



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

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE  
MAMPOSTERÍA ELABORADA CON BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA (BTC)**

**Génesis Argentina Cap Morales**

Asesorado por el Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz

Guatemala, enero de 2016



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE  
MAMPOSTERÍA ELABORADA CON BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA (BTC)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**GÉNESIS ARGENTINA CAP MORALES**

ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA CIVIL**

GUATEMALA, ENERO DE 2016



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	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Crecencio Benjamín Cifuentes Velásquez
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:

### **EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE MAMPOSTERÍA ELABORADA CON BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA (BTC)**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 2 de febrero de 2015.

**Génesis Argentina Cap Morales**



Guatemala, 03 de noviembre de 2015

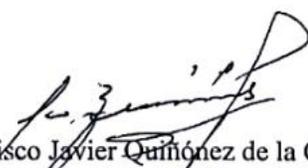
Ingeniero  
Hugo Leonel Montenegro Franco  
Director Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería

Señor Director:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación **“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE MAMPOSTERÍA ELABORADA CON BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA (BTC)”**, desarrollado por la estudiante universitaria **Génesis Argentina Cap Morales**, quien contó con mi asesoría.

Considero que el trabajo realizado por la estudiante **Cap Morales**, satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,

  
Francisco Javier Quinónez de la Cruz  
Ingeniero Civil Col. No. 1941  
Coordinador Grupo Ecomateriales





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

Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala, 05 de noviembre de 2015

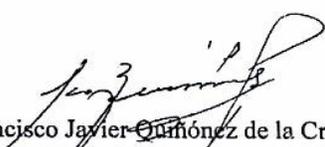
Ingeniero  
Hugo Leonel Montenegro Franco  
Director Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería

Señor Director:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación **“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE MAMPOSTERÍA ELABORADA CON BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA (BTC)”**, desarrollado por la estudiante universitaria **Génesis Argentina Cap Morales**, quien contó con mi asesoría.

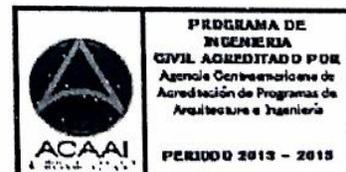
Considero que el trabajo realizado por la estudiante **Cap Morales**, satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,

  
Francisco Javier Quiñón de la Cruz  
Coordinador Unidad de Investigación –UIEIC-



*Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua*





**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

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

Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor y Coordinador de la Unidad de Investigación Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, al trabajo de graduación de la estudiante Génesis Argentina Cap Morales, titulado **EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE MAMPOSTERÍA ELABORADA CON BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA (BTC)**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

*Hugo Leonel Montenegro Franco*

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, enero 2016  
/mrm.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San Carlos  
de Guatemala

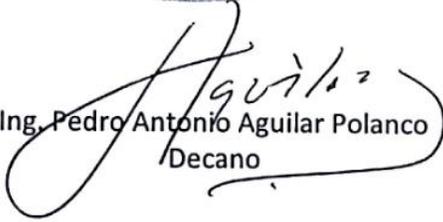


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 026.2016

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: **EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE MAMPOSTERÍA ELABORADA CON BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA (BTC)**, presentado por la estudiante universitaria: **Génesis Argentina Cap Morales**, 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, enero de 2016

/gdech





## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Sin Él no habría llegado hasta este momento.
<b>Mis padres</b>	Cesar Cap y Olga Morales, por su amor y apoyo incondicional.
<b>Mis hermanas</b>	Shannon y Mariam Cap, por ser uno de los motivos para seguir adelante.
<b>Mi abuela</b>	María Vda. de Cap (q. e. p. d.), por haber sido un gran ejemplo de vida, por apoyarme siempre e incentivar me a seguir adelante.
<b>Mis familiares</b>	Por siempre estar pendientes de mí.
<b>Mis amigos</b>	Por su compañía y ayuda.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser la máxima casa de estudios de Guatemala.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por permitirme estudiar en sus aulas.
<b>Catedráticos de la Facultad de Ingeniería</b>	Por impartir sus conocimientos y procurar que los estudiantes seamos personas de éxito.
<b>Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz</b>	Por su asesoría y paciencia, por compartir sus conocimientos y su amistad.
<b>Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila</b>	Por ser un catedrático con pasión por la enseñanza, por ser un amigo y compartir sus conocimientos.
<b>Sr. Fabio Sánchez</b>	Por su inigualable ayuda, consejos y vasta experiencia.
<b>Sección de Estructuras y Ecomateriales</b>	Por su ayuda en la realización de los ensayos.
<b>Área de Prefabricados</b>	Por proporcionar ayuda en la realización de los ensayos.

**Ing. Mariano Alfaro**

Por el apoyo en cuanto a material didáctico y equipo.

**Mis amigos**

Lucía Ramazzini, Jesús Moreno, Marvin Alvarado, Telma Sequen, Berta Solís, Diego Seisdedos, Fernando Martínez, Gerardo Páez, Alejandro Godoy, Junior Paredes, Leticia Álvarez e Ingrid Méndez; por compartir momentos tanto de alegría como de tristeza; por su apoyo y cariño; son geniales.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN .....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. CONSTRUCCIÓN CON TIERRA .....	1
1.1. La tierra utilizada como material de construcción .....	1
1.2. Historia de la construcción con tierra.....	1
1.3. Propiedades de la tierra como material de construcción .....	4
1.3.1. Generalidades .....	4
1.3.2. Componentes .....	5
1.3.3. Distribución granulométrica .....	7
1.3.4. Agua .....	8
1.3.5. Porosidad.....	10
1.3.6. Superficie específica.....	10
1.3.7. Densidad.....	11
1.3.8. Compactación.....	12
1.4. Ensayos para analizar la composición de la tierra.....	12
1.4.1. Límites de Atterberg .....	12
1.4.2. Granulometría por tamizado seco, húmedo y sedimentación.....	13
1.4.3. Contenido de humedad y compactación Proctor ....	14
1.5. Tecnología de construcción con tierra .....	15

1.5.1.	Generalidades .....	16
2.	BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA .....	19
2.1.	Definición .....	19
2.1.1.	Generalidades .....	20
2.2.	Arcillas.....	22
2.2.1.	Clasificación .....	24
2.2.2.	Propiedades .....	24
2.2.3.	Plasticidad y capacidad aglomerante .....	24
2.2.4.	Capacidad de endurecimiento al secarse.....	25
2.2.5.	Contracción .....	25
2.2.6.	Capacidad refractaria .....	26
2.3.	Limos.....	26
2.3.1.	Clasificación .....	27
2.3.2.	Propiedades .....	27
2.3.3.	Plasticidad y capacidad aglomerante .....	27
2.3.4.	Capacidad de endurecimiento al secarse.....	27
2.4.	Agregados.....	27
2.5.	Cemento.....	28
2.6.	Cal.....	28
2.7.	<i>Grout</i> (lechada) .....	29
3.	MATERIAL VOLCÁNICO .....	31
3.1.	Definición .....	31
3.1.1.	Clasificación .....	31
3.1.2.	Puzolanas naturales.....	32
3.1.3.	Puzolanas artificiales.....	33
3.1.4.	Aplicación de las puzolanas como agregado .....	33
3.1.5.	Aplicación de las puzolanas como aglomerante.....	33

3.1.6.	Las puzolanas en Guatemala .....	34
4.	METODOLOGÍA.....	37
4.1.	Materiales .....	37
4.1.1.	Material volcánico .....	37
4.1.2.	Agua .....	37
4.1.3.	Tierra .....	37
4.1.4.	Cal .....	38
4.1.5.	Cemento .....	38
4.2.	Equipo y herramienta a utilizar en la elaboración de bloques de tierra compactada .....	38
4.2.1.	Molino de bolas.....	38
4.2.2.	Molino de martillos.....	39
4.2.3.	Prensa manual.....	41
4.2.4.	Balanzas.....	41
4.2.5.	Cámara de curado .....	42
4.2.6.	Otra herramienta.....	43
4.3.	Caracterización de los materiales.....	43
4.4.	Equipo y procedimiento de ensayo.....	45
4.4.1.	Ensayo de compresión a unidades de BTC.....	45
4.4.1.1.	Cálculos.....	46
4.4.2.	Ensayo de capilaridad a unidades de BTC.....	47
4.4.2.1.	Cálculos.....	49
4.4.3.	Ensayo de erosión acelerada Swinburne a unidades de BTC .....	49
4.4.3.1.	Cálculos.....	51
4.4.4.	Ensayo de compresión de prismas de mampostería.....	51
4.4.4.1.	Cálculos.....	52

4.4.5.	Ensayo de tensión diagonal (corte) de prismas de mampostería .....	53
4.4.5.1.	Cálculos.....	53
5.	ELABORACIÓN DE BTC Y PRISMAS PARA ENSAYOS DE COMPRESIÓN Y TENSIÓN DIAGONAL .....	55
5.1.	Elaboración de bloques con aglomerante natural .....	55
5.1.1.	Elaboración de bloques para ensayos de compresión, capilaridad y erosión acelerada .....	55
5.2.	Elaboración de bloques con aglomerante ternario .....	57
5.2.1.	Elaboración de bloques para prismas de compresión y tensión diagonal .....	57
5.2.2.	Tipos de bloques elaborados .....	60
5.3.	Elaboración de prismas.....	61
5.3.1.	Prismas de compresión.....	61
5.3.2.	Prismas de tensión diagonal .....	62
6.	RESULTADOS.....	65
6.1.	Ensayos a BTC con aglomerante natural.....	65
6.1.1.	Ensayo de compresión a BTC.....	65
6.1.2.	Ensayo de erosión acelerada Swinburne a BTC .....	67
6.1.3.	Ensayo de capilaridad a BTC .....	68
6.2.	Ensayo de compresión a BTC con aglomerante ternario.....	70
6.2.1.	Ensayo de compresión a BTC.....	71
6.2.2.	Ensayo de erosión acelerada Swinburne a BTC con aglomerante ternario.....	72
6.2.3.	Ensayo de capilaridad a BTC .....	73
6.2.4.	Ensayo de compresión a prismas .....	74
6.2.5.	Ensayo de tensión diagonal (corte) a prismas.....	77

7.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	81
7.1.	Bloques con aglomerante natural .....	81
7.2.	Bloques con aglomerante ternario .....	82
	CONCLUSIONES .....	89
	RECOMENDACIONES .....	91
	BIBLIOGRAFÍA .....	93
	APÉNDICES .....	95



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Almacenes, templo de Ramsés II, Gourná, Egipto.....	2
2.	Perfil estratigráfico.....	5
3.	Simbolización de grava .....	7
4.	Simbolización de arena .....	7
5.	Simbolización de limo.....	8
6.	Simbolización de arcilla.....	8
7.	Huso del diagrama de texturas de las tierras .....	21
8.	Zona recomendada del diagrama de plasticidad de las tierras .....	21
9.	Tetraedro y unidad hexagonal.....	23
10.	Octaedro, retícula y lámina.....	23
11.	Molino de bolas .....	39
12.	Bolas para molienda.....	39
13.	Molino de martillos .....	40
14.	Cámara de trituración, molino de martillos .....	40
15.	Prensa para elaborar BTC .....	41
16.	Balanzas .....	42
17.	Cámara de curado.....	42
18.	Tamiz de 3/8 plg.....	43
19.	Granulometría de puzolana.....	44
20.	Máquina universal .....	46
21.	Equipo para ensayo de capilaridad .....	48
22.	Modelo de equipo.....	50
23.	Equipo utilizado .....	51

24.	Máquina de compresión Riehle.....	52
25.	Mezclado de material y material húmedo.....	56
26.	Obtención del BTC y almacenaje.....	56
27.	Puzolana sin finos y puzolana con finos .....	58
28.	Agregado de limo y aglomerante ternario .....	58
29.	Aplicación de agua y material húmedo .....	59
30.	Colocación de material y obtención del BTC .....	59
31.	Traslado y almacenamiento de BTC.....	60
32.	BTC tipo 1 y 2 .....	60
33.	BTC en “U” completo y en “U” con tope .....	61
34.	BTC en mitades y en mitades en “U” .....	61
35.	Preparación de mezcla, levantado de prismas y prismas completados.....	62
36.	Fundición de base del marco, levantado de prisma y prisma terminado.....	63
37.	Primera grieta y carga última BTC tipo A .....	66
38.	Primera grieta y carga última BTC tipo B.....	66
39.	Resultado ensayo a BTC tipo A.....	67
40.	Resultado ensayo a BTC tipo B.....	68
41.	Ensayo de capilaridad a BTC tipo A .....	68
42.	Ensayo de capilaridad a BTC tipo B .....	69
43.	Primera grieta y carga última .....	71
44.	Aplicación del agua y resultado .....	73
45.	Inmersión parcial y resultado .....	74
46.	Colocación de prisma, aplicación de carga y falla en los laterales .....	76
47.	Ensayo a tensión diagonal de prismas .....	79
48.	Falla real y trazo de curvatura.....	82
49.	Efecto de dovela en prisma.....	83
50.	Falla del <i>grout</i> .....	84

51.	Falla de prisma a compresión .....	84
52.	Diagrama de transformación de esfuerzos .....	85
53.	Aparición de primera grieta .....	86

## TABLAS

I.	Clases de resistencia normalizada a compresión .....	47
II.	Resistencia a la erosión: criterios de aceptación o rechazo .....	51
III.	Distribución de material en porcentaje para un BTC con aglomerante natural .....	55
IV.	Distribución de material en porcentaje para un BTC con aglomerante ternario .....	57
V.	Resultados ensayo a compresión de unidades tipo A .....	65
VI.	Resultados ensayo a compresión de unidades tipo B .....	66
VII.	Resultados ensayo de erosión a BTC tipo A .....	67
VIII.	Resultados ensayo de erosión a BTC tipo B .....	67
IX.	Resultados ensayo de capilaridad a BTC tipo A .....	69
X.	Resultados ensayo de capilaridad a BTC tipo B .....	70
XI.	Resultados ensayo a compresión de unidades .....	71
XII.	Resultados ensayo erosión acelerada .....	72
XIII.	Resultados ensayo de capilaridad .....	73
XIV.	Factores de corrección para resistencias de prismas con diferentes relaciones altura-espesor .....	75
XV.	Resultados ensayo a compresión de prismas .....	75
XVI.	Resultados del ensayo a tensión diagonal de prismas .....	78



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>cm</b>	Centímetro
<b>cm<sup>3</sup></b>	Centímetro cúbico
<b><math>\sigma</math></b>	Esfuerzo de compresión
<b><math>\tau</math></b>	Esfuerzo de corte
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>g</b>	Gramo
<b><math>\infty</math></b>	Infinito
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>km</b>	Kilómetro
<b>lb</b>	Libra
<b>lb/plg<sup>2</sup></b>	Libra por pulgada cuadrada
<b>MPa</b>	Mega Pascales
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>ml</b>	Mililitro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>min</b>	Minuto
<b>N</b>	Newton
<b>plg</b>	Pulgadas



## GLOSARIO

<b>Aglomerante</b>	Material que sirve para unir partículas de una o más sustancias y compactarlas, formando una sola masa.
<b>Árido</b>	Material granulado utilizado en construcción.
<b>Basalto</b>	Roca ígnea volcánica de composición máfica, de color oscuro, rica en hierro y magnesio.
<b>Coloidal</b>	Estado intermedio entre una solución y una suspensión. Mezcla de dos sustancias en la que una se encuentra dispersa y suspendida en la otra que funciona como un medio continuo.
<b>Hidraulicidad</b>	Definido numéricamente como la relación en peso de silicatos, aluminatos y óxidos de hierro, respecto del óxido de cal y de magnesio.
<b>Isotrópico</b>	Elemento que presenta las mismas características al aplicársele carga en cualquiera de sus lados.
<b>Oquedad</b>	Espacio vacío en el interior de un cuerpo.
<b>Piroclástico</b>	Magma que durante su ascenso a través de la corteza terrestre alcanza la superficie.

**Reológico**

Relacionado al estudio de cualidades de la materia como viscosidad, plasticidad y elasticidad.

**Silicatos**

Sales de ácido silícico.

## RESUMEN

El uso de tierra para construir se puede observar desde los inicios del hombre. Uno de los suelos más utilizados es la arcilla, debido a las características plásticas que presenta al momento de trabajarla. La arcilla ha sido utilizada para la elaboración de bloques tipo adobe, que luego sirven para el levantado de muros y construcción de casas.

En Guatemala, específicamente en el interior del país, se puede observar gran cantidad de casas construidas con bloques de tierra, como el adobe; sin embargo, no todos los bloques tienen las mismas características, debido a los materiales que los componen y a las deficiencias durante el proceso de elaboración.

Los bloques de tierra compactada (BTC) consisten en una mezcla de suelo con diferentes características granulométricas, uno con alto porcentaje de finos, el cual actuará como aglomerante natural gracias a su plasticidad, mientras el otro actuará como agregado natural, teniendo mayor cantidad de arenas y gravas. Dicha característica granulométrica ha sido establecida por normativas internacionales; así como la cantidad de material aglomerante necesario para la efectiva cohesión entre el agregado y el material fino.

La calidad de las unidades de mampostería utilizadas en el levantado de muros incide en un alto porcentaje, en el comportamiento que tendrán los mismos al trabajar en conjunto. Por esta razón, el bloque de tierra compactada debe cumplir con los requisitos establecidos por las normas que rigen la construcción en Guatemala.

Uno de los objetivos de este trabajo fue producir y evaluar bloques de tierra compactada para que posteriormente sean utilizados en viviendas económicas. Los bloques fueron elaborados con limo y agregados de materiales volcánicos. Esta opción de bloque permitirá una nueva alternativa constructiva, así como el aprovechamiento de los materiales existentes en las cercanías de los poblados.

Se buscó producir bloques de tierra compactada con los materiales guatemaltecos y determinar el comportamiento de los mismos al utilizarlos como unidades de mampostería en el levantado de muros. Además, determinar los parámetros de diseño en el laboratorio, al aplicar cargas de compresión y de corte a prismas elaborados con los bloques.

Con base en los resultados obtenidos se determinó que los bloques elaborados en este trabajo con puzolana, limo y aglomerante ternario, no son aptos para su utilización como elementos de mampostería, debido a su bajo rendimiento en los ensayos. También se determinó que los bloques no son adecuados para resistir fuerzas de corte.

# OBJETIVOS

## General

Elaborar y caracterizar bloques de tierra compactada (BTC) y evaluar los parámetros de diseño de resistencia a compresión y cortante de la mampostería elaborada con ellos.

## Específicos

1. Elaborar bloques de tierra compactada y establecer sus características físicas y propiedades mecánicas.
2. Evaluar experimentalmente el valor de resistencia a compresión de la mampostería de bloques de tierra compactada.
3. Evaluar experimentalmente el valor de resistencia a corte de la mampostería de bloques de tierra compactada.



## INTRODUCCIÓN

Este trabajo de investigación presenta una descripción general del comportamiento de bloques de tierra compactada (BTC) al utilizarlos como elementos en muros de mampostería. En el capítulo 1 se trata a grandes rasgos la construcción con tierra, así como características de la tierra como material de construcción; el capítulo 2 hace una descripción de los bloques de tierra compactada y los parámetros mínimos establecidos por la norma utilizada; también se tratan las características de los materiales utilizados para su elaboración.

El capítulo 3 trata sobre las puzolanas y su aplicación en los bloques de tierra compactada como agregado grueso y como aglomerante. El procedimiento de los ensayos realizados a los BTC, tanto de forma individual como en prismas y las normas en las que se basaron dichos ensayos son explicados en el capítulo 4.

El capítulo 5 hace una descripción del proceso de elaboración de los BTC y de la elaboración de los prismas para compresión y corte, así como fotografías que ilustran parte del proceso; el capítulo 6 muestra los resultados obtenidos de los ensayos a compresión, a erosión acelerada y capilaridad de las unidades de BTC; también se muestran los cálculos y los resultados de los ensayos de compresión y tensión diagonal de los prismas.

En la parte final del trabajo se presenta un análisis de los resultados obtenidos en los ensayos.



# **1. CONSTRUCCIÓN CON TIERRA**

## **1.1. La tierra utilizada como material de construcción**

La construcción con tierra data de hace más de nueve mil años, teniendo como resultado edificaciones que permanecen hasta nuestros días. A pesar de que su uso disminuyó con el surgimiento de materiales de construcción industrializados, en países en vías de desarrollo como Guatemala, aún se encuentra vigente.

La construcción con tierra presenta grandes ventajas frente a otros materiales como el concreto y el acero, debido a la abundancia de materia prima y a la reducción de los costos respecto del proceso constructivo; además, gracias a que la tierra mantiene las características de temperatura y humedad de los ambientes, tiene grandes cualidades de confort térmico y es amigable con el ambiente.

## **1.2. Historia de la construcción con tierra**

Viviendas que datan de alrededor de 8000-6000 a. C. fueron descubiertas en Turquestán (Pumpelly, 1908). Los antiguos egipcios y otras civilizaciones utilizaron la tierra como materia prima para la construcción de viviendas, templos y fortalezas; sin embargo, a partir de mitad del siglo XIX, la tierra paulatinamente dejó de emplearse para tales fines, debido a la creciente construcción con materiales industrializados.

Como ejemplo de construcciones con tierra se pueden mencionar las bóvedas del templo mortuorio de Ramsés II en Gourná, Egipto, construido con adobes hace más de 3 000 años (figura 1); la Gran Muralla China se construyó hace aproximadamente 4 000 años, inicialmente con tierra apisonada (tapial) y posteriormente fue enchapada con piedras naturales y ladrillos para dar la apariencia de ser completamente de piedra.

En países en vías de desarrollo, la población que se encuentra en las afueras de las grandes ciudades y en el campo, utiliza la tierra como alternativa para la construcción de sus viviendas.

Figura 1. **Almacenes, templo de Ramsés II, Gourná, Egipto**



Fuente: MINKE, Gernot. *Manual de construcción en tierra*. p. 13.

Existen diferentes técnicas de construcción con tierra, presentes en casi todas las civilizaciones del pasado y que se fueron expandiendo por medio de las invasiones y colonizaciones realizadas por diferentes pueblos sobre otros. Las técnicas propias de una región se unieron con las técnicas traídas por los extranjeros, adaptándolas a las formas más apropiadas para la construcción; por tal motivo, existen similitudes de una región a otra, pero cada una presenta peculiaridades y nomenclatura propia.

Comúnmente, la mezcla de arcilla, limo o arena muy fina, arena, y agregados mayores como grava o gravilla, es utilizada para construir; sin embargo, presenta ventajas y desventajas al utilizarla, debido a su composición. Entre las desventajas más grandes están:

- No es un material de construcción que esté estandarizado, debido a que dependiendo del lugar de extracción, las cantidades y tipos de componentes pueden ser diferentes y la preparación de la mezcla correcta también puede variar.
- Se contrae al secarse, lo que provoca la aparición de fisuras. Durante el secado, la retracción lineal se encuentra entre 3 % y 12 % en técnicas de tierra húmeda y entre 0,4 % y 2 % en técnicas con mezclas secas. La retracción puede disminuirse reduciendo la cantidad de agua y arcilla o mediante la utilización de aditivos.
- No es impermeable, por lo que debe ser protegido contra la lluvia. Las paredes de tierra deben protegerse por medio de aleros, barreras impermeabilizantes, tratamientos de superficies, entre otras.

Frente a otros materiales, la mezcla anteriormente mencionada, presenta ciertas ventajas:

- Regula la humedad ambiental, teniendo la capacidad de absorber y liberar humedad más rápido y en mayor cantidad que el resto de materiales de construcción, permitiendo que regule el clima del interior.
- Almacena calor, lo que permite que al existir diferencias de temperatura muy amplias, balancea el clima interior.

- Ahorra energía y disminuye la contaminación ambiental, tanto en su preparación, transportación y elaboración; siendo aproximadamente el 1 % de la energía que se requiere para el concreto armado o ladrillos cocidos.
- Es reutilizable, cuando es crudo únicamente requiere de ser triturado y humedecido para ser reutilizado.
- Economiza materiales de construcción y costos de transporte.
- Personas no especializadas pueden ser empleadas para construir con tierra, estando bajo la supervisión de una persona experimentada que controle el proceso de construcción.
- Preserva la madera y otros materiales orgánicos que se encuentren en contacto directo con él, gracias a su bajo equilibrio de humedad de 0,4 % y 6 % en peso y a su alta capilaridad.

### **1.3. Propiedades de la tierra como material de construcción**

La tierra presenta diferentes características, las cuales se presentan a continuación.

#### **1.3.1. Generalidades**

En un enfoque simple, el globo terrestre está compuesto, primeramente por un núcleo formado predominantemente por compuestos de hierro y níquel. Se considera que la densidad media de dicho núcleo es considerablemente

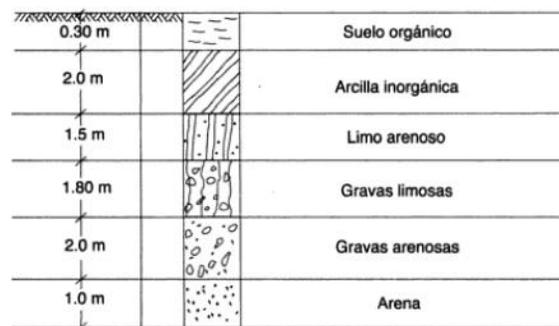
superior a la de capas más superficiales, poseyendo una parte sólida de aproximadamente 1 300 km, envuelta en un manto fluido o magma.

Envolviendo al manto antes mencionado se encuentra la corteza terrestre, cuya densidad decrece conforme se aproxima a la superficie, la cual está formada principalmente por silicatos. El espesor de esta capa es de aproximadamente entre 30 km y 40 km en las plataformas continentales; sobre la corteza terrestre existe una pequeña capa, formada por la disgregación y descomposición de sus últimos niveles, la cual es el suelo.

### 1.3.2. Componentes

Normalmente se cree que el suelo es un conjunto de partículas orgánicas e inorgánicas, no sujetas a ninguna organización; sin embargo, es un conjunto organizado y con propiedades. Verticalmente, sus propiedades cambian más rápido que de forma horizontal, lo que hace que tenga un perfil (figura 2).

Figura 2. Perfil estratigráfico



Fuente: CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. p. 27.

El término suelo se define de diferentes maneras, debido a que dicha definición puede provenir de diferentes profesionales; sin embargo, puede decirse que suelo es una capa delgada sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración o alteración física o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ella se asientan.

La corteza terrestre es atacada principalmente por el aire y el agua; sin embargo, todos los mecanismos de ataque pueden incluirse en dos grupos: desintegración mecánica y descomposición química. La desintegración mecánica hace referencia a la intemperización de las rocas por agentes físicos, como cambios periódicos de temperatura, congelación del agua en las juntas y grietas de las rocas, efectos de organismos, plantas, entre otros. Debido a estos fenómenos las rocas llegan a formar arenas, o a lo sumo limos y solo en casos especiales, arcillas. La descomposición química se refiere a la acción de agentes que atacan las rocas, modificando su constitución mineralógica o química.

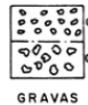
El principal agente de ataque es el agua y los mecanismos más importantes son la oxidación, hidratación y carbonatación; dichos mecanismos generalmente producen arcilla como último producto de descomposición. Todos los efectos anteriores se acentúan con los cambios de temperatura, por lo que con frecuencia se encuentran formaciones arcillosas de importancia en zonas húmedas y cálidas, mientras que en las zonas frías se encuentran formaciones arenosas o limosas, más gruesas.

### 1.3.3. Distribución granulométrica

La distribución granulométrica del suelo es de vital importancia para determinar el uso que se le dará al mismo. La granulometría que generalmente presenta el suelo es la siguiente:

- **Gravas:** son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas, tienen más de 2,0 mm de diámetro. Las gravas ocupan grandes extensiones pero por lo general se encuentran con mayor o menor proporción de cantos rodados, arenas, limos y arcillas. Sus partículas varían desde 7,62 cm (3,00 plg) hasta 2,0 mm (figura 3).

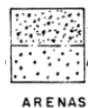
Figura 3. **Simbolización de grava**



Fuente: CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. p. 27.

- **Arenas:** materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, sus partículas varían entre 2,0 mm y 0,05 mm de diámetro (figura 4).

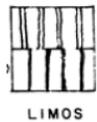
Figura 4. **Simbolización de arena**



Fuente: CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. p. 27.

- Limos: suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, puede ser limo inorgánico como el que se produce en canteras, o limo orgánico como el que se encuentra en los ríos. El diámetro de las partículas de limo está entre 0,05 mm y 0,005 mm (figura 5).

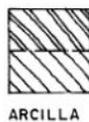
Figura 5. **Simbolización de limo**



Fuente: CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. p. 27.

- Arcillas: partículas sólidas con diámetro menor de 0,005 mm y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Algunos consideran como arcillas a las partículas menores a 0,002 mm (figura 6).

Figura 6. **Simbolización de arcilla**



Fuente: CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. p. 27.

#### 1.3.4. **Agua**

El agua puede encontrarse en el suelo como grado de saturación y contenido de agua o humedad. El grado de saturación de un suelo es la

relación entre su volumen de agua y el volumen de vacíos que presenta; por lo general se expresa como porcentaje:

$$G_w (\%) = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

Donde:

$G_w$  = grado de saturación

$V_w$  = volumen de agua

$V_v$  = volumen de vacíos

Varía de 0 (suelo seco) a 100 % (suelo totalmente saturado).

El contenido de agua o humedad de un suelo es la relación entre el peso de agua contenida en el mismo, y el peso de su fase sólida; comúnmente se expresa como porcentaje:

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Donde:

$w$  = contenido de agua

$W_w$  = peso de agua

$W_s$  = peso de los sólidos

Varía teóricamente de 0 a  $\infty$ ; en la naturaleza, la humedad de los suelos varía entre límites muy amplios.

### 1.3.5. Porosidad

La porosidad de un suelo es la relación entre su volumen de vacíos y el volumen de su masa; se expresa como porcentaje.

$$n(\%) = \frac{V_v}{V_m} \times 100$$

Donde:

$n$  = relación de vacíos

$V_v$  = volumen de vacíos

$V_m$  = volumen de masa

Dicha relación puede variar de 0 (en un suelo ideal, con solo fase sólida) a 100 (espacio vacío); los valores reales pueden oscilar entre 20 % y 95 %.

### 1.3.6. Superficie específica

Cuando una partícula es más pequeña y más laminar, su área superficial será mayor. La superficie específica  $S_s$  es entonces, la relación del área superficial por gramo de masa.

La superficie específica es la suma de superficies de todas las partículas. Mientras la superficie específica de la arcilla sea mayor, las fuerzas internas de adhesión serán mayores, lo que resulta importante para la capacidad aglutinante y la resistencia a la compresión y tensión.

### 1.3.7. Densidad

La densidad de un cuerpo se determina por medio de la masa de dicho cuerpo contenida en la unidad de volumen, dejando a un lado los vacíos; a eso se le llama densidad absoluta. La densidad aparente es similar a la absoluta, solo que sí se toman en cuenta los vacíos.

Para un suelo, la densidad relativa es la relación de la densidad absoluta o aparente promedio de las partículas que lo constituyen, a la densidad absoluta del agua destilada a 4 °C, expresándola en gramos masa por centímetro cúbico.

$$\text{Densidad absoluta} = D_a = \frac{P_s}{V_s}$$

$$\text{Densidad aparente} = D'_a = \frac{P_s}{V_t}$$

$$\text{Densidad relativa} = D_r = \frac{D_a}{D_w}; \text{ o bien } D_r = \frac{D'_a}{D_w}$$

Donde:

$P_s$  = peso de la partícula sólida, en gramos.

$V_s$  = volumen de sólidos, en cm<sup>3</sup>.

$V_t$  = volumen de sólidos más volumen de vacíos, en cm<sup>3</sup>.

$D_w$  = densidad absoluta del agua destilada a temperatura de 4 °C, con un valor de 1 g/cm<sup>3</sup>.

### **1.3.8. Compactación**

Es la capacidad que tiene la tierra para ser compactada por medio de la aplicación de presión estática o dinámica, reduciendo su volumen. La compactación máxima del suelo se obtiene cuando el mismo tiene un contenido específico de agua, al cual se le conoce como "contenido óptimo de agua", que permite llevar las partículas a un estado más denso.

## **1.4. Ensayos para analizar la composición de la tierra**

La principal herramienta para realizar un estudio de las características geotécnicas de un terreno, son los ensayos de laboratorio. Existen ensayos para identificar los suelos y ensayos para el estudio de la resistencia, deformación y permeabilidad de los mismos.

### **1.4.1. Límites de Atterberg**

Los límites de consistencia o de Atterberg se basan en que los suelos finos pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo del contenido de agua. El contenido de agua con que se produce el cambio de estado varía de un suelo a otro y es fundamental conocer el rango de humedades para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico, aceptando deformaciones sin romperse.

Con los límites de Atterberg se define la plasticidad y se pueden utilizar en la identificación y clasificación de un suelo, según AASHTO (American Association of State High-way and Transportation Officials) y el Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos SUCS o USCS (Unified Soil Classification System).

Atterberg definió tres límites: el límite de contracción (entre estado sólido y semisólido), el límite plástico (entre estado semisólido y plástico) y el límite líquido (entre estado plástico y semilíquido). Con ellos, se puede determinar el índice de plasticidad del suelo, y clasificarlo.

Las normas utilizadas para la determinación de dichos parámetros son AASHTO T089-02 (ASTM D423-66 -1982- ) *Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils*, para el límite líquido; AASHTO T090-00 (ASTM D424-54 -1982- ) *Standard Method of Test for Determining the Plastic Limit and Plasticity index of Soils*, para el límite plástico.

#### **1.4.2. Granulometría por tamizado seco, húmedo y sedimentación**

La variedad en el tamaño de las partículas del suelo casi es ilimitada; los granos más grandes son los que se pueden mover con gran facilidad. Las partículas producidas por la meteorización rara vez son de diámetro inferior a 0,001 mm y generalmente son mucho mayores.

La granulometría por tamizado es la más adecuada para clasificar por tamaño de partículas gruesas, una muestra secada en horno se hace pasar a través de una serie de tamices o mallas estándar, apilados en forma descendente según el tamaño de la abertura del tamiz, agitándolos; luego se determina el peso retenido en cada tamiz y se calcula el porcentaje del peso acumulado que pasa por cada tamiz. La norma utilizada en este ensayo es AASHTO T087-86 (ASTM D421-98) *Standard Method of Test for Dry Preparation of Disturbed Soil and Soil-Aggregate Samples for Test*.

Cuando en la muestra de suelo aumenta la cantidad de partículas finas, el tamizado debe ser húmedo, para eliminar los finos y determinar el porcentaje de combinación arcilla/limo. La muestra debe lavarse en una malla núm. 200 hasta que el agua salga lo más transparente posible; luego la cantidad de material retenido se seca en el horno y se hace pasar en una serie de tamices, se pesan las cantidades retenidas en cada tamiz y se calculan los porcentajes acumulados en cada uno. La norma a utilizar es AASHTO T088-00 (ASTM D422-02) *Standard Method of Test for Particle Size Analysis of Soils*.

El proceso de tamizado, a pesar de ser un proceso muy útil, no permite una mayor subdivisión de la distribución de tamaños de partículas finas; por tal motivo se debe aplicar el proceso de sedimentación. Una pequeña muestra del suelo se trata primero con un agente dispersante y después se lava a través de un tamiz núm. 200; la suspensión suelo/agua se diluye a 500 ml, se agita con fuerza unos minutos y se deja sedimentar.

Este procedimiento consiste en medir la densidad de la suspensión a una profundidad de 100 mm, en una serie de intervalos de tiempo. La norma AASHTO T087-86 (ASTM D421-98) "Preparación de la muestra", es para la preparación de la muestra, y la norma AASHTO T088-00 (ASTM D422-02) "Procedimiento de prueba", es para el procedimiento de prueba. Los porcentajes de los valores más finos de un diámetro determinado se obtienen de las lecturas de densidad.

#### **1.4.3. Contenido de humedad y compactación Proctor**

La prueba de compactación Proctor según AASHTO T180-01 (ASTM D1557-07) *Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4,54 kg (10 lb) Rammer and a 457 mm (18 plg)*, hace referencia a la

determinación del peso por unidad de volumen de un suelo que ha sido compactado por un procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad.

El objetivo de la prueba es:

- Determinar el peso volumétrico seco máximo que puede alcanzar un material, así como la humedad óptima a que deberá hacerse la prueba.
- Determinar el grado de compactación alcanzado por el material durante la construcción o cuando ya se encuentran construidos los caminos, aeropuertos y calles, relacionando el peso volumétrico obtenido en el lugar con el peso volumétrico máximo Proctor.

Con esta prueba se intenta reproducir en el laboratorio el tipo de compactación uniforme de la parte inferior hacia la superficie de la capa compactada. La humedad óptima es la humedad que permite el mejor acomodamiento de las partículas del suelo, empleando un mismo esfuerzo de compresión, obteniendo además el mayor peso volumétrico seco.

La prueba de Proctor está limitada a suelos que pasen en su totalidad la malla núm. 4, que a lo sumo se retenga un 10 % en dicha malla, pero que dicho retenido pase por completo la malla de 3/8 plg.

### **1.5. Tecnología de construcción con tierra**

Conjuntamente con la supervivencia de los sistemas constructivos primitivos y la necesidad de vivienda de la gente, la tierra es objeto de investigación, buscando el avance de la tecnología por medio del conocimiento

de las técnicas utilizadas en el pasado y el desarrollo de sistemas constructivos innovadores que permitan ser simples, eficientes y de bajo costo.

### **1.5.1. Generalidades**

Entre las técnicas de construcción se encuentra al adobe que es una combinación manual de tierra y agua, colocando la mezcla dentro de un molde que descansa sobre una superficie plana; a esta mezcla se le han añadido otros materiales que permiten el mejoramiento de sus propiedades, así como la implementación de granulometría más adecuada.

El tapial es otra técnica constructiva, consiste en una pared monolítica construida en el sitio por medio de la compresión de capas de tierra húmeda dentro de grandes moldes, que por lo general son de madera, y que se reubican conforme avanza la construcción.

Otra técnica que es utilizada en varias regiones y que recibe distintos nombres es la combinación de madera, bambú, palos, paja, fibras e incluso aglomerantes. En Guatemala es conocida como bajareque, es una técnica mixta que consiste en una estructura portante de madera unida por entramados reticulados de madera o palos y cubiertos con una mezcla plástica de tierra. Este sistema requiere de un revestimiento debido a la contracción que presenta la mezcla.

Existen otras técnicas menos conocidas, debido a que están sujetas a la geografía y su aplicación es más reducida. Comparando las técnicas antiguas de construcción con las actuales, se determina que dichas técnicas han evolucionado, adaptándolas para cubrir las necesidades que se presentan y aplicando conocimientos adquiridos en investigaciones, prácticas y del medio

socioeconómico y cultural donde se ejecutan, donde la fuerza laboral del hombre se reemplaza por herramientas y equipo y se introducen materiales regionales y algunos sintéticos.



## **2. BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA**

La construcción con bloques de tierra compactada es una forma de mampostería seca, usada como material de construcción de bajo costo. El proceso de elaboración y construcción no requiere de habilidades específicas y puede ser realizada por cualquier persona, haciéndolo atractivo para los países en vías de desarrollo. La producción de bloques de tierra compactada estabilizados está registrada desde 1956, año en el que el ingeniero colombiano Raúl Ramírez desarrolló la prensa de bloques CINVA RAM.

Los estudios para la estabilización de la tierra con aglomerantes, específicamente con cemento que comenzaron en los años 30 del siglo XX, abrieron una gama de posibilidades para la construcción con el nuevo material, ganando fuerza con el desarrollo de la prensa manual CINVA RAM para la fabricación de bloques, lo que conlleva a la industrialización.

El proceso de fabricación de los bloques de tierra compactada permite aplicar un sistema de control de calidad eficaz, además de asegurar la uniformidad de las dimensiones del bloque. En Guatemala, el ingeniero Roberto Lou desarrolló la prensa manual CETA RAM, que ha tenido algunas aplicaciones en el área rural.

### **2.1. Definición**

El bloque de tierra compactada (BTC) es un elemento de mampostería hecho con tierra, sometido a una fuerza de compresión proporcionada por una prensa manual o hidráulica, el cual puede ser desmoldado de forma inmediata.

Para mejorar las propiedades mecánicas y físicas del BTC, puede hacerse por medio de la estabilización granulométrica, que consiste en la mezcla de proporciones de diferentes tierras, y la estabilización química, en la cual se agrega un aditivo químico a la tierra, generalmente es un aglomerante de tipo cemento, cal o yeso.

### **2.1.1. Generalidades**

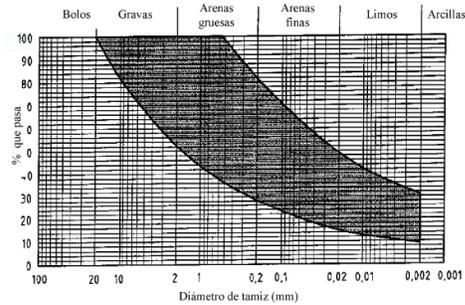
Para la elaboración de bloques de tierra compactada sin utilizar aglomerantes debe utilizarse tierra que esencialmente está compuesta de grava, arena, limo y arcilla, mezclada con agua. La tierra utilizada para elaborar los bloques no debe contener materia orgánica en cantidad mayor o igual al 2 % y sales solubles en contenido mayor del 2 %.

La norma UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”, establece que las características principales de la tierra que se utilizará para elaborar bloques son la granulometría, plasticidad y tipo de arcilla.

Para obtener resultados satisfactorios, se recomienda que la granulometría del material esté inscrita en el huso del diagrama de textura de la figura 7. No deben utilizarse tierras con un contenido de arcilla menor al 10 %.

La plasticidad del material es un aspecto importante, por lo que se recomienda que se encuentre dentro de la zona sombreada del diagrama de plasticidad de la figura 8.

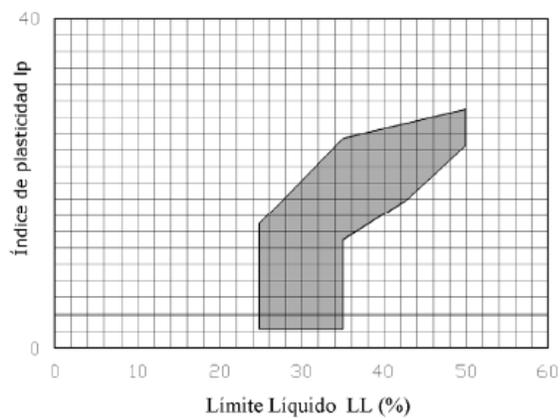
Figura 7. Huso del diagrama de texturas de las tierras



Fuente: NORMA UNE 41410. *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.* p. 12.

. Aquellos materiales cuya plasticidad se encuentre inscrita en la zona sombreada recomendada, en la mayoría de los casos, darán resultados satisfactorios.

Figura 8. Zona recomendada del diagrama de plasticidad de las tierras



Fuente: NORMA UNE 41410. *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.* p. 13.

Para obtener un adecuado BTC, es importante considerar la granulometría del suelo a utilizar, la plasticidad y el tipo de arcilla.

## **2.2. Arcillas**

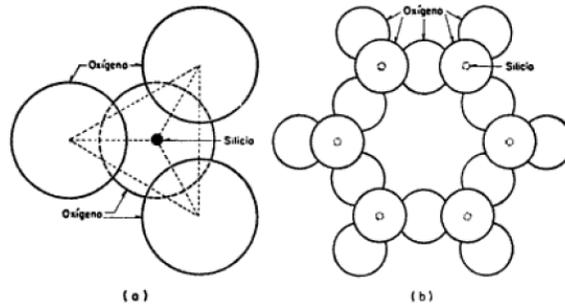
De los numerosos minerales (en especial silicatos) que se encuentran en las rocas ígneas y metamórficas, los agentes de descomposición química llegan a un producto final, la arcilla; predominando partículas de tamaño coloidal o casi coloidal, provista comúnmente de plasticidad cuando se encuentra humedecida y pulverizada de forma suficiente, rígida cuando está seca y vítrea cuando se calcina a temperatura suficiente.

El comportamiento mecánico de las arcillas depende de su estructura en general y constitución mineralógica en particular. Básicamente están constituidas por silicatos de aluminio hidratados, en ocasiones presentando silicatos de magnesio, hierro u otros metales hidratados. Dichos metales casi siempre tienen una estructura cristalina definida, dando lugar a que sus átomos se dispongan en láminas.

Existen dos tipos de láminas, la silícica y la alumínica. La lámina silícica está formada por un átomo de silicio rodeado de cuatro átomos de oxígeno, formando un tetraedro.

Los tetraedros se agrupan entre sí formando una unidad hexagonal que se repite de forma indefinida creando una retícula laminar. Un átomo de oxígeno sirve de nexos entre cada dos tetraedros (figura 9).

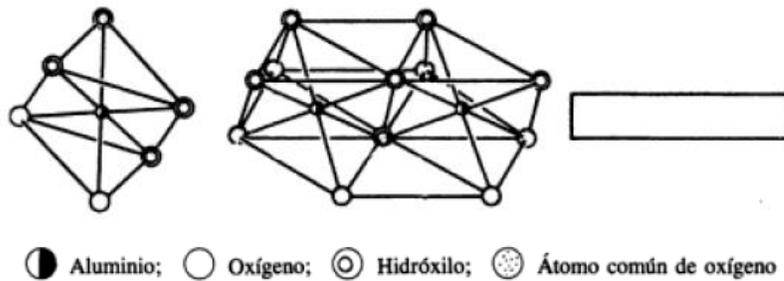
Figura 9. Tetraedro y unidad hexagonal



Fuente: JUÁREZ BADILLO, Eulalio. *Mecánica de suelos. Tomo 1.* p. 38.

La lámina de tipo alumínica está formada por un átomo de aluminio rodeado de seis átomos de oxígeno y de oxígeno e hidrógeno, formando en conjunto un octaedro, los cuales se agrupan entre sí por medio de un átomo común de oxígeno. Esto lo repiten indefinidamente hasta formar una redícula laminar alumínica (figura 10).

Figura 10. Octaedro, redícula y lámina



Fuente: CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones.* p. 23.

### **2.2.1. Clasificación**

Estudios mineralógicos, clasifican en cinco grupos a las arcillas con base en datos de estructura y composición.

- Cristalino
  - Grupo del caolín
  - Grupo de la montmorillonita
  - Grupo de la illita o hidrónica
  - Grupo de la attapulgita-sepiolita
  
- Amorfo
  - Grupo de la alófana

Estructuralmente el material se estudia en tres niveles: macroestructura, microestructura y a nivel iónico-molecular.

### **2.2.2. Propiedades**

Dependiendo de las propiedades que presenta el material, así será el uso que puede dársele. La arcilla presenta resistencia mecánica, dureza, resistencia al calor y la corrosión elevada, además posee propiedades magnéticas, eléctricas y ópticas.

### **2.2.3. Plasticidad y capacidad aglomerante**

La plasticidad de la arcilla es gracias al comportamiento laminar de sus partículas; esto le permite tomar la forma que se desee al estar bajo el efecto de

una acción, sin que aparezcan grietas y que conserve la forma adquirida al secarse.

Cuando el agua entra en contacto con la arcilla, las moléculas de agua (dipolos) se adentran entre las partículas lenticulares de caolinita y la acuñan provocando el hinchamiento de la arcilla. Las capas finas de agua entre las partículas estratiformes de minerales arcillosos condicionan las características de la pasta arcillosa.

La capacidad aglomerante se observa en la cohesión de los granos no plásticos, al igual que en la formación después del secado de un artículo bruto con bastante resistencia mecánica.

#### **2.2.4. Capacidad de endurecimiento al secarse**

La arcilla al secarse presenta resistencia mecánica, dicha resistencia está condicionada por la acción de las fuerzas de Van der Waals y la cementación de los granos de minerales por los iones de impurezas. Las fuerzas ejercidas por la presión capilar atraen a las partículas de arcilla, impidiendo su corrosión, dando lugar a la contracción aérea.

#### **2.2.5. Contracción**

El volumen de la materia bruta de arcilla y las dimensiones lineales se reducen durante el secado, dando lugar a la contracción aérea y a la contracción térmica, dependiendo del tipo de secado que se le dará.

La contracción aérea ocurre por la evaporación del agua presente en la materia bruta como resultado de la reducción del espesor de las capas de agua

que se encuentran alrededor de las partículas de arcilla, aparición de meniscos en los poros de la materia bruta y fuerzas de presión capilar.

La contracción térmica se da por el proceso de cocción, en él los componentes fusibles de la arcilla se funden y las partículas se aproximan en los lugares de su contacto. Esa contracción puede estar entre el 2 % y el 8 %, dependiendo del tipo de arcilla que se use.

La contracción total, que es la suma algebraica de las contracciones aérea y térmica, se encuentra entre el 5 % y el 18 %.

#### **2.2.6. Capacidad refractaria**

La arcilla posee la capacidad de soportar altas temperaturas sin fundirse. De ahí el porqué de su uso en muchas actividades.

### **2.3. Limos**

Los limos pueden encontrarse a lo largo de grandes superficies. Presentan colores rosado, rojizo, amarillento, café, entre otros. Pueden encontrarse agrietados en fragmentos poliédricos a lo largo de las fisuras.

También pueden encontrarse mezclados con otro tipo de suelo de granulometría mayor, como gravas y arenas; además, en ocasiones se encuentra mezclado con arcilla.

### **2.3.1. Clasificación**

Se pueden clasificar según el tamaño de las partículas, en gruesos (0,06 a 0,02), intermedios (0,02 a 0,006) y finos (0,006 a 0,002). A simple vista solo se aprecia el limo grueso; presenta poca plasticidad y dilatancia notable, ligeramente granular o sedoso al tacto.

### **2.3.2. Propiedades**

Por ser un material con gran porcentaje de finos, puede ser blando o suelto, con facilidad para moldearse; firme o denso, necesitando una presión fuerte para moldearse o aplastarse; muy blando, escurriendo entre los dedos cuando se exprime en la mano; blando, dejando moldearse con presión ligera.

### **2.3.3. Plasticidad y capacidad aglomerante**

Algunas veces posee cierta plasticidad, pero se desintegra en agua, los terrones se secan con rapidez, exhibe cohesión pero puede pulverizarse fácilmente con los dedos. Sin plasticidad o baja plasticidad.

### **2.3.4. Capacidad de endurecimiento al secarse**

Al secarse, el limo posee una gran dureza.

## **2.4. Agregados**

Son materiales pétreos inertes que resultan de la desintegración natural de rocas, trituración de las mismas o de otros materiales inertes y suficientemente duros; se clasifican por su tamaño y por su forma.

- Por su tamaño:
  - Agregado fino (arena), material que pasa por el tamiz núm. 4, de 4,76 mm (3/16 plg) de abertura entre hilos.
  - Agregado grueso (grava o piedrín), material que queda retenido en el tamiz de 150 mm (6 plg).
  
- Por su forma:
  - Canto rodado, proviene de cauces de ríos y es de forma redondeada. tiene mayor trabajabilidad y la composición mineralógica de sus partículas no es uniforme.
  - Triturado, de piedra de cantera. Su composición mineralógica es más uniforme y tiene aristas vivas.

## **2.5. Cemento**

Es un material generalmente en forma de polvo, de color gris azulado obtenido de la pulverización de clínker, el cual es obtenido de calentar intensamente una mezcla de minerales arcillosos y calcáreos.

El principal material utilizado como materia prima es una mezcla de piedra caliza pura y arcilla; la mezcla debe contener un 75 % de carbonato de calcio y el resto ser casi en su totalidad silicato de aluminio y sílice libre. El más utilizado es el cemento portland adicionado con puzolana.

## **2.6. Cal**

Conocida químicamente como calcia, es óxido de calcio (CaO) y se presenta en gran abundancia en la naturaleza, especialmente combinada con el dióxido de carbono en forma de carbonato de calcio, piedra caliza, mármol, tiza,

coral y conchillas. La cal comúnmente es empleada en morteros, cementos, como flujo de la fundición del hierro, en procesos químicos, como absorbente y para encalar suelos ácidos.

Se obtiene de la calcinación de piedra caliza en un horno común o rotatorio a 540 °C, con lo que se elimina el gas dióxido de carbono; el residuo se denomina cal viva o cal cáustica. La cal hidratada se hace moliendo cal viva, apagando el polvo con agua y transformándolo luego en un polvo fino. La cal hidratada es más fácil de manejar que la cal ordinaria.

La cal es un material aglomerante simple; sus propiedades aglomerantes se originan por la reabsorción del agua expulsada y la formación de los mismos compuestos químicos de que estaba formado el material original. Como material cementante, la cal tiene diferentes usos; como material aglomerante, se utiliza para morteros y en la composición de materiales decorativos para acabados.

## **2.7. Grout (lechada)**

Es un material cementicio utilizado para reforzar la mampostería; puede ser entregada por camiones o ser mezclada en el lugar de trabajo. Sus componentes básicamente son arena, cemento portland, agua y grava fina, los cuales se mezclan hasta formar una consistencia fluida y trabajable. Existen dos clases de lechada que son usadas.

- Lechada fina: existe un espacio de 1/4 plg o más entre el acero de refuerzo y la unidad de mampostería. Su proporción en volumen es:
  - 1 parte de cemento portland
  - 2 1/4 a 3 partes de arena

- Agua para obtener un *slump* de 8 plg a 10 plg
- Lechada gruesa: habrá un mínimo de espacio de 0,5 plg entre el acero de refuerzo y la unidad de mampostería. Su proporción por volumen es:
  - 1 parte de cemento portland
  - 2 1/4 a 3 partes de arena
  - 1 a 2 partes de grava fina
  - Agua para un *slump* de 8 plg a 10 plg

La lechada fina es utilizada en paredes o áreas donde el espacio para la lechada es pequeño, angosto o muy congestionado debido al acero de refuerzo. La lechada gruesa es utilizada en donde los espacios para echarla dentro de la mampostería de ladrillo tengan 1,5 plg o más de ancho horizontalmente; y en un bloque, si las dimensiones mínimas de la celda son de 1,5 plg por 3 plg.

### **3. MATERIAL VOLCÁNICO**

#### **3.1. Definición**

Según la norma ASTM C595M-11 “Especificaciones Normalizadas para Cementos Adicionados Hidráulicos”, la puzolana es “material silíceo o silíceo aluminoso, el cual en sí mismo posee un pequeño o ningún valor cementicio, pero que, finamente dividido y en presencia de humedad, reaccionará químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas comunes para formar compuestos que posee propiedades cementicias”.

Se han encontrado puzolanas que aun saliéndose de los parámetros establecidos por esta definición, han arrojado buenos resultados, por lo que dicha definición debe tomarse como punto de partida.

Una mejor definición podría ser, “material silíceo, aluminoso y ferroso que por sí solo no es cementante, pero que bajo ciertos estados de cristalinidad y estructura, podría reaccionar con cal en presencia de humedad, a temperatura y presión normales, para formar productos cementantes”.

#### **3.1.1. Clasificación**

Para clasificar las puzolanas, se han propuesto varios sistemas que pueden dividirse en dos grupos: sistemas basados en la química y mineralogía del material, y sistemas basados en la reactividad y características de comportamiento.

### 3.1.2. Puzolanas naturales

Entre ellas se encuentran las tobas, tierra de Santorín (ceniza volcánica), *trass* (piroclásto romano de origen volcánico), pumicita riolítica, diatomita, *gaize* y tripoli (piroclásto francés de sílice amorfo). Las puzolanas naturales pueden dividirse de forma simple en dos categorías:

- Derivadas de rocas volcánicas, en las que el vidrio amorfo es producido por la fusión; incluyen cenizas volcánicas (pumicitas), pómez, piedra de pómez, obsidiana, escoria, tobas (puzolanas italianas y *trass* alemán) y andesitas.
- Derivadas de rocas y tierras opalinas, incluyen las diatomitas (tierra de diatomeas), sílex (roca silíceo densa), pizarra arcillosa y arcillas que contienen ópalo. La precipitación de sílice en solución o de restos de organismos forma el ópalo.

La inestabilidad química de ciertas fases como vidrio volcánico, ópalo, minerales de arcilla, zeolitas y óxidos hidratados de aluminio determina la reactividad de los materiales.

Las puzolanas naturales más reactivas son las derivadas de rocas volcánicas porque contienen cantidades sustanciales de zeolitas, las cuales se forman por la acción del agua subterránea sobre el vidrio volcánico.

El proceso de zeolitización está influenciado por la composición química y microestructura del material sedimentario, tamaño de la partícula y distribución, pH del ambiente sedimentario, iones presentes en la solución,

edad de los depósitos, presión, temperatura y composición de fluidos intersticiales.

### **3.1.3. Puzolanas artificiales**

Estas incluyen materiales como la ceniza volante (*fly ash*), ceniza de altos hornos (*blast furnace slag*), *surkhi* (arcilla cocida en la India), ceniza de cascabillo de arroz (*rice husk ash*), hojas de banano quemado (*burnt banana leaves*), desechos quemados de caña de azúcar y desechos de bauxita. También podrían incluirse otros materiales como cenizas de bagazos, suelos lateríticos y suelos tropicales rojos que requieren ser calcinados para inducirles puzolanidad.

### **3.1.4. Aplicación de las puzolanas como agregado**

Las puzolanas, debido a sus características, pueden usarse como agregados gruesos y finos, sustituyendo a la grava y a la arena; esto gracias a su versatilidad en cuanto a la granulometría que presentan.

### **3.1.5. Aplicación de las puzolanas como aglomerante**

En lugares como Egipto, Grecia y Roma se ha encontrado que las puzolanas forman parte del cemento de estructuras ancestrales; recientes exámenes han demostrado que el cemento encontrado en muchas partes de las grandes pirámides es de aproximadamente 4 500 años de edad y todavía está en buenas condiciones.

El descubrimiento de cementos cal-puzolana permitió cambios radicales en la construcción, debido al incremento de la resistencia en los materiales; los

morteros de cal-puzolana fueron utilizados como agentes repelentes al agua para canales, duchas, tanques y acueductos.

Las adiciones minerales de alta finura pueden ayudar al mejoramiento de las cualidades del concreto; pueden ser efectos físicos como el incremento de la compacidad, o efectos físicoquímicos como los nuevos productos de reacción formados durante la reacción puzolánica. En ambos casos el efecto es similar; la porosidad del concreto disminuye, haciendo la distribución y tamaño de los poros más pequeño. Las puzolanas pueden modificar las propiedades reológicas y mecánicas del concreto, así como su durabilidad.

### **3.1.6. Las puzolanas en Guatemala**

El geólogo alemán Karl Sapper llegó a Guatemala en 1888; sus investigaciones fueron bastante extensas tanto en sentido geográfico como geológico, contribuyendo con otras ramas científicas y con el levantamiento topográfico de sus propios mapas topográficos. Tomó como base los estudios realizados por Dollfus y Montserrat y amplió los mismos gracias a sus viajes por toda Centroamérica, dando como resultado publicaciones resumidas en el libro *Mittelamerika* en 1937.

En 1883, el gobierno encargó a C. Manó, un ingeniero belga, el estudiar la República bajo el punto de vista mineralógico; se enfocó en investigar el frente de montaña desde Huehuetenango hasta Izabal; sus informes fueron presentados a la Secretaria de Fomento y reproducidos en *Los anales de la sociedad de geografía e historia* en 1940.

Samuel B. Bonis, geólogo y vulcanólogo describe a Guatemala en su obra *Un resumen de la geología de Guatemala* como una continuación geológica de

México y Norteamérica; rocas paleozoicas y mesozoicas que tienen rumbo sureste en el sur de México, sufren un cambio de rumbo hacia el este en Guatemala y continúan hasta el mar Caribe, emergiendo posiblemente para formar parte del eje geológico de las Antillas Mayores.

Dividió a Guatemala en cuatro provincias: volcánica de Edad Terciaria a Reciente, que abarca la parte sur del país; la planicie costera del Pacífico que consiste en restos provenientes de la erosión de las sierras volcánicas; una cordillera que forma el núcleo geanticlinal del norte de Centroamérica, que consiste en esquistos, granitos, serpentinas y un cinturón plegado sedimentario hacia el norte, y la tierra baja del Petén, una cuenca sedimentaria de edad Cretácica que ocupa la región norte de la República.

Las rocas sedimentarias de la zona de pliegue y de la cuenca del Petén tienen juntas de un espesor de más de 10 000 m, que incluye 3 000 m de lutitas y calizas de edad Pennsylvánica y Pérmica; 1 000 m de capas rojas de edad jurásica y cretácica; 3 000 m de carbonatos cretácicos, los cuales sufren un cambio lateral a una cuenca de evaporitas hacia el norte, con un espesor posiblemente de más de 3 000 m; y más de 1 000 m de clásticos de edad terciaria inferior. Sedimentos de edad terciaria superior exceden 1 000 m en espesor.

El cinturón volcánico formado por los volcanes cuaternarios de hasta 4 000 m de altura, se incrementa estrechamente desde la plataforma costera; bajo los volcanes y alrededor de ellos hacia el norte, se extiende el área de vulcanismo terciario que contiene depósitos llenos de pómez y grabens. La provincia volcánica cubre el oeste, sur y sureste de Guatemala y se extiende a los otros países centroamericanos; la mayoría de la población está localizada

en las tierras altas volcánicas y las ciudades más grandes están construidas sobre los depósitos de pómez que brinda la única región plana.

## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1. Materiales**

A continuación se describen los materiales utilizados en los BTC.

#### **4.1.1. Material volcánico**

El material volcánico o puzolana utilizado se pasó por el tamiz de 3/8 plg, Siendo previamente secado, colocándolo sobre plástico y dejándolo bajo el sol por aproximadamente 3 horas, moviéndolo cada 20 minutos para que se secase de forma homogénea.

También se utilizó puzolana molida, la cual fue colocada dentro del molino de bolas durante una hora, siendo previamente secada al sol. La puzolana es proveniente de un banco localizado en el km. 90 de la ruta CA-2.

#### **4.1.2. Agua**

El agua utilizada era proveniente del grifo, no contenía sales ni material orgánico.

#### **4.1.3. Tierra**

La tierra o suelo que se utilizó en la elaboración de los bloques fue limo de alta plasticidad, obtenido del municipio de Chinautla del departamento de Guatemala.

#### **4.1.4. Cal**

La cal utilizada fue cal hidratada, proveniente de un saco de 25 kg el cual se utilizó teniendo en cuenta el cuidado de no dejarlo a la intemperie para evitar el proceso de carbonatación.

#### **4.1.5. Cemento**

El cemento utilizado fue cemento de uso general en la construcción, adicionado con puzolana, de 4 000 lb/plg<sup>2</sup>.

### **4.2. Equipo y herramienta a utilizar en la elaboración de bloques de tierra compactada**

A continuación se describe el equipo y herramienta utilizada en la elaboración de los BTC.

#### **4.2.1. Molino de bolas**

Es un molino de acero marca Patterson, con una capacidad de 0,1 m<sup>3</sup>, compuesto por un casco que está conectado a unas chumaceras en los extremos, las cuales le sirven de soporte y a la vez como base sobre las cuales gira (ver figura 11). Posee una ventana por la cual se ingresa el material a moler y las bolas, además de permitir la inspección de la molienda; para su funcionamiento, el molino posee un motor trifásico. Las bolas utilizadas para la molienda tienen un diámetro promedio de 28 mm; el peso de las bolas en conjunto es de 50 kg (ver figura 12).

Figura 11. **Molino de bolas**



Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 12. **Bolas para molienda**



Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

#### **4.2.2. Molino de martillos**

Molino de metal, fabricado por Del Kyrios, S. A. Industria Metalmeccánica de Guatemala (ver figura 13). Está conformado por una tolva donde se coloca el material a triturar, una cámara de trituración en donde se encuentran 14 martillos de acero de dimensiones de 9 cm de largo, 5 cm de ancho y 1 cm de espesor; dentro de la misma cámara se encuentra una lámina perforada con

agujeros de 1/4 plg de diámetro que conecta con la salida del molino (ver figura 14). El molino posee un motor eléctrico trifásico para su funcionamiento.

Figura 13. **Molino de martillos**



Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 14. **Cámara de trituración, molino de martillos**



Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

#### 4.2.3. Prensa manual

Está hecha de placas de acero de 1/2 plg de espesor; el molde es de 0,30 m de largo, 0,15 m de ancho y 0,10 m de altura (ver figura 15). Cuenta con un tubo de acero de 1,90 m de longitud y 0,635 m de diámetro, el cual sirve como brazo de palanca para comprimir el material colocado dentro del molde.

Figura 15. Prensa para elaborar BTC



Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

#### 4.2.4. Balanzas

Se utilizó una balanza con capacidad máxima de 50 kg para pesar el material a utilizar en la elaboración de los bloques (ver figura 16a); y una balanza de precisión Heavy Duty, marca Ohaus con capacidad máxima de 20 kg y 0,1 g de precisión para pesar los bloques individuales (ver figura 16b).

Figura 16. **Balanzas**



(a) 50 kg



(b) 20 kg

Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

#### 4.2.5. **Cámara de curado**

Se utilizó para curar los BTC estabilizados con aglomerante ternario cemento-puzolana molida. Para su construcción se utilizó andamio de acero y planchas de acero, donde se colocaron los bloques y lienzo de polietileno con lo que se forró el andamio para que la cámara fuera hermética (ver figura 17).

Figura 17. **Cámara de curado**



Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

#### **4.2.6. Otra herramienta**

Se utilizaron palas, carretas, tamiz de 3/8 plg (ver figura 18), y tamiz núm. 30.

Figura 18. **Tamiz de 3/8 plg**



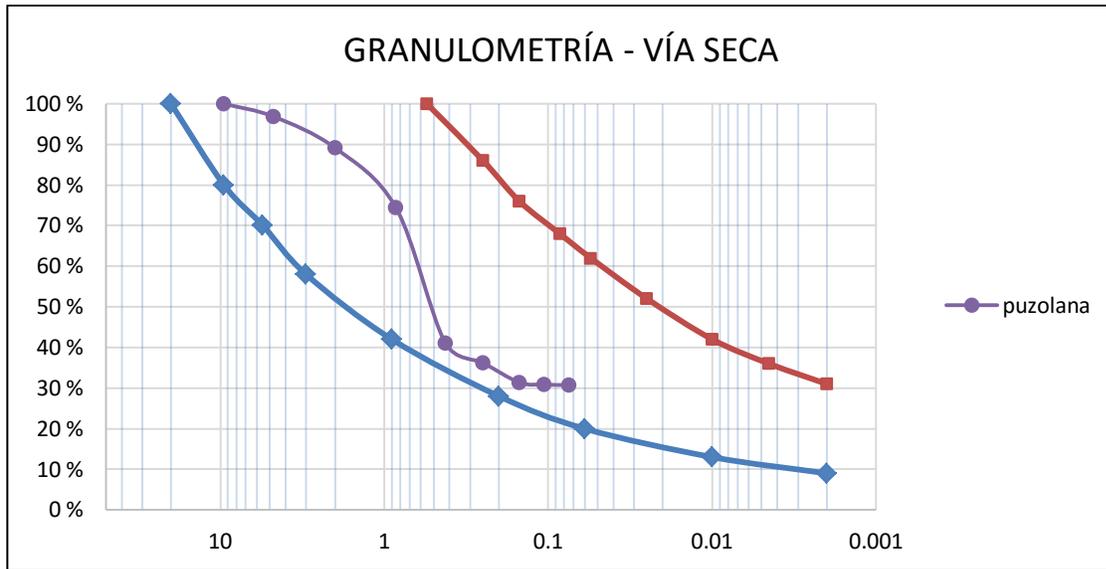
Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

#### **4.3. Caracterización de los materiales**

La puzolana antes de ser tamizada debió ser secada al sol; mientras estuvo en el proceso de secado al sol, se procedió a triturar el agregado fino antes de ser introducido al molino de martillos; al estar completamente seco, se procedió a molerlo.

Al agregado fino se le realizó el ensayo de límites de Atterberg, para determinar el tipo de suelo; de dicho ensayo se concluyó que no era arcilla sino un limo de alta plasticidad y no entraba dentro del área establecida en la figura 8. A la puzolana se le realizó el ensayo de granulometría por vía seca y húmeda para determinar los porcentajes de finos y gruesos que poseía, dando como resultado una granulometría aceptable (ver figura 19).

Figura 19. **Granulometría de puzolana**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Después de haber realizado los ensayos antes mencionados, se mezclaron la puzolana y el limo y a esa mezcla se le realizó el ensayo de granulometría y el de compactación Proctor, para determinar si la mezcla entraba dentro del huso de la figura 7 y para determinar su humedad óptima y capacidad de compactación. De estos ensayos se determinó que la granulometría sí entraba en el huso de la figura 7 y su humedad y compactación era aceptable.

Con base en pruebas realizadas a BTC con aglomerante natural en proporción de 20 % y 25 % (tipo A y tipo B respectivamente), se determinó que los bloques tipo B se comportaban de mejor manera, complementándolos con un aglomerante compuesto por 10 % de cal-puzolana (20 % cal y 80 % puzolana molida) y 5 % de cemento, teniendo así un aglomerante ternario. Se tomó en cuenta además que la cantidad de finos que la puzolana poseía eran

elevados, por lo que se procedió a pasar la puzolana por el tamiz Núm. 30, utilizando el 30 % de lo que pasó dicha malla.

#### **4.4. Equipo y procedimiento de ensayo**

A continuación se describe el equipo y el procedimiento utilizado en los ensayos realizados a los BTC.

##### **4.4.1. Ensayo de compresión a unidades de BTC**

Para los bloques con aglomerante natural, se utilizó la máquina universal ubicada en el antiguo edificio del Centro de Investigaciones de Ingeniería, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala (ver figura 20).

La máquina tiene cuatro escalas de carga, la primera es de 600 kg  $\pm$  0,5 kg; la segunda de 3 000 kg  $\pm$  2,5 kg; la tercera de 12 000 kg  $\pm$  10 kg; y la cuarta de 60 000 kg  $\pm$  50 kg.

Para los bloques con aglomerante ternario se utilizó la máquina de compresión Riehle, ubicada en el nuevo edificio del Centro de Investigaciones de Ingeniería. Es una máquina con capacidad de 60 000 lbs y una velocidad de aplicación de carga de 0 a 3 lb/min (ver figura 24).

La resistencia a compresión  $f_c$ , del bloque fue dada en N/mm<sup>2</sup>, teniendo en cuenta que la norma UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”, establece una resistencia mínima a compresión de 1,3 N/mm<sup>2</sup> (ver tabla I).

Figura 20. **Máquina universal**



Fuente: antiguo edificio del Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Se utilizaron 3 bloques para BTC con aglomerante natural y 3 bloques con aglomerante ternario.

Al realizar el ensayo, se colocó neopreno en la parte superior de los bloques, para garantizar una mejor distribución de la aplicación de la carga sin dañar antes de tiempo las caras de los mismos.

#### **4.4.1.1. Cálculos**

Con base en la norma UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”, se estableció un parámetro dentro del cual los bloques debían ingresar para ser considerados como aceptables.

$$\sigma = \frac{P}{A_b}$$

Donde:

$\sigma$  = esfuerzo a compresión

P = carga aplicada

$A_b$  = área bruta del bloque

Tabla I. **Clases de resistencia normalizada a compresión**

<b>Bloques</b>	<b>BTC 1</b>	<b>BTC 3</b>	<b>BTC 5</b>
Resistencia normalizada, $f_c$ , en N/mm <sup>2</sup>	1,3	3	5

Fuente: NORMA UNE 41410. *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.* p. 13.

#### **4.4.2. Ensayo de capilaridad a unidades de BTC**

Para este ensayo se procedió a utilizar el equipo y procedimiento establecido por la norma UNE-EN 772-11 parte 11. “Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería, en hormigón, piedra natural y artificial, y de la tasa de absorción de agua inicial de las piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería”.

Los aparatos utilizados en el proceso de ensayo fueron (ver figura 21):

- Una cubeta de una profundidad mínima de 20 mm, más grande que la cara del bloque a sumergir y provisto de un dispositivo que permita mantener el agua a un nivel constante.
- Un soporte de 400 mm<sup>2</sup> de superficie máxima a fin de mantener cada probeta por encima de la cubeta.

- Un cronómetro graduado en segundos.
- Una balanza para pesar los bloques tanto en estado seco como en estado húmedo.

Figura 21. **Equipo para ensayo de capilaridad**



Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Para realizar este ensayo, los bloques estaban completamente secos; se pesaron y luego se midieron las dimensiones de cada una de las caras sumergidas y se calculó la superficie bruta  $A_g$ . Luego se colocaron en el soporte de manera que no estuvieran en contacto con el fondo del recipiente, pero que sí estuvieran sumergidas en el agua a una profundidad de  $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ .

El cronómetro se activó y el nivel de agua se mantuvo constante a lo largo del ensayo ( $10 \text{ minutos} \pm 0,2 \text{ min}$ ), agregando agua cuando fue necesario. Después del tiempo de inmersión especificado se retiraron los bloques, se escurrió el agua de la superficie y se pesaron.

#### 4.4.2.1. Cálculos

Con base en lo observado en los bloques, se determina el coeficiente de absorción.

$$C_{w,s} = \frac{m_h - m_s}{A_b \sqrt{t}} \times 10^3$$

Donde:

$C_w$  = coeficiente de absorción, [ $kg/m^2 \times min^{0.5}$ ]

$m_h$  = masa del bloque después de haber sido inmerso en agua, en gramos (kg)

$m_s$  = masa del bloque antes de ser inmerso en agua, en gramos (kg)

$A_b$  = área bruta del bloque ( $m^2$ )

$t$  = tiempo de inmersión, en segundos (min)

#### 4.4.3. Ensayo de erosión acelerada Swinburne a unidades de BTC

La norma utilizada para este ensayo es la norma UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo, sección 8,4”.

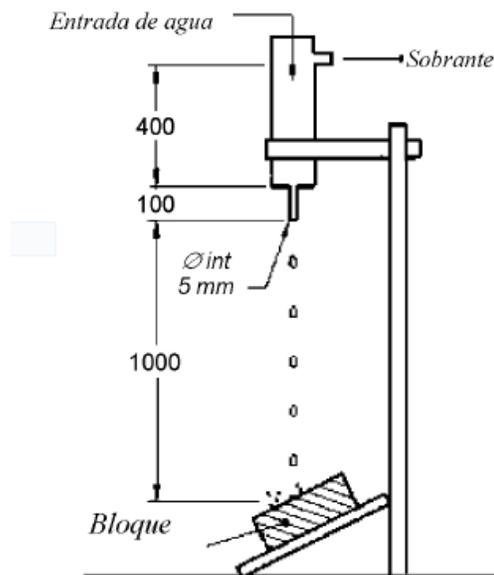
Se requirió de dos bloques; el equipo utilizado fue (ver figura 22):

- Una pieza de madera para colocar el bloque.
- Un tubo de PVC de 4 plg de diámetro.
- Un tubo de plástico de 5 mm de diámetro.
- Piezas de metal para el andamiaje.

Para el ensayo se dejó caer una corriente de agua continua sobre el bloque durante 10 min a través de un tubo de cristal de 5 mm de diámetro interno, conectado a un tanque de agua de nivel constante que se encontraba colocado a una altura de 1,5 m sobre la cara del bloque.

El bloque estaba inclinado a 27° respecto de la horizontal. Luego, con una varilla de 3 mm de diámetro se midió la profundidad de la oquedad que apareció.

Figura 22. **Modelo de equipo**



Fuente: NORMA UNE 41410:2008. *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.* p. 18 (medidas en mm).

Figura 23. **Equipo utilizado**



Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

#### 4.4.3.1. **Cálculos**

La caída constante de agua en el bloque puede provocar pérdida de material o generar un vacío. Según la tabla II, el bloque se puede clasificar en “apto” o “no apto” dependiendo del resultado del ensayo.

Tabla II. **Resistencia a la erosión: criterios de aceptación o rechazo**

<b>Propiedad</b>	<b>Criterio</b>	<b>Resultados</b>
D (profundidad del vacío), en mm	$0 \leq D \leq 10$	Bloque apto
	$D > 10$	Bloque no apto

Fuente: NORMA UNE 41410:2008. *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.* p. 14.

#### 4.4.4. **Ensayo de compresión de prismas de mampostería**

Este ensayo se basó en la norma ASTM C-1314 o su equivalente Coguanor NTG 41051 h2. Se elaboraron tres prismas, todos con el mismo tipo

de materiales; poseían una altura de 3 bloques (30 cm) y fueron ensayados a los 28 días después de haber sido realizados.

Se utilizó la máquina de compresión Riehle, ubicada en el nuevo edificio del Centro de Investigaciones de Ingeniería (ver figura 24). Es una máquina con capacidad de 60 000 lbs y una velocidad de aplicación de carga de 0 a 3 lb/min.

Figura 24. **Máquina de compresión Riehle**



Fuente: nuevo edificio del Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

#### 4.4.4.1. **Cálculos**

La resistencia de diseño a compresión se calculó según lo establecido en la norma Coguanor NTG 41051 h2. El esfuerzo de compresión especificado  $f'_m$  para cada prisma se obtiene de multiplicar la resistencia del prisma por el factor de corrección establecido en la tabla VII; luego se calcula el esfuerzo de compresión  $f'_{mt}$  para cada juego de prismas, promediando los valores obtenidos, como se muestra a continuación:

$$f'_m = f_m \times c_m$$

Y

$$f'_{mt} = \frac{\sum f'_m}{n}$$

Donde:

$f_m$  = resistencia del prisma

$c_m$  = factor de corrección altura-espesor

$f'_m$  = esfuerzo de compresión especificado para cada prisma

$f'_{mt}$  = esfuerzo de compresión del conjunto de prismas

$n$  = número de prismas

#### **4.4.5. Ensayo de tensión diagonal (corte) de prismas de mampostería**

Este ensayo se basó en la norma internacional ASTM E-519 o su equivalente Coguanor NTG 41051 h3. Se elaboraron tres prismas, todos con el mismo tamaño y tipo de mampostería, misma mano de obra y tipo de mortero; poseían dimensiones de 60 cm x 60 cm. El equipo utilizado en el ensayo fue un gato hidráulico Enerpac RC 102, cuyo pistón tiene un área efectiva de 14,45 cm<sup>2</sup> (2,24 plg<sup>2</sup>) con capacidad de 10 toneladas, dos deformómetros, dos esquineros y cuatro sargentos.

##### **4.4.5.1. Cálculos**

La resistencia de diseño a corte se calculó según lo establecido en la norma Coguanor NTG 41051 h3. El esfuerzo de corte para los prismas se calculó de la siguiente manera:

$$S_s = \frac{0.707P}{A_n}$$

Donde:

$S_s$  = esfuerzo de corte sobre el área neta, en MPa

$P$  = carga aplicada, en N

$A_n$  = área neta del prisma, mm<sup>2</sup>

## 5. ELABORACIÓN DE BTC Y PRISMAS PARA ENSAYOS DE COMPRESIÓN Y TENSIÓN DIAGONAL

Se realizaron dos tipos de BTC, los primeros utilizando aglomerante natural (limo de alta plasticidad), los segundos utilizando aglomerante ternario.

### 5.1. Elaboración de bloques con aglomerante natural

Para los BTC con aglomerante natural se utilizó la siguiente proporción:

Tabla III. **Distribución de material en porcentaje para un BTC con aglomerante natural**

Tipo	Material	Porcentaje	Total
1	Puzolana (agregado)	80 %	100 %
	Limo (aglomerante)	20 %	
2	Puzolana (agregado)	75 %	100 %
	Limo (aglomerante)	25 %	

Fuente: elaboración propia.

#### 5.1.1. Elaboración de bloques para ensayos de compresión, capilaridad y erosión acelerada

Se mezcló la puzolana con el limo plástico, habiendo pesado previamente el material, como se muestra en la figura 25a, luego se le agregó agua hasta obtener la humedad adecuada (figura 25b).

Figura 25. **Mezclado de material y material húmedo**



(a) Mezclado de material



(b) Material húmedo

Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Se colocó el material dentro de la máquina, y luego de aplicar la carga, se almacenó el bloque en la cámara de curado (ver figura 26).

Figura 26. **Obtención del BTC y almacenaje**



(a) Obtención del BTC



(b) Almacenaje

Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

## 5.2. Elaboración de bloques con aglomerante ternario

En la elaboración de los bloques para prismas de compresión y tensión diagonal, se utilizó puzolana como agregado grueso, limo como agregado fino y la combinación cal-puzolana molida-cemento como aglomerante. La puzolana fue pasada por el tamiz de 3/8 plg y por el tamiz núm. 30; del material que pasó el tamiz núm. 30 se utilizó el 30 %. La proporción utilizada se presenta en la tabla siguiente:

Tabla IV. **Distribución de material en porcentaje para un BTC con aglomerante ternario**

<b>Material</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Total</b>	
Puzolana (agregado grueso)	75 %	100 %	Agregados
Limo (agregado fino)	25 %		
Puzolana molida	80 %	10 %	Aglomerante
Cal	20 %		
Cemento UGC	5 %		

Fuente: elaboración propia.

### 5.2.1. Elaboración de bloques para prismas de compresión y tensión diagonal

Primero se mezcló la puzolana retenida en el tamiz núm. 30 con el 30 % de la puzolana que pasó dicho tamiz (ver figura 27).

Figura 27. **Puzolana sin finos y puzolana con finos**



(a) Sin finos

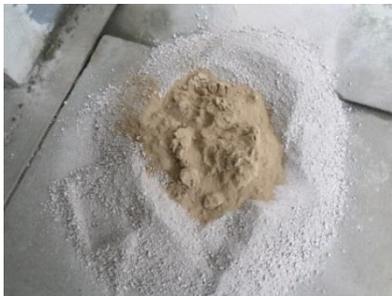


(b) Con finos

Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Se agregó limo a la puzolana y después de mezclar ambos materiales hasta tener un material homogéneo, se agregó la mezcla de cal-puzolana molida-cemento o aglomerante ternario (figura 28).

Figura 28. **Agregado de limo y aglomerante ternario**



(a) Limo



(b) Aglomerante ternario

Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Al tener los materiales debidamente mezclados, se agregó agua hasta obtener una mezcla con una humedad óptima; una tanda de material para 7 bloques necesitó de aproximadamente 9 lts (ver figura 29).

**Figura 29. Aplicación de agua y material húmedo**



(a) Aplicación de agua



(b) Material húmedo

Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Se colocó el material dentro de la máquina, teniendo cuidado de distribuirlo uniformemente en todo el espacio designado para el material. Se aplicó la carga y se procedió a retirar el bloque (ver figura 30).

**Figura 30. Colocación de material y obtención del BTC**



(a) Colocación de material



(b) Obtención del BTC

Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Los bloques se curaron en una cámara de curado durante 14 días, manteniendo la humedad de los mismos. Dicha cámara alcanza una

temperatura máxima de 43 °C y una mínima de 22 °C en época seca; en época lluviosa la temperatura máxima es de 28 °C y la mínima de 18 °C.

**Figura 31. Traslado y almacenamiento de BTC**



(a) Traslado



(b) Almacenaje

Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

**5.2.2. Tipos de bloques elaborados**

Se contó con moldes especiales para elaborar diferentes tipos de bloques, los cuales fueron utilizados para elaborar los prismas tanto de compresión como de corte. Los tipos de bloques se muestran a continuación:

**Figura 32. BTC tipo 1 y 2**



(a) Tipo 1



(b) Tipo 2

Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 33. **BTC en “U” completo y en “U” con tope**



(a) "U" completo



(b) "U" con tope

Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 34. **BTC en mitades y en mitades en “U”**



(a) Mitades



(b) Mitades en “U”

Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

### 5.3. **Elaboración de prismas**

A continuación se describe el proceso de elaboración de los dos prismas.

#### 5.3.1. **Prismas de compresión**

Se elaboraron 3 prismas de una altura de 0,30 m y una longitud de 0,30 m. Para rellenar los agujeros se utilizó una lechada fina con una parte de aglomerante y dos de agregado fino. El aglomerante se conformó por 80 % de

puzolana molida y 20 % de cal; mientras que el agregado fino utilizado en la lechada fue puzolana que pasó por el tamiz núm. 30 (ver figura 35).

Figura 35. **Preparación de mezcla, levantado de prismas y prismas completados**



(a) Preparación de mezcla



(b) Levantado de prismas



(c) Prismas completados

Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

### 5.3.2. Prismas de tensión diagonal

Se elaboraron 3 prismas de una altura de 0,60 m y una longitud de 0,60 m. Para rellenar los agujeros se utilizó una lechada fina con una parte de aglomerante y dos de agregado fino. El aglomerante se conformó por 80 % de puzolana molida y 20 % de cal; el agregado fino utilizado en la lechada fue puzolana que pasó por el tamiz núm. 30. También se colocó refuerzo en cada

uno de los prismas, siendo hierro núm. 2 (1/4 plg) colocado en forma de marco (ver figura 36).

Figura 36. **Fundición de base del marco, levantado de prisma y prisma terminado**



(a) Fundición de marco



(b) Levantado de prisma



(c) Levantado de prisma



(d) Prisma terminado

Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.



## 6. RESULTADOS

### 6.1. Ensayos a BTC con aglomerante natural

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados a los bloques tipo A y tipo B, así como a los prismas elaborados con BTC.

#### 6.1.1. Ensayo de compresión a BTC

Los bloques tuvieron un área bruta de 450 cm<sup>2</sup> y un área neta de 346.46 cm<sup>2</sup>. Se trabajó con el área neta, debido a que el bloque se ensayó a sección vacía.

Tabla V. Resultados ensayo a compresión de unidades tipo A

Núm.	Carga (kg)		Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )		Esfuerzo (MPa)		Estado
	1era. grieta	Última	1era. grieta	Último	1era. grieta	Último	
1	600,0	1 600,0	1,73	4,62	0,17	0,45	Reprobado
2	540,0	1 740,0	1,56	5,02	0,15	0,49	Reprobado
3	400,0	1 880,0	1,15	5,43	0,11	0,53	Reprobado
Promedio	513,3	1 740,0	1,48	5,02	0,15	0,49	Reprobado

Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Primera grieta y carga última BTC tipo A**



(a) Primera grieta



(b) Carga última

Fuente: antiguo edificio del Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Tabla VI. **Resultados ensayo a compresión de unidades tipo B**

Núm.	Carga (kg)		Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )		Esfuerzo (MPa)		Estado
	1era. grieta	Última	1era. grieta	Último	1era. grieta	Último	
1	700,0	3 660,0	2,02	10,56	0,20	1,04	Aprobado
2	400,0	2 700,0	1,15	7,79	0,11	0,76	Reprobado
3	900,0	2 640,0	2,60	7,62	0,25	0,75	Reprobado
Promedio	666,7	3 000,0	1,92	8,66	0,19	0,85	Reprobado

Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Primera grieta y carga última BTC tipo B**



(a) Primera grieta



(b) Carga última

Fuente: antiguo edificio del Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

### 6.1.2. Ensayo de erosión acelerada Swinburne a BTC

Para los bloques con 20 % de limo, los resultados fueron los siguientes:

Tabla VII. **Resultados ensayo de erosión a BTC tipo A**

Núm.	Profundidad (cm)	Tiempo (s)	Observaciones	Estado
1	1	3	Se detuvo el ensayo a los 19 s	No apto
2	1	5	Se detuvo el ensayo a los 17 s	No apto

Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Resultado ensayo a BTC tipo A**



Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Tabla VIII. **Resultados ensayo de erosión a BTC tipo B**

Núm.	Profundidad (cm)	Tiempo (s)	Observaciones	Estado
1	0,8	34	Se detuvo el ensayo	No apto
	1,5	115		No apto
2	1	13	Se detuvo el ensayo	No apto
	1,7	90		No apto

Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Resultado ensayo a BTC tipo B**



Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

### 6.1.3. **Ensayo de capilaridad a BTC**

Se realizaron ensayos a los BTC con 20 % de limo plástico y con 25 % de limo plástico.

Figura 41. **Ensayo de capilaridad a BTC tipo A**



Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Tabla IX. **Resultados ensayo de capilaridad a BTC tipo A**

Núm.	Peso seco (kg)	Peso húmedo (kg)	Ancho (mm)	Largo (mm)	A. bruta (m <sup>2</sup> )	H. agua (cm)	T (min)	C. promedio
1	4,798	5,101	145	290	0,04205	2,5	0,33	7,61
						3,5	0,75	
						3,5	0,95	
						4,5	1,83	
						5	2,58	
2	4,458	4,808	147	298	0,043806	1	0,05	17,90
						1,5	0,12	
						2	0,18	
						2,5	0,4	
						3	0,67	
3	4,707	4,973	148	298	0,044104	1	0,05	13,51
						1,5	0,1	
						2	0,23	
						2,5	0,38	
						3	0,75	
					3,5	1,12		

Fuente: elaboración propia.

El coeficiente de absorción promedio es de 13.

Figura 42. **Ensayo de capilaridad a BTC tipo B**



Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Tabla X. **Resultados ensayo de capilaridad a BTC tipo B**

Núm.	Peso seco (kg)	Peso húmedo (kg)	Ancho (mm)	A. bruta (m <sup>2</sup> )	H. agua (cm)	T (min)	C. promedio
1	5,09	5,322	148	0,044104	2	0,2	6,99
					2,5	0,58	
					3	1,13	
					3,5	1,47	
2	5,283	5,562	148	0,043956	0,5	0,08	11,52
					1	0,17	
					1,5	0,6	
					2	1,03	
					2,5	1,42	
3	5,005	5,19	148	0,044104	1	0,07	7,04
					1,5	0,3	
					2	0,77	
					2,5	1,2	
					2,6	1,88	

Fuente: elaboración propia.

El coeficiente de absorción promedio es de 8,52.

Ambos ensayos se detuvieron antes del tiempo designado de duración, debido a que se presentó desprendimiento de material, hinchamiento en los laterales y eflorescencia en la parte que estuvo en contacto con el agua, como se observa en la figura 42.

## 6.2. **Ensayo de compresión a BTC con aglomerante ternario**

A continuación se describe el ensayo a compresión realizado a los BTC con aglomerante ternario.

### 6.2.1. Ensayo de compresión a BTC

Los bloques tienen un área bruta de 450 cm<sup>2</sup> y un área neta de 346.46 cm<sup>2</sup>. Se trabajó con el área neta, debido a que el bloque se ensayó a sección vacía.

Tabla XI. Resultados ensayo a compresión de unidades

Núm.	Carga (kg)		Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )		Esfuerzo (MPa)		Estado
	1era. Grieta	Última	1era. grieta	Último	1era. grieta	Último	
1	1 590,9	2 545,5	3,54	5,66	0,35	0,55	Reprobado
2	1 818,2	2 363,6	4,04	5,25	0,40	0,52	Reprobado
Promedio	1 705,0	2 454,5	3,79	5,45	0,37	0,54	Reprobado

Fuente: elaboración propia.

Figura 43. Primera grieta y carga última



(a) Primera grieta



(b) Carga última

Fuente: nuevo edificio del Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Con base en los datos obtenidos, se determinó la carga esperada para los prismas de compresión, tomando en cuenta que la relación altura/espesor de los prismas es de 2, y que el factor a utilizar es de 1 (ver tabla XIV). Sin

embargo se decidió usar un factor de 0,95 debido a que los prismas serían ensayados a sección llena.

El valor de carga obtenido fue:

$$F = 5,45 \frac{kg}{cm^2} \times 450 \text{ cm}^2 \times 0,95 = 2\,329,9 \text{ kg}$$

Se esperaba que los prismas soportaran una carga última de 2 329,9 kg a pesar de haber sido reprobados.

### 6.2.2. Ensayo de erosión acelerada Swinburne a BTC con aglomerante ternario

A continuación se muestran los resultados obtenidos del ensayo de erosión acelerada.

Tabla XII. Resultados ensayo erosión acelerada

Núm.	Profundidad (cm)	Tiempo (s)	Observaciones	Estado
1	0	300	El ensayo se completó obteniendo buenos resultados.	Apto
	0	600		
2	0	300	El ensayo se completó obteniendo buenos resultados.	Apto
	0	600		

Fuente: elaboración propia.

Figura 44. **Aplicación del agua y resultado**



(a) Aplicación de agua



(b) Resultado

Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

### 6.2.3. **Ensayo de capilaridad a BTC**

A continuación se muestran los resultados obtenidos del ensayo de capilaridad.

Tabla XIII. **Resultados ensayo de capilaridad**

Núm.	Peso seco (kg)	Peso húmedo (kg)	Ancho (mm)	Largo (mm)	A. bruta (m <sup>2</sup> )	H. agua (cm)	T (min)	C. promedio
1	5,779	5,873	145	290	0,04205	1,8	2	1,02
						2,1	4	
						2,4	6	
						2,7	8	
						3	10	
2	5,821	6,112	147	298	0,043806	2	2	3,04
						2,6	4	
						2,8	6	
						3	8	
						3,4	10	

Continuación de la tabla XIII

Núm.	Peso seco (kg)	Peso húmedo (kg)	Ancho (mm)	Largo (mm)	A. bruta (m <sup>2</sup> )	H. agua (cm)	T (min)	C. promedio
3	5,865	6,295	148	298	0,044104	1,8	2	4,46
						2,4	4	
						2,8	6	
						3,1	8	
						3,3	10	

Fuente: elaboración propia.

Por lo que el coeficiente de absorción promedio de los bloques es de 2,84.

Figura 45. **Inmersión parcial y resultado**



(a) Inmersión



(b) Resultado

Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

#### 6.2.4. **Ensayo de compresión a prismas**

Deben tomarse en cuenta los factores de corrección presentados en la tabla siguiente:

Tabla XIV. **Factores de corrección para resistencias de prismas con diferentes relaciones altura-espesor**

Prisms $h/t_p$ <sup>1</sup>	1.30	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00
Correction factor	0.75	0.86	1.00	1.04	1.07	1.15	1.22

<sup>1</sup> $h/t_p$ —ratio of prism height to least actual lateral dimension of prism.

Fuente: Unified Building Code 1997. p. 274.

Teniendo un área bruta de 450 cm<sup>2</sup>, equivalente a una área de 69,75 plg<sup>2</sup>.

Se calculó la esbeltez:

$$Esbeltez = \frac{Altura}{Espesor} = \frac{0,30}{0,15} = 2$$

Factor de corrección es  $c_m = 1$  según lo establecido en la tabla XIV; sin embargo, se tomó un factor de 0,95 debido a que el ensayo se realizó con los bloques a sección llena.

Tabla XV. **Resultados ensayo a compresión de prismas**

Núm.	Carga (kg)		Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )		Esfuerzo (MPa)	
	1era. Grieta	Última	1era. Grieta	Último	1era. grieta	Último
1	1 785,5	8 035,7	3,97	17,86	0,39	1,75
2	2 232,1	6 875,0	4,96	15,28	0,49	1,50
3	2 901,8	8 125,0	6,45	18,06	0,63	1,77
Promedio	2 306,5	7 678,6	5,13	17,06	0,50	1,67

Fuente: elaboración propia.

Calculando el esfuerzo especificado de compresión para cada prisma, se tiene:

$$f'_{m1} = 1,75 \times 0,95 = 1,66 \text{ MPa}$$

$$f'_{m2} = 1,50 \times 0,95 = 1,43 \text{ MPa}$$

$$f'_{m3} = 1,77 \times 0,95 = 1,68 \text{ MPa}$$

El esfuerzo de compresión para los prismas fue, entonces:

$$f'_{mt} = \frac{1,66 + 1,43 + 1,68}{3} = 1,59 \text{ MPa}$$

Se esperaba, con base en los datos obtenidos de los bloques individuales, que los prismas soportaran una carga última promedio de 2 329,9 kg; sin embargo, resistieron una carga última promedio de 7 678,6 kg, dando un margen de 3,3 veces la carga esperada.

Figura 46. **Colocación de prisma, aplicación de carga y falla en los laterales**



(a) Colocación de prisma



(b) Aplicación de carga

Continuación de la figura 46.



(c) Falla en los laterales

Fuente: nuevo edificio del Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

### 6.2.5. Ensayo de tensión diagonal (corte) a prismas

Se utilizó un prisma relleno de *grout*, por lo que la ecuación presentada en la norma Coguanor NTG 41051 h3 no se puede utilizar, ya que la misma establece que es para piezas sólidas o sin *grout*; además, por la geometría del BTC, este no necesita de sabieta de pegado. Debido a esto, el área utilizada fue la de los cilindros de *grout*, y el área de los rectángulos intermedios de *grout* de los BTC:

$$A_c = \left(\frac{\pi}{4}\right) \phi^2$$

$$A_c = \left(\frac{\pi}{4}\right) (10 \text{ cm})^2 = 78,54 \text{ cm}^2 \times 4 = 314,16 \text{ cm}^2$$

$$A_r = 2,5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 3 = 37,5 \text{ cm}^2$$

$$A_T = 37,5 \text{ cm}^2 + 314,16 \text{ cm}^2 = 351,66 \text{ cm}^2$$

Tabla XVI. **Resultados del ensayo a tensión diagonal de prismas**

Núm.	A (mm <sup>2</sup> )	A (cm <sup>2</sup> )	Carga (kg)		Carga (N)	
			Diseño	Último	Diseño	Último
1	35 166,0	351,66	661,8	865,45	6 492,3	8 490,1
2	35 166,0	351,66	661,8	712,70	6 492,3	6 991,6
3	35 166,0	351,66	661,8	661,8	6 492,3	6 492,3
Promedio	35 166,0	351,66	661,8	746,65	6 492,3	7 324,6

Fuente: elaboración propia.

El esfuerzo de diseño de corte para los prismas fue:

$$\tau_d = \frac{6\,492,3\text{ N}}{35\,166\text{ mm}^2} = 0,18\text{ MPa}$$

El esfuerzo último de corte para los prismas fue:

$$\tau_{u1} = \frac{8\,490,1\text{ N}}{35\,166\text{ mm}^2} = 0,24\text{ MPa}$$

$$\tau_{u2} = \frac{6\,991,6\text{ N}}{35\,166\text{ mm}^2} = 0,2\text{ MPa}$$

$$\tau_{u3} = \frac{6\,492,3\text{ N}}{35\,166\text{ mm}^2} = 0,18\text{ MPa}$$

De donde el promedio fue:

$$\bar{\tau}_u = \frac{0,24 + 0,2 + 0,18}{3} = 0,21\text{ MPa}$$

De lo anterior se determinó el factor de seguridad, siendo este:

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{\text{Esf. último}}{\text{Esf. de diseño}} = \frac{0,21 \text{ MPa}}{0,18 \text{ MPa}} = 1,17$$

Se estima que el esfuerzo de diseño es aproximadamente el 83 % del esfuerzo último.

Figura 47. **Ensayo a tensión diagonal de prismas**



(a) Colocación gato hidráulico



(b) Colocación de deformómetros



(c) Toma de datos



(d) Separación de bloques



(e) Falla del prisma

Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

La primera grieta se presentó en todos los prismas, al llegar a la carga de 203,64 kg.

Sacando la relación entre el esfuerzo último de compresión y el esfuerzo último de corte de los prismas, se obtuvo:

$$\frac{\text{Esf. de compresión}}{\text{Esf. de corte}} = \frac{1,59 \text{ MPa}}{0,21 \text{ MPa}} = 7,6$$

## 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 7.1. Bloques con aglomerante natural

La norma UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”, establece que la resistencia mínima a la compresión de los bloques es la mostrada en la tabla I; sin embargo, permite que los resultados sean como mínimo un 80 % de esa resistencia. Los BTC tipo A no alcanzaron el mínimo, y únicamente uno de los BTC tipo B alcanzó ese mínimo, a pesar de que sus resultados fueron mayores a los del tipo A.

En el ensayo de capilaridad, tanto los bloques tipo A como los tipo B presentaron desprendimiento de material, hinchamiento y eflorescencia, haciendo que el ensayo se suspendiera antes del tiempo establecido. De igual manera, el ensayo de erosión acelerada se suspendió antes de tiempo debido a que los BTC superaron el límite establecido por la norma para la oquedad provocada por la acción del agua.

Se decidió utilizar la proporción de los BTC tipo B por haber presentado mejores resultados, pero utilizando el limo como agregado fino y como aglomerante, la mezcla de cemento-cal-puzolana molida, formando así un aglomerante ternario. El aglomerante se conformó de 5 % de cemento UGC y 10 % de la mezcla de cal-puzolana molida en una proporción de 20 % de cal y 80 % de puzolana molida.

## 7.2. Bloques con aglomerante ternario

Con base en los resultados obtenidos por los BTC se determinó que el limo, a pesar de tener una alta plasticidad, no permite un comportamiento adecuado de los bloques al estar bajo fuerzas compresivas. Esto se observa en los resultados del ensayo a compresión de las unidades, ya que ninguno alcanzó la resistencia mínima a compresión. La falla presentada por los bloques en el ensayo de compresión es una falla por aplastamiento, generada por la acción parcial del efecto de dovela (ver figura 48b).

Figura 48. **Falla real y trazo de curvatura**



(a) Falla real



(b) Trazo de curvatura

Fuente: nuevo edificio del Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Los ensayos de erosión acelerada y capilaridad permitieron determinar que los bloques presentan un buen comportamiento ante la presencia de agua, tomando en cuenta que la arcilla los haría aún más resistentes, ya que en el ensayo de erosión acelerada, los bloques no presentaron ninguna oquedad provocada por la acción del chorro de agua; mientras que en el ensayo de capilaridad, la absorción del agua fue bastante rápida al inicio y luego se estabilizó, al punto de no aumentar más.

De los resultados del ensayo a compresión de los prismas se observa que, la primera grieta del prisma corresponde aproximadamente a la falla del bloque individual ( $2\,306,5\text{ kg} \approx 2\,454,5\text{ kg}$ , respectivamente), esto debido a la formación del efecto de dovela.

La relación altura-ancho del prisma permite la formación de la curvatura (ver figura 49b), la cual alcanza aproximadamente la mitad del bloque superior, lo que permite absorber más energía, dando como resultado que los prismas soportaran  $7\,678,6\text{ kg}$  en lugar de  $2\,329,9\text{ kg}$  como se esperaba, proveyendo un margen de 3,3 veces la carga esperada.

Figura 49. **Efecto de dovela en prisma**



(a) Real



(b) Trazo de curvatura

Fuente: nuevo edificio del Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Debe tomarse en cuenta que el ensayo de los prismas fue a sección llena, por lo que el *grout* utilizado para rellenar los agujeros de los bloques también opuso resistencia a la compresión; sin embargo, no tuvo una adecuada adherencia a los mismos (ver figura 50).

Figura 50. **Falla del *grout***



Fuente: nuevo edificio del Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

En la figura 51 se puede observar la forma de falla del prisma, siendo esta una separación de pared externa de la unidad, según lo indicado en la norma NTG 41051h2, figura 4, modo de falla núm. 7; esta falla es debida al efecto de Poisson, provocando ensanchamiento lateral y desprendimiento.

Figura 51. **Falla de prisma a compresión**



(a) Frontal



(b) Lateral

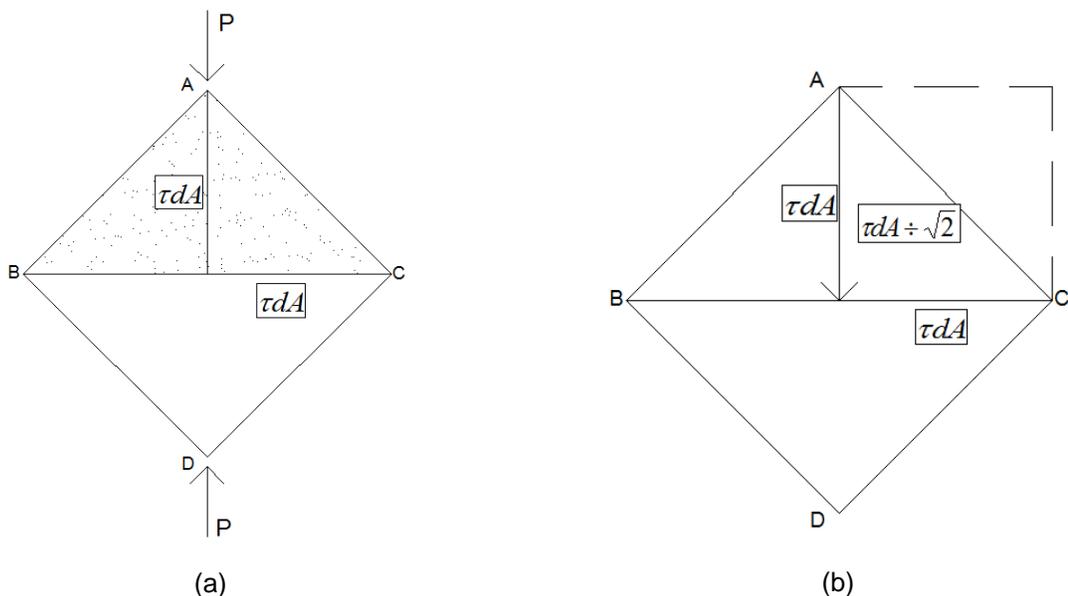
Fuente: nuevo edificio Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

En el ensayo a tensión diagonal de prismas, las primeras grietas aparecieron en los extremos superior e inferior.

Según la aplicación de la carga, se necesitó de la transformación de esfuerzos para poder analizar el esfuerzo normal que provocaba corte en el prisma. El enunciado de transformación de esfuerzos establece que “un esfuerzo cortante puro en un punto puede ser representado alternativamente por los esfuerzos normales a  $45^\circ$  con las direcciones de los esfuerzos cortantes”.

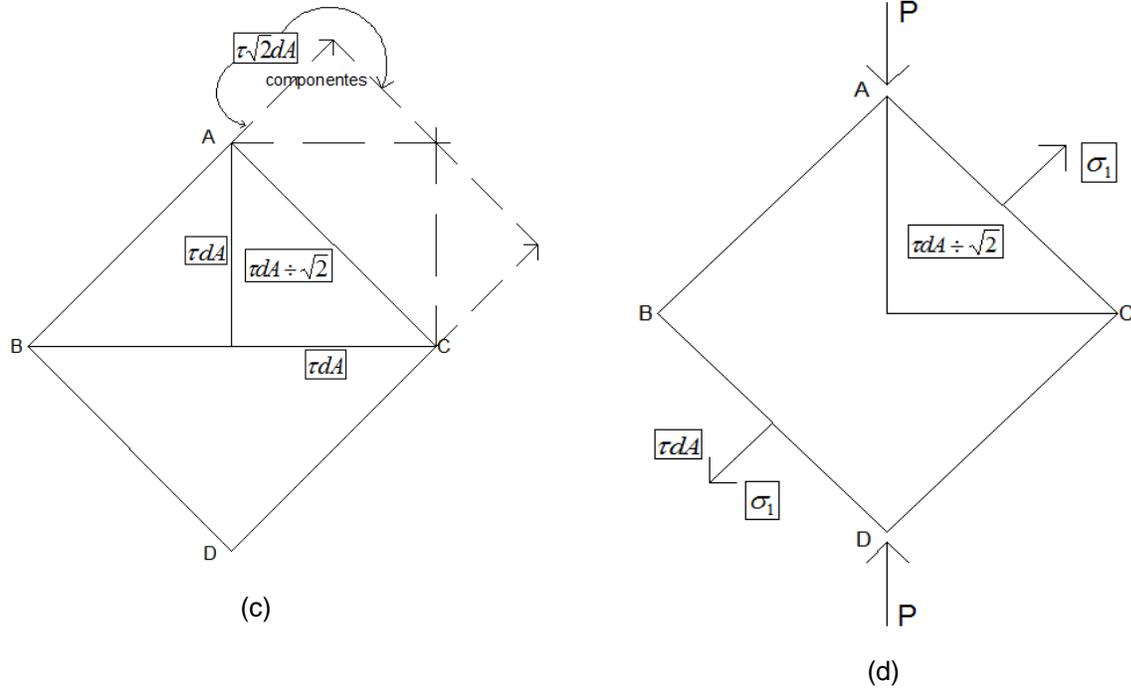
En el caso de este ensayo, la carga se aplicó en una de las esquinas de los prismas, pero la transformación de esfuerzos pudo aplicarse debido a que los prismas se consideraron como elementos isótropicos, sabiendo que la transformación de esfuerzos es aplicable únicamente a este tipo de elementos. De esta forma, permitió que  $\tau = \sigma_1$  como lo muestra la figura 52.

Figura 52. **Diagrama de transformación de esfuerzos**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Continuación de la figura 52.



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Según lo antes mencionado, se observa que la acción del esfuerzo normal  $\sigma_1$  sobre la línea AC, provoca la separación o grieta que se observa en el bloque mostrado en la figura 53.

Figura 53. **Aparición de primera grieta**



Fuente: Área de Prefabricados, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Los prismas sufrieron una deformación a lo largo de sus ejes horizontal y vertical, debido a la aplicación de carga, haciendo que las unidades de BTC se separaran; lo único que mantuvo confinados a los bloques fue el acero de refuerzo, el cual empezó a trabajar al momento que los BTC que conformaban los prismas cedieron.

La primera grieta se presentó en todos los prismas, al llegar a la carga de 203,64 kg, mostrando que esa fue la máxima carga que soportan los BTC a través del *grout* utilizado; después de eso, quien resistió la fuerza de corte fue el acero de refuerzo.

De la relación entre los prismas de corte y compresión, se tiene que el esfuerzo de compresión debe ser mayor o igual a 4 veces el esfuerzo de corte, por consiguiente se estimó la capacidad del prisma a corte de la siguiente manera:

$$\frac{\text{Esf. de compresión}}{\text{Esf. de corte}} \geq 4 \Rightarrow \text{Esf. de corte} = \frac{\text{Esf. de compresión}}{4}$$

$$\text{Esf. de corte} = \frac{1,59 \text{ MPa}}{4} \Rightarrow \text{Esf. de corte} = 0,4 \text{ MPa}$$

De donde se observa que la capacidad a corte del prisma no es la esperada, pues es aproximadamente la mitad de la capacidad esperada:

$$0,21 \text{ MPa} < 0.4 \text{ MPa}$$



## CONCLUSIONES

1. Los bloques de tierra compactada (BTC) elaborados con puzolana y limo como agregados y cemento ternario (cal-cemento-puzolana molida) como aglomerante, son aptos para estar en contacto con el agua; sin embargo, su comportamiento ante fuerzas compresivas no es el mínimo. Por tal motivo, los bloques elaborados con dicha proporción y materiales no son aptos para utilizarse en mampostería.
2. La capacidad a compresión de los prismas, a pesar de no estar elaborados con bloques que estuvieran con lo mínimo establecido por la norma, resultó mayor a la esperada (3,3 veces mayor). Esto es debido al efecto de dovela que sí se logra formar en los prismas gracias a su relación ancho-altura, lo que permite absorber mayor cantidad de energía que los bloques individuales.
3. La resistencia a corte de los prismas cumple con ser menor a la resistencia a compresión; sin embargo, es la mitad de la resistencia esperada, lo cual indica que los bloques son débiles ante las fuerzas de corte, aun en presencia de acero de refuerzo. Esto es debido a que, por su geometría, no requieren de mortero para pegarse entre sí, lo que hizo que el *grout* y el acero de refuerzo resistieran la acción de las fuerzas de corte.



## RECOMENDACIONES

1. Elaborar BTC utilizando arcilla y aglomerante ternario, para determinar si la presencia de la misma afectará en forma positiva el comportamiento de los BTC ante presencia de agua y bajo fuerzas compresivas, debido al comportamiento laminar de la arcilla, que la hace tener mejor cohesión con los otros materiales.
2. Evaluar el comportamiento de los nuevos BTC en prismas de compresión y de corte, utilizando acero de refuerzo para los prismas de corte y comparar los resultados con los obtenidos en este trabajo.
3. Realizar un ensayo de tracción a los BTC, con el objetivo de determinar la resistencia a tracción de la clavija del BTC.



## BIBLIOGRAFÍA

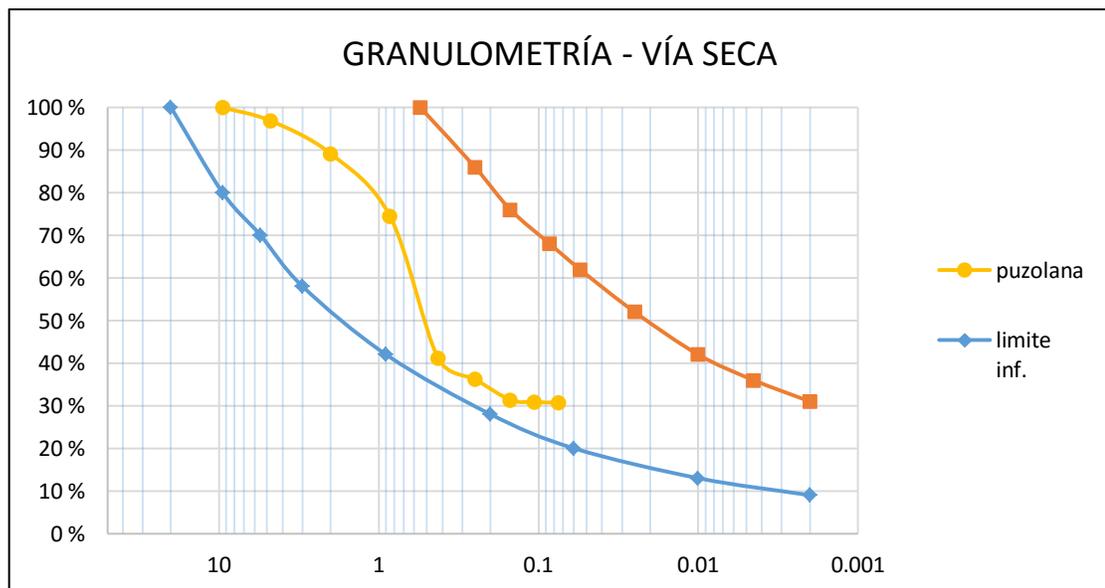
1. CHUPINA DE LEÓN, Alejandra Margarita. *Estudio comparativo entre las técnicas más utilizadas para la caracterización de arcillas y su aplicación industrial en la fabricación de ladrillos*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006. 123 p.
2. CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. 5a. edición. México: Limusa, 2005. 650 p.
3. GARRIDO LÓPEZ, Juan Carlos. *Manual práctico sobre ensayos de laboratorio y análisis de campo de materiales de construcción básicos para una correcta supervisión*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1997. 86 p.
4. JUÁREZ BADILLO, Eulalio. *Mecánica de suelos. Tomo 1*. 3a. ed. México: Limusa, 2005. 644 p.
5. HERNÁNDEZ CANALES, Juan Carlos. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 510 p.
6. MINKE, Gernot. *Manual de construcción en tierra*. Uruguay: Nordan Comunidad, 2001. 222 p.

7. NEVES, Célia; FARIA, Obede Borges. *Técnicas de construcción con tierra*. Bauru, SP: FEB-UNESP/PROTERRA, 2011. 79 p.
8. OCHOA MARROQUÍN, Luis Alfredo. *Caracterización geológica y física de 8 muestras de puzolanas de origen volcánico de la región de occidente de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 166 p.
9. POPOV, Egor P.; BALAN, Toader A. *Mecánica de sólidos*. 2a. ed. México: Pearson Education, 2000. 888 p.
10. WHEELER, Geoffrey. *Interlocking compressed earth blocks. Volume II. Manual of construction*. Germany: Center for Vocational Building Technology, 2005. 43 p.
11. WHITLOW, Roy. *Fundamentos de mecánica de suelos*. 2a. ed. México: CECSA, 1994. 589 p.

# APÉNDICES

Apéndice 1. **Granulometría de puzolana**

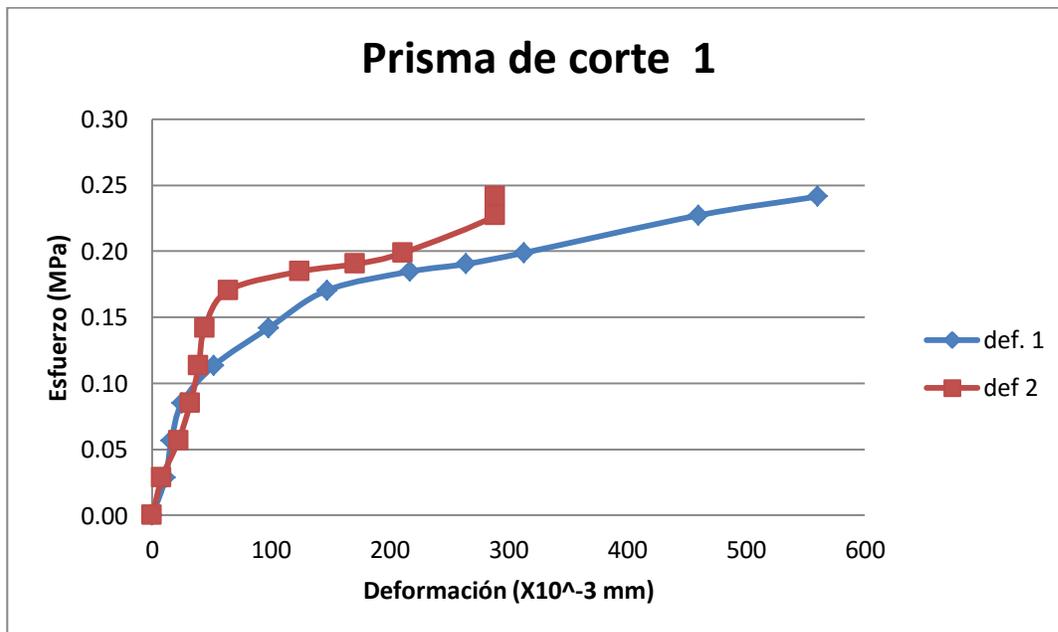
Tamiz	Puzolana		Límite inferior		Límite superior		
	Porcentaje	Abertura	Porcentaje	Abertura	Porcentaje	Abertura	
3/8 "	100	9,5	100	20	100	0,55	Gruesos
4	96,86	4,75	80	9,5	86	0,25	
10	89,15	2	70	5,5	76	0,15	
20	74,44	0,85	58	3	68	0,085	Arenas
40	41,16	0,425	42	0,9	62	0,055	Finos
60	36,22	0,25	28	0,2	52	0,025	
100	31,37	0,15	20	0,06	42	0,01	
140	30,85	0,106	13	0,01	36	0,0045	
200	30,74	0,075	9	0,002	31	0,002	



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Gráfica esfuerzo-deformación de prisma de corte 1**

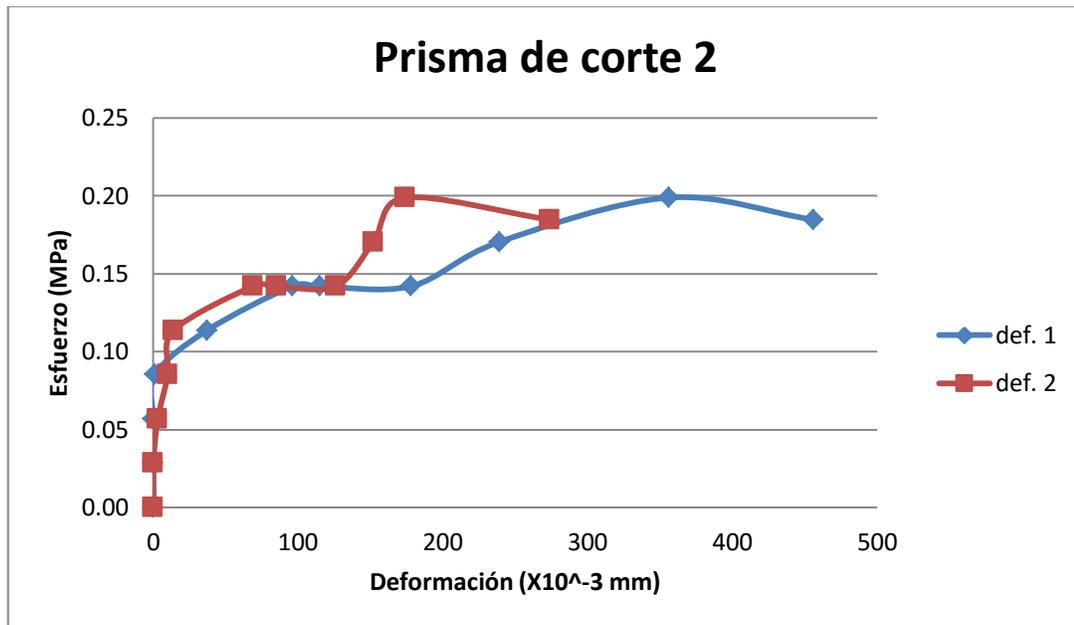
PRISMA 1						
Carga (MPa)	Lectura ini. 1	Lectura ini. 2	Def. 1	Def. 2	Defor. 1	Defor. 2
0,00	1,106	0,139	0,005	0,000	0	0
0,03	1,111	0,139	0,016	0,008	11	8
0,06	1,122	0,147	0,021	0,022	16	22
0,09	1,127	0,161	0,030	0,032	25	32
0,11	1,136	0,171	0,057	0,039	52	39
0,14	1,163	0,178	0,103	0,044	98	44
0,17	1,209	0,183	0,152	0,064	147	64
0,18	1,258	0,203	0,223	0,124	217	124
0,19	1,329	0,263	0,269	0,171	264	171
0,20	1,375	0,310	0,318	0,211	313	211
0,23	1,424	0,350	0,465	0,289	460	289
0,24	1,571	0,428	0,565	0,289	560	289



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Gráfica esfuerzo-deformación de prisma de corte 2**

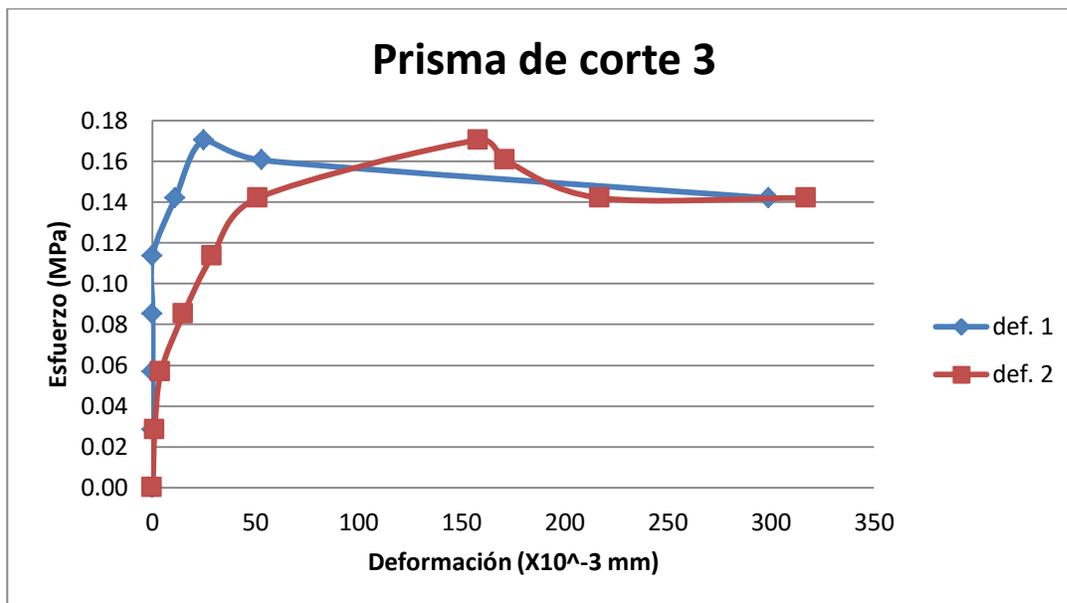
PRISMA 2						
Carga (MPa)	Lectura ini. 1	Lectura ini. 2	Def. 1	Def. 2	Defor. 1	Defor. 2
0,00	1,162	0,158	0,023	0,023	0	0
0,03	1,185	0,181	0,023	0,023	0	0
0,06	1,185	0,181	0,023	0,026	0	3
0,09	1,185	0,184	0,024	0,033	1	10
0,11	1,186	0,191	0,060	0,037	37	14
0,14	1,222	0,195	0,119	0,092	96	69
0,14	1,281	0,250	0,138	0,108	115	85
0,14	1,300	0,266	0,201	0,149	178	126
0,17	1,363	0,307	0,262	0,175	239	152
0,20	1,424	0,333	0,379	0,197	356	174
0,18	1,541	0,355	0,479	0,297	456	274



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Gráfica esfuerzo-deformación de prisma de corte 3**

PRISMA 3						
Carga (MPa)	Lectura ini. 1	Lectura ini. 2	Def. 1	Def. 2	Defor. 1	Defor. 2
0,00	0,686	0,133	0,000	0,000	0	0
0,03	0,686	0,133	0,000	0,001	0	1
0,06	0,686	0,134	0,000	0,004	0	4
0,09	0,686	0,137	0,000	0,015	0	15
0,11	0,686	0,148	0,000	0,029	0	29
0,14	0,686	0,162	0,011	0,051	11	51
0,17	0,697	0,184	0,025	0,158	25	158
0,16	0,711	0,291	0,053	0,171	53	171
0,14	0,739	0,304	0,299	0,217	299	217
0,14	0,985	0,350	0,299	0,317	299	317



Fuente: elaboración propia