

Retaining Wall based on mechanically stabilized tire stack

Muro de contención construido con neumáticos estabilizados mecánicamente

P. Barros *, G. Sarabia *, F. Valdés ¹*, P. Serrano *, I. Gaytan *

* Universidad Técnica Federico Santa María – Valparaíso, CHILE

Fecha de Recepción: 10/01/2019

Fecha de Aceptación: 15/05/2019

PAG 252-267

Abstract

In the last great fire of 2014 that affected Valparaíso, numerous building and structural deficiencies about slope construction were found. This issue was a significant factor in the number of homes destroyed. Then, the motivation arises to develop inexpensive retaining wall technologies, structurally validated, that can be implemented by people without greater technical knowledge. In parallel, Chile has a fleet close to 5,000,000 vehicles (INE, 2017). This means a potential replacement of 20,000,000 tires in 4 or 5 years, transforming them into an abundant and environmentally persistent volumetric residue, which accumulates especially in the gorges of Valparaíso. In this context, and as the first objective of this research, we identify the opportunity to contain landfills with recycled tire structures. In the present work, a vision about the state of international, national and local art about retaining wall with tires is shown and examples are presented. Then, exploratory proposals are developed, which finally settle in a definitive proposal of a retaining wall with mechanically stabilized tires. This proposal was submitted to structural calculation according to current engineering criteria, to lastly recommend it as a valid option for containing a horizontal plane with satisfactory building standards.

Keywords: Retaining wall, tires, mechanically stabilized earth (MSE), craft construction

Resumen

En el último gran incendio que afectó a Valparaíso el año 2014 quedaron al descubierto muchas deficiencias, tanto estructurales como constructivas, sobre la edificación en pendiente, factores que fueron determinantes en la cantidad de viviendas destruidas. De ahí surgió la motivación para desarrollar tecnologías económicas para los muros de contención, que fueran estructuralmente válidas y pudieran ser implementadas por personas sin mayores conocimientos técnicos. Por otra parte, el año 2015, Chile contaba con una flota de unos 5.000.000 vehículos (INE, 2017). Esto significa que existe un potencial de 20 millones de neumáticos de desecho acumulables en un periodo de entre 4 a 5 años, volumen que se transforma en un residuo abundante y persistente para el medio ambiente, y que se acumula principalmente en las quebradas entre los cerros de Valparaíso. En este contexto identificamos como principal objetivo de esta investigación, la oportunidad de contener los rellenos de tierra con estructuras construidas con neumáticos de desecho. Este trabajo presenta una visión del estado internacional, nacional y local de los muros de contención construidos con neumáticos y algunos ejemplos. Se desarrollaron algunas propuestas exploratorias que derivaron finalmente en la definitiva: un muro de contención construido con neumáticos estabilizados mecánicamente. Esta propuesta se sometió al cálculo estructural de acuerdo a los criterios ingenieriles vigentes, para finalmente recomendarla como una opción válida de retener un plano horizontal bajo estándares constructivos satisfactorios.

Palabras clave: Muro de contención, neumáticos, tierra estabilizada mecánicamente (TEM), construcción artesanal

1. Introducción

Valparaíso es una ciudad que desde sus orígenes creció en forma de anfiteatro sobre las laderas de sus cerros, desde el nivel del mar hasta los 300 metros de altura y horizontalmente en unos 8 km de extensión. Como se aprecia

en los diagramas de la (Figura 1), sus habitantes han desarrollado una cultura y habilidad para lograr la horizontal en un terreno con mucha pendiente.

¹ Autor de correspondencia:

Universidad Técnica Federico Santa María – Valparaíso, CHILE

E-mail: francisco.valdes@usm.cl

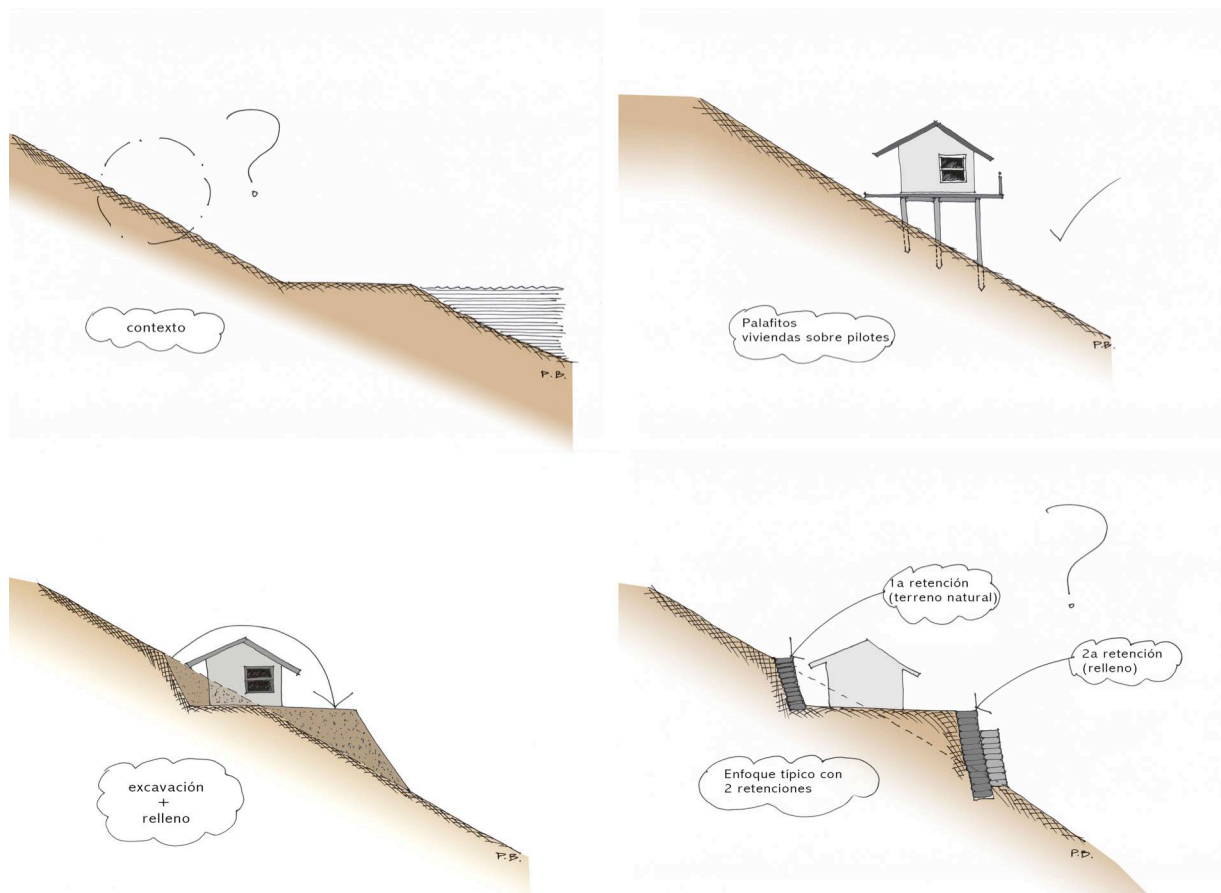


Figura 1. Esquemas de las formas tradicionales de obtención de la horizontal en Valparaíso (Dibujos: Pablo Barros L.)

Con posterioridad al incendio que ocurrió en abril del 2014, que afectó principalmente a los barrios periféricos y socioeconómicamente vulnerables (Barrales, 2017), resultó fácil comparar los daños sufridos entre las viviendas próximas al camino de cintura, construidas sobre suelos estabilizados y con muros de contención, y aquellas construidas directamente sobre tierra soportadas solamente sobre pilares de madera empotrados en el terreno. Las primeras sufrieron daños, pero no al nivel de destrucción y colapso de las segundas.

Al observar Valparaíso desde el mar hacia los cerros, con sus pendientes y quebradas, se aprecian los diferentes tipos de muros de contención, de acuerdo a los diversos periodos de desarrollo. Los de tipo gravitacional, construidos en mampostería de piedra de granito, eran los más comunes hasta mediados del siglo pasado (Hurtado et al., 2016); técnica que fue abandonada gradualmente por los constructores. Una explicación de este fenómeno es, principalmente, el mayor costo de las materias primas, la desaparición de la mano de obra especializada y el mayor costo del hormigón armado.



Figura 2. Viviendas construidas sobre terreno retenido por muros y sobre pilares, Valparaíso (Fuente desconocida)

Considerando que en este trabajo consideraron los cerros de topografía complicada y sus habitantes de muy bajos recursos económicos, la construcción en albañilería y en hormigón armado quedaron excluidas de las posibilidades. No obstante, los muros de contención artesanales constituyen una estrategia muy utilizada para retener el plano horizontal en diversos lugares de la región y han llegado a convertirse en parte de la memoria de la ciudad, como se aprecia en la (Figura 2).

El objetivo de este proyecto investigativo es revisar las técnicas que se pudieran desarrollar como una posible alternativa y solución técnica para construir muros de contención artesanales de bajo costo para viviendas ubicadas en las laderas de la región de Valparaíso. Luego de una encuesta y evaluación de las posibilidades, la misma investigación nos condujo al uso de neumáticos de desecho como un material ampliamente disponible para crear muros de contención. Como los neumáticos se consideran desperdicios, se pueden obtener gratuitamente y, como resultado positivo e importante, la propuesta también considerara el aspecto ecológico y el cuidado del medio ambiente, dándole una finalidad a estos elementos botados en todas partes. Se estima que en Europa, los neumáticos en desuso alcanzan las 3,4 millones de toneladas (Ramos et al., 2011) y en Chile, esta cantidad llega a los 3 millones anuales (CONAMA, 2008).

Por último, es importante señalar que la reutilización de los neumáticos ha despertado interés en la tecnología de los materiales (ETRMA, 2015). Sus propiedades han expandido la gama de posibilidades en la construcción: absorbedores de energía, impermeabilidad, posibilidad de ser chancados y usados en mezclas de materiales con características rígido-flexibles (Long, 1990) transformandolos en un material interesante tanto para la arquitectura como la ingeniería.

2. Discusión y desarrollo

2.1 Marco teórico y estado del arte

Un muro de contención es una estructura construida para retener un terreno natural o soportar un relleno artificial.

Para lograr la estabilización y equilibrio de la masa de tierra, el muro de contención transmite las cargas que genera hacia la fundación. Se usan para detener las masas de terreno cuando las condiciones no permiten la pendiente natural. A través de la historia, los muros de contención se han construido en diferentes materiales. Existen diversas técnicas que usan rocas, concreto, metal, tierra y otros; todas con diferentes características y costos. En sectores urbanos o rurales de escasos recursos, la variable económica es clave para escoger el material que se usará.

Los muros de contención se clasifican por la forma de transmitir las cargas a las que se encuentran sometidos (Caltrans, 2004):

Gravitacional: depende principalmente de su propio peso y de su resistencia natural a la compresión. Por ej.: relleno de roca, mampostería, terrazas andinas, gaviones y bloques de contención prefabricados.

Estructural: materiales moldeados. Ej.: viga voladiza, hormigón armado, con contrafuertes, accionados y anclados.

Tierra reforzada o suelo reforzado: formados por el material del mismo suelo al que se le introducen horizontalmente bandas de refuerzo para resistir el movimiento. Por ej.: con tensores metálicos, mallas geotextiles, estabilizadores de madera y jaulas de hormigón.

La tecnología de contención de los suelos avanza hacia la creación de soluciones que sean cada vez más simples, económicas y rápidas de ejecutar. Idealmente, se busca evitar las obras húmedas (como los muros de hormigón) y el movimiento de grandes cantidades de material, como en el caso de los muros de piedra. Las investigaciones e innovaciones destacan este razonamiento con propuestas como muros de contención en base a geoceldas (Mattox, 1994) o pantallas de malla de acero ancladas, como el sistema Erdox® (Posadas, 2017). En el primer caso, se agrega un panel frontal a la superficie de una geocelda lo que permite construir muros de contención verticales apilando unidades de geoceldas una sobre la parte superior de la otra y rellenando el panel frontal ya sea con piedras o concreto en bajas cantidades hasta completar la cara del muro. Por otra parte, el sistema Erdox® (Figura 3) es una construcción de

acero flexible en forma de pirámide, con un peso neto razonablemente bajo. El anclaje en el extremo de esta construcción en forma de paraguas se logra con un perno

sencillo en la losa base o en el anclaje, y así la pantalla de acero retiene el suelo.

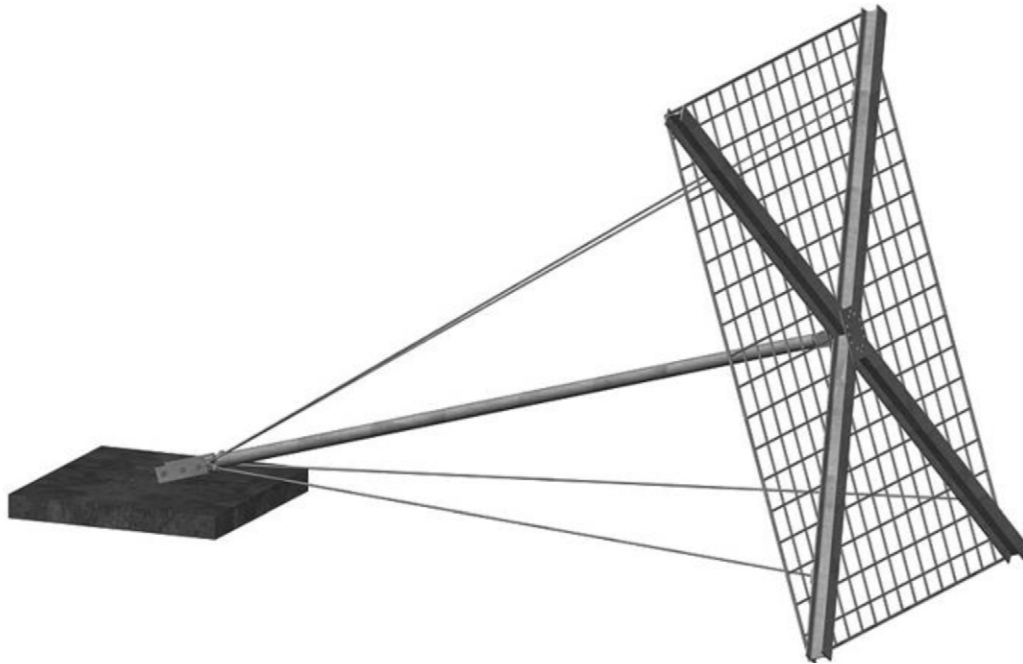


Figura 3. Sistema Erdox® (Fuente: Betonform L.A.)

2.2 Uso de neumáticos en las obras civiles

El uso de neumáticos en las obras civiles se ha estudiado por décadas. Los primeros datos se registran en Francia en 1976 (Long, 1990). En 1990, Nguyen Thanh Long publicó *The Pneusol*, donde recopila estudios sobre la combinación suelo-neumático y su aplicación en las obras civiles, estabilización de taludes y refuerzo de suelos, hasta su uso en la construcción de caminos. Esta técnica se ha usado en diversas partes del mundo, con resultados satisfactorios.

Los neumáticos de desecho abundan en todo el planeta y es posible encontrar ejemplos de su uso como retenedores en varios países. Es el desecho volumétrico más abundante en las cercanías de las zonas urbanas. Los neumáticos constituyen una tecnología que solo utiliza su banda de rodadura externa, por lo que el 90% de su estructura queda intacta.

2.3 Muros de contención con neumáticos

Este sistema usa los neumáticos de desecho como elemento de contención y/o de refuerzo. Se pueden emplear completos o trozados; se pueden unir formando capas horizontales continuas, sobrepuestas, para formar un muro de las dimensiones necesarias.

Esta tecnología constructiva para retener un suelo con neumáticos no es rara en la región de Valparaíso, incluso es posible encontrar casos de antiguos muros artesanales que continúan en servicio.

2.4 Muros con neumáticos y su disposición horizontal

La (Figura 4) presenta un muro de 9 capas o hileras de alto, por lo que se estima que mide unos 1,80m de alto. Este caso es muy interesante por su proximidad a una casa de dos pisos.



Figura 4. Muro de contención en el Cerro Las Cañas, Valparaíso (Foto: cortesía de Claudio Peña)

2.5 Muro con neumáticos soportados sobre albañilería de piedra

La (Figura 5) muestra un muro de casi 4m de altura construido sobre albañilería de piedra. Visto en detalle (Figura 5), la albañilería se usa para nivelar la base del muro.

Además, se estima que la vegetación que ha crecido entre los neumáticos podría actuar como refuerzo, ayudando a soportar el empuje del suelo. Sin embargo, esta suposición requiere de un estudio específico.



Figura 5. Muro de contención en el sector de La Vega, Olmué (Foto: cortesía de Tania Estay)

El muro representado en la (Figura 6) presenta los neumáticos dispuestos en pilas con cierta inclinación hacia el

terreno contenido y con las hileras entrecruzadas en el nivel superior.



Figura 6. Muro de contención en sector "Medialuna de La Dormida", Olmué (Foto: Gustavo Sarabia)

2.6 Muros de contención con neumáticos modificados – Método Yantek

Un caso interesante de considerar es el de la compañía Yantek en México. Como se observa en el informe del contratista para la Junta Directiva Integrada de Manejo de Desechos de California (CIWMB, por su nombre en inglés) el sistema "puede ser anclado y asegurado a los taludes para su estabilización y es adecuado para cortes profundos en los caminos, característicos de la construcción de caminos en Baja California" (CIWMB, 2009). Allí se construyen muros con neumáticos modificados; se les corta la cara lateral de las bandas con ayuda de una maquinaria especial. Luego, la banda se gira hacia adentro, dejando su cara interna hacia

afuera, generando así una unidad de caucho llamada "8", debido a su forma (Figura 7); la unión de muchos "8" forma una "estera", que se rellena con suelo compactado. Los costados de los neumáticos se usan en la parte trasera del muro. Una hilera se desfaza unos 5cm, creando así una inclinación de aproximadamente 70° en la parte frontal del sistema, como se aprecia en la (Figura 8). En ese espacio de 5cm se pueden colocar plantas. Este sistema no genera residuos y trabaja por gravedad. El muro es pesado, flexible y con capacidad de drenaje. Además posee una base amplia que constituye el 60% de su altura. Este sistema de muro se ancla al talud y al suelo.



Figura 7. Resultado de la modificación de los neumáticos (Foto: www.yantek.com)

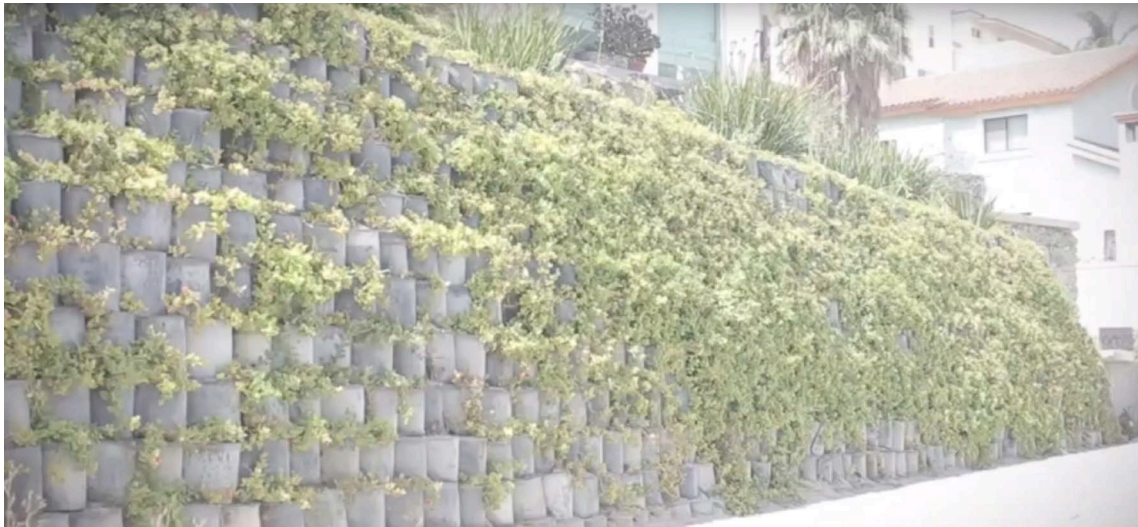


Figura 8. Muro de contención construido con sistema Yantek (Photo: www.yantek.com)

2.7 Muros de contención contruidos con neumáticos de desecho

Chile posee actualmente una flota de 4.960.945 vehículos, lo que significa un potencial de 20.000.000 de neumáticos de desecho en un periodo de 4 a 5 años (INE, 2017). En consecuencia, los neumáticos constituyen un residuo de gran volumen, abundante y persistente para el

medio ambiente en las cercanías de las ciudades. De ahí, el interés de encontrar formas de reutilizarlos en la construcción de terrenos planos. En este caso, el uso de neumáticos para moldear la topografía parece ser adecuado dada la disponibilidad de material y la velocidad de construcción que el muro de contención puede alcanzar, usando la mano de obra local y herramientas poco sofisticadas.

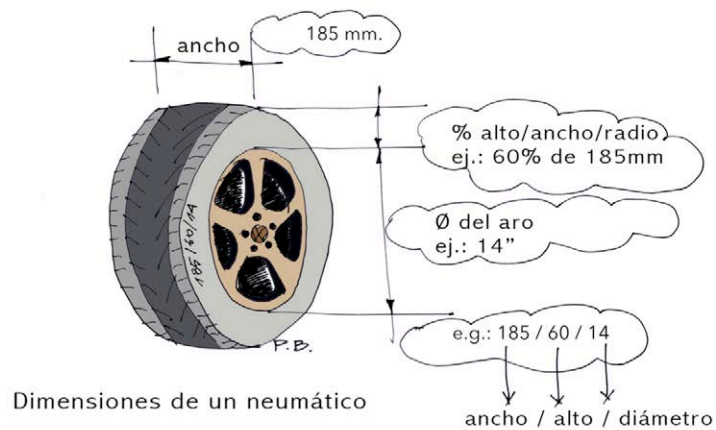


Figura 9. Diagrama explicativo de la simbología de un neumático (Dibujo: Pablo Barros L.)

3. Muros de contención construidos con neumáticos: propuestas exploratorias

Al revisar la literatura, se encuentran diversas formas de construir muros de contención con neumáticos. Estos sistemas usan neumáticos ya sea en su forma original o intervenida por procesos industriales, con sistemas de apoyo simples o con algún tipo de refuerzo. Pueden rellenarse con tierra o simplemente encadenarlos para formar una malla flexible que trabaja por tracción.

Las restricciones de diseño se establecen en base a las condiciones contextuales. Para diseñar un muro de contención construido con neumáticos, adecuado a la topografía de Valparaíso, con ejecución artesanal, construcción simple, económica y en la que su operación

estructural sea segura y pueda ser validada previamente mediante cálculos, se proponen los siguientes criterios:

- Muro con neumáticos, adecuado para retener el suelo y sin corte de taludes.
- Altura de construcción de 3m, medidos desde el nivel natural del terreno.
- Ancho del muro, equivalente al diámetro externo de un neumático de 185 / 60R14 (Figura 4)
- Uso de neumáticos de desecho sin intervención (bandas o cortes).

En las (Figura 10), (Figura 11) y (Figura 12), se presentan tres de las hipótesis evaluadas.

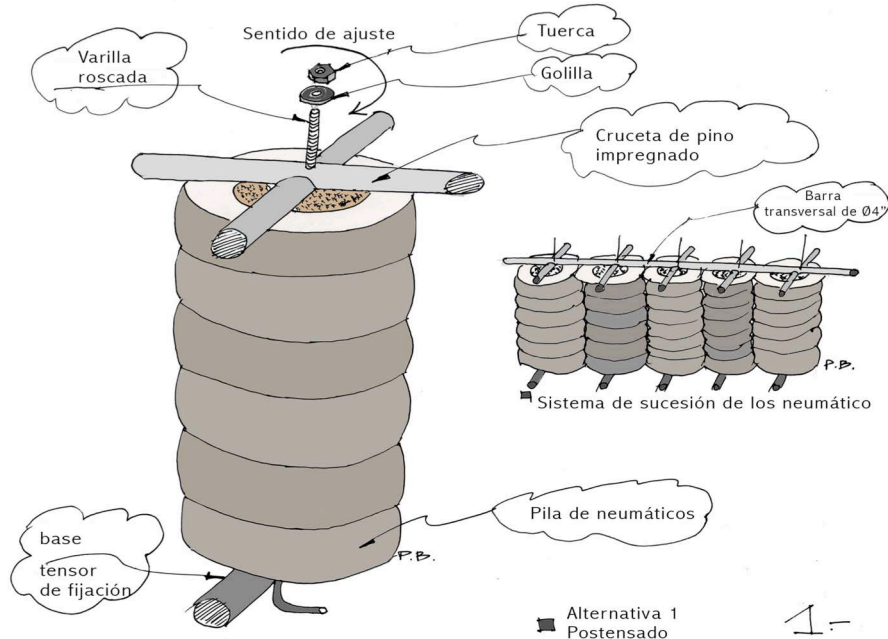


Figura 10. Diagrama de un muro de neumáticos relleno con tierra y postcompactado (Dibujo: Pablo Barros L.)

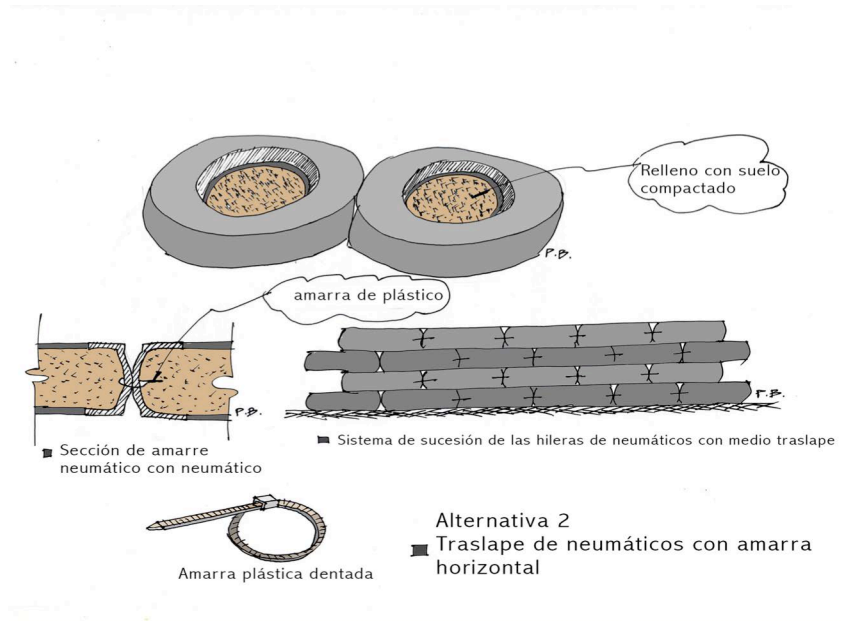


Figura 11. Diagrama de un muro trabado y asegurado con amarras de plástico (Dibujo: Pablo Barros L.)

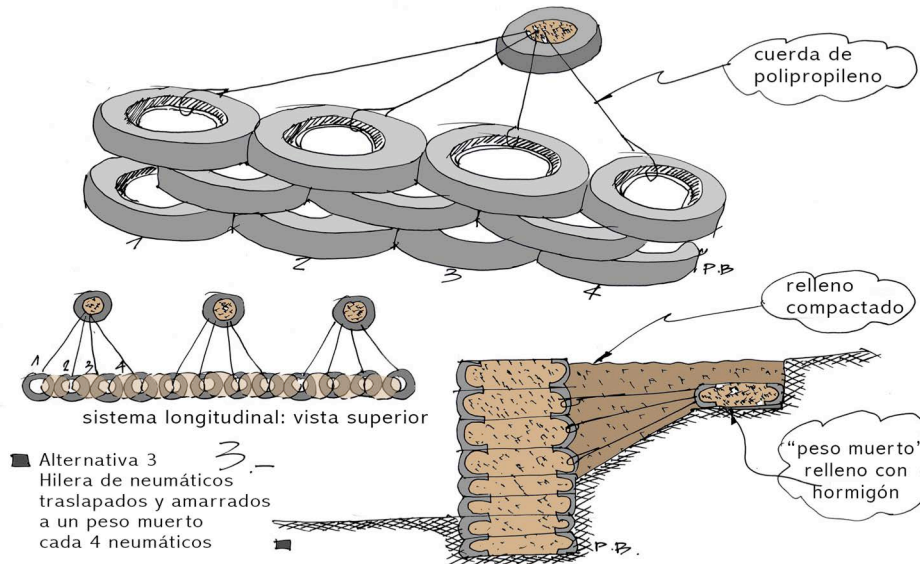


Figura 12. Esquema de un muro anclado a un "peso muerto" enterrado

3.1 Muro de contención a base de neumáticos estabilizados mecánicamente

Para seleccionar la propuesta más adecuada, se consideró una restricción adicional: no utilizar cimientos excavados a media profundidad para el apoyo del muro. Se estableció este requerimiento puesto que excavar y

hormigonar una fundación implica un incremento de los costos y una mayor dificultad en la construcción (materiales, maquinaria, accesibilidad). Esta última condición reveló la necesidad de adoptar análogicamente el sistema constructivo y estructural de los muros Tierra Estabilizada Mecánicamente (TEM), que el "Bridge Design Specifications- Section 5-

SPANISH VERSION.....

Retaining Walls" (Especificaciones técnicas de puentes – Sección 5 – Muros de contención) define como: muros de tierra que usan refuerzo metálico (inextensible) o geosintético (extensible) en la masa de suelo, y elementos de recubrimiento verticales o casi verticales (CALTRANS, 2004). Para llegar al modelo definitivo, se evaluaron diferentes hipótesis de diseño del muro y de los materiales que componen el sistema. El resultado se resume en la (Figura 13): Construcción de un muro sin pendiente, con pilas de

neumáticos dispuestos en 90° de la horizontal proyectada; uso de neumáticos de desecho como elemento principal; uso de geomallas como elemento de anclaje horizontal. Además, la propuesta considera arbitrariamente que se debe proveer un sistema de amarras, horizontal y vertical, de modo que el muro actúe como una sola estructura y ayude a resistir el cortante y evite las fallas estructurales. Las amarras de plástico se agregan con una máquina enzunchadora manual como sistema de amarre entre los neumáticos.

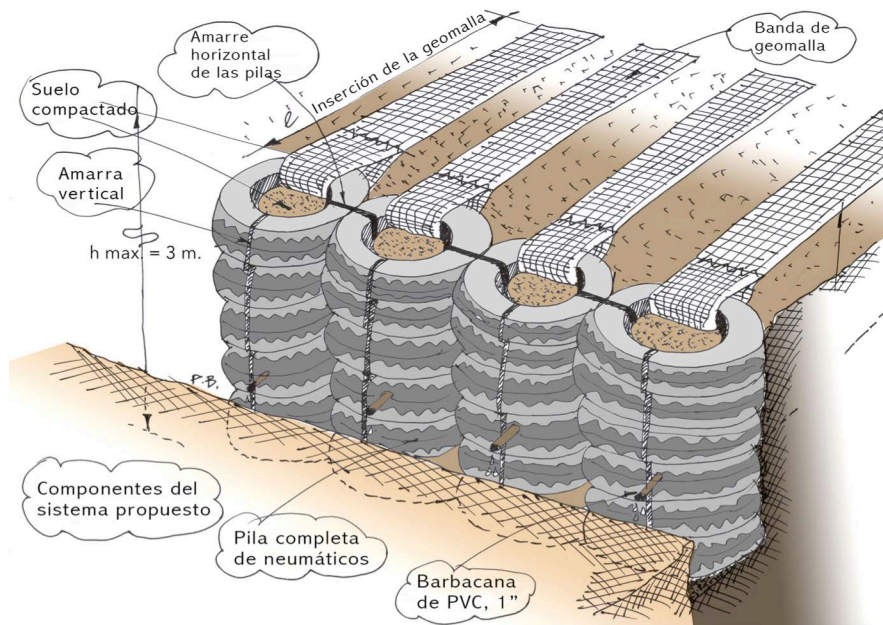


Figura 13. Esquema de un muro de contención con sistema TEM y correas de amarre (Dibujo: Pablo Barros L.)

El diseño estructural se realizó considerando las normas aplicables a los muros TEM (CALTRANS, 2004), considerando que el Muro TEM:

- No debe utilizarse donde existan servicios públicos o drenaje de caminos; debe ubicarse dentro de la masa reforzada, a excepción del drenaje de caminos que puede ubicarse dentro de la masa de suelo reforzada si este es ejecutado en forma vertical o perpendicular a la fachada del muro.

- No debe utilizarse si la erosión o erosión de la zona de inundación puede socavar la masa de suelo reforzado a menos que el muro se encuentre a una altura adecuada o se provea de una protección adecuada que evite la erosión o desgaste.

- No debe utilizarse para soportar los pilares de puentes con cimientos poco profundos, ni pilares de puentes soportados sobre pilotes donde el desplazamiento sísmico del pilar ejercería grandes fuerzas en los paneles frontales de los muros y en el refuerzo del piso para hacer frente a las conexiones del panel.

- Se pueden usar en pilares apoyados sobre pilotes, donde las fuerzas sísmicas de la superestructura del puente están limitadas por los rodamientos de apoyo elastoméricos que soportan la superestructura del puente. Estas fuerzas

sísmicas limitadas serán consideradas en el diseño del muro TEM.

- Se aumentará a 75 años, la vida útil de los muros TEM ubicados frente a los pilares de un puente apoyado sobre pilotes.

- No debe utilizarse cuando existen condiciones medio ambientales agresivas a menos que se realicen estudios medioambientales específicos sobre la corrosión a largo plazo o degradación del refuerzo del suelo.

- Se pueden usar muros TEM con refuerzo metálico al piso donde se usen sales descongelantes, siempre que se construya un tapón impermeable sobre o cerca de la superficie del suelo sobre el refuerzo del suelo y se controle adecuadamente la escorrentía superficial.

Interrogantes que el cálculo ingenieril debe responder: ¿cada cuántas hileras de neumáticos se debería instalar la geomalla para alcanzar la factibilidad estructural? ¿a qué profundidad se debe insertar la "banda" de geomalla? y ¿cual debería ser la altura máxima para colocar solo una hilera de neumáticos como ancho total?

Para responder estas preguntas, consideramos dos de los principales requisitos de diseño: El sistema debe tener solo una línea de neumáticos y los materiales deben ser económicos para que la construcción sea práctica.



4. Cálculo de la factibilidad estructural para el muro de contención propuesto

Para responder a los aspectos relacionados con el diseño se usó el Manual de Carreteras, Ed. 2016, vol. 3 (MC V3), (Chile. Dirección de vialidad, 2016) AASHTO, sección 5 de modo de poder hacer las comparaciones y verificaciones dentro de un marco teórico conocido.

En el diseño de estas estructuras retenedoras, los métodos para determinar la presión de la tierra se basaron principalmente en las teorías clásicas de empuje de la tierra de Rankine y Coulomb; y para la sismicidad, las teorías de Mononobe (Mononobe, 1925) y Okabe (Okabe, 1924).

Para el muro de contención propuesto, se consideraron de forma análoga los cálculos para muro TEM con capas estructuralmente colaborativas. Estas capas estructuralmente colaborativas pertenecen a una categoría especial de muros flexibles con contribución gravitacional. A menudo, en cuanto a sus dimensiones, se considera que el largo debe ser mayor al alto en al menos un 10%. Por lo tanto, estas estructuras normalmente ocupan mucho espacio.

4.1 Parámetros de cálculo

Los parámetros establecidos fueron:

Factores sísmicos

El diseño del muro fue proyectado para la ciudad de Valparaíso. De acuerdo a la norma chilena NCh433 Of.1966 Mod.2012, la zona sísmica corresponde a la 3, con un valor del coeficiente de aceleración de 0,4 (INN, 2012). En consecuencia, el coeficiente sísmico usado en el diseño fue de 0,2 para la horizontal, mientras que el coeficiente sísmico vertical se consideró nulo, según el MC V3.

Factores geométricos

- H: Altura del muro (m)
- L: Ancho del muro y longitud del refuerzo (m)

Cargas de diseño

- Carga muerta: corresponde al peso propio de los elementos debido a sus dimensiones, donde se consideró el peso específico de los materiales (γ).
- Cargas de relleno: se consideraron las cargas que ejercen ambos rellenos, el que forma el muro y el relleno tras él.
- Cargas hidrostáticas: corresponde a aquellas cargas generadas por el agua en la estructura.
- Presión de la tierra: el suelo o material de relleno adyacente al muro de contención, que ejerce sobre el una fuerza que tiende a volcarlo o deslizarlo hacia afuera. Los esfuerzos considerados en el empuje lateral son el empuje activo junto con sus incrementos dinámicos correspondientes, donde la cohesión y el ángulo de fricción entre el muro y el relleno se consideraron como nulos. Como la cohesión es una propiedad desconocida y puede ser degradada, no fue considerada en el diseño, y en cuanto al ángulo de fricción porque este aspecto no es controlado en la construcción.
- Acción sísmica: se consideró la interacción suelo-estructura, y se deben cumplir las condiciones del equilibrio dinámico. Se usaron las hipótesis y expresiones de

Mononobe y Okabe para determinar estos empujes sobre las estructuras de contención.

Análisis de la estabilidad externa

El análisis de la estabilidad externa se determinó mediante:

- Presión de la tierra: estática; momentos de empuje alrededor de la base del muro; incrementos dinámicos; momentos de incrementos dinámicos alrededor de la base del muro; momento de acción sísmica actuando como resultado del peso y sobrecarga ejercida en el muro.
- Estabilidad al deslizamiento: factor de seguridad para el caso estático y caso sísmico (solo componente horizontal).
- Volcamiento: factor de seguridad para el caso estático y caso sísmico.
- Capacidad (de apoyo): tanto para el caso estático como para el caso sísmico, es importante no construir sobre lodo, vertederos o relleno suelto para cumplir con esta condición.

Análisis de la estabilidad interna

El análisis de la estabilidad interna se determinó mediante:

- Falla a la tracción: tanto para el caso estático como para el sísmico, se debe tomar a precaución de que la tensión en cada refuerzo horizontal del muro no exceda el último valor de la resistencia a la tracción correspondiente al material.
- Falla a la extracción por deslizamiento: ocurre cuando uno de los refuerzos no es capaz de soportar las tensiones a la que está sometido y se desliza hacia el exterior. Tanto para el caso estático como para el sísmico, se debe asegurar que el refuerzo tenga una longitud de anclaje adecuada en la zona de resistencia.

4.2 Explicación de los resultados de los cálculos

Se realizaron los cálculos para evaluar de la factibilidad estructural del muro propuesto, los que demuestran que es posible prever un buen comportamiento estructural de un muro de contención construido de manera tradicional, con neumáticos de desecho como cara externa, con refuerzos horizontales usando "bandas" de geomalla y bajo la tipología estructural del muro TEM.

En general, los resultados demostraron que, en muchos casos, existe una falla de extracción por deslizamiento. Sin embargo, se permitió esta condición porque en los cálculos no se consideró el amarre entre neumáticos en la dirección horizontal ni vertical. Por lo tanto, esta condición entrega de manera efectiva una mayor resistencia contra este tipo de falla.

En cuanto a las interrogantes sobre el diseño de construcción: ¿Cada cuántas hileras de neumáticos se debería instalar la geomalla para cumplir con los requisitos de factibilidad estructural? ¿A qué profundidad se debería instalar la banda de geomalla? Las respuestas se encuentran en la (Tabla 1), según los tipos de sobrecarga y condiciones de la columna de agua, manteniendo una altura constante de 3m para el muro.

Tabla 1. Determinación de la longitud del refuerzo y espaciamiento vertical para un muro de 3m de altura

Propiedades del suelo				
Peso específico		18	(kN/m ³)	
Cohesión		0	(kN/m ²)	
Angulo de fricción interna		30	(°)	
Angulo de fricción entre relleno y muro		0	(°)	
Coefficiente sísmico para Valparaíso, con Ao=0,4g (NCh433)				
Horizontal		0,2		
Vertical		0		
Geomalla de refuerzo				
Resistencia a la tracción		16,5	(kN/m)	
Altura del muro (m)	Sobrecarga (kN/m ²)	Altura columna de agua	Long. del refuerzo (m)	Espaciamiento del refuerzo (m)
3	8	1	4,1	0,5
3	8	0,5	3,9	0,5
3	8	0	3,7	0,5
3	4	1	4	0,5
3	4	0,5	3,7	0,5
3	4	0	3,6	0,5

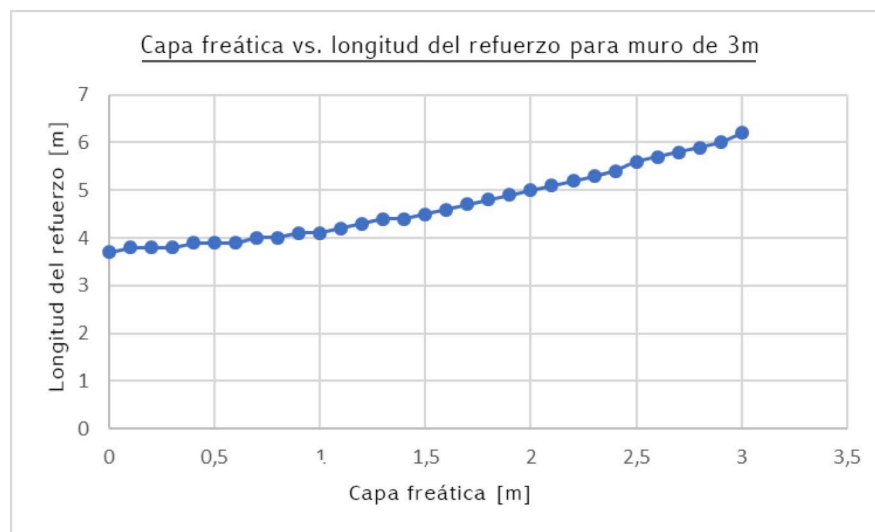


Figura 14. Capa freática vs. longitud del refuerzo para muro de 3m de alto

Para evaluar el comportamiento de estos muros, se realizó un análisis estadístico de sensibilidad, en el que se encontró que uno de los factores más influyentes para el sistema es el nivel de la capa freática detrás del muro. En la (Figura 14), se aprecia que para los muros de 3 (m) de alto y con sobrecarga de 8 (kN/m²), la longitud del refuerzo requerido aumenta considerablemente a medida que sube el nivel del agua detrás del muro. Por eso, se debería considerar un sistema de drenaje adecuado para evacuar el agua que se pueda acumular, por ejemplo, tras una lluvia copiosa.

En cuanto a la pregunta de cual debería ser la altura máxima del muro para tener un ancho de solo una hilera de neumáticos, su altura máxima no depende solamente del

factor número de hileras. La altura podría elevarse proporcionando mayor cantidad de refuerzo de modo de alcanzar la resistencia requerida. Sin embargo, las restricciones deberían considerarse respecto a la razón alto-largo del muro, la que con frecuencia tiene una relación $L = 1,1$ veces al altura, ocupando mucho espacio.

La (Tabla 2) se construyó bajo condiciones similares a la anterior, para evaluar las alturas mínima y máxima razonables para el tipo de muro diseñado; sin embargo, al determinar la tendencia a la falla por extracción por deslizamiento, sin considerar la posible contribución de las amarras verticales y horizontales entre los neumáticos, es aconsejable mantener un rango de altura conservador, recomendando un altura máxima de 3m para el muro.



Tabla 2. Especificaciones para la altura máxima del muro propuesto

Altura del muro (m)	Sobrecarga (kN/m²)	Altura columna de agua	Long. del refuerzo (m)	Espaciamiento del refuerzo (m)
5	8	1	6,3	0,46
5	8	0,5	6,1	0,45
5	8	0	5,9	0,44
4,5	8	1	5,8	0,44
4,5	8	0,5	5,6	0,43
4,5	8	0	5,4	0,42
4	8	1	5,2	0,42
4	8	0,5	5	0,41
4	8	0	4,8	0,4
3,5	8	1	4,7	0,39
3,5	8	0,5	4,5	0,38
3,5	8	0	4,3	0,37
3	8	1	4,1	0,5
3	8	0,5	3,9	0,5
3	8	0	3,7	0,5
2,5	8	1	3,6	0,5
2,5	8	0,5	3,3	0,48
2,5	8	0	3,2	0,5
2	8	1	3,1	0,5
2	8	0,5	2,8	0,5
2	8	0	2,6	0,5
1,5	8	1	2,6	0,5
1,5	8	0,5	2,2	0,5
1,5	8	0	2	0,5
5	4	1	6,1	0,52
5	4	0,5	5,9	0,51
5	4	0	5,7	0,5
4,5	4	1	5,6	0,5
4,5	4	0,5	5,4	0,5
4,5	4	0	5,2	0,48
4	4	1	5	0,46
4	4	0,5	4,8	0,46
4	4	0	4,7	0,46
3,5	4	1	4,5	0,5
3,5	4	0,5	4,3	0,5
3,5	4	0	4,1	0,5
3	4	1	4	0,5
3	4	0,5	3,7	0,5
3	4	0	3,6	0,5
2,5	4	1	3,5	0,5
2,5	4	0,5	3,2	0,5
2,5	4	0	3	0,5
2	4	1	3	0,5
2	4	0,5	2,6	0,5
2	4	0	2,6	0,5
1,5	4	1	2,5	0,5
1,5	4	0,5	2,1	0,5
1,5	4	0	1,9	0,5

Evaluando gráficamente el análisis de estabilidad externo e interno y considerando un nivel de agua detrás del muro de 0,5m, se obtiene que, para una altura de muro

determinada, se requiere la longitud de refuerzo con geomalla que se muestra en el (Figura 15).

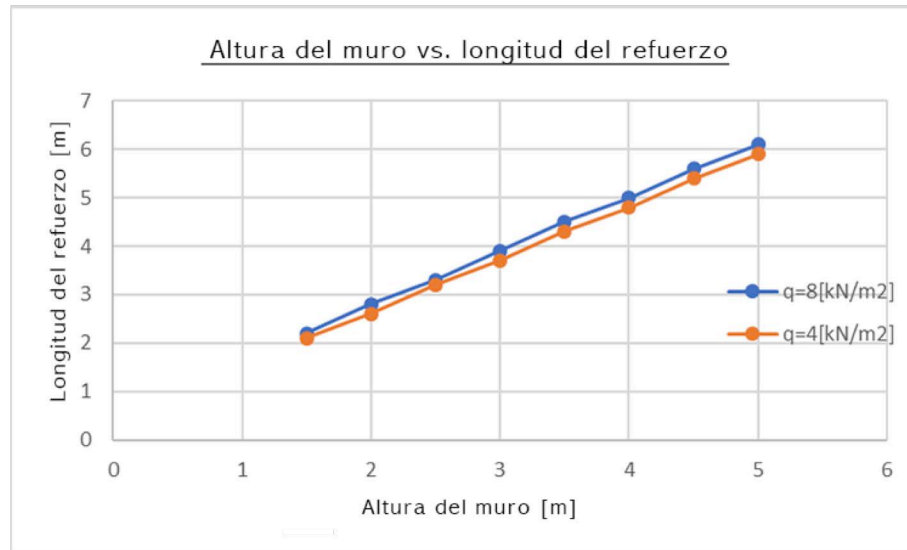


Figura 15. Altura del muro vs. longitud del refuerzo

5. Conclusiones

El diseño se realizó de modo que los componentes estructurales fueran capaces de resistir las fuerzas de corte y momento generadas por las presiones del suelo y otras cargas. Además, se verificó la estabilidad a fin de que el muro se comportara de manera segura frente a un posible volcamiento o desplazamiento lateral. Esto se cumple solo cuando las cargas que ocurren en la base no exceden la capacidad soportante de la fundación. Otro aspecto importante es que se debería evitar la erosión del suelo bajo y frente al muro. En específico, se debe evitar la presencia de cargas de agua detrás del muro o minimizarlas lo más posible con un drenaje adecuado, colocando capas de material granular que actúen de drenaje.

Igualmente, es aconsejable conocer el tipo de suelo para rellenar el muro y prevenir una posible expansión. Por ejemplo, los suelos arcillosos se ven afectados por esta condición, aumentando las cargas laterales, que tienden a ocurrir más superficialmente (raramente ocurren por debajo de 1,5m de profundidad). Como no existen métodos confiables para calcular estos incrementos de carga, una estrategia de mitigación es colocar capas de material grueso, como se mencionó anteriormente, para proporcionar un buen drenaje.

5.1 Recomendaciones para el sistema propuesto

1. Para el uso eficiente de los neumáticos para este u otros fines, es necesario implementar un sistema de recolección organizado y formal, de preferencia planificado por barrios.
2. Capacitar a quienes deseen construir usando este sistema, para lo cual es deseable desarrollar un manual de instrucciones gráfico
3. Usar neumáticos del mismo diámetro, sin intervención, dispuestos en pilas verticales.
4. Usar amarras entre los neumáticos (vertical) y entre las pilas (horizontal).
5. Instalar geomallas en todas las pilas, cada 3 hileras (0,55m máximo), con una longitud de inserción no menor a 3,8m (valores promedio, (Tabla 1).
6. Aunque estructuralmente no es necesario, constructivamente es recomendable compactar adecuadamente la tierra dentro de las pilas con una apisonadora manual.
7. Se debe compactar la tierra entre las geomallas, idealmente con una apisonadora mecánica.
8. Agregar un porcentaje de grava en el relleno para mejorar de drenaje, colocar al menos una barbacana por pila, en el primer tercio de la altura total del muro, como se muestra en la (Figura 16).

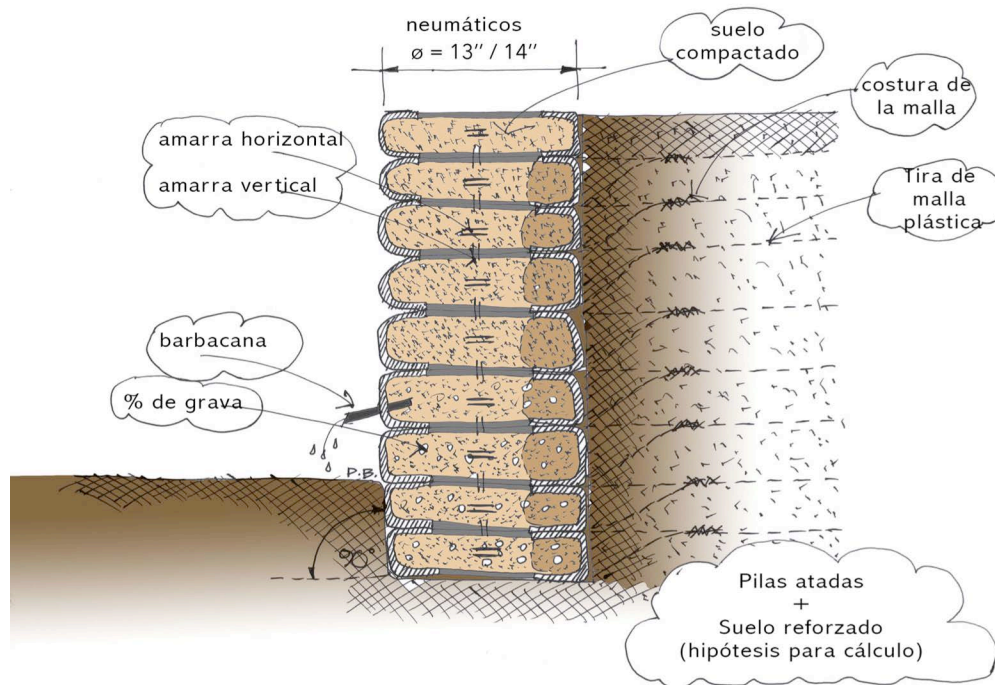


Figura 16. Sección explicativa: características constructivas de un muro de contención (Dibujo: Pablo Barros L.)

5.2 Posibles desarrollos a futuro

1. Desarrollo de un sistema económico para mitigar la acción del fuego, como estucos a base de arcilla proyectados sobre una malla de alambre y/o la posibilidad de plantar cubiertas vegetales que cuelguen del sistema.

2. Optimizar el sistema de amarre entre los neumáticos y entre las pilas, por ejemplo, combinando

cuerdas de polipropileno, amarres plásticas para viñedos y/o bandas plásticas para embalaje u otros, buscando mejorar la eficiencia constructiva.

3. Investigar y calcular el reemplazo de la geomalla por otro material más económico.

4. Por último, es necesario calcular y verificar, con casos reales, los costos exactos del sistema.

6. Referencias

- Barrales Guzmán, K. D. (2017)**, Vulnerabilidad socio natural en cerros y quebradas de Valparaíso: Decisiones de políticas públicas a propósito del gran incendio de 2014. Tesis para optar al grado de Magister en Gestión y Políticas Públicas, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Industrial, Santiago de Chile.
- Caltrans. (2004)**, BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS - SECTION 5 - RETAINING WALLS. Retrieved noviembre 13, 2018, from <http://www.dot.ca.gov>: www.dot.ca.gov/des/techpubs/manuals/bridge-design-specifications/page/section5.pdf
- Chile. Dirección De Vialidad.(2016)** Manual De Carreteras.Vol.3 Santiago, Chile: Ministerio De Obras Públicas, Dirección de Vialidad. 2016.
- CIWMB. (2009)**, El Flujo de Llantas Usadas y de Desecho en la Región Fronteriza de California y México. Informe del Contratista para la Junta. Universidad Estatal de San Diego, Instituto de Estudios Regionales de las Californias. Sacramento: Publications Clearinghouse.
- CONAMA. (2008, diciembre)**, Informe Final, Diagnostico Fabricación, Importación y Distribución de neumáticos y Manejo de Neumáticos Fuera de Uso. Retrieved julio 2016, 2016, from <http://portal.mma.gob.cl>: <http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2015/07/Diagnostico-neumaticos-2008.pdf>
- ETRMA. (2015)**, The 2015 edition of ETRMA's End-of-life Tyres Management report. Retrieved noviembre 08, 2018, from <http://www.etrma.org>: <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/elt-report-v9a---final.pdf>

SPANISH VERSION.....

- Hurtado, M.; Salazar, M.; Muñoz, G. (2016, diciembre)**, Construction features of the historical architecture in the sea port city of Valparaiso: architect E.O.F. Harrington's brick masonry buildings. Retrieved noviembre 05, 2018, from <https://scielo.conicyt.cl>: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2016000300007
- INE. (2017, mayo 18)**, Parque de Vehículos en Circulación. Retrieved junio 11, 2017, from INE: <http://www.ine.cl/estadisticas/economicas/transporte-y-comunicaciones?categoria=Anuarios>
- INN. (2012)**, Norma Chilena Oficial. NCh433 Of.1966 Mod.2012, Diseño Sísmico de Edificios. Santiago de Chile: Instituto Nacional de Normalización-INN.
- Long, N. T. (1990)**, the Pneusol. Paris: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Mattox, R. M. (1994)**, United States Patent No. 5,320,455.
- Mononobe, N. (1925)**, Design of a seismic gravity wall, Report of Kanto Earthquake Damage of 1923. Journal of the Society of Civil Engineers, 3.
- Okabe, S. (1924)**, General theory of earth pressure and seismic stability of retaining wall and dam. Journal of the Society of Civil Engineers, 10(6), 1277-1323.
- Posadas, C. A. (2017)**, ESTABILIZACIÓN DE TALUD CON SISTEMA ERDOX EN. Lima: PUCP.
- Ramos, G.; Alguacil, F.; López, F. (2011, mayo-junio)**. The recycling of end-of-life tyres. Technological review. Revista de Metalurgia(47), 273-284.

