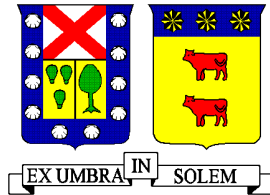


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAISO - CHILE



MUROS DE CONTENCIÓN MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE NEUMÁTICOS
DESECHADOS PARA ALTURAS MENORES.

CLAUDIO ANDRÉS PEÑA GUZMÁN

Memoria para optar al Título de
Constructor Civil

Profesor Guía
Luis Pablo Barros L.

Profesor Co-referente.
Miguel Petersen A.

Abril de 2018

Agradecimientos

A mis profesores por su guía y vocación, y a todas las personas que aportaron de una u otra manera para el desarrollo de esta memoria.

A todos aquellos que ven en los residuos nuevas oportunidades.

Dedicatoria

A mi familia por su apoyo incondicional.

A Norma por su amor.

“Donde el alma no trabaja junto con las manos, ahí, no hay arte”.

Leonardo Da Vinci

Resumen

En Chile y el mundo, debido al amplio uso del automóvil, se generan desechos de neumáticos en grandes cantidades, especialmente en zonas urbanas. Son desechos indeseables puesto que no son biodegradables, ocupan grandes espacios y presentan potenciales riesgos de salubridad y de incendios. Por otro lado, gracias a la elevada resistencia a las tensiones radiales, los neumáticos fuera de uso se presentan como un material de construcción de características interesantes, y además de bajo costo, que permite revalorizar de esta forma un residuo sólido urbano común en la actualidad. Una forma de revalorizarlos es usarlos para la construcción de muros de contención en conjunto con suelo residual o material seleccionado, para mitigar riesgos en zonas de inestabilidad de tierras. Esta técnica no es nueva, y existen diversos estudios de distintas partes del mundo, que ayudan a entender el comportamiento de este tipo de estructuras. De hecho, en muchos casos, se ha encontrado en Chile que estos muros son construidos por los propios lugareños y sin supervisión, y en ocasiones no siguen parámetros de diseño que permitan tener una estructura estable y confiable.

La presente memoria tiene como objetivo la investigación del material neumático-suelo como unidad base en la construcción de muros de contención en sistemas tecnológicamente sencillos y además, dar a conocer los problemas y algunas soluciones existentes para reducir y consumir estos desechos. Para esto se realiza una extensiva revisión de literatura relativa a este tipo de muros, además de una revisión en donde se mencionan otros usos de los neumáticos en obras civiles; se presenta información relativa al panorama actual de los neumáticos en Chile; se ensayan muestras de neumáticos al corte directo en laboratorio para la determinación del esfuerzo de corte entre dos superficies de caucho y, adicionalmente, el esfuerzo de corte entre probetas con la infiltración de arena fina entre ellas; se muestran algunos casos de este tipo de muros encontrados en Chile (en la V, VI y VIII región del país); finalmente, se realiza una comparación económica de distintos tipos de muros para una misma altura.

La investigación deja en evidencia que la opción que presentan los neumáticos desechados para la construcción de muros de contención permite crear estructuras mecánicamente confiables, tecnológicamente simples y de un bajo costo económico y ambiental, que permiten la estabilización de suelos.

PALABRAS CLAVE: materiales reciclados; bajo costo; neumáticos; muros de contención.

Abstract

In Chile and in the world, due to the wide use of the automobile, scrap tires are generated in large quantities, especially in urban areas. They are undesirable waste because they are not biodegradable, occupy large spaces and present potential health and fire hazards. Furthermore, thanks to the high radial tensile resistance, the waste tires are presented as a construction material with interesting characteristics, and also low cost, which allows to revalue a solid urban waste nowadays. A way of revaluing them is to use them for the construction of retaining walls together with residual soil or selected material, to mitigate risk in areas of land instability. This technique is not new, and there are several studies from different parts of the world, that help to understand the behavior of this type of structures. In fact, in many cases, it has been found in Chile that these walls are built by the locals themselves and without supervision, and sometimes do not follow design parameters that allow a stable and reliable structure.

The objective of this memory is to investigate the pneumatic-soil material as a base unit in the construction of retaining walls in technologically simple systems and also, to present the problems and some solutions available to reduce and consume these wastes. For this an extensive review of the literature on this type of wall is carried out, in addition to a review where other uses of tires are mentioned in civil works; present information regarding the current panorama of tires in Chile; tire specimens are tested by direct cutting in the laboratory for the determination of shear stress between two rubber surfaces and, additionally, the shear stress between specimens with the infiltration of fine sand between them; some cases of this type of walls found in Chile (in V, VI and VIII region of the country) are shown; finally, an economic comparison of different types of retaining walls for the same height is made.

The research shows that the option of discarded tires for the construction of retaining walls allows the creation of mechanically reliable structures, technologically simple and of low economic and environmental cost, which allow the stabilization of soils.

KEYWORDS: recycled materials; low cost; tires; retaining walls.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Anisotrópico: Dícese de un material en el que sus propiedades varían según las direcciones de éste.

Barbacana: También conocidos como “*despichaderos*” y “*lloraderos*”. En muros de contención son sistemas de drenaje que consisten en tubos, generalmente de material PVC, que cruzan el muro desde la parte posterior hacia la cara frontal con el fin de evacuar el agua a trasdós.

Coronamiento: Parte superior de un muro de contención.

Geomaterial: Material usado en la geotecnia para mejorar las características de un suelo.

Georefuerzo: Material que cumple la función de reforzar un suelo.

Grouting: Mortero cementicio especial para anclaje y nivelación.

Intradós: Parte frontal de un muro de contención. También conocido como cara.

Llantas: Nombre que reciben los neumáticos en otros países latinoamericanos.

NFU: Neumático Fuera de Uso. Se genera al finalizar su primera vida útil, como neumático para vehículos.

Malla de neumáticos (*en inglés: Tire mat*): Malla o capa horizontal de neumáticos, unidos entre ellos mediante elementos de conexión. Uniones de mallas unas sobre otras conforman los muros de contención de neumáticos. [Ver figura 4-17.](#)

Pneusol o Tiresoil: Nombre dado al sistema constructivo que tiene como elemento base el material compuesto por neumático y suelo compactado dentro de él. Este nombre fue dado por N.T. Long.

REP: Responsabilidad Extendida del Productor. Hace alusión a las políticas para disminuir la contaminación de residuos no biodegradables, extendiendo esta responsabilidad al productor.

Resistividad: La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad. A medida que aumenta la resistividad de un suelo, este es menos corrosivo. En la siguiente tabla se muestra esta relación (O’Shaughnessy, 1998):

Agresividad	Resistividad ohm-cm
Muy corrosivo	<700
Corrosivo	700 – 2000
Moderadamente corrosivo	2000 – 5000
Ligeramente corrosivo	5000 – 10000
No corrosivo	>10000

Figura 0-1 Agresividad de un suelo según su resistividad. Obtenido de (O’Shaughnessy, 1998).

Serviciabilidad: Medida del comportamiento de, en este caso, un muro de contención, que se relaciona con la seguridad y comodidad que puede brindar al usuario

Shotcrete: Hormigón o mortero proyectado a alta velocidad de forma neumática sobre una superficie. Puede ser por método de vía húmeda o vía seca. Es utilizado principalmente para soporte y revestimiento.

Trasdós: Parte posterior de un muro de contención. También llamado respaldo.

Tresbolillo: Dícese de la colocación de elementos (en este caso neumáticos) en filas paralelas, de modo que cada elemento de cada fila corresponda al medio de cada elemento adyacente de la fila inmediata, de suerte que los centros de cada neumático forman triángulos equiláteros.

Troceado: Acción y efecto de trocear. Dividir o cortar en trozos una cosa.

Trabajabilidad: Es la facilidad de un material para ser manipulado. En el caso de un suelo, es la facilidad con que este puede ser colocado y compactado.

Zigurat: Estructura en forma de pirámide truncada que funcionaba como templo en la antigua Mesopotamia.

Contenido

Glosario de términos.....	7
1 Introducción.....	18
1.1 Objetivos y alcances de la memoria	19
1.1.1 Objetivo general	19
1.1.2 Objetivos específicos.....	19
1.1.3 Alcance	20
1.1.4 Limitaciones	20
1.2 Metodología de trabajo	20
1.3 Breves antecedentes históricos	21
1.3.1 Desarrollo de la técnica	21
1.3.2 Desarrollo de la teoría.....	25
1.3.3 Desechos.....	25
1.4 Problemática medioambiental.....	26
1.4.1 Situación actual de los NFU en Chile.....	27
1.5 Mención de muros de contención de neumáticos en la normativa chilena.....	30
2 Marco teórico.....	32
2.1 Teoría de empuje de tierras.....	32
2.1.1 Presiones que actúan sobre un muro de contención	32
2.1.2 Ecuación de Terzaghi. <i>Consideración del efecto del agua en la presión</i>	34
2.1.3 Teoría de Coulomb. <i>Resistencia al esfuerzo cortante</i>	34
2.1.4 Teoría de Rankine.....	34
2.1.5 Empuje sísmico	39
2.2 Estado del arte.....	42
2.2.1 Clasificación según su capacidad de deformación	43
2.2.2 Clasificación según la forma de contrarrestar los esfuerzos.....	44
2.2.3 Sistemas de tierra reforzada.....	46
3 El neumático.....	49
3.1 Propiedades del neumático	49
3.1.1 Elementos que constituyen el neumático.....	49
3.1.2 Durabilidad del neumático.....	50
3.1.3 Resistencia al fuego	52

3.1.4	Resistencia a la tracción	52
3.1.5	Resistencia a la extracción.....	53
3.2	Revalorización de los neumáticos fuera de uso	54
3.2.1	Algunas aplicaciones relacionadas a la construcción.....	55
4	Muros de contención con neumáticos desechados	60
4.1	Descripción del sistema.	61
4.2	Consideraciones de diseño.....	65
4.2.1	Dimensionamiento.....	66
4.2.2	Diseño externo.....	67
4.2.3	Diseño interno	69
4.2.4	Drenaje.....	70
4.3	Método constructivo	72
4.3.1	Consideraciones y trabajos previos	72
4.3.2	Secuencia constructiva: Muro de contención con neumáticos desechados....	74
4.3.3	Secuencia constructiva: Muro de contención con neumáticos desechados reforzado con acero.	76
4.3.4	Ventajas y desventajas del sistema.....	78
4.4	Algunos casos de muros de contención de neumáticos en Chile.....	79
4.4.1	Achupallas, Viña del Mar, Región de Valparaíso.	79
4.4.2	La pólvora, Valparaíso, Región de Valparaíso.....	81
4.4.3	Cerro La Cruz, Valparaíso, región de Valparaíso.	81
4.4.4	Lebu, Provincia de Arauco, Región del Bio Bio	82
4.4.5	Casos en cerro San Juan, Machalí, Región de O'Higgins	82
4.4.6	Caso cerro Las Cañas, Valparaíso	84
4.4.7	Caso Olmué, sector La Vega, Región de Valparaíso.	85
4.4.8	Caso de neumáticos apilados en columnas, sector La Dormida, Olmué.....	86
5	Ensayos de laboratorio.....	87
5.1.1	Medición del peso de un elemento de neumático-suelo	87
5.1.2	Ensayo de corte directo sobre probetas de neumático.....	88
6	Diseño de muro de neumáticos.....	97
6.1	Desarrollo del cálculo	98
6.1.1	Cálculo estático	99
6.1.2	Cálculo sísmico	102

6.1.3	Factores de seguridad	105
6.1.4	Refuerzo del muro	107
7	Cálculo de costos	109
7.1	Muro de contención cantilever.	109
7.2	Muro de contención de tierra armada	111
7.3	Muro de contención con neumáticos desechados	112
7.4	Muro contención de neumáticos armados al corte.....	113
7.5	Resumen.....	115
8	Conclusiones.....	116
9	Bibliografía.....	119
10	Anexos.....	123
10.1	Anexo A: Resultados de ensayo de corte directo sobre dos neumáticos rellenos con suelo compactado a escala real.	123
10.2	Anexo B: Algunos resultados de ensayos de extracción sobre neumáticos.	125
10.2.1	(Long, 1990).	125
10.2.2	(Gerscovich, Medeiros, & Sayão, 2001)	126
10.3	Anexo C: Ejemplo de muro con neumáticos modificados.	127
10.3.1	Empresa Yantek: imágenes del proceso constructivo del muro con neumáticos modificados.	127
10.4	Anexo D: Manual de carreteras.....	129

Índice de figuras

FIGURA 0-1 AGRESIVIDAD DE UN SUELO SEGÚN SU RESISTIVIDAD. OBTENIDO DE (O'SHAUGHNESSY, 1998).	7
FIGURA 1-1 CONTRASTE: CASAS SOBRE MUROS DE CONTENCIÓN FRENTE A CASAS SOBRE PALAFITOS. VALPARAÍSO, CHILE.....	19
FIGURA 1-2 MURO DE CONTENCIÓN CIRCULAR DE NEWGRANGE CAIRN. IRLANDA. OBTENIDO DE: (KILLOWENHOUSE, 2017)	22
FIGURA 1-3 IZQ: MACHU PICCHU, PERÚ. DER: SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA TERRAZA AGRÍCOLA (WRIGHT AND ZEGARRA, 2000).....	22
FIGURA 1-4 IZQ: MURO DE PNEUSOL; DER: PARAMENTO DE PNEUSOL + REFUERZO CON GEOTEXILES. AIGUEBLANCHE, SABOYA. FUENTE: (LONG, 1990).....	24
FIGURA 1-5 ESTABILIZACIÓN DE TALUD MEDIANTE EL USO DE NEUMÁTICOS, GUATEMALA. EXTRAÍDO DE: HTTPS://WWW.FACEBOOK.COM/ECOMUROGUATEMALA/	24
FIGURA 1-6 ARCOS HECHOS POR TERMITAS. DIBUJO DE TURID HÖLLDOBLE; TOMADO DE (WILSON, E.O. ,1971)	26
FIGURA 1-7 GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE UNIDADES DE NFU EN CHILE SEGÚN TIPO DE VEHÍCULO.	28
FIGURA 1-8 GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN SEGÚN USO DE NEUMÁTICOS. FUENTE: CINC.	28
FIGURA 1-9 TABLA DE PROYECCIÓN DE RECAMBIO Y GENERACIÓN DE NFU. FUENTE: MMA, ECOING 2010.	29
FIGURA 1-10 GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE NFU EN CHILE.....	29
FIGURA 1-11 TABLA DE CANTIDADES DE NFU SEGÚN MEDIDA DE NEUMÁTICO, 2016. FUENTE: CINC.	30
FIGURA 2-1 FUERZAS ACTUANTES SOBRE UN MURO DE GRAVEDAD. (LAMBE, WHITMAN Y JIMÉNEZ SALAS, 2009).....	32
FIGURA 2-2 NATURALEZA DE LA PRESIÓN LATERAL DE LA TIERRA SOBRE UN MURO DE CONTENCIÓN. EXTRAÍDO DE (BRAJA, 2001)	36
FIGURA 2-3 ESQUEMAS DE CUÑAS ACTIVAS Y PASIVAS.....	36
FIGURA 2-4 FUERZA ACTIVA EN MURO DE CONTENCIÓN. EXTRAÍDO DE APUNTES DE MECÁNICA DE SUELOS I. M. PETERSEN.....	37
FIGURA 2-5 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL EMPUJE PASIVO Y ACTIVO SOBRE UN MURO.	38
FIGURA 2-6 ÁNGULOS EN MURO DE CONTENCIÓN CON TRASDÓS INCLINADO.....	40
FIGURA 2-7 TABLA DE VALORES DE ACELERACIÓN EFECTIVA MÁXIMA A0 Y COEFICIENTE DE ACELERACIÓN EFECTIVA MÁXIMA A0'	41

FIGURA 2-8 DIAGRAMA DE EMPUJE INCREMENTO SÍSMICO, CONSIDERANDO KV=0.	42
FIGURA 2-9 TIPOS COMUNES DE ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN DE TIERRAS. FUENTE: (KRAMER, 1996). ..	42
FIGURA 2-10 CLASIFICACIÓN DE MUROS DE CONTENCIÓN.	43
FIGURA 2-11 ESQUEMA DE ALGUNOS MUROS FLEXIBLES. EXTRAÍDO DE: (SUÁREZ DÍAZ, 1998).	44
FIGURA 2-12 MUROS DE MAMPOSTERÍA Y DE ESCOLLERA. OBTENIDAS DE (DE IZQ. A DER.): (USM.CL, 2013); (PROCEDIMIENTOSCONSTRUCCION.BLOGS.UPV.ES, 2017).....	45
FIGURA 2-13 TIPOS DE MUROS DE CONTENCIÓN (OBTENIDO DE BRAJA M., 2001).	46
FIGURA 2-14 TIPOS DE REFUERZO PARA MUROS TEM. OBTENIDA DE: (EROSION.COM, 2013).	48
FIGURA 2-15 ELEMENTOS DE UN MURO DE TIERRA ARMADA. OBTENIDA DE (TIERRA-ARMADA.CL, S.F.)	48
FIGURA 3-1 COMPONENTES DE UN NEUMÁTICO. EXTRAÍDO DE HTTP://WWW.NEUMATICOSMEDICA.COM.AR/PARTES.HTML	50
FIGURA 3-2 MURO DE NEUMÁTICOS QUEMADO LUEGO DEL GRAN INCENDIO DE VALPARAÍSO DEL AÑO 2014. FOTO MODIFICADA DE LA FUENTE: (VENTANA-VERDE.BLOGSPOT.CL, 2014).	52
FIGURA 3-3 PARTES DEL NEUMÁTICO ENSAYADAS.	53
FIGURA 3-4 AISLANTE ACÚSTICO. EXTRAÍDO DE: (TNU.ES, S.F.)	56
FIGURA 3-5 PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIONES Y PROTECCIÓN COSTERA. EXTRAÍDO DE: (TIRECGROUP.CO.UK , 2011).....	57
FIGURA 3-6 NEUMÁTICOS USADOS EN EARTHSHIPS. OBTENIDAS DE (DE IZQ. A DER.): (LOW-TECH MAGAZINE, 2007); (SIMONAITIS, P., 2014).....	58
FIGURA 3-7 PROCESO DE COMBINACIÓN PARA FORMAR MATERIALES DE REFUERZOS DE TRES TIPOS. MODIFICADO DE SCRAP TIRE DERIVED GEOMATERIALS. OPPORTUNITIES AND CHALLENGES, 2007. ...	58
FIGURA 4-1 MURO ARMADO CON NEUMÁTICOS USADOS, CON NEUMÁTICOS CON TIRANTES COMO ELEMENTO DE ANCLAJE. EXTRAÍDO DE: (SUÁREZ DÍAZ, 1998).	60
FIGURA 4-2 MURO DE CONTENCIÓN CON NFU DE LA EMPRESA ECOFLEX INTERNATIONAL. OBTENIDO DE (ECOFLEX, S.F.)	60
FIGURA 4-3 MURO DE CONTENCIÓN CON NEUMÁTICOS. EXTRAÍDO DE: (SUÁREZ DÍAZ, 1998).	62
FIGURA 4-4 NUDO CUADRADO. OBTENIDO DE: (WIKIPEDIA, 2017)	64
FIGURA 4-5 TABLA: RESISTENCIA A LA TRACCIÓN CUERDA DE UNIÓN DE POLIPROPILENO. MODIFICADO DE (HUAT, AZIZ & LOH, 2008).	64
FIGURA 4-6 DESFASES ENTRE MALLAS SEGÚN INCLINACIÓN.	66

FIGURA 4-7 DISTANCIA DE LA CUÑA DE SUELO.....	66
FIGURA 4-8 TABLA: FACTORES DE SEGURIDAD MÍNIMOS AL DESLIZAMIENTO.	67
FIGURA 4-9 TABLA: FACTORES DE SEGURIDAD MÍNIMOS AL VOLCAMIENTO.	68
FIGURA 4-10 A) DESLIZAMIENTO DE LA BASE DEL MURO; B) VOLCAMIENTO DEL MURO; C) VOLCAMIENTO A ALGUNA ELEVACIÓN SOBRE EL PIE DEL MURO; D) ESTABILIDAD GLOBAL; E) FALLA POR CAPACIDAD DE CARGA DEL SUELO; F) FALLA POR INESTABILIDAD INTERNA. ILUSTRADO POR OLIVER CONTRERAS.	70
FIGURA 4-11 COLAPSO DE MURO POR AUMENTO DE PRESIONES HIDROSTÁTICAS. OBTENIDO DE (94DIEZ.COM, 2014).	70
FIGURA 4-12 ESQUEMA MURO DE CONTENCIÓN CON DRENAJE.	71
FIGURA 4-13 BARBACANAS DE PVC Y CUNETAS DE HORMIGÓN EN MUROS DE CONTENCIÓN CON NFU. EXTRAÍDO DE (RODRÍGUEZ, O., 2016).....	72
FIGURA 4-14 CORTE DE BANDA LATERAL DE UN NFU.....	73
FIGURA 4-15 ATADO DE NEUMÁTICOS DEL MURO. OBTENIDA DE: "ESTABILIZACIÓN DE TALUDES CON MUROS DE NEUMÁTICOS" (SIEIRA ET AL, 2001).....	75
FIGURA 4-16 A) LLENADO Y COMPACTADO MANUAL DE SUELO EN NFU; B) RELLENO DE NEUMÁTICOS CON SUELO RESIDUAL MEDIANTE OPERACIONES MANUALES. OBTENIDA DE: "SCRAP TIRE: A CIVIL ENGINEERING MATERIAL" (GERSCOVICH, SIEIRA, MEDEIROS Y SAYÃO, 2004).....	75
FIGURA 4-17 ESQUEMA SIMPLIFICADO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO.....	76
FIGURA 4-18 TABLA: RELACIÓN BASE/ALTURA PARA MUROS DE NEUMÁTICOS ARMADOS AL CORTE. VALORES DADOS POR MECÁNICO DE SUELOS.....	77
FIGURA 4-19 ESQUEMA DE COLUMNAS DE MUROS ARMADOS AL CORTE.	77
FIGURA 4-20 MURO DE NEUMÁTICOS AL TRESBOLILLO CON REFUERZO AL CORTE. CORTESÍA DE MARCELO WITTO MÁTTIG.	77
FIGURA 4-21 NEUMÁTICOS USADOS PARA ESTABILIZACIÓN DE TERRENO. ACHUPALLAS.	79
FIGURA 4-22 IZQUIERDA Y CENTRO: REFUERZO DE SUELO ARTESANAL QUE FALLÓ; DERECHA: REFUERZO DE SUELO ARTESANAL AÚN VIGENTE. ACHUPALLAS.	80
FIGURA 4-23 ELEMENTO DE CONTENCIÓN: FALLA POR VOLCAMIENTO. ACHUPALLAS.	80
FIGURA 4-24 MURO EN SECTOR LA PÓLVORA, VALPARAÍSO.....	81
FIGURA 4-25 APILADO DE NEUMÁTICOS ARTESANAL PARA AFIRMAR TERRENO.....	81
FIGURA 4-26 MURO DE BAJA ALTURA. LEBU, REGIÓN DEL BIO BIO	82
FIGURA 4-27 MURO DE CONTENCIÓN DE NEUMÁTICOS, MACHALÍ, REGIÓN DE O'HIGGINS.....	82

FIGURA 4-28 MURO DE CONTENCIÓN DE NEUMÁTICOS, OTRA VISTA. MACHALÍ, REGIÓN DE O'HIGGINS. ...	83
FIGURA 4-29 SUPERFICIE GENERADA POR LA CONTENCIÓN DE MURO, MACHALÍ, REGIÓN DE O'HIGGINS. ..	83
FIGURA 4-30 MURO DE CONTENCIÓN DE NEUMÁTICOS. MACHALÍ, REGIÓN DE O'HIGGINS.....	83
FIGURA 4-31 MURO DE CONTENCIÓN CON NEUMÁTICOS. CERRO LAS CAÑAS.....	84
FIGURA 4-32 MURO DE CONTENCIÓN CON NEUMÁTICOS, SECTOR "LA VEGA", OLMUÉ. CORTESÍA DE TANIA ESTAY	85
FIGURA 4-33 DETALLES DEL MURO DE CONTENCIÓN CON NEUMÁTICOS. FOTOGRAFÍAS CORTESÍA DE TANIA ESTAY	85
FIGURA 4-34 MURO DE CONTENCIÓN CON NEUMÁTICOS, SECTOR "LA DORMIDA", OLMUÉ. CORTESÍA DE GUSTAVO SARABIA.	86
FIGURA 5-1 MATERIALES DE IZQ. A DER.: NEUMÁTICO ARO 14, MAICILLO Y AGUA.	87
FIGURA 5-2 COMPACTACIÓN DEL SUELO DENTRO DEL NEUMÁTICO. MATERIAL NEUMÁTICO-SUELO COMPACTADO.	88
FIGURA 5-3 DE IZQ. A DER.: PROBETAS DE CAUCHO Y PROBETA MONTADA EN CAJA CONTENEDORA.	89
FIGURA 5-4 EQUIPO DE CORTE. FUENTE: NCH 3085, 2007.	90
FIGURA 5-5 PROBETAS.	90
FIGURA 5-6 PROBETAS CON CAPA ARENA ENTRE ELLAS.....	90
FIGURA 5-7 A) INDICADOR DE DEFORMACIÓN VERTICAL; B) INDICADOR DE DEFORMACIÓN HORIZONTAL..	91
FIGURA 5-8 PROBETAS DE NEUMÁTICO.....	92
FIGURA 5-9 TABLA: RESUMEN DE RESULTADOS ENSAYO NEUMÁTICO- NEUMÁTICO.	93
FIGURA 5-10 ESFUERZO NOMINAL DE CORTE VS DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL PARA ENSAYO NEUMÁTICO-NEUMÁTICO.	93
FIGURA 5-11 GRÁFICO: ENVOLVENTE DE FALLA PARA ENSAYO NEUMÁTICO-NEUMÁTICO. VALORES EN KGF/CM ²	93
FIGURA 5-12 GRÁFICO: ENVOLVENTE DE FALLA PARA ENSAYO NEUMÁTICO-NEUMÁTICO AJUSTADA CON C=0. VALORES EN KGF/CM ²	94
FIGURA 5-13 TABLA: RESUMEN DE RESULTADOS ENSAYO NEUMÁTICO-ARENA FINA-NEUMÁTICO.	95
FIGURA 5-14 GRÁFICO: ESFUERZO NOMINAL DE CORTE VS DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL PARA ENSAYO NEUMÁTICO-ARENA FINA-NEUMÁTICO.	95

FIGURA 5-15 GRÁFICO: ENVOLVENTE DE FALLA PARA ENSAYO NEUMÁTICO-ARENA FINA-NEUMÁTICO CON VALORES EN [KGF/CM ²]	95
FIGURA 6-1 MURO EJEMPLO. MEDIDAS EN CENTÍMETROS.	98
FIGURA 6-2 MURO CASO ESTÁTICO.	99
FIGURA 6-3 DESCOMPOSICIÓN DE LA FUERZA DE EMPUJE ACTIVO PA.	99
FIGURA 6-4 DIAGRAMA DE FUERZAS SOBRE MURO. CASO SÍSMICO.	102
FIGURA 6-5 RESUMEN DE FUERZAS.	104
FIGURA 7-1 DIMENSIONES DE MURO DE CONTENCIÓN CANTILEVER TIPO A. (MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, 2017).	109
FIGURA 7-2 TABLA DE DIMENSIONES: MURO CANTILÉVER, SEGÚN MANUAL DE CARRETERAS V4 (MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, 2017).	109
FIGURA 7-3 COSTOS DE MURO DE CONTENCIÓN CANTILÉVER.....	110
FIGURA 7-4 TABLA DE DIMENSIONES DEL MURO TEM.	111
FIGURA 7-5 TABLA DE COSTOS DE MURO DE CONTENCIÓN TEM.....	111
FIGURA 7-6 TABLA DE COSTOS DE MURO DE CONTENCIÓN CON NEUMÁTICOS DESECHADOS.....	112
FIGURA 7-7 MURO DE CONTENCIÓN CON NEUMÁTICOS ARMADOS AL CORTE.....	114
FIGURA 7-8 TABLA DE COSTO TOTAL POR TIPO DE MURO.	115
FIGURA 7-9 TABLA COMPARATIVA DE VARIACIÓN PORCENTUAL DE COSTOS TOTALES ENTRE MUROS.	115
FIGURA 10-1 CURVA DE ESFUERZO CORTANTE VS DESPLAZAMIENTO NORMAL RELATIVO DE LLANTA CON EL MATERIAL DE LLENO.	123
FIGURA 10-2 CURVA DE ESFUERZO CORTANTE VS ESFUERZO NORMAL DEL CONJUNTO LLANTA CON EL MATERIAL DE LLENO	123
FIGURA 10-3 CURVA DE ESFUERZO CORTANTE VS ESFUERZO NORMAL CON LA COMBINACIÓN DE LOS CONECTORES A CORTANTE.....	124
FIGURA 10-4 ENSAYOS DE EXTRACCIÓN SOBRE NEUMÁTICOS.....	125
FIGURA 10-5 PROGRAMA DE ENSAYOS DE EXTRACCIÓN.....	126
FIGURA 10-6 RESULTADOS DE ENSAYOS DE EXTRACCIÓN.....	126
FIGURA 10-7 MODIFICACIÓN DE LOS NEUMÁTICOS.....	127
FIGURA 10-8 COLOCACIÓN Y COMPACTACIÓN.....	127

FIGURA 10-9 REUTILIZACIÓN DE BANDAS LATERALES.	128
FIGURA 10-10 MURO A MEDIO CONSTRUIR Y MUROS FINALIZADOS.....	128
FIGURA 10-11 PLANO DE OBRA TIPO PARA MURO DE CONTENCIÓN CANTILEVER TIPO A	129

1 INTRODUCCIÓN

En las sociedades modernas se crean y comercializan artículos que se distribuyen a escala mundial a una tasa nunca antes imaginada, muchos de los cuales son creados bajo costos materiales, energéticos y ambientales altos. A esa misma tasa se generan residuos que pasan a engrosar la gran cantidad de desperdicios contaminantes en el planeta que no son biodegradables. Esta predisposición cultural de usar y tirar junto con las estadísticas, hacen presagiar que esto seguirá en crecimiento. La vida lineal de un producto, es decir: ser *creado, usado y desechado*, se contrapone con la circularidad presente en la naturaleza, en donde cada materia al cumplir un ciclo en un subsistema, pasa a formar parte de otro; subsistemas que a su vez forman parte de otro mayor, lo que Aristóteles llamaba *hólos* o la totalidad.

Un desecho interesante de estos tiempos es el neumático, el cual ha despertado interés en la tecnología de materiales. Sus propiedades y proyecciones de uso han ampliado la gama de posibilidades en la materialidad de construcciones, desde su uso por sus propiedades como absorbente de energía, pasando por su impermeabilidad y su capacidad de ser troceado, hasta la llamativa mezcla de materiales con características rígido-flexibles que lo convierten en material de interés para la ingeniería.

Por otro lado, el desarrollo urbano y el crecimiento demográfico de la población han generado la necesidad de crear nuevos espacios, por lo que se ha hecho necesario aprovechar al máximo el espacio geográfico disponible. Es en estas circunstancias que los muros de contención son una solución, ya que permiten generar un cambio abrupto en la elevación de la superficie de un terreno, mediante el confinamiento de éste, de tal forma de lograr la estabilización y el equilibrio, al ser estos elementos de contención un medio que permita transmitir los esfuerzos hacia zonas más estables del propio suelo para su posterior disipación. En este sentido, el costo económico es determinante al momento de definir el tipo de muro a construir, por lo que se hace necesario entregar soluciones que permitan economizar en los medios y que puedan satisfacer en los fines.

Ante esto, esta memoria estudia el uso de neumáticos desechados en la construcción de estructuras de contención. El sistema consta de neumáticos enteros o cortados situados adyacentes uno al lado del otro, atados entre ellos y rellenos con suelo residual o material granular compactado, formando una malla horizontal. La sucesiva colocación de mallas unas sobre otras, hasta alcanzar la altura deseada, forma una estructura de contención. El uso de neumáticos desechados permite mejorar las propiedades mecánicas de un suelo residual al reforzarlo. Su materialidad hace que el costo económico y ambiental se vea reducido frente a la utilización de un sistema tradicional.



Figura 1-1 Contraste: Casas sobre muros de contención frente a casas sobre palafitos. Valparaíso, Chile.

1.1 OBJETIVOS Y ALCANCES DE LA MEMORIA

1.1.1 Objetivo general

Investigar el material compuesto por neumático y suelo compactado como unidad base para la construcción de muros de contención.

1.1.2 Objetivos específicos

- Presentar el resultado de una revisión exhaustiva de la literatura publicada en tierra reforzada con énfasis en la utilización de neumáticos desechados.
- Presentar un método para la construcción de muros de contención con neumáticos.
- Establecer ventajas y desventajas de la técnica.
- Estudiar el comportamiento entre dos muestras de la banda lateral de un neumático bajo corte directo, con tres cargas axiales diferentes.
- Presentar casos de estudio de la construcción y uso de muros de contención con neumáticos fuera de uso.
- Realizar un estudio económico comparativo entre dos técnicas de muro de neumáticos y muros de técnicas tradicionales, para una altura de 5 metros.
- Concientizar sobre las problemáticas ambientales relacionadas a la generación de residuos sólidos urbanos y las soluciones que se pueden generar utilizándolos, otorgándoles un nuevo valor de uso post consumo para la fabricación de productos arquitectónicos, constructivos, etc.
- Entregar un estudio sobre los muros de contención de neumáticos en Chile, que aporte desde el aspecto técnico de estas estructuras.

1.1.3 Alcance

El alcance de esta memoria es el de estudiar los muros de contención hechos a base de neumáticos desechados y su aplicación en Chile para alturas menores, con el fin de ser aplicadas como obras de mitigación de riesgos asociadas a viviendas.

1.1.4 Limitaciones

La mejor manera de realizar mediciones para poder caracterizar este tipo de muros es mediante la experimentación a tamaño real. Debido a las magnitudes que esto implica esta memoria se limita a analizar en laboratorio una parte aislada de la totalidad, la cual es la medición del esfuerzo de corte sobre dos muestras de neumáticos y el esfuerzo de corte en donde, entre dos muestras de neumáticos haya presencia de arena fina, escenario que puede ocurrir mediante arrastre por agua depositándose ésta entre diferentes capas de neumáticos. En la literatura estudiada para la realización de esta memoria se encontraron estudios sobre muros de contención a tamaño real y estudios de esfuerzos de corte sobre dos neumáticos rellenos con suelo compactado a tamaño real, mediante la construcción de un dispositivo que permitiera realizar esta medición.

No se ha tocado el aspecto de la capacidad portante y de las propiedades geotécnicas para el suelo de apoyo, solo se menciona que este debe ser adecuado.

No se realiza un análisis de estabilidad de laderas, y en los casos necesarios este análisis se debe realizar.

1.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se revisan brevemente algunos antecedentes históricos relativos a las técnicas de construcción de muros de contención, al desarrollo de la teoría y a los desechos. Además se presenta información sobre la problemática generada por los neumáticos desechados, información extraída desde un estudio realizado en Chile el año 2013.

Se hace una revisión general del estado del arte existente en cuanto a muros de contención, desde los tradicionales hasta los más recientes sistemas desarrollados de tierra reforzada.

Se presenta información relativa al neumático como sus propiedades resistivas y formas de revalorización.

Se hace una revisión exhaustiva de los estudios realizados en torno a la utilización de neumáticos fuera de uso como refuerzo de tierras y afines. Se estudian puntos importantes para considerar en diseño y se presenta un proceso constructivo. Además se presentan casos encontrados en Chile sobre la utilización de neumáticos desechados en la construcción de estos sistemas de contención. También se analizan los criterios de diseño de muros tradicionales y de los que se deben considerar en particular para muros con neumáticos fuera de uso.

Se presentan las teorías que conciernen al estudio de los muros de contención, revisando las clásicas teorías de empuje de tierras, de Rankine, Coulomb, Terzaghi y los efectos sísmicos propuestos por Mononobe & Okabe.

Se presenta un ensayo de laboratorio de corte directo sobre probetas de neumáticos para analizar la componente del roce ofrecida por la interfaz neumático-neumático. Se realiza un segundo ensayo emulando la situación en que exista material arrastrado por el agua y quede depositado entre neumáticos. Vale decir, se presenta la interfaz neumático-arena fina-neumático.

Se realiza un diseño de un muro de contención con neumáticos desechados hipotético de altura de 5 metros.

Se da una metodología para la construcción de muros de contención con neumáticos. Se presentan las ventajas y desventajas de la técnica.

Se realiza un análisis de costo comparando diferentes técnicas de muros de contención de altura de 5 metros. Estos son cantiléver, de tierra armada con geotextil, de neumáticos desechados y de neumáticos desechados armados al corte.

1.3 BREVES ANTECEDENTES HISTÓRICOS

1.3.1 Desarrollo de la técnica

Las primeras estructuras destinadas a la contención de masas de suelo o materiales pétreos datan del siglo IV A.C., que corresponden a los monumentos megalíticos ubicados en la costa atlántica de Europa. Un ejemplo de estas construcciones es Newgrange Cairn, ubicado en Irlanda, la cual está constituida por un muro de piedras circular que contiene una masa de piedras redondeadas dividida separadas en capas por esterillas de hierba, las cuales actúan reduciendo considerablemente la presión sobre la estructura de contención circular. Estas esterillas convierten a esta estructura en uno de los registros más antiguos en el uso de materiales naturales como georrefuerzo (Kerisel, 1993). Otros ejemplos de usos de este tipo de georrefuerzos son en los Zigurats mesopotámicos (Kerisel, 1993). y en la gran muralla china (Jones, 1996).



Figura 1-2 Muro de contención circular de Newgrange Cairn. Irlanda. Obtenido de: (killowenhouse, 2017)

Ya en el siglo XV según se estima, fueron construidas otras estructuras de contención importantes en América del sur, de especial interés por ser un complejo sistema de terrazas en una zona con una compleja orografía y clima lluvioso, por lo que la técnica para construir esta ciudadela es digna de atención. Esto es Machu Picchu, inmerso en la cordillera de los Andes del Perú, en donde se construyeron terrazas soportadas por muros de contención con piedras de granito de diversos tamaños apiladas y unidas con un 5% de pasta y construidas en sólidas fundaciones o directamente sobre la roca. Adicionalmente, cuenta con un gran sistema de drenaje de aguas lluvia, y el conjunto propiciaba la actividad agrícola ajustándose al talud natural presentado por la montaña. La masa de material de relleno retenido a trasdós estaba conformada por capas de material granular de mayor tamaño en el fondo, seguida de una capa de material granular más pequeña y arena fina para luego coronar con suelo apto para la agricultura. Esta disposición fuerza al agua de la lluvia a filtrar y dispersarse a lo largo de la terraza controlando el flujo del agua y evitando la erosión de la capa superior. Esto demuestra la grandeza de la técnica constructiva y agrícola de esta cultura (Fontanese, 2010).

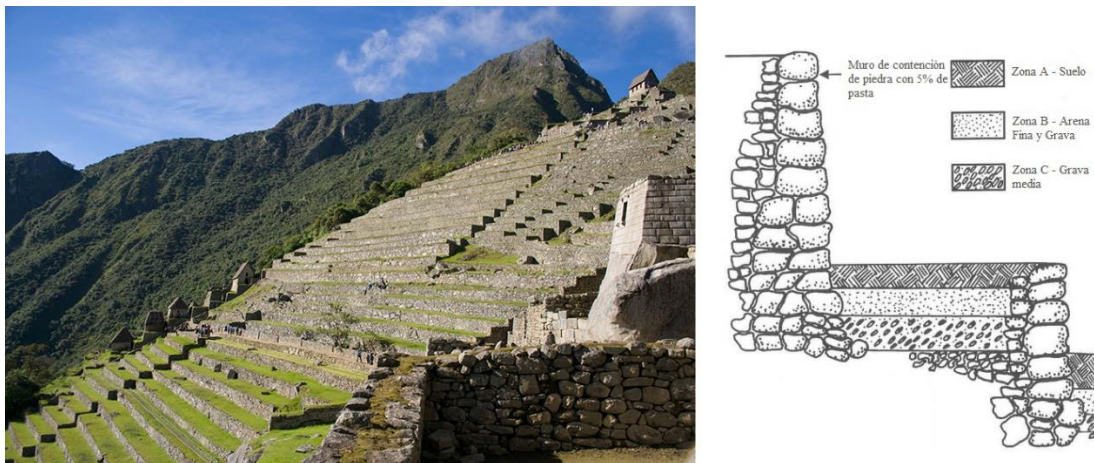


Figura 1-3 Izq: Machu Picchu, Perú. Der: Sección transversal de una terraza agrícola (Wright and Zegarra, 2000).

Estas estructuras de piedra, de peso de varias toneladas por metro cuadrado, fueron ampliamente utilizadas durante siglos. La aparición del hormigón armado con acero en el

siglo XIX permitió el desarrollo de estructuras como los muros de hormigón y de otras más ligeras como los muros cantiléver fabricados con hormigón armado. Pronto aparecieron diversas técnicas como los gaviones, muros de cribas, muros anclados con acero, solo por nombrar algunas. Importante es mencionar en el contexto que envuelve a esta memoria el desarrollo de técnicas de suelo reforzado, que han permitido obtener variedad de estructuras, y la diferencia en flexibilidad han permitido a los ingenieros el estudio del alcance de cuál presión, activa o pasiva es esfuerzo-dependiente y la distribución de presiones laterales (Kerissel, 1993). Diversas disposiciones estructurales, materiales, métodos de cálculo y diseño a través de computadores y de fabricación, han permitido la existencia de estructuras cada vez más diversas hasta el día de hoy.

En cuanto a la utilización de neumáticos en muros de contención, desde hace décadas ha comenzado a ser investigada. En Francia se registra la primera investigación realizada sobre esto y fue en el año 1976, la que en 1977 fue entregada como un reporte a la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique (Long, 1990). Luego de una serie de investigaciones en torno al uso del neumático en obras civiles, en 1990, el ingeniero y doctor Nguyen Thanh Long, escribe el libro *Pneusol*, en donde recopila sus estudios sobre la combinación suelo-neumático y su aplicación en obras civiles, desde estabilización de taludes y refuerzo del suelo, hasta su uso en la construcción de caminos.

Desde la década de los 90, otros estudios importantes sobre este tipo de muros han sido realizados por Vinod Garga y Vince O'Shaughnessy en Canadá, de la Universidad de Ottawa, y por Medeiros y Sayão, entre otros, en la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro de Brasil. Estas universidades, en conjunto con la Fundación Geo-Río (Ayuntamiento de la ciudad de Río de Janeiro) empezaron en 1995 con la construcción de un muro experimental de neumáticos desechados localizado en Río de Janeiro, el cual contó con instrumentación para realizar mediciones (Sieira et al, 2001).

Al día de hoy esta técnica ha sido utilizada en diversas partes del mundo, con resultados satisfactorios. Una de las primera construcciones de este tipo de muros data de la década del 70, con la reconstrucción de un terraplén en una carretera, reforzado con neumáticos en el norte de California, el cual fue construido con capas horizontales, verticalmente espaciadas de 0,60 metros y unidas con metal, según citan los autores en (Gerscovich et al, 2004) en la página 3. Para el año 1990, Long contaba más de 60 estructuras de este tipo construidas en Francia y 12 en Algeria (Long, 1990). En 1982, se construyó un muro experimental en Langres, Francia, de dimensiones de 5 metros de alto y 10 metros de largo (Long, 1990). También está el muro de Bussang, constituido por 6 obras con 650 metros de longitud y de 2 hasta 7 metros de altura, construido en el año 1987 (Eselin et al., 1993). También existen muros de contención con NFU en países como Estados Unidos e Inglaterra, entre otros (O'Shaughnessy, 1997).

Cabe mencionar, que en los trabajos de Long el *Pneusol* se estudió para diferentes aplicaciones, a saber: como reductor de presión activa; rigidización de pendientes;

absorbedores de energía; relleno ligero; dispositivos de seguridad de bancos y pendientes; y creación de arqueos (en tuberías bajo tierra) al repartir esfuerzos.

Entre otros trabajos que cabe mencionar, está el realizado en el año 2008 en Malasia, en la universidad de Putra se llevaron a cabo estudios y fueron presentados en un trabajo titulado “*Application of scrap tires as earth reinforcement for repair of tropical residual soil slope*”. En Colombia, en el año 2017 se realizó una Tesis titulada “*Estandarización de técnicas de diseño y construcción de muros de tierra reforzada con llantas de desecho*” en la Universidad Nacional de Colombia.

En la actualidad existen muros de este tipo construidos en diversas partes del mundo y empresas que se dedican a este tipo de construcciones. Dos ejemplos son *Ecoflex international*, empresa Australiana que se dedica entre otro tipo de obras a la construcción de sistemas *E Wall*, que consisten en muros de gravedad con neumáticos desechados (Ver [figura 4-2](#)); y *Yantek*, empresa Mexicana que construye muros mediante la modificación de neumáticos desechados (Ver [Anexo C](#)).



Figura 1-4 Izq: Muro de Pneuol; Der: Paramento de Pneuol + Refuerzo con geotextiles. Aigueblanche, Saboya.
Fuente: (Long, 1990).



Figura 1-5 Estabilización de talud mediante el uso de neumáticos, Guatemala. Extraído de:
<https://www.facebook.com/ecomuroguatemala/>

1.3.2 Desarrollo de la teoría

En la construcción antigua, las problemáticas eran abarcadas mediante la intuición y la experiencia, y no es hasta el siglo XVIII que la mecánica de suelos se comienza a desarrollar como ciencia, con la aparición de la teoría de Coulomb en 1776, sobre la determinación del empuje lateral aplicado por el suelo sobre una estructura de contención, la cual aún sigue siendo importante para la mecánica de suelos moderna e incluso es una de las principales bases para los métodos corrientes de dimensionamiento de un muro de contención. En 1857 aparece la teoría de Rankine, que da solución a un campo de tensiones en un estado de equilibrio plástico, y permite la predicción de las presiones activas y pasivas del terreno.

En 1871 el trabajo de Mohr cristalizó en una teoría de falla para materiales idealmente plásticos, la que en combinación con el trabajo de Coulomb, relacionó en una fórmula matemática la resistencia cortante producida por una tensión sobre una masa de suelo, con las propiedades de cohesión y ángulo de fricción que presenta el suelo.

Conceptos modernos de tierra reforzada fueron primero idealizados por Casagrande e implementados por el ingeniero y arquitecto francés Henri Vidal. En 1963 patenta el sistema de “tierra armada”, que consiste en un material compuesto fabricado por capas de relleno de tierra alternadas por capas de miembros de refuerzo unidos a elementos de revestimiento. La interacción friccional entre las partículas de suelo y los miembros de refuerzo estabilizan la estructura de material compuesto creando un muro de gravedad. Esta tecnología dio lugar a una mejor comprensión de los conceptos fundamentales implicados y condujo al rápido desarrollo de nuevas formas de mejorar los refuerzos (O’Shaughnessy, 1997).

1.3.3 Desechos

Hoy en día el desarrollo de las sociedades modernas, el sistema productivo imperante y la concepción cultural de usar y tirar han ocasionado que se generen gran cantidad de elementos de desecho los que se vuelven contaminantes para el medio ambiente una vez que su ciclo de vida ha finalizado. Un ejemplo insigne de esto son los neumáticos de vehículos, los cuales no son biodegradables y requieren de cantidades de energía considerables para su fabricación. Una solución para esta problemática es cambiar la mirada que se tiene sobre estos elementos, concientizar a la población sobre su impacto en la naturaleza y explorar las diversas maneras de revalorizarlos.

En el pasado los desechos generados por las actividades humanas estaban integrados en los ciclos naturales, siendo estos absorbidos por los ecosistemas naturales sin mayores problemas. No obstante, estos residuos trajeron problemas a los incipientes asentamientos

urbanos debido a la falta de planificación en la recogida y organización, generando crisis sanitarias de plagas y epidemias que diezmaron a la población.

Un hito importante lo marca la revolución industrial a fines del siglo XVIII. Tras esto surgen nuevos medios de producción, actividades industriales y el comercio crece a pasos agigantados. Esto produce una explosión demográfica y económica que desemboca en el desarrollo urbano. Este nuevo ritmo que adquirieron las sociedades, más vertiginoso que el de antaño, complejiza el escenario para los residuos generados por el humano y su posterior integración a los ciclos naturales. Sin embargo, no es hasta el segundo tercio del siglo XX, cuando el avance tecnológico en conjunto con la globalización de la economía basada en el consumo, junto con la cultura de usar y tirar que el problema se agudiza aún más volviéndose crítico y generando un gran daño en nuestro medio ambiente (www.uned.es, 2017).

La reutilización de elementos para la construcción también forma parte del desarrollo social de otras especies. Por ejemplo, en las sociedades de insectos, podemos encontrar construcciones realizadas con residuos orgánicos. Tal es el caso de las castas trabajadoras de las termitas *Macrotermes bellicosus*, las que construyen arcos y columnas mediante la acumulación de una mezcla de tierra, saliva, madera masticada y excremento (Wilson, 1971).

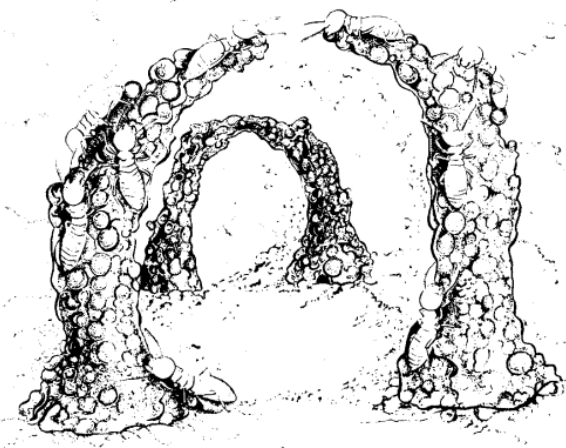


Figura 1-6 Arcos hechos por Termitas. Dibujo de Turid Hölldoble; tomado de (Wilson, E.O. ,1971)

1.4 PROBLEMÁTICA MEDIOAMBIENTAL

Actualmente el acelerado incremento en el parque automotriz tanto en Chile como mundialmente, la baja vida útil de los neumáticos, la cual es generalmente de unos 50.000 km, equivalente a unos 3 o 4 años, sin considerar recauchaje (Cámara de la Industria del Neumático de Chile A.G., 2013), y las políticas de reciclaje insuficientes convierten a los neumáticos en uno de los principales elementos de desecho en Chile. Son elementos que no se degradan en el corto plazo en el medio ambiente, son focos de insalubridad, y son materiales de alta combustión.

1.4.1 Situación actual de los NFU en Chile

En Chile, se generaron al año 2008 más de 40.000 toneladas de NFU y se estima que al año 2020 sean más de 80.000 las toneladas generadas anualmente. Hasta antes del año 2009, no existía ninguna planta de tratamiento para neumáticos fuera de uso y su única forma de valorización era la de incineración en cementeras, usados como combustibles alternativos. A partir de este año Polambiente es la primera empresa que se dedica a tratar el problema de los neumáticos fuera de uso en Chile, mediante la instalación de una planta de trituración y granulación de NFU para producir gránulos, polvo y chips de caucho reciclado en la región Metropolitana, la cual es capaz de tratar (Polambiente, s.f.), la cual es capaz de tratar 6.500 toneladas de NFU al año. Esta planta nace luego de que en Chile se generaran políticas y planes de incentivo para producir de una manera más limpia y mitigar los riesgos hasta ahora generados por aquellas industrias y sus productos, que no tenían un plan de manejo adecuado luego de la vida útil de estos.

Una cooperación técnica y económica entre la República Federal Alemana y la República de Chile, cristalizó en el proyecto “Gestión integral de residuos sólidos en Chile” cuyo objetivo era el de *“lograr el acuerdo con los actores relevantes de los sectores públicos y privados para poner en marcha la incorporación de la Responsabilidad Extendida del Productor”*. Esto sirvió como base para que en el año 2008 CINC (Cámara de la Industria del Neumático de Chile A.G.), CPL (Consejo de Producción Limpia) y la CONAMA (Corporación Nacional del Medio Ambiente), actual Ministerio del Medio Ambiente de la república de Chile, suscribieron un Acuerdo Marco, el que tuvo como principal objetivo el de incorporar la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) para el rubro de los neumáticos a través del desarrollo de un Acuerdo de Producción Limpia para el sector. Luego en 2009 la Cámara de la Industria del Neumático de Chile A.G. (CINC), firmó el Acuerdo de Producción Limpia “Prevención y Valorización de Neumáticos Fuera de Uso” que tuvo como objetivo la incorporación de agentes económicos del rubro de los neumáticos el concepto de responsabilidad extendida al productor (REP), con la finalidad de *“prevenir la generación de NFU, garantizar la gestión sustentable de los mismos y servir como base para el potencial futuro reglamento chileno oficial de la REP”*. Cabe destacar que uno de los objetivos específicos es el de: *“Promover el desarrollo de nuevos proyectos de valorización de NFU”*. Las otras partes participantes de este acuerdo fueron la Comisión Nacional del Medio Ambiente, Ministerio de Obras Públicas, Ministerio de Salud, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Corporación de Fomento a la Producción Limpia, Dirección Nacional de Aduanas, INNOVA Chile, y el Consejo Nacional de Producción Limpia (Cámara de la Industria del Neumático de Chile A.G., 2013).

Según el estudio mencionado anteriormente (Cámara de la Industria del Neumático de Chile A.G., 2013) de un total de cerca de 3 millones de NFU, cantidad que equivale a unas 42.000 toneladas de residuo: 2,5 millones provienen de vehículos livianos, lo que equivale a 22.000 toneladas; 85.000 provienen del transporte público, equivalentes a 4.000 toneladas; 300.000 provienen de vehículos de carga que equivalen a 14.000 toneladas; y 3.000 unidades

proviene de vehículos agrícolas, equivalentes a 300 toneladas de residuos”. Estas estadísticas se resumen a continuación en el siguiente gráfico:

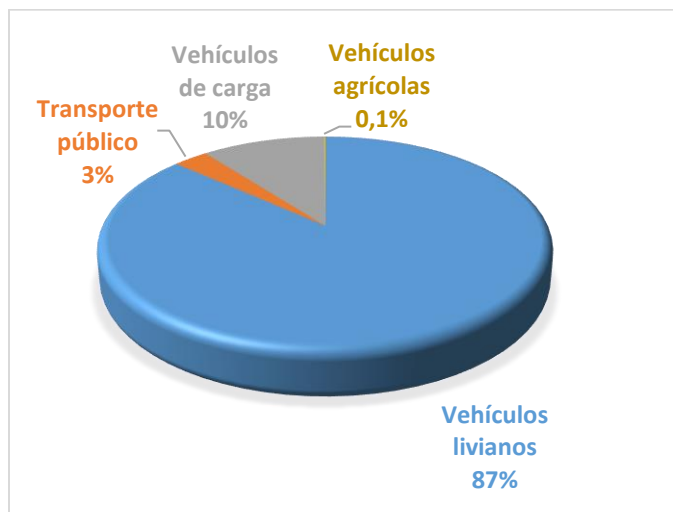


Figura 1-7 Gráfico de distribución de unidades de NFU en Chile según tipo de vehículo.

Para el año 2013 se estimó que se comercializaron entre 3 a 3,5 millones de unidades al año, destinados a vehículos livianos, de transporte público y de carga. A continuación se muestra la distribución de estos:

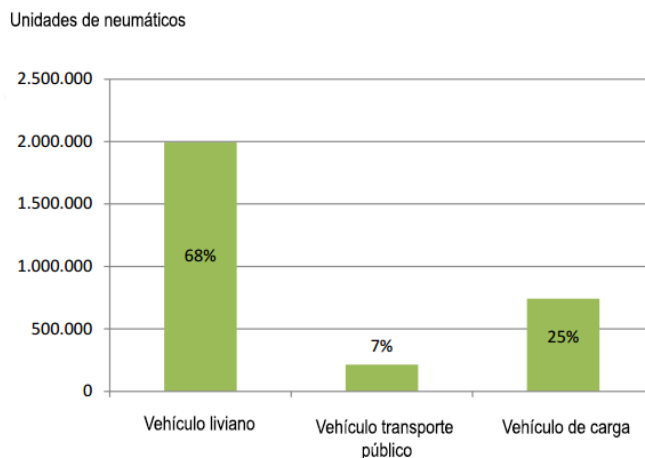


Figura 1-8 Gráfico de distribución según uso de neumáticos. Fuente: CINC.

Se estima que el crecimiento del mercado de los neumáticos es del orden de un 4% anual. En base a esto y otros parámetros se realizó una proyección de la generación de unidades de neumáticos fuera de uso (NFU) y sus respectivas toneladas, que se presenta a continuación:

<i>Año</i>	<i>Unidades NFU</i>	<i>Toneladas NFU</i>
2008	3.094.000	47.593
2015	3.662.151	65.795
2020	4.455.340	80.046

Figura 1-9 Tabla de proyección de recambio y generación de NFU. Fuente: MMA, Ecoing 2010.

En cuanto a la distribución geográfica de comercialización, se estima que en la zona centro, considerada con un radio de 500 km, se comercializa una cantidad cercana al 77% de los neumáticos a nivel nacional, equivalente a 2.300.000 unidades anuales, al año 2008 (Cámara de la Industria del Neumático de Chile A.G., 2013). Además en este documento se estableció una radiografía regional de la distribución de NFU en el país la cual se resume en el siguiente gráfico:

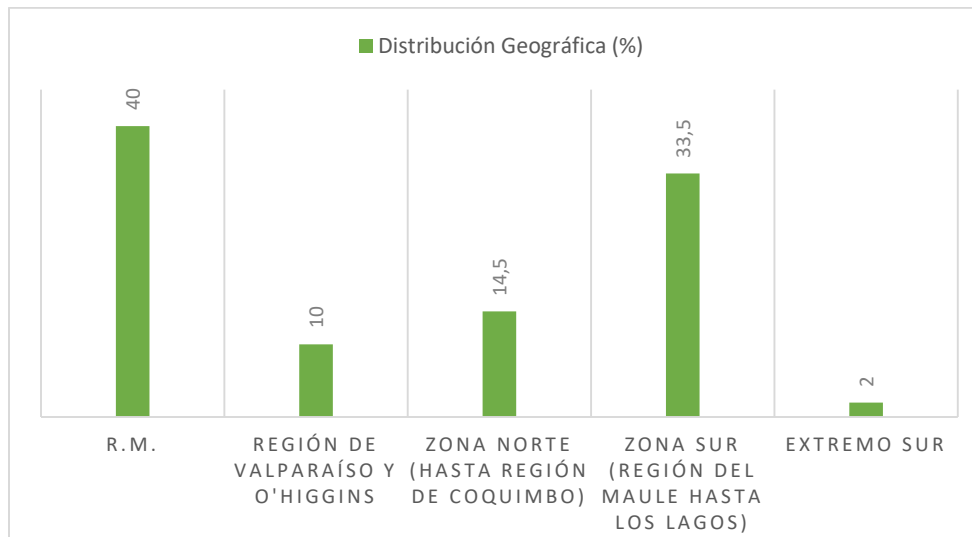


Figura 1-10 Gráfico de distribución geográfica de NFU en Chile.

En cuanto a cómo terminan los neumáticos cabe mencionar que se desconoce el paradero final de más del 90% de los NFU generados en el país; cerca de 2000 toneladas se destinan a incineración en hornos cementeros como combustible alternativo; y “*otras 1500 toneladas a usos tales como estabilización de laderas de rellenos sanitarios y uso agrícola*” (Cámara de la Industria del Neumático de Chile A.G., 2013).

En la siguiente tabla se presentan la cantidad generada anualmente de neumáticos fuera de uso en Chile según la medida del neumático, según datos otorgados por la Cámara de la Industria del Neumático de Chile A.G (CINC) al 2016:

Medida Neumático	Generación Aprox. NFU Unidad/año	Aro Pulgada	Diámetro externo mm	Ancho mm
175/70R13	489.478	13	576	177
185/65R14	319.248	14	596	189
175/65R14	310.989	14	584	177
295/80R22.5	287.613	22,5	298	1044
11R22.5	257.784	22,5	279	1054
245/75R16	167.513	16	774	248
195/65R15	158.688	15	635	201
205/55R16	123.611	16	632	214
185/65R15	104.291	15	621	189
235/75R15	88.889	15	733	235
TOTAL	2.308.104			

Figura 1-11 Tabla de cantidades de NFU según medida de neumático, 2016. Fuente: CINC.

Se puede ver que los neumáticos de aro 13 y 14 pulgadas, son los más desechados en el país. En conjunto, los neumáticos aro 14 suman 630.237 unidades de NFU por año, por lo que son los neumáticos más desechados según su aro. Tomando como referencia estos datos, los neumáticos aro 14 se pueden transformar en una buena alternativa para su uso como refuerzo de tierras en Chile.

1.5 MENCIÓN DE MUROS DE CONTENCIÓN DE NEUMÁTICOS EN LA NORMATIVA CHILENA

En la norma, resolución número 222 del Ministerio de Agricultura en conjunto con la Corporación Nacional Forestal (CONAF) que se titula: “Fija costos de forestación, recuperación de suelos degradados, estabilización de dunas, poda y raleo, por hectárea, y establecimiento de cortinas cortavientos por kilómetro, al 31 de julio de 2000, para los efectos del decreto ley N° 701 de 1974 y sus modificaciones posteriores” se hace mención a los muros de contención de neumáticos, indicando los casos en que se puede utilizar esta obra y como se debe hacer. A continuación, dentro de las “*especificaciones técnicas generales de obras de recuperación de suelos degradados susceptibles de bonificar*” se presenta el párrafo donde se mencionan los muros de contención con neumáticos:

“Esta obra se puede utilizar en el control de cursos de agua secundarios, generalmente temporales, tales como arroyos, esteros y quebradas y en la contención de bases de taludes y laderas con erosión lineal de canalículos o zanjas incipientes. Se utilizan neumáticos usados (aro 13 .15), rellenos con tierra e imbricados, como ladrillos en albañilería y escalonados con peldaños de 5 a 8 cm. En su construcción debe emparejarse el talud y la base, disponer los neumáticos, rellenar con tierra y compactar. La primera corrida o línea de base, se debe alambrear a un poste horizontal que se entierra y las 2 o 3 primeras corridas de neumáticos deben fijarse por estacas de 60 a 70 cm. El largo de esta obra es variable,

pero la altura no debe sobrepasar los 1,5 metros y la pendiente del talud corresponde a 1: z, donde $z = 0,4$ a $0,8$. Para reforzar biológicamente la obra se deberá sembrar semillas de especies herbáceas en la superficie rellena de los neumáticos”.

Esta normativa limita el uso de neumáticos a bases de taludes y laderas con dimensiones de máximo 1,5 metros de altura. La realidad existente y encontrada en algunos lugares del país da cuenta de que el uso de neumáticos se extiende a mayores dimensiones y a pendientes próximas a la verticalidad. Es por esto que se hace necesaria la creación y actualización de normativas que regulen la construcción de este tipo de muros en el país.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 TEORÍA DE EMPUJE DE TIERRAS

2.1.1 Presiones que actúan sobre un muro de contención

Las presiones reales existentes sobre un muro de contención son difíciles de estimar debido a que son de naturaleza variada, y por la gran cantidad de variables que intervienen como pueden ser: el tipo de relleno, su comportamiento en el tiempo y el tipo de compactación, la humedad y sus variaciones, entre otras. Un muro de gravedad junto al relleno que sostiene y el suelo que le soporta, constituye un sistema con un grado elevado de indeterminación. La estática por sí sola no permite determinar las magnitudes de las fuerzas que actúan sobre un muro y además estas fuerzas se verán afectadas por la secuencia de las operaciones de construcción y relleno.

En la figura 2-1 se presentan de manera general, las principales fuerzas que actúan sobre un muro de contención de gravedad. Aquí se muestra el empuje activo, el cual tiende a empujar el muro hacia el exterior y se genera luego de colocar el relleno y cuando actúan otras sobrecargas en la superficie del terreno. En la base del muro se genera la resistencia al deslizamiento y por delante del muro se genera el empuje pasivo, fuerzas que contrarrestan el movimiento hacia afuera generado por el empuje activo. Además, el empuje activo tiende a volcar el muro en torno a su pie, el cual es contrarrestado por el peso del muro y la componente vertical del empuje activo. Así pues, el peso del muro es importante por dos conceptos: se opone al vuelco y da lugar a una resistencia al deslizamiento en la base. Por esta razón un muro de este tipo se denomina muro de gravedad (o muro que resiste por su peso). (Lambe, Whitman y Jiménez Salas, 2009).

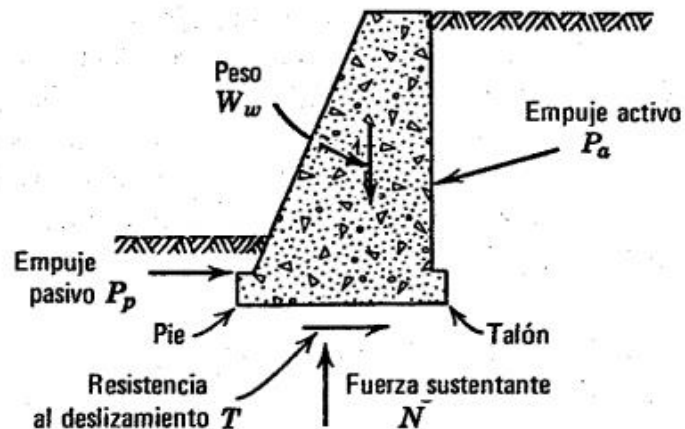


Figura 2-1 Fuerzas actuantes sobre un muro de gravedad. (Lambe, Whitman y Jiménez Salas, 2009).

Algunas fuerzas existentes no consideradas en este diagrama son (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2009):

- i. Sobrecargas actuantes sobre el relleno.
- ii. Fuerzas de filtración y otras debidas al agua.
Estas presiones hidrostáticas son generadas por la acumulación de agua tras el muro. Esta condición debe ser evitada instalando en el muro el drenaje adecuado que garantice la correcta canalización para su extracción.
- iii. Las subpresiones.
Se producen bajo el muro, por almacenamiento de agua cuando el drenaje es deficiente o ha sufrido un desperfecto.
- iv. La vibración.
Producidas por el paso de tráfico, máquinas u otras causas. Estas pueden incrementar las presiones contra muros cercanos. Generalmente se desprecian estos esfuerzos en el cálculo por ser pequeños.
- v. El impacto de fuerzas.
Estos efectos tienden a ser rápidamente amortiguados por el propio relleno y suelen no ser tomados en cuenta.
- vi. Movimientos sísmicos.
Pueden aumentar momentáneamente la presión lateral contra un muro.
- vii. La acción de las heladas.
Cuando el drenaje de los rellenos no es adecuado, la parte superior del mismo puede saturarse y en condiciones climáticas apropiadas el agua puede helarse. Esto produce expansiones de cierta importancia en el relleno sobre el muro y estos efectos pueden hacerse notables cuando se repiten frecuentemente.
- viii. Las expansiones debidas a cambios de humedad en el relleno.

Estos problemas son frecuentes en rellenos arcillosos en los que la expansión produce un aumento en las presiones laterales sobre el muro; este aumento de las presiones está limitado por las condiciones de fluencia sobre el muro.

Cuando el suelo se seca, se contrae y la presión disminuye. La reiteración de estos procesos puede ser perjudicial. El efecto suele presentarse más intensamente en la superficie del relleno, decreciendo con la profundidad, de modo que rara vez se manifiesta debajo de 1,5 m aproximadamente, bajo la superficie del relleno.

No hay ningún método seguro para calcular los incrementos de presión producidos por estos fenómenos, que pueden evitarse en gran parte con estratos horizontales de material grueso que actúe como dren.

2.1.2 Ecuación de Terzaghi. Consideración del efecto del agua en la presión.

El esfuerzo total presente en una masa de suelo, está conformado por los esfuerzos efectivos sumado a los esfuerzos de presión que ejerce el agua situada en los vacíos intercomunicados existentes en la estructura de partículas sólidas que conforman el suelo. Expresado matemáticamente:

$$\sigma = \bar{\sigma} + u \quad (2.1)$$

Donde:

σ = Fatiga o tensión total.

$\bar{\sigma}$ = Fatiga o tensión efectiva.

u = Presión de agua.

2.1.3 Teoría de Coulomb. Resistencia al esfuerzo cortante

El ingeniero y físico Coulomb realizó el primer intento en calcular de manera científica la presión de la tierra sobre elementos de contención, bajo las hipótesis de que la tierra es incompresible, que su deformación previa a la falla es despreciable y que la falla ocurre a lo largo de superficies planas de deslizamiento. La resistencia al esfuerzo cortante que estableció Coulomb fue a través de la ecuación:

$$\tau_f = C + \sigma * tg\phi \quad (2.2)$$

En donde:

τ_f = Esfuerzo de corte.

C = Constante de Cohesión del suelo.

σ = Tensión normal al plano.

ϕ = Ángulo de rozamiento interno del suelo.

2.1.4 Teoría de Rankine

La teoría de Rankine está restringida a las hipótesis que a continuación se presentan:

1. Los estados “plásticos”, tanto activo como pasivo, se desarrollan por completo en toda la masa del suelo. Esta hipótesis se verifica razonablemente en los muros reales, que pueden deformarse lo suficiente para que se desarrolle en última instancia dicha presión activa. El tipo de movimiento necesario para que pueda desarrollarse un estado “plástico” es un ligero giro del muro en torno a su base, en el sentido conveniente (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2009).

2. Cuando la superficie del relleno es horizontal y si el respaldo del muro es vertical, como implícitamente se ha considerado hasta ahora, el muro debe ser “liso”, es decir, el coeficiente de fricción entre él y el suelo de relleno debe ser nulo.

Para efectos prácticos, se considerará el caso de superficie horizontal del relleno.

2.1.4.1 Empuje de tierras en reposo

Este caso considera que el muro que contiene la tierra no sufre desplazamientos de ningún tipo.

Considérese en el interior de un semiespacio de suelo en reposo con frontera superior horizontal, se considera un elemento de suelo de altura dz a una profundidad z . En estas condiciones la presión vertical efectiva actuante sobre la estructura del elemento es:

$$d\sigma_v = \gamma * dz \quad (2.3)$$

Al integrar se tiene que:
$$\sigma_v = \gamma * z \quad (2.4)$$

Dónde γ es el peso específico del medio.

Bajo la influencia del esfuerzo vertical el elemento de suelo se presiona lateralmente originándose un esfuerzo horizontal, σ_h que en base a la experiencia se ha aceptado como directamente proporcional a σ_v .

$$\overline{\sigma_H} = k_0 * \gamma * z \quad (2.5)$$

Es decir
$$\overline{\sigma_H} = k_0 * \overline{\sigma_v} \quad (2.6)$$

En suelos no saturados se tiene nula presión de agua es decir $u=0$, por consiguiente $\sigma = \overline{\sigma}$, entonces:

$$\sigma_H = k_0 * \sigma_v \quad (2.7)$$

Con k_0 como *coeficiente de presión de tierra en reposo*:

$$k_0 = \frac{\mu}{1-\mu} \quad (2.8)$$

μ : *Coeficiente de poisson*

Se han obtenido valores de k_0 experimentalmente en laboratorio y en el campo, observándose, que para suelos granulares sin finos, oscila entre 0,4 y 0,8 siendo el primer valor correspondiente a arenas sueltas y el segundo a arenas apisonadas. Una arena natural compacta suele tener un valor de k_0 del orden de 0,5 (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2009).

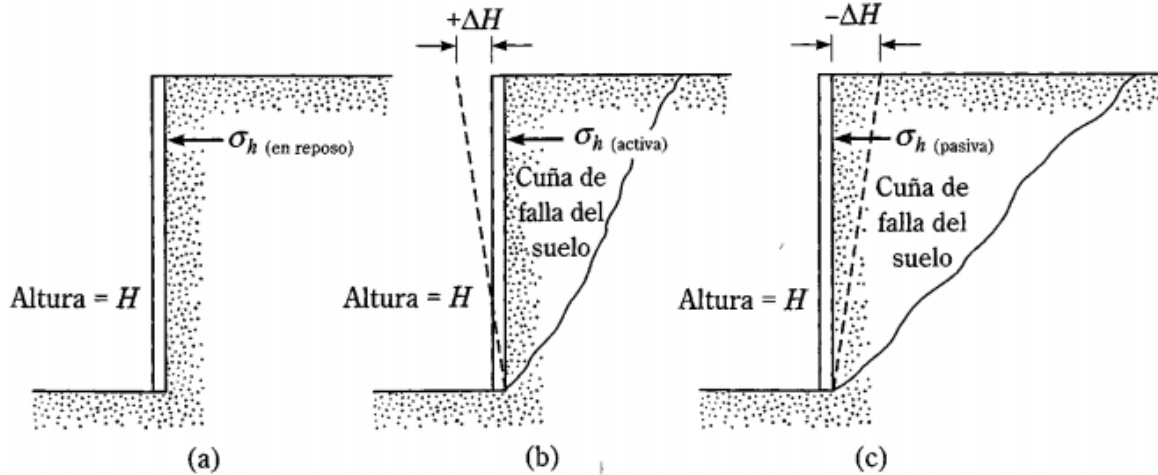


Figura 2-2 Naturaleza de la presión lateral de la tierra sobre un muro de contención. Extraído de (Braja, 2001)

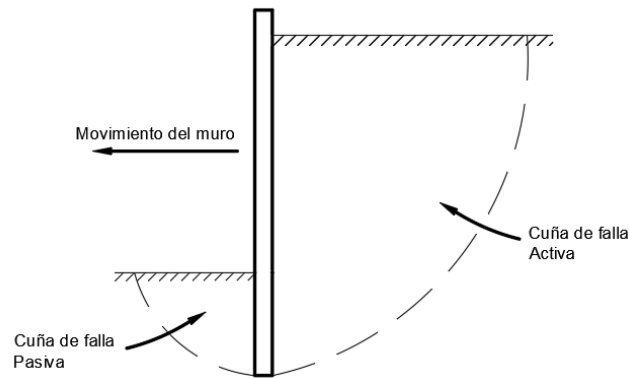


Figura 2-3 Esquemas de cuñas activas y pasivas.

2.1.4.2 Empuje activo de tierras

En este caso, se considera que el muro se desplaza alejándose de la masa de tierra contenida (ver [Figura 2-2 b](#)) y la presión ejercida sobre cualquier profundidad z del muro decrecerá, por lo que se tendrá que el esfuerzo horizontal será menor al del caso estático:

$$\bar{\sigma}_H < k_0 * \bar{\sigma}_v \quad (2.11)$$

$$\sigma_H = k_a * \sigma_v \quad (2.12)$$

Con k_a : Coeficiente de presión activo de tierras.

Para suelos granulares no cohesivos se tiene que:

$$k_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) = \frac{1 - \text{sen}\phi}{1 + \text{sen}\phi} \quad (2.13)$$

Los esfuerzos para el caso activo son:

$$\sigma_a = k_a * \gamma * H \quad (2.14)$$

Los esfuerzos para este caso son sustituidos por una fuerza puntual, la cual es llamada empuje activo y es:

$$P_a = \frac{1}{2} * k_a * \gamma * H^2 \quad (2.15)$$

Hasta aquí se ha considerado que las fórmulas sólo valen para el caso en que el relleno de tierra sea horizontal y el paramento del muro vertical. A continuación se presenta una versión del coeficiente de empuje activo para casos en que el paramento del muro es inclinado, la superficie superior del relleno de tierra es inclinada y existe roce muro-suelo, el cual es obtenido a través del método de las cuñas de Coulomb.

$$K_a = \left(\frac{\operatorname{cosec}(\beta) * \operatorname{sen}(\beta - \phi)}{\sqrt{\operatorname{sen}(\beta + \delta)} + \sqrt{\frac{\operatorname{sen}(\phi + \delta) * \operatorname{sen}(\phi - i)}{\operatorname{sen}(\beta - i)}}} \right)^2 \quad (2.16)$$

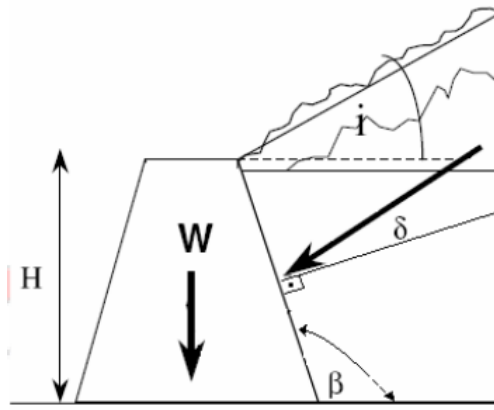


Figura 2-4 Fuerza activa en muro de contención. Extraído de apuntes de Mecánica de suelos I. M. Petersen.

2.1.4.3 Empuje pasivo de tierras

En este caso, se considera que el muro se desplaza hacia la masa de tierra contenida (ver [Figura 2-2 c](#)), por lo que el esfuerzo ejercido a cualquier profundidad z aumentará, y se tendrá que el esfuerzo horizontal en el caso pasivo será mayor que en el caso estático:

$$\bar{\sigma}_H > k_0 * \bar{\sigma}_v \quad (2.17)$$

$$\sigma_H = k_p * \sigma_v \quad (2.18)$$

Para suelos granulares no cohesivos se tiene que:

$$k_p = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) = \frac{1 + \text{sen}\phi}{1 - \text{sen}\phi} \quad (2.19)$$

El esfuerzo para el caso pasivo es:

$$\sigma_p = k_p * \gamma * h \quad (2.20)$$

El volumen de presiones de esfuerzos pasivos puede considerarse sustituido por una fuerza puntual llamada empuje pasivo y es:

$$P_p = \frac{1}{2} * k_p * \gamma * h^2 \quad (2.21)$$

La distribución de presiones en la teoría de Rankine es lineal, por lo que el punto de aplicación de las fuerzas de empuje se encuentra a un tercio de la altura del muro medido a partir de la base.

Además, existe una relación entre el coeficiente lateral de empuje pasivo y activo:

$$k_p = \frac{1}{k_a}$$

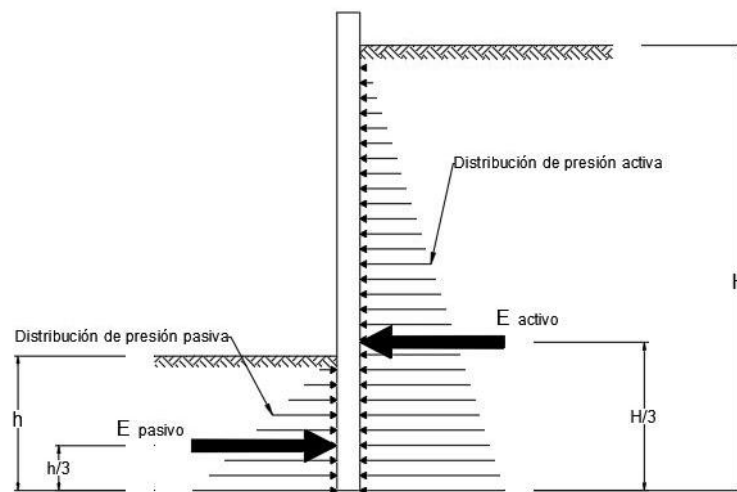


Figura 2-5 Representación gráfica del empuje pasivo y activo sobre un muro.

2.1.4.4 Caso considerando cohesión, fricción y sobrecarga

Esta es la situación en que el relleno presenta una sobrecarga uniformemente distribuida “ q ” en su superficie superior horizontal, que puede representar la situación en que existe una estructura, y que adicionalmente el suelo presente las propiedades de cohesión y fricción.

El esfuerzo adicional generado por la carga q es:

Para el caso activo:

$$\sigma_q = k_a * q \quad (2.20)$$

Análogamente para el caso pasivo:

$$\sigma_q = k_p * q \quad (2.21)$$

Luego las fuerzas de empuje activo y pasivo son:

Fuerzas de empuje activo:

$$E_{a\ total} = \frac{1}{2} * k_a * \gamma * H^2 + 2 * C * H * \sqrt{k_a} + q * H * k_a \quad (2.22)$$

Fuerzas de empuje pasivo:

$$E_{p\ total} = \frac{1}{2} * k_p * \gamma * H^2 + 2 * C * H * \sqrt{k_p} + q * H * k_p \quad (2.23)$$

2.1.5 Empuje sísmico

Método de Mononobe & Okabe (Japón, 1926)

El efecto dinámico debido a sismos aumenta las presiones a trasdós sobre los muros de contención. El análisis se hace de forma pseudo-dinámica (pseudo-estática) y se considera un diagrama triangular invertido adicional de empuje, y además se consideran fuerzas adicionales inerciales sísmicas producto del propio peso del muro.

Sea:

k_h : Aceleración sísmica promedio horizontal.

k_v : Aceleración sísmica promedio vertical.

El incremento sísmico de empuje es:

$$\Delta k_s = k_{dinámico} - k_{a\ estático} \quad (2.24)$$

Donde:

$$k_{dinámico} = (1 - k_v) \left[\frac{\cos^2(\phi - \theta - \alpha)}{\cos(\theta) * \cos^2(\alpha) * \cos(\alpha + \delta + \theta) * \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\phi + \delta) * \text{sen}(\phi - \theta - i)}{\cos(\alpha + \delta + \theta) * \cos(i - \alpha)}} \right\}^2} \right] \quad (2.25)$$

$k_{a\text{estático}}$ está dado por la [fórmula 2.16](#).

$$\text{Con } \theta = \text{arctg} \left(\frac{k_h}{1 - k_v} \right) \quad (2.26)$$

Notas:

- 1) $k_{dinámico}$ fue calculado mediante el método de las cuñas de Coulomb.
- 2) $k_{a\text{estático}} = k_a$

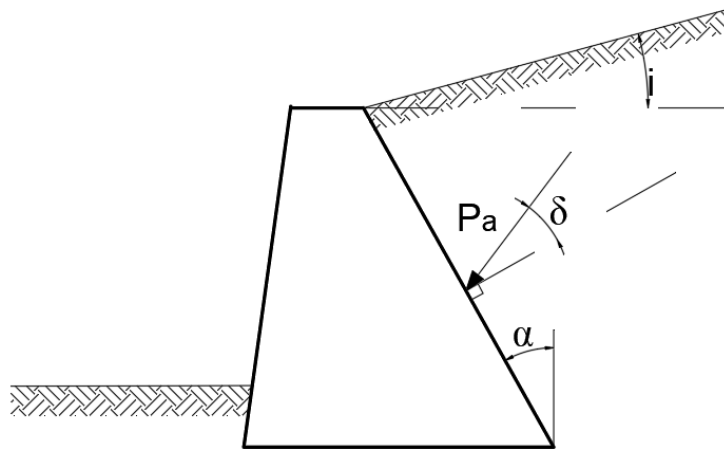


Figura 2-6 Ángulos en muro de contención con trasdós inclinado.

Los valores usuales de k_h y k_v

$$k_h = 0,16 \text{ a } 0,20$$

$$k_h = \frac{500 * e^{0,7025 * M}}{S^{1/4} * (R + 60)^{2,71}} \quad (2.27)$$

Donde:

M: Magnitud Richter del sismo.

S: Corrimiento lateral permitido al muro en centímetros (cm).

R: Distancia hipocentral al foco del sismo, en kilómetros (km).

Otra fórmula para k_h es (Ministerio de Obras Públicas, 2017):

$$k_h = \frac{1}{2} * A_0' \quad (2.28)$$

Con A_0' : Aceleración efectiva máxima del suelo.

$$A_0' = \frac{A_0}{g} \quad (2.29)$$

Los valores de A_0 son (Instituto Nacional de Normalización, 1996):

Zona Sísmica	A_0	A_0'
1	0,20 g	0,20
2	0,30 g	0,30
3	0,40 g	0,40

Figura 2-7 Tabla de valores de aceleración efectiva máxima A_0 y coeficiente de aceleración efectiva máxima A_0' .

De acuerdo a la zonificación sísmica de Chile, Valparaíso se encuentra tipificada como Zona Sísmica 3, por lo que $A_0 = 0,40 g$, según Nch 433 (Instituto Nacional de Normalización, 1996).

En Valparaíso, de la ecuación 2.28 y 2.29 se tiene que:

$$A_0' = \frac{0,40 g}{g} = 0,40$$

$$k_h = \frac{1}{2} * A_0' = 0,20$$

Por otro lado k_v se calcula:

$$k_v = \frac{2}{3} * k_h \quad (2.30)$$

O se utiliza usualmente: $k_v = 0$

El esfuerzo y el empuje para el caso sísmico son:

$$\Delta\sigma_{a_s} = \Delta k_s * \gamma * H \quad (2.31)$$

$$\Delta P_{a_s} = \frac{1}{2} * \Delta k_s * \gamma * H^2 \quad (2.32)$$

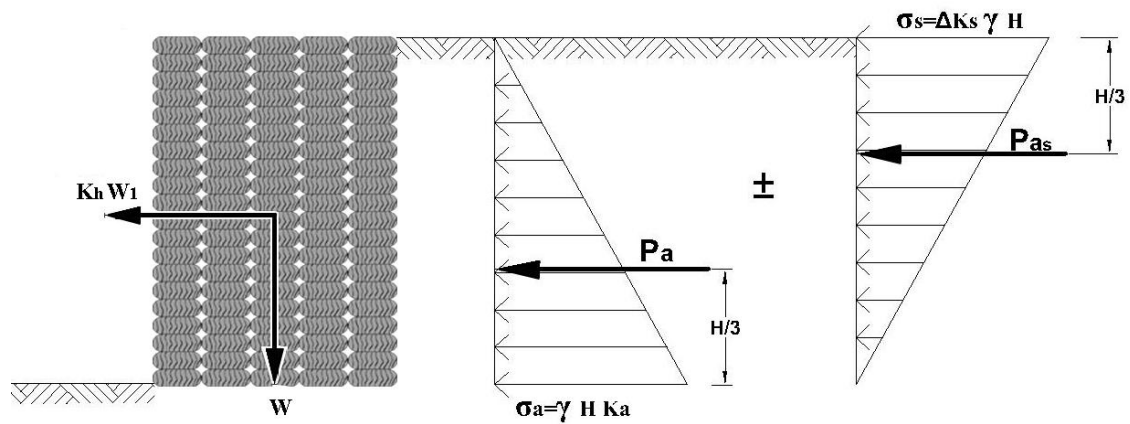


Figura 2-8 Diagrama de empuje incremento sísmico, considerando $k_v=0$.

2.2 ESTADO DEL ARTE

Dentro de la literatura relativa a muros de contención se pueden encontrar diversas clasificaciones, que hacen alusión a diferentes características, como por ejemplo su forma de construcción, la manera en que contrarrestan los empujes de la tierra, según su flexibilidad, su peso, entre otras. En los diversos textos relativos a la geotecnia se presentan algunas clasificaciones de los muros de contención, la cual ha ido cambiando con el avance tecnológico en la materia. A continuación se presentan algunas de estas categorías.

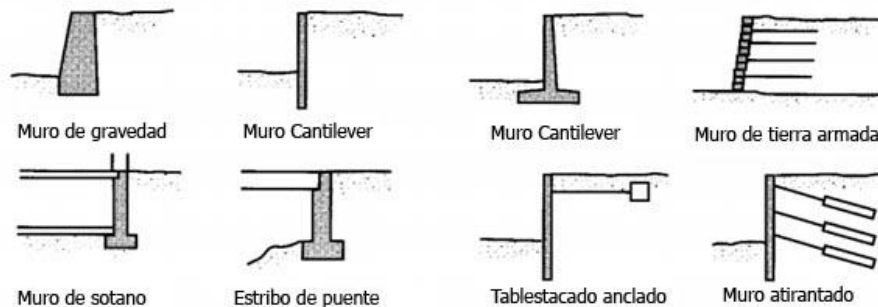


Figura 2-9 Tipos comunes de estructuras de contención de tierras. Fuente: (Kramer, 1996).

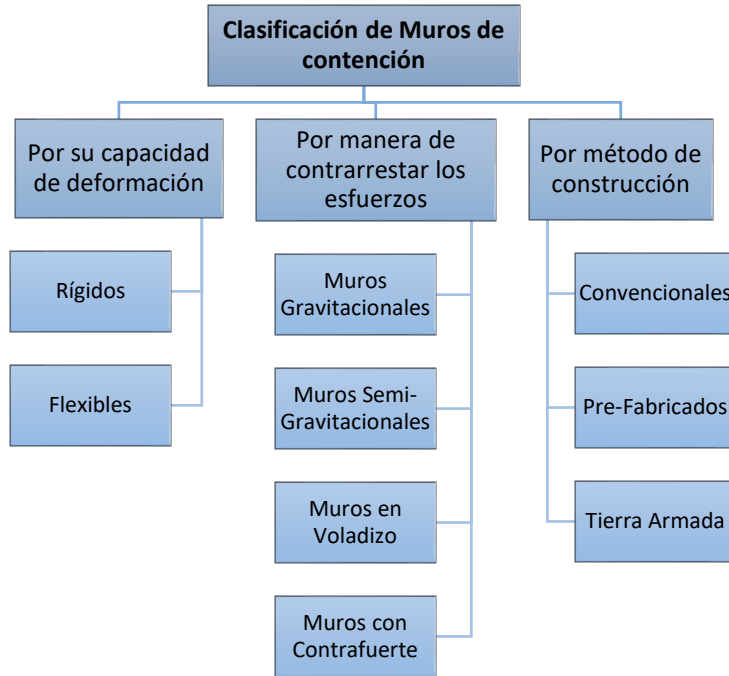


Figura 2-10 Clasificación de muros de contención.

2.2.1 Clasificación según su capacidad de deformación

Atendiendo a la capacidad de deformación de un muro de contención, se pueden clasificar en rígidos y flexibles. Los muros rígidos trabajan conteniendo los empujes laterales del suelo sin sufrir deformaciones por flexión que sean significativas, debido a esto el muro puede sufrir movimientos de giro y/o traslación. Por su parte, los muros flexibles son estructuras que están constituidas por elementos estructurales flexibles, sensibles a deformarse bajo cargas, siendo esta capacidad, la de soportar deformaciones importantes sin que se rompa la estructura, la que determinará su efectividad. Algunos ejemplos de estos son los muros de tablestacados de madera, de neumáticos, de gaviones y de cribas.

Respecto de los últimos mencionados, los muros de gaviones, son estructuras de contención hechas con contenedores de forma prismática o cestas de enrejado metálico, de malla hexagonal generalmente, rellenos con piedra de cantera o algún material similar que esté disponible cerca de la obra. Los muros de cribas, también llamados muros jaula, son estructuras de contención conformadas por una serie de celdas rellenas de material granular compactado. Estos son realizados con piezas prefabricadas de hormigón, a veces madera, que crean una red espacial rellena de suelo. Frente a los muros de hormigón, este tipo de estructura necesita de una mayor base de apoyo.

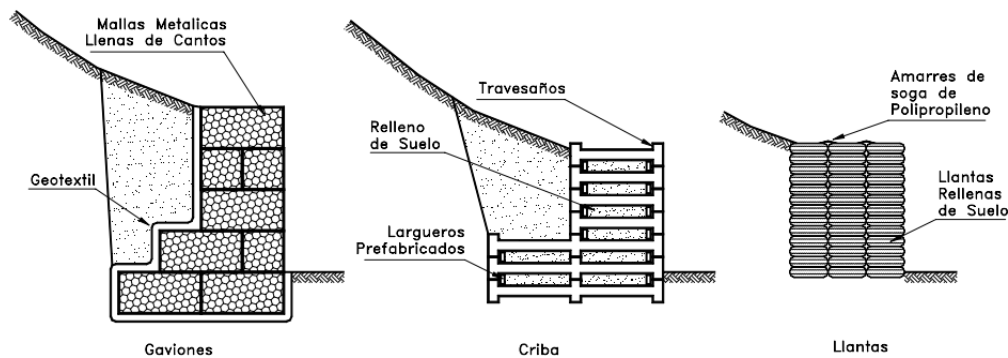


Figura 2-11 Esquema de algunos muros flexibles. Extraído de: (Suárez Díaz, 1998).

2.2.2 Clasificación según la forma de contrarrestar los esfuerzos

Atendiendo a la forma de contrarrestar los esfuerzos se distinguen los muros gravitacionales, los semi-gravitacionales, en voladizo y con contrafuertes.

Los muros gravitacionales son los que dependen principalmente de su propio peso y de su resistencia a la compresión para asegurar la estabilidad de la tierra a contener; generalmente son construidos con hormigón en masa, mampostería o gaviones (ver [figura 2-13 a](#)). Son muros de grandes dimensiones las que varían en función de los empujes que deben resistir y no necesitan refuerzos. Pueden presentar diferentes formas geométricas. En estos casos el peso del muro es importante ya que se opone al vuelco y da lugar a una resistencia al deslizamiento en la base. Este tipo de muros no es económico para grandes alturas (Braja M., 2001).

Un ejemplo de estos, son los muros de mampostería que pueden ser construidos con ladrillos, bloques de cemento prefabricados o con rocas (de menor tamaño que los de escollera), elementos que van unidos con o sin conglomerante. El conglomerante que une las unidades constituyentes de este tipo de muro puede ser la argamasa (a base de cal) o el mortero de cemento.

Otro ejemplo de este tipo de muros son los muros de escollera, los que están constituidos por bloques de piedras prismáticas y rugosas de grandes dimensiones, obtenidas generalmente por voladura. Según su función podemos encontrar de escollera vertida, utilizados en diques, rompeolas y en general obras marítimas y fluviales; los compactados usados en pedraplenes, presas y obras marítimas en general; y los colocados, usados en muros con fines de contención o sostenimiento, que son aquellos de interés en este caso.



Figura 2-12 Muros de mampostería y de escollera. Obtenidas de (de izq. a der.): (USM.cl, 2013); (Procedimientosconstruccion.blogs.upv.es, 2017)

Los muros semi-gravitacionales son muros de gravedad construidos con una pequeña cantidad de acero que permite una disminución en la sección del muro (ver [figura 2-13 b](#)).

Los muros en voladizo, también llamados aligerados (ver [figura 2-13 c](#)), son una variante de muros de gravedad hechos con hormigón armado con barras de fierro, con lo que se reduce su peso. Estos utilizan su propio peso más el peso de la tierra ubicada a trasdós y sobre el talón para generar el estado de equilibrio. Debido a su reducción en la dimensión de la base de apoyo, aumentan las presiones sobre el terreno, punto a tener en consideración si se cimienta en suelos de pobres características geotécnicas. Este tipo de muro es económico hasta una altura de 8 metros (Braja M., 2001).

Los muros con contrafuerte son una variación de los muros en voladizo y son utilizados cuando en estos se aumenta la altura, lo que evita aumentar las dimensiones del muro cantiléver (ver [figura 2-13 e](#)). Estos están constituidos por contrafuertes, elementos delgados de hormigón, espaciados a lo largo del muro que conectan el paramento vertical del muro con su losa, pueden estar ubicados a intradós o a trasdós y con forma geométrica triangular o en “L”. Su función es la de reducir los esfuerzos cortantes y el momento flector.

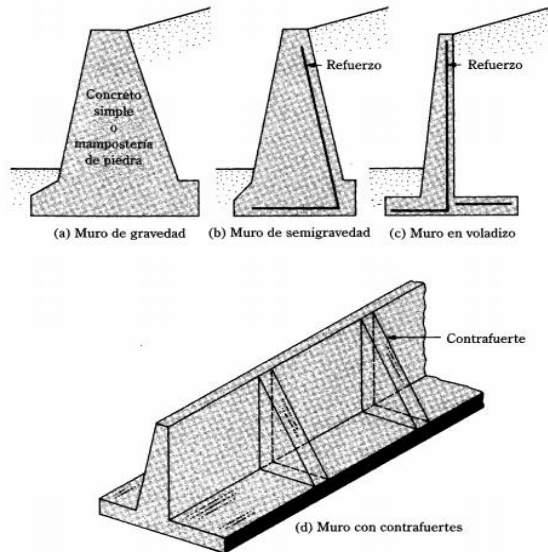


Figura 2-13 Tipos de muros de contención (Obtenido de Braja M., 2001).

2.2.3 Sistemas de tierra reforzada

Las estructuras de tierra reforzada, también conocidas como muros de “tierra estabilizada mecánicamente” (TEM), son estructuras ampliamente usadas en la geotecnia en diversas aplicaciones, entre las cuales cabe destacar fundaciones, terraplenes inclinados, pendientes naturales o generadas por corte y muros de contención. Están compuestas por capas de relleno compactado y de refuerzo, intercaladas hasta lograr la altura requerida. Los refuerzos deben ser capaces de resistir los esfuerzos de tensión, de flexión y de corte, según sea el caso.

Si bien este tipo de estructuras no es nueva, se puede decir que Henri Vidal es el padre de la tierra reforzada moderna, la cual patentó en la década del sesenta. Hoy en día se pueden encontrar una serie de materiales diferentes para distintos propósitos en ingeniería civil. Entre los materiales se pueden encontrar barras y tiras de acero, *geomallas*, geotextiles, anclajes, madera y neumáticos, los cuales son distribuidos de forma horizontal en el suelo.

Los elementos principales de estos sistemas son: los elementos de refuerzo, el material de relleno o suelo in-situ (el cual interactuará con el refuerzo), y el paramento frontal. El sistema puede ser caracterizado por la geometría del refuerzo y/o por materialidad, el mecanismo de transferencia de esfuerzos, la flexibilidad del refuerzo y el método constructivo. En cuanto al relleno in-situ, sus propiedades claramente afectarán al desempeño de la estructura. Suelos granulares son usualmente especificados para estructuras reforzadas convencionales a largo plazo con el fin de cumplir con las transferencias de esfuerzo, durabilidad y requerimientos de drenaje. Los elementos de paramento frontal son requeridos por estructuras verticales para: prevenir erosión de los suelos expuestos, permite compactación del suelo cerca del paramento, además son estéticos arquitectónicamente.

Las ventajas que se pueden encontrar en estos sistemas de refuerzo del suelo son: costo, confiabilidad, técnicas simples de construcción, flexibilidad para adaptarse a diferentes condiciones medioambientales, la habilidad para deformarse sin problemas, su estética, su capacidad de ser construidos en terrenos escarpados e inestables, permite construirse sobre fundaciones débiles, tolera asentamientos diferenciales, pero se requiere espacio disponible superior al de cualquier otra estructura de contención.

En cuanto al diseño, estos muros son considerados como muros de contención por gravedad. Se debe analizar su estabilidad general además de su estabilidad interior. Sísmicamente son elementos seguros. Son capaces de soportar grandes cargas estáticas y dinámicas.

Los principales elementos de refuerzo son con tiras, con mallas y con geotextil. Adicionales a estos se encuentra el refuerzo con neumáticos.

Las tiras de refuerzo son colocadas entre capas sucesivas de relleno compactado. Estos van conectados con los elementos de revestimiento, los que generalmente son prefabricados de paneles de hormigón o miembros de metal. Estos elementos le dan rigidez al terraplén. Las tiras metálicas son generalmente planas o nervadas. El uso de nervios o ranuras aumenta la fricción entre el suelo y el refuerzo. Uno de los problemas del uso de tiras metálicas es la corrosión, por lo que estos elementos deben ser protegidos contra la humedad. Cintas de plástico de poliamida o poliéster de alta resistencia han sido utilizadas para evitar problemas de corrosión en elementos metálicos. El material de relleno debe ser especificado en base a consideraciones geotécnicas y de durabilidad.

El refuerzo con mallas consiste en una estructura plana con elementos transversales y longitudinales que conforman una malla, la cual da una rigidez relativa al terraplén y las capas no conforman superficies de debilidad. Estas complementan la resistencia a la tensión del suelo. Las mallas pueden ser fabricadas con metal, acero galvanizado o con polímeros resistentes a tracción. También se conocen como *geomallas*.

Los geotextiles consisten en refuerzos hechos de fibras de poliéster o polipropileno las que pueden ser fabricadas de forma tejida o no tejida. El mecanismo de transferencia de esfuerzos funciona principalmente mediante la fricción generada entre el refuerzo y el suelo. La estructura de tierra reforzada es construida en capas sucesivas de refuerzo y suelo de relleno hasta alcanzar la altura deseada. El geotextil se envuelve alrededor del suelo expuesto en la cara para formar una unidad de revestimiento estable. El geotextil es susceptible a la luz solar, por lo que no debe quedar expuesto. El paramento frontal puede ser construido con elementos prefabricados de hormigón, gaviones, bloques modulares u otros elementos disponibles en el mercado para estos fines. Las capas de geotextil se unen a las unidades de revestimiento estructural mediante colada de hormigón, la fricción, anclaje, la superposición u otros procedimientos de conexión (O'Shaughnessy, 1997). Son muros económicos y fáciles de construir.

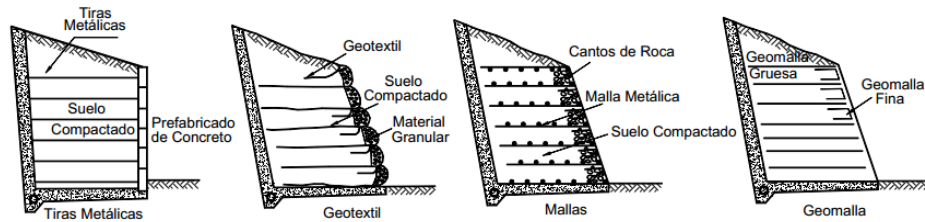


Figura 2-14 Tipos de refuerzo para muros TEM. Obtenida de: (Erosion.com, 2013).

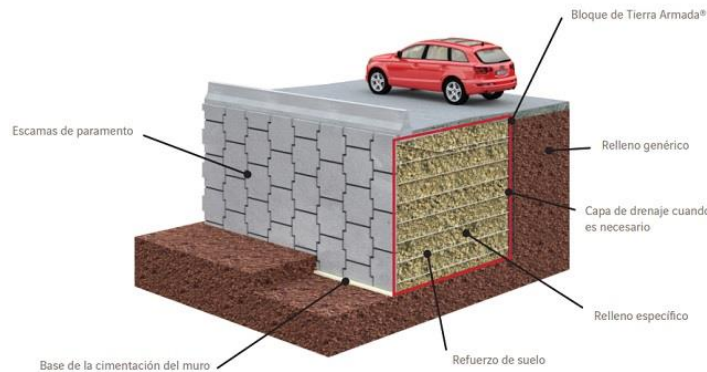


Figura 2-15 Elementos de un muro de Tierra Armada. Obtenida de (Tierra-armada.cl, s.f.)

Por último, cabe nombrar el sistema que consiste en la utilización de neumáticos desechados como elementos de refuerzo. Los neumáticos pueden ser utilizados completos o cortados, estos van unidos entre ellos formando capas horizontales continuas, las cuales se van superponiendo hasta formar el muro con las dimensiones con las cuales se diseñó. En los próximos capítulos se ahondará en este tipo de muros.

Además de los muros de contención mencionados existen otros tipos, los cuales no serán mencionados en esta memoria, debido a los alcances de esta.

3 EL NEUMÁTICO.

3.1 PROPIEDADES DEL NEUMÁTICO

El neumático es un elemento compuesto por caucho vulcanizado, el cual constituye casi la mitad de su peso; de rellenos reforzantes como el negro de humo, constituido por carbono el cual aumenta la tenacidad, la resistencia a la tracción, a la torsión y al desgaste; por fibras de refuerzo que son textiles y de acero, y le aportan resistencia al neumático; además de agentes vulcanizantes como el azufre, el cual mezclado con el caucho incrementa su viscosidad, dureza, propiedades de tensión, resistencia a la abrasión, entre otros. Existen neumáticos construidos diagonal y radialmente, siendo estos últimos los de más uso en la actualidad.

3.1.1 Elementos que constituyen el neumático

Los principales componentes de un neumático son:

- La banda de rodamiento: Es la cara que hace contacto con la superficie de desplazamiento, esta provee de tracción al neumático y adherencia a las superficies, además resiste la fricción y proporciona capacidad de frenado.
- Las paredes laterales: Van de la banda de rodadura hasta los talones, las que son revestidas por un compuesto de caucho de alta resistencia a la fatiga por flexión otorgándole flexibilidad al neumático.
- Capa de goma interna: También llamada *Innerliner*. Es el revestimiento protector de la estructura en la pared interna del neumático. Retiene el aire comprimido en el neumático. En el caso de la tierra reforzada con neumáticos, contiene el material de relleno.
- La tela de cuerpo: Son capas de cuerdas hiladas o trenzadas de fibra natural (algodón), sintética (nylon, seda sintética) y/o metálicas que se extienden de talón a talón. Son componentes de refuerzos y estructurales del neumático. Son las que tienen como funciones resistir la presión del aire, soportar la carga y aislar las irregularidades del camino.
- Los talones: También llamados pestañas, están formado por alambres de acero de alta tenacidad, y tienen como función anclar la tela de cuerpo y fijar el neumático a la llanta.
- Los cinturones estabilizadores: Están conformados por capas de tela de acero. Estos elementos le otorgan estabilidad a la banda de rodamiento y rigidez, además de mejorar el agarre y la tracción del neumático.

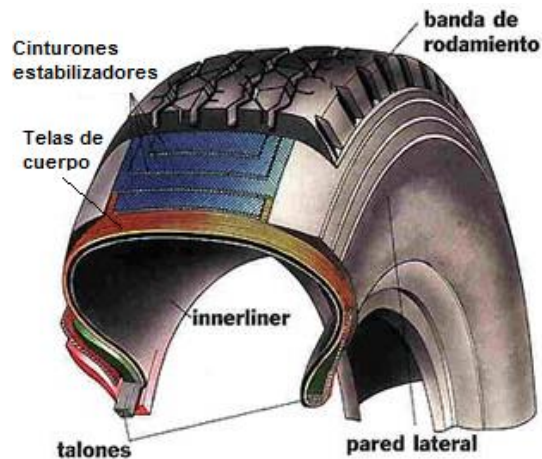


Figura 3-1 Componentes de un neumático. Extraído de <http://www.neumaticosmedica.com.ar/partes.html>

Aquellos neumáticos con la tela de cuerpo construida con seda sintética son muy fuertes; un cordón de solo unas cuantas décimas de milímetros de diámetro (0,6 a 0,8 mm) pueden lograr una resistencia a la tracción de 40,8 kgf (Long, 1990).

De todo esto se desprende que los neumáticos están fuertemente reforzados, lo que los hace un material atractivo para su uso en la ingeniería y en particular para la geotecnia, ya que constituyen un elemento de desecho de bajo o nulo costo, que permite mejorar las características de un suelo e incluso crear muros de contención.

3.1.2 Durabilidad del neumático

Según un estudio que se realizó sobre un neumático recuperado luego de 42 años de exposición a agua de mar a una profundidad de 24 metros, se encontró que el caucho no tuvo un serio deterioro (Ab-Malek and Stevenson, 1986). Experimentos mostraron que la máxima cantidad de agua adsorbida en este periodo fue de menos del 5% de la masa del neumático seco, sin tener efectos adversos en las propiedades de resistencia, observándose que las propiedades físicas del caucho resultaron ser tan buenas como las de un neumático nuevo de similares característica. En este ensayo no se observó corrosión de los elementos metálicos al interior del neumático. Esto por la delgada capa de caucho que lo cubre. Por este motivo se dice que los neumáticos no son susceptibles a la corrosión. Por otro lado, según Long en sus investigaciones respecto al tema, menciona que: “*de acuerdo a expertos, neumáticos que han sido enterrados en la tierra por más de 40 años han sido recuperados perfectamente intactos y sin el más ligero signo de deterioro*” (Long, 1990).

Las propiedades mecánicas de los neumáticos se pueden ver alteradas debido al envejecimiento físico-químico, radiación UV, deformación por fluencia lenta –también llamada *creep*- y daño causado durante la construcción, (O’Shaughnessy, 1997). Dentro de los principales factores que afectan a la durabilidad de los neumáticos, O’Shaughnessy identifica (O’Shaughnessy, 1997):

- a) **Radiación Ultra Violeta (UV)**: La radiación UV degrada al neumático.
- b) **Calor**: El secado del caucho resulta en agrietamiento. Este problema puede ser minimizado en los neumáticos enterrados, debido a que la temperatura, a mayor profundidad de una masa de tierra, podría variar menos.
- c) **Ozono**: El caucho es degradado por el ozono. Sin embargo, la concentración de ozono en el suelo es insignificante.
- d) **Acidez del suelo**: Acidez fuerte (pH ~ 1) destruiría el caucho. Este parámetro podría ser importante si materiales de desecho son usados como relleno, tales como desechos industriales o residuos ácidos de minería.
- e) **Daño por construcción**: Los neumáticos son capaces de soportar altos niveles de esfuerzos impuestos durante la compactación, por ser capaces de deformarse en la misma medida que el suelo circundante, no obstante la compactación no debe ser excesiva. Si los neumáticos son atados unos juntos a otros para formar capas horizontales, los elementos de interconexión tales como barras de acero, cuerdas y correas de polyester podrían estar sujetos a mayores daños por construcción que los neumáticos circundantes. La cantidad de daño podría ser una función de la resistencia a la tracción y la flexibilidad del material de conexión. Si cuerdas son unidas mediante un nudo, se puede deshacer por el paso de vehículos de construcción pesados.

Los neumáticos tejidos de algodón se pudrirán, pero los tejidos de rayón (seda artificial) y nylon son muy resistentes a cualquier forma de ataque. El acero de alta resistencia a la tracción en las pestañas y los cinturones estabilizadores del neumático están bien protegido por la capa de caucho que los reviste. Por lo tanto, incluso neumáticos desgastados representan un material de refuerzo de muy alta calidad el que es muy resistente a la corrosión y al deterioro.

3.1.3 Resistencia al fuego



Figura 3-2 Muro de neumáticos quemado luego del gran incendio de Valparaíso del año 2014. Foto modificada de la fuente: (Ventana-verde.blogspot.cl, 2014).

La quema de los neumáticos constituyentes de la estructura de tierra reforzada, que se puede apreciar en la fotografía, da cuenta de que la ignición se produjo en los neumáticos expuestos. Esto gracias a la tierra presente en la estructura. Para reforzar esta idea, O'Shaughnessy (O'Shaughnessy, 1997) en la página 30, cita al WYCC (West Yorkshire County Council) que en 1977 estudió los efectos del fuego en estructuras hechas con neumáticos desechados, rellenos con tierra no compactada. La estructura fue de 1 m de altura y circular. Según se informó, los intentos de incendiar los neumáticos no fueron fáciles. De hecho, para incendiar la estructura, la fuente de fuego debió ser continua e intensa y la combustión solo afectó a los neumáticos expuestos y no penetró en el relleno.

3.1.4 Resistencia a la tracción

En 1990 en Francia se realizó un estudio sobre los neumáticos desechados y su uso en la construcción que lleva por título “El *pneusol*: estudios e investigaciones” realizado por N.T. Long. En este estudio se han realizado pruebas mecánicas sobre partes del neumático en una prensa, obteniéndose los siguientes resultados (Long, 1990):

- Banda de rodamiento: La resistencia a la tracción promedio es de 5710 kgf, con una desviación estándar de 2447 kgf, con una probabilidad de que el esfuerzo de tracción de todas las bandas de rodamiento exceda 2651 kgf del 90%; aquellos que exceden 3671 kgf solo son el 80%;

- Bandas laterales: prácticamente no existe diferencia entre las dos bandas laterales que componen un neumático. El rango de la resistencia va de los 1733 kgf para los menos reforzados hasta un promedio de 2549 kgf para los más reforzados, con una media de 2549 kgf y una desviación estándar de 1020 kgf.

Un estudio más actual realizado por Huat, Aziz y Loh en el año 2008, revela que el esfuerzo a la tracción promedio de la banda de rodadura fue de 5710 kgf, con una desviación standard de 1530 kgf. Mediante un análisis de probabilidad se determinó que la banda de rodadura de un neumático fuera de uso ofrece una resistencia a la tracción mayor a 2039 kgf con un 99,08% de probabilidad. Con respecto al módulo elástico máximo, varió desde 19.669,81 kgf/cm^2 a 37.952,81 kgf/cm^2 (Huat, Aziz & Loh, 2008).

Se observa que los valores de resistencia a la tracción obtenidos tanto por Long como por Huat, Aziz y Loh se encuentran dentro de rangos similares.

3.1.5 Resistencia a la extracción

Otro ensayo realizado en investigaciones sobre el uso de neumáticos como refuerzo de suelos, cuyos resultados son importantes de conocer, es el de la resistencia a la extracción (en inglés *pullout resistance*). Este ensayo consiste en pruebas a escala real en las que se aplican cargas horizontales a mallas de neumáticos embebidas en material de relleno, intentando arrancarlos desde el interior. En el *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* se realizaron ensayos de resistencia al arranque sobre diferentes partes del neumático, algunos dispuestos de diversas formas, tales como: banda de rodadura sobre su borde, banda de rodadura plana (cortada y estirada) y cara lateral bajo de 1 metro de profundidad de sobrecarga (Long, 1990). Ver [figura 3-3](#). Los resultados de este ensayo se presentan en el [anexo B](#). Se puede apreciar que para un elemento de banda de rodadura, tanto plana como sobre su borde, la fuerza máxima fue cercana a los 3059 kgf con un desplazamiento frontal de 120 y 170 milímetros respectivamente, mientras que para un elemento de banda lateral, disminuyó a aproximadamente 2039 kgf con un desplazamiento frontal de 70 milímetros. Se puede apreciar que el mayor desplazamiento ocurrió en la banda de rodadura sobre su borde.



Figura 3-3 Partes del neumático ensayadas.

La resistencia a la extracción de los neumáticos varía en función de: la fricción en la interfaz suelo-neumático; resistencia pasiva del suelo contra cualquier elemento frontal; la

fricción suelo-suelo en el anillo a lo largo de las dos superficies de corte horizontales. La capacidad última a la extracción de una malla de neumáticos de refuerzo es predominantemente gobernada por el ángulo interno efectivo de fricción del suelo (O'Shaughnessy, 1997).

En ensayos realizados en Brasil por Gerscovich y compañía, se concluyó que en los ensayos de extracción la respuesta varió según el número de neumáticos. Para una mayor cantidad de neumáticos resultó en mayores cargas de extracción proporcionalmente. Además, en cuanto a los resultados de este ensayo, los investigadores concluyeron que pese a la cantidad limitada de neumáticos, los resultados sugieren un valor mínimo de resistencia de 408 kgf por neumático / altura de sobrecarga (m); y 0,12 (m) de desplazamiento frontal máximo, por cada fila transversal de neumáticos (Gerscovich et al., 2004).

La configuración de la malla de neumáticos influye en la resistencia a la extracción. Para mallas lineales de neumáticos con una fila simple y transversal a la dirección de la carga aplicada se producen mayores resistencias al arranque que aquellas obtenidas con una configuración lineal de neumáticos dispuesta en la dirección de la fuerza aplicada. Para un solo neumático las resistencias fueron sistemáticamente mayores que las medidas en mallas de neumáticos. *“Este comportamiento puede ser atribuido a la existencia de una fuerte influencia del confinamiento lateral en un arreglo simple de neumáticos. Además, arreglos con más de un neumático presentan vacíos entre neumáticos, los cuales son difíciles de rellenar con suelo compactado. Esto puede resultar en una más floja y menor resistencia del material suelo-neumático”* según citan Gerscovich, Medeiros, & Sayão en la página 3 en (Gerscovich, Medeiros, & Sayão, 2001).

En los ensayos y estudios realizados por Gerscovich, Medeiros, y Sayão (Gerscovich, Medeiros, & Sayão, 2001), se presentan fórmulas para calcular la resistencia a la extracción en función del área de contacto movilizada, el esfuerzo vertical efectivo y el ángulo de fricción, entre otras fórmulas que pretenden describir el comportamiento al arranque de la capa de neumáticos. Adicionalmente ensayaron mallas con arreglos de 4x3x4 neumáticos rellenos con una mezcla de suelo-cemento (10% en peso) o una placa de hormigón no reforzada, bajo sobrecarga de suelo con altura de 1,5 metros. Los resultados fueron comparados con el caso original, en el que se rellenan los neumáticos con suelo compactado. Para los neumáticos rellenos con suelo-cemento se observó una reducción de un 8,5% del desplazamiento frontal correspondiente. Para el caso de los neumáticos rellenos con una placa de hormigón sin reforzar se obtuvo un comportamiento más rígido en la malla de neumáticos y se redujo en un 37% el desplazamiento frontal en la falla.

3.2 REVALORIZACIÓN DE LOS NEUMÁTICOS FUERA DE USO

La revalorización es el proceso de dar un nuevo valor a un material luego de terminada su vida útil, en las diversas formas y usos que la ingeniería pueda concebir. Los neumáticos desechados son elementos con características atractivas y que proveen de diversas ventajas prácticas a la ingeniería civil. Son livianos, alta absorción frente a la vibración, alta compresibilidad elástica, alta conductividad hidráulica, y potencial aislamiento térmico

(Scrap tire derived geomaterials. Opportunities and challenges, 2007). Esto sumado a sus buenas características mecánicas de flexión, compresión, tracción radial y resistencia al corte.

Existen tres alternativas para seguir siendo utilizados: la reutilización, valorización material y valorización energética. La reutilización es conocida como recauchado y consiste en revestir al neumático con una nueva superficie de rodadura, siempre que esté en buen estado. La valorización material permite la recuperación del neumático entero, o por alguna de sus partes constituyentes (caucho, metal y fibra). Entre los materiales que se revalorizan están el negro de humo, polvo y granulado de neumático. Y por último está la valorización energética, gracias al alto poder calorífico del neumático. Este es utilizado como combustible de sustitución en procesos industriales, ampliamente usado en las cementeras, y también en centrales térmicas y calderas industriales.

3.2.1 Algunas aplicaciones relacionadas a la construcción

Durante las últimas décadas los neumáticos desechados han sido objeto de estudios para sus diversas aplicaciones en el campo de la ingeniería. Sus propiedades y su bajo costo convierten a estos materiales en objeto de interés.

En Japón durante el año 2007, se llevó a cabo el primer foro internacional en el que se generó la instancia para el intercambio de conocimientos y experiencias, mediante la presentación sobre experimentos, modelación numérica, diseño y aplicaciones prácticas relacionadas a los *geomateriales* derivados de los neumáticos desechados. Este foro ha sido presentado en el libro “*Scrap Tire Derived Geomaterials – Opportunities and Challenges*” de los editores Hazarik & Yasuhara, en donde se presentan estudios que van desde: uso de los neumáticos completos, triturados en pequeñas partes (chips) como material de relleno ligero, aplicaciones de drenaje; chips de neumáticos mezclados con suelos y/o materiales tratados, como es el caso de arcillas tratadas con cemento; propiedades mecánicas y modelación; evaluación e impacto medio ambiental; hasta conceptos nuevos, casos de estudio y aplicaciones de campo (Scrap tire derived geomaterials. Opportunities and challenges, 2007). A continuación se presentan algunas de las aplicaciones que podemos encontrar en este libro y otras interesantes de mencionar.

3.2.1.1 Neumático Triturado.

3.2.1.1.1 Relleno ligero.

Son usados como relleno ligero para construcción de terraplenes. Son utilizados en casos de inestabilidad de laderas o deslizamientos de tierra, que pueden ser causados por fundaciones débiles. También en casos de asentamiento excesivo causado por el peso del terraplén (Humphrey, 2011). También son utilizados en estructuras o tuberías bajo tierra, para limitar la carga sobre el elemento gracias a su capacidad de deformación. Estudios sobre esta aplicación se pueden encontrar en (Long, 1990).

3.2.1.1.2 Material de relleno para muros de contención y estribos de puentes.

Para el caso de muros convencionales, los neumáticos triturados ayudan a reducir: la presión sobre el muro y el asentamiento si el muro es fundado sobre suelo comprimible. La presión reducida se traduce en un muro más barato y menores asentamientos se traducen en menor agrietamiento del muro (Humphrey, 2011).

3.2.1.1.3 Aislante acústico en viviendas

Investigadores del Instituto de Tecnología de Materiales en el campus de Alcoy de la Universitat Politècnica de Valencia (UPV), han desarrollado este producto en base a neumáticos desechados triturados. Este material permite el aislamiento acústico y vibracional de paredes suelos y techos. Está constituido por partículas de caucho, fibras metálicas y textiles, creando así un producto en el que el elastómero absorbe las vibraciones y la parte fibrosa absorbe acústicamente (Tnu.es, s.f.).

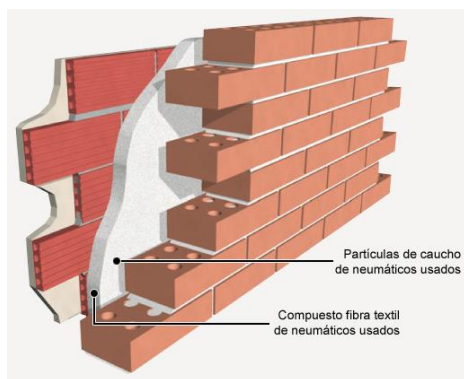


Figura 3-4 Aislante acústico. Extraído de: (Tnu.es, s.f.)

3.2.1.2 Neumáticos embalados (*Tire Bales*).

Consisten en la compactación de entre 100 y 125 neumáticos mediante maquinaria, formando una unidad prismática modular llamada “*tire bale*”, “*neumáticos embalados*” -en una traducción aproximada- o también “*llantiones*” de peso aproximado de 1 tonelada. Por su peso y características son utilizados en la construcción de estructuras de contención y presas, de manera similar a la de muros de contención de gaviones. Según su función se pueden utilizar como barreras acústicas, en la contención de taludes, como fundaciones para caminos sobre suelo blando, entre otras funciones.



Figura 3-5 Protección contra inundaciones y protección costera. Extraído de: (Tirecgroup.co.uk , 2011)

3.2.1.3 Adición de neumáticos triturados en carreteras de asfalto.

El polvo de neumático es utilizado en mezclas de asfaltos, para mejorar las características de este. Según Xavier Elías Castellás (Elías Castellás, 2000), las características del asfalto mezclado con polvo de neumático, en comparación a uno convencional, son:

- *“Mayor resistencia mecánica (del orden del 70%)*
- *Reducción del nivel del ruido del tráfico, en un 60%*
- *Disminución del desgaste de los neumáticos hasta en un 25%*
- *Mayor durabilidad del firme, hasta el doble*
- *Mejora de las propiedades antideslizantes*
- *Más compacidad o menor fragilidad al agrietado provocado por las diferencias de temperatura ambiente, lo que reduce la partida de mantenimiento*
- *Mejora de la impermeabilización de la superficie pavimentada, evitando la penetración del agua, lo que suele acarrear consecuencias nefastas en las épocas del año en las que el agua infiltrada, al helarse, aumenta de volumen*
- *Mayor flexibilidad con lo que estos pavimentos soportan mejor los esfuerzos mecánicos a que se ven sometidos”*

Estas ventajas técnicas se ven contrastadas con las limitaciones de índole económica debido al coste de la preparación del polvo de neumático.

3.2.1.4 Eartships

Las *Eartships* o “nave tierra” son construcciones cuyo diseño fue creado por el arquitecto Michael Reynolds, y estas aprovechan materiales reciclados como materia prima, como botellas, latas, y neumáticos desechados, entre otros materiales. El diseño de este tipo de construcciones incluye sistemas de captación de aguas lluvia, tratamiento de residuos,

diseño solar pasivo y *bioclimatización*, entre otras técnicas ecológicas (Comuntierra.org, s.f.).



Figura 3-6 Neumáticos usados en earthships. Obtenidas de (de izq. a der.): (Low-tech magazine, 2007); (Simonaitis, P., 2014).

3.2.1.5 Partes de neumáticos como refuerzo de suelos.

Los componentes que conforman a los neumáticos también son utilizados para la formación de refuerzos para el suelo. Las componentes utilizadas son las bandas laterales y las bandas de rodamiento. Estos elementos son utilizados para conformar mallas horizontales planas o de 3 dimensiones. Yeo Won Yoon de la universidad Inha, de Incheon, Corea, estudió estas formas de refuerzos para suelos. Este trabajo titulado “*Engineering characteristics of tire treads for soil reinforcement*” es presentado en el libro *Scrap tire derived geomaterials. Opportunities and challenges*, donde se muestran una serie de ensayos realizados sobre estas como ensayos de tracción, de extracción y resistencia de la unión de estas mallas con pernos. Yeo Won Yoon concluye que estas *geogridas* y *geoceldas* hechas con material reciclado son excelentes refuerzos para suelos.

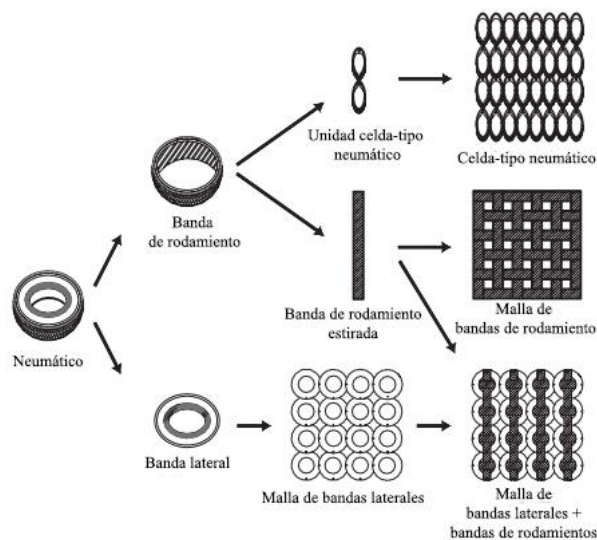


Figura 3-7 Proceso de combinación para formar materiales de refuerzos de tres tipos. Modificado de *Scrap tire derived geomaterials. Opportunities and challenges*, 2007.

En México, la empresa *Yantek* se dedica a la construcción de muros de contención con neumáticos modificados. En este sistema, el neumático es separado en ambas caras laterales y en la banda de rodadura, a través de la utilización de máquinas cortadoras. La banda de rodadura es girada hacia adentro, dejando su cara interior hacia afuera y es engrapada en el centro. A esta unidad se le llama *ocho* por su forma. La unión de varios “ochos” forman un “tapete”, los cuales van en la parte del frente rellenos con tierra compactada y en la parte de atrás van las caras laterales de los neumáticos. Una hilada se desfasa aproximadamente unos 5 centímetros, lo que genera una inclinación en la cara frontal del sistema de unos 70°. En el espacio que queda en los 5 centímetros se deja un nicho, que puede ser utilizado como maceta para el sembrado de plantas adecuadas para el sistema. Al usarse las dos caras y la banda de rodadura, el sistema no genera desperdicios. Los materiales constituyentes de este método son caucho, acero, nylon, entre otros. Estos son muros que trabajan por gravedad. Son pesados, flexibles y drenantes. Son de base grande, la que constituye el 60% de la altura del muro. Los muros son anclados al talud y al terreno. (Omar de la Rosa, 2014). Ver [anexo C](#).

4 MUROS DE CONTENCIÓN CON NEUMÁTICOS DESECHADOS

El neumático es un material con propiedades interesantes tanto para la geotecnia, y para la ingeniería en general, gracias a su alta resistencia a la rotura y su capacidad de deformación controlada (Long, 1990). Su geometría permite que el vacío dejado por la cámara de aire sea relleno con suelo o material seleccionado, creando un conjunto con resistencia a la tracción y al corte, mejorando las propiedades mecánicas del suelo. Puede ser utilizado en su totalidad o por sus partes separadas, las cuales son: dos caras laterales y una banda de rodadura. Estos pueden ser utilizados de diferentes formas al momento de construir un muro de contención: desde la construcción de un muro con neumáticos el cual es anclado con neumáticos en el interior del relleno mediante tirantes (ver [figura 4-1](#)); un muro de tierra estabilizada mecánicamente (TEM) con neumáticos como elemento de refuerzo; o muros con neumáticos armados con conectores a cortante. En este capítulo se analizarán las dos últimas técnicas mencionadas.

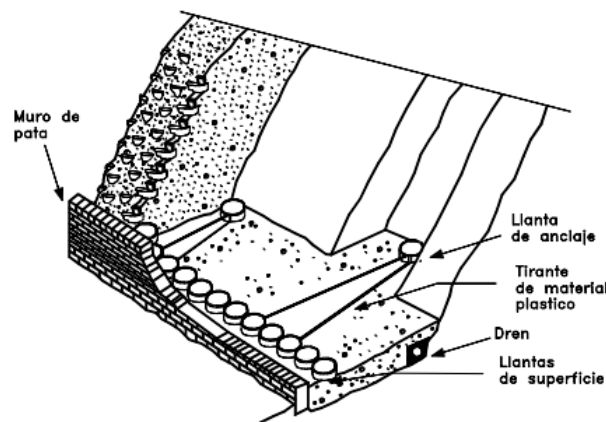


Figura 4-1 Muro armado con neumáticos usados, con neumáticos con tirantes como elemento de anclaje. Extraído de: (Suárez Díaz, 1998).

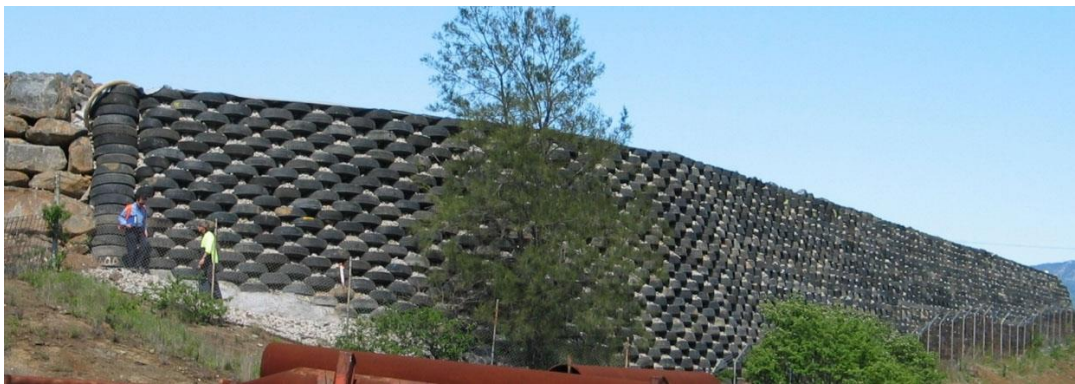


Figura 4-2 Muro de contención con NFU de la empresa Ecoflex internacional. Obtenido de (Ecoflex, s.f.)

4.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.

El sistema consiste en la utilización del conjunto suelo-neumático como unidad constructiva. Estas unidades en conjunto con otras, son atadas entre ellas y dispuestas horizontalmente en arreglos al tresbolillo o en otro tipo de arreglo, formando mallas de neumáticos. La colocación de mallas sucesivas, unas sobre otras, hasta alcanzar la altura y geometría deseada conforma el muro de contención. Un correcto diseño permitiría que el muro actúe de manera homogénea. Esta es una técnica sencilla que no requiere de personal calificado, por lo que la operación de ensamblaje debe ser simple tecnológicamente, y viable económicamente (Long, 1990).

Los muros de contención hechos con neumáticos desechados son muros de tipo gravitatorios, por lo que la resistencia al empuje lateral de la tierra, y su estabilidad externa frente al volcamiento y al deslizamiento, es en función del peso propio del muro. Además se comportan como muros flexibles lo que permite que este tipo de muros puedan soportar grandes asentamientos diferenciales. La flexibilidad también se expresa en desplazamientos horizontales mayores frente a sistemas tradicionales, lo cual permite una relajación de esfuerzos, y su flexibilidad ayuda a la acción mecánica de transferencia de carga (Gerscovich et al., 2004). Se esperan deformaciones de $\frac{1}{500} H$ a $\frac{1}{250} H$. Por ejemplo, para alturas de muro de 5 metros, se esperan deformaciones de 1 a 2 centímetros. Por otro lado, la disposición de las mallas de neumáticos en niveles también proporciona una mejora en la distribución de los esfuerzos en la masa de suelo reforzado y sobre las fundaciones (Long, 1990).

El neumático puede ser utilizado en su totalidad o con una de sus caras laterales cortadas, de manera tal que la extracción de esta superficie facilite la compactación del material de relleno. El uso de neumáticos con una banda lateral removida produce un muro de mayor peso específico y menor compresibilidad. Es de particular importancia cortar una banda lateral del neumático en el caso de utilizar material de relleno arcilloso (Medeiros et al, 1999). Además, en estudios en los que se han construido muros de contención con neumáticos cortados, se ha observado que la eliminación de una banda lateral acelera el proceso de construcción. Esto debido a la mayor facilidad para rellenar los neumáticos con suelo (Sieira et al., 2001). En cuanto al corte de la cara lateral, durante el desarrollo de los ensayos de esta memoria fueron cortadas bandas laterales de neumáticos mediante la utilización de un cuchillo cartonero, en poco tiempo y sin mayores dificultades.

En la literatura y estudios sobre este tipo de muro, se trata a este sistema de contención como un sistema de suelo reforzado. En contraste con los sistemas de suelo reforzado en los que la fricción entre el suelo y el refuerzo es el parámetro clave para el buen desempeño, la movilización directa de la fricción suelo a suelo hace posible que se puedan utilizar suelos residuales de baja calidad, porque ensayos han demostrado que la fricción entre el suelo y el refuerzo es inalterablemente menor que la fricción interna (Long, 1990). En investigaciones sobre este sistema se ha encontrado que la resistencia al corte de las mallas de refuerzo de neumáticos está predominantemente gobernada por el esfuerzo de corte del relleno usado,

por lo que el material de relleno usado debe ser capaz de transferir esfuerzos a los neumáticos de refuerzo (O'Shaughnessy, 1997).

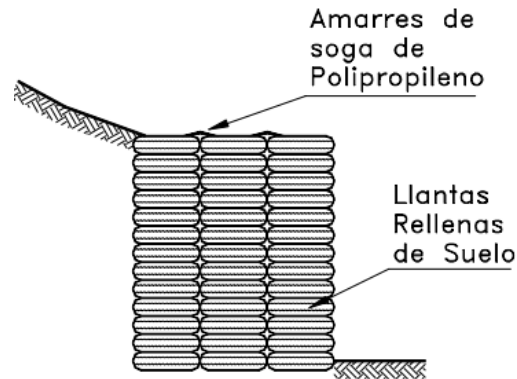


Figura 4-3 Muro de contención con neumáticos. Extraído de: (Suárez Díaz, 1998).

4.1.1.1 Conexiones, uniones

Las conexiones son sin duda parte importante en este tipo de muro, ya que provee la unión entre los elementos adyacentes, para conformar mallas de neumáticos de tal manera de permitirle al muro comportarse como unidad, si posee un correcto diseño. El uso de un sistema de unión con apriete restrictivo, para los neumáticos de una misma capa, facilita esto (Gerscovich et al., 2004).

Es importante conocer los parámetros de resistencia de los materiales usados para unir. En cuanto a la resistencia mecánica es importante conocer el límite elástico, el módulo elástico y el esfuerzo a la tracción permitido a largo plazo de la unión. También es importante conocer su resistencia y comportamiento frente a agentes químicos y biológicos, entre otros. Esto es, si la unión es metálica, estas son susceptibles a corrosión, y el material sufrirá una pérdida de resistencia a la tracción asociada, la cual puede ser contrarrestada incrementando su sección transversal. Las uniones de naturaleza orgánica pueden sufrir pudrición debido a la humedad y presencia biológica. Los materiales poliméricos son afectados por fluencia, temperatura, envejecimiento y esfuerzo confinado.

Por otro lado, el material de las uniones debe ser de fácil colocación y de bajo costo o sin costo alguno si es posible, como puede ser en los casos de materiales desechados, esto para mantener el sistema en general de bajo costo y simple tecnológicamente.

En la literatura estudiada, los elementos más utilizados como uniones son las cuerdas de polipropileno, alambre galvanizado y cables metálicos revestidos con plástico. Se debe cuidar que los elementos metálicos sean colocados solo en suelos que sean a lo más medianamente corrosivos, es decir con *resistividad* entre 2000 – 5000 Ohm/cm (O'Shaughnessy, 1997).

Características importantes de cualquier unión son (O'Shaughnessy, 1997):

- Deben satisfacer un mínimo requerimiento de esfuerzos;
- El área de contacto de la unión debe ser lo suficientemente ancha para prevenir perforación del caucho;
- Ser durable; debe ser compatible con la vida de servicio de la estructura;
- Debe ser económico (otro material de desecho sería ideal).
- Debe ser medioambientalmente aceptable.

Según ensayos llevados a cabo por O'Shaughnessy (O'Shaughnessy, 1997) se concluyó que el nudo que mejor funcionó, manteniendo la simplicidad del sistema, para cuerdas de polipropileno de 9,4 milímetros fue el nudo cuadrado (ver [figura 4-4](#)). También se observó que aumentando el número de vueltas de la cuerda alrededor del neumático aumenta la resistencia de la unión. Mediante ensayos se obtuvieron curvas de esfuerzo-deformación en relación con el número de vueltas de la cuerda, en donde determinaron que el módulo elástico para una vuelta simple de cuerda fue de 2447 kgf/cm^2 y 3263 kgf/cm^2 para dos vueltas. La carga de rotura por tracción varió desde 1213 kgf para una vuelta simple a 2998 kgf para tres vueltas. Además se observó que la resistencia a la tracción por longitud de cuerda estimada para dos vueltas disminuye con el número de vueltas desde los 612 a 510 kgf por longitud de cuerda. Esto es debido a una inesperada distribución de esfuerzos, ya que cada cuerda no lleva la misma carga, por lo que la carga de rotura por tracción no es directamente proporcional al número de vueltas, basado en un elemento continuo de una sola cuerda. Este comportamiento debe ser considerado al momento de diseñar, y establecer una carga de tracción permitida sobre la unión. Asimismo se identificó que la unión representa la parte más débil en la construcción de una malla de neumáticos ya que la carga de rotura por tracción de neumáticos excederá 2651 kgf en el 90% de los casos. Es por esto que una falla de la unión significaría una repentina pérdida de resistencia, lo cual podría tener serias consecuencias. Esto debido a que la mejora en la resistencia al corte es directamente proporcional a la máxima fuerza generada dentro de la malla de refuerzo de neumáticos. Ante este modo de falla se debe emplear un factor de seguridad. Por otro lado un mecanismo de falla deseable sería la pérdida de adherencia entre el suelo y la malla de neumáticos, caso en el que una distribución de esfuerzos de corte es posible si existe una falla de este tipo de la estructura. Con respecto a las deformaciones durante la falla, variaron desde 21% a 26% y variaron según el número de vueltas. En cuanto a la rigidez de la unión, esta influenciará la deformabilidad de la estructura. Un esquema de unión dando dos o tres vueltas alrededor del neumático podría incrementar de forma moderada la rigidez del sistema de refuerzo.

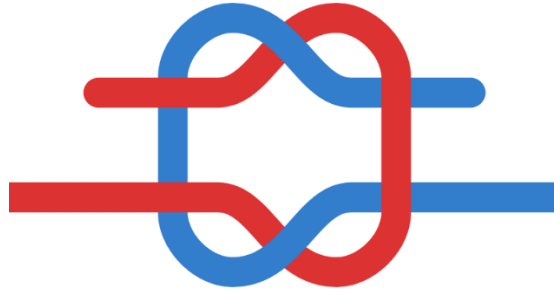


Figura 4-4 Nudo cuadrado. Obtenido de: (Wikipedia, 2017)

Por otro lado, estudios realizados en la Universidad de Putra en Malasia por Huat, Aziz y Loh (Huat, Aziz & Loh, 2008) muestran los resultados obtenidos de ensayos de tracción sobre uniones de cuerda de polipropileno de 12 mm de diámetro, cable de acero de 12 mm de diámetro más U-clip de tamaño acorde. En cuanto a los resultados el cable de acero resistió una carga de trabajo de 2549 kgf pero la unión, que corresponde al cable de acero unido con U-clip solo soportó 1530 kgf. Por otro lado, la cuerda de polipropileno volvió a tener buenos resultados. Una cuerda de 12 mm de diámetro pudo soportar cargas sobre los 5302 kgf (ver [figura 4-5](#)). Estos resultados llevaron a la conclusión de los autores de considerar a las cuerdas de polipropileno como el sistema de unión más adecuado para unir los neumáticos desechados en una configuración de mallas. La resistencia del material fue superior; es flexible; barato; resistente a agentes químicos, ataques biológicos y no se corroe (Huat, Aziz & Loh, 2008).

Muestra N°	Diámetro cuerda (mm)	N° de vueltas	N° de nudos	Resistencia Máx. (kgf)
1	12	1	1	1.224
2	12	1	2	2.345
3	12	2	2	5.302

Figura 4-5 Tabla: Resistencia a la tracción cuerda de unión de polipropileno. Modificado de (Huat, Aziz & Loh, 2008).

En Brasil, en la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro en conjunto con la Universidad del Estado de Río de Janeiro, Sieira, Sayão, Medeiros, y Gerscovich, llevaron a cabo un estudio llamado “Estabilización de Taludes con Muros de Neumáticos” (Sieira et al., 2001) en donde, entre otros elementos componentes de un muro, analizaron las uniones en este tipo de estructuras, ensayando cuerdas de polipropileno y alambres galvanizados (de gavión). Esto lo hicieron mediante la construcción de muros de contención con neumáticos con distintas configuraciones. En cuanto a los desplazamientos horizontales, para la sección de muro construida con cuerdas de polipropileno fueron mayores en un 20%. Sin embargo, el costo del alambre es mayor al de la cuerda, pero su utilización facilita y acelera el proceso constructivo. La cuerda es la alternativa más económica. El módulo de elasticidad que se logró con el alambre fue de $E = 31 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$. El módulo de elasticidad logrado con la cuerda

de polipropileno fue de $E = 25 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$. La unión con alambre galvanizado proporciona un ligero aumento de la rigidez del material compuesto suelo-neumático (Sieira et al., 2001).

4.1.1.2 Cara frontal

La exposición de las caras de un muro de contención con neumáticos es un punto importante a considerar para aumentar la vida útil de estos elementos y protegerlos de la erosión y del deterioro. El fuego y la radiación UV pueden afectar la integridad de la estructura.

Es importante que el paramento sea flexible para preservar la flexibilidad de la estructura de neumáticos. Se recomienda que sea proveído después de la construcción de la estructura, de preferencia cuando la mayor deformación haya ocurrido (O'Shaughnessy, 1997). También, si se quiere dar un atractivo arquitectónico al muro, el paramento puede mejorar el valor estético de los neumáticos en bruto. En el caso de paramentos prefabricados, estos permitirían hacer la construcción de manera simple y rápida (Long, 1990). Existen diversas opciones para proteger las caras expuestas. Algunos ejemplos son *shotcrete* de revestimiento u hormigón proyectado, elementos prefabricados y capas vegetales.

4.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Para el diseño se deben conocer las características del suelo sobre el que se emplazará la estructura, y la que se dispondrá a contener por lo que se debe realizar un estudio geotécnico del suelo de fundación. El conocimiento de las características geotécnicas de un suelo permite una mejor comprensión de este. Un muro de contención debe ser capaz de mantener su estabilidad y resistir tanto los esfuerzos externos como los internos que la puedan solicitar. Se debe tener en cuenta que se tendrá un material anisotrópico, ya que el objetivo es reforzar el suelo en la dirección de mayores esfuerzos (Long, 1990).

Un diseño adecuado debe considerar:

- El muro y sus componentes deben ser capaces de resistir los esfuerzos cortantes y momentos internos ejercidos por el suelo y sus cargas.
- El muro debe ser seguro contra un desplazamiento lateral.
- El muro debe ser seguro contra el volcamiento.
- El muro debe ser seguro contra el desplazamiento relativo entre los distintos niveles de mallas.
- Las presiones no deben sobrepasar la capacidad de soporte del piso de fundación.

El diseño de cada muro de contención con esta técnica debe ser desarrollado por un ingeniero competente.

4.2.1 Dimensionamiento.

Al trabajar estas estructuras por gravedad debe guardarse especial cuidado en el dimensionamiento del muro. Debe dimensionarse con el peso suficiente para permitir la estabilidad de la estructura. El ancho de la base debe diseñarse de tal manera de que el muro no se deslice. Para el caso de muro de contención con neumáticos, se recomienda que la altura del muro sea 1,25 veces su base como máximo (base 0,8 veces la altura), por lo que esta última limitará su altura. Además se recomienda que el máximo ángulo de abatimiento para el muro de contención no debería exceder los 70 grados cuando se usa un relleno de baja calidad (O'Shaughnessy, 1997). Se recomienda evitar muros con cara frontal en 90 grados, debido a la poca "confianza psicológica" que daría un muro recto de este tipo de elementos. Se recomienda inclinar 1:5 (H:V), es decir, unos 80°, para lo que se debe desfasar unos 4 centímetros entre cada malla. Para obtener una pendiente de 70°, se debe desfasar unos 7 centímetros entre mallas. Esto considerando un neumático aro 14 (185/65R14). Ver [figura 4-6](#).

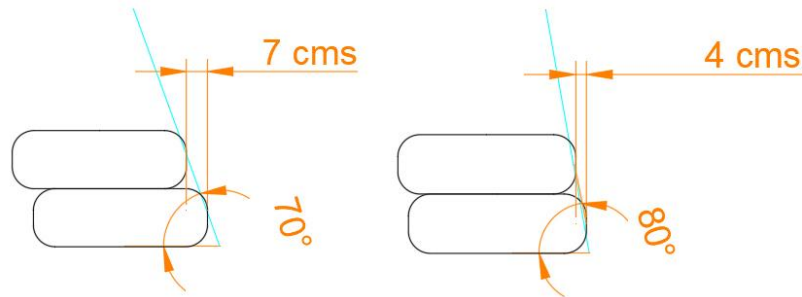


Figura 4-6 Desfases entre mallas según inclinación.

También es necesario mencionar que debe considerarse una distancia mínima entre el muro y una estructura sobre el terreno contenido. Del método de las cuñas de Coulomb, se desprende esta distancia mínima, la cual es la distancia horizontal de la cuña. Por lo tanto, no deben construirse estructuras en distancias menores a D (ver [figura 4-7](#)).

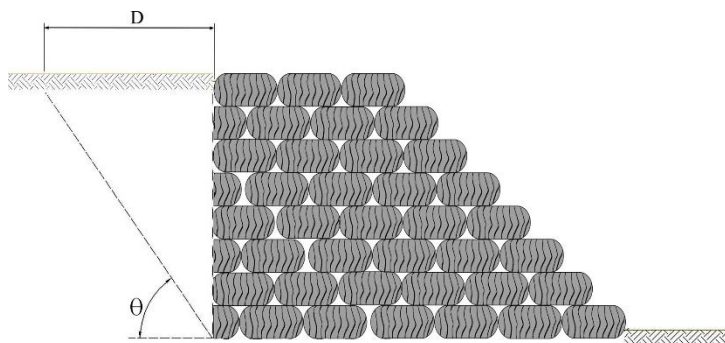


Figura 4-7 Distancia de la cuña de suelo

$$\text{Con } D = H * \cot \theta \quad \& \quad \theta = \pi/4 - \phi/2$$

4.2.2 Diseño externo

El principal objetivo del diseño externo es el de asegurar la estabilidad externa de los muros de contención, frente a las solicitaciones sobre estos, considerando que el muro actúa como una misma unidad. Para esto se aplican factores de seguridad ante las posibles fallas que se puedan producir. Cabe mencionar, que los factores de seguridad para cada tipo de falla, son fijados en base a la experiencia, varían en cierto rango y se recomienda que en todo proyecto se fije específicamente el valor más adecuado (Código de normas y especificaciones técnicas de obras de pavimentación, 2016).

Un muro de contención de neumáticos, apropiadamente diseñado debería actuar como un material compuesto homogéneo. Se espera que los modos de fallas sean (O’Shaughnessy, 1997):

- Deslizamiento del volumen reforzado en la base;
- Volcamiento del muro, incluyendo vuelco a alguna elevación sobre el pie del muro. Ver [figura 4-10 c](#);
- Falla por capacidad de carga o excesivo asentamiento del suelo de fundación;
- Falla de estabilidad por profundo asentamiento, o deslizamiento a lo largo de un plano de debilidad interno;
- Pérdida de serviciabilidad debido a deformación excesiva.

4.2.2.1 Falla debido a deslizamiento a lo largo de la base

Ocurre cuando las fuerzas externas sobre el muro son mayores que la resistencia friccional en su base, por lo que ocurre el desplazamiento horizontal de muro. La fuerza que se resiste al deslizamiento en la base del muro debe ser mayor que la fuerza total aplicada a trasdós sobre este. Se debe cumplir que:

$$F.S._{deslizamiento} = \frac{\sum \text{Fuerzas resistentes horizontales}}{\sum \text{Fuerzas horizontales a trasdós sobre el muro}} \geq F.S._{mínimo}$$

<i>F.S._{mínimo}</i>	<i>Estático</i>	<i>Dinámico</i>
	1,5	1,2

Figura 4-8 Tabla: Factores de seguridad mínimos al deslizamiento.

*Valores recomendados por mecánica de suelos. Para región de Valparaíso. Para el caso dinámico $k_h = \frac{1}{2} * A_0/g = 0,2$ y $k_v = 0$.

Ver [Figura 4-10 a](#).

4.2.2.2 Falla debido al volcamiento

Se produce cuando el momento de volcamiento, producido por el empuje, es mayor que el momento resistente, el cual es generado por el peso propio del muro. Cuando ocurre esto, el muro gira hacia el exterior en torno a su base.

Se considera que el muro de contención con neumáticos se comportará como un bloque monolítico de material. Sin embargo, debido a la flexibilidad de la estructura, la falla en esta forma es cuestionable. No obstante, es recomendable el uso de un factor de seguridad según cita O'Shaughnessy en la página 178 de (O'Shaughnessy, 1997).

$$F.S._{volcamiento} = \frac{\sum \text{Momentos resistentes}}{\sum \text{Momentos volcantes}} \geq F.S._{mínimo}$$

	<i>Estático</i>	<i>Dinámico</i>
<i>F.S._{mínimo}</i>	1,5	1,2

Figura 4-9 Tabla: Factores de seguridad mínimos al volcamiento.

* Valores recomendados por mecánica de suelos. Para región de Valparaíso. Para el caso dinámico $k_h = \frac{1}{2} * A_0/g = 0,2$ y $k_v = 0$.

Ver [Figura 4-10 b](#).

4.2.2.3 Estabilidad global

Se debe realizar un estudio de la estabilidad global del muro en conjunto con el terreno que está conteniendo y el que está por debajo de este, mediante un análisis de estabilidad apropiado. Esto es importante para asegurar la estabilidad de la estructura, la cual se puede verificar analizando varios planos de falla y asegurando que haya suficiente resistencia a lo largo del plano crítico.

En el caso de que el macizo a contener constituya un talud, se deben realizar análisis de estabilidad de talud adecuados para asegurar que el muro se mantenga intacto. Adicionalmente este tipo de estructura puede ser complementada con anclajes para la estabilización del talud.

Ver [Figura 4-10 d](#).

4.2.2.4 Falla debido a la capacidad de carga

Los esfuerzos generados por el muro y la sobrecarga no deberían exceder la capacidad de carga del suelo de fundación que soporta este peso. La naturaleza flexible del sistema de

contención y su habilidad de acomodar grandes asentamientos diferenciales pueden reducir el factor de seguridad mínimo requerido comparado a muros de hormigón tradicionales (O'Shaughnessy, 1997). El suelo de apoyo debe ser competente, por lo que no se debe fundar en terrenos muy deformables o muy sueltos en los que no se produzcan grandes asentamientos.

En suelos débiles es recomendable dimensionar aumentando el área de la base, para de esta manera disminuir la fuerza por unidad de área sobre el suelo.

$$F.S._{capacidad\ de\ carga} = \frac{\text{Capacidad de carga de la fundación}}{\text{Esfuerzos verticales en la base}} = \frac{q_{\text{último}}}{\sigma_v} \geq F.S._{\text{mínimo}}$$

$$F.S._{\text{mínimo}} = 2,0$$

Ver [Figura 4-10 e](#).

4.2.3 Diseño interno

El muro debe ser diseñado de tal manera de que sus partes constituyentes actúen juntas como unidad, evitando que estas partes se deslicen con respecto a otras o se salgan de su posición. Para esto es importante considerar el material de unión correcto y con la configuración de unión que mejor resista las tensiones. El análisis interno de este tipo de muro es necesario debido a sus características. Es importante conocer la interacción entre los elementos constitutivos. Roce suelo-suelo, suelo-caucho, caucho-caucho.

En una memoria realizada en la Universidad Nacional de Colombia para optar al título de Magister en ingeniería-geotecnia por el señor Oscar Rodríguez González (Rodríguez, O., 2016) se fabricó un dispositivo de corte directo a escala real para ensayar dos neumáticos de vehículos livianos rellenos con suelo compactado. Adicionalmente, se realizaron ensayos insertando elementos conectores a cortante. Se ensayaron desde uno a tres conectores de hormigón; y tres conectores de acero de 1". Comparando los resultados de las curvas obtenidas (ver [Anexo A](#)), se puede apreciar que:

- En comparación con el material de relleno, el ángulo de fricción “Ø” del material compuesto (neumático-suelo compactado) es menor en todos los casos.
- Se aprecia un aumento de cohesión del material compuesto en contraste con el material de relleno.
- Mediante la inclusión de conectores a cortante en el material compuesto, y a medida que se aumentaron, fue aumentando el ángulo de fricción “Ø” de manera considerable.

El uso de este tipo de conectores a corte en muros de contención, podría permitir variar el diseño externo, ya que primero se deberá modificar la disposición de los neumáticos en columnas de tal manera de que exista el espacio para situar los conectores y que estos tengan continuidad a lo largo de la columna, o modificar los neumáticos en el arreglo intercalado tipo albañilería antes descrito para armarlos al corte. El aumento de la resistencia al corte que aportarán estos elementos permitiría un diseño con un menor ancho de muro.

Ver [Figura 4-10 f](#).

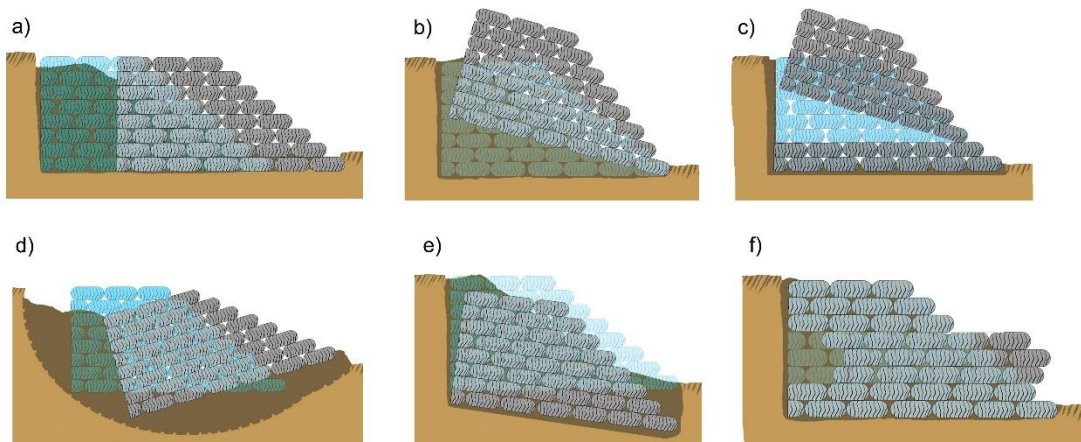


Figura 4-10 a) Deslizamiento de la base del muro; b) Volcamiento del muro; c) Volcamiento a alguna elevación sobre el pie del muro; d) Estabilidad global; e) Falla por capacidad de carga del suelo; f) Falla por inestabilidad interna. Ilustrado por Oliver Contreras.

4.2.4 Drenaje

El agua es un factor importante a considerar en la estabilidad de un muro de contención, el cual puede presentarse por medio de napas freáticas y aguas lluvias próximas al muro, por ejemplo. Es necesario que esta sea evacuada con el fin de que no se generen presiones hidrostáticas tras el muro, ya que este aumento en las presiones puede ocasionar su colapso ([Ver figura 4-11](#)). Un buen sistema debe ser capaz de evitar la acumulación de agua detrás del muro mediante una correcta canalización y posterior descarga fuera de la zona donde pueda afectar al muro. También su correcta evacuación permite mitigar problemas de durabilidad y corrosión de la estructura según sea el caso. La presencia de aguas en climas fríos puede agudizar el problema debido a su congelamiento. Se recomienda construir estas estructuras por sobre el nivel de napas freáticas con el fin de reducir el impacto ambiental.



Figura 4-11 Colapso de muro por aumento de presiones hidrostáticas. Obtenido de (94diez.com, 2014).

Las arcillas usadas como relleno, al saturarse bajo la presencia de agua, generan grandes empujes sobre el muro. El mejor relleno para colocar en la parte posterior del muro es un suelo no cohesivo y con buen drenaje. No obstante, este tipo de muros al ser flexibles admiten suelos de mala calidad como relleno.

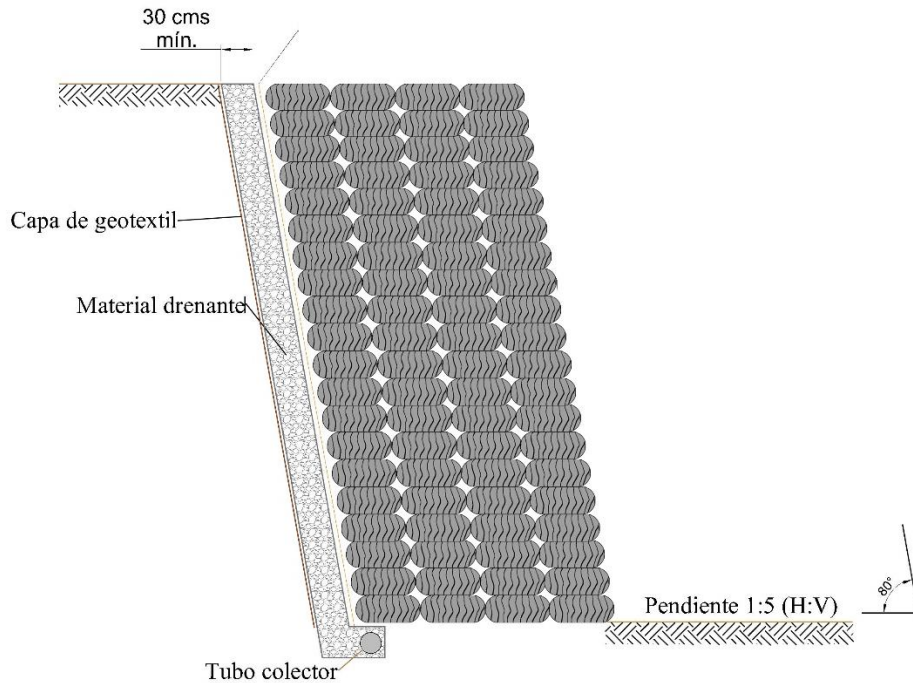


Figura 4-12 Esquema muro de contención con drenaje.

Se recomienda construir un sistema de drenaje, el cual puede ser una capa de material permeable que cubra el respaldo del muro en toda su longitud, de un espesor mínimo de 30 cm, con un tubo colector perforado en la base con descarga en ambos extremos (Código de normas y especificaciones técnicas de obras de pavimentación, 2016). Esto puede ser complementado con la colocación de una capa de geotextil en el trasdós del muro. Además, se recomienda la colocación de barbacanas o “lloraderos” de PVC de 5 centímetros de diámetro a través del muro de contención, en hileras paralelas a lo largo del muro, con espaciamiento vertical no mayor de 2 metros (Código de normas y especificaciones técnicas de obras de pavimentación, 2016). Para captar además el agua al interior del muro mismo, se recomienda realizar una modificación a estas barbacanas, la que consiste en perforarlas, dejando una franja sin perforar en la parte inferior del tubo, para permitir captar el agua dentro del muro y descargarla al exterior, se debe cubrir la tubería con geotextil no tejido y en el extremo interior se deberá colocar un filtro de material granular que restrinja el ingreso de material que pueda obstruir la tubería o un tapón. Esta debe llevar a una obra de captación de agua frente a la base, de tal forma de garantizar que el agua recogida no afecte la estabilidad de la estructura (Rodríguez González, O., 2016). En el caso de arcillas, O’Shaughnessy recomienda la colocación de capas de drenaje horizontal, las cuales sean puestas a intervalos apropiados. Esto podría ayudar a incrementar el ritmo de consolidación del relleno arcilloso

de tal forma de que los asentamientos primarios puedan ocurrir en un corto periodo de tiempo (O'Shaughnessy, 1997).



Figura 4-13 Barbacanas de PVC y cuneta de hormigón en muros de contención con NFU. Extraído de (Rodríguez, O., 2016).

4.3 MÉTODO CONSTRUCTIVO

Método constructivo para muro de contención de suelo reforzado con neumáticos, una variante de la técnica tradicional de muros de tierra reforzada, que presenta variaciones en cuanto al comportamiento. Gran parte de la literatura estudiada refiere a la utilización de neumáticos en este tipo de muros.

4.3.1 Consideraciones y trabajos previos

A continuación se mencionan consideraciones que deben ser parte de las especificaciones técnicas del proyecto de diseño de este tipo de muros.

4.3.1.1 Selección.

Primero, los neumáticos seleccionados deben encontrarse en buen estado, que no estén rajados, ni que estén expuestos los elementos internos del neumático como pueden ser tejidos y metales. Se recomienda la utilización de neumáticos desechados desestimando la utilización de neumáticos nuevos. En lo posible se deben utilizar neumáticos del mismo tamaño para la construcción del muro. De no ser así, se debe cuidar de que cada malla horizontal este formada por neumáticos del mismo tamaño. Los neumáticos de mayor tamaño se deberán ubicar en la parte inferior del muro.

4.3.1.2 Corte.

Para rellenos arcillosos, es recomendable la utilización de neumáticos sin una banda lateral. Para esto mediante un cuchillo o equipo eléctrico se debe cortar una de sus bandas laterales. Este proceso no toma demasiado tiempo por cada neumático. Durante el desarrollo de esta memoria se realizaron cortes de la banda lateral con un cuchillo cartonero sin complicaciones. No obstante, los neumáticos también pueden ser utilizados completos.



Figura 4-14 Corte de banda lateral de un NFU.

4.3.1.3 Relleno y compactación

Materiales recomendados para obtener estructuras de larga duración son suelos no cohesivos bien graduados (relleno granular) o suelos cohesivos friccionantes de alta calidad. Dentro de las ventajas que poseen los rellenos no cohesivos de buena calidad son: estabilidad, buena trabajabilidad, alta permeabilidad, insensibilidad a las heladas y durabilidad del material de refuerzo. El punto en contra de este tipo de materiales es su posible alto costo.

La compactación detrás del muro debería ser realizada con el fin de evitar el desarrollo de la presión sobre el muro, reduciendo su deformación hacia afuera y el aumento de la resistencia al esfuerzo de corte. La compactación debe seguir las especificaciones del diseño del proyecto, según densidad establecida, evitando la compactación excesiva, para impedir que se originen presiones residuales que aumentan el empuje (Código de normas y especificaciones técnicas de obras de pavimentación, 2016).

4.3.1.4 Disposición

Las capas deberán ser colocadas de manera escalonada lateralmente. Esto para distribuir los vacíos de forma uniforme a través de la estructura. Estos vacíos deben ser rellenos con el fin de desarrollar una buena fricción de entrelazamiento entre las diferentes capas de refuerzos neumáticos y además para minimizar el asentamiento del muro. (O'Shaughnessy, 1997).

4.3.2 Secuencia constructiva: Muro de contención con neumáticos desechados.

- 1) Replanteo. Se debe marcar y trazar a tamaño real la disposición de los elementos constructivos sobre el terreno, según lo indicado en los planos.
- 2) Excavación y movimiento de tierras.
- 3) Limpiado y nivelado de la superficie base. Se deben retirar todos los materiales de mala calidad que puedan mermar las condiciones para el apoyo de la estructura.
- 4) Colocación de la primera malla de neumáticos. Se deben colocar en un arreglo al tresbolillo. Los neumáticos deben ser atados, se recomiendan cuerdas de polipropileno de 9,4 milímetros de diámetro. Como se menciona en el punto 4.1.1.1 es recomendable una configuración del sistema de unión que contemple dos o tres vueltas de cuerda. La fila frontal de neumáticos debe atarse con tres vueltas de cuerda, mientras que para los internos dos, por ejemplo. Dos nudos también pueden aumentar la rigidez del sistema. Además se deben colocar estacas de madera en la fila frontal con el fin de evitar desplazamientos excesivos luego de la compactación del suelo, para lo cual también pueden utilizarse anclajes con acero estriado de construcción, también conocido como “*dawers*”. Para el caso de que sean neumáticos con una de sus bandas laterales removidas, se recomienda colocar la banda lateral dentro del neumático vacío para evitar desperdicios de material. Para mayor seguridad, adicionalmente los neumáticos pueden ser amarrados verticalmente (entre mallas). De esta forma se restringen los desplazamientos relativos entre mallas.
- 5) Se deben rellenar y compactar los neumáticos. Esto se debe realizar con trabajo manual o maquinaria liviana.
- 6) Mallas de neumáticos deben ser colocadas sobre las anteriores hasta alcanzar la altura de diseño. Estas deben ser dispuestas de forma escalonada y al tresbolillo, para contribuir y promover el entrelazamiento entre capas.
- 7) Finalmente se debe recubrir el muro. Una buena opción es hacerlo con hormigón proyectado sobre una malla de alambre galvanizado sujeto con grapas U. Otra opción es la de vegetar a intradós, en los escalones entre capas con especies vegetales de raíz firme y de la zona. También puede ser protegido con elementos prefabricados, como es el caso de los paramentos frontales de muros TEM, para lo cual debe cuidarse que los desplazamientos horizontales máximos del muro ya hayan ocurrido.



Figura 4-15 Atado de neumáticos del muro. Obtenida de: "Estabilización de taludes con muros de neumáticos" (Sieira et al, 2001).



Figura 4-16 a) Llenado y compactado manual de suelo en NFU; b) Relleno de neumáticos con suelo residual mediante operaciones manuales. Obtenida de: "Scrap tire: a civil engineering material" (Gerscovich, Sieira, Medeiros y Sayão, 2004)

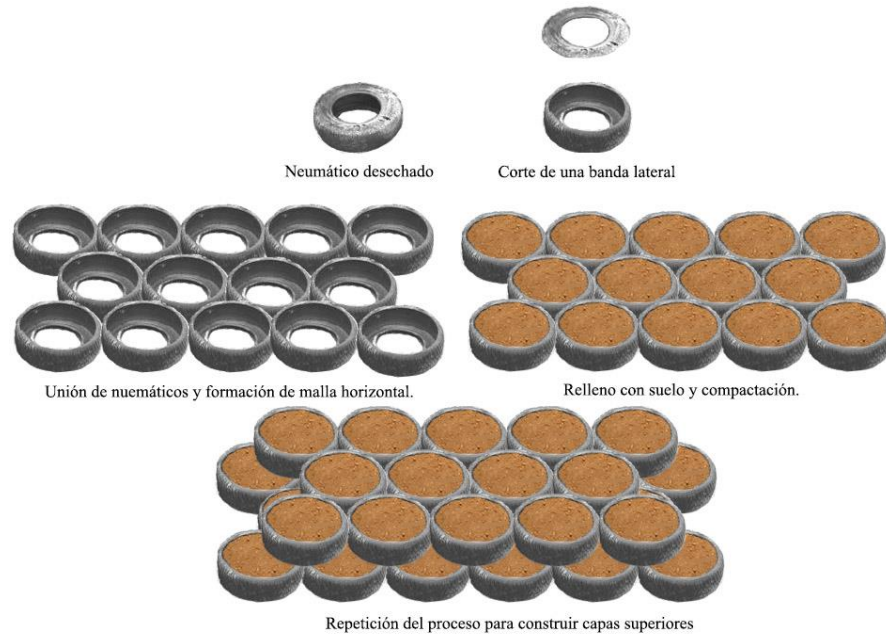


Figura 4-17 Esquema simplificado del proceso constructivo.

4.3.3 Secuencia constructiva: Muro de contención con neumáticos desechados reforzado con acero.

Una variante del sistema antes descrito es el de la inclusión de conectores al corte directo. Para esto se recomienda la inclusión de enfierradura de 12 mm mínimo y de calidad A630-420H, anclada al suelo a un mínimo de 100 centímetros, con *grouting* o mortero, cada 60 centímetros, es decir, por cada neumático basal. Según el diseño y cálculo. Los neumáticos deben ser unidos con polipropileno horizontalmente. La disposición relativa de las capas debe ser tal que permita el paso del refuerzo al corte. Este tipo de variante puede significar en estructuras más esbeltas y más armadas al corte. A continuación se muestran relaciones entre el ancho del muro y su altura, en donde el ancho representa un 60% de la altura.

- 1) Replanteo. Se debe marcar y trazar a tamaño real la disposición de los elementos constructivos sobre el terreno, según lo indicado en los planos.
- 2) Excavación y movimiento de tierras.
- 3) Limpiado y nivelado de la superficie base. Se deben retirar todos los materiales de mala calidad que puedan mermar las condiciones para el apoyo de la estructura.
- 4) Colocación del acero. Se deberán colocar estos refuerzos en los lugares trazados según el diseño. Se deben anclar al terreno mediante la aplicación de *grouting* o mortero. Se recomienda la utilización de acero de calidad A640-420.
- 5) Colocación de la primera malla de neumáticos. Se deben colocar en un arreglo al tresbolillo o apilados, según diseño. Se debe cuidar que los neumáticos sean pasados por la enfierradura de tal manera de que queden conectados. En el caso en que se elija

utilizar neumáticos en una disposición al tresbolillo, se deberán modificar estos, mediante corte en las bandas laterales, para permitir el paso de la enfierradura. Los neumáticos deben ser atados entre ellos. Se deben rellenar y compactar los neumáticos. Esto se debe realizar con trabajo manual o maquinaria liviana.

- 6) Mallas de neumáticos deben ser colocadas sobre las anteriores hasta alcanzar la altura de diseño.
- 7) Recubrir el muro.

Corridas de neumáticos – Ancho del muro (<i>Cantidad</i>)	Ancho del muro (<i>Metros</i>)	Altura del muro (<i>Metros</i>)
1	0,6	1
2	1,2	2
3	1,8	3
4	2,4	4
5	3,0	5

Figura 4-18 Tabla: Relación base/altura para muros de neumáticos armados al corte. Valores dados por mecánico de suelos.

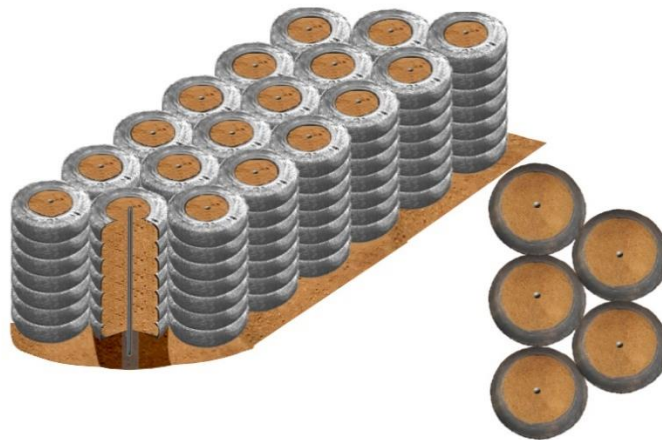


Figura 4-19 Esquema de columnas de muros armados al corte.



Figura 4-20 Muro de neumáticos al tresbolillo con refuerzo al corte. Cortesía de Marcelo Witto Mättig.

4.3.4 Ventajas y desventajas del sistema

En base a las ventajas descritas por Long (Long, 1990) y Gerscovich y compañía (Gerscovich et al., 2004) en sus trabajos sobre muros experimentales, se presentan a continuación una serie de ventajas y desventajas del sistema.

Las ventajas son:

- No son necesarias grandes fundaciones ni mejoramientos de suelos de baja calidad;
- Permite la utilización de suelo residual;
- Permite el reciclaje de un material contaminante, y de alta producción de residuos, ayudando así al medioambiente;
- Bajo costo en materia prima, bajos costos de transporte cuando los neumáticos desechados se encuentran disponibles en depósitos próximos al área de construcción;
- Es tecnológicamente simple. Permite que trabajadores no calificados puedan construir bajo supervisión técnica;
- Alta durabilidad.
- Permite estandarización y velocidad en la ejecución. Puede dar paso al prefabricado de mallas de neumáticos;
- Construcción en etapas y secciones;
- La geometría de los neumáticos permite la proyección y construcción de diversas geometrías de muro;

En cuanto a las desventajas:

- Para la variante de suelo reforzado con neumáticos se necesita de amplio espacio para su construcción. La variante de estas estructuras armadas al corte permite secciones más esbeltas.
- Bajo valor estético en bruto.
- Poca revalorización de este tipo de materiales para construir en el país.

4.4 ALGUNOS CASOS DE MUROS DE CONTENCIÓN DE NEUMÁTICOS EN CHILE

4.4.1 Achupallas, Viña del Mar, Región de Valparaíso.

En el sector de achupallas, cercano al paradero 12, próxima a la avenida Los Almendros en Viña del mar, se encontraron diversos casos de utilización de neumáticos de manera artesanal como material para la construcción de elementos de contención, estabilización de taludes e incluso como mobiliario en plazuelas.

Caso 1

En este caso, el más interesante hallado en este sector, se construyó un muro de neumáticos cercano a una vivienda.

Las imágenes obtenidas no muestran el muro en su totalidad, debido a la presencia de vegetación en el lugar que limita la vista. En la [figura 4-21](#) se puede apreciar una estructura de cuatro hileras de neumáticos, considerando 20 centímetros de espesor se estima que es de una altura de 0,8 a 1 metros. Se desconoce el ancho de la estructura.



Figura 4-21 Neumáticos usados para estabilización de terreno. Achupallas.

Caso 2

En estos casos se colocaron neumáticos rellenos con suelo arcilloso de la zona en columnas con espesor de unos pocos neumáticos, con una altura aproximada de 2 metros, de tal manera de poder rellenar vacíos existentes, con el fin de mitigar riesgos. Se encontraron dos casos, uno en que la estructura colapsó y otro que aún se encuentra vigente. En entrevista con el dueño de casa y constructor de la estructura aún vigente, los neumáticos fueron colocados hace más de 10 años, y resistieron sin problemas el terremoto de magnitud 8,8 en la escala de Richter del 27 de Febrero del año 2010 de Chile.



Figura 4-22 Izquierda y centro: Refuerzo de suelo artesanal que falló; Derecha: Refuerzo de suelo artesanal aún vigente. Achupallas.

Caso 3

En este caso se puede apreciar una sección de muro de contención con neumáticos. En la parte frontal se colocaron perfiles metálicos para evitar el desplazamiento lateral del muro. Se puede apreciar que no se encuentran unidos y su disposición es irregular. En la fotografía de la derecha (ver [figura 4-23](#)) se puede apreciar la esbeltez del elemento de contención. Solo posee una columna vertical de neumáticos. La estructura de contención presenta una rotación con respecto a su pie debido al empuje del suelo a trasdós, y probablemente la sobrecarga (vivienda) sobre el terreno contenido actúe sobre el muro debido al distanciamiento.



Figura 4-23 Elemento de contención: Falla por volcamiento. Achupallas.

4.4.2 La pólvora, Valparaíso, Región de Valparaíso.

En este sector existe un pequeño muro de 1,5 metros aproximadamente, escalonado en dos partes y dispuestos en columnas. Se observa la presencia de especies herbáceas. Se aprecia que las columnas inferiores no están aplomadas, producto probablemente de presiones del suelo y/o hidrostáticas a trasdós, y/o por la falta de elementos de unión, armado al corte o por poseer una sección muy esbelta, produciéndose de esta manera un desplazamiento relativo entre las diferentes capas. Se desconocen las características del suelo.



Figura 4-24 Muro en Sector La Pólvora, Valparaíso.

4.4.3 Cerro La Cruz, Valparaíso, región de Valparaíso.

Aquí existe un apilado de neumáticos en la base de una quebrada de forma irregular y desordenada. A simple vista se puede decir que el suelo contenido es arcilloso.



Figura 4-25 Apilado de neumáticos artesanal para afirmar terreno.

4.4.4 Lebu, Provincia de Arauco, Región del Bio Bio

Usados para estabilizar una pequeña pendiente. Neumáticos apilados en columnas y de tamaños variados; se aprecian neumáticos de vehículos agrícolas. No se tiene información del tipo de suelo.



Figura 4-26 Muro de baja altura. Lebu, Región del Bio Bio

4.4.5 Casos en cerro San Juan, Machalí, Región de O'Higgins

El primero de los casos es un muro de contención de aproximadamente 1 metro de altura y con espesor de un neumático, es decir, de unos 60 centímetros. Se puede ver que en ciertos sectores de la base los neumáticos fueron dispuestos de manera traslapada entre capas. En otras zonas, fueron apilados en columnas. Interesante es la presencia de árboles (Eucaliptos), dos de los cuales crecen entre las dos primeras capas de neumáticos. Otros dos crecen por fuera de los neumáticos. Se deduce que se plantaron en esa zona con el fin de ayudar a contrarrestar los empujes del suelo sobre los neumáticos, en una técnica mixta entre neumáticos y árboles.



Figura 4-27 Muro de contención de neumáticos, Machalí, Región de O'Higgins.



Figura 4-28 Muro de contención de neumáticos, otra vista. Machalí, Región de O'Higgins.



Figura 4-29 Superficie generada por la contención de muro, Machalí, Región de O'Higgins.

En el segundo de los casos encontrados en las cercanías del cerro San Juan, se ve un muro de mayores dimensiones, menor pendiente y desordenados en su configuración.



Figura 4-30 Muro de contención de neumáticos. Machalí, Región de O'Higgins.

4.4.6 Caso cerro Las Cañas, Valparaíso

Próximo al sector el Vergel alto, en la calle Isla Juan Fernández del cerro Las Cañas, se encontró un muro de contención de neumáticos.

En las imágenes se puede apreciar que el muro posee nueve capas o hileras de neumáticos, por lo que se estima que su altura es de unos 1,80 metros. Este caso es especialmente interesante debido a la proximidad de la construcción de una vivienda de dos pisos que existe arriba. Se desconoce la fecha de construcción del muro, pero probablemente sea posterior al año 2014, luego del gran incendio de Valparaíso, debido a que se encuentra en una zona fuertemente afectada por el incendio.



Figura 4-31 Muro de contención con neumáticos. Cerro Las Cañas.

4.4.7 Caso Olmué, sector La Vega, Región de Valparaíso.

Aquí existe un muro de contención con neumáticos de altura considerable, se estima que cercano a los 4 metros. Se puede apreciar que está construido sobre una base de mampostería en piedra.



Figura 4-32 Muro de contención con neumáticos, sector "La Vega", Olmué. Cortesía de Tania Estay



Figura 4-33 Detalles del muro de contención con neumáticos. Fotografías cortesía de Tania Estay

En la figura 4-33, derecha, se puede apreciar el perfil del muro de contención, y la colocación de piedras para confinar el suelo dentro de los neumáticos.

4.4.8 Caso de neumáticos apilados en columnas, sector La Dormida, Olmué.

Este muro presenta una disposición de los neumáticos apilados unos sobre otros en columnas, con cierta inclinación hacia el terreno contenido, en terrazas y con una sola fila de ancho. El tamaño de los neumáticos corresponde a neumáticos de camión. Este muro posee una altura aproximada de 2,5 metros.

Además en la fotografía se puede apreciar que este muro de neumáticos se construyó luego de la falla del muro de mampostería a falta de una estructura de contención en esa zona.



Figura 4-34 Muro de contención con neumáticos, sector "La Dormida", Olmué. Cortesía de Gustavo Sarabia.

5 ENSAYOS DE LABORATORIO

La utilización de neumáticos desechados para refuerzo requiere de una buena comprensión de las propiedades físicas y mecánicas del material. Existen diversos estudios en los que se realizan ensayos de campo a escala completa en muros de contención y otros tantos ensayos de laboratorio. Muchos autores concuerdan en que no existen pruebas estándar o una línea que sirva de guía para realizar mediciones de resistencia en neumáticos.

Los ensayos de campo en tamaño real han sido los más representativos. Debido al costo económico y al montaje de estos ensayos, un ensayo de corte a escala completa escapa a los recursos disponibles para la realización de esta memoria, por lo que se ideó un ensayo de laboratorio sobre la materialidad del neumático y estudiar el comportamiento de los esfuerzos de corte bajo cargas horizontales y verticales.

La constitución fuertemente armada de las partes que conforman al neumático hace difícil analizarlos en laboratorio (Long, 1990). Tomar muestras separadas del conjunto sin duda afecta a las propiedades mecánicas del neumático y a los resultados que se puedan extraer. No obstante, la perspectiva de este trabajo es analizar algunas propiedades mecánicas de una muestra de neumáticos, sometiendo dos muestras en contacto a esfuerzos de corte entre ellas y bajo la presencia de esfuerzos normales, en una prensa de ensayo de corte directo.

5.1.1 Medición del peso de un elemento de neumático-suelo

Se eligió un neumático de aro 14 (175/65 R14), debido a ser estos de los más utilizados en Chile (Ver [figura 1-11](#)). El peso del neumático es de 5,7 Kilogramos.

Luego, este fue relleno con un material granular sin cohesión NP llamado maicillo de presencia en la costa de Valparaíso, de origen residual. El maicillo fue previamente mezclado con un 6% de agua (con respecto al peso del maicillo) para facilitar la compactación.



Figura 5-1 Materiales de izq. a der.: Neumático aro 14, maicillo y agua.

La compactación del maicillo se realizó con un combo metálico, por capas, hasta lograr el llenado completo del neumático.



Figura 5-2 Compactación del suelo dentro del neumático. Material neumático-suelo compactado.

Una vez realizado esto, se procedió a pesar el conjunto suelo-neumático. Se obtuvo un valor del peso para una unidad de suelo-neumático de:

$$Peso_{\text{suelo-neumático}} = 79 \text{ [kg]}$$

5.1.2 Ensayo de corte directo sobre probetas de neumático.

El ensayo de corte directo es adecuado para la determinación de las propiedades de resistencia al corte en condición consolidada drenada de un suelo. Como el neumático en este caso se trata de un material de geo-refuerzo, se someterá a ensayos de corte. Estos permitirán evaluar la resistencia en una situación donde la unidad suelo-neumático se encuentre bajo las tensiones normales existentes, siempre que exista la interfaz neumático-neumático la que se da en los casos en que el neumático se utilice en su totalidad, sin extracción de una banda lateral. Los resultados de diversos ensayos se pueden utilizar para expresar la relación entre la tensión de consolidación y la resistencia al corte drenado (Nch3085, 2007).

Se realizaron ensayos de corte sobre probetas cilíndricas de neumáticos. Se obtuvo valores de esfuerzo de corte para diferentes tensiones normales de valores: 0,30 [kgf/cm²], 0,51 [kgf/cm²] y 1,0 [kgf/cm²] (0,03; 0,05 y 0,1 [Mpa] respectivamente).



Figura 5-3 De izq. a der.: Probetas de caucho y probeta montada en caja contenedora.

Además se realizaron tres ensayos adicionales, bajo las mismas cargas verticales, en los que se agregó una capa de arena fina entre las probetas de neumático, para ver cómo afecta en el comportamiento la filtración de este tipo de material fino en la superficie de contacto neumático-neumático. La arena fue extraída de las dunas de Concón, en la región de Valparaíso.

5.1.2.1 Descripción del método de ensayo

Consiste en colocar las probetas de ensayo en la caja de corte directo de tal manera de que queden enfrentadas ambas caras de caucho, luego se aplica una tensión normal predeterminada. Luego se sueltan los armazones que contienen las muestras y se desplaza el armazón superior horizontalmente con respecto al inferior a una velocidad constante de corte. Se mide la fuerza de corte y los desplazamientos horizontales a medida que se cortan las probetas.

Las condiciones de ensayo deben representar a aquellas condiciones que se puedan dar en el muro de neumáticos que se está investigando. Un ejemplo de esto es la elección de las tensiones normales. Estas representan la carga sobre un neumático bajo una columna de neumáticos de determinada profundidad.

Se debe diseñar el ensayo de tal manera de asegurar que las condiciones de ensayo representen a aquellas condiciones que se están investigando (Nch3085, 2007).

Se ensayaron un total de seis probetas de dos formas distintas: tres probetas en que se colocaron las caras de caucho frente a frente, y otras tres probetas en las que entre las caras de caucho se colocó arena fina, de manera de simular una situación que pueda ocurrir durante la vida útil del muro de neumáticos en donde se filtra material fino entre ellos. En cada una de estas formas de ensayo se aplicaron tres tensiones normales las cuales fueron de valores: 0,30 [kgf/cm²], 0,51 [kgf/cm²] y 1,0 [kgf/cm²].

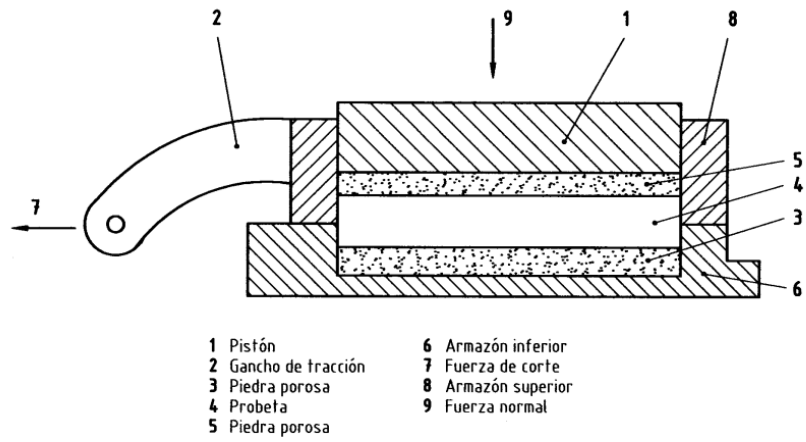


Figura 5-4 Equipo de corte. Fuente: NCh 3085, 2007.



Figura 5-5 Probetas.



Figura 5-6 Probetas con capa arena entre ellas.

5.1.2.2 Aparatos

1. Prensa de corte

El ensayo se realizó en la prensa de corte directo marca *Soiltest* modelo *D-110-B*, a una velocidad de corte de *9,5 milímetros/segundo*.

2. Caja de corte

La altura interior de cada uno de los contenedores de las probetas de la caja de corte era de *11 milímetros* y *63,1 milímetros* de diámetro cada una (dos en total).

3. Placas o piedras porosas.

4. Dispositivos de carga

- a. Dispositivo para aplicar la fuerza normal.
- b. Dispositivo para aplicar y medir fuerza de corte a la probeta.

5. Balanzas.

6. Indicadores de deformación.



Figura 5-7 a) Indicador de deformación vertical; b) Indicador de deformación horizontal.

7. Equipos y herramientas misceláneos/as:

- a. Cronómetro.
- b. Agua desmineralizada.
- c. Espátulas.
- d. Cuchillos, cuchillos cartoneros.
- e. Resina epóxica.

5.1.2.3 Preparación de la probeta

Para la elaboración de las probetas se cortaron muestras circulares de 62 milímetros de diámetro de la cara lateral de un neumático reforzado con filamentos de polyester, con carga máxima de 540 Kilogramos y con máxima presión de 300 KPa (44 PSI) según la información dada por el fabricante.

El corte del caucho se realizó con un cuchillo cartonero. Para lograr el espesor uniforme en la muestra se modificó cortando material de la parte más ancha del espesor de tal manera de que quedara con espesor uniforme y equivalente a la sección de menor espesor de la muestra, es decir, de 6 milímetros, lo que permitió obtener una superficie plana y horizontal para el ensayo.

Además se utilizó aglomerado de fibras de madera de densidad media (también llamado trupán) de 5 milímetros de espesor y de 62 milímetros de diámetro, el que se eligió para unirse a la muestra de neumático para alcanzar la altura del contenedor de las muestras, y porque no sufre una deformación considerable bajo cargas, como si puede sufrir por ejemplo una muestra de suelo.

Finalmente se unieron ambos materiales con resina epóxica. En resumen el espesor de la muestra de la cara lateral del neumático era de 6 mm y la del trupán de 5 mm logrando una altura total de probeta de 11 milímetros cada una. Para un ensayo se utilizaron dos.



Figura 5-8 Probetas de neumático.

5.1.2.4 Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de corte directo realizados sobre probetas cilíndricas de neumático.

5.1.2.4.1 Ensayo sin arena entre muestras de neumático.

Probeta n°:	1	2	3
Tensión Vertical [kgf/cm ²]	0,30	0,51	1,0
Carga sobre el Plato [kg]	9,351	15,585	31,17
Corte Máximo [kgf/cm ²]	0,187	0,335	0,714

Figura 5-9 Tabla: Resumen de resultados ensayo neumático- neumático.

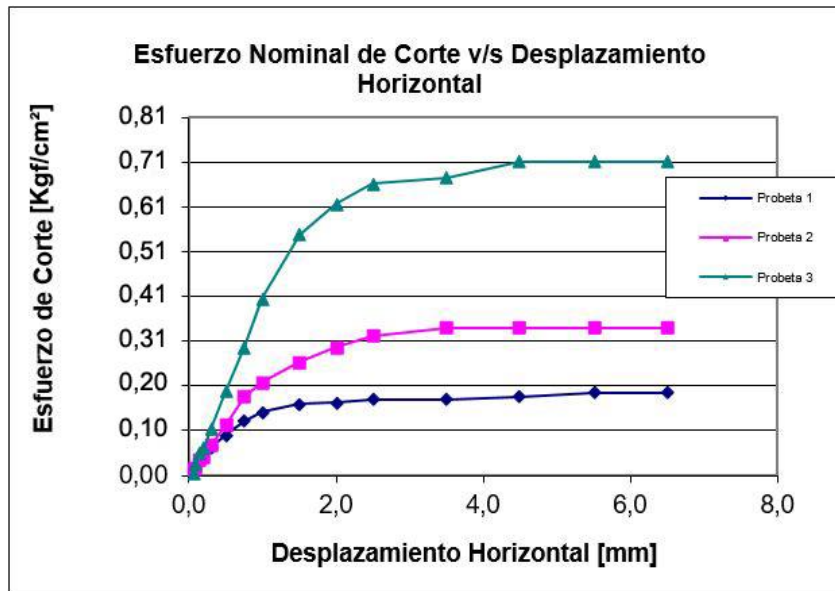


Figura 5-10 Esfuerzo nominal de corte vs desplazamiento horizontal para ensayo neumático-neumático.

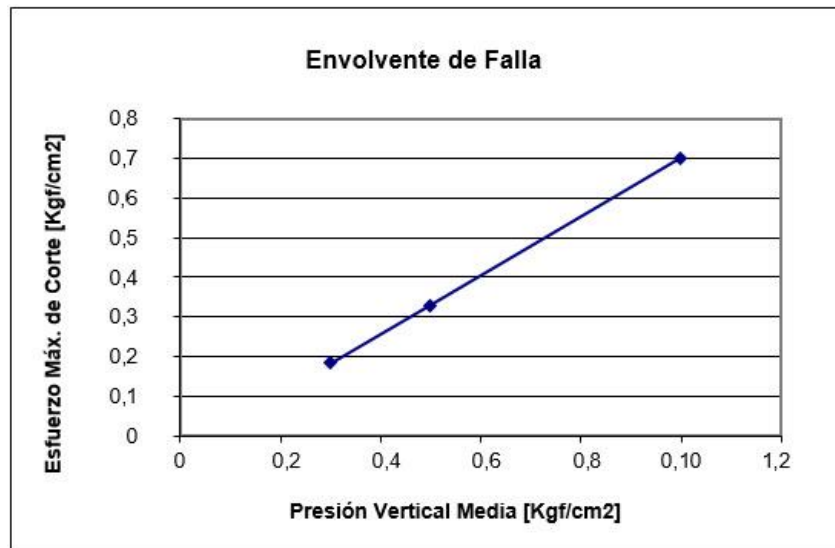


Figura 5-11 Gráfico: Envolvente de falla para ensayo neumático-neumático. Valores en kgf/cm².

La ecuación de la recta de la envolvente de falla es:

$$\tau = -0,039 + 0,7402 \sigma \left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right)$$

Donde:

$$\text{Tan } \phi = 0,7402$$

$$\phi = 36,5^\circ$$

Se obtuvo una curva con el valor de cohesión negativa, y la cohesión no puede tomar valores negativos, por lo que se ajustó la curva con cohesión =0.

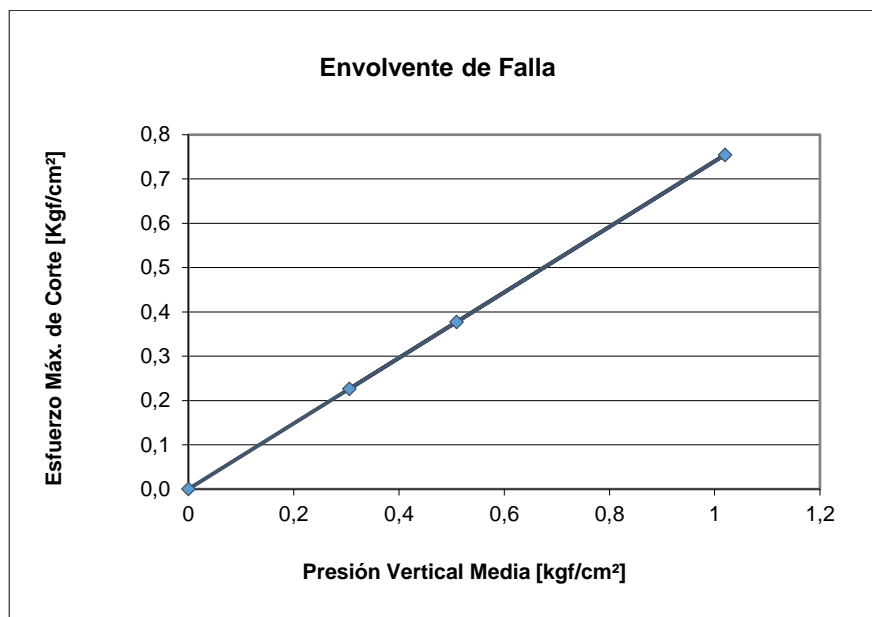


Figura 5-12 Gráfico: Envolvente de falla para ensayo neumático-neumático ajustada con C=0. Valores en kgf/cm².

$$\tau = \text{Tan}(36,5^\circ) * \sigma \left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right)$$

Con σ en $\left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right)$.

5.1.2.4.2 Ensayo con arena fina entre las muestras de neumáticos.

Probeta n°:	4	5	6
Tensión Vertical [kgf/cm ²]	0,30	0,51	1,02
Carga sobre el Plato [kg]	9,351	15,585	31,17
Corte Máximo [kgf/cm ²]	0,168	0,254	0,494

Figura 5-13 Tabla: Resumen de resultados ensayo neumático-arena fina-neumático.

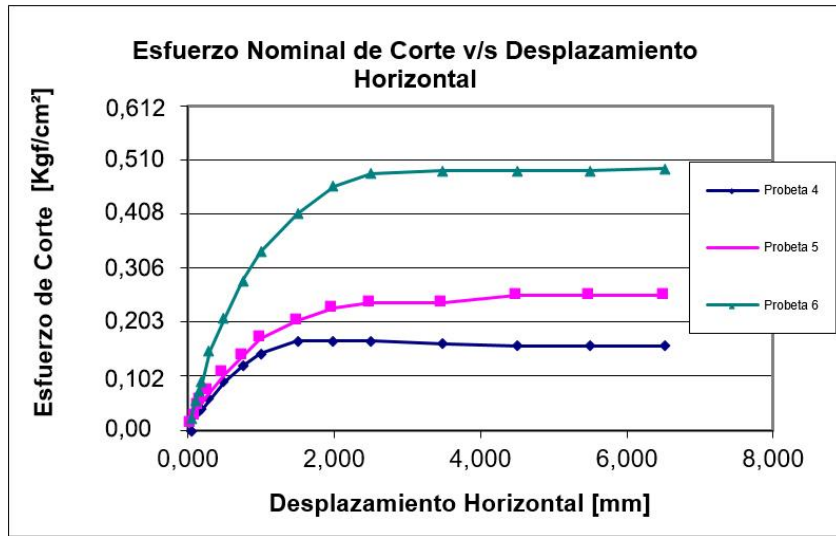


Figura 5-14 Gráfico: Esfuerzo nominal de corte vs desplazamiento horizontal para ensayo neumático-arena fina-neumático.

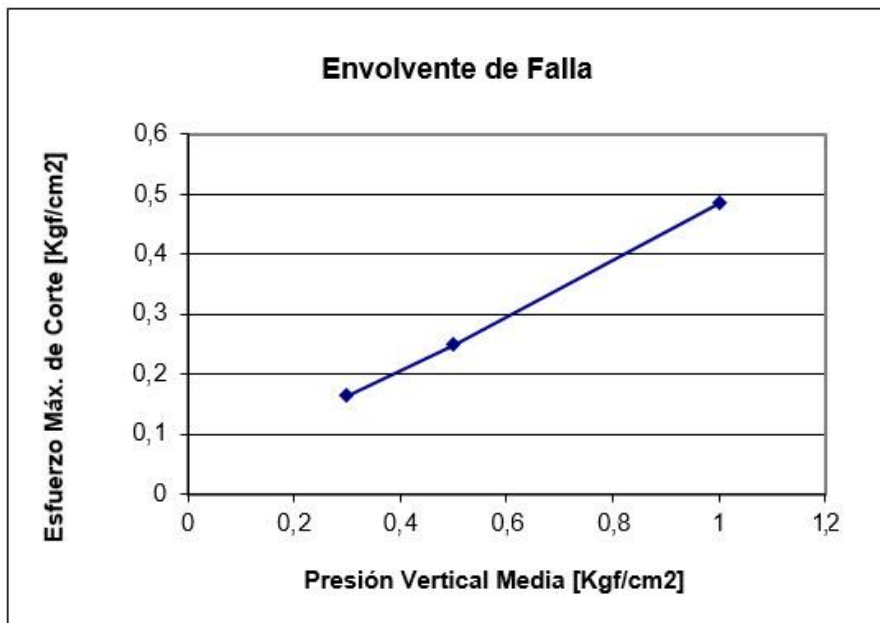


Figura 5-15 Gráfico: Envolverte de falla para ensayo neumático-arena fina-neumático con valores en [kgf/cm²]

La ecuación de la recta de la envolvente de falla es:

$$\tau = 0,4597 \sigma + 0,024 \left(\frac{kgf}{cm^2} \right)$$

Donde:

$$C = 0,024 \left(\frac{kgf}{cm^2} \right)$$

$$\text{Tan } \phi = 0,4597$$

$$\phi = 24,6^\circ$$

Es decir:

$$\tau = 0,024 + \text{Tan}(24,6^\circ) * \sigma \left(\frac{kgf}{cm^2} \right)$$

Con σ en $\left(\frac{kgf}{cm^2} \right)$.

De los resultados se desprende que la presencia de arena fina entre las capas de neumáticos disminuye el ángulo de fricción entre estas, lo que en otras palabras significa que disminuye la resistencia al corte frente a las mismas sollicitaciones.

Si bien la condición de roce neumático con neumático, no constituye la totalidad de la interfaz que actúa en el esfuerzo de corte entre las diferentes mallas para los casos en que se utiliza el neumático completo, ante la presencia de arena fina, se recomienda reforzar al corte este tipo de estructuras.

6 DISEÑO DE MURO DE NEUMÁTICOS

Se diseñará un muro de neumáticos rellenos internamente y cada uno de ellos con arena no cohesiva, que sostendrá un suelo de las mismas características. El muro que se utilizará como ejemplo será uno de altura igual a 5 metros y deberá sostener un suelo arenoso no cohesivo con $\gamma_t = 1,7 T/m^3$ y $\phi = 30^\circ$. Debido a que el peso de este tipo de muros de neumáticos es bajo en relación al peso de muros gravitatorios corrientes, por ejemplo de albañilería en piedra o de hormigón masa, el ancho basal del muro debe ser de un mínimo de 0,6 veces su altura:

$$B \geq 0,6 * H = 0,6 * 5 = 3 \text{ metros}$$

Es decir, para un muro de 5 metros de alto, su base deberá ser de 3 metros de ancho como mínimo, el cual es el ancho basal que se analizará.

El suelo de fundación es un suelo firme con valores de carga admisible de:

$$Q_{admisible\ estático} = 4,0 \left(\frac{kg}{cm^2} \right)$$

$$Q_{admisible\ dinámico} = 5,5 \left(\frac{kg}{cm^2} \right)$$

Debido al bajo peso del muro se consideró un roce muro-suelo $d = 10,3^\circ$ y sin cohesión. En la base del muro se consideró un roce de 30° , valor del roce considerado en el análisis como un valor mínimo resumen de los ensayos de corte ejecutados entre placas de goma de neumáticos con arena fina entre ellas.

Cada neumático se considera de una altura de 25 centímetros, de un diámetro interior de 30 centímetros y de un diámetro exterior de 60 centímetros. Acorde a esto, en 5 metros de altura caben 20 neumáticos, es decir, que el muro está conformado por 20 mallas horizontales de neumáticos.

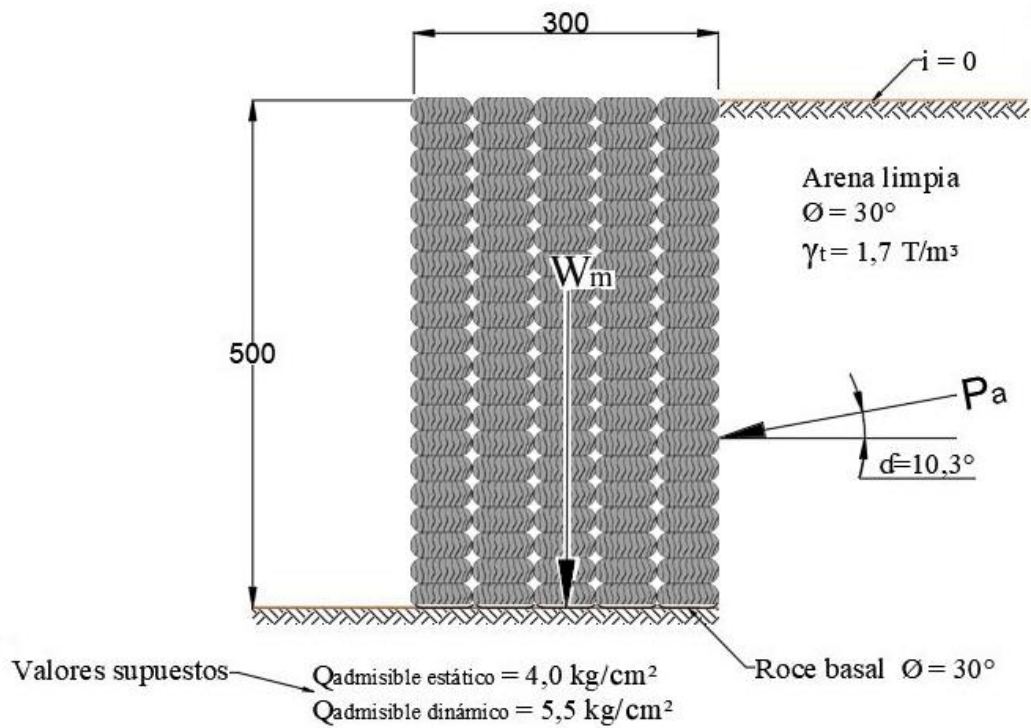


Figura 6-1 Muro ejemplo. Medidas en centímetros.

6.1 DESARROLLO DEL CÁLCULO

Para el diseño se utilizará el empuje activo tradicional, con una componente dinámica simplificada como un diagrama de presiones triangular invertido y calculada con la clásica expresión de Mononobe & Okabe, usando:

$$K_h = 0,20 \quad Y \quad K_v = 0$$

Con $K_h = 1/2 A_0'$ según (Ministerio de Obras Públicas, 2017)

Siendo $A_0' = 0,40$ para la costa de Valparaíso, según la Norma Nch 433 (Instituto Nacional de Normalización, 1996).

6.1.1 Cálculo estático

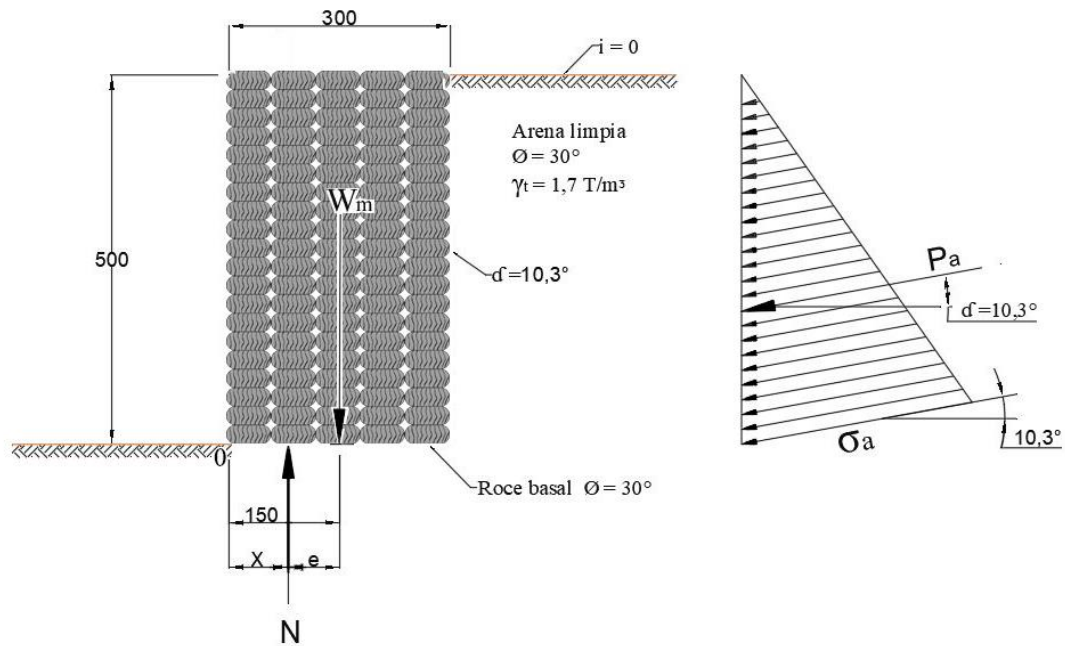


Figura 6-2 Muro caso estático.

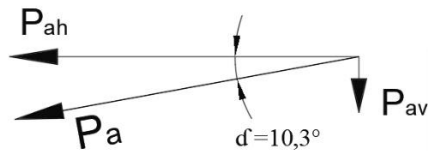


Figura 6-3 Descomposición de la fuerza de empuje activo Pa.

Peso del muro (W_m):

Se considerará el peso de un neumático con arena no cohesiva de 108 Kilogramos. Para un largo de 1 metro de muro y 25 centímetros de alto (altura del neumático), se tienen 180 Kilogramos.

En el muro se tienen 5 neumáticos de ancho y 20 mallas de alto. Es decir, que se tiene:

$$W_m = 5 * 20 * 108 = 10.800 \text{ (kilogramos/60 cm)} \quad (6.1.1)$$

Para 1 metro de ancho de muro, se tiene:

$$W_m = 18.000 \left(\frac{kg}{m} \right) = 18,0 \text{ (Ton/m)} \quad (6.1.2)$$

Cálculo del empuje activo:

Coeficiente lateral de empuje activo

Se calculará según la [fórmula 2.15](#). Además se tiene que:

$$\beta = 90^\circ; \quad i = 0^\circ; \quad \delta = 10,3^\circ \quad \text{y} \quad \phi = 30^\circ \quad (6.1.3)$$

Ver [figura 2.4](#)

$$K_a = \left(\frac{\operatorname{cosec}(90^\circ) * \operatorname{sen}(90^\circ - 30^\circ)}{\sqrt{\operatorname{sen}(90^\circ + 10,3^\circ)} + \sqrt{\frac{\operatorname{sen}(30^\circ + 10,3^\circ) * \operatorname{sen}(30^\circ - 0)}{\operatorname{sen}(90^\circ - 0)}}} \right)^2$$
$$K_a = 0,308 \quad (6.1.4)$$

Esfuerzo activo:

$$\sigma_a = \gamma_t * k_a * H$$
$$\sigma_a = 1,7 * 0,308 * H = 0,52 * H \quad (6.1.5)$$

Para $H = 5$ metros:

$$\sigma_a = 0,52 * 5 = 2,62 \text{ (Ton/m}^2\text{)} \text{ por cada metro lineal de muro} \quad (6.1.6)$$

Fuerza del empuje activo:

$$P_a = \frac{1}{2} * \sigma_a * H \quad (6.1.7)$$

$$P_a = \frac{1}{2} * 2,62 * 5 = 6,54 \text{ (Ton/m)} \quad (6.1.8)$$

Esta fuerza es aplicada a una altura de $H/3$, es decir, de **1,67** metros por sobre la base del muro.

La fuerza del empuje activo P_a se puede descomponer en sus componentes horizontal y vertical (ver [figura 6-3](#)):

La componente vertical es:

$$P_{a_v} = P_a * \operatorname{Sen}(\delta) = 6,54 * \operatorname{Sen}(10,3^\circ) \quad (6.1.9)$$

$$P_{a_v} = 1,17 \text{ (Ton/m)} \quad (6.1.10)$$

La componente horizontal es:

$$P_{ah} = P_a * \text{Cos}(\alpha) = 6,54 * \text{Cos}(10,3^\circ) \quad (6.1.11)$$

$$P_{ah} = 6,44 \text{ (Ton/m)} \quad (6.1.12)$$

Ahora, por equilibrio de fuerzas se tiene que:

$$\sum F_y = 0; \quad N - W_m - P_{av} = 0 \quad (6.1.13)$$

$$N = 1,17 + 18,0 = 19,17 \text{ (Ton/m)}$$

(6.1.14)

$\sum M_0 = 0$; (Con momento positivo en sentido anti horario)

$$N * x - W_n * 1,5 - P_{av} * 3,0 + P_{ah} * 1,67 = 0 \quad (6.1.15)$$

$$x = \frac{18,0 * 1,5 + 1,17 * 3,0 - 6,44 * 1,67}{19,17}$$

$$x = 1,03 \text{ (m)} \quad (6.1.16)$$

Excentricidad e :

$$e = \frac{B}{2} - x = \frac{3}{2} - 1,032 = 0,47 \text{ (m)} \quad (6.1.17)$$

Para que la fórmula clásica de esfuerzo por compresión y flexión ([fórmula 6.1.20](#)) tenga validez, se debe cumplir que:

$$e < \frac{B}{6} \quad (6.1.18)$$

$$0,47 \text{ m} < 0,5 \text{ m} \quad (6.1.19)$$

Determinación de esfuerzos por compresión y flexión:

Determinación del esfuerzo ejercido sobre la superficie de fundación por un muro de contención:

$$\sigma_{\text{máx,mín}} = \frac{N}{\text{área}} \pm \frac{M}{W} \quad (6.1.20)$$

Con N : Fuerza normal; W : Módulo resistente

$$M = N * e \quad (6.1.21)$$

$$W = \frac{I}{C} = \frac{\frac{1}{12} * B^3}{\frac{B}{2}} = \frac{1}{6} * B^2 \quad (6.1.22)$$

Reemplazando estos valores en la [fórmula 2.25](#), se calcula el valor de $k_{dinámico}$:

$$= (1 - 0) \left[\frac{\cos^2(30^\circ - 11,3^\circ - 0^\circ)}{\cos(11,3^\circ) * \cos^2(0^\circ) * \cos(0^\circ + 10,3^\circ + 11,3^\circ) * \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(30^\circ + \delta) * \text{sen}(30^\circ - 11,3^\circ - 0^\circ)}{\cos(0^\circ + 10,3^\circ + 11,3^\circ) * \cos(0^\circ - 0^\circ)}} \right\}^2} \right]$$

$$\mathbf{k_{dinámico} = 0,4539} \quad (6.2.3)$$

De la [fórmula 2.24](#), se tiene que el incremento sísmico de empuje es:

$$\Delta k_s = k_{dinámico} - k_{a\text{estático}} = 0,4539 - 0,3080 = \mathbf{0,146}$$

El cual para diseño y en forma simplificada se aplicará sobre el muro como un diagrama de esfuerzos triangular invertido:

$$\Delta \sigma_{a_s} = \Delta k_s * \gamma * H = 0,146 * 1,7 * 5 = \mathbf{1,241} \text{ (Ton/m}^2\text{)}$$

por cada metro lineal de muro

$$\Delta P_{a_s} = \frac{1}{2} * \Delta k_s * \gamma * H^2 = \frac{1}{2} * 0,146 * 1,7 * 5^2 = \mathbf{3,102} \text{ (Ton/m)}$$

La componente vertical de ΔP_{a_s} es:

$$\Delta P_{a_{sv}} = \Delta P_{a_s} * \text{Sen}(d) = 3,10 * \text{Sen}(10,3^\circ) \quad (6.1.9)$$

$$\Delta P_{a_{sv}} = \mathbf{0,55} \text{ (Ton/m)} \quad (6.1.10)$$

La componente horizontal de ΔP_{a_s} es:

$$\Delta P_{a_{sh}} = \Delta P_{a_s} * \text{Cos}(d) = 3,10 * \text{Cos}(10,3^\circ) \quad (6.1.11)$$

$$\Delta P_{a_{sh}} = \mathbf{3,05} \text{ (Ton/m)} \quad (6.1.12)$$

Componente sísmica del peso propio del muro:

$$W_{m_{hs}} = \Delta k_s * W_m = 0,146 * 18,0 = \mathbf{2,63} \text{ (Ton/m)} \quad (6.1.13)$$

$$\sum F_y = 0; \quad N_s - W_m - P_{av} - \Delta P_{a_{sv}} = 0$$

$$N_s = W_m + P_{av} + \Delta P_{a_{sv}} = 18,0 + 1,17 + 0,55 = \mathbf{19,72} \text{ (Ton/m)} \quad (6.1.14)$$

RESUMEN DE FUERZAS:

FUERZAS ESTÁTICAS (Ton/m)	FUERZAS SÍSMICAS (Ton/m)
$W_m = 18,0$	$W_{m_{hs}} = 2,63$
$P_a = 6,54$	$\Delta P_{a_s} = 3,10$
$P_{a_v} = 1,17$	$\Delta P_{a_{sv}} = 0,55$
$P_{a_h} = 6,44$	$\Delta P_{a_{sh}} = 3,05$
$N = 19,17$	$N_s = 19,72$

Figura 6-5 Resumen de fuerzas.

Ver [Figura 6.4](#).

$$\sum M_0 = 0;$$

$$N_s * X_s - W_m * \frac{B}{2} - (P_{a_v} + \Delta P_{a_{sv}}) * B + W_{m_{hs}} * \frac{H}{2} + P_{a_h} * \frac{H}{3} + \Delta P_{a_{sh}} * 2 * \frac{H}{3} = 0$$

$$X_s = 0,24 \text{ m}$$

La excentricidad e es:

$$e = \frac{B}{2} - X_s = 1,26 \text{ m}$$

$$e > B/6$$

$$1,26 \text{ m} > 0,5 \text{ m}$$

Es decir, la resultante $N_{s\acute{m}sica}$ cae fuera del tercio central de la base y ésta se encuentra comprimida en un 24% de su ancho (se admite hasta 20%) y la presión o fatiga máxima dinámica sobre el suelo es de:

$$\sigma_1 = \frac{2 * N_s}{3 \left(\frac{B}{2} - e \right)}$$

$$\sigma_1 = \frac{2 * 19,72}{3 \left(\frac{3}{2} - 1,26 \right)} = 54,8 \text{ (Ton/m}^2\text{)}$$

$$\sigma_1 < Q_{admisible \text{ dinámico}}$$

$$5,48 \text{ (Kgf/cm}^2\text{)} < 5,5 \text{ (Kgf/cm}^2\text{)}$$

6.1.3 Factores de seguridad

6.1.3.1 Volcamiento.

CASO ESTÁTICO.

$$F.S.\text{volcamiento}_{estático} = \frac{\sum \text{Momentos resistentes}}{\sum \text{Momentos volcantes}} \geq 1,5$$

$$\sum \text{Momentos resistentes} = W_m * \frac{B}{2} + P_{a_v} * B$$

$$\sum Mr = 18,0 * \frac{3}{2} + 1,17 * 3 = 30,51 \text{ (Ton * m)}$$

$$\sum \text{Momentos volcantes} = P_{a_h} * \frac{H}{3}$$

$$\sum Mv = 6,44 * \frac{5}{3} = 10,73 \text{ (Ton * m)}$$

$$F.S.\text{volcamiento}_{estático} = \frac{30,51}{10,73} = 2,84 \geq 1,5$$

CASO SÍSMICO.

$$F.S.\text{volcamiento}_{sismico} = \frac{\sum \text{Momentos resistentes}}{\sum \text{Momentos volcantes}} \geq 1,2$$

$$\sum \text{Momentos resistentes} = W_m * \frac{B}{2} + (P_{a_v} + \Delta P_{a_{sv}}) * B$$

$$\sum Mr = 18,0 * \frac{3}{2} + (1,17 + 0,55) * 3 = 32,16 \text{ (Ton * m)}$$

$$\sum \text{Momentos volcantes} = P_{a_h} * \frac{H}{3} + W_{m_{hs}} * \frac{H}{2} + \Delta P_{a_{sv}} * \frac{2}{3} * H$$

$$\sum Mv = 6,44 * \frac{5}{3} + 2,63 * \frac{5}{2} + 0,55 * \frac{2}{3} * 5 = 27,48 \text{ (Ton * m)}$$

$$F.S.\text{volcamiento}_{sismico} = \frac{32,16}{27,48} = 1,17 \approx 1,2 \geq 1,2$$

6.1.3.2 Deslizamiento

CASO ESTÁTICO.

$$F.S.\text{deslizamiento}_{\text{estático}} = \frac{\sum \text{Fuerzas resistentes horizontales}}{\sum \text{Fuerzas actuantes horizontales}} \geq 1,5$$

$$\sum \text{Fuerzas resistentes horizontales} = N * Tg \phi$$

$$\sum Fr = 19,17 * Tg 30^\circ = 11,07 \text{ (Ton)}$$

$$\sum \text{Fuerzas actuantes horizontales} = P_{a_h}$$

$$\sum Fa = 6,44 \text{ (Ton)}$$

$$F.S.\text{deslizamiento}_{\text{estático}} = \frac{11,07}{6,44} = 1,72 \geq 1,5$$

CASO DINÁMICO

$$F.S.\text{deslizamiento}_{\text{sísmico}} = \frac{\sum \text{Fuerzas resistentes horizontales}}{\sum \text{Fuerzas actuantes horizontales}} \geq 1,2$$

$$\sum \text{Fuerzas resistentes horizontales} = N_s * Tg \phi$$

$$\sum Fr = 19,72 * Tg 30^\circ = 11,38 \text{ (Ton)}$$

$$\sum \text{Fuerzas actuantes horizontales} = P_{a_h} + \Delta P_{a_s h} + W_{m_h s}$$

$$\sum Fa = 6,44 + 3,05 + 2,63 = 12,12 \text{ (Ton)}$$

$$F.S.\text{deslizamiento}_{\text{sísmico}} = \frac{11,38}{12,12} = 0,94 < 1,2$$

Por lo tanto, el muro frente a un sismo deslizaría horizontalmente, debido a que las fuerzas actuantes son mayores a las fuerzas resistentes. Esto se puede corregir con la inclusión de barras de acero verticales hundidas en el suelo, en la base del muro, que aumentan la resistencia al corte. Esta inclusión debe ser tanto dentro del cuerpo como basal. La introducción de las barras en el suelo y en la base debiese ser de no menos de 100 centímetros.

6.1.4 Refuerzo del muro

Para que cumpla con el factor de seguridad al deslizamiento para el caso sísmico, se considerará la inclusión de barras de acero de diámetro 25 milímetros de calidad A 640-420.

CORTE PARA BARRA DE ACERO A630-420H

Para el acero calidad A 640-420 se tiene que el esfuerzo límite de fluencia es:

$$\sigma_{fluencia} = 4200 \left(\text{Kgf}/\text{cm}^2 \right)$$

$$\sigma_{admisible} = 0,4 * \sigma_{fluencia}$$

$$\sigma_{admisible} = 1680 \left(\text{Kgf}/\text{cm}^2 \right)$$

Para una barra de acero de 25 milímetros de diámetro se tiene un área de:

$$A_{\phi 25} = \pi * r^2 = 4,91 \text{ (cm}^2\text{)}$$

Por lo tanto, la fuerza de corte admisible sobre la barra de acero es:

$$T_{adm} = \tau_{adm} * (0,9 * A_{\phi 25})$$

$$T_{adm} = 1680 * (0,9 * 4,91) = 7424 \text{ Kgf} = 7,4 \text{ (Ton)}$$

Si se considera la fuerza de corte a una profundidad bajo el coronamiento del muro de $H' = 4,75 \text{ metros}$, la fuerza horizontal será de:

$$P_a = \frac{1}{2} * k_a * \gamma * H'^2 * \text{Cos}(d) = \frac{1}{2} * 0,308 * 1,7 * 4,75^2 * \text{Cos}(10,3^\circ)$$

$$P_a = 5,81 \text{ (Ton/m)}$$

$$\Delta P_{as} = \frac{1}{2} * \Delta k_s * \gamma * H'^2 * \text{Cos}(d) = \frac{1}{2} * 0,146 * 1,7 * 4,75^2 * \text{Cos}(10,3^\circ)$$

$$\Delta P_{as} = 2,75 \text{ (Ton/m)}$$

El peso del muro a profundidad H' será de:

$$W'_m = \frac{H'}{0,25} * 5 * 180 = 17,1 \text{ (Ton/m)}$$

En el caso sísmico se tendrá una componente sísmica del peso propio del muro de:

$$W_{mhs} = \Delta k_s * W'_m = 0,146 * 17,1 = 2,5 \text{ (Ton/m)}$$

La suma de las fuerzas horizontales de corte es de:

$$P_a + \Delta P_{a_s} + W_{m_h_s} = 5,81 + 2,75 + 2,5 = \mathbf{11,06} \text{ (Ton/m)}$$

$$N_s = 19,72 \text{ (Ton/m)} \quad \text{y} \quad \delta = 10,3^\circ \text{ (sin cohesión entre pneus)}$$

La fuerza resistente es

$$T = 19,72 * \text{Tan}(10,3^\circ) = \mathbf{3,58} \text{ (Ton/m)}$$

$$F.S.\text{deslizamiento}_{sismico} = \frac{3,58}{11,06} = \mathbf{0,32} < \mathbf{1,2}$$

Valor muy bajo e inadmisibles, por lo que se calculará cada cuanto se necesita colocar barras de acero para cumplir con el F.S. mínimo al deslizamiento sísmico.

Se tiene que:

$$F.S.\text{deslizamiento}_{sismico} = \mathbf{1,2} = \frac{19,72 * \text{Tan}(10,3^\circ) + C}{11,06}$$

$$C = \mathbf{9,54} \text{ (Ton/m)}$$

Una barra de acero de Calidad A 640-420 y diámetro 25 milímetros, resiste una fuerza de corte de:

$$T_{adm} = 7,4 \text{ (Ton)}$$

Por lo tanto, se deben colocar

$$\text{Distanciamiento de barras de acero} = \frac{7,40}{9,54} = 0,77 \approx 0,75 \text{ (metros)}$$

Es decir, se deberá colocar una barra de acero cada 75 centímetros de largo de muro o mejor aún cada 60 centímetros, lo que equivale a colocar una barra cada un neumático, o se deben amarrar todos y cada uno de los neumáticos tanto vertical como horizontalmente unos con otros mediante, por ejemplo, cuerdas o tiras plásticas.

7 CÁLCULO DE COSTOS

A continuación se calcularán los costos para un muro de contención con neumáticos desechados con enfierradura de refuerzo y se comparará con un muro TEM y un muro tipo Cantilever, todos para una de altura de 5 metros, un largo de 5,4 metros y conteniendo un talud horizontal. El ancho del muro dependerá de cada tipo de muro y su correspondiente diseño.

Para todos los casos se considera un terreno existente con una pendiente de 60°.

7.1 MURO DE CONTENCIÓN CANTILEVER.

A continuación se presenta la cubicación para un muro de contención tipo Cantilever tipo A, con coeficiente de aceleración $C=0,20$ para una altura de 5 metros, según el Manual de carreteras Volumen 4, del año 2017 (Ministerio de Obras Públicas, 2017). (Ver [Anexo D](#)).

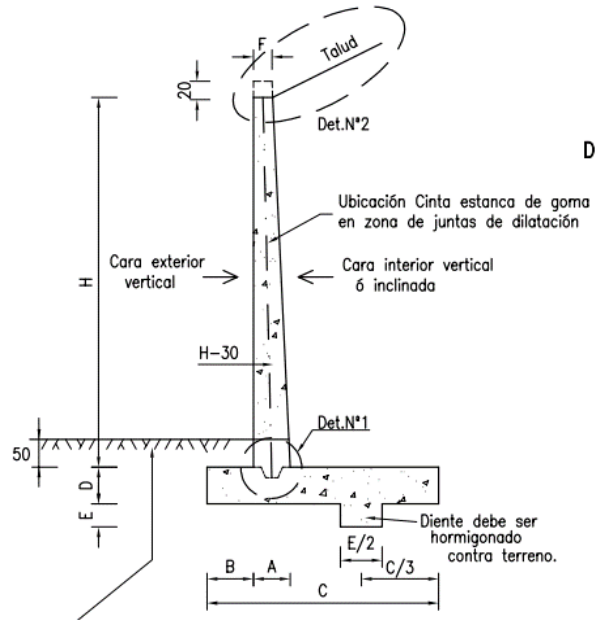


Figura 7-1 Dimensiones de muro de contención cantilever tipo A. (Ministerio de Obras Públicas, 2017).

Dimensiones en metros

H	5
L	5,4
A	0,5
B	0,85
C	3,15
D	0,55
E	0
F	0,3

Figura 7-2 Tabla de dimensiones: muro cantiléver, según Manual de carreteras v4 (Ministerio de Obras Públicas, 2017).

Las cubicaciones de hormigón tipo H-30, H-5 y enfierradura vienen dadas por el Manual de carreteras antes mencionado.

<i>Ítem</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>P. Unitario (CLP)</i>	<i>TOTAL (CLP)</i>
I	MOVIMIENTO DE TIERRAS				
1.1	Trazado y replanteo	ML	5,40	\$ 25.878	\$ 139.741
1.2	Excavación y retiro de excedentes	m ³	56,12	\$ 12.322	\$ 691.491
1.3	Escarpe perfilado del suelo natural y preparación del sello de fundación	m ²	46,98	\$ 7.150	\$ 335.907
1.4	Rellenos.	m ³	53,46	\$ 17.200	\$ 919.512
II	MURO DE CONTENCIÓN CANTILEVER				
2.1	Acero A 640	Kg	1376,5	\$ 1.260	\$ 1.734.340
2.2	H-5	m ³	0,9	\$ 64.537	\$ 55.760
2.3	H-30	m ³	20,5	\$ 102.952	\$ 2.107.016
2.4	Moldaje	m ²	72,9	\$ 16.650	\$ 1.213.286
III	DRENAJE				
3.1	Barbacanas PVC.	Unidad	4	\$ 1.288	\$ 5.152
				Costo Directo	\$ 7.202.204
				Utilidad 8%	\$ 576.176
				Gastos Generales 12%	\$ 864.265
				Costo Neto	\$ 8.642.645
				I.V.A 19%	\$ 1.642.103
				Costo total	\$10.284.748

Figura 7-3 Costos de muro de contención cantiléver.

7.2 MURO DE CONTENCIÓN DE TIERRA ARMADA

Se considera un muro de 5 metros de alto y de un ancho de 0,7 veces la altura (valor mínimo) lo cual equivale a 3,5 metros. Los refuerzos también deben cumplir con un mínimo de 0,7 veces la altura, por lo que se consideran de 3,5 metros.

Dimensiones del muro en metros	
<i>H</i>	5
<i>L</i>	5,4
<i>B</i>	3,5

Figura 7-4 Tabla de dimensiones del muro TEM.

Cada capa de tierra armada será de 0,25 metros de alto. Por lo que el muro está conformado por 20 capas de suelo confinado con geotextil. Habrán 20 capas de geotextil rodeando estas capas de tierra, con un traslape de 0,5 metros por lo que serán 22,95 metros cuadrados de geotextil por cada capa.

<i>Ítem</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>P. Unitario (CLP)</i>	<i>TOTAL (CLP)</i>
I	MOVIMIENTO DE TIERRAS				
1.1	Trazado, niveles	ML	5,40	\$ 2.043	\$ 11.032
1.2	Excavación y retiro de excedentes	m ³	43,65	\$ 12.322	\$ 537.827
1.3	Escarpe perfilado del suelo natural y preparación del sello de fundación	m ²	45,90	\$ 7.150	\$ 328.185
II	MURO TEM CON GEOTEXTIL				
2.1	Relleno material seleccionado	m ³	94,50	\$ 24.389	\$ 2.304.761
2.2	Geotextil	m ²	459	\$ 3.116	\$ 1.430.277
2.3	Paramento	m ²	30,24	\$ 25.461	\$ 769.939
				Costo Directo	\$5.382.021
				Utilidad 8%	\$ 430.562
				Gastos Generales 12%	\$ 645.843
				Costo Neto	\$6.458.425
				I.V.A 19%	\$ 1.227.101
				Costo total	\$7.685.526

Figura 7-5 Tabla de costos de muro de contención TEM

7.3 MURO DE CONTENCIÓN CON NEUMÁTICOS DESECHADOS

Para este tipo de estructura el ancho del muro debe ser como mínimo 0,8 veces la altura del muro, por lo que para una altura de muro de 5 metros se tiene una base de 4 metros. Como el ancho de cada neumático es de 0,6 metros, el ancho será de 4,2 metros. La configuración de cada malla de neumáticos será de 9 X 7. Cada malla tiene una altura de 0,25 metros por lo que en 5 metros de altura se tienen 20 mallas. El total del muro está conformado por 1260 neumáticos. En cuanto a las uniones de los neumáticos, en cada malla existirán 140 uniones como mínimo, por lo que en el total de mallas habrá 2.800 uniones de 2 metros cada una, lo que equivale a un total de 5600 metros en uniones de polipropileno.

<i>Ítem</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>P. Unitario (CLP)</i>	<i>TOTAL (CLP)</i>
I	MOVIMIENTO DE TIERRAS				
1.1	Trazado, niveles	ML	5,4	\$ 2.043	\$ 11.032
1.2	Excavación	m ³	39,0	\$ 12.322	\$ 480.202
1.3	Retiro de escombros	m ³	4	\$ 7.200	\$ 28.800
1.4	Escarpe perfilado del suelo natural y preparación del sello de fundación	m ²	49,68	\$ 7.150	\$ 355.212
1.5	Rellenos y compactados de material de la zona	m ³	68,04	\$ 9.000	\$ 612.360
				Costo parcial	\$ 1.487.607
II	MURO DE CONTENCIÓN CON NEUMÁTICOS DESECHADOS				
2.1	Neumáticos	Unidad	1260	\$ 326	\$ 410.760
2.2	Cuerda de polipropileno de 9 mm	m	5600	\$ 150	\$ 840.000
2.3	Geotextil	m ²	27	\$ 3.116	\$ 84.132
III	DRENAJE				
3.1	Material permeable	m ³	8,1	\$ 10.000	\$ 101.412
3.2	Tubo colector perforado PVC sanitario 110mm	ML	5,4	\$ 6.260	\$ 33.804
				Costo Directo	\$ 2.957.715
				Utilidad 10%	\$ 236.617
				Gastos Generales 12%	\$ 354.926
				Costo Neto	\$ 3.549.258
				I.V.A 19%	\$ 674.359
				Costo total	\$ 4.223.616

Figura 7-6 Tabla de costos de muro de contención con neumáticos desechados.

7.4 MURO CONTENCIÓN DE NEUMÁTICOS ARMADOS AL CORTE

Acorde a las dimensiones del muro y de los neumáticos mencionadas en el ejemplo de diseño, el muro estará conformado por 20 mallas horizontales dispuestas una sobre la otra, las cuales tendrán una altura total de 5 metros. En un ancho de 3 metros –ancho equivalente a 0,6 veces la altura del muro- habrá 5 neumáticos y en un largo de 5,4 metros habrá 9 neumáticos. Esto significa que cada malla será de 5x9, es decir, 45 neumáticos. Por lo tanto, en 20 mallas, habrá 900 neumáticos.

Cada neumático se considera de una altura de 25 centímetros, de un diámetro interior de 30 centímetros y de un diámetro exterior de 60 centímetros. Acorde a esto, en 5 metros de altura caben 20 neumáticos, es decir, que el muro está conformado por 20 mallas horizontales de neumáticos. El ancho de cada malla será de 5 neumáticos y para un largo de 5,4 metros.

En cuanto a las uniones, se consideran uniones dobles, de un largo de 2 metros por unión. En una malla existen 100 uniones, por lo que en 20 mallas habrá 4.000 metros lineales en uniones de polipropileno.

En cuanto a la enfierradura, para este muro se consideran refuerzos al corte cada 0,6 metros. Para 5,4 metros de largo se deberán colocar 9 barras de acero de diámetro 25 milímetros de 6 metros de largo cada una, de las cuales 1 metro va anclado al terreno con mortero tipo grout de anclaje, para lo cual se considera que se debe llenar un agujero de 50 milímetros de diámetro menos el volumen del acero.

Se considera una capa de geotextil a lo largo de todo el respaldo del muro. Además se considera una capa de material drenante a trasdós con un espesor de 0,30 metros

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario (CLP)	TOTAL (CLP)
I	MOVIMIENTO DE TIERRAS				
1.1	Trazado, niveles	ML	5,4	\$ 2.043	\$ 11.032
1.2	Excavación	m ³	39,0	\$ 12.322	\$ 480.202
1.3	Retiro de escombros	m ³	4	\$ 7.200	\$ 28.800
1.4	Escarpe perfilado del suelo natural y preparación del sello de fundación	m ²	44,82	\$ 7.150	\$ 320.463
1.4	Rellenos y compactados de material de la zona	m ³	48,6	\$ 9.000	\$ 437.400
				Costo parcial	\$ 840.498
II	MURO DE CONTENCIÓN CON NEUMÁTICOS ARMADO				
2.1	Neumáticos	Unidad	900	\$ 326	\$ 293.400
2.2	Acero Ø25 A 640	Kg	207,9	\$ 1.260	\$ 261.954
2.3	Grouting Anclaje	m ³	0,02	\$ 661.203	\$ 14.409
2.4	Cuerda de polipropileno de 9 mm	ML	4000	\$ 150	\$ 600.000
2.5	Geotextil	m ²	27	\$ 3.116	\$ 84.132
III	DRENAJE				
3.1	Material permeable	m ³	9,72	\$ 12.520	\$ 101.412
3.2	Tubo colector perforado PVC sanitario 110mm	ML	5,4	\$ 6.260	\$ 33.804
				Costo Directo	\$2.229.609
				Utilidad 8%	\$ 178.369
				Gastos Generales 12%	\$ 267.553
				Costo Neto	\$2.675.531
				I.V.A 19%	\$ 508.351
				Costo total	\$3.183.881

Figura 7-7 Muro de contención con neumáticos armados al corte.

7.5 RESUMEN

Tipo muro	Costo total (CLP)	Costo total (UF)
<i>Cantilever</i>	\$ 10.284.748	381,2
<i>TEM</i>	\$ 7.685.526	284,9
<i>Pneus</i>	\$ 4.223.616	156,5
<i>Pneus armado</i>	\$ 3.183.881	118,0
<i>Valor UF:</i>	\$ 26.979,46	Fecha UF: 16-04-2018

Figura 7-8 Tabla de costo total por tipo de muro.

De los muros tradicionales se observa que el de mayor costo es el muro de hormigón armado tipo cantiléver.

Dentro de los muros de contención con neumáticos desechados, la versión armada al corte fue la de menor costo, con una diferencia de 25% más barato que el muro de neumáticos sin armar. Esto se debe a que el muro con neumáticos armado al corte posee una sección más esbelta, por lo que esto se traduce en menores cantidades de neumáticos y uniones a utilizar.

<i>Variación</i>	<i>Cantilever</i>	<i>TEM</i>	<i>Pneus</i>	<i>Pneus armado</i>
<i>Pneus</i>	59%	45%	-	-25%
<i>Pneus armado</i>	69%	59%	25%	-

Figura 7-9 Tabla comparativa de variación porcentual de costos totales entre muros.

Ambas opciones de muros de contención con neumáticos presentan variaciones de importancia con respecto a muros tipo cantiléver y TEM. En esta oportunidad la inclusión de barras de acero para armar el muro de contención con neumáticos se traduce en un muro más confiable y más barato, en zonas con disponibilidad de material.

8 CONCLUSIONES

Los muros de contención contruidos con neumáticos desechados son una buena alternativa para la construcción de estructuras de contención porque aúnan la estabilidad mecánica y un menor costo económico, en comparación a otros sistemas de contención tradicionalmente utilizados; la tierra que se utiliza puede ser residual obtenida desde el mismo lugar del emplazamiento del muro, y los neumáticos son desechos de bajo o nulo valor comercial. Además, la construcción de este tipo de estructuras permite consumir un desecho no biodegradable y que ocasiona problemas medioambientales debido a que son potencialmente inflamables, focos de enfermedades y porque ocupan gran espacio. Esta técnica ha sido utilizada en diversas partes del mundo encontrándose diferentes estudios que avalan su factibilidad.

En cuanto al método constructivo, este es tecnológicamente simple por lo que no se requiere de mano de obra calificada y permite que pueda ser transferida a colectivos de autoconstrucción. No obstante, en muchos de los casos en donde se encontraron muros de contención de este tipo en ciertas zonas del país, se observó que estos fueron contruidos de manera incorrecta, poniendo en riesgo la seguridad de los lugareños y la estabilidad del lugar. Ante esto se invita a seguir las recomendaciones de construcción mencionadas en esta memoria, las que en síntesis son:

- El suelo de apoyo debe ser competente, por lo que no se debe fundar en terrenos muy deformables o muy sueltos. No son necesarias grandes fundaciones ni mejoramientos de suelos de baja calidad. Se recomienda su construcción sobre el nivel de aguas debido a que se desconoce el impacto de los neumáticos sobre éstas;
- Formación de mallas con neumáticos aro 14 u otra medida pero de tamaño uniforme;
- Unión de los neumáticos mediante unión competente. Mediante cuerdas de polipropileno: tres vueltas para los elementos frontales y dos para los restantes u otra unión competente. Adicionalmente, dos nudos también pueden aumentar la rigidez del sistema. En lo posible, realizar unión vertical de los elementos;
- Se recomienda la utilización de enfierradura o amarre vertical para cada uno de los neumáticos, para armar estas estructuras al corte directo debido a la naturaleza sísmica del país.
- Relleno y compactación del material de relleno;
- Posicionamiento de las mallas unas sobre otras, con desplazamiento relativo hacia el talud entre cada malla de 4 centímetros para una inclinación de 80°, esto considerando neumáticos de unos 20 centímetros de ancho. Todo esto debe ser complementado por un sistema de drenaje adecuado.
- En cuanto al dimensionamiento, para el método suelo reforzado con neumáticos se recomienda que la altura sea de **1,25** veces la base como máximo, o dicho de otra forma, la base debe ser de a lo menos **0,8** veces la altura. Para el método reforzado

con acero, la base deberá ser de **0,6** veces la altura como mínimo, con un anclaje de la enfierradura mínimo de **1** metro.

Cabe mencionar como desventajas de estos muros que se necesita de amplio espacio para su construcción (sobre todo para la variante sin armar al corte), poseen bajo valor estético en bruto y son residuos poco *revalorizados* en el país.

Desde el punto de vista económico, estos muros presentan una solución de bajo costo tanto ambiental como económico. El comparativo de costos muestra que para ambas variantes de muros de contención con neumáticos desechados se obtienen costos menores al ser comparadas con muros de hormigón armado tipo cantiléver y muros TEM. Entre muros de neumáticos, la variante armada al corte con acero muestra ser, además de la mejor en términos técnicos, también la más barata, por lo que se convierte en una buena alternativa en donde el emplazamiento de obra esté próximo a centros de acopio de neumáticos desechados y del resto de los materiales. De lo contrario podría existir un aumento de costos asociados al transporte.

Debido a la incidencia en la rigidez y en el costo total del muro que tienen los elementos de unión, se podrían ensayar diferentes materiales que sean competentes. Además, se pueden experimentar otros cortes y configuraciones de malla con el neumático, mediante modificaciones que signifique mejoras en el diseño y/o aumente su valor estético. También se podría explorar con otros conectores al corte para aumentar la resistencia al corte del muro y variar el relleno del neumático con el fin de aumentar la rigidez del muro.

Los resultados de los ensayos de laboratorio al esfuerzo de corte entre probetas de neumáticos mostraron para el caso de roce neumático-neumático un ángulo de fricción de **36,5°** y cohesión nula; para el caso de roce neumático-neumático con arena fina entre estos, el ángulo de fricción disminuyó a **24,6°** y cohesión cercana a cero. En otros estudios realizados a escala natural (Rodríguez, O., 2016) se encontraron otras curvas para el esfuerzo de corte que incluyen cohesión.

Ante los pocos estudios en el país, se recomienda utilizar los resultados sin cohesión de esta memoria. Además, se recomienda reforzar los muros al corte. No obstante, cabe mencionar que estos resultados tienen menor precisión aquellos que se pueden obtener entre neumáticos rellenos con suelo compactado a escala natural, en donde puede existir cohesión en el conjunto. Por lo tanto, estos estudios por sí solos, difícilmente lograrán realizar una modelación ajustada a la realidad del país, por lo que se deben complementar con más estudios y experiencias que permitan una caracterización más completa de este tipo de muros.

Finalmente, desde el punto de vista ingenieril, las propiedades de los neumáticos hacen que estos sean atractivos para diversos usos. En vista de la acelerada tasa de desechos generados anualmente tanto en Chile como en otros países, se transforma en una necesidad para las sociedades encontrar un nuevo valor de uso a los desechos no biodegradables, lo que se convierte en un reto y en un deber para las diferentes disciplinas de la ingeniería y la ciencia, para aspirar a tener nuestro *oikos* -es decir nuestro hogar- limpio y menos

contaminado por un lado, y por otro, para adquirir paulatinamente un modo de vida que sea sostenible para las generaciones venideras.

9 BIBLIOGRAFÍA

94diez.com (2014). Cárdenas denunció el derrumbe de un muro de contención hecho con neumáticos. [En línea]. Disponible en: <<http://www.94diez.com/noticias/leer/5075-c-rdenas-denunci-el-derrumbe-de-un-muro-de-contenci-n-hecho-con-neum-ticos.html>> [Consulta: 13 Abril. 2017].

Ab-Malek, K. and Stevenson, A. (1986). The effect of 42 year immersion in sea-water on natural rubber. [En línea] Springer Link. Disponible en: <<https://link.springer.com/article/10.1007/BF01144713>> [Consulta: 3 Diciembre 2016].

Braja M., D. (2001). Principios de ingeniería de cimentaciones. 4th ed. México: Thomson Editores.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Resolución 222. [En línea] Disponible en: <<https://www.leychile.cl/N?i=174193&f=2000-08-19&p=>> [Consulta: 15 Agosto 2017].

[Sagarpa.gob.mx](http://www.sagarpa.gob.mx). Muros de contención. [En línea] <<http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasCOUSSA/Muros%20de%20contenci%C3%B3n.pdf>> [Consulta: 15 Abril 2016].

Cámara de la Industria del Neumático de Chile A.G. (2013). Evaluación de impacto APL Prevención y valorización de neumáticos fuera de uso. [ebook] Disponible en: <<http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2015/07/Evaluacion-APL-neumaticos-2013.pdf>> [Consulta: 2 Marzo 2017].

Código de normas y especificaciones técnicas de obras de pavimentación. (2016). [ebook] Santiago: MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO, pp.409-410. <http://www.minvu.cl/aopensite_20160519150905.aspx> [Consulta: 9 Junio 2017].

Comuntierra.org. (s.f.). Común Tierra | Comunidades y Proyectos | Earthship Chile. [En línea] Disponible en: <http://comuntierra.org/site/comunidades.php?id=154&id_idioma=3> [Consulta: 13 Julio. 2017].

Consejo Nacional de Producción Limpia. (2009). APL Prevención y Valorización de Neumáticos Fuera de Uso. [En línea] Disponible en: <[http://www.cpl.cl/Acuerdos\(APL\)/apl.php?id=23](http://www.cpl.cl/Acuerdos(APL)/apl.php?id=23)> [Consulta: 15 Mayo 2017].

Ecoflex (s.f.) E Wall by Ecoflex International [Fotografía] Disponible en <<http://www.ecoflex.com.au/e-wall.html>> [Consulta: 16 Mayo 2016].

Elías Castellas, X. (2000). Reciclaje de residuos industriales. Madrid: Díaz de Santos, pp.376-377.

Erosion.com (2013) Presentaciones [Fotografía] Disponible en : <<http://www.erosion.com.co/presentaciones/category/45-tomo-i.html#>> [Consulta: 15 de Junio de 2016].

Esbelin, G., Long, N, Ursat, P. (1993). Pneusol at the Bussang Pass. Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. [En Línea] Disponible en: <<http://scholarsmine.mst.edu/icchge/3icchge/3icchge-session13/10>> [Consulta: 17 de Mayo 2017].

Fontanese, M. (2010). A STABILITY ANALYSIS OF THE RETAINING WALLS OF MACHU PICCHU. BS in Civil Engineering, Master of Science. University of Pittsburgh.

Gerscovich, D., Medeiros, L., & Sayão, A. (2001). Field pullout tests of scrap tire reinforcement layers under different soil surcharges. XV International Conference On Soil Mechanics And Geotechnical Engineering. Istanbul, Balkema.

Gerscovich, D., Sieira, A., Medeiros, L., & Sayão, A. (2004). Scrap tire: a civil engineering material. International Journal Of Engineering.

Huat, B., Aziz, A. and Loh, W. (2008). Application of Scrap Tires as Earth Reinforcement for Repair of Tropical Residual Soil Slope. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, [online] 13, pp.1-13. <<http://www.ejge.com>> [Consulta: 8 Julio 2016].

Humphrey, D. (2011). Civil Engineering Applications Using Tire-Derived Aggregate (TDA). [ebook] California: California Integrated Waste Management Board. Disponible en: <<http://www.calrecycle.ca.gov/publications/Documents/tires/2011038.pdf>> [Consulta: 29 Marzo 2017].

Jones, C. (1996). Earth reinforcement and soil structures. Londres: Thomas Telford.

Juárez Badillo, E. and Rico Rodríguez, A. (2009). Mecánica de suelos (tomo 2). 2da ed. México: Limusa.

Kerisel, J. History of retaining wall design. En: Conferencia “Retaining Structures” organized by institution of civil engineers and held at Robinson College, Cambridge, Inglaterra. Editado por C.R.I. CLAYTON. Londres. Thomas Telford, 1993. pp. 1-14.

Killowen House (2017) Newgrange from air [Fotografía] Disponible en: <<http://killowenhouse.com/things-to-do/castles-historical-places/>> [Consulta: 15 de Febrero de 2016].

Lambe, T., Whitman, R. y Jiménez Salas, J. (2009). Mecánica de suelos. México: Limusa.

Long, N. (1990). Études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées (pp. 6-21). París: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Lowtechmagazine.com (2007). Calienta tu vivienda con neumáticos y tierra [Fotografía]. Disponible en: <<http://www.es.lowtechmagazine.com/2007/12/caldea-tu-casa.html>>

Medeiros, L., Vinod, G., Gerscovich, D., Sayão, A., Andrade, M. (1999). Analysis of the instrumentation of a scrap tire reinforced retaining wall. 11th Panamerican conference on soil mechanics and geotechnical engineering – vol I pp 19-25.

Ministerio de Obras Públicas (Chile). Manual de Carreteras, Volumen N°3: Instrucciones y Criterios de uso. 2017. 1546 p.

Ministerio de Obras Públicas (Chile). Manual de Carreteras, Volumen N°4: Planos de obras tipo. 2017. 408 p.

Neumaticosmedica.com.ar (s.f.) Partes de un neumático [Fotografía] Disponible en: <<http://www.neumaticosmedica.com.ar/partes.html>> [Consulta: 24 de Mayo de 2016].

Instituto Nacional de Normalización (Chile). Mecánica de suelos – Métodos de ensayo – Corte directo de suelos bajo condición consolidada drenada. Nch3085 Of. 2007. 17 p.

Instituto Nacional de Normalización (Chile). Diseño sísmico de edificios. Nch433 Of. 1996. 51 p.

O'Shaughnessy, V. (1997). Reinforcement of earth structures using scrap tires. B. Sc. (Geology), B.A.Sc. (Civil), M.A.Sc. University of Ottawa.

Polambiente. (s.f.). Quienes somos. [En línea] Disponible en: <<http://www.polambiente.com/nosotros>> [Consulta: 21 Mayo 2017].

Procedimientosconstruccion.blogs.upv.es (2017). Procedimientos de construcción. [En línea] Disponible en: <<http://procedimientosconstruccion.blogs.upv.es/>> [Consulta: el 11 Enero. 2016].

Rodríguez González, O. (2016). Estandarización de técnicas de diseño y construcción de muros de tierra reforzada con llantas de desecho. Universidad Nacional de Colombia.

Scrap tire derived geomaterials. Opportunities and challenges. (2007). Yokosuka, Japan: Hemanta Hazarika & Kazuya Yasuhara.

Sieira, A., Sayão, A., de Medeiros, L. & Gerscovich, D. (2001). Estabilización de Taludes con Muros de Neumáticos. En: Sopena, L.V simposio nacional sobre taludes y laderas inestables. Madrid, CEDEX, III, pp.1061-1070.

Simonaitis, P. (2014) Earthship to Buffalo: couple carves space into mountainside [Fotografía] Disponible en <http://trib.com/news/state-and-regional/earthship-to-buffalo-couple-carves-space-into-mountainside/article_6dd633ab-f4fe-5193-b662-a86ee767b216.html> [Consulta: el 16 de Mayo. 2016].

Suárez Díaz, J. (1998). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Bucaramanga, Colombia.: Ingeniería de Suelos Ltda., pp.477-539.

Tierra-armada.cl (s.f.) Sistema [Fotografía]. Disponible en <<http://www.tierra-armada.cl/sistema.html>> [Consulta: 15 de Agosto de 2016].

Tirecgroup.co.uk (2011) Case Studies [Fotografía] Disponible en: <<http://www.tirecgroup.co.uk/casestudies.htm>> [Consulta: 20 de Abril 2016].

Tnu.es. (s.f.). Tratamiento de Neumáticos Usados - TNU. [En línea] Disponible en: <<http://www.tnu.es/w/128/aislante-acustico-de-ultima-generacion-en-viviendas/lang/es>> [Visitado el 1 Abril 2017].

Uned.es. (s.f.). Los residuos urbanos y su problemática. [En línea] Disponible en: <http://www2.uned.es/biblioteca/rsu/pagina1.htm#epig_2> [Consulta: 7 Noviembre 2016].

USM.cl (2013). Universidad Técnica Federico Santa María avanza en negociaciones colectivas [Fotografía]. Disponible en <<http://www.noticias.usm.cl/2013/12/17/universidad-tecnica-federico-santa-maria-avanza-en-negociaciones-colectivas/>> [Consulta: 15 de Enero 2017].

Ventana-verde.blogspot.cl, (2014) Incendio de Valparaíso, una propuesta [Fotografía]. Disponible en: <<http://ventana-verde.blogspot.cl/2014/07/incendio-de-valparaiso-una-propuesta.html>> [Consulta: 13 de Octubre 2016].

(Wikipedia, 2017) Reef knot [Fotografía]. Disponible en: <https://en.wikipedia.org/wiki/Reef_knot> [Consulta: 25 de Octubre 2016].

Wilson, E. O. (1971) The Insect Societies. 7ma edición. Cambridge, Mass: Harvard University Press, p. 230

WYMCC (1997), Reuse of worn tyres in Civil Engineering construction. Report prepared for the West Yorkshire County Council.

Yantek [Omar de la Rosa]. (4 abr. 2014). Sistema Yantek 2013 [Archivo de video]. Recuperado de <<https://www.youtube.com/watch?v=Sqj8O1wkIw>>

Yantek. (s.f.). Nosotros. [En línea] Disponible en: <<http://www.yantek.com/>> [Consulta: 17 Mayo 2017].

10 ANEXOS

10.1 ANEXO A: RESULTADOS DE ENSAYO DE CORTE DIRECTO SOBRE DOS NEUMÁTICOS RELLENOS CON SUELO COMPACTADO A ESCALA REAL.

Resultados de Rodríguez González, O. (2016). *Estandarización de técnicas de diseño y construcción de muros de tierra reforzada con llantas de desecho*. Universidad Nacional de Colombia.

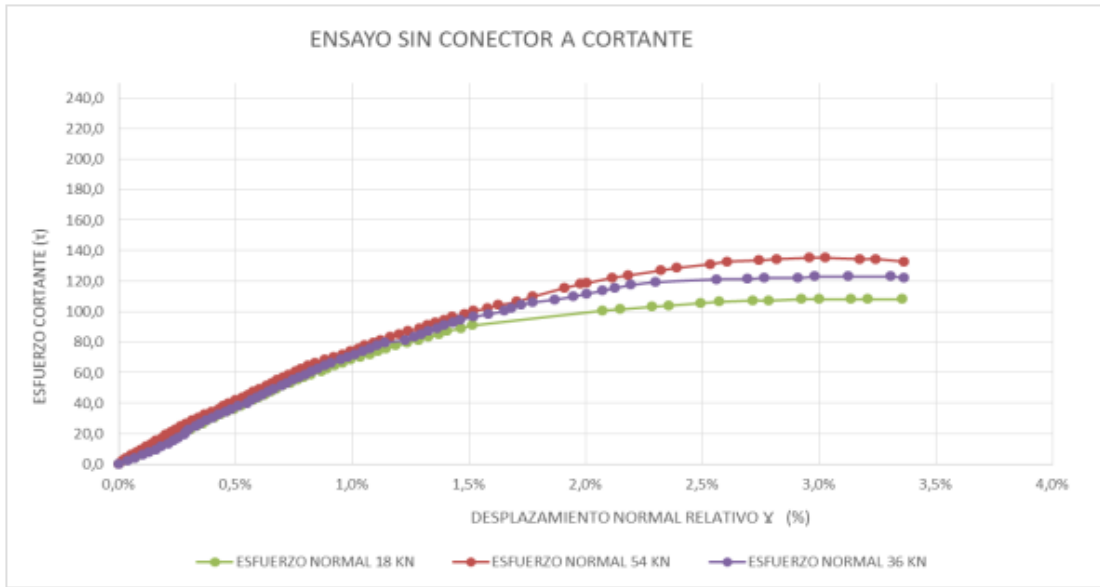


Figura 10-1 Curva de Esfuerzo Cortante Vs Desplazamiento Normal Relativo de Llanta con el Material de Lleno.

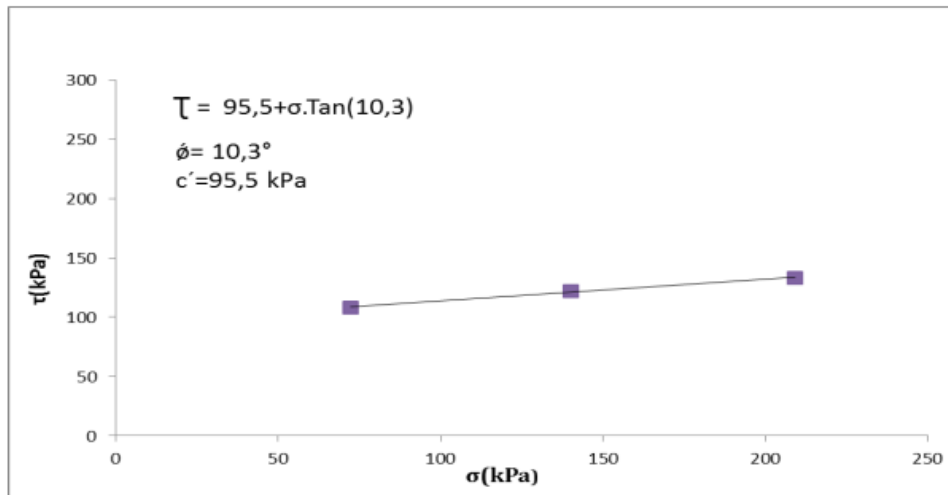


Figura 10-2 Curva de Esfuerzo Cortante Vs Esfuerzo Normal del Conjunto Llanta con el Material de Lleno

Comparación de los distintos ensayos.

A continuación se muestra la gráfica de la aplicación de la carga normal de 18 kN, 36 kN y 54 kN con los esfuerzos para diferentes ensayos sin conectores al corte y con conectores al corte en distintas cantidades y materialidades.

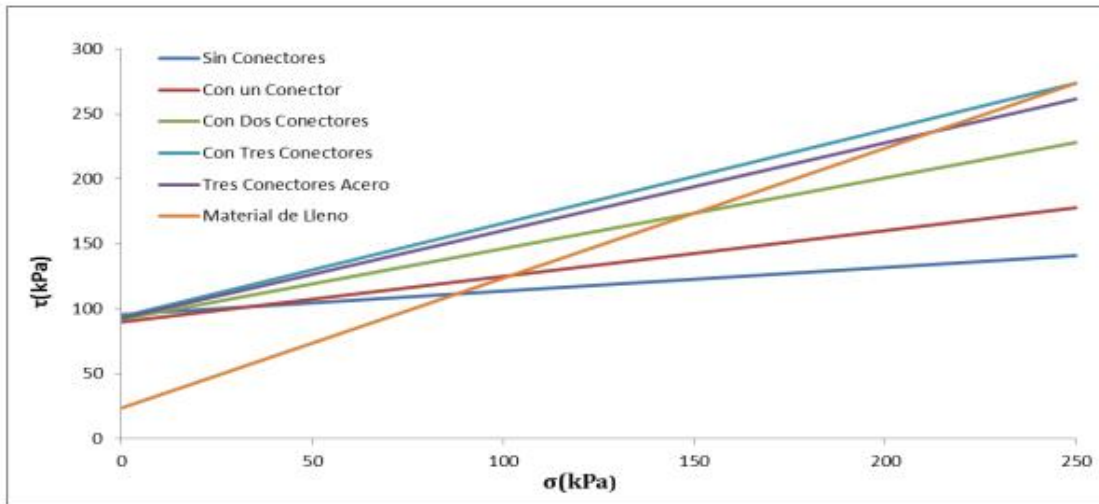


Figura 10-3 Curva de Esfuerzo Cortante Vs Esfuerzo Normal con la combinación de los conectores a cortante.

10.2 ANEXO B: ALGUNOS RESULTADOS DE ENSAYOS DE EXTRACCIÓN SOBRE NEUMÁTICOS.

10.2.1 (Long, 1990).

Número de elementos	Banda de rodadura sobre su borde						Banda lateral			
Fuerza máxima (kN)	>44.3	>68.0	>44.4	>40.9	>38.2	>56.0	>43.0	54	>57.5	>33
Desplazamiento frontal (mm)	>430	>260	>240	>200	>240	>135	>360	460	>385	>255
Tracción para desplazamiento de 100 mm (kN)	26	45	21.5	26.2	21.2	49.5	18	25	22.5	20

Número de elementos	Banda de rodadura plana				Banda de rodadura sobre su borde			Banda lateral	
Fuerza máxima (kN)	31	49	68	33.5	32	41	19.5	30	>33.5
Desplazamiento frontal (mm)	120	290	440	170	320	620	70	400	>290
Tracción para desplazamiento de 100 mm (kN)	30	39	36	25	19	16	19	20	25

Resultados de ensayos son para refuerzos de neumaticos bajo 1 m de altura de sobre carga

Figura 10-4 Ensayos de extracción sobre neumáticos.

10.2.2 (Gerscovich, Medeiros, & Sayão, 2001)

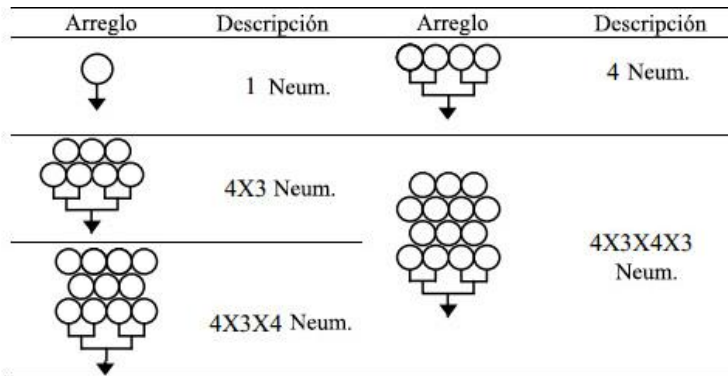


Figura 10-5 Programa de ensayos de extracción.

Arreglo	H* (m)	P _f ** (kN)	P _f / # Neum. (kN)	Δ _f *** (m)
1 N. C.	0.5	17.2	17.2	0.11
	1.5	36.5	36.5	0.20
	2.5	58.8	58.8	0.15
1 N. Com.	1.0	22.6	22.6	0.12
	2.5	54.3	54.3	0.20
4 N. C.	0.5	34.8	8.7	0.18
	1.5	68.5	17.1	0.18
	2.5	123.2	30.8	0.24
4 N. Com.	1.0	24.5	6.1	0.24
	2.5	108.9	27.2	0.30
4 X 3 N. C.	0.5	37.4	8.7	0.20
	1.5	88.2	17.1	0.33
	2.5	127.6	30.8	0.40
4 X 3 N. Com.	1.0	50.0	7.1	0.34
	2.5	128.7	18.4	0.40
4 X 3 X 4 (N. C.)	0.5	55.1	5.0	0.36
	1.5	98.1	8.9	0.47
Suelo - Cemento	1.5	103.3	9.4	0.43
4 X 3 X 4 (N. Com.)	1.0	60.0	5.5	0.56
	2.5	142.2	12.5	0.54
4 X 3 X 4 X 3 (N. C.)	0.5	78.5	5.6	0.40
	1.5	104.2	7.4	0.54
Placa de hormigón	1.5	98.5	7.0	0.34
4 X 3 X 4 X 3 (N. Com.)	1.0	78.5	5.6	0.75

* H = Superficie de sobrecarga
** P_f = Fuerza de extracción en la falla
*** Δ_f = Desplazamiento frontal en la falla

Notas:
N. C. : Neumático cortado
N. Com. : Neumático completo

Figura 10-6 Resultados de ensayos de extracción.

10.3 ANEXO C: EJEMPLO DE MURO CON NEUMÁTICOS MODIFICADOS.

10.3.1 Empresa Yantek: imágenes del proceso constructivo del muro con neumáticos modificados.



Figura 10-7 Modificación de los neumáticos.



Figura 10-8 Colocación y compactación.



Figura 10-9 Reutilización de bandas laterales.



Figura 10-10 Muro a medio construir y muros finalizados.

Imágenes cortesía de empresa YANTEK.

10.4 ANEXO D: MANUAL DE CARRETERAS

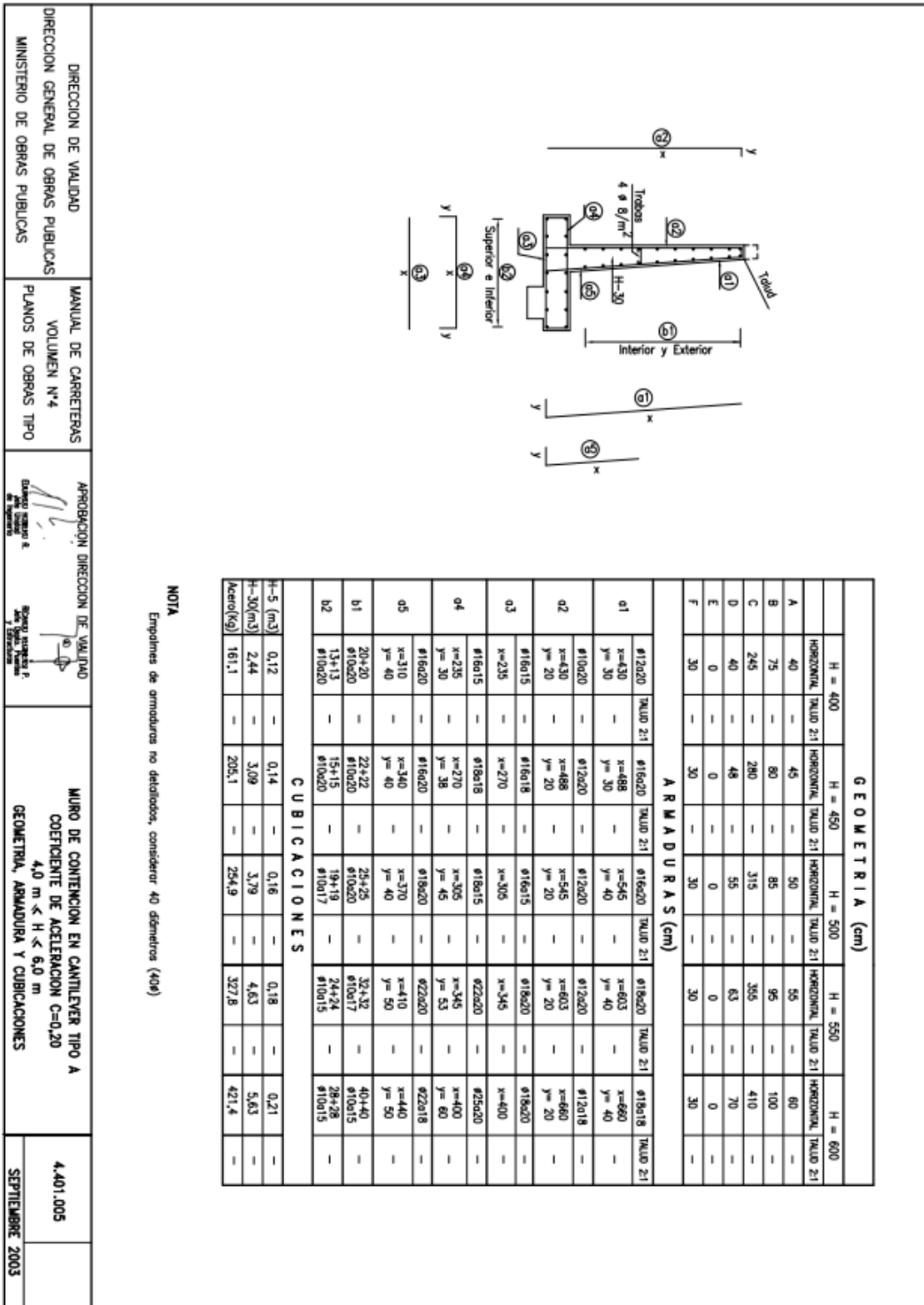


Figura 10-11 Plano de obra tipo para Muro de contención cantilever tipo A