



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**PERMEABILIDAD EN MUROS DE PARAMENTO PARA LA
ESTABILIZACIÓN DE TIERRA ARMADA**

Brandon Enrique González Pineda

Asesorado por la Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol

Guatemala, noviembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PERMEABILIDAD EN MUROS DE PARAMENTO PARA LA
ESTABILIZACIÓN DE TIERRA ARMADA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

BRANDON ENRIQUE GONZÁLEZ PINEDA

ASESORADO POR LA INGA. DILMA YANET MEJICANOS JOL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

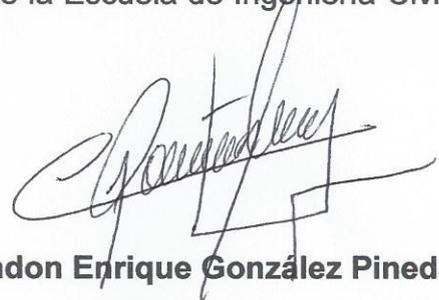
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila
EXAMINADOR	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PERMEABILIDAD EN MUROS DE PARAMENTO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE TIERRA ARMADA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
el 25 de octubre de 2016.



Brandon Enrique González Pineda



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Guatemala, 30 de agosto de 2018

Ingeniero
José Gabriel Ordoñez Morales
Área de Materiales y Construcciones Civiles
COORDINADOR

Ingeniero Ordoñez

Me dirijo a usted para informarle, que he revisado el trabajo de graduación: **PERMEABILIDAD EN MUROS DE PARAMENTO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE TIERRA ARMADA**, elaborado con el estudiante universitario Brandon Enrique González Pineda, quien contó con la asesoría de la suscrita.

Considerando que el trabajo desarrollado por el estudiante universitario González Pineda, satisface los requisitos exigidos en el reglamento de graduación, por lo cual recomiendo su aprobación.

Atentamente,

"Id y enseñad a todos"


Inga. Civil Dilma Yanet Mejicanos Jol
Col. 5947
ASESORA

Dilma Y. Mejicanos Jol
Ingeniera Civil
Col. 5947



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
12 de octubre de 2018

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **PERMEABILIDAD EN MUROS DE PARAMENTO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE TIERRA ARMADA** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Brandon Enrique González Pineda quien contó con la asesoría de la Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/mrrm.

Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen de la Asesora Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Brandon Enrique González Pineda PERMEABILIDAD EN MUROS DE PARAMENTO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE TIERRA ARMADA da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Fruto


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
DIRECTOR
FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, noviembre 2018

/mrm.

Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
de Guatemala

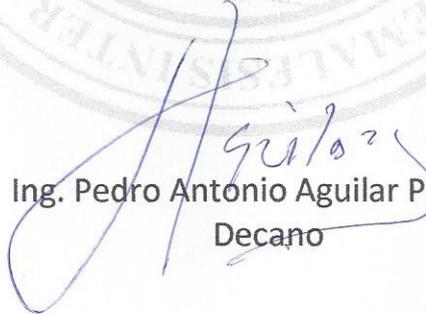


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 474.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **PERMEABILIDAD EN Muros DE PARAMENTO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE TIERRA ARMADA**, presentado por el estudiante universitario: **Brandon Enrique González Pineda**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, noviembre de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** El maestro por excelencia.
- Mi padre** Lic. César Augusto González Enríquez, por ser mi ejemplo a seguir y el hombre a quien más admiro. Soy sangre de tu sangre y este éxito también es tuyo porque lo gané para los dos.
- Mi madre** Licda. Herlin Maribel Pineda González de González, siempre fuerte y hermosa, eres la flor más bella de mi jardín y la que el tiempo no ha podido marchitar. Gracias por todo tu apoyo.
- Mis hermanas** Licda. Carol Julissa González Pineda, por ser mi compañera de batalla desde antes de nacer, eres una gran mujer y una abogada exitosa. A Herlin Paola y Cristy Sofía González Pineda a ustedes les dedico, especialmente, todo mi esfuerzo.
- Mis abuelos** Cristobal González (q. e. p. d) y Lucía Enríquez. Cayetano Pineda y Olga González, por sus enseñanzas y buenos consejos.

Mis tíos

Gracias por ayudar a dirigirme en un camino de bien.

Mis primos

Por ser como mis hermanos.

Jalpatagua

Mi tierra preciosa.

AGRADECIMIENTOS A:

Facultad de Ingeniería	Por ser mi casa de estudios en mi formación académico-profesional.
Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol	Por su apoyo en la realización de este trabajo de graduación.
Mis amigos	Por su compañía y amistad.
Sección de Agregados, Concretos y Morteros	Por permitirme formar parte del equipo de trabajo.
Universidad de San Carlos de Guatemala	A la tricentenaria, gloriosa y grande entre las del mundo. <i>Vivat Academia.</i>

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Usos del concreto permeable	1
1.1.1. Muros de contención de concreto ligero	3
1.1.2. Sistemas de drenaje para agua de lluvia	4
1.1.3. Pavimentos para áreas de estacionamiento	5
1.1.4. Carreteras.....	7
1.1.5. Otros estudios realizados con concreto permeable.....	8
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. Tipos de suelos en función de absorción y retención de agua.....	11
2.1.1. Acuíardo	13
2.1.2. Acuícludo	13
2.1.3. Acuífugo	13
2.2. Muros de paramento	14
2.3. Sistema de tierra armada	16

3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	19
3.1.	Ensayos de agregados utilizados para la elaboración de concreto permeable, según la Norma NTG 41007 h1 (ASTM C-33).....	19
3.1.1.	Cemento.....	19
3.1.2.	Agregado fino.....	20
3.1.3.	Agregado grueso.....	21
3.2.	Diseño y proporción del concreto permeable	23
3.2.1.	Ejemplo ilustrativo para el diseño de mezcla.....	24
3.3.	Propuesta de la geometría de las placas	26
3.4.	Ensayos de concreto fresco	30
3.4.1.	Revenimiento	30
3.4.2.	Peso volumétrico.....	31
3.4.3.	Elaboración de cilindros	34
3.5.	Ensayos de concreto endurecido	37
3.5.1.	Ensayo a compresión.....	37
3.5.2.	Ensayo a flexión	39
3.5.3.	Permeabilidad	41
3.6.	Ensayos de suelos	44
3.6.1.	Límites de Atterberg	44
3.6.1.1.	Límite líquido (LL).....	45
3.6.1.2.	Límite plástico (LP).....	45
3.6.1.3.	Índice de plasticidad (IP)	46
3.6.2.	Corte directo.....	47
3.7.	Construcción a escala del muro	47
3.7.1.	Costos	61
4.	RESULTADOS.....	63
4.1.	Resumen de resultados obtenidos.....	63

4.2.	Índice de permeabilidad.....	64
4.3.	Funcionalidad del manejo de escorrentía.....	65
4.4.	Ejemplo ilustrativo para el diseño de un muro de paramento con concreto permeable	66
4.5.	Análisis y comparación de resultados	73
CONCLUSIONES		75
RECOMENDACIONES.....		77
BIBLIOGRAFÍA.....		79
ANEXOS.....		81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Concreto permeable en jardín	3
2.	Estacionamiento de concreto permeable	6
3.	Pavimento a color de concreto permeable	7
4.	Hombros en carretera de concreto permeable	10
5.	Agua subterránea.....	12
6.	Fachada de muros de paramento	15
7.	Detalle del muro de tierra armada.....	17
8.	Detalle de las placas en centímetros.....	26
9.	Detalle de la placa.....	27
10.	Moldes para las placas.....	28
11.	Instalación de flejes.....	28
12.	Fabricación de placas	29
13.	Placas de concreto permeable	29
14.	Curado de las placas de concreto permeable	30
15.	Procedimiento del ensayo	31
16.	Peso unitario y porcentaje de vacíos del concreto permeable	34
17.	Elaboración de cilindros	35
18.	Cilindros de 150 mm X 300 mm	36
19.	Curado de cilindros	36
20.	Aplicación de carga a compresión	38
21.	Aplicación de carga a flexión.....	41
22.	Placa para prueba de infiltración	42
23.	Ensayo de permeabilidad.....	43

24.	Límites de Atterberg.....	45
25.	Muestra de suelo	47
26.	Ubicación para el montaje del muro.....	50
27.	Excavación	50
28.	Solera de nivelación.....	51
29.	Orden de instalación del muro	52
30.	Verificación de plomo y nivel	52
31.	Nivelación de la primera fila del muro	53
32.	Instalación de la primera fila del muro	53
33.	Instalación del drenaje francés	54
34.	Estabilización del suelo con cal	55
35.	Instalación de primera cama de flejes.....	55
36.	Instalación de la segunda fila del muro	56
37.	Instalación de segunda cama de flejes	56
38.	Instalación de la tercera fila del muro	57
39.	Instalación de tercera cama de flejes.....	57
40.	Instalación de la cuarta fila del muro.....	58
41.	Instalación de cuarta cama de flejes.....	58
42.	Instalación terminada del muro	59
43.	Columna de confinamiento	59
44.	Solera corona	60
45.	Muro terminado.....	60
46.	Simulación de lluvia	65
47.	Drenado del agua en el muro	66
48.	Análisis de muro de concreto permeable.....	67

TABLAS

I.	Características físicas del agregado fino.....	21
II.	Porcentaje que pasa en los tamices para el agregado fino.....	21
III.	Características físicas del agregado grueso	22
IV.	Porcentaje que pasa en los tamices para el agregado grueso.....	23
V.	Resultados de ensayos a compresión.....	38
VI.	Datos de laboratorio del ensayo a flexión	40
VII.	Datos de laboratorio del ensayo de permeabilidad	43
VIII.	Clasificación de los suelos según su índice de plasticidad (IP).....	46
IX.	Integración de costos	61
X.	Resumen de las características físicas de los agregados.....	63
XI.	Resumen de los ensayos de concreto fresco.....	63
XII.	Resumen de los ensayos de concreto endurecido.....	64
XIII.	Resumen de los ensayos de suelo	64
XIV.	Comparación de resultados	74

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
cm²	Centímetro cuadrado
N/m	Fuerza por unidad de longitud; Newton/metro
°	Grados
g	Gramos
kg	Kilogramo
kg/cm²	Kilogramo por centímetro cuadrado
kg/m³	Kilogramo por metro cúbico
psi	Libra por pulgada cuadrada
lb	Libras fuerza
>	Mayor que
MPa	Mega pascales
<	Menor que
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cúbico
ml	Mililitro
mm	Milímetro
N-m/m	Momento por unidad de longitud
%	Porcentaje
pulg	Pulgada
“	Pulgada
pulg²	Pulgada cuadrada
pulg³	Pulgada cúbica

f'c

Resistencia a compresión del concreto

GLOSARIO

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes).
ACI 522 R-10	Especificaciones para el concreto permeable.
Agregado	Material inorgánico natural o artificial, cuyas dimensiones están comprendidas entre los límites fijados según norma; están clasificados como fino y grueso, está embebido en la pasta y ocupa aproximadamente el 75 % del volumen del concreto.
Agua subterránea	Es aquella que se filtra hasta llegar a zonas impermeables donde queda almacenada.
Asentamiento	Es la medida de consistencia que mide la facilidad de moldear y alisar el concreto.
ASTM	Sociedad Americana para el Ensayo e Inspección de los Materiales (American Society for Testing and Materials).
Cauce	Concavidad del terreno natural o artificial, por donde corre un río, un canal o cualquier corriente de agua.

Ciclo hidrológico	Describe el movimiento continuo y cíclico del agua en el planeta Tierra.
Cohesión	Propiedad de los suelos que permite resistir deformaciones rápidas sin agrietarse ni desagregarse.
Curado	Proceso a través del cual se mantiene el concreto y mortero en la condición húmeda y a una temperatura favorable, a fin de que se desarrollen las propiedades deseadas del material. El curado garantiza la hidratación y el endurecimiento satisfactorio de los materiales cementantes.
Desportillar	Romper o deteriorar un objeto en sus bordes.
Dosificación	Proceso de medición por peso o volumen de los materiales y su introducción en la mezcladora para una cantidad de concreto y mortero.
Drenaje francés	Es un sistema cubierto con grava o rocas que permite redirigir el agua hacia otra área deseada.
Empuje	También conocido como presión lateral, es la acción de movimiento que ejerce un suelo sobre un muro.
Erosión	Desgaste que se produce por la acción de agentes externos, tales como: viento, agua o por la fricción continua con otros cuerpos.

Escorrentía	Es la altura en milímetros, del agua de lluvia que circula sobre una superficie.
Filtración	Es un flujo que atraviesa un medio poroso.
Fleje	Cinta continua hecha de plástico de alta densidad que se utiliza para estabilizar un volumen de suelo.
Fraguado	Grado en el cual el concreto fresco perdió su plasticidad y se endurece.
Geomalla	Geosintético formado por una red regular de elementos integralmente conectados con aberturas mayores que 6,35 mm (1/4 pulg), para permitir el inter trabazón con el suelo o roca que lo circunda, desarrollando así la función de refuerzo.
Hidratación	Es la reacción entre el cemento hidráulico y el agua, a través de la cual se forman nuevos compuestos que confieren resistencia al concreto.
Nivel freático	Nivel donde la presión de agua de un acuífero es igual a la presión atmosférica.
Pasta	Constituyente del concreto y mortero, consiste en cemento y agua.
Permeabilidad	Es un material, que debido a su alta porosidad, permite el paso fácil de un flujo a través de él.

Polietileno	Polímero termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno.
Polipropileno	Polímero termoplástico, parcialmente cristalino que se obtiene de la polimerización del propileno (o propeno).
Porosidad	Es una medida de espacios vacíos en un material.
Saturación	Facción del agua de la formación en la zona no perturbada.
Suelo	Es la capa superficial de la corteza terrestre que sirve como soporte para plantas, edificaciones y carreteras.
Talud	Es la inclinación o pendiente que se da a las tierras para que se sostengan unas con otras, ya sea de manera natural o mecánica.

RESUMEN

El concreto permeable es un tipo especial de concreto con una alta porosidad usado para filtrar el agua proveniente de precipitación y otras fuentes, reduciendo la escorrentía superficial, evitando que ésta transporte sedimentos y contaminantes hacia sistemas de recolección de aguas, provocando que éstos se tapen por la gran cantidad de residuos que transporta, de esta manera el concreto actúa como un colador que impide el paso de sólidos y posteriormente pueden ser removidos con un simple mantenimiento. Este concreto se fabrica con muy poco agregado fino, lo que contribuye a un alto contenido de vacíos, es una aplicación sostenible para la construcción, que es muy poco utilizada en Guatemala.

La siguiente investigación busca desarrollar una nueva aplicación al concreto permeable, utilizado para fabricar placas prefabricadas e instalarlas como un muro de contención y determinar si es capaz de drenar el exceso de agua que se genera en la contención del suelo saturado, esto para evitar socavaciones y licuefacciones que se generan por el movimiento del agua. De esta manera se podría recolectar el agua acumulada y reutilizarla para riego, limpieza u otra actividad humana.

OBJETIVOS

General

Desarrollar muros que permitan evacuar el exceso de agua en la contención de suelos saturados.

Específicos

1. Diseñar la mezcla de un concreto permeable que permita un buen drenaje para su disposición final.
2. Determinar el flujo de agua en un concreto permeable.
3. Evaluar el comportamiento de los paramentos de concreto permeable.

INTRODUCCIÓN

El agua de lluvia sumada a la impermeabilización de las superficies a causa de la urbanización, representan una disminución del agua que alimenta los mantos freáticos e incrementan volumen de agua que deberá evacuarse por un sistema de drenaje, para evitar esto, la instalación de concreto permeable es una alternativa, ya que es un material que contiene alta porosidad, permitiendo que el agua pase a través de este reduciendo la escorrentía superficial y recargar los acuíferos, por esto es considerado como un material ecológico.

Entre las aplicaciones se puede mencionar: pavimentos para estacionamiento, carreteras, cunetas de carreteras, patios, canchas deportivas, muros de contención, entre otros. Basándose en el reporte del Comité ACI 522 R-10, se realizaron análisis utilizando los parámetros establecidos por las normas, las que describen el procedimiento de ensayo de las probetas, así como el procesamiento de datos y los parámetros para identificar la calidad de los materiales y del concreto permeable; para utilizarlo como un sistema de drenaje en muros de contención.

En este trabajo de investigación se estudiará el comportamiento de un muro que drene el exceso de agua en la contención de un suelo saturado, utilizando un concreto permeable convencional para elaborar placas que conformarán el muro, con la finalidad de brindar una mayor estabilidad a la contención.

1. ANTECEDENTES

1.1. Usos del concreto permeable

Empezó a utilizarse por primera vez en la fabricación de dos casas en el Reino Unido en 1852, este concreto consistía en solo grava y cemento; luego en 1923 se construyó un grupo de 50 casas en Edimburgo, Escocia; utilizando materiales que tenían propiedades permeables. A finales de 1930 se continuó adaptando el uso del concreto permeable para la construcción de viviendas.

Del mismo modo, en Europa, entre 1945 y 1956 muchas casas fueron construidas de concreto permeable debido a la cantidad limitada de materiales para fabricar buenos ladrillos a causa de la segunda guerra mundial. Con el paso de los años su uso fue extendido en la producción de casas en los países de Holanda, Francia, Alemania, Bélgica, Rusia y Australia. Por lo tanto en Europa se vio descubierto este tipo de material pero, no se llevó a cabo una investigación sobre ello.

En América se utilizó muy poco, ya que después de la segunda guerra mundial, América del Norte no presentó una gran escases de materiales como en Europa y fue en 1960 que se reportó el primer uso en la fabricación de algunas casas en Toronto, Canadá. Seguidamente se utilizó para fabricar pisos y pavimentos en la ciudad de México en 1994 donde han sido utilizados con éxito.

En 1990 en Estados Unidos, a través de la administración de protección ambiental, implementó la Ley de Agua Limpia, la cual requiere que el propietario

o desarrollador de un proyecto que conlleve a la impermeabilización logre captar tanto como sea posible, el agua de lluvia para evitar el arrastre de sólidos y otros contaminantes.

Desde 1999 Estados Unidos utilizó el concreto permeable sometiéndolo a diferentes condiciones climáticas llegando a ser los pioneros en la creación de normas que unificarían los procedimientos para su elaboración, lo que llevaría a implementarlo en diferentes aplicaciones.

En el 2002, el comité ACI American Concrete Institute publicó los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en la ciudad de Florida en donde se aplicó en estacionamientos, demostrando que disminuye el volumen de escorrentía generada por las lluvias. Dando a conocer el Comité ACI 522 R (Reporte del Concreto Permeable), posteriormente la asociación American Society for Testing and Materials (ASTM) creó la forma de medir la tasa de infiltración del agua en el concreto permeable, plasmando sus resultados en la Norma ASTM C-1701 y su equivalente actual para Guatemala es la Norma NTG- 41017 h 34.

Debido a que este concreto permite reducir significativamente rápido la escorrentía, no se debe agregar ningún tipo de refuerzo ya que, al estar en continuo contacto con el agua, el acero tiende a oxidarse con rapidez, lo que podría generar una dilatación en el concreto provocando fracturas y que no cumpla con su objetivo de drenar el agua a través de sus poros.

Por tanto, se ha utilizado con mayor frecuencia en pasos peatonales, también en áreas donde pueda ser aprovechado por la flora como en bloques ecológicos en jardines e invernaderos y poco en áreas de estacionamiento. Este último se ha utilizado más en países europeos y en Estados Unidos de

América. Sin embargo, en Guatemala aún no se conoce una obra que utilice dicho concreto a gran escala, debido a que es un material muy poco conocido en el país, ya la baja resistencia que este brinda; pero sus usos varían desde estabilización de taludes hasta largos sistemas de captación de agua de lluvia.

Figura 1. **Concreto permeable en jardín**



Fuente: Concreto permeable en jardín. <https://goo.gl/images/JXjxht>. Consulta: agosto 2018.

1.1.1. Muros de contención de concreto ligero

Son aplicaciones de la ingeniería civil que proporciona un soporte a los taludes con el objetivo de dar un balance de empuje al sistema. Para diseñarlo es necesario conocer, en primer lugar; las características físicas y propiedades mecánicas del suelo que se utilizará en la contención del muro, ya que esto permitirá hacer un análisis de estabilización interna y de ser necesario, utilizar anclas interiores para aumentar la estabilización del mismo y reducir las fuerzas que actúan sobre el muro.

Los suelos se clasifican según el tamaño medio de las partículas que lo componen; un suelo arenoso consta de partículas relativamente grandes y

tienden a no adherirse entre sí (a esto se le denomina cohesión) inclusive cuando está húmedo. Por otro lado, los suelos arcillosos se componen principalmente por partículas más pequeñas con alta cohesión, lo que permite ser moldeados. Debido a esto es importante instalar un sistema de evacuación de fluidos para que no se concentre en los suelos y proporcione empujes mayores.

El preferido de los suelos para un relleno en un muro, es aquel que contiene un alto porcentaje de arena y grava, porque permite que el agua pase a través de éste con mayor facilidad que en una tierra arcillosa, ya que retiene y absorbe el agua.

Estos muros tienen como finalidad resistir las presiones laterales producidas por el material retenido, generalmente tierra, cuando las condiciones no permiten que estas masas asuman sus pendientes naturales. Estas condiciones se presentan cuando el ancho de una excavación, corte o terraplén está restringido por distintas condiciones, tales como: topografía complicada, terraplén accidentado, restricciones legales, entre otras. Asimismo, es importante recalcar que al ser muros de concreto ligero, no están capacitados para soportar grandes presiones, por lo tanto, son muros de poca altura.

1.1.2. Sistemas de drenaje para agua de lluvia

Debido a la rápida expansión urbana, más del 70 % del suelo esta cubierto por carreteras de asfalto o concreto hidráulico y todo tipo de impermeabilización urbana, estos retienen el calor aumentando la temperatura ambiental y provocan un aumento en la escorrentía superficial; por esto es importante establecer un sistema que evacúe el volumen de agua acumulada

para disminuir al máximo los daños que pueda ocasionar a la ciudadanía y las edificaciones en el entorno urbano.

Para esto se debe instalar una red de drenajes que puedan ser dirigidos por gravedad hacia un cauce de agua para continuar con el ciclo hidrológico. Puesto que a éstos conducen grandes cantidades de agua, tienden a obstruirse por los sedimentos y basura que transportan, provocando inundaciones y posibles accidentes durante la ocurrencia de lluvias.

El concreto permeable es una alternativa para drenar el agua de lluvia, ya que en lugar de evacuarlas por medios receptores hacia otro cauce, se filtra hacia el nivel freático en el subsuelo, para posteriormente abastecer el agua subterránea. Esta zona de saturación se conoce como manto freático donde todos los espacios porosos están llenos de agua.

En general, este material ha tenido éxito, ya que permiten la filtración directa al suelo o la conducción hacia tanques de almacenamiento pluviales, reduciendo la escorrentía superficial, evitando la contaminación, encharcamiento y la erosión de áreas aledañas.

1.1.3. Pavimentos para áreas de estacionamiento

El concreto permeable fue referenciado como un material para estacionamientos, conocido como ecopavimento, mostrando resultados favorables para la circulación de tráfico vehicular liviano. El concepto se desarrolló como un medio para manejar las enormes cantidades de agua que caen en un estacionamiento durante una tormenta; permite que el agua se filtre en el suelo bajo el pavimento y mantenga abasteciendo el manto freático.

Figura 2. **Estacionamiento de concreto permeable**



Fuente: Estacionamiento de concreto permeable. <https://goo.gl/images/ih2JKN>. Consulta: agosto 2018.

También han sido seleccionados como una solución integral al problema de los pavimentos calientes, como lo son los pavimentos a base de materiales pétreos. En general, la temperatura del aire en los estacionamientos de concreto permeable es más frío que la temperatura sobre los estacionamientos de asfalto.

Existe una amplia aplicación de concreto permeable en pavimentaciones, algunas únicamente de concreto permeable y otros una combinación de pavimentos rígidos, semirígidos y flexibles con concreto permeable. Estas combinaciones han demostrado tener gran éxito en la disminución de inundaciones por falta de mantenimiento en los drenajes, inclusive en algunas ocasiones han logrado anular el uso de drenajes tradicionales, implementando sistemas de filtración de agua utilizando concreto permeable; en Guatemala ha sido poco el desarrollo de estos pavimentos y pueden ser una solución a la problemática del invierno y sus consecuencias a la infraestructura pública.

1.1.4. Carreteras

En las carreteras de concreto permeable se utilizan usualmente de dos formas: como una base de desagüe o como material de subbase; y como superficie de la carretera. En ambas categorías, las características para drenar son propiedades necesarias, pero los requisitos de resistencia pueden variar dependiendo de la localización del material en la sección de pavimento y del uso.

Se utiliza especialmente en zonas residenciales ya que son áreas de tráfico vehicular liviano y una de sus ventajas es la notable reducción de la contaminación del sonido ocasionado por la fricción de los neumáticos, teniendo en cuenta que en la colocación es importante no compactar de manera excesiva para no obstruir los vacíos, ya que esto disipa el sonido. Asimismo, se puede agregar cualquier pigmentación a la mezcla de concreto para elaborar mosaicos arquitectónicos a la carretera. Esto no afecta ninguna de sus propiedades mecánicas.

Figura 3. **Pavimento a color de concreto permeable**



Fuente: Pavimento a color de concreto permeable. <https://goo.gl/images/WGzzLY>. Consulta: agosto 2018.

El intervalo de espesores prácticos de diseño para el concreto permeable es de 6 a 10 pulgadas (150 a 250 mm) para pavimentos camino llano. Muchas carreteras en Europa se construyen con una capa de concreto permeable añadiendo látex modificado que permite el drenaje del pavimento y la reducción de ruido de los neumáticos. El resultado de la modificación de látex u otro aditivo brinda mejores propiedades mecánicas.

1.1.5. Otros estudios realizados con concreto permeable

Un estudio realizado por la Inga. Natalia Rodas en el 2012 trata sobre el desarrollo de bloques de concreto permeable en senderos ecológicos, el cual realizó diversos ensayos basados en el reporte ACI 522 R-10 para conocer sus propiedades mecánicas y que brinde un rango aceptable de infiltración y de resistencia, también especifica la manera correcta de realizar un concreto permeable estableciendo un estándar en el peso volumétrico de 1 700 kg/m³ para el diseño de mezcla y dosificación de los materiales; para ser utilizado en jardines, caminamientos, parqueos (donde transite un tráfico vehicular liviano).

El ensayo demostró que la dosificación de cemento: agregado fino: agregado grueso: agua de 1: 0,3: 4,2: 0,49 presentó una resistencia a compresión de 56,44 kg/cm² (5,50 MPa), resistencia a la flexión de 19,18 kg/cm² (1,90 MPa) y una capacidad de infiltración de 1 601,89 pulg/hora; demostrando óptimos resultados para su disposición final.

El Ing. José Iván González realizó otro estudio en el 2015 para evaluar las características físicas y propiedades mecánicas del concreto permeable utilizando una fibra derivado del proceso de reciclaje del PET, conocido como polvillo de PET en lugar del agregado fino. Este estudio utilizó las mismas proporciones que en el estudio anteriormente mencionado, y establece un

rango en el peso volumétrico entre 1 600 kg/m³ a 2 000 kg/m³; en el cual aplicó un valor de 1 900 kg/m³, la mezcla patrón de esta investigación dio una resistencia a compresión de 130,52 kg/cm² (12,80 MPa), resistencia a la flexión de 21,41 kg/cm² (2,10 MPa) y una tasa de infiltración de 3 616,96 pulg/hora. La mezcla de investigación demuestra que disminuyen sus propiedades mecánicas; dando una resistencia a compresión de 109,11 kg/cm² (10,70 MPa), una resistencia a la flexión de 18,35 kg/cm² (1,80 MPa) y una infiltración de 1 812,48 pulg/hora; por lo tanto, el uso del polvillo de PET no demostró ningún beneficio para mejorar sus características físicas y propiedades mecánicas.

Con el fin de recargar los mantos fráticos que han sido impermeabilizados por la urbanización de las carreteras, el Ing. Marlon Hernández realizó un estudio en el 2017 agregando tiras de polietileno de baja densidad al concreto permeable en la aplicación de pavimentos rígidos de tráfico liviano; el estudio tomó como referencia la investigación colombiana publicada en el 2002 en la revista ingeniería de construcción, vol. 17 núm. 2, en la que establece una proporción para el diseño de mezcla de 1: 0,46: 2,81: 0,39 y planteó un peso volumétrico de 1 800 kg/m³.

En esta investigación se realizó una mezcla patrón la que dio como resultados de resistencia a compresión de 192,73 kg/cm² (18,90 MPa), resistencia a la tensión de 29,57 kg/cm² (2,90 MPa) y tasa de infiltración de 796,60 pulg/hora. Mientras que a la mezcla de análisis se añadió el 0,10 % de tiras de polietileno al total de la mezcla; dio una resistencia a compresión de 178,45 kg/cm² (17,50 MPa), resistencia a la flexión de 35,69 kg/cm² (3,50 MPa) y una capacidad de infiltración de 603,90 pulg/hora. Por lo tanto, el polietileno mejoró su resistencia a la tensión y disminuyó su resistencia a la compresión e infiltración, sin embargo, se encuentran en el rango estipulado por el ACI 522 R-10.

Dentro de otros estudios del arte, también se puede utilizar como un sistema de almacenamiento térmico en plantas de efecto invernadero que sirve como área de almacenamiento, así como un intercambiador de calor para la calefacción de efecto invernadero solar, evita que el agua se estanque y elimina el crecimiento de malezas, mientras que proporciona una superficie resistente y duradera para equipos en movimiento. También ha sido utilizado ampliamente para la construcción de canchas de tenis.

Se ha utilizado como hombros en las carreteras principales para el manejo de aguas pluviales evitando acarrear basura y reduciendo inundaciones.

Figura 4. **Hombros en carretera de concreto permeable**



Fuente: Hombros en carretera de concreto permeable. <https://goo.gl/images/GVWJxW>.

Consulta: agosto 2018.

Se utiliza como pantallas acústicas en muros de edificios, para reducir ruidos procedentes de diferentes tipos de tráfico, que para los ocupantes de un edificio puede ser problemático. Su estructura de amplia graduación tiende a absorber y disipar el sonido en el material en vez de reflejarlo a otro lugar.

2. MARCO TEÓRICO

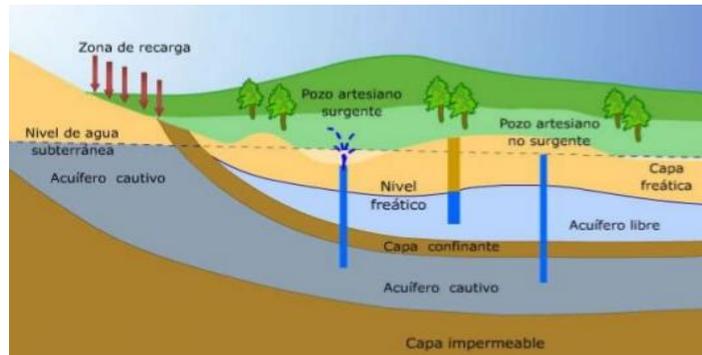
2.1. Tipos de suelos en función de absorción y retención de agua

Gran parte del agua lluvia se filtra en el suelo y fluye hacia el nivel freático, donde los poros se encuentran llenos de agua para luego alimentar los acuíferos, y la capa inferior a éste es una capa impermeable que impide que siga descendiendo; a este movimiento se le conoce como infiltración y abastece el agua subterránea.

Un acuífero es una estructura geológica formada naturalmente cuando la superficie terrestre absorbe el agua y forma capas subterráneas, hasta llegar a una zona no permeable en donde la composición de la roca es más cerrada y el agua no pasa con tanta facilidad. Por tanto, están conformados por dos capas de agua: la confinada y la no confinada. Siendo los acuíferos no confinados los que mayormente son excavados; ya que el agua que se encuentra en los acuíferos confinados es más difícil de extraer, no solo porque se encuentra a mayor profundidad sino que la roca es más difícil de excavar. De aquí una de las importancia del uso del concreto permeable, el cual permite suministrar el manto freático.

La relevancia del agua en los acuíferos es que almacenan el mayor volumen de agua dulce que es superior a la existente en ríos y lagos, como bien se sabe, el agua es de vital importancia para el desarrollo de la humanidad, ya que se destinan dos terceras partes para cultivos, una décima parte para uso industrial y el resto como agua potable para el consumo humano.

Figura 5. **Agua subterránea**



Fuente: Agua subterránea. <https://goo.gl/images/bjfbFz>. Consulta: agosto 2018.

Actualmente los acuíferos representan una de las mayores reservas mundiales de agua potable. Estas formaciones rocosas tienen diferentes clasificaciones en función de la forma que presentan, pueden ser porosos o fisurados, dependiendo del terreno y de su estructura interna, con base en esto la calidad del agua es muy variable. Sin embargo, debido a que estos cauces de agua se encuentran a gran profundidad, ayuda a que no se contamine y se mantiene su calidad, de hecho en la mayoría de los casos no necesita un tratamiento especial, basta con una pequeña cloración antes de entregar al consumo.

Adicionalmente es un recurso que se encuentra cerca de los consumidores finales, por tanto, no es necesario realizar grandes inversiones, ya que en muchas zonas es el único recurso disponible. Lo más importante acerca del uso del agua subterránea es el equilibrio adecuado entre el consumo y la recuperación del nivel de agua en el acuífero para evitar la sobre explotación y la contaminación de este recurso. A continuación se describen los diferentes acuíferos, según su comportamiento hidrodinámico:

2.1.1. Acuíardo

Se trata de formaciones rocosas llenas de poros semipermeables y de las grietas o fisuras en las rocas impermeables, estas grietas se producen principalmente en rocas de granito o pizarras, inclusive se puede dar el caso de alta porosidad en algunas piedras volcánicas. También se encuentra formaciones kársticas, se conoce como karst a los espacios en rocas blandas como la piedra caliza. En cualquier tipo, existe poca porosidad.

Estas formaciones contienen apreciables cantidades de agua y puede suministrar, aunque sea muy lentamente, considerables volúmenes de agua a lo largo del tiempo a un acuífero infrayacente si la disposición de ambos lo permite, por lo que son buenos almacenes pero malos transmisores, esto también se debe a que está conformado por arenas muy finas.

2.1.2. Acuícludo

Se define como el estrato poroso y de permeabilidad baja pero no nula, además de muy difícil recuperación, es únicamente funcional como almacenamiento, ya que al ser una formación geológica confinante no transmite el agua a través de él, por lo que aún conteniendo grandes cantidades de agua es difícil su explotación debido al estrato confinante y a que se encuentra a una mayor profundidad. Generalmente son depósitos subterráneos de arcilla o limo.

2.1.3. Acuífugo

Están formados por rocas con porosidad nula y se encuentran revestidos por una superficie impermeable, tales como: granitos, cuarcitas no fisuradas y

formaciones calizas sin karstificación. Por tanto es incapaz de absorber o transmitir agua.

En realidad no existen formaciones geológicas completamente impermeables o con porosidad nula, ya que siempre presentan una capacidad para transmitir el agua, en todo caso será muy pequeña, además todo material es susceptible a deformarse alcanzando una fractura frágil que conlleva al aumento el volumen de espacios vacíos. Por lo tanto, es más correcto referirse a los acuiclodos y acuífugos como formaciones de baja y muy baja permeabilidad, respectivamente.

2.2. Muros de paramento

Son estructuras capaces de contener y soportar las presiones laterales o empujes de tierra generados por terrenos naturales o rellenos estabilizados mecánicamente. De manera general, se han utilizado para la contención de suelos aunque, en ingeniería hidráulica, se define como paramento al muro de contención para las represas.

Este muro está diseñado para trabajar en conjunto mediante escamas prefabricados que son específicamente elaboradas para conectarse únicamente por gravedad, a través de uniones macho-hembra a fin de lograr un muro unificado, asimismo, están conformados con colas de polipropileno de alta resistencia que son distribuidas uniformemente en el alma de cada placa (ver figura 8) mejorando el suelo al aumentar la estabilización de la estructura en la contención. Este refuerzo está formado por un núcleo de tiras de poliéster revestidos con polietileno que ofrece una mayor durabilidad, protección y proporciona un confinamiento lateral para óptimos resultados en cuanto a

estabilización mecánica, eficiencia de instalación y un alto rendimiento para soportar los empujes.

Figura 6. **Fachada de muros de paramento**



Fuente: Fachada de muros de paramento. <https://goo.gl/images/PWPGXm>. Consulta: agosto 2018.

Este sistema satisface las necesidades de cambios de nivel como, esquinas a 90°, curvas convexas, escalonados y se pueden adaptar con facilidad a una variedad de consideraciones de diseño, inclusive se pueden combinar con otros sistemas de estabilización de acuerdo a las necesidades del proyecto.

Uno de los factores individuales más importantes es el efecto del agua en la estabilidad del muro, ya que el agua ejerce presión hidrostática lo que provoca que el total de la fuerza en el muro sea mayor a comparación de los suelos no saturados; debido a esto las placas de concreto permeable junto a la instalación de un drenaje francés en la espalda del muro, evacuarán el agua para reducir esa fuerza hidrostática. De este modo solo el suelo estará ejerciendo fuerza en el muro.

Debido a que el muro actúa como un conjunto de placas, se debe asumir un muro uniforme y debe ser diseñado como un muro de gravedad, ya que utiliza su propio peso y amarres traseros para soportar el terreo que hay detrás del él. Funcionan de manera óptima cuando son aplicados en áreas rectangulares en los que su base es dos veces la altura, aproximadamente; esto contribuye a reducir la falla por volteo y la corona del muro deber ser inaccesible o aplicar solo carga peatonal.

El amarre trasero es una malla sintética flexible o tiras de flejes que son utilizados como anclajes para reforzar la estabilización del suelo; por esto se le conoce como muro de gravedad coherente o gravedad gigante, ya que las masas de terreno reforzadas con geomalla crean el mismo efecto que tener un muro de gran espesor, y debe resistirse al deslizamiento.

2.3. Sistema de tierra armada

Se utiliza principalmente para muros de paramento, ya que se basan en la colocación de placas que se unen entre sí de manera no rígida, además, que pueden ser de medidas y formas variables, y tienen un espesor relativamente reducido. Esta tecnología ofrece mayor flexibilidad, rapidez de ejecución y terminación estética.

El sistema consiste en la estabilización mecánica de un terraplén, relleno o estribos para puentes; por medio de la incorporación ordenada de bandas de refuerzo al interior de la contención, compactando cada capa para tensionarlas, lo que le brida el amarre al suelo. Estas bandas se disponen horizontalmente de manera perpendicular a las placas o paneles de protección (paramento), generando un macizo estable y resistente.

La fase constructiva es muy importante, ya que se tiene que ir compactando por capas de pequeño espesor para darle mayor resistencia al suelo; en consecuencia, es fundamental clasificar el suelo que conformará el talud mediante análisis para definir el comportamiento mecánico como: resistencia al corte, cohesión, fricción, plasticidad y análisis granulométrico. Esta información es importante, no solo para realizar los cálculos de empuje sino que para determinar la mejor manera de estabilizar el suelo y que pueda drenar el agua con mayor facilidad para evitar socavaciones, desprendimiento y licuefacciones. Estas fallas de estabilidad están asociadas a suelos finos, predominantemente limosos.

Generalmente, el sistema de tierra armada se usa para una sección próxima a la rectangular, en la que el ancho sea mayor que de la altura. La estabilidad interna del suelo puede analizarse por los métodos de “*Coulumb* y *Rankine*”¹ así como la estabilidad externa se debe considerarse al sistema de placas como un conjunto que no será diferente de un muro convencional.

Figura 7. **Detalle del muro de tierra armada**



Fuente: Detalle del muro de tierra armada. <https://goo.gl/images/ZAfJqE>. Consulta: agosto 2018.

¹ DAS, Braja: *Principios de ingeniería de cimentaciones*. p. 293.

3. ESARROLLO EXPERIMENTAL

Con base en los antecedentes sobre el concreto permeable. Se harán los ensayos y pruebas a los materiales que se van a utilizar para establecer la calidad y garantizar un exitoso diseño de mezcla así como una excelente fabricación del concreto permeable.

Se realizarán los ensayos de concreto fresco y se elaborarán cilindros de seis pulgadas de diámetro por doce pulgadas de altura para determinar su resistencia a compresión a los 3, 7 y 28 días de fraguado; así como una probeta de 6 x 6 x 21 pulgadas para determinar su resistencia a la flexión y otra de 12 x 24 x 3 pulgadas para determinar la capacidad de filtración.

3.1. Ensayos de agregados utilizados para la elaboración de concreto permeable, según la Norma NTG 41007 h1 (ASTM C-33)

Los agregados finos y gruesos ocupan comúnmente entre el 60 y 75 % del volumen del concreto e influyen en las propiedades del concreto recién mezclado y endurecido y en la economía. Los materiales que se utilizaron para la elaboración del concreto permeable cumplen con lo estipulado por el reporte del Comité ACI 522-R10, tanto en cantidad como en la calidad que se describen en las Normas NTG y ASTM respectivas para cada material.

3.1.1. Cemento

Es un material aglomerante hidráulico, esto quiere decir, que reacciona y fragua con el agua; que al ser mezclado con agregado fino y agregado grueso,

se crea una mezcla llamada concreto. Los tipos de cemento recomendados para realizar concreto permeable son: pórtland tipo I y II de acuerdo con la Norma ASTM C-150 y pórtland tipo GU y HE, según lo establecido con la Norma ASTM C-1157.

Basado en el reporte ACI 522 R-10 se debe utilizar cemento tipo pórtland de alta resistencia inicial, tipo HE; conocido en el medio como cemento estructural de 5 800 psi (ARI), el cual cumple con la Norma COGUANOR NGO 41001 (ASTM C-1157).

3.1.2. Agregado fino

El agregado a emplearse proviene de una planta de procesamiento y distribución ubicada en Pal n, Escuintla. Es un producto de trituración de roca ígnea, también llamada magmática. Es el material que pasa por el tamiz núm. 4 hasta el tamiz núm. 100 debe cumplir con lo establecido en la Norma NTG 41007 h1 (ASTM C-33: especificación estándar para agregados del concreto).

Dicha norma especifica lo siguiente: el módulo de finura debe encontrarse entre 2,30 y 3,10. Los límites del peso específico deben estar entre 2,40 y 2,90. El contenido de vacíos debe estar entre el 30 y 50 %. El peso volumétrico varía de 1 200 kg/m³ a 1 750 kg/m³. El análisis de contenido de materia orgánica como el máximo permisible es núm. 3.

A continuación se describen las características físicas del agregado que se utilizó para el concreto permeable:

Tabla I. **Características físicas del agregado fino**

Peso específico	2,62
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1 800,00
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1 670,00
Porcentaje de vacíos (%)	31,00
Porcentaje de absorción (%)	0,70
Contenido de materia orgánica	1
Pasa tamiz núm. 200 (%)	4,80
Retenido tamiz 6,35 (%)	0,00
Módulo de finura	2,72

Fuente: ÁLVAREZ GUILLEN, Julio César. *Azúcar como aditivo retardante y modificador de resistencia para mezclas de concreto*. p. 50.

Tabla II. **Porcentaje que pasa en los tamices para el agregado fino**

Tamiz núm.	9,50	4,75	2,36	1,18	0,60	0,30	0,15
% Que pasa	100,00	100,00	88,00	62,00	41,00	25,00	12,00

Fuente: ÁLVAREZ GUILLEN, Julio César. *Azúcar como aditivo retardante y modificador de resistencia para mezclas de concreto*. p. 53.

El uso del agregado fino en el concreto incrementa su resistencia a compresión, manejabilidad y densidad. Sin embargo, al añadirlo puede afectar el vacío entre los poros, interrumpiendo el flujo del agua a través del concreto; por esto, es que su uso debe ser limitado o nulo, dependiendo del diseño de mezcla.

3.1.3. Agregado grueso

La procedencia de este agregado es la misma que el agregado fino. Se considera como el material que pasa por el tamiz 6,35 y el retenido por el tamiz

núm. 4. Asimismo, debe cumplir con los requerimientos que establece la Norma NTG 41007 h1 (ASTM C-33).

Esta establece lo siguiente: el peso específico se encuentra entre 2,40 y 3,00. No tiene información sobre los límites en el módulo de finura. El peso volumétrico varía de 1 200 kg/m³ a 1 750 kg/m³. Los niveles de absorción están entre el 0,2 al 4,0 %

El tamaño del agregado se encuentra en función de las necesidades específicas para el diseño del concreto. Para elaborar concreto permeable, la graduación del agregado debe ser entre 3/8" y 3/4". Es importante mencionar que a mayor diversidad del tamaño del agregado menor porcentaje de vacíos tendrá el concreto permeable.

Se utilizó un agregado grueso con un tamaño nominal de 3/8" y sus características físicas se muestran a continuación:

Tabla III. **Características físicas del agregado grueso**

Peso específico	2,67
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1520,00
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1440,00
Porcentaje de absorción	0,80
Pasa tamiz núm. 200 (%)	1,00
Porcentaje de vacíos (%)	43,00
Módulo de finura	5,88
Retenido tamiz 6,35 (%)	60,70

Fuente: ÁLVAREZ GUILLEN, Julio César. *Azúcar como aditivo retardante y modificador de resistencia para mezclas de concreto*. p. 47.

Tabla IV. **Porcentaje que pasa en los tamices para el agregado grueso**

Tamiz núm.	1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"	No.4	No. 8	No. 16
% Que pasa	100,00	100,00	100,00	100,00	97,00	15,00	0,00	0,00

Fuente: ÁLVAREZ GUILLEN, Julio César. *Azúcar como aditivo retardante y modificador de resistencia para mezclas de concreto*. p. 49.

3.2. **Diseño y proporción del concreto permeable**

El diseño de mezcla fue basado por lo establecido en el reporte del Comité ACI 522-R10, asimismo, se tomarán los valores establecidos en la investigación realizada por la Inga. Natalia Rodas; en la cual especifica las siguientes proporciones: cemento, agregado fino, agregado grueso, agua, de 1:0,3:4,2: 0,49 y un peso volumétrico teórico del concreto permeable de 1 700 kg/m³ con estos parámetros establecidos, se deben de calcular el volumen de concreto estimado que se debe colocar, luego la cantidad de cada material se determina de la siguiente manera:²

$$PU1 = \frac{PUT}{Ce + AF + AG + W}$$

Donde:

PU1 = peso volumétrico del diseño

PUT = peso volumétrico teórico

Ce = cemento

AF = agregado fino

² RODAS RALDA, Natalia Ixchel. *Desarrollo y uso de bloques de concreto permeable en senderos ecológicos*. p. 40.

AG = agregado grueso

W = agua

Luego se debe multiplicar el valor de cada proporción por el peso unitario del diseño:

$Ce \times PU1 = \text{cemento en kg/m}^3$

$AF \times PU1 = \text{agregado fino en kg/m}^3$

$AG \times PU1 = \text{agregado grueso en kg/m}^3$

$W \times PU1 = \text{agua en litros/m}^3$

Seguidamente cada uno se debe multiplicar por el volumen de concreto para obtener el peso en kg de cada material:

$\text{Cemento kg/m}^3 \times \text{VolCon} = \text{cemento en kg}$

$\text{Agregado fino kg/m}^3 \times \text{VolCon} = \text{agregado fino en kg}$

$\text{Agregado grueso kg/m}^3 \times \text{VolCon} = \text{agregado grueso en kg}$

$\text{Agua en litros/m}^3 \times \text{VolCon} = \text{agua en litros}$

3.2.1. Ejemplo ilustrativo para el diseño de mezcla

A continuación se describe el cálculo que se realizó para el diseño de mezcla utilizado para los ensayos de control de calidad del concreto fresco y endurecido:

Se determinó el volumen para elaborar seis cilindros de 150 x 300 mm, una viga de 6 x 6 x 21 pulg, una placa de 12 x 24 x 3 pulg y un recipiente de 7 litros. En conjunto forman 0,065 m³ y se le debe agregar un 10 % de

desperdicio (esto dependerá del criterio del diseñador según su experiencia) para un volumen final de 0,072 m³.

Luego se utiliza la dosificación dada por el ACI 522 R-10 y se planteó un peso específico del concreto permeable de 1 700 kg/m³, para determinar un peso específico para cada material:

1: 0,3: 4,2: 0,49

$$\frac{1\,700\text{ kg/m}^3}{1 + 0,3 + 4,2 + 0,49} = 283,81\text{ kg/m}^3$$

Cemento: $1 \times 283,81\text{ kg/m}^3 = 283,81\text{ kg/m}^3$

Agregado fino: $0,3 \times 283,81\text{ kg/m}^3 = 85,143\text{ kg/m}^3$

Agregado grueso: $4,2 \times 283,81\text{ kg/m}^3 = 1\,192,002\text{ kg/m}^3$

Agua: $0,49 \times 283,81\text{ kg/m}^3 = 139,07\text{ litros/m}^3$

Es importante mencionar que la densidad del agua es de 1 000 kg/m³ y en 1m³ hay 1 000 litros es equivalente a 1 kg/litro, por lo tanto, un litro de agua tiene una masa de un kilogramo.

Seguidamente se multiplica cada uno por el volumen de concreto para determinar la cantidad a utilizar de cada material:

Cemento: $283,81\text{ kg/m}^3 \times 0,072\text{ m}^3 = 20,28\text{ kg}$

Agregado fino: $85,143\text{ kg/m}^3 \times 0,072\text{ m}^3 = 6,08\text{ kg}$

Agregado grueso: $1\,192,002\text{ kg/m}^3 \times 0,072\text{ m}^3 = 85,19\text{ kg}$

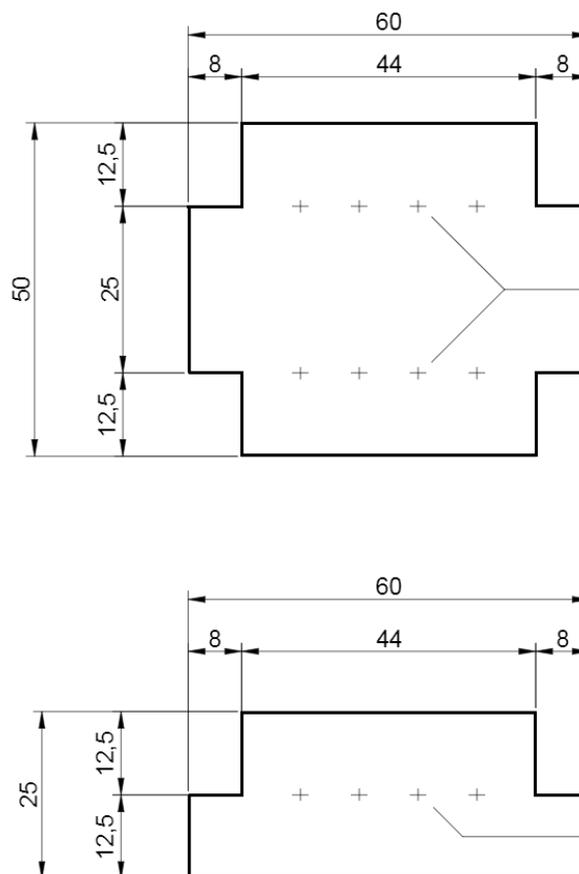
Agua: $139,07\text{ litros/m}^3 \times 0,072\text{ m}^3 = 9,93\text{ litros} = 9\,938\text{ ml}$

De la misma manera se debe proceder para colocar cualquier volumen de concreto permeable.

3.3. Propuesta de la geometría de las placas

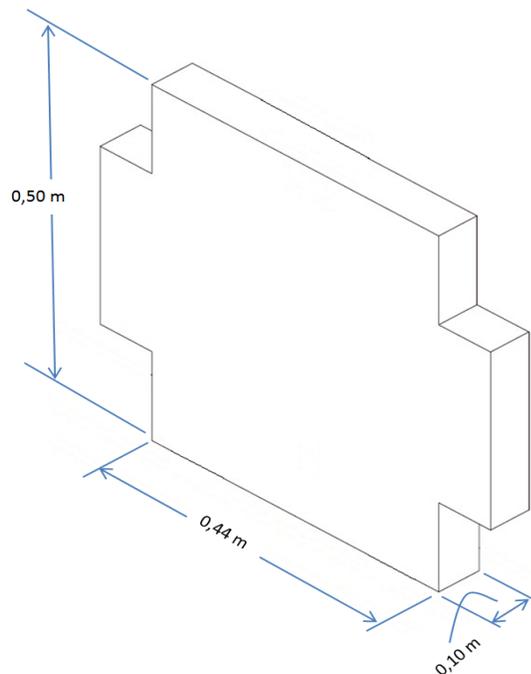
Para la presente investigación se estableció una geometría basada en los adoquines, para establecer un amarre entre las placas de manera uniforme a lo largo del muro, con un espesor de 10 centímetros y las dimensiones son las siguientes:

Figura 8. Detalle de las placas en centímetros



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Figura 9. **Detalle de la placa**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Los moldes de las placas se fabricaron de tal forma que se conecten por uniones macho-hembra con la finalidad de una fácil y rápida instalación al unirse únicamente por gravedad sin ningún material para sellar las juntas, ya que esto obstruiría la permeabilidad de las placas.

En el sistema de paramento tradicional con concreto estructural, los flejes van unidos a las placas mediante arranques que son atornillados a la placa; dado a que el concreto permeable no se puede perforar, se optó porque los flejes estén fundidos en la placa a la mitad de su espesor simulando una longitud de desarrollo de al menos 5 centímetros. Su longitud total tiene que ser por lo menos el 80 % de la altura del muro. Esto se repite instalando dos camaras con cuatro flejes dobles para cada placa.

Figura 10. **Moldes para las placas**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 11. **Instalación de flejes**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 12. **Fabricación de placas**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Cada placa tiene una superficie de $0,26 \text{ m}^2$ y un peso de $44,20 \text{ kg}$ en total se fabricaron 14 placas para la instalación del muro, estas se mantuvieron envueltas con nylon para que no pierdan su humedad mientras alcanzan su máxima hidratación.

Figura 13. **Placas de concreto permeable**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 14. **Curado de las placas de concreto permeable**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

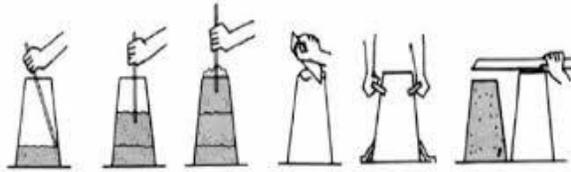
3.4. Ensayos de concreto fresco

El concreto fresco se define como el recién preparado y su estado es plástico y moldeable, debido a que no ha iniciado su proceso de fraguado (endurecimiento) adopta la forma de cualquier molde en el que se vierta. Se debe tener en cuenta que para tener un control en la calidad del concreto permeable se deben realizar los siguientes ensayos:

3.4.1. Revenimiento

Generalmente el concreto permeable no presenta asentamiento, sin embargo, la Norma NTG – 41052 (ASTM C-143: método de prueba estándar para el asentamiento de concreto) establece unos valores como referencia entre 0,8 y 2 pulgadas. Se debe tomar en cuenta que estos valores son considerados como un asentamiento teórico y que no brinda un resultado acertado.

Figura 15. **Procedimiento del ensayo**



Fuente: Procedimiento del ensayo. <https://goo.gl/images/z3GeVp>. Consulta: agosto 2018.

3.4.2. **Peso volumétrico**

La Norma NTG – 41017 h33 (ASTM C-1688: método de prueba estándar para determinar la densidad y contenido de vacíos del concreto permeable) establece que se debe utilizar un martillo de proctor estándar (5 libras) y se debe añadir el concreto en dos capas de igual espesor y golpear con el martillo 20 veces a cada capa. “Se considera que el rango de densidades es de 1 600 kg/m³ a 2 000 kg/m³ para el concreto permeable”.³

El peso unitario se realizó conforme a la Norma NTG – 41017 h33 (ASTM C-1688) y se obtiene dividiendo el peso neto del concreto, que es el peso del cilindro lleno menos la masa del cilindro, con el volumen del cilindro. Para lo cual se utilizó un cilindro de 2,68 kg con una capacidad de 7 litros y los resultados fueron los siguientes:

Tara: 2,68 kg

Peso bruto: 16,52 kg

³ GONZÁLEZ CABRERA, José Ivan. *Estudio y evaluación de las características físicas y propiedades mecánicas del concreto polimérico permeable para su utilización en proyectos con fines ambientales*. p. 14.

Volumen de tara: 7 litros (0,007m³)

$$P. U. = \frac{16,52 \text{ Kg} - 2,68 \text{ Kg}}{0,007 \text{ m}^3} = 1\,977,20 \text{ kg/m}^3$$

Debido a que el peso volumétrico cambia, se debe recalculer el diseño de mezcla para establecer las cantidades reales de cada material a utilizar. El volumen de concreto es de 0,072 m³

1: 0,3: 4,2: 0,49

$$\frac{1\,977,20 \text{ kg/m}^3}{1 + 0,3 + 4,2 + 0,49} = 330,10 \text{ kg/m}^3$$

Cemento: $1 \times 330,10 \text{ kg/m}^3 = 330,10 \text{ kg/m}^3$

Agregado fino: $0,3 \times 330,10 \text{ kg/m}^3 = 99,00 \text{ kg/m}^3$

Agregado grueso: $4,2 \times 330,10 \text{ kg/m}^3 = 1\,386,40 \text{ kg/m}^3$

Agua: $0,49 \times 330,10 \text{ kg/m}^3 = 161,70 \text{ litros/m}^3$

Seguidamente cada uno se debe multiplicar por el volumen de concreto para obtener el peso en kg de cada material:

Cemento: $330,10 \text{ kg/m}^3 \times 0,072 \text{ m}^3 = 28,76 \text{ kg}$

Agregado fino: $99,00 \text{ kg/m}^3 \times 0,072 \text{ m}^3 = 7,12 \text{ kg}$

Agregado grueso: $1\,386,40 \text{ kg/m}^3 \times 0,072 \text{ m}^3 = 99,80 \text{ kg}$

Agua: $161,70 \text{ litros/m}^3 \times 0,072 \text{ m}^3 = 11,64 \text{ litros} = 11\,642 \text{ ml}$

Esta es la cantidad real de materiales a utilizar, según el peso volumétrico establecido en el proceso experimental.

La Norma NTG – 41017 h33 (ASTM C-1688) también se puede determinar “el porcentaje de vacíos en el concreto, el cual se encuentra del 14 al 31 % según registros del Comité del ACI de Estados Unidos de América (Schaefer et al, 2006, Jornales ACI)”⁴

El porcentaje de vacíos se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$P.V. = \frac{T - R}{T} \times 100$$

Donde:

P.V.= porcentaje de vacíos

T = densidad teórica del concreto

D = densidad real del concreto

El porcentaje de vacíos obtenido es el que se muestra a continuación:

$$T = 1\,700,00 \text{ kg/m}^3$$

$$R = 1\,977,20 \text{ kg/m}^3$$

$$P.V. = \frac{1\,700 - 1\,977,20}{1\,700} \times 100 = 16,30 \%$$

⁴ GONZÁLEZ CABRERA, José Ivan. *Estudio y evaluación de las características físicas y propiedades mecánicas del concreto polimérico permeable para su utilización en proyectos con fines ambientales*. p. 15.

Figura 16. **Peso unitario y porcentaje de vacíos del concreto permeable**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

3.4.3. Elaboración de cilindros

Es necesario fabricarlos para determinar las propiedades mecánicas del concreto permeable, entre las más comunes: la resistencia a compresión y flexión; el subcomité ASTM C 09,49 en concreto permeable especifica que el llenado de los cilindros debe ser con dos capas de igual espesor y se deben consolidar con el martillo proctor estándar (5 libras) dando 20 golpes a cada capa.

También especifica que el llenado de los mismos debe empezar, como máximo 15 minutos después de terminar de mezclar los materiales. Se debe colocar los moldes en una superficie sólida y nivelada para que al aplicar los golpes se transmita la energía uniformemente y no se generen vacíos en el molde.

Figura 17. **Elaboración de cilindros**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

La probeta estándar para determinar la resistencia a compresión es un cilindro de 150 mm (6 pulg) de diámetro por 300 mm (12 pulg) de altura para un agregado grueso de tamaño máximo nominal de 50 mm (2 pulg). También es válido el cilindro de 100 mm (4 pulg) de diámetro por 200 mm (8 pulg) de altura, pero este generalmente se utiliza para concretos de alta resistencia. La diferencia de resistencia entre los tamaños de cilindros es insignificante.

El cilindro de 150 x 300 mm (6 x 12 pulg) es el que más se ha utilizado a pesar que el cilindro de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg) que requiere menos muestra, pesa menos, es más fácil maniobrarlo y requiere menos espacio para su curado.

Figura 18. **Cilindros de 150 mm X 300 mm**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

A diferencia del curado del concreto tradicional, estos no se deben sumergir en una pileta con agua, sino guardarlos en un ambiente de temperatura favorable para mantener la humedad necesaria durante el período de hidratación del concreto, ya que si el curado es aplicado correctamente la resistencia y durabilidad se desarrollarán por completo. Las probetas se mantuvieron en bolsas de nylon en un lugar fresco hasta cumplir su edad para ensayarlos.

Figura 19. **Curado de cilindros**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

3.5. Ensayos de concreto endurecido

Los aspectos más importantes del concreto son su resistencia a la compresión y flexión, indican la calidad del concreto fabricado y se determinan mediante los ensayos a las muestras realizadas según las normas establecidas. Los ensayos a realizarse, se encuentran a continuación:

3.5.1. Ensayo a compresión

Para este ensayo se deben utilizar los cilindros elaborados, el equipo y procedimiento descrito por la Norma NTG – 41017 h1 (ASTM C-39: prueba estándar para resistencia a compresión de probetas cilíndricas de concreto).

Esta norma específica que los cilindros deben cumplir con que la altura sea dos veces su diámetro para certificar su resistencia. “La cual está en el intervalo de 3,5 MPa a 28 MPa (28 a 280 kg/m³)”⁵ y dependerá de las propiedades y proporciones de los materiales, así como las técnicas de colocación y las condiciones ambientales

Debido a la porosidad del concreto permeable la aplicación de carga no se transmite uniformemente en sus bases, por lo tanto, se colocaron capas de papel periódico mojado en ambos extremos del cilindro.

Se determinó la resistencia a compresión del concreto permeable a las edades de 3, 7 y 28 días de fraguado (a este último se le conoce como $f'c$) y

⁵ GONZÁLEZ CABRERA, José Ivan. *Estudio y evaluación de las características físicas y propiedades mecánicas del concreto polimérico permeable para su utilización en proyectos con fines ambientales*. p. 16.

generalmente se expresan en kilogramos sobre cada centímetro cuadrado (kg/cm²), los resultados de las probetas fueron los siguientes:

Tabla V. **Resultados de ensayos a compresión**

Edad (días)	Peso en kg	Diámetro promedio (cm)	Altura promedio (cm)	Carga en lb	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (MPa)
3	10,530	15,13	30,56	30 000	75,70	7,40
3	10,555	15,19	30,47	31 500	78,90	7,70
7	10,560	15,14	30,53	42 000	105,90	10,40
7	10,540	15,13	30,47	41 500	104,80	10,30
28	10,565	15,13	30,42	44 000	111,10	10,90
28	10,550	15,11	30,45	46 000	116,40	11,40

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Aplicación de carga a compresión**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Se puede observar en la tabla III que los especímenes están dentro del rango de resistencia a compresión para el concreto permeable (28 a 280 kg/m²).

3.5.2. Ensayo a flexión

El concreto es un material rígido, por lo tanto, no trabaja a flexión, sin embargo, es importante conocer su valor, ya que esto contribuye al cálculo del concreto reforzado como en losas y pavimentos. El comité ACI 522 determinó que el contenido de aire afecta inversamente su resistencia a flexión, a mayor contenido de aire menor resistencia a flexión debido a esto es que se añade un pequeño porcentaje de agregado fino (alrededor del 5 %) para aumentar su resistencia.

El cálculo de la flexión se mide según la Norma NTG - 41017 h2 (ASTM C-78) y dependerá de la ubicación de la falla en la probeta, si la falla ocurre en los tercios extremos o si ocurre en el tercio medio. También especifica que la probeta a ensayar es una viga con una sección de 6 x 6 pulg con la longitud mínima de tres veces su espesor, teniendo en cuenta de agregar el espacio suficiente para el montaje de la probeta sobre los apoyos. Cabe destacar que “la flexión o módulo de ruptura está dentro del rango de 10 kg/cm² a 38 kg/cm² para el concreto permeable.”⁶

Si la fractura se presenta en el tercio medio de la luz, el módulo de ruptura se calcula de la siguiente manera:

⁶ RODAS RALDA, Natalia Ixchel. *Desarrollo y uso de bloques de concreto permeable en senderos ecológicos*. p 10.

$$R = \frac{P \times L}{b \times d^2}$$

Donde:

R = módulo de ruptura

P = carga máxima aplicada

L = distancia entre apoyos

b = ancho del espécimen

d = peralte del espécimen

La viga se ensayó a los 28 días de fraguado y falló en el tercio medio con una carga de 5 000 lb.

Tabla VI. **Datos de laboratorio del ensayo a flexión**

DATOS DE LABORATORIO	
P (lb)	5 000
L (pulg)	18
b (pulg)	6
d (pulg)	6

Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto el módulo de ruptura es igual a:

$$R = 29,30 \text{ kg/cm}^2 \text{ (2,85 MPa)}$$

Figura 21. **Aplicación de carga a flexión**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

3.5.3. Permeabilidad

Es la característica más distinguida de este material y por lo que se considera como un material ecológico. La capacidad de filtración del agua depende del tamaño del poro en el concreto permeable; a mayor contenido de aire, mayor filtración de agua, sin embargo, a mayor contenido de aire, menor resistencia a compresión, por lo tanto, se debe realizar un diseño de mezcla para tener un balance entre la tasa de infiltración y una resistencia aceptable.

La tasa de infiltración mínima que establece la Norma NTG – 41017 h 34 (ASTM C-1701: método estándar para pruebas de infiltración en el concreto permeable) es de 0,2 centímetros/segundo (283 pulg/hora) la misma establece que el equipo necesario para realizar la prueba es el siguiente:

- Anillo de filtración
- Balanza
- Cronometro
- Sellador
- Agua

La norma específica que se debe fabricar una probeta de 12 x 24 x 3 pulg para realizar la prueba, sobre ésta placa se debe colocar el anillo y aplicar el sellador (se debe dejarlo secar por 24 horas) por toda la orilla para evitar fugas.

La tasa de infiltración se calcula de la siguiente manera:

$$i = \frac{K \times M}{\varphi^2 \times t}$$

Donde:

i = tasa de infiltración en pulgadas/hora

K = constante de permeabilidad, que según la Norma ASTM C-1701, para el concreto permeable es 126 870 pulg³xsegundo / librasxhora

M = masa del agua utilizada en libras

φ = diámetro del anillo en pulgadas

t = tiempo que tarda el agua en filtrarse en segundos

Figura 22. **Placa para prueba de infiltración**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Tabla VII. **Datos de laboratorio del ensayo de permeabilidad**

DATOS DE LABORATORIO			
M=	20 litros =	44,09	lb
φ=	20 cm =	7,87	pulg
t=	24,87	segundos	

Fuente: elaboración propia.

$$i = \frac{(126\,870 \text{ pulg}^3 \times \text{segundos} / \text{libras} \times \text{hora}) \times (44,092 \text{ libras de agua})}{(7,874016 \text{ pulg})^2 \times (24,87 \text{ segundos})}$$

$$i = 3\,627,859 \text{ pulg/hora}$$

Debido a que la densidad del agua es 1 000 kg/m³, se puede relacionar la capacidad volumétrica a una masa para convertir los m³ a litros y luego a libras de agua. Por tanto, el diseño de mezcla presentó una taza de infiltración mucho mayor a la establecida por la norma.

Figura 23. **Ensayo de permeabilidad**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

3.6. Ensayos de suelos

Es importante conocer las características físicas y propiedades mecánicas del suelo para determinar si se puede utilizar en terraplenes o se deba estabilizar, determinar empuje y otros cálculos para controlar los suelos en un proyecto.

3.6.1. Límites de Atterberg

Por esto, “es necesario conocer la plasticidad en el suelo que es la consistencia y cohesión que tienen las partículas que depende del contenido de agua, ya que presenta varios estados de consistencia; tales como: sólido, semisólido, plástico, semilíquido o líquido”⁷. La arcilla por ejemplo, acepta deformaciones sin romperse (plasticidad), debido a lo anterior, los límites de Atterberg o límites de consistencia se utiliza en la identificación y clasificación de un suelo, así como para determinar los estados de plasticidad.

Estos son: el límite de contracción que es la frontera convencional entre el estado sólido y semisólido; el límite plástico que es la frontera entre los estados semisólido y plástico; y el límite líquido que es la frontera entre el estado plástico y semilíquido o entre el plástico y líquido (ver figura 24).

⁷ HERNÁNDEZ CANALES, Juan Carlos. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. p. 46.

Figura 24. **Límites de Atterberg**

Sólido	Semisólido	Plástico	Semilíquido	Líquido
LC		LP	LL	

Fuente: HERNÁNDEZ CANALES, Juan Carlos. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. p. 47.

3.6.1.1. Límite líquido (LL)

“Se utilizar para estimar asentamiento a través de un método mecánico conocido como Copa de Casagrande, la cual es esférica con un radio interior de 54 mm y tiene una manivela que se debe rotar a 120 revoluciones por minuto con una altura de caída de 1 cm y cada golpe corresponde a un esfuerzo cortante de 1 g/cm^2 ⁸. Se debe realizar una ranura al suelo con una espátula y el ensayo consiste en determinar el número de golpes necesarios para cerrar la ranura hecha en la muestra de suelo con tres o más diferentes contenidos de humedad.

La muestra que se ensayó, presentó un límite líquido de 24,8 % y se realizó según las Normas AASHTO T-89 y T-90 y ASTM D-4318.

3.6.1.2. Límite plástico (LP)

La prueba consiste en elaborar cilindros con la muestra de suelo, de 1/8 pulg (aproximadamente 3 mm) al rodarse con la palma de la mano sobre una superficie lisa y determinar el contenido de humedad del suelo en la cual el

⁸ HERNÁNDEZ CANALES, Juan Carlos. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. p. 48 a la 62.

cilindro se rompe o agrieta. Esta prueba es muy subjetiva porque el operario debe interpretar cuándo se presenta el agrietamiento así como el diámetro del cilindro.

3.6.1.3. Índice de plasticidad (IP)

Numéricamente es la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP). Representa la variación de la humedad para que el suelo se pueda conservar en un estado plástico. Ambos límites dependen de la cantidad y calidad de arcilla presente en la muestra y varía de cero hasta 17 (ver tabla VIII).

Tabla VIII. **Clasificación de los suelos según su índice de plasticidad (IP)**

Si $IP = 0$	Si no es posible determinar uno de los dos límites (LL o LP), o si la diferencia es negativa. El suelo se clasifica como no plástico (NP)
Si $IP < 7$	El suelo tiene una baja plasticidad
Si $7 < IP < 17$	El suelo es medianamente plástico
Si $IP > 17$	Suelo altamente plástico

Fuente: BOWLES, Joseph. *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. p. 21.

El suelo ensayado presentó un IP de 8,3 % y debido a su presencia de arena mostró una baja plasticidad. Por lo tanto, el suelo es una arcilla arenosa de baja plasticidad color café.

Figura 25. **Muestra de suelo**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigaciones de Ingeniería.

3.6.2. Corte directo

Este ensayo se utiliza según lo establecido por la Norma ASTM D 3080-04 para determinar el peso específico del suelo, cohesión y el ángulo de fricción interna que son los valores necesarios para “el cálculo de esfuerzo cortante en la ecuación de *Coulomb*⁹”; según el reporte, el suelo presentó un peso específico de 1 370 kg/m³, un ángulo fricción interna de 17,93° y una cohesión aparente de 1 750 kg/m² (ver anexos).

3.7. Construcción a escala del muro

El muro construido tiene una altura de 1 metro formando una L de 3,28 metros por 0,92 metros de largo. Con la finalidad de evaluar el comportamiento del muro bajo la presión sometida por el suelo, se detalla la siguiente comparación:

⁹ HERNÁNDEZ CANALES, Juan Carlos. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. p. 274.

Empuje del suelo:

Para determinar el esfuerzo activo, primero se debe calcular el coeficiente lateral de empuje activo de la siguiente manera:

$$K_a = \frac{1 - \text{sen}(\Phi)}{1 + \text{sen}(\Phi)}$$

Donde:

K_a = coeficiente lateral de empuje activo

Φ = ángulo de fricción interna del suelo.

$$K_a = \frac{1 - \text{sen}(17,93^\circ)}{1 + \text{sen}(17,93^\circ)}$$

$$K_a = 0,52922$$

Luego el esfuerzo activo se determina mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma_a = \gamma_s \times h \times K_a$$

Donde:

σ_a = esfuerzo activo

γ_s = peso específico del suelo

h = altura del muro

K_a = coeficiente lateral de empuje activo

$$\sigma_a = (0,00137 \text{ kg/cm}^3) \times (100 \text{ cm}) \times (0,52922)$$

$$\sigma_a = 0,072503 \text{ kg/cm}^2$$

Presión sobre el concreto permeable:

El esfuerzo que resiste el concreto permeable está dado por la siguiente fórmula:

$$\sigma_c = \gamma_c \times h$$

Donde:

σ_c = esfuerzo del concreto permeable

γ_s = peso unitario del concreto permeable

h = altura del muro

$$\sigma_a = (0,00197720 \text{ kg/cm}^3) \times (100 \text{ cm})$$

$$\sigma_a = 0,197720 \text{ kg/cm}^2$$

Luego se puede realizar la comparación de los esfuerzos

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_a} = \frac{0,197720 \text{ kg/cm}^2}{0,072503 \text{ kg/cm}^2} = 2,73$$

A continuación se describe el procedimiento del montaje del muro de contención para sistemas de tierra armada, el cual se construyó al final del caminamiento que está entre el edificio T-7 hacia el edificio Emilio Beltranena, USAC.

Figura 26. **Ubicación para el montaje del muro**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

En primer lugar se procedió a la excavación necesaria para colocar las placas en toda su longitud y profundidad.

Figura 27. **Excavación**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

Luego se debe fundir una solera de nivelación, que no es una cimentación, su única función es nivelar la superficie y es fundamental que tenga una buena

horizontalidad para el montaje de la primera fila de las placas, además se hace de concreto permeable para que su filtración sea continua hacia el subsuelo y evitar que el agua se concentre en el punto más bajo de la contención.

Figura 28. **Solera de nivelación**

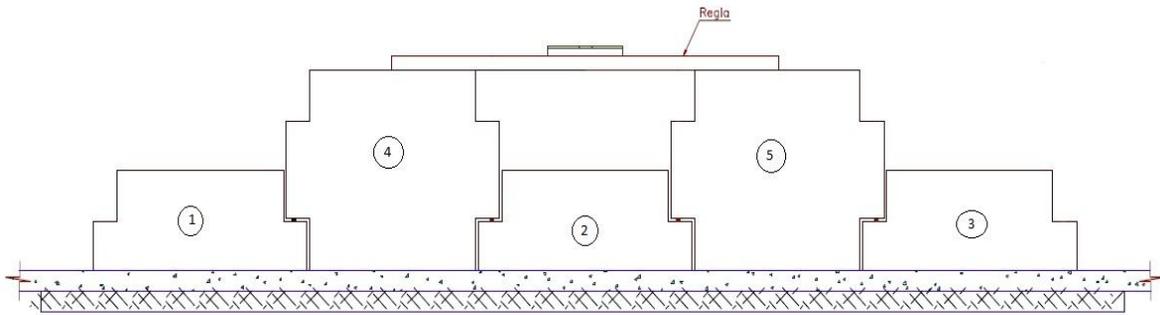


Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

Seguidamente se procese a la instalación de la primera fila de placas, bajo el siguiente orden de operación:

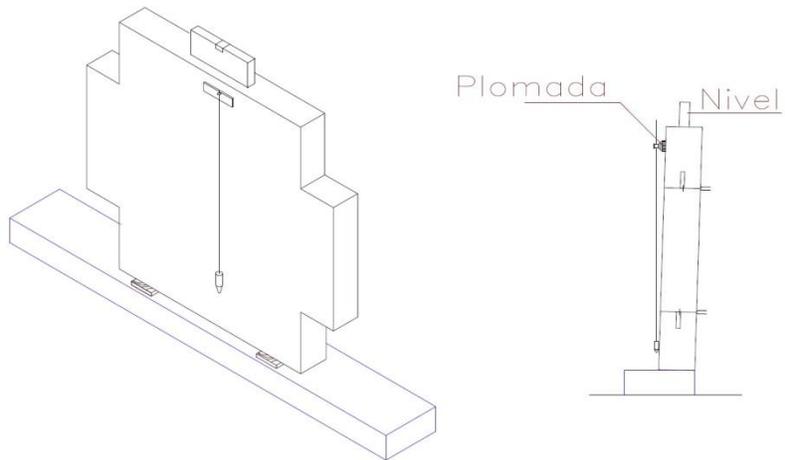
- Colocación de placa núm. 1
- Colocación de las placas núm. 2 y núm. 3
- Colocación de las placas núm. 4 y núm. 5
- Comprobación de horizontalidad entre las placas.
- Verificación de la verticalidad de las placas con plomo nunca con nivel.

Figura 29. **Orden de instalación del muro**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Figura 30. **Verificación de plomo y nivel**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Figura 31. **Nivelación de la primera fila del muro**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

Figura 32. **Instalación de la primera fila del muro**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

Posteriormente se procedió a proteger la espalda del muro con un encajuelado de agregado grueso de 3/4" del mismo espesor que la placa de concreto (4 pulg) para generar un drenaje francés y evitar que el poro de la placa se obstruya con suelo al estar saturado, y de un desgaste prematuro por

el continuo contacto con el suelo saturado. Esto se trabajó de manera continua a lo alto y a lo largo del muro.

Figura 33. **Instalación del drenaje francés**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

A continuación se empezó a agregar el suelo con el 5 % del volumen en cal para eliminar el hinchamiento a la arcilla. Esto se logró agregando 2 libras de cal en cada bote de 5 galones, se debe agregar a la mitad del bote así al vaciarlo en la contención, el suelo se mezcla con la cal. Luego se compacta la capa, recordando que cada una no tiene que ser mayor a 4 pulg para sacar el aire que queda atrapado en el suelo. Este procedimiento se repite en todas las capas hasta cubrir la altura del muro.

Figura 34. Estabilización del suelo con cal



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

Después se colocaron los flejes, de manera ordenada en la contención para realizar el amarre a la tierra. Esto le brinda una mayor estabilidad disminuyendo la presión al muro.

Figura 35. Instalación de primera cama de flejes



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

Seguidamente se agregó otra capa de suelo agregando cal y compactando hasta llegar a la altura para instalar la segunda fila del muro.

Figura 36. **Instalación de la segunda fila del muro**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

Este procedimiento se repite hasta alcanzar la altura del muro, por consiguiente a continuación solo se mostrarán las fases de la instalación:

Figura 37. **Instalación de segunda cama de flejes**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

Figura 38. **Instalación de la tercera fila del muro**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

Figura 39. **Instalación de tercera cama de flejes**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

Figura 40. **Instalación de la cuarta fila del muro**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

Figura 41. **Instalación de cuarta cama de flejes**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

Figura 42. Instalación terminada del muro



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

Posteriormente se procedió a colocar una columna de confinamiento en la esquina donde se forma la L para unificar el muro.

Figura 43. Columna de confinamiento



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

Luego se continuó con la colocación de un remate de 5 centímetros de espesor cubriendo el espesor de la placa y del encajuelado, que amarrará todo el muro, proteja el drenaje y unificará el sistema. De igual forma está hecho de concreto permeable para no interrumpir el flujo del agua a través del muro.

Figura 44. **Solera corona**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

Después se niveló con el suelo hasta alcanzar la altura final del muro

Figura 45. **Muro terminado**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

3.7.1. Costos

A continuación se detalla la integración de costos de este trabajo de investigación. Para esto es necesario determinar la cantidad total de materiales utilizados, así como el costo por los ensayos de control de calidad y la mano de obra.

Tabla IX. Integración de costos

Núm. De renglón	Descripción	Unidad de medida	Cantidad	Costo unitario (en quetzales)	Costo total (en quetzales)
1	Ensayo de límites de Atterberg del suelo	Único	1	360,00	360,00
2	Ensayo de análisis granulométrico del suelo	Único	1	460,00	460,00
3	Ensayo de corte directo al suelo	Único	1	700,00	700,00
4	Análisis completo del agregado fino	Único	1	600,00	600,00
5	Análisis completo del agregado grueso	Único	1	480,00	480,00
6	Ensayos de concreto fresco y elaboración de cilindros	Único	1	1 032,00	1 032,00
7	Ensayo a flexión	Único	1	90,00	90,00
8	Ensayo de permeabilidad	Único	1	50,00	50,00
9	Tabla de madera de pino de 10 pies	pie	3	55,00	165,00
10	Elaboración de moldes para placas	Molde	6	85,00	510,00
11	Arena triturada	m ³	1	90,00	90,00
12	Piedrín de 3/8"	m ³	1	190,00	190,00
13	Cemento estructural de 5 800 psi	saco	4	90,00	360,00
14	Fleje 2 000 metros	rollo	1	78,00	78,00
15	Mano de obra por excavación y corte del talud	m ³	2,99	45,00	134,55
16	Instalación del muro	m ²	4,20	60,00	252,00
Total de la investigación					5 551,55

Fuente: elaboración propia.

Como primer punto se debe realizar un análisis del suelo donde se desea instalar el muro, para esto se debe entregar un pie cúbico de muestra, cubierta en parafina. Se debe tener en cuenta que solo se realizaron los estudios básicos en esta investigación (ver anexos) y para un mayor control,

dependiendo del proyecto, se deben hacer más estudios al suelo acorde a las especificaciones técnicas.

Luego los ensayos para los agregados y para realizar el control de calidad del concreto fresco, elaboración y ensayo de cilindros; ensayo a flexión y de permeabilidad.

Seguidamente el costo de los materiales está dado por el volumen utilizado en: ensayos de control de calidad (Ver ejemplo ilustrativo) 0,072 m³; solera del muro 0,025 m³, las 14 placas es de 0,42 m³, volumen para la columna de confinamiento de 0,01 m³ y para el remate del muro es de 0,043 m³. Para un volumen total de 0,50 m³. Para lo cual se necesita 142 kg de cemento (4 sacos); 44 kg de agregado fino; 595 kg de agregado grueso. Adicionalmente se compró un rollo de 2 000 metros de fleje.

Por tanto, el costo total de la investigación asciende a Q5 551,55

El costo por los materiales representa el 13 % del costo total, por esta razón, el concreto permeable es una solución constructiva, además de ser funcional es muy económica debido a que no necesita mucha agua no produce asentamientos y genera un alto rendimiento para llenar los volúmenes. Se hace mención que para la fabricación de las placas y la instalación de muro, se utilizó el equipo y herramienta proporcionada por la sección de agregados, concretos y morteros del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII).

4. RESULTADOS

4.1. Resumen de resultados obtenidos

Con base en los análisis realizados se detalla los resultados obtenidos en las siguientes tablas.

Tabla X. **Resumen de las características físicas de los agregados**

	Agregado fino	Agregado grueso
Peso específico	2,62	2,67
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1 800,00	1 520,00
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1 670,00	1 440,00
Porcentaje de vacíos (%)	31,00	43,00
Porcentaje de absorción (%)	0,70	0,80
Contenido de materia orgánica	1,00	N/A
Pasa tamiz núm. 200 (%)	4,80	1,00
Retenido tamiz 6,35 (%)	0,00	60,70
Módulo de finura	2,72	5,88

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Resumen de los ensayos de concreto fresco**

Revenimiento	0"
Peso volumétrico (kg/m ³)	1 977,20

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Resumen de los ensayos de concreto endurecido**

Resistencia a compresión (kg/cm ²)	116,40
Resistencia a flexión (kg/cm ²)	29,30
Permeabilidad (pulg/hora)	3 627,85

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Resumen de los ensayos de suelo**

Ángulo de fricción interna	17,93°
Cohesión (kg/m ²)	1 750
Peso específico (kg/m ³)	1 370

Fuente: elaboración propia.

4.2. Índice de permeabilidad

La mejor forma para un buen drenaje en la contención es un suelo granular. Sin embargo, debido a que el movimiento de tierras es el proceso más costoso en un proyecto, representaría un alto costo cambiar un suelo que no drene el agua por otro más favorable, así que no es factible desechar un material que no permita el flujo de agua fácilmente.

Si el suelo que se va a utilizar para la contención absorbe el agua en lugar de generar una escorrentía, se debe hacer una combinación con otro suelo granular para que el agua tenga una mayor facilidad de filtración, teniendo en cuenta que se debe mezclar y no solo agregarlo en capas separadas; adicionalmente instalar un drenaje francés en toda la espalda del muro con un agregado grueso que sea como mínimo de 3/4 de pulg.

4.3. Funcionalidad del manejo de escorrentía

Como ya se ha mencionado, se colocó un encajuelado en toda la espalda del muro utilizando agregado grueso de 3/4" con la finalidad que el agua drene con una mayor escorrentía, además que le brinda una protección al muro evitando que el poro se obstruya por la filtración de suelos finos, mientras que evita que el concreto permeable se desgaste con mayor rapidez debido a que se encontraría en continuo contacto con el suelo saturado.

Luego se sometió a prueba el muro simulando una lluvia torrencial durante una hora y media, utilizando mangueras. Transcurridos los primeros cuarenta minutos, el muro el muro empezó a evacuar el agua a través de las placas y sus poros.

Figura 46. Simulación de lluvia



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

Posteriormente la escorrentía de agua empezó a fluir con mayor rapidez, evacuando la mayoría del agua que ingresaba en la contención del muro. Tras

la hora y media de la simulación de lluvia, se cortó el flujo de agua y el muro continuó drenando el agua retenida durante treinta minutos.

Figura 47. **Drenado del agua en el muro**



Fuente: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería entre el edificio T-7 y el edificio Emilio Beltranena.

Por tanto, se puede afirmar que el muro cumplió con su función de evacuar el exceso de agua que se genera en la contención de suelos saturados.

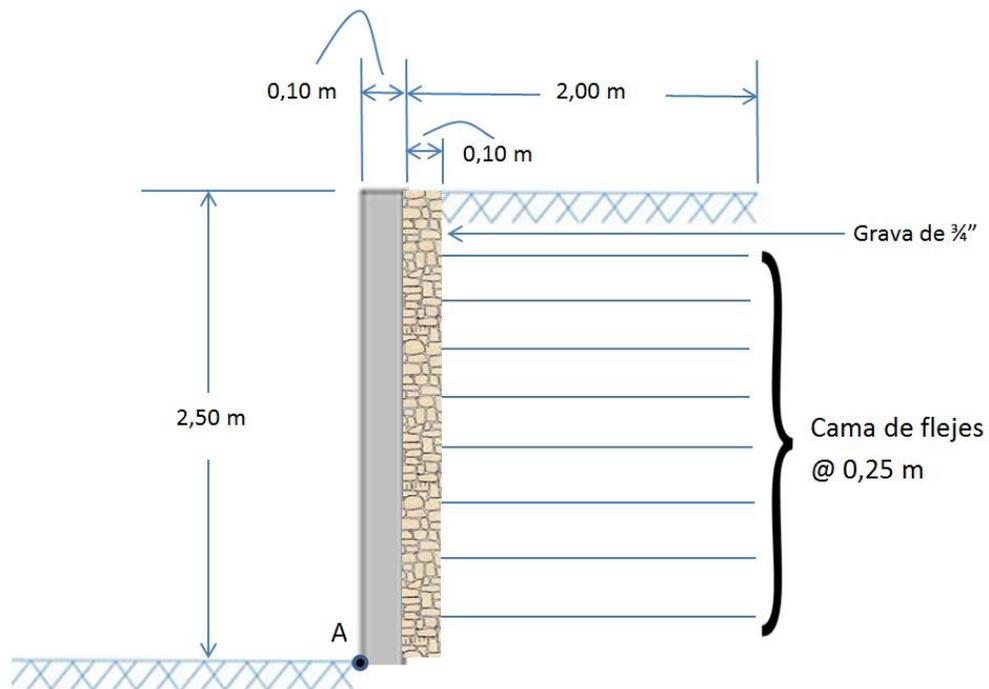
4.4. Ejemplo ilustrativo para el diseño de un muro de paramento con concreto permeable

Un muro de retención es un objeto tridimensional (longitud, altura y profundidad), con el fin de simplificar el análisis; la longitud del muro se

considera de un metro (o un pie) y el muro se analiza como un sistema de dos dimensiones. La cantidad mínima recomendada de factores de seguridad para muros de retención reforzados con anclas son de 1,50 para el fallo por deslizamiento y de 2,00 para fallo por volteo.

El siguiente ejemplo de la figura 48 ilustra el procedimiento para el análisis de la estabilidad en el deslizamiento (SFS) y volteo (OFS):

Figura 48. **Análisis de muro de concreto permeable**



Fuente: elaboración propia, empleando Adobe Photoshop CS6.

$H = 2,50 \text{ m}$ (5 placas)

$\Phi = 17,93^\circ$

$K_a = 0,52922$

$\rho_{\text{suel}} = 1\ 370,00 \text{ kg/m}^3$

$$\rho_{\text{concr}} = 1\,977,20 \text{ kg/m}^3$$

$$L_g = 0,80 (2,50 \text{ m}) = 2,00 \text{ m}$$

Donde:

H = altura del muro.

Φ = ángulo de fricción interna.

Ka = coeficiente lateral de empuje activo.

ρ_{suel} = peso volumétrico del suelo.

ρ_{concr} = peso volumétrico del concreto permeable.

Lg = largo de la geomalla

Normalmente se estima que la longitud de la geomalla requerida que debe ser al menos el 80 % de la altura del muro. Seguidamente se calcula el peso de la gravedad coherente del muro:

$$W_m = (\rho_{\text{concr}}) (H) (\text{esp}) (g)$$

Donde:

Wm = peso del muro.

ρ_{concr} = peso volumétrico del concreto permeable.

H = altura del muro.

esp = espesor del muro. (ver figura 9)

g = gravedad (9,81 m/s²)

$$W_m = (1\,977,20 \text{ kg/m}^3) (2,50 \text{ m}) (0,10 \text{ m}) (9,81 \text{ m/s}^2)$$

$$W_m = 4\,849,08 \text{ N/m}$$

El peso del suelo es igual al peso volumétrico del relleno, multiplicado por la altura del muro, multiplicado por profundidad (medida desde la cara posterior al muro al final de la geomalla).

$$\begin{aligned} W_s &= (\rho_{\text{suel}}) (H) (Lg) (g) \\ &= (1\,370,00 \text{ kg/m}^3) (2,50 \text{ m}) (2,00 \text{ m}) (9,81 \text{ m/s}^2) \\ &= 67\,198,50 \text{ N/m} \end{aligned}$$

El peso total de muro de gravedad coherente es de:

$$\begin{aligned} W_t &= W_m + W_s \\ &= (4\,849,08 \text{ N/m}) + (67\,198,50 \text{ N/m}) \\ &= 72\,047,58 \text{ N/m} \end{aligned}$$

El próximo paso es determinar el activo total de la fuerza ejercida por el suelo al muro, mediante la ecuación:

$$F_a = (0,5) (\rho_{\text{suel}}) (K_a) (H)^2 (g)$$

Donde:

F_a = fuerza active sobre el muro.

ρ_{suel} = peso volumétrico del suelo.

K_a = coeficiente lateral de empuje activo.

H = altura del muro.

g = gravedad (9,81 m/s²)

$$\begin{aligned} F_a &= (0,5) (1\,370 \text{ kg/m}^3) (0,52922) (2,50 \text{ m})^2 (9,81 \text{ m/s}^2) \\ F_a &= 22\,226,74 \text{ N/m} \end{aligned}$$

Las componentes horizontal y vertical de la fuerza activa son:

$$\begin{aligned}F_h &= (F_a) \cos (\Phi) \\&= (22\,226,74 \text{ N/m}) \cos (17,93^\circ) \\&= 21\,147,26 \text{ N/m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}F_v &= (F_a) \sin (\Phi) \\&= (22\,226,74 \text{ N/m}) \sin (17,93^\circ) \\&= 6\,842,61 \text{ N/m}\end{aligned}$$

A continuación la fuerza total se calcula:

$$\begin{aligned}V_t &= W_m + F_v \\&= (4\,849,08 \text{ N/m}) + (6\,842,61 \text{ N/m}) \\&= 78\,890,19 \text{ N/m}\end{aligned}$$

La fuerza resistente al deslizamiento se calcula multiplicando el total de la fuerza vertical por la dirección del ángulo de fricción del suelo:

$$\begin{aligned}F_r &= (V_t) \tan (\Phi) \\&= (78\,890,19 \text{ N/m}) \tan (17,93^\circ) \\&= 25\,526,46 \text{ N/m}\end{aligned}$$

Seguidamente se calcula la resistencia adicional que proporcionan las anclas en el suelo (cama de flejes), según el fabricante, estos pueden soportar una carga de 500 lb (226,80 kg). Se calcula de la siguiente manera:

$$F_e = \frac{(226,80 \text{ kg})(9,81 \text{ m/s}^2)}{0,25 \text{ m}}$$

$$F_e = 8\,899,57 \text{ N/m}$$

El factor resultante de seguridad para deslizamiento para un muro con anclas, está dado por la suma de la fuerza resistente (F_r) y la resistencia por las camas de flejes (F_e) dividido entre la fuerza activa horizontal:

$$SFS = \frac{(25\,526,46 \text{ N/m}) + (8\,899,57 \text{ N/m})}{(21\,147,26 \text{ N/m})}$$

$$SFS = 1,63 \geq 1,50 \quad OK$$

Dos fuerzas contribuyen al momento resistiendo el vuelco en el muro. Estos momentos son el peso del muro, que es el momento resistente al volteo (M_r), y la componente vertical de la fuerza activa en el muro (M_o). Todos los momentos son tomados desde el punto A en la figura 48.

Momento resistente al volteo (M_r):

$$\Sigma M_{rA} = (W_m) (0,5) (\text{esp}) + (W_s) (0,5) (L_g) + (F_v) (L_g)$$

Donde:

ΣM_{rA} = sumatoria de momentos resistentes al volteo en el punto A.

W_m = peso del muro.

esp = espesor del muro.

W_s = peso del suelo.

L_g = largo de la geomalla

F_v = componente vertical de la fuerza activa.

$$\Sigma Mr_A = (4\ 849,08\ \text{N/m}) (0,5) (0,10\ \text{m}) + (67\ 198,50\ \text{N/m}) (0,50) (2,00\ \text{m}) + (6\ 842,61\ \text{N/m}) (2,00\ \text{m})$$

$$\Sigma Mr_A = 81\ 126,17\ \text{N-m/m}$$

Momento provocante del volteo (M_o):

$$\Sigma Mo_A = (F_h) (1/3) (H)$$

Donde:

ΣMo_A = sumatoria de momentos provocante del volteo en el punto A.

F_v = componente horizontal de la fuerza activa.

H = altura del muro.

$$\Sigma Mo_A = (21\ 147,26\ \text{N/m}) (1/3) (2,50\ \text{m})$$

$$\Sigma Mo_A = 17\ 622,72\ \text{N-m/m}$$

El factor de seguridad contra el volteo (OFS) está dado por la siguiente ecuación:

$$\text{OFS} = \frac{\Sigma Mr_A}{\Sigma Mo_A} \geq 2,00$$

$$\text{OFS} = \frac{81\ 126,17\ \text{N} - \text{m/m}}{17\ 622,72\ \text{N} - \text{m/m}} = 4,60$$

$$\text{OFS} = 4,60 \geq 2,00\ \text{OK}$$

Ya que ambos factores de seguridad de este muro exceden los mínimos, el muro es el adecuado con respecto al deslizamiento y vuelco. En los casos en que uno de los factores de seguridad es inferior a la requerida, entonces la longitud de la geomalla se debe aumentar y se repite el análisis. El proceso termina cuando ambos factores de seguridad superan el mínimo de los valores recomendados.

4.5. Análisis y comparación de resultados

El trabajo de investigación consistió en estudiar el comportamiento del concreto permeable como un muro de contención para ser utilizado como sistema de evacuación del agua en la contención de un suelo saturado, esto para disminuir el diagrama de presiones que se ejercen en él. Debido a que este concreto es ligero por sí solo, no está diseñado para instalarlo a muros de gran altura.

Para realizar el estudio se procedió con el diseño de mezcla de concreto permeable según los parámetros por el Comité ACI 522 R-10, a continuación se detalla una comparación de resultados con las otras investigaciones mencionadas en el primer capítulo:

Tabla XIV. **Comparación de resultados**

Investigación	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia a flexión (kg/cm ²)	Permeabilidad (pulg/hora)
Desarrollo y uso de bloques de concreto permeable en senderos ecológicos	56,44	19,18	1 601,89
Características físicas y propiedades mecánicas del concreto permeable utilizando una fibra derivado del proceso de reciclaje del PET	130,52	21,41	3 616,96
Concreto permeable con adición de tiras de plástico y su aplicación en pavimentos rígidos de tráfico liviano.	192,73	29,57	796,60
Permeabilidad en muros de paramento para la estabilización de tierra armada	116,40	29,30	3 627,86

Fuente: elaboración propia.

Según los estudios del suelo, se determinó que el suelo de relleno para el talud, es una arcilla arenosa de baja plasticidad de color café. Debido a esto, se realizó una estabilización agregando cal al 5 % del volumen del suelo distribuido uniformemente y en múltiples capas para eliminar el hinchamiento que la arcilla produce cuando se satura.

El muro de concreto permeable es recomendable instalarlo hasta una altura máxima de 2,50 metros, según el análisis de estabilidad y a la proporción de las placas; es importante mencionar que en la corona del muro no debe aplicarse ninguna carga o solo carga peatonal; así mismo la longitud de este debe aproximarse a un área rectangular donde no supere tres veces su altura. Este sistema de filtrado se puede combinar con muros con contrafuertes para alcanzar muros de gran altura, ya que la losa vertical del sistema se podría realizar de concreto permeable para evacuar el agua en la contención. Se recomienda consultar con un especialista para realizar el análisis.

CONCLUSIONES

1. El muro de paramento de concreto permeable funciona hasta una altura máxima de 2,50 metros; debido a que es de baja resistencia por el alto porcentaje de vacíos que presenta y para desarrollar muros de mayor altura, se deberán hacer estudios más profundos, como una mayor compactación y añadir geomallas especiales al suelo para que aporte una mayor estabilidad.
2. Debido al tipo del suelo con el que se cuenta, el cual es: arcilla arenosa de baja plasticidad color café; se debió estabilizar para mitigar la expansión que produce cuando está saturada, agregando el 5 % de cal respecto al volumen mismo y así eliminar el hinchamiento.
3. La resistencia a compresión y a flexión fueron superadas por las resistencias mínimas que establece el reporte del Comité ACI 522 R-10. La resistencia a compresión obtenida en ésta investigación fue de 116,40 kg/cm² respecto a la mínima de 28 kg/cm² establecida por este Comité. La resistencia a flexión fue de 29,30 kg/cm² respecto a la mínima propuesta por el Comité de 10 kg/cm².
4. El resultado de infiltración en este estudio de acuerdo al diseño del concreto permeable fue de 3 627,86 pulg/hora superando la mínima propuesta por la Norma NTG – 41017 h 34 (ASTM C-1701) de 283 pulg/hora. Por esto permite la rápida evacuación del agua.

5. El sistema presentó buenas características para la evacuación del agua, evitando generar licuefacciones, desprendimiento de suelo, deslizamientos y erosiones.
6. Debido a la alta capacidad de filtración es posible captar el agua y reutilizarla para riego, limpieza u otras actividades humanas.

RECOMENDACIONES

1. Realizar constante inspección visual cuando se esté realizando el concreto permeable, ya que al agregar demasiada agua al diseño de mezcla se puede producir pasta, la cual llena los vacíos, volviendo el concreto impermeable y por consiguiente una baja resistencia.
2. Se debe tener un riguroso control en el curado de las placas, ya que deben mantener su humedad como mínimo tres días después de su fabricación, en un ambiente fresco y cubiertos con nylon u otro material no absorbente.
3. Realizar una combinación con un suelo granular al volumen de suelo original para aumentar la escorrentía y disminuir el diagrama de presiones que se generan en el muro por el suelo saturado.
4. Se debe tener especial cuidado en la instalación del muro, por ser un material poroso tiende a desportillarse con facilidad cuando se arma una placa sobre otra.
5. No compactar vigorosamente cuando se coloque el concreto permeable para evitar llenar los vacíos en él.
6. Si se va a aplicar carga en la parte de arriba del talud, como estribos para puentes; hacer una combinación de sistemas de contención, como con un muro con contrafuertes, ya que recibirán toda la presión de

empuje y las placas de concreto permeable servirán como un filtro para drenar el agua.

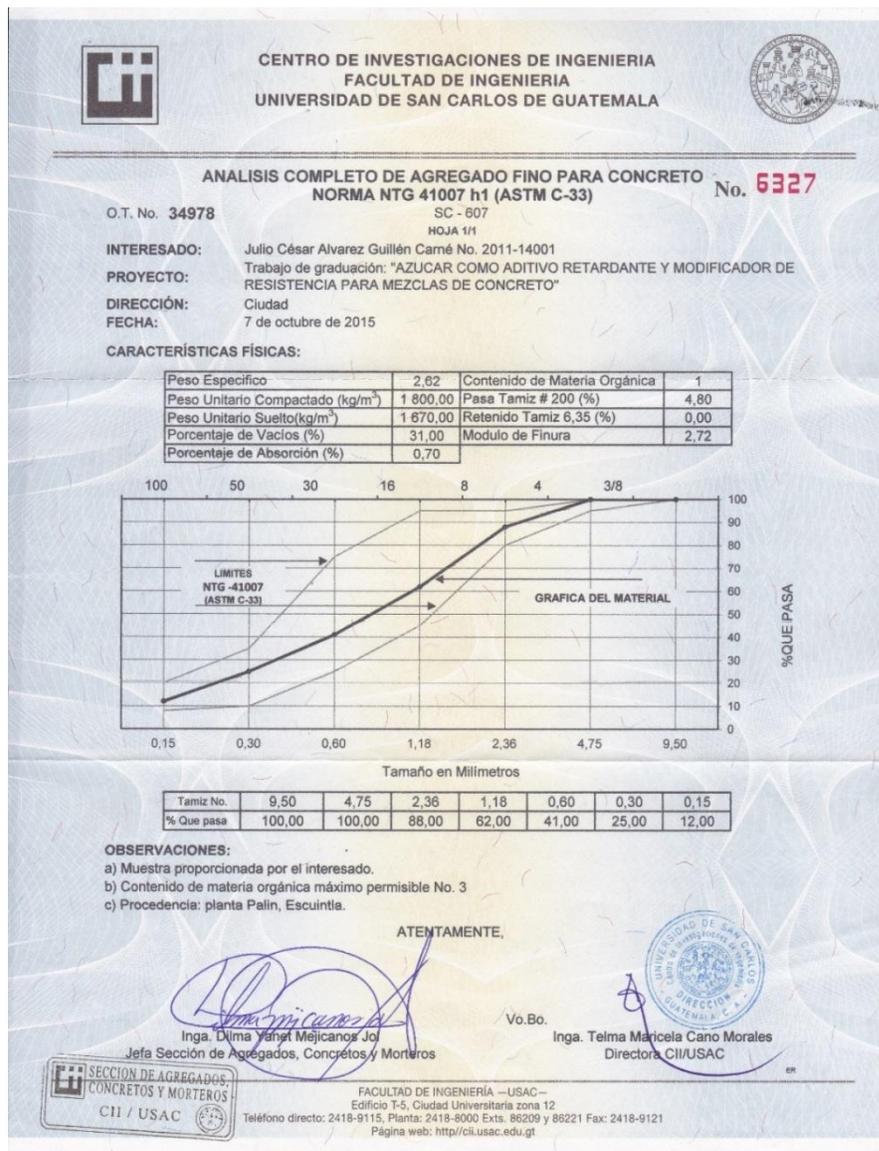
BIBLIOGRAFÍA

1. ALVAREZ GUILLÉN, Julio César. *Azúcar como aditivo retardante y modificador de resistencia para mezclas de concreto*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2017. 143 p.
2. BONILLA PENSABENE, Eddi David. *Diseño de muros de contención de bloques segmentantes*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos. 2009. 143 p.
3. GONZÁLEZ CABRERA, José Iván. *Estudio y evaluación de las características físicas y propiedades mecánicas del concreto polimérico permeable para su utilización en proyectos con fines ambientales*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2015. 127 p.
4. HERNÁNDEZ CANALES, Juan Carlos. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos. 2008. 510 p.
5. HERNÁNDEZ RIVERA, Marlon Estuardo. *Concreto permeable con adición de tiras de plástico y su aplicación en pavimentos rígidos de tráfico liviano*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2017. 176 p.

6. MORALES MENDEZ, Boris Leonel. *Sistema prefabricado T-WALL para muros de contención*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2004. 96 p.
7. MORATAYA PEREZ, Lisbeth Johana. *Sistemas de tierra armada con geomalla (procedimiento de diseño y evaluación de estructuras existentes)*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos. 2011. 157 p.
8. MORALES RAMÍREZ, Evelyn Maribel. *Manual de apoyo docente para desarrollar ensayos de laboratorio, relaciones con materiales de construcción*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2006. 166 p.
9. PANTOJA PRERA, José Julio. *Protección de taludes utilizando el método Soil Nailing*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2008. 111 p.
10. RODAS RALDA, Natalia Ixchel. *Desarrollo y uso de bloques de concreto permeable en senderos ecológicos*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2012. 117 p.

ANEXOS

Anexo 1. Informe del análisis completo de agregado fino



Fuente: ÁLVARES GUILLEN, Julio César. *Azúcar como aditivo retardante y modificador de resistencia para mezclas de concreto.*

Anexo 2. Informe del análisis completo de agregado grueso



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



ANALISIS COMPLETO DE AGREGADO GRUESO PARA CONCRETO
NORMA NTG 41007 h1 (ASTM C-33)
 INFORME No. S.C. - 583
 HOJA 1/1

No. 6302

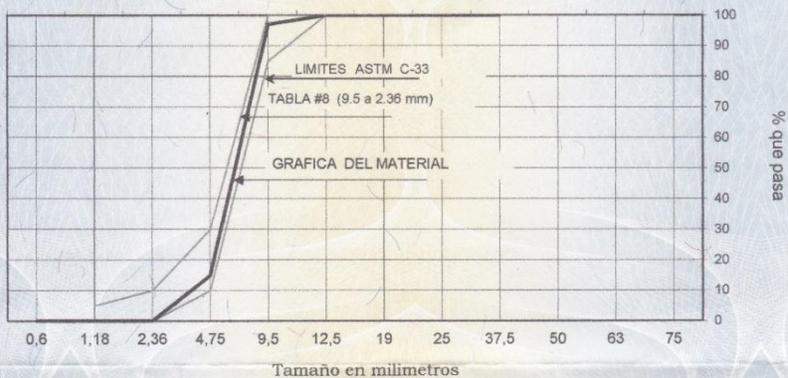
O.T. No. 34979

INTERESADO: Julio César Alvarez Guillén, Camé No. 2011 14001.
PROYECTO: Trabajo de Graduación "Azúcar como Aditivo Retardante y Modificador de Resistencia para Mezclas de Concreto".
DIRECCIÓN: Ciudad.
FECHA: 24 de septiembre de 2015.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS:

Peso Especifico	2,67	Pasa Tamiz # 200 (%)	1,00
Peso Unitario Compactado (kg/m ³)	1520,00	Porcentaje de Vacíos (%)	43,00
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1440,00	Modulo de Finura	5,88
Porcentaje de absorción	0,80		

No.30 No.16 No.8 No.4 3/8" 1/2" 3/4" 1" 1 1/2" 2" 2 1/2" 3"



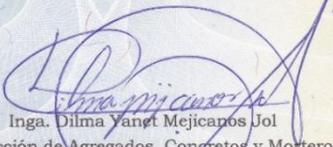
Tamaño en milímetros

Tamiz No.	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No.4	No.8	No.16
% Que pasa	100,0	100,00	100,00	100,00	97,00	15,00	0,00	0,00

OBSERVACIONES:

a) Muestra proporcionada por el interesado.
 b) Tamiz # 200, procedimiento A, lavado con agua corriente.

ATENTAMENTE,



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
 Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Vo.Bo.



Inga. Telma Maricela Cano Morales
 Directora CII/USAC



FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: ÁLVARES GUILLEN, Julio César. *Azúcar como aditivo retardante y modificador de resistencia para mezclas de concreto.*

Anexo 3. Informe del análisis a compresión del concreto permeable



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN PARA CILINDROS DE CONCRETO
NORMA NTG - 41017 h1 (ASTM C-39) **No. 15038**

O.T. No. 37317

INFORME SACM - 400/18

HOJA 1/1

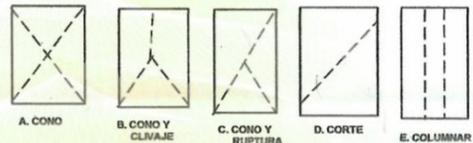
INTERESADO: Brandon Enrique González Pineda, Carnet: 2012 - 22516.
PROYECTO: Trabajo de Graduación "Permeabilidad en muros de paramento para la estabilización de tierra armada".
DIRECCIÓN: Ciudad de Guatemala.
EMISIÓN DE INFORME: 25 de julio de 2018

No. CILINDRO OBRA	No. CILINDRO LABORATORIO	FECHA DE COLOCACIÓN	FECHA DE RUPTURA	EDAD en días	CILINDRO REPRESENTATIVO DE LA COLOCACIÓN	PESO en kg	DIÁMETRO en cm	ALTURA en cm	CARGA en libras	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/in ²	TIPO DE FRACTURA
1	98-04	17/04/2018	20/04/2018	3	Concreto Permeable	10,530	15,130	30,560	30 000	7,40	1 070	B
2	99-04	17/04/2018	20/04/2018	3	Concreto Permeable	10,555	15,185	30,473	31 500	7,70	1 120	B
3	100-04	17/04/2018	24/04/2018	7	Concreto Permeable	10,560	15,135	30,530	42 000	10,40	1 510	B
4	101-04	17/04/2018	24/04/2018	7	Concreto Permeable	10,540	15,125	30,473	41 500	10,30	1 500	B
5	94-05	17/04/2018	15/05/2018	28	Concreto Permeable	10,565	15,130	30,423	44 000	10,90	1 580	B
6	95-04	17/04/2018	15/05/2018	28	Concreto Permeable	10,550	15,110	30,453	46 000	11,40	1 650	B

OBSERVACIONES :

- Muestra proporcionada por el interesado.
- Muestras ensayadas en máquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300 000 libras, dial utilizado para lectura 300 000 libras.
- Cilindros cabeceados según norma COGUANOR NTG 41067 (ASTM C1231)
- El interesado proporcionó:
 - No. de cilindro en obra.
 - Fecha de colocación.
 - Edad de ensayo.
 - El representativo de estructura.
- Peso unitario: **1980 kg/m³**
- Porcentaje de aire: **6,00 %**
- Asentamiento: **0,0" ln (0,00 cm)**
- Temperatura: **19,5 °C**

BOSQUEJO DE TIPOS DE FRACTURA

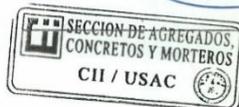


El presente informe únicamente es para las muestras identificadas en el mismo. Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

Inga. Dilma Yajaj Mejicanos Jor
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

ATENTAMENTE,

Vo.Bo. Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz.
Director CII/USAC



FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltrarena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 4. Informe del análisis a flexión y permeabilidad



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

No. 15039

INFORME DE ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO Y ENSAYO DE PERMEABILIDAD EN CONCRETO

NORMA NTG 41017 h2 (ASTM C-78) Y NORMA NTG 41017 h 34 (ASTM C-1701)

O.T. No. 37317

INFORME SACM - 401/18

HOJA 1/1

INTERESADO: Brandon Enrique González Pineda, Carnet: 2012 - 22516.
PROYECTO: Trabajo de Graduación "Permeabilidad en muros de paramento para la estabilización de tierra armada".
DIRECCIÓN: Ciudad de Guatemala.
EMISIÓN DE INFORME: 25 de julio de 2018

ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO

MUESTRA	FECHA DE COLOCACIÓN	FECHA DE RUPTURA	EDAD (días)	ANCHO (mm)	ALTO (mm)	LARGO (mm)	LUZ ENTRE APOYOS (mm)	CARGA RUPTURA (lb)	ESFUERZO A FLEXIÓN (Mpa)	ESFUERZO A FLEXIÓN (PSI)
Concreto Permeable	17/04/2018	15/05/2018	28	152,40	152,40	540,00	457,20	5000,00	2,85	415,00

ENSAYO DE PERMEABILIDAD EN CONCRETO

TASA DE INFILTRACIÓN (pulgadas/hora)	
CONCRETO PERMEABLE	3 627,90

OBSERVACIONES :

- Muestra proporcionada por el interesado.
- Muestras ensayadas en máquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300 000 libras, dial utilizado para lectura 60 000 libras.
- Mezclas y ensayos realizados bajo condiciones de laboratorio.

El presente informe únicamente es para las muestras identificadas en el mismo.
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.


Inga Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

ATENTAMENTE,

Vo.Bo.

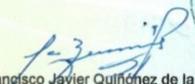
Ing. Francisco Javier Quirón de la Cruz
Director CII/USAC



FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltrán, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 5. Informe de límites de Atterberg

	CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA													
INFORME No. 112 S.S.		O.T.: 38,396												
		No. 13259												
Interesado:	Brandon Enrique González Pineda													
Proyecto:	Trabajo de Graduación "Permeabilidad en Muros de Paramento para la Estabilización de Tierra Armada"													
Asunto:	ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG													
Norma:	AASHTO T-89 Y T-90													
Ubicación:	7a. Ave. 5-05 Vale de la Mariposa, Amatitlán													
FECHA:	lunes, 23 de abril de 2018													
RESULTADOS:														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><thead><tr><th>ENSAYO No.</th><th>MUESTRA No.</th><th>L.L. (%)</th><th>I.P. (%)</th><th>CLASIFICACION *</th><th>DESCRIPCION DEL SUELO</th></tr></thead><tbody><tr><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">24.8</td><td style="text-align: center;">8.3</td><td style="text-align: center;">CL</td><td>Arcilla Arenosa de Baja Plasticidad Color Café</td></tr></tbody></table>			ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	CLASIFICACION *	DESCRIPCION DEL SUELO	1	1	24.8	8.3	CL	Arcilla Arenosa de Baja Plasticidad Color Café
ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	CLASIFICACION *	DESCRIPCION DEL SUELO									
1	1	24.8	8.3	CL	Arcilla Arenosa de Baja Plasticidad Color Café									
(*) CLASIFICACION SEGÚN CARTA DE PLASTICIDAD														
Observaciones: Muestra proporcionado por el interesado.														
Atentamente,														
 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez Jefe Sección Mecánica de Suelos	Vo.Bo.	 Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz DIRECTOR CII/USAC												
														
														
<small>FACULTAD DE INGENIERÍA –USAC– Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121 Página web: http://cii.usac.edu.gt</small>														

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 6. Análisis granulométrico del suelo



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



No. 13260

Informe No.: 113 S.S. O.T.: 38,396

Interesado: Brandon Enrique González Pineda

Tipo de Ensayo: Análisis Granulométrico con tamices y lavado previo

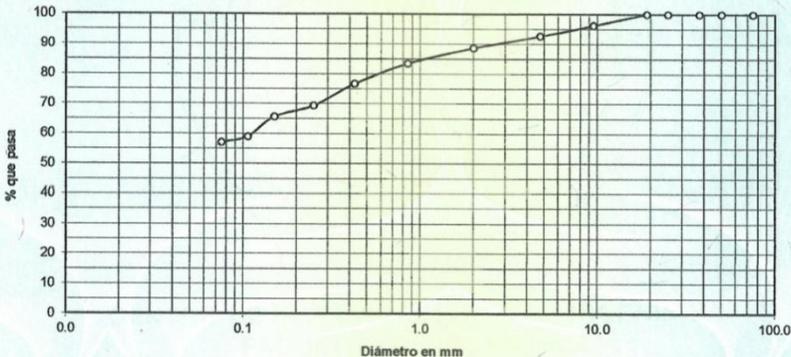
Norma: ASTM D6913-04

Proyecto: Trabajo de Graduación "Permeabilidad en Muros de Paramento para la Estabilización de Tierra Armada"

Ubicación: 7a. Ave. 5-05 Res. Vale de La Mariposa, Amatitlán

Fecha: lunes, 23 de abril de 2018

Tamiz	Abertura	% que pasa	Tamiz	Abertura	% que pasa
3"	75 mm	100.00	10	2.00 mm	88.65
2"	50 mm	100.00	20	850 μm	83.49
1 1/2"	37.5 mm	100.00	40	425 μm	76.65
1"	25 mm	100.00	60	250 μm	69.38
3/4"	19.0 mm	100.00	100	150 μm	65.66
3/8"	9.5 mm	96.21	140	106 μm	59.04
4	4.75 mm	92.63	200	75 μm	57.10



Descripción del suelo: Arcilla Arenosa de Baja Plasticidad Color Café

Clasificación:	S.C.U.: CL	% de Grava: 7.37	D10: *
	P.R.A.: A-4	% de Arena: 35.54	D30: *
		% de finos: 57.10	D60: 0.104 mm

Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.
* Diámetro efectivo no aplica.

Atentamente,

Omar Enrique Médrano Méndez
Ing. Omar Enrique Médrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo.Bo. *Francisco Javier Quiñonez de la Cruz*
Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
DIRECTOR CIUUSAC



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
SECCIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS

FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 7. Informe de corte directo del suelo



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



No. 13261

Informe No.: 114 S.S. **O.T.:** 38,396

Interesado: Brandon Enrique González Pineda

Proyecto: Trabajo de Graduación "Permeabilidad en Muros de Paramento para la Estabilización de Tierra Armada"

Ubicación: 7a. Ave. 5-05 Res. Vale de La Mariposa, Amatitlán

Ensayo: CORTE DIRECTO

Norma: ASTM D 3080-04

Fecha: lunes, 23 de abril de 2018

Pozo: 1

Muestra: 1

Descripción del Suelo: Arcilla Arenosa de Baja Plasticidad Color Café

Tipo de Ensayo: No Consolidado, No Drenado

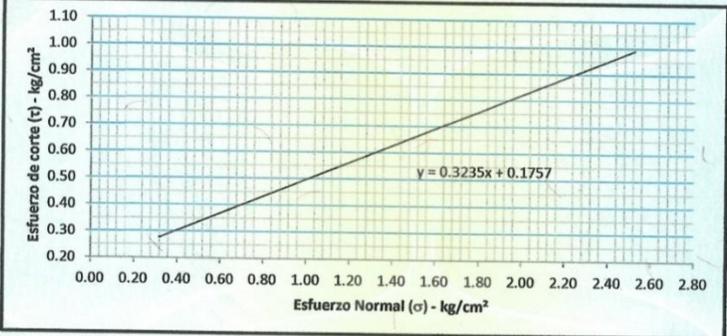
Tipo de Probeta: Remoldeada

Diámetro Inicial: 6.35 cm

Área Inicial: 31.67 cm²

Altura Inicial: 2.54 cm

Volúmen Inicial: 80.44 cm³



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA: $\phi = 17.93^\circ$	COHESIÓN APARENTE: $C_u = 1.75 \text{ Ton/m}^2$
--	---

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm ²)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm ²)	0.49	0.30	0.33	1.11
DENSIDAD SECA (Ton/m ³)	1.14	1.14	1.14	1.14
DENSIDAD HUMEDA (Ton/m ³)	1.37	1.37	1.37	1.37
HUMEDAD (%H)	19.51	19.51	19.51	19.51

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

Vo. Bo.



Ing. Francisco Javier Quiñón de la Cruz
DIRECTOR CII/USAC



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
SECCIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS

FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

