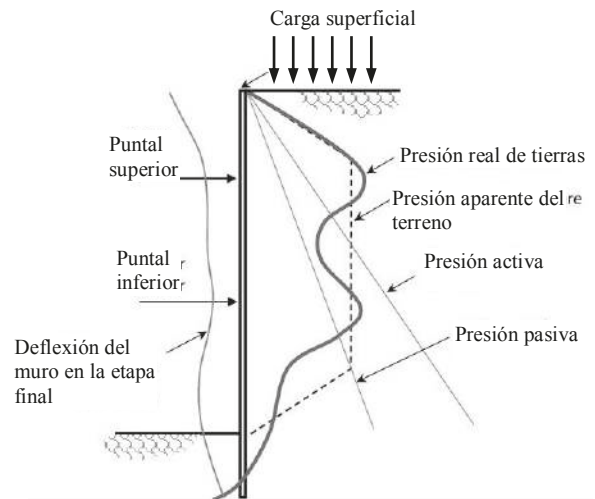


Fig. 18 Cargas actuantes en un muro apuntalado

Este empuje “aparente” corresponde a la envolvente de empujes observado por Terzaghi y Peck (1967), Schnabel (1982), Winter (1990) y Sabatini et al. (1999) y es función de la resistencia

y tipo de terreno, altura de libre del muro y número de puntales (AASHTO, 2012).

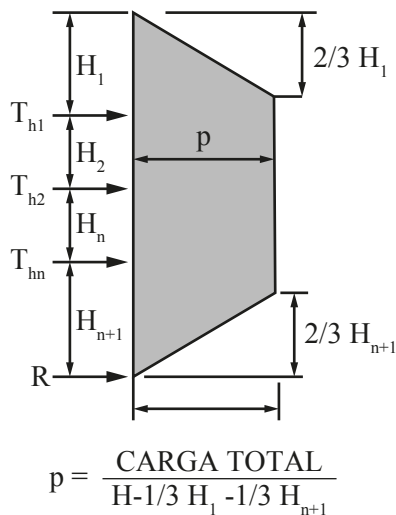


Fig. 19 Empuje redistribuido para una excavación de altura H apuntalada (SMMS, 2004)

Método del módulo de reacción

La hipótesis de una viga apoyada en una cimentación elástica ha tenido, históricamente, múltiples aplicaciones para el análisis numérico de muros y excavaciones apuntaladas. En todos los casos, se asume la hipótesis de Winkler (1867), que consiste en que la presión de tierras es proporcional a la deflexión de la pantalla, es decir, una “cama de resortes”. La constante elástica de estos resortes con que se modela al suelo corresponde al *coeficiente de módulo de reacción* (módulo de balasto o coeficiente de subgrado). Al cabo de varias iteraciones, el método tiene a virtud de dar como resultados las leyes de empuje de suelos, diagramas de momentos flectores, cortantes y reacciones de los apoyos para el análisis estructural del sistema.

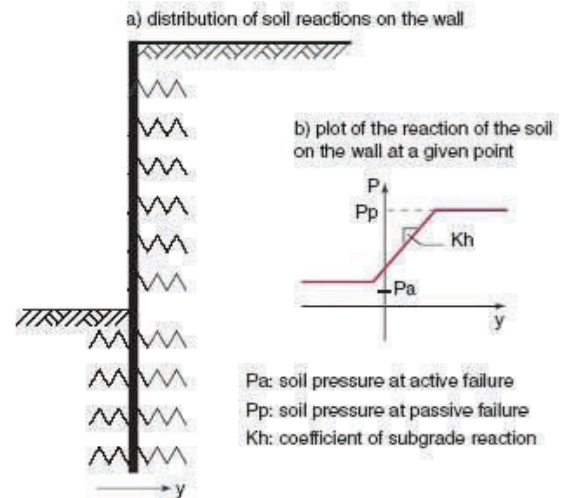
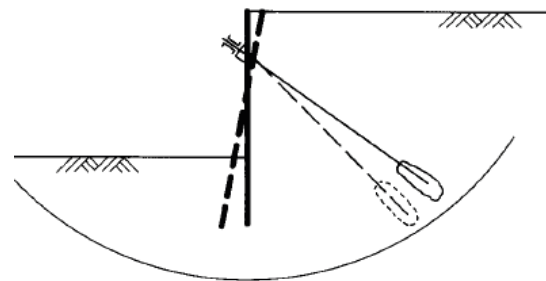
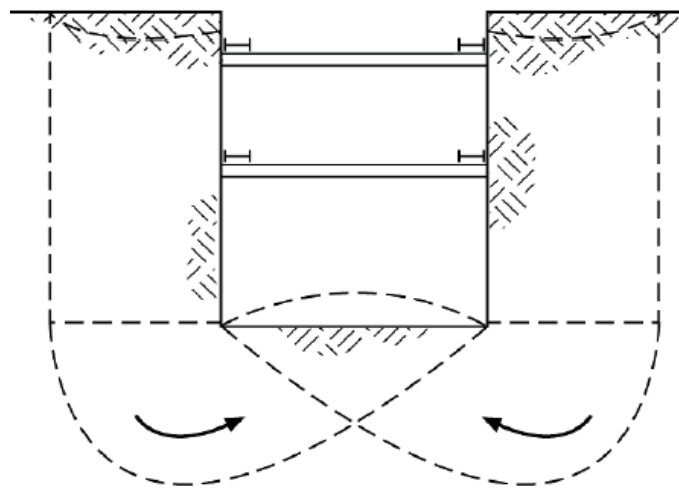
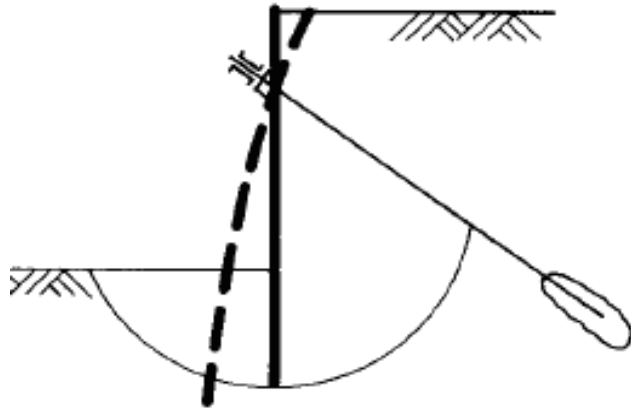


Fig. 20 Distribución de resortes elastoplásticos en un muro Berlín

A diferencia de los métodos de ELF, estos métodos tienen la ventaja de considerar el efecto del proceso constructivo en los empujes del terreno y el desarrollo de deformaciones y elementos mecánicos en la pantalla.





por pateo, falla de fondo

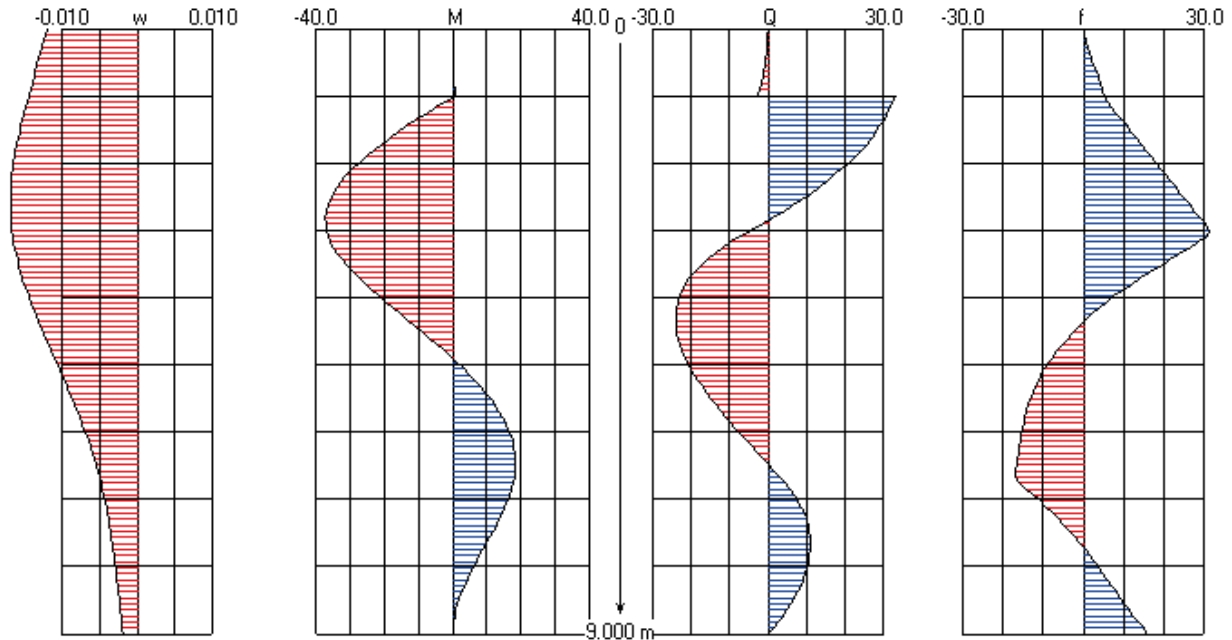


Fig. 22 Diagrama de deformaciones w [mm], momento flector M [kN-m/m], cortante Q [kN/m] y giro f [°] para un muro Berlín de 9.0 m de longitud calculado con el software SPW2006 (Verruijt, 2006)

Análisis geotécnicos adicionales

Existen diversos modos de falla asociados a la geometría y etapas de excavación que deben ser analizados de manera simultánea para garantizar la seguridad del muro: estabilidad global, falla por pateo (desplazamiento del pie), falla de fondo, subpresión y falla de los elementos de apuntamiento (COVITUR, 1987).

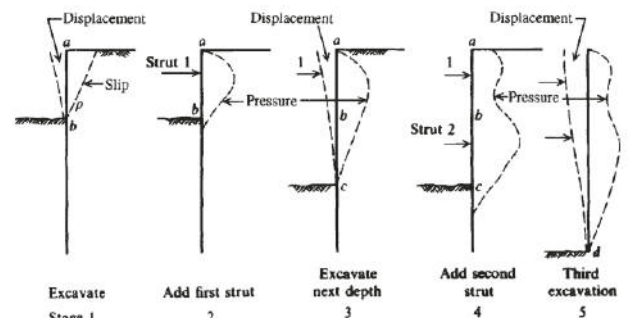


Fig. 23 Influencia del proceso constructivo en el comportamiento del muro (Bowles, 1972)

Elemento finito

Una tercera vía que ayuda a resolver los problemas más complejos de excavaciones, la integran los métodos de elementos finitos (MEF). Los MEF incorporan modelos matemáticos del medio continuo del suelo y de los elementos estructurales que interactúan entre sí, sin asumir posibles superficies de falla (presentes en los métodos analíticos). El terreno puede ser asumido como un material elástico-lineal, elasto-plástico, o de resistencia dependiente del tiempo o deformaciones. Sin embargo, la cantidad de información geotécnica del sitio requerida y la experiencia del diseñador se incrementa notablemente (principio de “garbage in, garbage out”), por lo que su aplicación suele ser reservada a proyectos complejos o de gran envergadura.

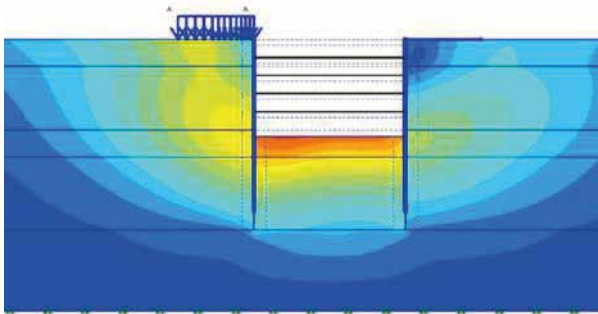


Fig. 24 Campo de desplazamientos para una excavación apuntalada en un MEF, software Plaxis V8

2.2 Revisión estructural

Vigas de acero

Una vez satisfechas las comprobaciones geotécnicas del muro, se puede proceder a realizar el análisis estructural de la pantalla. Las comprobaciones principales de las vigas del muro Berlín son en el sentido de garantizar que los

elementos trabajen en el intervalo elástico. Desde una perspectiva de esfuerzos admisibles (diseño ASD) este estado se alcanza cuando los esfuerzos de trabajo (USACE, 1994) de las vigas son menores a:

- Esfuerzo de flexión $< 0.6 f_y$
- Esfuerzo de corte $< 0.33 f_y$

donde f_y es el módulo de fluencia del acero.

Para el estado de flexión del muro, el módulo de sección (S_{min}) mínimo requerido de la sección de acero es igual a la relación entre el momento flector máximo ($M_{máx}$) y el esfuerzo admisible del acero (f_b):

$$S_{min} = M_{máx} / f_b$$

Tablones

Los elementos de contención secundarios son diseñados como vigas simples sometidas a flexión con las siguientes características:

- i. Longitud igual al espaciamiento entre vigas de acero.
- ii. Carga uniforme igual a la máxima presión de tierras en el trasdós

El manual de ademado de excavaciones de California (Caltrans, 2011), contiene una guía de especificación de tablones de madera en función del tipo de suelo, altura libre del muro y espaciamiento entre vigas de acero.



Fig. 25 Muro Berlín para contención de chatarra en los patios de Gerdau-Corsa (México)

Puntales / Vigas de reparto

Si bien el diseño estructural de estos elementos sale de los alcances de este manual, el diseño de los puntales y vigas de reparto (madrinas) deben ser analizados para el siguiente sistema de cargas:

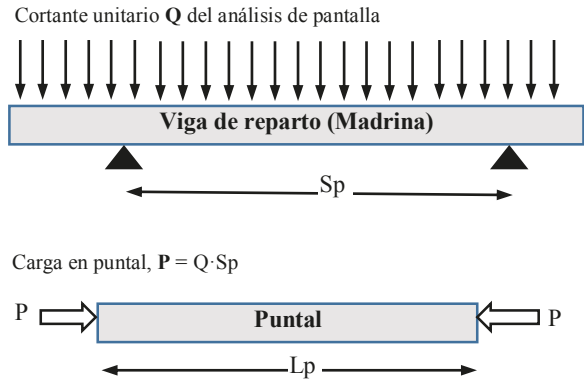


Fig. 26 Diagramas para el análisis estructural de la viga de reparto y puntales



Fig. 27 Muro Berlín permanente con elementos de concreto prefabricado como tablonces (Eastern Vault, 2020)

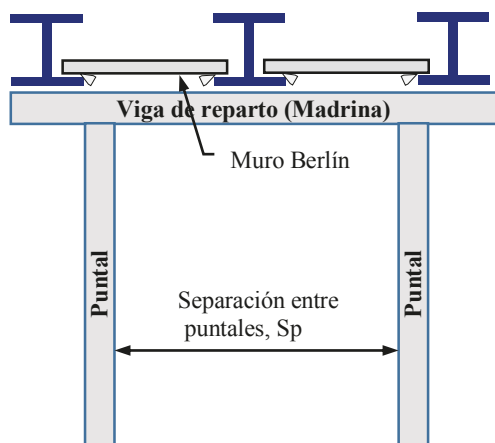


Tabla -1 Espesor de tablonces de madera recomendados en muros Berlín de acuerdo con CALTRANS (2011)

Consistencia	SUCS/Descripción	Excavación	Espesor (mm) de tablonces de madera para esparcimiento entre vigas de:					
			1.5 m	1.8 m	2.1 m	2.4 m	2.7 m	3.0 m
Suelos competentes (alta densidad)	ML, SM-ML. Limos y arenas limosas por encima del NAF. Arenas y gravas (medias a densas).	< 8.0 m	50	75	75	75	100	100
	CL, CH. Arcillas no fisuradas de consistencia media a muy dura.	8.0 m -18.0 m	75	75	75	100	100	125
Suelos difíciles (compacidad baja a media)	SW, SP, SM. Arenas y arenas limosas (sueltas).							
	SC. Arenas arcillosas (medias a densas), bajo el NAF.	< 8.0 m	75	75	75	100	100	125
	CL, CH. Arcillas sobreconsolidadas, saturadas.							
	ML, SM-ML. Limos no plásticos o arenas limosas bajo el NAF.	8.0 m -18.0 m	75	75	100	100	125	125
Suelos peligrosos (tablonces no recomendados)	CL, CH. Arcillas blandas.	< 5.0 m	75	75	100	125	-	-
	ML. Limos ligeramente plásticos bajo el NAF.	5.0 m - 8.0 m	75	100	125	150	-	-
	SC. Arenas arcillosas bajo el NAF.	8.0 m -11.0 m	100	125	150	-	-	-

3 Ejemplo de diseño

Revisemos el caso de un muro Berlín desplantado en un suelo granular (arenas), con excavación máxima de 6.0 m y un nivel de arriostamiento (anclajes o puntales). El espaciamiento horizontal entre vigas (s) será 1.5 m. En este ejemplo debe calcular, por iteraciones, la longitud de empotre (por debajo del nivel máximo de excavación) requerida para asegurar la base del muro, la reacción del arrioste y el momento flector máximo del muro Berlín.

3.1 Geometría y cargas

- ☒ Altura de excavación, $H_L = 6.0$ m
- ☒ Profundidad del arrioste, $H_a = 1.5$ m
- ☒ Sobrecarga (uniforme), $q = 1.5$ ton/m²
- ☒ Espaciamiento entre vigas $s = 1.5$ m
- ☒ Para el cálculo del método de apoyo libre, es necesario suponer de manera inicial la longitud de empotre. Se asume una longitud inicial $D = 3.1$ m

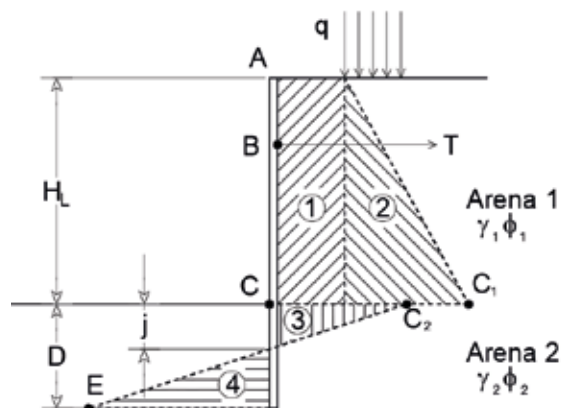


Fig. 28 Definición de parámetros usados en el cálculo

3.2 Resistencia del terreno

Se tienen dos estratos de arenas, una superficial de arena media hasta los 6.0 m de profundidad, y otra de consistencia densa a muy densa de espesor indeterminado. Las propiedades geotécnicas relevantes de estas capas son:

Capa	γ [t/m ³]	ϕ [°]
Arena 1	11.75	30
Arena 2	21.90	34

3.3 Coeficientes de presión de tierras

Usando la teoría de Rankine, los coeficientes de presión de tierras pueden ser calculados con las siguientes ecuaciones:

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

$$K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

De esta forma, los coeficientes correspondientes serán

$$\text{Arena 1 } K_{a1} = 0.33 \quad K_{p1} = 3.0$$

$$\text{Arena 2 } K_{a2} = 0.28 \quad K_{p2} = 3.54$$

3.4 Diagrama de presiones

Las presiones de tierras en los puntos de interés mostrados en la Fig. 28 son calculados como:

$$P_A = q \cdot K_{a1} = 0.5 \frac{t}{m^2}$$

$$P_{C1} = Ka_1(q + \gamma_1 H_L) = 4.0 \frac{t}{m^2}$$

$$P_{C2} = Ka_2(q + \gamma_1 H_L) = 3.39 \frac{t}{m^2}$$

La profundidad a la cual se localiza el cambio entre empuje activo y pasivo (j), es calculado como:

$$j = \frac{P_{C2}}{\gamma_2(Kp_2 - Ka_2)} = 0.55 \text{ m}$$

Por lo que

$$P_E = \gamma_2(D - j)\gamma_2(Kp_2 - Ka_2) = 15.78 \frac{t}{m^2}$$

3.5 Empujes del suelo

Usando las áreas achuradas en la figura de referencia, los empujes de cada zona (nótese que el análisis es para un muro de ancho unitario) son calculados como sigue:

$$E_1 = P_A H_L = 3.00 \frac{t}{m}$$

$$E_2 = \frac{H_L}{2}(P_{C2} - P_A) = 8.68 \frac{t}{m}$$

$$E_3 = P_{C2} \frac{j}{2} = 0.93 \frac{t}{m}$$

$$E_4 = P_E \frac{(D - j)}{2} = 20.13 \frac{t}{m}$$

Clasificando los empujes resultantes en activos (E_a) y pasivos (E_p), se tiene:

$$E_a = E_1 + E_2 + E_3 = 12.61 \frac{t}{m}$$

$$E_p = E_4 = 20.13 \frac{t}{m}$$

3.6 FS del pie

El factor de seguridad del pie (FS_E) del sistema deberá expresar la razón del empuje pasivo (resistencia) al empuje activo (fuerzas motoras), y es calculado como:

$$FS_E = \frac{E_p}{E_a} = 1.60$$

Este factor de seguridad deberá ser mayor a 1.5 en muros temporales, y 2.0 en caso de muros permanentes.

Con esto se comprueba que la suposición de la longitud de empotre de 3.2 m es válida. Sin embargo, dada la alta sensibilidad del cálculo hacia este parámetro, se recomienda el incremento de entre el 20% y 30% del resultado del análisis para fines constructivos. Por lo tanto, el empotramiento requerido será de $D \geq 4.0 \text{ m}$.

3.7 Reacción del arriostramiento

La fuerza que deberá soportar el arriostramiento, por unidad de ancho del muro, es determinada mediante la diferencia de empujes activos y pasivos:

$$T = E_p - E_a = 7.52 \frac{t}{m}$$

Cuyo valor deberá ser usado para el diseño del anclaje y vigas de reparto,

3.8 Momento flector máximo

El momento flector máximo del muro se presenta a la profundidad (x) donde la fuerza cortante es nula, es decir, cuando se cumple con la ecuación:

$$T = P_A x + \frac{P_{C1} - P_A}{2H_L} x^2$$

Resolviendo la ecuación cuadrática, se tiene que esta profundidad es $x = 4.29 \text{ m}$, medido desde la cabeza del muro.

Así, es posible establecer el momento flector máximo a esta profundidad para cada prisma de empuje (Fig. 28) parcializado en "x", bajo las siguientes formulaciones:

$$M_1 = \frac{P_A x^2}{2} = 4.60 \frac{\text{ton} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$M_2 = \frac{(P_{C1} - P_A) x^3}{3H_L} = 15.37 \frac{\text{ton} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$M_a = T \cdot H_a = 11.28 \frac{\text{ton} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

El momento máximo será:

$$M_T = M_1 + M_2 - M_a = 8.70 \frac{\text{ton} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

3.9 Módulo de sección requerido

Si el espaciamiento máximo entre las vigas del muro Berlín es de 2.0 m (s), el momento flector máximo actuante en cada viga será:

$$M_{m\acute{a}x} = (2.0\text{m}) \left(8.70 \frac{\text{ton} \cdot \text{m}}{\text{m}} \right) = 17.4 \text{ ton} \cdot \text{m}$$

Para una viga grado 50 de acero ASTM A992, el esfuerzo permisible es calculado como:

$$f_b = 0.6f_y = 0.6(50\text{ksi}) = 206.8\text{MPa}$$

De esta forma, el módulo de sección mínimo que deberán tener las vigas del muro Berlín es:

$$S_{min} = \frac{M_{m\acute{a}x}}{f_b} = \frac{17.4 \text{ ton} \cdot \text{m}}{206.8\text{MPa}} = 824.4\text{cm}^3$$

Este módulo de sección mínimo es satisfecho con los siguientes perfiles IR del manual IMCA (2015)

- W12x45 (IR 305x66.9), $S_x = 952 \text{ cm}^3$
- W14x38 (IR 356x56.7), $S_x = 895 \text{ cm}^3$
- W16x36 (IR 406x53.7), $S_x = 926 \text{ cm}^3$

3.10 Determinación de tablonés

Finalmente, los tablonés de madera son especificados para una excavación de 6.0 m en arenas bien graduadas de consistencia suelta, y una separación entre vigas de acero es de 2.0 m. De acuerdo con la Tabla -1., el espesor de tablonés de madera deberá ser de al menos 75 mm (3")

4 Conclusiones

La técnica de muro Berlín es muy versátil y puede aplicarse a una gran variedad de proyectos. Entre sus virtudes destaca su economía, adaptabilidad a las condiciones del proyecto, facilidad de instalación y posibilidad de reuso de los perfiles metálicos. El éxito de estos muros depende en gran medida de la calidad del diseño geotécnico y el cuidado en el seguimiento del proceso constructivo del proyecto. El proceso constructivo típicamente está dominado por la secuencia de excavación (alternando con la colocación de tablonés) y apuntalamiento del muro Berlín.

En caso de que los muros Berlín sean usados como muros definitivos, se debe realizar un análisis del efecto de la corrosión siguiendo el procedimiento sugerido por García y Villeda (Resistencia a la corrosión de Pilotes de Acero, 2020), cuyo vínculo es incluido en la bibliografía de referencia.



5 Referencias

- AASHTO. (2012). *LRFD Bridge Design Specifications, Customary Units*. Washington DC, USA: AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS.
- Bowles, J. (1972). *Foundations Analysis and Design*. New York: McGraw-Hill.
- Caltrans. (2011). *Trenching and Shoring Manual*. California Department of Transportation.
- Clayton, C., Milititsky, J., & Woods, R. (1993). *Earth Pressure and Earth-retaining Structures* (2a ed.). Sulfolk, UK: Blackie Academic & Professional.
- COVITUR. (1987). *Manual de Diseño Geotécnico Volumen I.*. México DF.: Comisión de Vialidad y Transporte Urbano (COVITUR).
- Das, B. M. (2008). *Advance Soil Mechanics* (3a ed.). Oxon, UK: Taylor & Francis.
- Eastern Vault. (10 de 07 de 2020). Obtenido de Precast Concrete Decorative Lagging: <https://eastervault.net/precast-concrete-lagging-walls/>
- García Carrasco, E., & Torres Villeda, R. (marzo-mayo de 2020). Resistencia a la corrosión de Pilotes de Acero. *Revista Geotecnia (SMIG)*(255). Obtenido de <https://www.smig.org.mx/archivos/revista-trimestral-smig/revista-geotecnia-smig-numero-255.pdf>
- GCO. (2003). *Pub. 1/90. Review of Design Methods for Excavations*. Geotechnical Engineering Office. Honk Kong: The Government of the Hong Kong Special Administrative Region.
- Goldberg, D. T., Jaworski, W. E., & Gordon, D. M. (1976). *FHWA-RD-75-128. Lateral Support Systems and Underpinning* (Vol. I: Design and Construction). Washington, DC: Federal Highway Administration. EEUU.
- IMCA. (2015). *Manual de Construcción en Acero* (5a ed.). (A. Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, Ed.) México, DF: Limusa.
- Jager, R. (1 de enero de 2017). *Regional Connector tunneling machine breaks through at the Grand Avenue Arts/Bunker Hill Station*. Obtenido de Metro The Source: <https://thesource.metro.net/2017/06/01/regional-connector-tunneling-machine-breaks-through-at-the-grand-avenue-artsbunker-hill-station/>
- SMMS. (2004). *Manual de Construcción Geotécnica, Tomo I y II*. México DF: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos AC.
- Taméz, E. (2001). *Ingeniería de Cimentaciones*. México: TGC Geotecnia S.A de C.V.
- USACE. (1994). *EM 1110-2-2504. Design of Sheet Pile Walls*. Washington: US Army Corps of Engineers.
- Verruijt, A. (2006). Software SPW2006. *Analysis of a sheet pile wall in a layered soil, with multiple anchors. Soil response modeled by a series of elast-plastic springs*. Delf University. Obtenido de <https://geo.verruijt.net/software.html>
- Weissenbach, A., Hettler, A., & Simpson, B. (2003). Stability of Excavations. En Smoltezy, & Ulrich, *Geotechnical Engineering Handbook* (págs. 273-409). München: Ernst & Sons.
- Yepes Piqueras, V. (14 de junio de 2015). *Entibación berlinesa o "muro berlinés"*. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2015/06/14/entibacion-berlinesa-o-muro-berlines/>



DIRECTORIO

OFICINAS COMERCIALES

T. +52 55 5262 7300 / Av. Ejército Nacional 216 P.2, Anzures, Miguel Hidalgo, CDMX, 11590.

ÁREA DE DESARROLLO DE MERCADO

desarrollodemercado@gerdau.com

PLANTAS

CD. SAHAGÚN

T. +52 791 913 8105 / Km. 3 Ctra. Mex - Cd. Sahagún, Zona Ind. Tepeapulco, Cd. Sahagún, Hidalgo, 43990

TULTITLÁN

T. +52 55 5894 0044 / 2487 2065 / Primera Sur S/N, Independencia, Tultitlán, Edo. de México, 54915

LA PRESA

T. +52 55 5003 4030 / 5062 1916 / Av. La Presa 2, Zona Industrial La Presa, Tlalnepantla, Edo. De México, 54187

DISTRIBUCIÓN

CDMX

T. +52 55 5089 8930 / Año 1857 8, Ticomán, Gustavo A. Madero, CDMX, 07330

MONTERREY

T. +52 81 8748 7610 / Blvd. Carlos Salinas de Gortari 404, Centro Apodaca, Nuevo León, 66600

PATIOS DE CHATARRA Y CENTROS DE RECOLECCIÓN

CD. SAHAGÚN

T. +52 791 9138 105 / Km. 3 Ctra. Mex - Cd. Sahagún, Zona Ind. Tepeapulco, Cd. Sahagún, Hidalgo, 43990

LA PRESA

T. +52 55 5003 4030 / 5062 1916 / Av. La Presa 2, Zona Industrial La Presa, Tlalnepantla, Edo. de México, 54187

LOS REYES

T. +52 55 5856 1651 / Tepozanes Los Reyes, Acaquilpan, México, 56428

GUADALAJARA

T. +52 33 3668 0285 / 36702769 / Av. 18 de Marzo 531, La Nogalera, Guadalajara, Jalisco, 44470

SAN JUAN

T. +52 55 2603 3275 / 5262 7359 / San Juan 669, Granjas Modernas, CDMX, 07460

TULTITLÁN

T. +52 55 5894 0044 / 2487 2065 / Primera Sur S/N, Independencia, Tultitlán, Edo. de México, 54915

VERACRUZ

T. +52 229 923 1359 / Ctra. Fed. Aluminio L. 7 o Camino Puente Roto Km. 1.5, Nuevo Veracruz, Veracruz, 91726



GERDAU CORSA

El futuro se moldea

gerdaucorsa.com.mx



Gerdau Corsa. El futuro se moldea.