



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

**BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA ESTABILIZADOS
CON AGLOMERANTE NATURAL CP**

Marvin Grover Alvarado Figueroa

Asesorado por el Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz

Guatemala, agosto de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA ESTABILIZADOS
CON AGLOMERANTE NATURAL CP**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

MARVIN GROVER ALVARADO FIGUEROA

ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, AGOSTO DE 2015

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. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
EXAMINADORA	Inga. María del Mar Girón Cordón
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel López Juárez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE NATURAL CP

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 6 de octubre de 2014.



Marvin Grover Alvarado Figueroa



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



Guatemala, 16 de julio de 2015

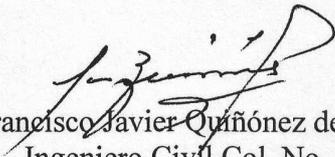
Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

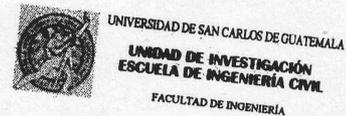
Señor Director:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación **“BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE NATURAL CP”**, desarrollado por el estudiante universitario **Marvin Grover Alvarado Figueroa**, quien contó con mi asesoría.

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

Atentamente,


Francisco Javier Quiñón de la Cruz
Ingeniero Civil Col. No. 1941



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



Guatemala, 22 de julio de 2015

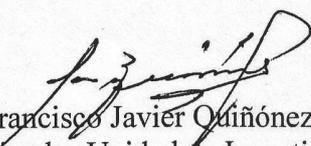
Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

Señor Director:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación **“BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE NATURAL CP”**, desarrollado por el estudiante universitario **Marvin Grover Alvarado Figueroa**, quien contó con mi asesoría.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante **Alvarado Figueroa**, 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





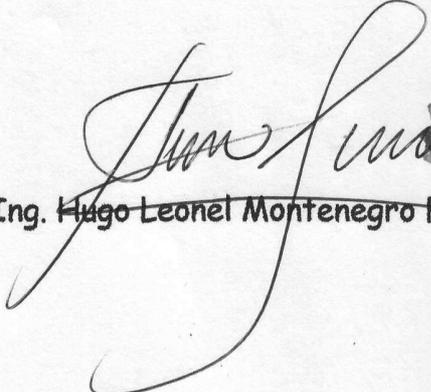
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<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, al trabajo de graduación del estudiante Marvin Grover Alvarado Figueroa, titulado **BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE NATURAL CP**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Francisco



Guatemala, agosto 2015

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.410.2015

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: **BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE NATURAL CP**, presentado por el estudiante universitario: **Marvin Grover Alvarado Figueroa**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, agosto de 2015

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Marvin Evenildo Alvarado Espinoza y María Esther Figueroa Carrera, por su amor, confianza e incondicional apoyo en mi vida.

Mis hermanos

Edgar Fernando y Hugo Ahmad Alvarado Figueroa, que este éxito alcanzado, sea una muestra de que con esfuerzo, dedicación y perseverancia se pueden alcanzar los sueños. Y a Myra Lily Huevo Martínez, por el apoyo incondicional en el desarrollo de este trabajo de graduación y hacia mi familia.

A las familias

Alvarado y Figueroa, por el apoyo otorgado.

AGRADECIMIENTOS A:

- | | |
|--|--|
| Dios | Por proveerme entendimiento, fe, fortaleza y sabiduría en mi vida y por su voluntad que me ha permitido alcanzar este éxito. |
| Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala | Por ser mi casa de formación académica y profesional. |
| Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz | Por la humildad en sus enseñanzas y conocimientos transmitidos; por la oportunidad, confianza y apoyo incondicional otorgado en la realización de este trabajo de graduación y por ser un ejemplo de excelencia profesional. |
| Ing. Edgar Mariano Alfredo Lemus | Por proporcionar el equipo utilizado en la elaboración de los bloques de tierra compactada, cuyo apoyo fue primordial en el desarrollo de este trabajo de graduación. |
| Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila | Por inculcar una educación holística en mi vida, por enseñarme la eficiencia y eficacia que debe caracterizar a un profesional, por la transmisión de sus enseñanzas y conocimientos espirituales. |

**Doctor Edgar Virgilio
Ayala Zapata**

Por inculcarme el coraje que debo tener para cumplir con mis metas y la importancia de una constante educación en la vida, y por la transmisión de sus conocimientos filosóficos.

Señor Fabio Sánchez

Por compartir sus conocimientos y consejos, por brindarme su amistad y apoyo desinteresado en el desarrollo de este trabajo de graduación.

**Doctor Jose María
Manzó Balbuena**

Por compartir sus conocimientos y apoyo en el desarrollo de este trabajo de graduación.

A mis amigos

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIV
GLOSARIO	XVI
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXV
1. CONSTRUCCIÓN CON TIERRA.....	1
1.1. La historia de la construcción con tierra	1
1.2. La tierra como material de construcción	2
1.2.1. Ventajas.....	3
1.2.2. Desventajas	4
1.3. Propiedades de la tierra como material de construcción	4
1.3.1. Composición	4
1.3.1.1. Componentes	5
1.3.1.2. Distribución granulométrica	5
1.3.1.3. Agua	6
1.3.1.4. Porosidad.....	6
1.3.1.5. Superficie específica.....	7
1.3.1.6. Densidad	7
1.3.1.7. Compactibilidad	7
1.3.2. Ensayos para analizar la composición del material tierra	7
1.3.2.1. Ensayos estandarizados de laboratorio.....	8

	1.3.2.1.1.	Granulometría	8
	1.3.2.1.2.	Límites de Atterberg	9
	1.3.2.1.3.	Compactación Proctor	9
	1.3.2.2.	Ensayos de campo	10
	1.3.2.2.1.	Dilatancia	10
	1.3.2.2.2.	Tenacidad	11
	1.3.2.2.3.	Resistencia en estado seco	11
	1.3.2.2.4.	Color	12
	1.3.2.2.5.	Olor	12
1.4.		Tecnología de construcción con tierra.....	12
2.		BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA	15
2.1.		Definición	15
2.2.		Arcilla	15
	2.2.1.	Clasificación	16
	2.2.2.	Propiedades	17
	2.2.2.1.	Plasticidad y capacidad aglomerante ..	17
	2.2.2.2.	Capacidad de endurecimiento al secarse.....	17
	2.2.2.3.	Contracción	18
	2.2.2.4.	Capacidad refractaria	18
2.3.		Estabilizantes utilizados en la elaboración de bloques de tierra compactada.....	18
	2.3.1.	Tipos de estabilizantes	19
	2.3.1.1.	Estabilizantes minerales.....	19
	2.3.1.2.	Estabilizantes vegetales	20
2.4.		Estabilización con cal	21
	2.4.1.	Acción de la cal en las arcillas.....	21

2.4.2.	Ciclo de la cal	22
3.	PUZOLANAS.....	27
3.1.	Generalidades	27
3.2.	Clasificación	28
3.2.1.	Según su origen.....	28
3.2.1.1.	Puzolanas naturales	29
3.2.1.2.	Puzolanas artificiales	30
3.2.2.	Según su comportamiento mecánico.....	30
3.3.	Aplicación de las puzolanas	31
3.4.	Las puzolanas en Guatemala	32
4.	AGLOMERANTE CAL PUZOLANA.....	37
4.1.	Historia del uso de la puzolana.....	37
4.2.	Las puzolanas como aglomerantes	38
4.3.	Aglomerante cal puzolana	41
4.3.1.	Especificaciones y control de calidad	42
4.3.1.1.	Humedad natural de las puzolanas	42
4.3.1.2.	Ensayo visual-táctil	43
4.3.2.	Proceso de producción	43
5.	MARCO EXPERIMENTAL	47
5.1.	Metodología.....	47
5.1.1.	Equipo utilizado en la preparación de los materiales que se utilizaron en la elaboración de los cubos con agregado y aglomerante de origen volcánico y los BTC	48
5.1.1.1.	Molino de bolas.....	48
5.1.1.2.	Molino de martillos.....	50

5.1.2.	Equipo utilizado en la elaboración y ensayo de los cubos elaborados con agregado y aglomerante de origen volcánico	52
5.1.2.1.	Balanza	53
5.1.2.2.	Moldes de acero.....	53
5.1.2.3.	Mezcladora.....	54
5.1.2.4.	Mesa de flujo	56
5.1.2.5.	Cámara de curado acelerado	57
5.1.2.6.	Máquina universal	58
5.1.3.	Equipo utilizado en la caracterización de los materiales utilizados en la elaboración de los BTC	59
5.1.3.1.	Copa de Casagrande	59
5.1.3.2.	Tamizadora y tamices	60
5.1.3.3.	Horno universal	61
5.1.4.	Equipo utilizado en la elaboración y ensayo de los BTC.....	62
5.1.4.1.	Balanza	62
5.1.4.2.	Prensa manual	63
5.1.4.3.	Termómetros	64
5.1.4.4.	Vernier.....	65
5.1.4.5.	Diseño y construcción del equipo utilizado en el ensayo de humectación/secado	66
5.1.4.6.	Diseño y construcción del equipo utilizado en el ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)	68

5.1.4.7.	Diseño y construcción del equipo utilizado en el ensayo de absorción de agua por capilaridad	71
5.1.4.8.	Diseño y construcción de la cámara de curado tipo invernadero	73
5.1.4.9.	Máquina universal.....	76
5.1.5.	Materiales	76
5.1.5.1.	Cemento tipo UGC	76
5.1.5.2.	Cal hidratada	77
5.1.5.3.	Material tierra.....	78
5.1.5.3.1.	Puzolana	78
5.1.5.3.2.	Limo.....	80
5.1.5.4.	Agua	80
5.1.6.	Caracterización de los materiales.....	81
5.1.6.1.	Granulometría.....	81
5.1.6.2.	Límites de Atterberg	81
5.1.7.	Mezclas de aglomerante natural cal puzolana y agregado de origen volcánico	82
5.1.7.1.	Elaboración de las mezclas	82
5.1.7.2.	Curado.....	88
5.1.7.3.	Ensayo.....	92
5.1.8.	Bloques de tierra compactada (BTC) estabilizados con aglomerante natural cal puzolana y los estabilizados con cemento tipo UGC.....	95
5.1.8.1.	Elaboración de los bloques.....	95
5.1.8.2.	Curado.....	101
5.1.8.3.	Ensayos.....	103
5.2.	Resultados.....	114

5.2.1.	Mezclas de aglomerante natural cal puzolana y agregado de origen volcánico.....	114
5.2.2.	Caracterización de los materiales	119
5.2.3.	Bloques de tierra compactada (BTC) estabilizados con aglomerante natural cal puzolana y los estabilizados con cemento tipo UGC.....	123
6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	147
6.1.	Mezclas de aglomerante natural cal puzolana y agregado de origen volcánico	147
6.2.	Caracterización de los materiales	148
6.3.	Bloques de tierra compactada (BTC) estabilizados con aglomerante natural cal puzolana y estabilizados con cemento tipo UGC.....	149
	CONCLUSIONES.....	153
	RECOMENDACIONES	155
	BIBLIOGRAFÍA.....	157
	APÉNDICES.....	159
	ANEXOS.....	197

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Disposición de material volcánico	35
2.	Molino de bolas, marca Patterson con 0,1 m ³ de capacidad.....	49
3.	Bolas utilizadas en la molienda de la puzolana	50
4.	Molino de martillos, fabricado por DEL KYRIOS, S. A. Industria Metalmecánica de Guatemala.....	51
5.	Cámara de trituración del molino de martillos	52
6.	Balanza mecánica de precisión, marca Ohaus, 2 610 g de capacidad y 0,1 g de precisión.....	53
7.	Moldes de acero, marca Forney.....	54
8.	Mezcladora marca Hobart N-50	55
9.	Mesa de flujo marca Humboldt 3620.....	56
10.	Cámara de curado acelerado, marca Humboldt H 1390	57
11.	Máquina universal, marca Baldwin Lima-Hamilton, modelo MA18	58
12.	Copa de Casagrande, marca Humboldt H-4226	59
13.	Batería de tamices, marca Humboldt	60
14.	Tamizadora mecánica, marca Humboldt-4330.....	61
15.	Horno universal, marca Humboldt H-30128	62
16.	Balanza de precisión Heavy Duty, marca Ohaus, 20 kg de capacidad y 0,1 g de precisión.....	63
17.	Prensa manual para la fabricación de BTC	64
18.	Termómetro de madera de -30 a 50 °C de capacidad	65
19.	Vernier con carátula, marca Mitutoyo.....	66

20.	Bandeja utilizada en el ensayo de humectación/secado.....	67
21.	Piezas de apoyo utilizadas en el ensayo de humectación/secado....	67
22.	Esquema del equipo utilizado en el ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)	68
23.	Equipo utilizado en el ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)	70
24.	Esquema del equipo utilizado en el ensayo de absorción de agua por capilaridad	72
25.	Equipo utilizado en el ensayo de absorción de agua por capilaridad ..	73
26.	Armazón de la cámara de curado tipo invernadero	74
27.	Forro de la cámara de curado tipo invernadero	75
28.	Cámara de curado tipo invernadero.....	75
29.	Bolsa de cemento tipo UGC, vista frontal y lateral.....	77
30.	Bolsa de cal hidratada Horcalsa	78
31.	Banco de material, Tecpán, Chimaltenango, Guatemala.....	79
32.	Puzolana molida	79
33.	Limo altamente plástico	80
34.	Mezclado del material en la mezcladora.....	85
35.	Colocación de la mezcla en la mesa de flujo	86
36.	Moldes llenos con la mezcla	87
37.	Curado a vapor	89
38.	Curado en inmersión en agua a 80 °C.....	89
39.	Cubos de las muestras sin curado.....	90
40.	Curado en agua a temperatura ambiente	92
41.	Ensayo a compresión en la máquina universal.....	94
42.	Falla a compresión luego del ensayo.....	94
43.	Mezclado del material para la fabricación de los BTC	97
44.	Peso del material para la fabricación de un BTC.....	98
45.	Colocación del material dentro del molde de la prensa manual.....	98

46.	Acomodo del material dentro del molde de la prensa manual.....	99
47.	Fabricación del BTC.....	99
48.	BTC fabricado	100
49.	Colocación de los BTC en una superficie plana	100
50.	Curado de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana dentro de la cámara de curado tipo invernadero	101
51.	Secado al ambiente de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC.....	102
52.	Bodega donde se guardaron los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana y los de cemento tipo UGC.....	103
53.	Ensayo a compresión de un BTC estabilizado con 5 % de aglomerante natural cal puzolana	106
54.	Falla del BTC estabilizado con 5 % de aglomerante natural cal puzolana luego del ensayo a compresión	106
55.	Ensayo de humectación/secado de un BTC estabilizado con 10 % de aglomerante natural cal puzolana	108
56.	Observación luego del ensayo de humectación/secado de un BTC estabilizado con 10 % de aglomerante natural cal puzolana.....	109
57.	Ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET) a los BTC estabilizados	110
58.	Oquedades producto del impacto del flujo de agua sobre la cara de los BTC estabilizados	111
59.	Medida de las oquedades, ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET).....	111
60.	Peso del BTC antes del ensayo de absorción de agua por capilaridad.....	113
61.	Ensayo de absorción de agua por capilaridad	114

62.	Esfuerzos de la mezcla 2 para media hora de curado respecto a la edad de ensayo de la muestra	115
63.	Esfuerzos de la mezcla 2 para una edad de 28 días respecto a distintos tiempos de curado.....	116
64.	Esfuerzos de la mezcla 3 respecto a la edad de ensayo de la muestra.....	117
65.	Esfuerzos de la mezcla 2 respecto a la edad de ensayo de la muestra.....	118
66.	Granulometría del material base, por lavado y por tamizado.....	121
67.	Clasificación del material utilizado como aglomerante natural.....	123

TABLAS

I.	Mezcla 1	83
II.	Mezcla 2	83
III.	Mezcla 3	84
IV.	Mezcla 4	84
V.	Cantidad de materiales para la elaboración de un BTC estabilizado...	96
VI.	Cantidad de materiales en porcentaje de aglomerante cal puzolana...	97
VII.	Velocidad de aplicación de la carga.....	105
VIII.	Clasificación de los BTC según su resistencia normalizada a compresión.....	105
IX.	Resistencia a la erosión. Criterios de aceptación o rechazo.....	110
X.	Esfuerzos de la mezcla 2 para media hora de curado respecto a la edad de ensayo de la muestra	115
XI.	Esfuerzos de la mezcla 2 para una edad de 28 días respecto a distintos tiempos de curado.....	116
XII.	Esfuerzos de la mezcla 3 respecto a la edad de ensayo de la muestra.....	117

XIII.	Esfuerzos de la mezcla 2 respecto a la edad de ensayo de la muestra	118
XIV.	Granulometría por lavado, 80 % puzolana y 20 % de limo.....	119
XV.	Granulometría por tamizado, 80 % puzolana y 20 % de limo.....	120
XVI.	Límites de Atterberg del aglomerante natural	122
XVII.	Nomenclatura utilizada para los BTC	124
XVIII.	Esfuerzos de primera grieta y ruptura de los BTC sin estabilizar ensayados a compresión	125
XIX.	Dimensiones de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana ensayados a compresión	126
XX.	Esfuerzos de primera grieta de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana ensayados a compresión.....	127
XXI.	Esfuerzos de ruptura de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana ensayados a compresión.....	128
XXII.	Datos estadísticos de los esfuerzos de ruptura respecto al área neta de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana	128
XXIII.	Valores de resistencias a compresión de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana	129
XXIV.	Dimensiones de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC ensayados a compresión	130
XXV.	Esfuerzos de primera grieta de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC ensayados a compresión	131
XXVI.	Esfuerzos de ruptura de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC ensayados a compresión.....	132
XXVII.	Datos estadísticos de los esfuerzos de ruptura respecto al área neta de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC	132
XXVIII.	Valores de resistencias a compresión de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC	133

XXIX.	Profundidad de las oquedades de los BTC sin estabilizar mediante el ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)	134
XXX.	Profundidad de las oquedades de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana mediante el ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)	135
XXXI.	Profundidad de las oquedades de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC mediante el ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)	135
XXXII.	Dimensiones de los BTC sin estabilizar, ensayo de absorción de agua por capilaridad	136
XXXIII.	Coefficientes de absorción de los BTC sin estabilizar, ensayo de absorción de agua por capilaridad	136
XXXIV.	Dimensiones de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana, ensayo de absorción de agua por capilaridad	137
XXXV.	Coefficientes de absorción de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana, ensayo de absorción de agua por capilaridad	138
XXXVI.	Datos estadísticos de los coeficientes de absorción de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana	138
XXXVII.	Valores de los coeficientes de absorción de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana	139
XXXVIII.	Dimensiones de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC, ensayo de absorción de agua por capilaridad	140
XXXIX.	Coefficientes de absorción de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC, ensayo de absorción de agua por capilaridad	141
XL.	Datos estadísticos de los coeficientes de absorción de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC	141
XLI.	Valores de los coeficientes de absorción de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC	142

XLII.	Condiciones de rechazo para los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana, ensayo humectación/secado	143
XLIII.	Condiciones de rechazo para los BTC estabilizados con cemento tipo UGC, ensayo humectación/secado.	144

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área bruta de aplicación de carga
A_s	Área bruta de contacto del BTC
P	Carga total máxima
cm	Centímetros
cm²	Centímetros cuadrados
cm³	Centímetros cúbicos
C_{w,s}	Coefficiente de absorción de agua por capilaridad
°C	Grados centígrados
g	Gramos
h	Horas
Kg	Kilogramo
m_{so,s}	Masa del BTC húmedo
MPa	Mega pascales
m	Metros
m²	Metros cuadrados
m³	Metros cúbicos
mm	Milímetros
mm²	Milímetros cuadrados
N	Newton
%	Porcentaje
σ	Resistencia de compresión
s	Segundos
tso	Tiempo de inmersión del BTC

GLOSARIO

Absorción	Atraer y retener un cuerpo, entre sus moléculas a otro en estado líquido o gaseoso.
ASTM	Siglas en inglés de American Society of Testing Materials. (Sociedad Americana para Ensayos en los Materiales).
Banco de material	Lugar donde se extraerá material para ser utilizado en una obra civil.
Capilaridad	Es una propiedad física del agua por la que ella puede avanzar a través de un canal minúsculo (desde unos milímetros hasta micras de tamaño) siempre y cuando el agua se encuentre en contacto con ambas paredes de este canal y estas paredes se encuentren suficientemente juntas.
Carencia	Falta o privación de algo.
Ceniza volante	Puzolana artificial, similar al polvo de cemento, subproducto de la combustión de carbón en polvo, en las plantas generadoras de electricidad.
<i>Clinker</i>	Principal componente del cemento Pórtland, el cemento más común y, por lo tanto, del concreto.

Coeficiente	Expresión numérica que mediante alguna fórmula determina las características o propiedades de un cuerpo.
Cohesión	Cualidad por la cual las partículas de un suelo se mantienen unidas en virtud de fuerzas internas.
Compactación	Aumento de la densidad del material que compone un suelo.
Densidad	Relación entre la masa y el volumen de una sustancia, o entre la masa de una sustancia y la masa de un volumen igual de otra sustancia tomada como patrón.
Desgaste	Pérdida de masa de la superficie de un material sólido por la interacción mecánica con otro cuerpo en contacto.
Eflorescencias	Cristales de sales, generalmente de color blanco, que se depositan en la superficie de los materiales.
Ensayo	Es un análisis de laboratorio de los materiales de construcción, para corroborar que cumplan con las especificación de las normas establecidas.
Erosión	Desgaste producido en la superficie de un cuerpo por el roce o frotamiento de otro.

Esfuerzo	Es la resistencia que ofrece un área unitaria para una carga aplicada externa, del material del que está hecho un miembro.
Hermético	Que cierra perfectamente de modo que no deja pasar el aire ni el líquido.
Ígneas	Son rocas que se forman cuando el magma se enfría y se solidifica.
<i>In situ</i>	Es una expresión latina que significa “en el sitio” o “en el lugar” y que suele utilizarse para designar un fenómeno observado en el lugar, o una manipulación realizada en el lugar.
Inmersión	Introducción completa de un cuerpo en un líquido.
Metamórficas	Son rocas que se forman a partir de otras rocas mediante un proceso en que quedan sometidas a altas presiones, altas o a un fluido activo que provoca cambios en la composición de la misma.
Mortero	Es una mezcla de aglomerantes, agregados y agua, y posibles aditivos que sirven para pegar elementos de construcción tales como ladrillos, piedras y bloques de hormigón.
Oquedad	Espacio hueco en el interior de un cuerpo sólido.

Pajilla	Tubo muy delgado, generalmente de plástico flexible, que sirve para beber líquidos, en especial refrescos, sorbiéndolos.
Polietileno	Plástico.
Tamiz	Es una malla elaborada con filamentos entrecruzados para formar un cedazo.
UNE	Siglas en español de normas españolas “Una Norma Española”.

RESUMEN

En este trabajo de investigación se evaluó la incidencia del aglomerante natural cal puzolana en las características físicas y propiedades mecánicas de los bloques elaborados con tierra compactada, atendiendo los requerimientos de la normativa española UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”; donde se indican los tipos de ensayos y el equipo necesario para la realización de los mismos.

La investigación se dividió en dos fases. Cada una de ellas conformada por una parte teórica y otra experimental. Las partes experimentales se realizaron en diversas secciones y laboratorios del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Se elaboraron bloques de tierra compactada sin estabilizar, estabilizados con aglomerante natural cal puzolana y otros estabilizados con cemento tipo UGC. De acuerdo con los ensayos realizados, con base en resultados de laboratorio, se verificó la incidencia, del aglomerante natural cal puzolana, en el mejoramiento de las características físicas y propiedades mecánicas de los bloques, respecto a los no estabilizados. Asimismo, los bloques estabilizados con cemento tipo UGC, se elaboraron para tener un punto de comparación con los estabilizados con aglomerante natural cal puzolana; obteniendo resultados muy variables.

OBJETIVOS

General

Evaluar la incidencia de un aglomerante natural en las características físicas y propiedades mecánicas de bloques elaborados con tierra compactada.

Específicos

1. Evaluar la incidencia del tipo de curado en mezclas de agregados y aglomerantes naturales para utilizarse en la estabilización de los bloques de tierra compactada.
2. Elaborar bloques de tierra compactada con agregados y aglomerantes naturales y evaluar sus características físicas y propiedades mecánicas, de acuerdo con los procedimientos y estándares establecidos por la normativa internacional.

INTRODUCCIÓN

Algunos de los materiales utilizados en las primeras construcciones del hombre fueron: lodo, piedras, madera y fibras naturales; la implementación de estos materiales dependía del lugar en el cual se realizaba la construcción, pero siempre se utilizaba la tierra como material aglomerante, cuya granulometría y estado de humedad determinaba el comportamiento del sistema constructivo.

El impacto que genera el campo de la construcción en el medio ambiente, hace que la humanidad busque alternativas para aprovechar de forma adecuada los recursos que ofrece la naturaleza.

La tierra es un material que predomina en cualquier lugar; en la actualidad, su utilización se ha incrementado, por ser un material reciclable, por su bajo costo y mínimo impacto ambiental producido en la construcción.

Una de las técnicas de construcción con tierra, es la mampostería de bloques de tierra compactada. Este material de construcción es fabricado con una mezcla de tierra y un material estabilizante, como el cemento, el yeso o la cal, que es comprimida y moldeada mediante una prensa manual o hidráulica.

La utilización de cal como estabilizante de suelos, data desde épocas muy antiguas. Mediante esta estabilización se obtienen materiales de calidad, que resuelven las posibles carencias del material que se dispone, aumentando su resistencia, disminuyendo los cambios volumétricos debido al contenido de agua y minimizando la absorción del material.

Guatemala es una región de alta actividad volcánica, por lo cual se encuentra abundante material eruptivo en toda la franja volcánica del país. El territorio guatemalteco ha sido conformado por la intensa actividad volcánica, dando lugar a extensiones amplias de suelos y montañas formadas por materiales volcánicos depositados a lo largo de la historia geológica. La mayoría de estos materiales eruptivos carecen de propiedades cementicias pero es posible que en presencia de humedad, reaccionen químicamente con la cal a temperaturas ambientales, para formar compuestos con estas propiedades.

La utilización de un aglomerante natural, conformado por materiales volcánicos y cal, es un método factible de estabilización para la elaboración de bloques de tierra compactada. Son materiales con fácil disponibilidad con que cuenta el país, minimiza el impacto ambiental y es económico.

El presente trabajo de graduación consiste en la evaluación de la incidencia de un aglomerante natural en las características físicas y propiedades mecánicas de bloques elaborados con tierra compactada y así, determinar si los bloques de tierra compactada, elaborados con agregados y aglomerantes naturales, satisfacen los requerimientos mínimos de la normativa internacional. Ampliando así, el campo de investigación sobre la construcción con tierra.

1. CONSTRUCCIÓN CON TIERRA

1.1. La historia de la construcción con tierra

La tierra ha sido un material habitual de construcción, desde los inicios de la arquitectura, 5800 años a. de C. hasta la época actual, utilizado en gran medida en numerosos núcleos de población de los países en vías de desarrollo.

La tierra cruda como recurso natural de construcción, carece de resistencia, durabilidad y flexibilidad, pero mediante un correcto proceso de estabilización puede cumplir con estas propiedades mecánicas. En un inicio, los constructores primitivos debieron de descubrir la conveniencia de preparar las piezas de tierra en tamaños bastante reducidos y perfeccionar el adecuado proceso de secado. La inclusión de otros materiales, como la paja triturada o la cal, para estabilizar la composición de las piezas de tierra, se descubrió con la experimentación, con base en las condiciones climáticas, para satisfacer las necesidades de durabilidad para la vivienda.

Desde el punto de vista histórico y tipológico, las construcciones con tierra se han identificado básicamente con la auténtica vivienda del hombre, en tanto que la arquitectura monumental hecha con piedra se dejaba esencialmente para los templos, conocidos como “viviendas de los dioses”, o para los edificios representativos y simbólicos de la sociedad.

La construcción con adobes y el uso del tapial puede encontrarse en Mesopotamia y el antiguo Egipto, construcciones que datan desde hace 3000 años a. de C.

Así también, en el Oriente-Medio, como las Mezquitas en Malí e Bazar de Sedjan en Irán, la Gran Muralla en China, el centro de la Pirámide del Sol en Teotihuacán, México; o la Alhambra de Granada, España. Ejemplos que son suficientemente ilustrativos del potencial formal y de la capacidad que pueden llegar a alcanzar las construcciones con tierra. Y que, con el paso del tiempo, han permitido el desarrollo de las técnicas ya existentes y de otras técnicas de construcción como el bahareque y, actualmente, los bloques de tierra compactada.

En la actualidad, a partir de la creciente toma de conciencia mundial respecto, a la necesidad de preservar el ambiente, se plantea la revalorización de las técnicas de construcción con tierra ampliamente difundidas en el pasado, con las que se levantaron importantes edificios y monumentos que resistieron asombrosamente el paso del tiempo y la acción de los agentes climáticos en todo el mundo.

1.2. La tierra como material de construcción

En los climas cálido-secos y templados del mundo, la tierra ha sido el material de construcción predominante. Actualmente, aproximadamente un tercio de la humanidad habita en viviendas de tierra, y en países en vías de desarrollo esto representa más de la mitad.

No ha sido posible resolver los inmensos requerimientos de hábitat en los países en vías de desarrollo con materiales industrializados como el hormigón y el acero, por el costo que representa. Estas necesidades, solo se pueden encarar utilizando materiales de construcción locales y técnicas de construcción que puedan desarrollarse por las mismas personas de la localidad.

La desmedida explotación de los recursos naturales y los sistemas de producción centralizados intensivos en capital y energía no solo generan desperdicios sino que contaminan el medio ambiente, además, incrementando el desempleo. Por lo que la tierra toma importancia y surge como material de construcción.

La inmediata disponibilidad del material tierra a muy bajo costo y la facilidad de trabajarlo sin necesidad de mayores transformaciones previas, con técnicas simples, sin complejos equipos, ni habilidades especiales de mano de obra, tanto como la nula o disminución de los gases de efecto invernadero en su utilización, son factores que favorecen la revalorización de estas tecnologías como una solución alternativa para proveer viviendas dignas a las personas con bajos recursos económicos.

Las construcciones con tierra, principalmente, ante las condiciones de humedad del ambiente, presentan deterioros en las características físicas y propiedades mecánicas, por lo que es necesario la estabilización del mismo. La estabilización del material presenta grandes ventajas en la implementación de técnicas de construcción con tierra.

A continuación se presentan las ventajas y desventajas que como todo material de construcción poseen.

1.2.1. Ventajas

- Regula la temperatura de la vivienda
- Ahorra energía en la construcción y disminuye la contaminación ambiental
- Material reutilizable
- Rápida construcción

- Preservante de la madera antihongos e insectos.

1.2.2. Desventajas

- No es un material estandarizado, su composición depende del lugar donde se extrae el material, por lo que las proporciones de la mezcla son variantes.
- Contracción y fisuración al secarse.
- Permeable.

1.3. Propiedades de la tierra como material de construcción

A continuación se describen las propiedades de la tierra utilizada como material de construcción:

1.3.1. Composición

La tierra es producto de la erosión de las rocas en la corteza terrestre. La erosión ocurre fundamentalmente a través de la pulverización de las rocas provocada por movimientos glaciales, del agua, del viento y por la expansión del agua congelada en las grietas de las rocas. Adicionalmente los ácidos orgánicos existentes en las plantas, las reacciones químicas producidas por el agua y el oxígeno provocan también la erosión de las rocas.

La composición y variedad de las propiedades de la tierra dependen del lugar donde se encuentra. Por ejemplo los suelos con alto contenido de grava son más apropiados para las técnicas de barro apisonado, siempre y cuando contengan suficiente arcilla. Los suelos en las laderas de los ríos, por lo general,

son más limosos y por lo tanto menos resistentes a las inclemencias del tiempo y a la compresión.

1.3.1.1. Componentes

La tierra es una mezcla de arcilla, limo y arena, que algunas veces contiene agregados mayores, llamados gravas. En ingeniería sus partículas se definen dependiendo de su diámetro: partículas con diámetros menores a 0,002 mm se denominan arcillas, entre 0,002 y 0,06 mm limos y entre 0,06 y 2 mm arenas. Partículas mayores a 2 mm se denominan gravas.

La arcilla actúa como aglomerante natural para pegar las partículas mayores de tierra como lo hace en el hormigón el cemento. Limo, arena y otros agregados constituyen rellenos en la tierra. Dependiendo de cuál de estos tres componentes sea el predominante se puede hablar de un suelo arcilloso, limoso o arenoso.

1.3.1.2. Distribución granulométrica

La distribución granulométrica de un suelo se representa mediante una curva granulométrica, donde se muestran los resultados obtenidos en un laboratorio, en el análisis de la estructura del suelo, desde el punto de vista del tamaño de las partículas que lo forman.

Para este análisis se utilizan dos procedimientos en forma combinada, las partículas mayores se separan por medio de tamices con aberturas de malla estandarizadas, y luego se pesan las cantidades que han sido retenidas en cada tamiz. Las partículas menores se separan por el método hidrométrico.

Se representa gráficamente en un papel denominado "log-normal" por tener en la horizontal una escala logarítmica, y en la vertical una escala natural.

1.3.1.3. Agua

El agua activa las fuerzas aglutinantes del material tierra. Aparte del agua libre, existen tres tipos diferentes de agua en el material: agua de la cristalización, agua absorbida y agua capilar.

El agua de cristalización, es el agua que conforma la estructura del material, esta químicamente enlazada y se puede distinguir solo si el material es calentado desde 400 a 900 °C. El agua de absorción está eléctricamente enlazada a los minerales de la arcilla. El agua capilar es el agua que entra en los poros del material por acción capilar. El agua absorbida y la capilar se desprende del material cuando se calienta a 100 °C.

Si se humedece la arcilla seca, esta se expande ya que el agua se desliza entre las estructuras laminares, recubriendo las láminas con una fina película de agua. Si esta agua se evapora la distancia ínterlaminar se reduce y las láminas se acomodan paralelamente debido a sus fuerzas de atracción eléctricas. Así, las arcillas obtienen una fuerza aglutinante, si está en estado plástico y luego se seca, obtienen una resistencia a la compresión.

1.3.1.4. Porosidad

El grado de porosidad se define por el volumen de todos los poros del material tierra. Más importante que el volumen de los poros son las dimensiones de los mismos. Mientras mayor sea la porosidad mayor será la difusión de vapor y mayor la resistencia de hielo/deshielo del material.

1.3.1.5. Superficie específica

La superficie específica de un suelo es la suma de las superficies de todas las partículas. La arena gruesa tiene una superficie específica de aproximadamente $23 \text{ cm}^2/\text{g}$ y la arcilla desde 10 hasta $1\ 000 \text{ m}^2/\text{g}$. Mientras mayor sea la superficie específica de la arcilla mayor serán las fuerzas internas de adhesión que resultan importantes para la capacidad aglutinante y la resistencia a la compresión y tensión del material.

1.3.1.6. Densidad

La densidad se define por la relación de la masa seca con respecto al volumen (incluyendo los poros). Un suelo recientemente excavado tiene una densidad de $1\ 200$ a $1\ 500 \text{ Kg}/\text{m}^3$. Si este suelo se compacta como en técnicas de tapial o en bloques de suelo, su densidad varía de $1\ 700$ a $2\ 200 \text{ Kg}/\text{m}^3$, o más, si contiene considerables cantidades de grava.

1.3.1.7. Compactibilidad

La compactibilidad es la capacidad de la tierra para ser compactada mediante presión estática o compactación dinámica reduciendo así su volumen. Para obtener la compactación máxima el suelo debe tener un contenido óptimo de agua, lo que permite obtener la densidad máxima del material.

1.3.2. Ensayos para analizar la composición del material tierra

Para verificar que un suelo es apropiado para una aplicación específica, es necesario conocer su composición. A continuación se describen los ensayos estandarizados de laboratorio y de campo utilizados para el análisis de los suelos.

1.3.2.1. Ensayos estandarizados de laboratorio

Los ensayos de laboratorio utilizados para caracterizar la composición de la tierra son granulometría, límites de Atterberg y compactación proctor.

1.3.2.1.1. Granulometría

La determinación de la distribución de las partículas de un suelo en cuanto a su tamaño, se conoce como análisis granulométrico; se hace por un proceso de tamizado (análisis granulométrico por vía seca) en suelos de grano grueso, y por un proceso de sedimentación en agua (análisis granulométrico por vía húmeda) en suelos de grano fino. Cuando se usan ambos procesos, el ensayo recibe por nombre análisis granulométrico combinado.

Según sean las características de los materiales finos de la muestra, el análisis con tamices se hace bien con la muestra entera, o bien con parte de ella, después de separar los finos por lavado. Si la necesidad del lavado no se puede determinar por examen visual, se seca una pequeña porción del material y luego se examina su resistencia en seco rompiéndola entre los dedos. Si se puede romper fácilmente y el material fino se pulveriza bajo la presión de aquellos, entonces el análisis con tamices, se puede efectuar sin previo lavado.

El análisis granulométrico por sedimentación, es propio para los tamaños de partículas menores de 0,07 mm de diámetro, es decir, el material que pasa el tamiz núm. 200.

1.3.2.1.2. Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos, aunque su comportamiento varía a lo largo del tiempo.

Los ensayos se realizan en el laboratorio y miden la cohesión del suelo y su contenido de humedad, para ello se forman pequeños cilindros de espesor con el suelo. Siguiendo estos procedimientos se definen tres límites:

- Límite líquido: cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido. Para la determinación de este límite se utiliza la copa de Casagrande.
- Límite plástico: cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico.
- Límite de retracción o contracción: cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y se contrae al perder humedad.

1.3.2.1.3. Compactación Proctor

El ensayo de compactación Proctor es uno de los más importantes procedimientos de estudio y control de calidad de la compactación de un suelo. A través de él es posible determinar la compactación máxima de un terreno en relación con su grado de humedad, condición que optimiza el inicio de la obra con relación al costo y el desarrollo estructural e hidráulico.

1.3.2.2. Ensayos de campo

Una de las grandes ventajas del sistema unificado de clasificación de suelos, es el criterio para identificar en el campo los suelos, si se cuenta con algo de experiencia. Es aconsejable la comparación sistemática de los resultados de la identificación en campo realizada con los del laboratorio cuando exista la posibilidad de hacerlo.

La principal base del criterio para identificar suelos en campo, es la investigación de las características de dilatancia, de tenacidad y de resistencia en estado seco. El color y el olor del suelo pueden ayudar, especialmente en suelos orgánicos.

1.3.2.2.1. Dilatancia

La velocidad con que el suelo cambia su consistencia y con la que el agua aparece y desaparece, define la intensidad de la reacción e indica el carácter de los finos del suelo. Al disminuir la uniformidad en estos suelos, la reacción se hace menos rápida. Las arenas muy finas dan reacción más rápida y distintiva. La arcilla plástica no tiene reacción. Los limos inorgánicos (polvo de roca) dan una reacción rápida moderada.

El fenómeno de aparición de agua en la superficie de la muestra es debido a la compactación de los suelos limosos y, aun en mayor grado, de los arenosos bajo la acción dinámica de los impactos contra la mano; esto reduce la relación de vacíos del material, expulsando el agua de ellos. El amasado posterior aumenta de nuevo la relación de vacíos y el agua se restituye a estos vacíos. Los suelos arcillosos no sufren estos efectos bajo cargas dinámicas, por lo cual no producen reacción. Según la dilatancia de los suelos se identifican así:

- Reacción rápida: arenas finas uniformes, no plásticas y en algunos limos inorgánicos (polvo de roca) y también tierras diatomáceas.
- Reacción lenta: limos inorgánicos y orgánicos ligeramente plásticos.
- Reacción extremadamente lenta o nula: arcillas orgánicas de alta plasticidad.

1.3.2.2. Tenacidad

La potencialidad de la reacción coloidal arcillosa de un suelo se identifica por la mayor o menor tenacidad del rollito al acercarse al límite plástico y por la rapidez de la muestra al romperse finalmente entre los dedos. Según la tenacidad de los suelos se identifican así:

- Entre más rápido y tenaz es el rollito: arcillas inorgánicas
- Media tenacidad: arcillas glaciales
- Poco tenaces: limos arcillosos

1.3.2.3. Resistencia en estado seco

Con el suelo se forma un cubo que se deja al aire y al sol durante 24 horas para que pierda la humedad, posteriormente se somete a compresión entre los dedos. Según la resistencia de los suelos en estado seco, se identifican así:

- Alta resistencia en seco: arcillas inorgánicas.
- Ligera resistencia: un limo inorgánico, se puede distinguir por el tacto al pulverizar al espécimen seco. La arena fina se siente granular mientras que el limo típico da una sensación de suavidad.

- No representan ninguna resistencia en estado seco: son los limos exentos de plasticidad, sus muestras se desmoronan con muy poca presión digital (el polvo de roca y la tierra diatomácea).
- Resistencia en estado seco bajo: es representativa de todos los suelos de baja plasticidad y, aun, de algunas arcillas inorgánicas muy limosas.

1.3.2.2.4. Color

En exploraciones de campo, el color del suelo suele ser un dato útil para distinguir los diferentes estratos y para identificar tipos de suelo.

En general, existen también algunos criterios relativos al color; por ejemplo, el color negro y otros de tonos oscuros, suelen ser indicativos de la presencia de materia orgánica. Los colores claros y brillantes son más bien de suelos inorgánicos.

1.3.2.2.5. Olor

Los suelos orgánicos tienen por lo general un olor distintivo, que puede usarse para la identificación: el olor es particularmente intenso si el suelo está húmedo, y disminuye con la exposición al aire, aumentando por el contrario, con el calentamiento de la muestra húmeda.

1.4. Tecnología de construcción con tierra

La arquitectura habitacional se manifiesta a través de las diversas tecnologías que se han utilizado en la producción de un hábitat, pudiendo referir el término tecnología a los medios y procedimientos aplicados, al conjunto de máquinas y herramientas, insumos materiales y productos, dentro de un contexto

de conocimientos de los cuales dispone una sociedad en un momento determinado. Deben considerarse, igualmente, procesos de asentamiento tales como adaptación a un clima, a un terreno, a un territorio, a la forma de habitarlo. De tal manera resulta válido afirmar que son los habitantes de un lugar, en su acontecer histórico, social y cultural, los responsables de construir y desarrollar su arquitectura.

Son varias las técnicas constructivas que utilizan la tierra arcillosa como material principal, las más conocidas son:

- El adobe: es un bloque formado por una masa de barro sin cocer. Se fabrica con tierra con un alto porcentaje de arcilla, mediante un molde, y se deja secar al sol. Para evitar que se agriete al secar, se añaden a la masa paja, heno seco, entre otros. Las dimensiones adecuadas deben ser tales que el albañil pueda manejarlo con facilidad. Las dimensiones pueden variar de un lugar a otro.
- Tapial: la técnica se basa en la compactación de la tierra húmeda por tandas, mediante su apisonado *in situ*. Se utiliza un encofrado desmontable de madera (cajón) de varias dimensiones por ejemplo: 150 x 90 cm con una anchura de 60 cm. Su proceso de construcción incluye tres fases: montaje del cajón o encofrado, relleno y compactación del mismo y desmontaje o desencofrado. El proceso de compactado se realiza tradicionalmente con un pisón, compactador manual en la actualidad se utilizan vibradores.
- Bajareque: es la denominación de un sistema de construcción de viviendas a partir de palos o cañas entretrejidas y barro. Esta técnica ha sido utilizada

desde épocas remotas para la construcción de vivienda en pueblos indígenas de América.

- Bloques de tierra compactada: son elementos prismáticos utilizados en la construcción, se obtienen de aplicar presión al material tierra en el interior de un molde, mediante una prensa manual o hidráulica, de esta forma se mejora las propiedades mecánicas del material. Suelen emplearse estabilizados con cal, cemento o yeso.

2. BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA

2.1. Definición

El bloque de tierra compactada, también conocido como BTC, es un elemento de construcción elaborado con una mezcla de tierra y un material estabilizante, como cal aérea, cal hidráulica, cemento o arcilla, que es comprimida y moldeada utilizando una prensa manual o mecánica. El BTC es un sustituto del ladrillo corriente en actividades de construcción; se utiliza en la construcción de muros apilándolo manualmente y utilizando una mezcla de los mismos materiales como pega.

2.2. Arcilla

Es producto de la descomposición química de los minerales que conforman a las rocas ígneas y metamórficas. Estos suelos están constituidos básicamente por silicatos de aluminio, así como por silicatos de magnesio, hierro y otros materiales, todos ellos hidratados. Estos minerales tienen una estructura cristalina y se disponen atómicamente en láminas, las cuales se denominan sílica y alumínica.

En general, las partículas de las arcillas tienen un tamaño del orden de 2 micras o menos, presentando una gran actividad eléctrica. Es conocido el hecho de que en los suelos finos predominan las fuerzas eléctricas, producto de los minerales cristalinos, algunos de los cuales son muy pequeños en tamaño, lo que hace que tengan una actividad muy baja superficialmente y no contribuyan a los efectos de plasticidad y cohesión, tales como lo hacen el cuarzo y la calcita.

2.2.1. Clasificación

Los minerales cristalinos que contribuyen a la plasticidad y cohesión son los llamados arcillosos, de los cuales existen tres grupos, a saber: las caolinitas, las montmorillonita e ilitas.

- Caolinitas: están formadas por una lámina sílica y otra alumínica que se superponen indefinidamente. La unión entre todas las retículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua entre ellas (absorción). En consecuencia, las arcillas caoliníticas serán relativamente estables en presencia del agua.
- Montmorillonita: están formadas por una lámina alumínica entre dos sílicas superponiéndose indefinidamente. En este caso, la unión entre las retículas del mineral es débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad. Una condición de estas es la de que, especialmente en presencia del agua, presentan fuertes tendencias a la inestabilidad.
- Iilitas: están estructuradas analógicamente como las montmorillonitas pero su construcción interna manifiesta tendencias a formar grumos, de manera que reduce el área expuesta al agua por unidad de volumen, por ello su expansividad es menor que la de las montmorillonitas y, en general, estas se comportan mecánicamente más favorables.

2.2.2. Propiedades

Las arcillas se caracterizan por su capacidad aglomerante, de endurecimiento al secarse, de contracción y refractaria.

2.2.2.1. Plasticidad y capacidad aglomerante

La arcilla, amasada con cierta cantidad de agua, forma la pasta arcillosa que posee coherencia y plasticidad. Al mojar la arcilla seca, se percibe un olor característico de tierra mojada y el desprendimiento de calor. 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 de la arcilla se manifiesta en la posibilidad de cohesión de los granos materiales no plásticos (arenas), al igual que en la formación después del secado de un artículo bruto con bastante resistencia mecánica.

2.2.2.2. Capacidad de endurecimiento al secarse

Una particularidad de la pasta de arcilla es su capacidad de endurecer al secarla al aire. La resistencia mecánica de la arcilla secada viene 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 de presión capilar atraen a las partículas de arcilla impidiendo su corrosión, a consecuencia de lo que tiene lugar la contracción aérea.

Durante la saturación de agua desaparecen los meniscos, cesa la acción de las fuerzas capilares, las fuerzas se desplazan libremente en el exceso de agua y la arcilla se empapa.

2.2.2.3. Contracción

La contracción consiste en que se reducen las dimensiones lineales y el volumen de la materia bruta de arcilla durante su secado (contracción térmica).

La contracción aérea transcurre en el proceso de evaporación del agua a partir de la materia bruta, como consecuencia de la disminución del espesor de las capas acuosas alrededor de las partículas de arcilla, aparición en los poros de la materia bruta de meniscos y fuerzas de presión capilar, tendientes a acercar las partículas.

La contracción térmica sucede a causa de que en el proceso de cocción los componentes fusibles de la arcilla se funden y las partículas de esta se aproximan en los lugares de su contacto.

2.2.2.4. Capacidad refractaria

La capacidad refractaria de la arcilla es la propiedad de la arcilla de soportar altas temperaturas sin fundirse.

2.3. Estabilizantes utilizados en la elaboración de bloques de tierra compactada

Un estabilizante es un material que, como su nombre lo indica, permitirá mejorar las características físicas del suelo, ya sea aumentando la resistencia a

la compresión, a la tracción, o bien, reduciendo las fisuras provocadas por la retracción de la arcilla.

2.3.1. Tipos de estabilizantes

Los estabilizantes utilizados en la estabilización de los bloques de tierra compactada son de tipo mineral y vegetal.

2.3.1.1. Estabilizantes minerales

- **Cemento:** este actúa como estabilizador contra el agua en suelos de bajo contenido de arcilla. Mientras menor sea el contenido de arcilla, más cemento es necesario para alcanzar el mismo efecto de estabilización.
- **Cal:** el intercambio de iones ocurre en la mezcla de barro con cal como estabilizador si existe suficiente humedad. Los iones de calcio de la cal se intercambian con los iones metálicos de la arcilla formando uniones estabilizadoras.
- **Bitumen:** es apropiado para barros con bajo contenido de arcilla.

En una clasificación más amplia, según P. Doat, los estabilizantes fisicoquímicos se dividen en hidrófobos (que no interaccionan con agua), y estos a su vez en derivados del amoníaco, resinas y asfaltos; y los ligantes, donde se encuentran los diferentes tipos de cal, el cemento, los lignosulfitos o productos derivados de la pulpa del papel, y el silicato de sodio.

Para el caso de suelos con 55 a 65 % de arena en su composición, se recomienda estabilizarlos con cal, y para aquellos que en su composición posean un porcentaje mayor a 65 % se recomienda estabilizarlos con cemento.

2.3.1.2. Estabilizantes vegetales

Son diversos los estabilizantes que pueden ser utilizados para los bloques de tierra compactada. Dentro de esta área se encuentran las savias de plantas aceitosas y con contenido de látex; plantas con estas características son el sisal, agave, banano y *Euphorbia herea*, este último es usado en combinación con cal y tienen su mejor aplicación como pintura estabilizadora. En muchos países se han realizado diversas investigaciones que han encontrado que usando aceite de linaza doblemente cocido, se incrementa la resistencia a las inclemencias del tiempo en superficies de barro, además de que la difusión del vapor en estructuras de tierra se reduce de manera considerable.

Como puede observarse, se tienen diversas alternativas vegetales para estabilizar bloques de tierra compactada, entre ellos el almidón cocido y las melazas, que pueden utilizarse para optimizar la estabilidad. Se ha observado que este efecto aumenta si se añaden, además, pequeñas porciones de cal.

Otro estabilizante de origen vegetal utilizado en la fabricación de BTC es el mucílago de nopal; se ha buscado mejorar el comportamiento de los adobes frente al agua y la humedad de manera empírica, por lo que se le ha adicionado mucílago de nopal, ya sea para la elaboración del adobe mismo o como protección, adicionado en capas alternativas con jabón y alumbre.

El mucílago o “hidrocoloide” es una sustancia viscosa que se encuentra en diferentes vegetales (tanto en hojas como en tallo, raíces, entre otros) y algunas

leguminosas. La resistencia a la compresión y tracción pueden incrementarse empleando almidón y celulosa, pero esos aditivos, al mismo tiempo, reducen la cohesión y aumentan la retracción, lo cual resulta desventajoso, a diferencia del mucílago, compuesto por amilasa y amilopectina.

2.4. Estabilización con cal

La utilización de cal para la estabilización del suelo (especialmente de suelos finos) data desde épocas muy antiguas. Las arcillas forman una parte importante del suelo, y generalmente requieren una estabilización para aumentar la resistencia, así como disminuir los cambios volumétricos debido al contenido de agua.

La utilización de esta técnica cumple con el plan trazado, obteniéndose varios efectos:

- Reducción del índice de plasticidad.
- Aceleración de la disgregación de los grumos arcillosos durante la pulverización, mediante el uso de agua y cal.
- Reducción de los efectos aglomerados.
- Reducción de las contracciones y las expansiones debido a la humedad.
- Incremento de la resistencia a la compresión.

2.4.1. Acción de la cal en las arcillas

La acción de la cal en las arcillas se divide en dos etapas:

- Primera etapa: en esta se observa la acción producida por el aporte masivo de iones a causa de la cal. Los cationes de calcio se unen a la

arcilla debido al intercambio catiónico, lo cual provoca la unión de las partículas arcillosas. Esto aumenta a una floculación a edades tempranas, lo que provoca una reducción del índice de plasticidad, produciendo que el suelo se vuelva menos sensible al agua.

- Segunda etapa: en esta las arcillas reaccionan en forma regular, dependiendo de la naturaleza de los materiales arcillosos. Ello se traduce en una degradación de los mismos elementos mineralógicos, apareciendo nuevos, dando como resultado un aumento en la resistencia en la comprensión simple.

2.4.2. Ciclo de la cal

El material constructivo que se conoce comúnmente como cal es el producto de un proceso de calcinado, rehidratación y secado de rocas de origen calizo. Este fenómeno resulta sumamente interesante debido a los factores ecológicos que involucra.

Se trata de un desarrollo de tipo cíclico que inicia con la transformación del carbonato de calcio (CaCO_3 , mineral de origen sedimentario) y concluye con la generación del mismo material, pero mediante un procedimiento artificial. Para comprender de manera más clara esta “metamorfosis”, se puede explicar a partir de lo que se conoce como el “ciclo de la cal”.

Todo comienza con la extracción de rocas con alto contenido de carbonato de calcio del medio natural. La mayoría de las veces, las calizas están contaminadas con carbonato de magnesio, MgCO_3 (dolomita), material que es indeseable en la construcción por sus problemas de solubilidad en agua. Además de las piedras o minerales inorgánicos, existen otros elementos orgánicos ricos

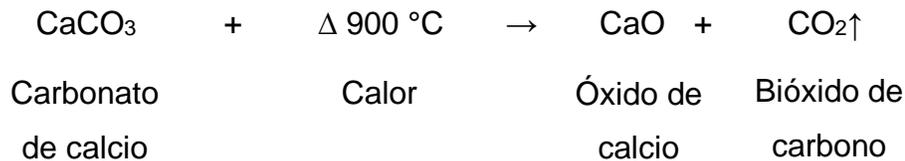
en calcio que históricamente han sido utilizados para su extracción como son las conchas, corales y caracoles marinos.

Todas estas fuentes se presentan en la naturaleza acompañados de sustancias como el hierro y el magnesio, que dentro de este proceso se consideran impurezas o contaminantes debido a que su presencia modifica el comportamiento esperado para el producto final. Para que la piedra caliza sea apta para fines constructivos deberá contar con por lo menos 90 % de carbonato de calcio, de otro modo la cal resultante será de mala calidad.

En el pasado, se sabía por experiencia transmitida de modo tradicional que la piedra caliza que producía buena cal era la que presentaba un color claro uniforme y con pocas manchas amarillas, anaranjadas, rojas o negras, que suelen ser sintomáticas de la presencia de hierro. Además, al golpear entre sí dos fragmentos de piedra con alto contenido de carbonato de calcio, se produce un sonido de tipo metálico que ayuda a su identificación.

Hoy en día, para la producción industrial de cal se manejan cuidadosos análisis químicos que permiten verificar la pureza de la piedra caliza utilizada como materia prima. Este producto natural es sometido a temperaturas de entre 900 y 1 300 °C en hornos especialmente diseñados que antaño utilizaban leña o carbón como combustible, pero que en la actualidad funcionan a base de gas.

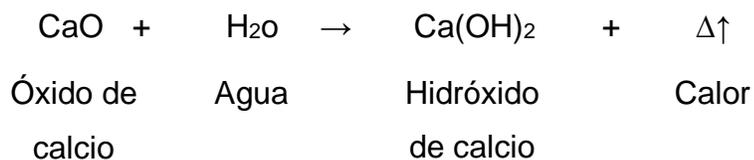
Por el efecto del calor, en esta etapa el material base se transforma en óxido de calcio, al tiempo que desprende dióxido de carbono como un gas que se eleva a la atmósfera. La reacción se puede representar químicamente de la siguiente manera:



El óxido de calcio, al que comúnmente se le denomina “cal viva”, es un producto inestable que perdió parte de su peso durante la calcinación. Es una sustancia ávida de agua que, si no se controla de forma adecuada, tiende a recuperar el equilibrio que mantenía como carbonato de calcio.

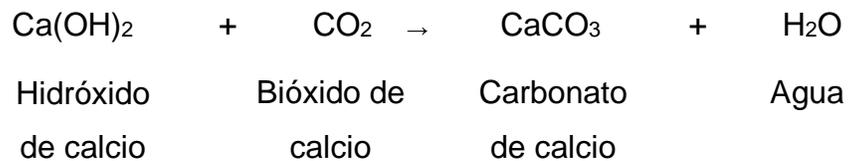
Resulta un material sumamente cáustico y corrosivo, pues reacciona muy fácilmente con cualquier fuente de humedad, pero tiene la cualidad de que, al momento de agregársele agua, adopta un estado “latente” que permite su uso inmediato o su almacenamiento al convertirse en lo que se conoce como “cal apagada” o “cal hidratada”.

Lo que sucede a nivel químico es que el óxido de calcio toma el hidrógeno y oxígeno del agua y se transforma en hidróxido de calcio, que es un material con consistencia fluida, y que, mientras se mantenga aislado del aire, puede conservar sus cualidades durante meses o años. Como se explicará más adelante, la hidratación o “apagado” de la cal viva es una reacción en la que se desprende calor.



La pasta de cal es sumamente versátil y puede ser utilizada como insumo para pinturas, morteros o mezclas constructivas.

La etapa con la que concluye el ciclo de la cal se desarrolla cuando el hidróxido de calcio toma bióxido de carbono del aire y pierde agua por evaporación, en un proceso en el que se endurece al recuperar su estado original como carbonato de calcio, es decir, se convierte nuevamente en roca.



Esta fase final es la más importante para la construcción, ya que durante el proceso de fraguado al hidróxido de calcio se le pueden incorporar minerales adicionales, con el objetivo de que sean “atrapados” durante el endurecimiento y se vuelvan parte integral del conjunto. De este modo, se crea una “piedra artificial” con cualidades físicas, químicas, formales y cromáticas singulares, en función tanto del origen fisicoquímico de los agregados como de los procesos de manufactura.

3. PUZOLANAS

3.1. Generalidades

Los griegos y romanos en su afán de construir y crear grandes imperios fueron los primeros en conocer “la cal” con sus propiedades aglomerantes. A esta le agregaron materiales naturales que estaban a su alcance, con el objetivo de obtener áridos inertes. El suelo donde se edificaron estas civilizaciones tiene una importante cobertura de material piroclástico, obteniendo morteros de alta resistencia y mayor durabilidad, un hecho que llevó al uso casi generalizado de los aditivos volcánicos.

El nombre puzolana proviene principalmente de la explotación de material en Pouzzoles (Italia), la cual no se encuentra muy lejos del volcán Vesubio. La puzolana es un término genérico de este material, pues de ahí se separan en distintos tipos, como la pumicita, piedra pómez, entre otros.

La Norma ASTM C 618-92 *Specification for fly ash and row or calcined natural puzzolan for use as a mineral admixture in Pórtland cement concrete* define las puzolanas como “materiales silíceos o alumino-silíceos los cuales por si solos poseen poco o ningún valor cementante, pero finamente divididos y en presencia de humedad reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes”.

La puzolana se emplea básicamente en la industria del cemento como adición al clínker para obtener cemento con puzolanas o como sustitución del contenido requerido de cemento en algún determinado tipo de hormigón.

En términos generales, las puzolanas son materiales de adición de suma importancia en la industria del cemento, por su capacidad de atrapar la cal libre que queda en el clínker después del proceso de sinterización de las materias primas, reduciendo el calor de hidratación y los costos de producción. Dicho de otra manera, se consideran generalmente como puzolanas los materiales que, carentes de propiedades cementicias y de actividad hidráulica por sí solos, contienen constituyentes que se combinan con cal a temperaturas ordinarias y en presencia de agua, dando lugar a compuestos permanentemente insolubles y estables que se comportan como conglomerantes hidráulicos.

En tal sentido, las puzolanas dan propiedades cementantes a un conglomerante no hidráulico como es la cal. Estos son por consiguiente, materiales reactivos frente a la cal, en las condiciones normales de fabricación ordinaria de conglomerados (morteros y hormigones).

3.2. Clasificación

Las puzolanas se clasifican según su origen, en naturales y artificiales, y según su comportamiento mecánico, por su resistencia a compresión.

3.2.1. Según su origen

Las puzolanas, según su origen, se clasifican en dos grandes grupos: naturales y artificiales; si bien puede existir un grupo intermedio constituido por puzolanas naturales que se someten a tratamientos térmicos de activación, análogos a los que se aplican para obtener puzolanas artificiales, con el fin de incrementar su hidraulicidad. Estas puzolanas tratadas, activadas o ennoblecidas, si bien naturales en origen, pueden considerarse como artificiales en virtud del tratamiento que reciben. Podrían denominarse puzolanas mixtas o

intermedias, por participar de los caracteres tanto de las naturales como de las artificiales.

3.2.1.1. Puzolanas naturales

Según Robert Day en su libro: *Pozzolans for use in low-cost housing*, “son todos aquellos materiales de origen mineral que provienen de erupciones volcánicas, sedimentaciones o algún proceso de formación natural sin intervención del hombre”.

Las puzolanas naturales son productos minerales con características composicionales (silico-aluminosos), estructurales (estructura imperfecta o amorfa) y texturales (grano fino) que los hacen aptos para su uso como aditivos activos en la industria del cemento y se dividen en:

- **Orgánicas**

Estas puzolanas de origen natural son aquellas provenientes de algún organismo vivo. Las puzolanas de origen orgánico como las Diatomeas, son sedimentos lacustres muy finos que se encuentran en depósitos, por la acumulación de algas microscópicas unicelulares que al morir se asentaron en el lecho marino. Como toda una buena puzolana, contienen una alta capacidad de retención de sílice al impregnar en sus membranas o paredes con ella.

- **Inorgánicas**

Estos materiales provenientes siempre de procesos naturales, pero no de seres vivos.

Son materiales vítreos procedentes de las erupciones volcánicas que no llegaron a cristalizarse en su conformación estructural. Según su naturaleza, las puzolanas de origen volcánico más comunes se pueden encontrar como ceniza volcánica o arena pómez”.

3.2.1.2. Puzolanas artificiales

Son provenientes de procesos manejados por el hombre, que a su vez tienen implicaciones ecológicas, debido a la forma en que son obtenidas.

Las puzolanas artificiales incluyen materiales como la ceniza volante (*fly ash*), cenizas 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 la caña de azúcar y desechos de bauxita. Otros materiales potenciales, tales como cenizas de bagazos, suelos lateríticos y suelos tropicales rojos, los cuales requieren calcinación para inducir puzolanidad, podrían también clasificarse como puzolanas artificiales, pero si no se requiere calcinación, entonces se clasificarían como puzolanas naturales.

3.2.2. Según su comportamiento mecánico

Day y Quiñonez mencionan un sistema de clasificación conveniente basado en el comportamiento mecánico. Para esta clasificación se requiere de una base de datos muy grande. Un examen exhaustivo de 530 muestras de puzolanas naturales americanas fue desarrollado por el Bureau of Reclamation de los Estados Unidos en 1969. Exámenes petrográficos y ensayos físicos con métodos de ASTM se realizaron y cada puzolana fue incluida en una clase, dependiendo de su respuesta física.

El comportamiento está basado en cuatro ensayos: resistencia (actividad puzolánica), trabajabilidad (requerimientos de agua), serviciabilidad (contracción) y durabilidad (ataque álcali-agregado). Estos son los elementos esenciales de una buena puzolanidad.

Day, Hammond y Quiñónez, indican una clasificación más simplificada basada en la resistencia (actividad) de morteros curados por 8 días a 50 grados centígrados. Esta es la clasificación hindú, la cual presenta los siguientes límites de resistencia y su interpretación:

- Muy inactiva, si la resistencia es menor de 1,4 MPa
- Inactiva, si la resistencia está entre 1,4 y 2,8 MPa
- Pobremente activa, si la resistencia está entre 2,8 y 4,1 MPa
- Intermedia, si la resistencia está entre 4,2 y 5,5 MPa
- Activa, si la resistencia está entre 5,5 y 6,9 MPa
- Muy activa, si la resistencia es mayor de 6,9 MPa

3.3. Aplicación de las puzolanas

Las puzolanas se utilizan con dos fines principales, el primero es utilizarlo en la fabricación de cementos puzolánicos. El material natural o artificial es molido junto con el clinker. El segundo uso es introducirlo directamente en la concretera como un ingrediente más, en la elaboración del concreto o mortero. El uso de este material es utilizado por distintas razones, como fijar la cal liberada de los silicatos del cemento y mejorar la durabilidad del mismo; estas propiedades son de mucha ayuda cuando se utiliza concreto en obras sometidas a constante agua.

3.4. Las puzolanas en Guatemala

Dengo, en su obra de 1987 *Historia del desarrollo del conocimiento geológico de América Central*, hace mención de la llegada de varios investigadores a la región centroamericana durante la segunda parte del siglo XIX con el propósito específico de estudiar aspectos de su geología. Fue el geólogo alemán Karl Von Seebach quien presentó la primera obra detallada y sistemática sobre los volcanes de América Central en 1892, basada en sus propias investigaciones, realizadas en 1864 y 1865.

Sin menospreciar las descripciones hechas anteriormente por otros, la obra de Von Seebach es indudablemente la de mayor valor en cuanto a estudios vulcanológicos y también fue una de las primeras investigaciones de este tipo en el mundo.

Una obra que constituye una de las piedras fundamentales sobre la geología del norte de América Central, es la de los franceses A. Dollfus y E. de Montserrat, basada en sus investigaciones durante los años de 1863 y 1864 en El Salvador y Guatemala. Estos geólogos formaban parte de una Misión Científica enviada a México y América Central por el Emperador Napoleón III, quien aún antes de llegar al poder de Francia había escrito sobre las posibles rutas interoceánicas. La obra de Dollfus y de Montserrat, acompañada de un mapa geológico a colores, uno de los primeros de la época, sentó las bases de la estratigrafía de la región estudiada.

La figura que más destaca en la investigación de la geología centroamericana es indudablemente la del geólogo alemán Karl Sapper, quien llegó a Guatemala en 1888.

Las investigaciones de Sapper fueron sumamente extensas, no solo en el sentido geográfico sino también porque, además de hacer aportes a la geología, contribuyó a otras ramas científicas y al levantamiento de sus propios mapas topográficos.

En geología uno de sus mayores intereses fue el estudio de los volcanes, llegando años después a ser una autoridad mundial en ese campo. Sin embargo, sus investigaciones cubrieron todos los aspectos geológicos de Dollfus y de Montserrat, ampliaron los conocimientos estratigráficos de las rocas del Paleozoico y Mesozoico y varios de los nombres usados por él para las formaciones geológicas, siguen vigentes. Tales contribuciones estratigráficas en el norte de América Central las amplió mediante sus estudios en Belice, Yucatán y Chiapas.

Otro investigador que ha estudiado la geología de Guatemala durante varios años ha sido el geólogo y vulcanólogo Samuel B. Bonis. En su obra *Un resumen de la geología de Guatemala* describe a Guatemala como una continuación geológica de México y Norteamérica. Rocas paleozoicas y mesozoicas con rumbo sureste en el sur de México sufren en Guatemala un cambio de rumbo hacia el este y continúan hasta el mar Caribe, posiblemente emergen para formar parte del eje geológico de las Antillas mayores.

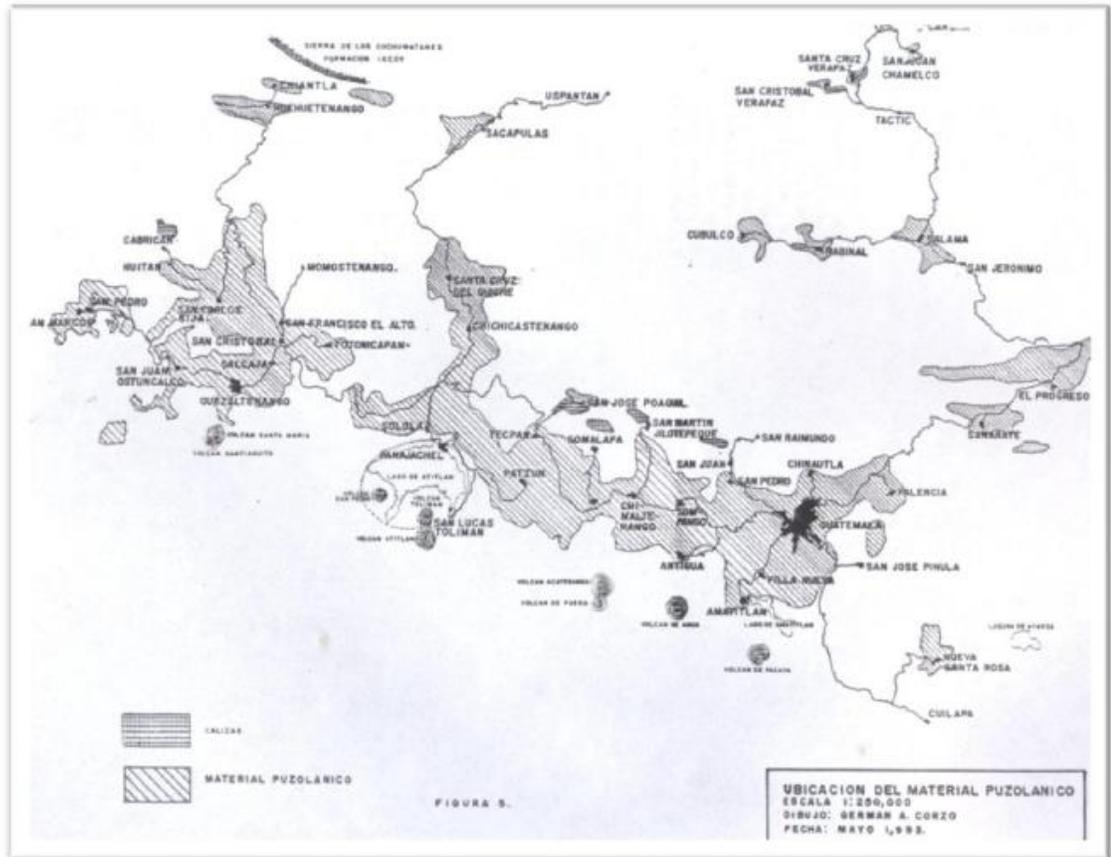
Bonis divide Guatemala en cuatro provincias principales: provincia volcánica de edad Terciaria a reciente que abarca la parte sur del país; la planicie costera del Pacífico que consiste en restos provenientes de la erosión de las sierras volcánicas; una cordillera que forma el núcleo geanticlinal del norte de Centroamérica, consistente 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.

Williams (1960) realizó un extenso reconocimiento geológico en su documento *Volcanic History of the Guatemalan Highlands*, donde caracterizó 6 zonas de material volcánico (pómez), discutiendo su origen. Tomando como base este estudio McBirney (1963) detectó material piroclástico en las cercanías de Salamá y Cobán. Con esto Bonis, en 1965, cartografió el material piroclástico como una unidad estratigráfica muy importante.

Todos los estudios realizados son presentados de manera sintetizada en la tesis de maestría realizada por Reynolds en 1975 titulada *Tertiary Volcanic Stratigraphy of North and Central America*. La figura 1 muestra la localización del material volcánico en el cinturón volcánico de Guatemala, como producto de los trabajos antes mencionados. En el Instituto Geográfico Nacional (IGN) se encuentran varios mapas geológicos que son resultados de todos los estudios antes mencionados.

En Guatemala el uso de las puzolanas se comenzó a utilizar como adición activa mezclada con cemento Portland hasta en los años 80. En los años 90 se comenzó a fabricar cementos mezclados con este material con un contenido de puzolana del 15 %, que indican las normas internacionales.

Figura 1. Disposición de material volcánico



Fuente: ARRIVILLAGA, Manuel. *Evaluación geológica de bancos de puzolanas en el occidente de Guatemala.* p. 25.

4. AGLOMERANTE CAL PUZOLANA

4.1. Historia del uso de la puzolana

En la historia de la civilización humana el descubrimiento de los materiales y de las acciones cementantes hidráulicas fue posterior al del fuego y debió ser poco posterior al descubrimiento de la cerámica. Tal revelación, por lo que se refiere a los pueblos mediterráneos, debió pasar de egipcios a griegos y romanos, siendo ampliado y perfeccionado en sucesivas etapas. Por razones de puro azar geográfico y geológico, los griegos y romanos, pudieron adobarla con materiales naturales de origen volcánico que tenían tan a mano.

Según Mella (2004), la observación debió hacer el resto, y de la comparación de la resistencia y del comportamiento general de los conglomerados hechos con cal y materiales volcánicos y no volcánicos, surgió la nueva técnica de mezclar los primeros; ya como materiales activos, con la cal, en polvo y en seco o en húmedo, para obtener los que han pasado a la historia como "cementos y morteros romanos", a base de cal y puzolana, o cal, puzolana y arena, respectivamente. Tales materiales fueron la tierra griega de Santorín y las cenizas y tobas romanas de Puzzuoli (o Puteoli).

Spence y Cook (citado por Day, 1991) explica que existe evidencia del uso de cerámica entre los 3000 y 1500 años antes de Cristo, en la elaboración de morteros de cal. Los antiguos ingenieros encontraron que el uso de polvo fino de un material natural o molido, podía ser utilizado para hacer cemento, y consecuentemente, construcciones de muy alta calidad.

Recientes análisis de Davidovits y Morris (citado por Day, 1991) han mostrado que este cemento fue encontrado en muchas partes de las grandes pirámides con una edad aproximada de 4 500 años y que están todavía en muy buenas condiciones; esto contrasta con las reparaciones de los monumentos egipcios con cemento Portland, las cuales se han agrietado y degradado en solamente 50 años. Las primeras aplicaciones en civilizaciones antiguas y los usos contemporáneos en Europa, Asia y América, han mostrado que las puzolanas son materiales muy útiles.

Day (trad. por Quiñónez, 2010) explica que datos medidos con un espectrofotómetro, indican que los concretos antiguos tenían 500 kg de agregado grueso 1 000 kg de agregado fino, 470 kg de tierra Santorín y 150 kg de cal. La resistencia de este material es cercana a los 12 MPa y el módulo de elasticidad fue cercano a los 8 GPa. La permeabilidad fue también baja, sin embargo, no existen comparaciones con concreto.

Drury (citado por Day, 1991) explica que actualmente en los Estados Unidos se comenzó a investigar el uso de las puzolanas naturales, cuando este fue utilizado en el acueducto de Los Ángeles en 1912. Recientes investigaciones sobre puzolanas en Estados Unidos mostraron que concretos de cemento Portland hechos con puzolana tuvieron propiedades deseables tales como mejora de la permeabilidad y resistencia a la acción de aguas agresivas

4.2. Las puzolanas como aglomerantes

Las puzolanas forman parte del cemento de estructuras ancestrales en Egipto, Grecia y Roma. Hay también evidencia en cerámica, que fueron utilizadas en el período entre 3000 y 1500 antes de Cristo, en la elaboración de morteros de cal.

Los ingenieros antepasados encontraron que el uso de polvos finos de material natural o cerámica molida podían ser utilizados para hacer cemento, y consecuentemente edificaciones de muy alta calidad. Exámenes recientes han mostrado 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; lo cual puede ser contrastado con el cemento Portland moderno que ha sido usado para reparar monumentos egipcios ancestrales; este último material se ha agrietado y degradado en solamente 50 años.

El descubrimiento de los cementos cal-puzolana permitió cambios radicales en la construcción a causa del incremento de resistencia en los materiales; arcos, bóvedas, y también fue posible construir estructuras marinas con suficiente durabilidad. Los morteros cal-puzolana fueron utilizados como agentes repelentes al agua, para canales, duchas, tanques y acueductos.

En los concretos antiguos parece que mucha atención se dio a la graduación de los agregados y el concreto antiguo que fue ensayado tuvo una graduación muy cercana a la ideal que se reconoce actualmente para los concretos modernos.

Las adiciones minerales de alta finura pueden ayudar al mejoramiento de las cualidades del hormigón. Estos pueden ser efectos físicos tal como el incremento de la compacidad, o efectos fisicoquímicos como los nuevos productos de reacción formados durante la reacción puzolánica. En ambos casos el efecto final es similar, la porosidad del hormigón disminuye y la distribución y tamaño de los poros se hacen más pequeños. El uso de las puzolanas puede modificar las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón.

La función de la puzolana en los hormigones es aportar los finos que no tiene la dosificación, es decir, para aumentar la compacidad del hormigón. Como ya se ha dicho anteriormente, las puzolanas tienen casi ninguna propiedad hidráulica, pero al mezclarlas con el clinker del cemento (en su fabricación) se activa dicha propiedad. Como requisito en la utilización de puzolanas en hormigones se requiere que esta esté seca y pulverizada, para trabajar con una granulometría controlada.

Respecto de las resistencias mecánicas a compresión alcanzadas por las lechadas con puzolanas, son más elevadas de lo que cabría esperar, por el contenido en cemento de las mismas y por la elevada relación agua/cemento, demostrando el papel efectivo en el desarrollo de microestructuras resistentes activadas por la presencia de puzolanas.

La reacción puzolánica en muchas puzolanas es significativa después de los 7 días, cuando la mayoría de los productos de reacción del cemento ya se han formado, la concentración alcalina es considerable para romper los enlaces y facilitar la formación de productos de reacción del cemento.

En muchos casos y dependiendo de la reactividad de la puzolana, muchas de las reacciones finalizan en los primeros 60 días. Sin embargo, el uso de grandes volúmenes de adiciones puzolánicas incrementan el riesgo de la autoneutralización debido al excesivo consumo de hidróxido de calcio durante la reacción puzolánica. Una caída significativa en el pH, puede causar la disolución de otros productos de reacción y la destrucción de la matriz cementicia.

4.3. Aglomerante cal puzolana

A través de los años, el desarrollo en la construcción ha determinado que el cemento Portland es uno de los materiales de uso indispensable en la construcción de edificaciones, debido a sus características de fraguado y alcance de gran resistencia mecánica.

Se puede decir que existen cementos naturales como las cales hidráulicas, cementos de escoria constituidos por cenizas y escorias granuladas. En otros países, de similares necesidades que Guatemala. Se han desarrollado fórmulas y materiales que poseen ciertas características de fraguado y de alcance de resistencia mecánica. Uno de ellos ha sido el aglomerante cal puzolana.

El aglomerante cal puzolana es la mezcla homogénea de cal y puzolana, molido hasta una fineza tal que caracteriza a los materiales cementantes, formando un aglomerante hidráulico y que tiene las características de un fraguado más lento y un alcance de resistencia menor que el cemento Portland.

Este aglomerante se puede utilizar en morteros para aplicación en albañilería, estabilización de suelos, elementos de concreto, fabricación de bloques y otros elementos utilizados en la construcción.

La proporción de cal y puzolana debe ser medida y adecuada según la caracterización de la materia prima a utilizar, y que en el caso de este cementante casi siempre se utilizan los materiales que existen en el lugar de producción. Por lo que implica un costo de producción menor que el cemento Portland y de recuperación a corto plazo. Todo ello origina grandes ventajas en la utilización de este producto, y sobre todo, apropiado para explotarlo.

Las puzolanas se pueden considerar como un tipo de agregado activo, ya que al adicionarse a la cal, reaccionan químicamente en condiciones de humedad, dando como resultado variaciones en cuanto a trabajabilidad y resistencia de las mezclas.

En Guatemala el tipo de puzolana más común es la de origen volcánico, formado de materiales piroclásticos en forma de cenizas volcánicas. Es muy abundante debido a la constitución volcánica del territorio nacional y se puede encontrar en diversos bancos sobre la cadena o cinturón volcánico que atraviesa el país.

En el mercado local de Guatemala, la cal puede comprarse al mejor precio en sacos de 25 y 20 kg y constituye aproximadamente entre el 20 al 35 % del peso del aglomerante cal puzolana.

4.3.1. Especificaciones y control de calidad

Algunas especificaciones son necesarias a tomar en cuenta para lograr una calidad adecuada del aglomerante; mediante ensayos de campo se puede determinar ciertas propiedades de la materia prima.

4.3.1.1. Humedad natural de las puzolanas

Este ensayo es necesario efectuarlo cada vez que se haga una molienda, y sirve para verificar que la puzolana a utilizar esté completamente seca.

Primeramente se remueve la puzolana para verificar visualmente la uniformidad del color, ya que en ocasiones la capa superior del banco de puzolana está seca y la inferior a esta capa contiene humedad, esta humedad es

detectada a simple vista por el cambio de color claro a oscuro entre la capa superior y la inferior.

Luego, se toma una porción de puzolana con la mano y se cierra el puño aplicando cierta fuerza de compresión y procurando que no se escape la puzolana. Si al abrir el puño, el material se expande y desparrama en toda la mano, el contenido de humedad es permisible. Si por el contrario, presenta signos de aglomeración es inadecuado para su molienda y necesita ser sometido al proceso de secado.

4.3.1.2. Ensayo visual-táctil

Este procedimiento permite determinar el tamaño correcto de las partículas del aglomerante, mediante la observación directa y la percepción al tacto de las partículas. Para ello se toman 250 ml de aglomerante y 250 ml de cemento Portland, con ambas manos se palpan los materiales a modo de comparar los tamaños de las partículas entre uno y otro, los cuales deben ser similares o con una mínima diferencia de tamaños. Si la comparación resulta una diferencia considerable entre los tamaños de las partículas, quiere decir que el tiempo de molienda no es el óptimo o bien el material puzolánico no es el adecuado. Esta observación es necesaria hacerla cada vez que se obtiene una molienda.

4.3.2. Proceso de producción

El proceso de producción del aglomerante cal puzolana es el siguiente:

- Comienza con la obtención de materia prima (cal y puzolana) la cual tiene que ser protegida de la humedad al ser almacenada, ya que si la puzolana cuenta con algún tipo de humedad hay que someterla a un proceso de

secado natural (sol y aire), el cual debe hacerse exponiéndola al ambiente natural extendida en una capa delgada, aproximadamente de 1 cm. Remover el material cada cierto tiempo para permitir la uniformidad del secado. Si no se cuenta con un área pavimentada, se puede utilizar cualquier otro material como base, como lonas de polietileno, para evitar el contacto directo con el suelo natural para evitar la contaminación de la puzolana.

- Cuando la puzolana está libre de humedad puede ser procesada, habrá que tamizarla en caso de existir piedras o partículas mayores de 3/8" o bien eliminar dichas partículas clasificándolas visualmente para alargar la vida útil del molino y para hacer más efectivo el proceso de trituración.
- Una vez listas la puzolana y la cal, se procede a la carga del molino. La dosificación es preferible realizarla por medio de pesos, aunque también puede hacerse volumétricamente, aforando recipientes adecuados, teniendo cuidado con la compactación durante el manejo del material. Los recipientes o instrumentos de medición deben ser propios e independientes para cada material. Las cantidades de la dosificación dependen del uso que se le dará al aglomerante, del tipo de puzolana a utilizar y del volumen de aglomerante que se producirá por molienda.
- Se procede a colocar los empaques y la tapadera del molino, teniendo cuidado de no dañar los espárragos. Luego se echa a andar el molino durante el tiempo determinado por la experimentación previa. Este tiempo se puede aprovechar por los operarios en realizar otro trabajo como: secado, tamizado y transporte de material.

- Al cumplirse el tiempo de molienda se detiene el molino y se procede a la descarga. A la vez que se hace la descarga del molino se puede envasar el material procesado, colocándolo en bolsas o sacos.
- Luego se procede a la identificación del producto, colocando los datos en el envase tales como: fecha de fabricación, tiempo de molienda, tipo de puzolana utilizada y cantidad de material que contiene el envase.
- El producto terminado se almacena en un lugar seco y adecuado, se debe evitar el contacto directo de los envases con el suelo.

La dosificación se obtiene de forma empírica con orientación de un experto a través de la experimentación de diversas proporciones y tiempo de molienda hasta alcanzar la finura adecuada en un tiempo óptimo de molienda. Este procedimiento debe realizarse al inicio de la producción y cada vez que cambie la materia prima a utilizar y las proporciones de molienda.

La proporción de cal y puzolana que se debe usar para producir el aglomerante cal puzolana tiene que ver con el uso que se le dará. La proporción general recomendada para su fabricación es de 20 % del peso total de cal y 80 % del peso total de puzolana.

Para el uso de morteros se puede aumentar la proporción de cal conforme la resistencia lo requiera o disminuir la proporción de cal en el caso de utilizar el material para estabilizar suelos, por ejemplo. La puzolana a utilizar también es bastante importante, teniendo que aumentar la proporción de cal con puzolanas de baja calidad, de reacción hidráulica baja o contaminadas con algún otro material.

5. MARCO EXPERIMENTAL

5.1. Metodología

La investigación se dividió en dos fases. Cada una de ellas conformada por una parte teórica y otra experimental. Las partes experimentales se realizaron en diversas secciones y laboratorios del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, que se mencionan a continuación.

La primera fase, en su parte teórica, consistió en la búsqueda y análisis de fuentes bibliográficas sobre aglomerantes naturales de origen volcánico; y en lo experimental, se evaluaron las características físicas, mediante la observación, de las mezclas de aglomerantes y agregados naturales de origen volcánico, y la incidencia del tipo de curado de las mismas, para utilizarse en la elaboración de bloques de tierra compactada. Esto se realizó en el Laboratorio de Concretos, Aglomerantes y Morteros. Además, se evaluaron las propiedades mecánicas de las muestras, posterior a su curado, mediante ensayos de resistencia a compresión, en el Laboratorio de Productos Manufacturados.

La segunda fase, en su parte teórica, consistió en la búsqueda y análisis de fuentes bibliográficas sobre bloques de tierra compactada. Dentro de lo experimental, previo a la elaboración de los bloques de tierra compactada, se realizaron ensayos de granulometría y límites de Atterberg, en el Laboratorio de Mecánica de Suelos; basados en los requerimientos de la normativa internacional se caracterizaron los materiales utilizados en la elaboración de los bloques.

Una vez fabricados los bloques de tierra compactada y estabilizados con aglomerante natural, se evaluó que los bloques cumplieran con los requerimientos de la normativa internacional, mediante los ensayos de resistencia a compresión, ensayo realizado en el Laboratorio de Productos Manufacturados; humectación y secado, erosión acelerada Swinburne y absorción de agua por capilaridad, estos últimos realizados en la sección de Ecomateriales.

Con lo descrito anteriormente, se pudo determinar si los bloques de tierra compactada estabilizados con aglomerante natural cal puzolana, satisfacen los requerimientos mínimos que exige la normativa internacional para su uso en la construcción.

5.1.1. Equipo utilizado en la preparación de los materiales que se utilizaron en la elaboración de los cubos con agregado y aglomerante de origen volcánico y los BTC

A continuación se describe el equipo utilizado en la preparación de los materiales utilizados en la elaboración de los cubos con agregado y aglomerante de origen volcánico y los BTC.

5.1.1.1. Molino de bolas

El molino de bolas, de la figura 2, está fabricado de acero; conformado por un cuerpo o casco conectado a unas chumaceras en sus extremos, que le sirven como soporte y a la vez como base sobre la cual gira; también, cuenta con una ventana que permite el ingreso del material y las bolas dentro del casco, y la inspección de la molienda. Además, posee un motor eléctrico trifásico, que permite transformar la energía eléctrica en energía mecánica.

Se utilizó para la molienda de la puzolana y posteriormente la mezcla de la puzolana molida con cal, donde se obtuvo el aglomerante natural.

En la figura 3, se muestran las bolas utilizadas en la molienda de la puzolana, que tienen en promedio un diámetro de 28 mm, aproximadamente; y un peso de bolas de 50 kg.

Figura 2. **Molino de bolas, marca Patterson con 0,1 m³ de capacidad**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 3. **Bolas utilizadas en la molienda de la puzolana**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.1.2. Molino de martillos

Se utilizó en la molienda del material limoso, que sirvió para la fabricación de los BTC. Este material se extrajo en terrón de un banco de material, por lo que se debió moler para obtener una finura tal, que permitió realizar la mezcla adecuadamente.

El molino de martillos, de la figura 4, está fabricado de metal; conformado por una tolva, donde se introduce el material a triturar; una cámara de trituración, donde se encuentran ubicados 14 martillos (ver figura 5), estos son de acero, con dimensiones de 9 cm de largo, 5 cm de ancho y 1 cm de espesor; dentro de esta

cámara se encuentra una lámina perforada de $\frac{1}{4}$ de pulgada de diámetro en cada agujero, que conecta con la salida del material del molino.

El molino para su funcionamiento, está conectado a un motor eléctrico trifásico.

Figura 4. **Molino de martillos, fabricado por DEL KYRIOS, S. A. Industria Metalmeccánica de Guatemala**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 5. **Cámara de trituración del molino de martillos**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.2. Equipo utilizado en la elaboración y ensayo de los cubos elaborados con agregado y aglomerante de origen volcánico

A continuación se describe el equipo utilizado en la elaboración y ensayo de los cubos elaborados con agregado y aglomerante de origen volcánico.

5.1.2.1. Balanza

Se utilizó en la dosificación en peso de las mezclas requeridas para la elaboración de los cubos con agregado y aglomerante de origen volcánico. Es una balanza mecánica de precisión (ver figura 6), con una capacidad de 2 610 gramos \pm 0,1 gramo de precisión.

Figura 6. **Balanza mecánica de precisión, marca Ohaus, 2 610 g de capacidad y 0,1 g de precisión**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.2.2. Moldes de acero

Se utilizaron en la elaboración de los cubos con agregado y aglomerante de origen volcánico. Estos moldes tienen una capacidad para 3 cubos por molde (ver figura 7).

Son fabricados según especificaciones de la Norma ASTM C109-11 *Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. Donde se indica que cada compartimiento cúbico debe tener una dimensión de 2 pulgadas por lado, los moldes deben ser separables en no más de dos partes y deben estar hechos de un metal duro para que los lados sean lo suficientemente rígidos para evitar ensanchamiento o alabeo.

Figura 7. **Moldes de acero, marca Forney**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.2.3. Mezcladora

La mezcladora utilizada para este proceso contiene las especificaciones de la Norma ASTM C 305-11 *Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. Se utilizó para el mezclado de agua con el agregado y aglomerante de origen volcánico, para la elaboración de los cubos.

La mezcladora, que se aprecia en la figura 8, es de tipo epicíclico, accionada por un motor mecánico eléctrico, capaz de impartir movimientos de rotación y traslación circular, simultáneamente a la paleta mezcladora. Tanto la paleta como el recipiente de mezcla son de acero inoxidable, fácilmente removibles. El recipiente tiene una capacidad de 4 litros, suficiente para que por cada proceso de mezclado se obtuvieran 6 cubos.

Figura 8. **Mezcladora marca Hobart N-50**



Fuente: Laboratorio de Concretos, Aglomerantes y Morteros. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.2.4. Mesa de flujo

Se utilizó para determinar el flujo de las mezclas utilizadas en la elaboración de los cubos.

Las especificaciones para la mesa de flujo se encuentran en la Norma ASTM C 230-08 *Standard Specification for Flow Table for Use in Test of hydraulic Cement*. La mesa de flujo, que se muestra en la figura 9, está conformada por un soporte o armazón rígida, fabricada de acero y una mesa superior circular y un molde cónico de flujo que se coloca en la parte central de la mesa, fabricados de bronce fundido.

Figura 9. Mesa de flujo marca Humboldt 3620



Fuente: Laboratorio de Concretos, Aglomerantes y Morteros. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.2.5. Cámara de curado acelerado

Se utilizó para el curado de los cubos con agregado y aglomerante de origen volcánico, mediante inmersión en agua a 80 °C.

La cámara de curado, que se muestra en la figura 10, posee un microprocesador de temperatura, que controla la temperatura en un intervalo desde la temperatura ambiente hasta 82 °C, con una precisión de ± 1 °C. Además, tiene un agitador magnético que permite una temperatura constante del agua en todo el interior de la cámara. Así también, posee una estantería, que se coloca dentro de la cámara, donde se colocan las muestras. El interior de la cámara y la estantería están fabricados de acero inoxidable. La cámara tiene una capacidad de 8 galones y sus dimensiones son de 19,5 pulgadas de longitud, 11,5 pulgadas de ancho y 8 pulgadas de alto.

Figura 10. Cámara de curado acelerado, marca Humboldt H 1390



Fuente: Laboratorio de Concretos, Aglomerantes y Morteros. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.2.6. Máquina universal

El funcionamiento de la máquina es mediante un sistema hidráulico, eléctrico y neumático; posee cuatro escalas, la primera de $600 \text{ kg} \pm 0,5 \text{ kg}$; la segunda de $3\,000 \text{ kg} \pm 2,5 \text{ kg}$; la tercera de $12\,000 \text{ kg} \pm 10 \text{ kg}$ y la cuarta de $60\,000 \text{ kg} \pm 50 \text{ kg}$. Utilizada para realizar ensayos a tensión o compresión de distintos materiales.

En la figura 11, se muestra la máquina universal que fue utilizada para realizar el ensayo de resistencia a compresión, siendo de suma importancia, en la determinación de la capacidad de resistencia a compresión de los cubos con agregado y aglomerante de origen volcánico.

Figura 11. **Máquina universal, marca Baldwin Lima-Hamilton, modelo MA18**



Fuente: Laboratorio de Productos Manufacturados. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.3. Equipo utilizado en la caracterización de los materiales utilizados en la elaboración de los BTC

A continuación se describe el equipo utilizado en la caracterización de los materiales utilizados en la elaboración de los BTC.

5.1.3.1. Copa de Casagrande

Se utilizó para la caracterización del material que sirvió como aglomerante natural, mediante el ensayo de límites de Atterberg, en la fabricación de los BTC.

Este es un dispositivo mecánico eléctrico (ver figura 12), que está conformado por una taza de latón suspendida de un pasador, diseñado para controlar su caída en una base de caucho endurecido, cuenta con un contador automático, que marca el número de golpes de la taza sobre la base.

Figura 12. **Copa de Casagrande, marca Humboldt H-4226**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.3.2. Tamizadora y tamices

Se utilizaron para la caracterización del material que se utilizó como agregado grueso, mediante el ensayo de granulometría, en la fabricación de los BTC.

Los tamices, de la figura 13, están conformados por un marco de latón y una malla de acero inoxidable, poseen un diámetro de 8 pulgadas. La tamizadora, que se muestra en la figura 14, tiene la capacidad de utilizar tamices de 8” a 12” de diámetro, posee un motor de $\frac{1}{4}$ hp con un temporizador hasta 30 minutos, sus dimensiones son de 21” de largo, 18” de ancho y 47” de altura.

Figura 13. Batería de tamices, marca Humboldt



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 14. **Tamizadora mecánica, marca Humboldt-4330**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.3.3. Horno universal

Se utilizó en el secado de los materiales utilizados en los ensayos de granulometría y límites de Atterberg.

El interior del horno está forrado con láminas de acero aluminado resistente a la corrosión que permiten la transmisión de calor de manera uniforme dentro del horno; cuenta con 3 parillas de acero inoxidable donde se colocan los materiales; la puerta del horno tiene un cierre termoplástico para evitar fuga de calor, tiene un tango de temperatura máxima de 225 °C y las dimensiones son de 20" de largo, 16" de ancho y 30" de altura (ver figura 15).

Figura 15. **Horno universal, marca Humboldt H-30128**



Fuente: GENEQ inc. *Instruments scientifiques*.

<http://www.geneq.com/catalog/images/s/specials-sections/Lab-Equipment.pdf>. Consulta: julio de 2015.

5.1.4. Equipo utilizado en la elaboración y ensayo de los BTC

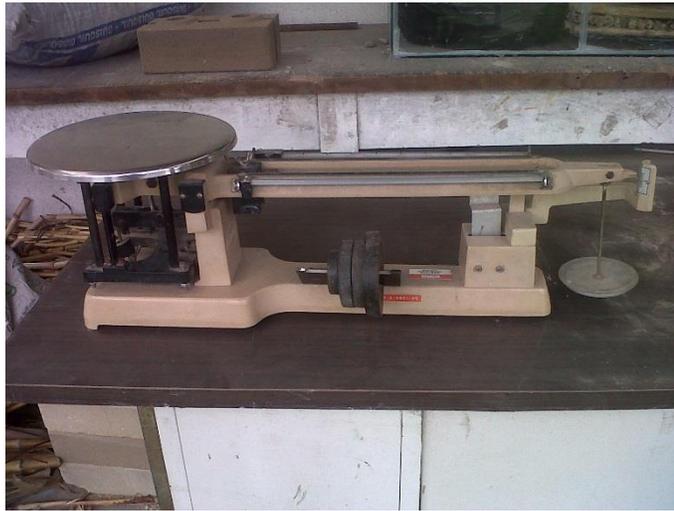
A continuación se describe el equipo utilizado en la elaboración y ensayo de los BTC.

5.1.4.1. Balanza

Se utilizó en la dosificación en peso de las mezclas requeridas para la elaboración de los BTC.

Así también, se utilizó para determinar el peso de las unidades en los ensayos requeridos por la normativa internacional (ver figura 16).

Figura 16. **Balanza de precisión Heavy Duty, marca Ohaus, 20 kg de capacidad y 0,1 g de precisión**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.4.2. Prensa manual

Se utilizó para elaborar los bloques de tierra compactada, que sirvieron para el desarrollo y culminación del presente trabajo de investigación.

El modelo de los bloques es de origen tailandés, donde los BTC tienen trabes macho, en la parte superior, y hembra, en la parte inferior, que se entrelazan en el levantamiento de muros. Esto conlleva a un proceso de construcción rápido, ya que no requiere de mortero de pega entre las caras de los bloques.

La prensa manual está fabricada por placas de acero de media pulgada de espesor. Las dimensiones del molde son de 30 cm de largo, 15 cm de ancho y 10 cm de altura. Se pueden elaborar bloques en U, bloques esquineros, mitades de bloques y bloques completos. Además, cuenta con un tubo de acero de 190 cm de longitud y de 6,35 cm de diámetro, que sirve de palanca para comprimir el material dentro del molde de la prensa (ver figura 17).

Figura 17. **Prensa manual para la fabricación de BTC**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.4.3. Termómetros

Se utilizaron para medir la temperatura en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$) dentro de la cámara de curado tipo invernadero y del ambiente (ver figura 18).

Figura 18. **Termómetro de madera de -30 a 50 °C de capacidad**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.4.4. Vernier

Utilizado para medir las oquedades, producidas por el impacto de flujo de agua en la cara del BTC, en el ensayo de erosión acelerada Swinburne (ver figura 19).

Figura 19. **Vernier con carátula, marca Mitutoyo**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.4.5. Diseño y construcción del equipo utilizado en el ensayo de humectación/secado

El equipo utilizado en el ensayo de humectación/secado se diseñó e implemento según los requerimientos de la Norma Española UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”.

El equipo necesario para la realización del ensayo estuvo conformado por:

- Una bandeja, capaz de contener el volumen de agua necesario para el ensayo (ver figura 20).

Figura 20. **Bandeja utilizada en el ensayo de humectación/secado**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Tres piezas de apoyo, de vidrio reciclado, de 3 mm de altura (ver figura 21).

Figura 21. **Piezas de apoyo utilizadas en el ensayo de humectación/secado**

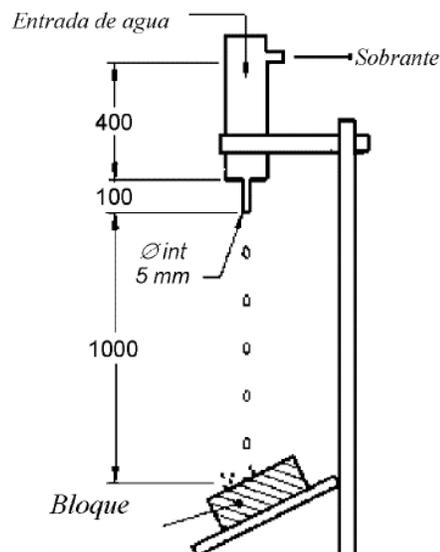


Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.4.6. Diseño y construcción del equipo utilizado en el ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)

El equipo utilizado en el ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET) se diseñó e implemento según los requerimientos de la Norma Española UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo” (ver figura 22 y 23).

Figura 22. Esquema del equipo utilizado en el ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)



Fuente: Norma UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”.
(Medidas en milímetros. Sin escala). p. 17.

Las herramientas y materiales utilizados en la construcción del equipo son reciclados en su mayoría, los cuales se describen a continuación:

- Madera: reciclada, de 1 pulgada de espesor, dentro de las instalaciones de la sección de Prefabricados del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la USAC. Se utilizó para la construcción de las bases del tanque de almacenamiento y soporte de colocación del BTC a ensayar.
- Tubería PVC: reciclada dentro las instalaciones de la sección de Prefabricados del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la USAC. Se utilizó para la construcción del tanque de almacenamiento, de 4 pulgadas de diámetro, y como medio de conexión de entrada y rebalse del mismo, de 0,5 pulgadas de diámetro.
- Manguera: reciclada dentro de las instalaciones de la sección de Prefabricados del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la USAC. Se utilizó como medio de conexión de entrada del fluido al tanque de almacenamiento y como un medio de rebalse del mismo tanque.
- Conexiones de PVC: reciclados, de 0,5 pulgadas de diámetro, dentro de las instalaciones de la sección de Prefabricados del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la USAC. Utilizados para conectar la tubería de entrada y de rebalse al tanque de almacenamiento.
- Andamio de acero: reciclado dentro de las instalaciones de la sección de Prefabricados del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la USAC. Utilizado como marco soporte del equipo a utilizar en el ensayo.
- Hule: reciclado de neumático de vehículo. Con el que se elaboraron los empaques que se colocaron en la entrada y rebalse del tanque de almacenamiento, con el fin de asegurar la colocación de los accesorios en dichos puntos. Así también, evitar la salida de fluido por los mismos.

- Pajilla: reciclado de un soporte de globos, de 10 cm de largo y 5 mm de diámetro. Utilizado como salida del fluido del tanque de almacenamiento.
- Materiales no reciclados: se utilizó pegamento para tubería de PVC para la unión de la tubería de entrada y de rebalse; la pajilla y el tapón PVC al tanque de almacenamiento. El tapón PVC se utilizó como fondo de dicho tanque.

Figura 23. **Equipo utilizado en el ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

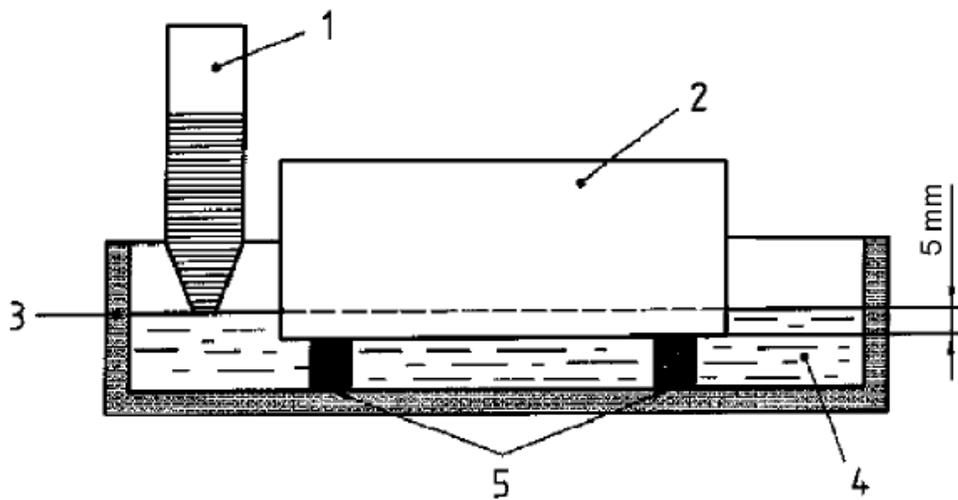
5.1.4.7. Diseño y construcción del equipo utilizado en el ensayo de absorción de agua por capilaridad

El equipo utilizado en el ensayo de absorción de agua por capilaridad se diseñó e implemento según los requerimientos de la norma española UNE-EN 772-11 “Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 11: Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería de hormigón, hormigón celular curado en autoclave, piedra artificial y piedra natural, y la tasa de absorción de agua inicial de las piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería” (ver figuras 24 y 25).

Las herramientas y materiales utilizados en la construcción del equipo son reciclados, los cuales se describen a continuación:

- Bandeja: utilizada como recipiente
- Perfiles de acero: utilizados como soportes regulables
- Madera y bambú: como base de soporte para el depósito
- Botella de plástico: utilizado como depósito

Figura 24. **Esquema del equipo utilizado en el ensayo de absorción de agua por capilaridad**



Fuente: Norma UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo” (sin escala). p. 18.

Descripción de los componentes enumerados en la figura anterior:

1. Depósito (nivel constante)
2. BTC
3. Cubeta
4. Agua potable
5. Soportes regulables

Figura 25. **Equipo utilizado en el ensayo de absorción de agua por capilaridad**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.4.8. Diseño y construcción de la cámara de curado tipo invernadero

La cámara de curado tipo invernadero, se diseñó y construyó con el fin de acelerar la capacidad de resistencia de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana (ver figura 28).

Las herramientas y materiales utilizados para su construcción fueron:

- Andamio de acero: reutilizado como armazón de la cámara de curado.
- Planchas de acero: reutilizadas como bases, donde se colocaron los BTC dentro de la cámara de curado (ver figura 26).

Figura 26. **Armazón de la cámara de curado tipo invernadero**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Lienzo de polietileno: utilizado para forrar el andamio y, de esa manera, que la cámara de curado fuera hermética (ver figura 27).

Figura 27. **Forro de la cámara de curado tipo invernadero**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 28. **Cámara de curado tipo invernadero**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.4.9. Máquina universal

La máquina universal se utilizó para determinar la capacidad de resistencia a compresión de los BTC, mediante el ensayo de resistencia a compresión. Para mayor información de este equipo referirse a la sección 5.1.2.6. (ver figura 11).

5.1.5. Materiales

A continuación se detallan las especificaciones de los materiales utilizados en el proceso experimental de la presente investigación.

5.1.5.1. Cemento tipo UGC

Se utilizó para la estabilización de los BTC, siendo estos un punto de comparación en los resultados de los ensayos correspondientes, que exige la normativa internacional, con respecto a los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana (ver figura 29).

Él mismo, cumple con la Norma ASTM 1157 "*Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*", donde se clasifican los cementos por tipo con base en los requisitos específicos, para uso general, alta resistencia inicial, desarrollo lento de resistencia, resistencia al ataque de sulfatos, y calor de hidratación.

Figura 29. **Bolsa de cemento tipo UGC, vista frontal y lateral**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.5.2. Cal hidratada

Este material se utilizó para conformar el aglomerante natural cal-puzolana (ver figura 30).

Este está regulado por la Norma ASTM C 207-06 “*Standard Specification for Hydrated Lime for Masonry Purposes*”. Esta especificación cubre los morteros de pega para uso en la construcción de estructuras de unidades de mampostería no reforzadas y reforzadas. Se cubren cuatro tipos de morteros de pega en cada una de las dos especificaciones incluidas: por proporciones y por propiedades, también se indican los ensayos que se deben realizar a los dichos morteros.

Figura 30. **Bolsa de cal hidratada Horcalsa**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.5.3. Material tierra

El material tierra que se utilizó en la elaboración de los BTC estuvo conformado por puzolana y limo altamente plástico.

5.1.5.3.1. Puzolana

Se utilizó parte como agregado, en el material base para la fabricación de los BTC y otra, como aglomerante natural cal puzolana para la estabilización de los mismos (ver figura 32). La puzolana se obtuvo en un banco de material ubicado en el km 90 de la carretera Interamericana, Tecpán, Chimaltenango, Guatemala (ver figura 31).

Figura 31. Banco de material, Tecpán, Chimaltenango, Guatemala



Fuente: carretera Interamericana km 90, Tecpán, Chimaltenango, Guatemala.

Figura 32. Puzolana molida



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.5.3.2. Limo

El material que se utilizó como aglomerante natural en el material base para la fabricación de los BTC fue un limo altamente plástico. Este material se obtuvo en un banco de material ubicado en el km 10,5, Santa Cruz Chinautla, Guatemala (ver figura 33).

Figura 33. **Limo altamente plástico**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.5.4. Agua

El agua que se utilizó, para la mezcla de los materiales con que se fabricaron los cubos de aglomerante natural de origen volcánico y los BTC, fue de una fuente de agua conocida, cumpliendo con lo requerido en la norma UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”.

5.1.6. Caracterización de los materiales

El estudio de los materiales que se utilizaron en la fabricación de los BTC se realizó en el Laboratorio de Mecánica de Suelos, del Centro de Investigaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Los ensayos que se utilizaron para la caracterización de los materiales fueron:

5.1.6.1. Granulometría

Con base en los requerimientos de la normativa UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”, se realizó el ensayo de granulometría por tamizado, a una muestra de puzolana natural que se utilizó como agregado en la fabricación de los BTC, basado en la Norma ASTM “*Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*”. También, el ensayo de granulometría por lavado a una muestra del mismo material, para corroborar los resultados de la granulometría anterior, basados en la Norma ASTM C 117 – 13 “*Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*”.

5.1.6.2. Límites de Atterberg

Con base en los requerimientos de la normativa UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”, se realizó el ensayo de límites de Atterberg al limo, de acuerdo a las recomendaciones de la Norma ASTM D 4318 – 10 “*Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*”, para determinar la plasticidad de este material, que se utilizó, como estabilizante natural, en la fabricación de los BTC.

5.1.7. Mezclas de aglomerante natural cal puzolana y agregado de origen volcánico

A continuación se detalla el proceso de elaboración, ensayo y curado para las distintas mezclas de aglomerante natural cal puzolana y agregado de origen volcánico.

5.1.7.1. Elaboración de las mezclas

La elaboración de las mezclas del aglomerante se realizaron en el Laboratorio de Concretos, Aglomerantes y Morteros del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Se realizaron cuatro mezclas distintas de agregado y aglomerante natural cal puzolana. El agregado que se utilizó fue la puzolana en estado natural. El aglomerante natural está conformado por el 80 % de puzolana molida y 20 % de cal, ambas con respecto al peso total de la cantidad de aglomerante.

A continuación se muestran las características y proporciones utilizadas en cada una de las mezclas:

- Mezcla 1: el agregado natural que se usó fue el material que pasó el tamiz de 3/8. Se utilizó una proporción en peso de 1: 1.4: 0.6 (aglomerante: agregado: agua).

Tabla I. **Mezcla 1**

Materiales	Cantidad
Puzolana molida (g)	532,3
Cal (g)	77,1
Agregado (g)	853,2
Agua (ml)	370

Fuente: elaboración propia.

- Mezcla 2: el agregado natural que se utilizó fue el material que pasó el tamiz de 3/8. Se empleó una proporción en peso de 1: 3: 1.1 (aglomerante: agregado: agua).

Tabla II. **Mezcla 2**

Materiales	Cantidad
Puzolana molida (g)	268,2
Cal (g)	67
Agregado (g)	1 005,6
Agua (ml)	345

Fuente: elaboración propia.

- Mezcla 3: el agregado natural que se manejó fue el material que pasó el tamiz de 3/8 y se agregó un 20 % más del mismo material que pasó el tamiz 50. Se utilizó una proporción en peso de 1: 2: 0.9 (aglomerante: agregado: agua).

Tabla III. **Mezcla 3**

Materiales	Cantidad
Puzolana molida (g)	532,3
Cal (g)	77,1
Agregado (g)	1 218,8
Agua (ml)	555

Fuente: elaboración propia.

- Mezcla 4: el agregado natural que se utilizó solamente fue el que pasa el tamiz 4 y retenido en el tamiz 50. Se usó una proporción en peso de 1: 4: 1.7.

Tabla IV. **Mezcla 4**

Materiales	Cantidad
Puzolana molida (g)	268,2
Cal (g)	67
Agregado (g)	1 340,8
Agua (ml)	585

Fuente: elaboración propia.

- Mezclado del material

El proceso de mezclado del agregado y aglomerante natural cal puzolana se basó en el procedimiento descrito por la Norma ASTM C 593 – 06 “*Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization*”, donde se indica el procedimiento ordenado y cronometrado del

mezclado (ver apéndice 1). Por cada proceso de mezclado se obtuvieron 6 cubos, cada uno con dimensiones 5 x 5 x 5 centímetros (ver figura 34).

Figura 34. **Mezclado del material en la mezcladora**



Fuente: Laboratorio de Concretos, Aglomerantes y Morteros. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- **Determinación del flujo de la mezcla**

De acuerdo a los requerimientos de la Norma ASTM C 593 – 06 “*Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization*”, indica que el flujo de la mezcla debe estar dentro del rango de 65 a 75, en la suma de los 4 diámetros, luego de 10 caídas (golpes) en 6 segundos (ver apéndice 1). Este procedimiento sirvió para determinar si la cantidad de agua en la mezcla se encuentra dentro del rango indicado por la normativa (ver la figura 35).

Figura 35. **Colocación de la mezcla en la mesa de flujo**



Fuente: Laboratorio de Concretos, Aglomerantes y Morteros. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Llenado de moldes

El llenado de moldes se basó en el procedimiento de apisonado manual descrito por la Norma ASTM C 593 – 06 “*Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization*” (ver apéndice 1).

Primero, se colocó aceite hidráulico en los moldes; luego, se colocó una capa de mortero alrededor de 25 mm (1 pulgada) en todos los compartimientos del molde y se apisonó el mortero 32 veces en aproximadamente 20 segundos. Cuando el apisonado de la primera capa en todos los compartimientos cúbicos se completó, se llenaron los compartimientos con el mortero restante y se apisonó como se especificó para la primera capa. Y por último se rasaron los moldes (ver figura 36).

Figura 36. **Moldes llenos con la mezcla**



Fuente: Laboratorio de Concretos, Aglomerantes y Morteros. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

A los siete días después de haber llenado los moldes, con las mezclas preparadas, se procedió a desencofrar las muestras y al curado de los mismos.

5.1.7.2. Curado

Por medio de los resultados de pruebas anteriores elaboradas, en la sección de Ecomateriales del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se decidió someter los cubos de cada una de las muestras a distintos tipos de curado, para tener una serie de opciones y poder elegir el mejor tipo de curado, de acuerdo a los resultados obtenidos en laboratorio; para luego utilizarlo en el curado de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana.

A continuación se describe el proceso de curado, para cada una de las muestras de las mezclas elaboradas anteriormente:

- Muestras de la mezcla 1: se utilizaron dos tipos de curado; el primero, el curado a vapor (ver figura 37) y el segundo, inmersión en agua a 80 °C (ver figura 38), para ambos tipos de curado se utilizó la cámara de curado acelerado. Se elaboraron 12 cubos, por cada media hora de curado se sacaban 3 cubos. Por lo que se obtuvieron 4 muestras para un tiempo de curado distinto, en un intervalo de media hora.

Figura 37. **Curado a vapor**



Fuente: Laboratorio de Concretos, Aglomerantes y Morteros. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 38. **Curado en inmersión en agua a 80 °C**



Fuente: Laboratorio de Concretos, Aglomerantes y Morteros. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Muestras de la mezcla 2:
 - Sin curado: luego de desencofrar las muestras de la mezcla 2, los cubos se colocaron sobre una mesa en las condiciones del ambiente, bajo sombra. Se elaboraron 12 cubos (ver figura 39).

Figura 39. **Cubos de las muestras sin curado**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Inmersión en agua a 80 °C: para este tipo de curado se utilizó la cámara de curado acelerado. Se elaboraron 12 cubos, por cada media hora de curado se sacaban 3 cubos. Por lo que se obtuvieron 4 muestras para un tiempo de curado distinto, en un intervalo de media hora (ver figura 38).

- Muestras de la mezcla 3:
 - Sin curado: se elaboraron 9 cubos. Luego de desencofrar las muestras, se colocaron sobre una mesa en las condiciones del ambiente, bajo sombra, hasta el día del ensayo correspondiente (ver figura 39).
 - Inmersión en agua a 80 °C: para este tipo de curado se utilizó la cámara de curado acelerado. Se elaboraron 9 cubos, por cada media hora de curado se sacaban 3 cubos. Por lo que se obtuvieron 3 muestras para un tiempo de curado distinto, en un intervalo de media hora (ver figura 38).
 - Inmersión en agua a temperatura ambiente: para este tipo de curado los cubos se sumergieron en un recipiente lleno de agua. Se elaboraron 9 cubos. Los cubos se fueron sacando del recipiente un día antes del ensayo (ver figura 40).

Figura 40. **Curado en agua a temperatura ambiente**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Muestras de la mezcla 4: se utilizaron los mismos tipos de curados y número de muestras por curado que las muestras de la mezcla 3.

5.1.7.3. Ensayo

Para determinar la resistencia mecánica a compresión de los cubos, que se elaboraron de las mezclas anteriores, se realizó el ensayo de resistencia a compresión, por lo cual se usó la máquina universal.

El procedimiento de ensayo a compresión se basó en el procedimiento que indica la Norma ASTM C 109 – 11 “*Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2-inches or 50-millimeters Cube Specimens)*” (ver figuras 41 y 42).

Con la información del ensayo de carga y área de aplicación de carga, se determinó la resistencia de la muestra, mediante la siguiente fórmula:

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

Donde:

σ = resistencia de compresión (MPa)

P= carga total máxima (N)

A= área de la superficie de carga (m²)

Para las muestras de las mezclas donde se ensayaron más de un cubo, se determinó el valor de la media aritmética.

Figura 41. **Ensayo a compresión en la máquina universal**



Fuente: Laboratorio de Productos Manufacturados. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 42. **Falla a compresión luego del ensayo**



Fuente: Laboratorio de Productos Manufacturados. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.8. Bloques de tierra compactada (BTC) estabilizados con aglomerante natural cal puzolana y los estabilizados con cemento tipo UGC

A continuación se detalla el proceso de elaboración, curado y ensayo de los BTC.

5.1.8.1. Elaboración de los bloques

Con base en investigaciones anteriores, se determinó primero, el porcentaje de los materiales que conformaron la mezcla base, que se utilizó para la fabricación de los bloques de tierra cruda, es decir, sin estabilizar. Posteriormente, se trabajó en la estabilización de los BTC.

El proceso de estabilización se basó en los requerimientos de la Norma UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”, donde indica que el contenido total del material estabilizante utilizado, debe ser menor o igual al 15 % de la masa en seco del BTC.

En la elaboración de los bloques de tierra cruda, se utilizó una mezcla base de 80 % de puzolana natural como agregado y 20 % de limo altamente plástico como aglomerante natural, de un total de 6 kilos de mezcla en seco, correspondiente para cada BTC. De la figura 43 a la 49 se muestra el proceso de elaboración de los bloques de tierra compactada.

Luego, se fabricaron BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana con un 5, 10 y 15%. Para poder determinar, mediante los resultados de los ensayos, cual es el mínimo porcentaje requerido de estabilizante necesario

para que los bloques cumplan con lo requerido por la normativa internacional. La cantidad de estabilizante utilizado según el porcentaje, es sobre el total de los 6 kilos de la mezcla base.

Además, se fabricó otra serie de BTC estabilizados con cemento tipo UGC, con los mismos porcentajes de estabilización a los anteriores; con el fin de tener un punto de comparación con los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana (ver tablas V y VI).

Tabla V. **Cantidad de materiales para la elaboración de un BTC estabilizado**

Cantidad de materiales para la elaboración de un BTC estabilizado		
Materiales	Porcentaje	Cantidad (kg)
Puzolana en estado natural	80 %	4,8
Limo altamente plástico	20 %	1,2
Aglomerante cal puzolana	5 %	0,3
	10 %	0,6
	15 %	0,9
Cemento tipo UGC	5 %	0,3
	10 %	0,6
	15 %	0,9

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Cantidad de materiales en porcentaje de aglomerante cal puzolana**

Materiales	Porcentaje	Cantidad en porcentaje de aglomerante cal puzolana (kg)		
		5 %	10 %	15 %
Puzolana molida	80 %	0,24	0,48	0,72
Cal	20 %	0,06	0,12	0,18

Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Mezclado del material para la fabricación de los BTC**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 44. **Peso del material para la fabricación de un BTC**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 45. **Colocación del material dentro del molde de la prensa manual**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 46. **Acomodo del material dentro del molde de la prensa manual**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 47. **Fabricación del BTC**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 48. **BTC fabricado**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 49. **Colocación de los BTC en una superficie plana**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.8.2. Curado

Acorde a la teoría, el aglomerante natural cal puzolana reacciona en presencia de humedad a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes. Por lo que se utilizó la cámara de curado tipo invernadero en el curado de los BTC estabilizados con este aglomerante, con el fin de acelerar la capacidad mecánica de resistencia (ver figura 50).

Los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana se regaron 3 veces al día; a las 9:00 am, 12:00 pm y 15:00 pm, para mantenerlos húmedos el mayor tiempo posible. Estos bloques se curaron durante 14 días; luego, se dejaron dentro de la cámara para su secado.

Figura 50. **Curado de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana dentro de la cámara de curado tipo invernadero**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Los BTC estabilizados con cemento tipo UGC se sometieron al mismo proceso de curado que los bloques estabilizados con aglomerante natural cal puzolana.

Estos BTC se colocaron en un lugar donde no corría mucho viento y bajo la sombra, para mantener los bloques lo más húmedo posible. Luego, se dejaron en el mismo sitio para su secado al ambiente (ver figura 51).

Figura 51. **Secado al ambiente de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Tanto los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana como los estabilizados con cemento tipo UGC, luego de haberse secado, se guardaron en una bodega (ver figura 52), para la preservación de los mismos; hasta el día que se realizaron los ensayos requeridos por la normativa internacional.

Figura 52. **Bodega donde se guardaron los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana y los de cemento tipo UGC**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.1.8.3. Ensayos

Los ensayos a los que se sometieron los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana, como los estabilizados con cemento tipo UGC, se basaron en los requerimientos de la normativa UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”, donde se indica el procedimiento que se debe seguir para cada uno de los mismos.

A continuación se describe el procedimiento de cada uno de los ensayos, que se llevaron a cabo en esta investigación:

- Ensayo a compresión

Para determinar la resistencia mecánica a compresión de los BTC estabilizados, se hizo uso de la máquina universal (ver figuras 53 y 54).

El procedimiento de ensayo a compresión se basó en lo indicado por la Norma UNE-EN 772-1 “Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión” y la normativa UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”. Así también, se indica la velocidad de aplicación de carga durante el ensayo (ver tabla VII); la clasificación de los BTC estabilizados según la capacidad de resistencia a compresión que posean y el número de bloques a ensayar. En el orden respectivo (ver tabla VIII).

Con la información del ensayo de carga y área de aplicación de carga, se determinó la resistencia de la muestra, mediante la siguiente fórmula:

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

Donde:

σ = resistencia de compresión (MPa)

P= carga total máxima (N)

A= área bruta de aplicación de carga (m²)

Se determinó el valor de la media aritmética, ya que por cada muestra son 3 BTC estabilizados ensayados.

Tabla VII. **Velocidad de aplicación de la carga**

Resistencia a compresión prevista (N/mm²)	Velocidad de aplicación de la carga (N/mm²)/s
<10	0,05
11 a 20	0,15
21 a 40	0,3
41 a 80	0,6
>80	1,0

Fuente: Norma UNE-EN 772-1 "Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. p. 12.

Tabla VIII. **Clasificación de los BTC según su resistencia normalizada a compresión**

Clasificación	BTC 1	BTC 3	BTC 5
Resistencia a compresión (MPa)	1,3	3	5

Fuente: elaboración propia.

Figura 53. **Ensayo a compresión de un BTC estabilizado con 5 % de aglomerante natural cal puzolana**



Fuente: Laboratorio de Productos Manufacturados. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 54. **Falla del BTC estabilizado con 5 % de aglomerante natural cal puzolana luego del ensayo a compresión**



Fuente: Laboratorio de Productos Manufacturados. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Ensayo humectación/ secado

Para la elaboración de este ensayo se utilizó el equipo que se construyó en la sección de Ecomateriales del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, de acuerdo a los requerimientos de la Norma UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”.

Para el ensayo se tomaron dos bloques enteros, utilizando uno de ellos como referencia, para cada porcentaje utilizado de estabilización.

El procedimiento de ensayo se basó en lo indicado por la misma norma. Este consistió en colocar la cara del bloque dentro de la bandeja y sobre los apoyos. Se añadió agua, hasta que el bloque quedo sumergido 10 mm. El bloque se mantuvo sumergido 30 segundos. Luego, se sacó de la bandeja y se dejó secar al aire, hasta igualar el color del bloque que se utilizó de referencia. Se observó el estado del bloque, anotando si aparecían las condiciones de rechazo, enumeradas por la misma norma. Se repitió 6 veces el ciclo de inmersión/secado/observación. Al sexto ciclo, se dejó secar completamente y se observó (ver figuras 55 y 56).

Los BTC, que se ensayaron según el procedimiento anterior, serán aptos si tras seis ciclos de humectación/secado, no se observa ninguna condición de rechazo, enumeradas en la misma norma.

Las condiciones de rechazo, que enumera la Norma UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”, en la sección 5.7, son las siguientes:

- Modelo de grietas aleatorio.
- Modelo de grietas en estrella.
- Hinchamiento local.
- Picado local en al menos 5 zonas.
- Pérdida general o local de capas de suelo.
- Penetración de agua en más del 70 % de la anchura del BTC (visualmente por el exterior).
- Pérdida de fragmentos mayores a 50 mm, excepto los que provengan de la parte comprendida entre los bordes y 50 mm hacia adentro.
- Eflorescencias en la superficie.

Figura 55. **Ensayo de humectación/secado de un BTC estabilizado con 10 % de aglomerante natural cal puzolana**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 56. **Observación luego del ensayo de humectación/secado de un BTC estabilizado con 10 % de aglomerante natural cal puzolana**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)

Para la elaboración de este ensayo se utilizó el equipo que se construyó en la sección de Ecomateriales del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, con base en las especificaciones de la Norma UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”.

Se ensayaron dos bloques enteros para cada uno de los porcentajes de estabilización utilizado en la fabricación de los BTC, estabilizados con aglomerante natural cal puzolana como para los de cemento tipo UGC.

El procedimiento de ensayo se basó en lo indicado por la misma norma. Este consistió en dejar caer una corriente de agua continua de agua sobre el

bloque durante 10 minutos a través de un tubo de salida de 5 mm de diámetro, conectado a un tanque de agua de nivel constante, cuya cabecera se encontraba a 1,5 metros sobre la cara del bloque. Este se mantiene inclinado a 27° respecto a la horizontal (ver figura 57). Con un vernier, se midió la profundidad de las oquedades, que resultan del impacto de la corriente de agua sobre la cara del bloque (ver figuras 58 y 59).

Los BTC ensayados se consideraran como “aptos” o “no aptos”, según el criterio de la tabla IX.

Tabla IX. **Resistencia a la erosión. Criterios de aceptación o rechazo**

Propiedad	Criterio	Resultado
D, (profundidad de oquedad, 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.

Figura 57. **Ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET) a los BTC estabilizados**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 58. **Oquedades producto del impacto del flujo de agua sobre la cara de los BTC estabilizados**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 59. **Medida de las oquedades, ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Ensayo de absorción de agua por capilaridad

Para la elaboración de este ensayo se utilizó el equipo que se construyó en la sección de Ecomateriales del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, acorde a los requerimientos que exige la Norma UNE-EN 772-11 “Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 11: Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería de hormigón, hormigón celular curado en autoclave, piedra artificial y piedra natural, y la tasa de absorción de agua inicial de las piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería”.

Se ensayaron tres bloques enteros para cada tipo de material, con sus respectivos porcentajes de estabilización, utilizados en la fabricación de los BTC.

El procedimiento de ensayo se basó en lo indicado por la misma norma. Este consistió en medir las dimensiones de la cara del bloque a ensayar; luego, se coloca el bloque dentro de la bandeja sobre los apoyos, de manera que la cara del bloque no toque el fondo de la bandeja, y se sumergió en agua hasta una profundidad de 5 mm durante 10 minutos. Después del tiempo de inmersión, se sacó el bloque de la bandeja, se retiró el agua de la superficie de la cara sumergida y se pesó (ver figuras 60 y 61).

Para determinar el coeficiente de absorción de agua por capilaridad de los BTC estabilizados, se utilizó de la siguiente ecuación:

$$C_{w,s} = \frac{m_{so,s} - m_{seco,s}}{A_s * \sqrt{t_{so}}} * 10^6 \left[\frac{g}{m^2 * s^{0,5}} \right]$$

Donde:

$C_{w,s}$ = coeficiente de absorción de agua por capilaridad $\left[\frac{g}{m^2 \cdot s^{0,5}} \right]$

$m_{so,s}$ = masa del BTC húmedo (g)

$m_{seco,s}$ = masa del BTC seco (g)

A_s = área bruta de contacto del BTC (m^2)

t_{so} = tiempo de inmersión del BTC ($s^{0,5}$)

Luego se determinó el valor de la media aritmética, ya que por cada muestra se ensayaron 3 BTC.

Figura 60. **Peso del BTC antes del ensayo de absorción de agua por capilaridad**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 61. **Ensayo de absorción de agua por capilaridad**



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

5.2. Resultados

A continuación se muestran los resultados, obtenidos en laboratorio, de las mezclas de aglomerante natural cal puzolana y agregado de origen volcánico, y los BTC.

5.2.1. Mezclas de aglomerante natural cal puzolana y agregado de origen volcánico

A continuación se muestran, de acuerdo al tipo de curado, los resultados de mayor relevancia obtenidos del ensayo a compresión, de las muestras de las distintas mezclas de aglomerante natural cal puzolana y agregado de origen

volcánico, que se elaboraron en el Laboratorio de Concretos, Aglomerantes y Morteros del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

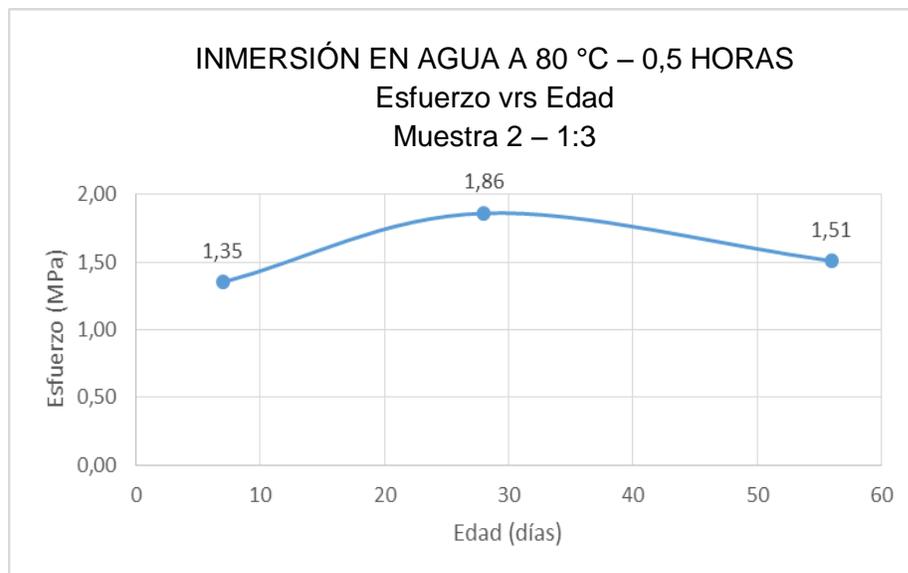
- Inmersión en agua a 80 °C

Tabla X. **Esfuerzos de la mezcla 2 para media hora de curado respecto a la edad de ensayo de la muestra**

Tiempo de curado (h)	Esfuerzo 7 días (MPa)	Esfuerzo 28 días (MPa)	Esfuerzo 56 días (MPa)
0,5	1,35	1,86	1,51

Fuente: elaboración propia.

Figura 62. **Esfuerzos de la mezcla 2 para media hora de curado respecto a la edad de ensayo de la muestra**



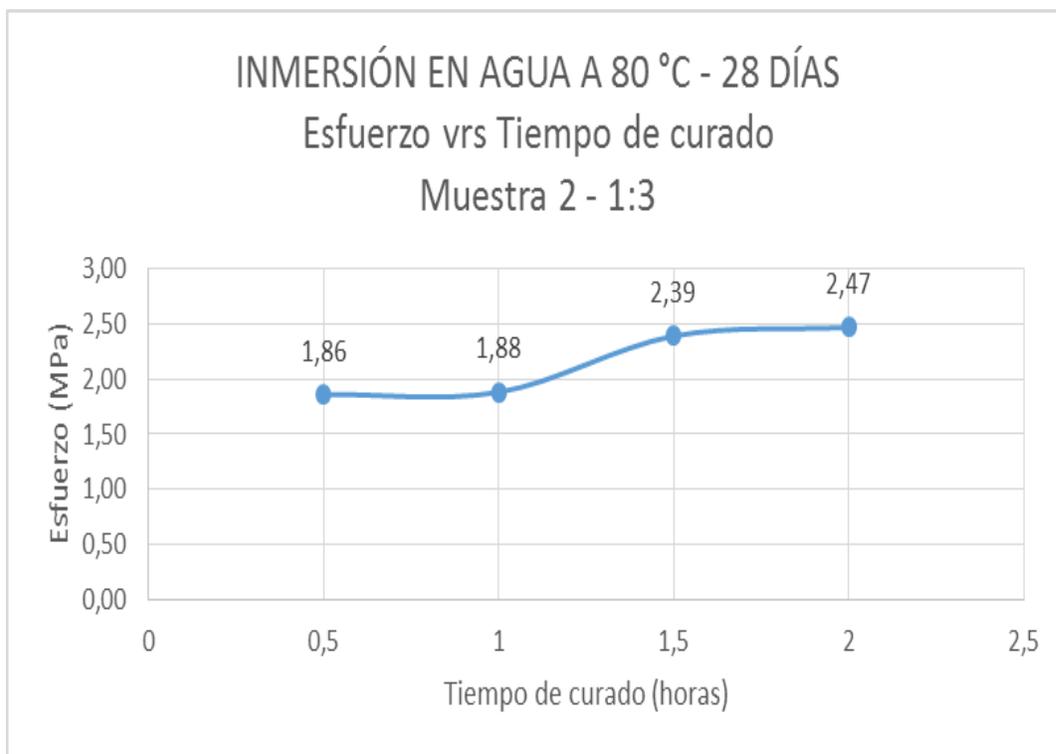
Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2013.

Tabla XI. **Esfuerzos de la mezcla 2 para una edad de 28 días respecto a distintos tiempos de curado**

Tiempo de curado (h)	Esfuerzo 28 días (MPa)
0,5	1,86
1	1,88
1,5	2,39
2	2,47

Fuente: elaboración propia.

Figura 63. **Esfuerzos de la mezcla 2 para una edad de 28 días respecto a distintos tiempos de curado**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2013.

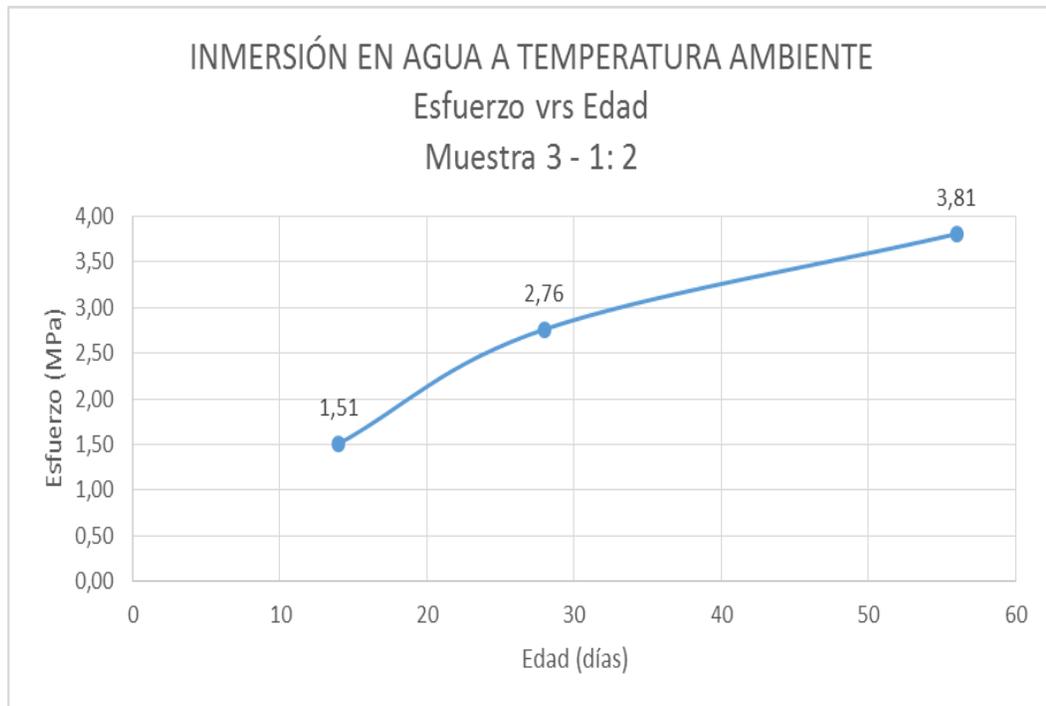
- Inmersión en agua a temperatura ambiente

Tabla XII. **Esfuerzos de la mezcla 3 respecto a la edad de ensayo de la muestra**

Tiempo (días)	Esfuerzo (MPa)
14	1,51
28	2,76
56	3,81

Fuente: elaboración propia.

Figura 64. **Esfuerzos de la mezcla 3 respecto a la edad de ensayo de la muestra**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2013.

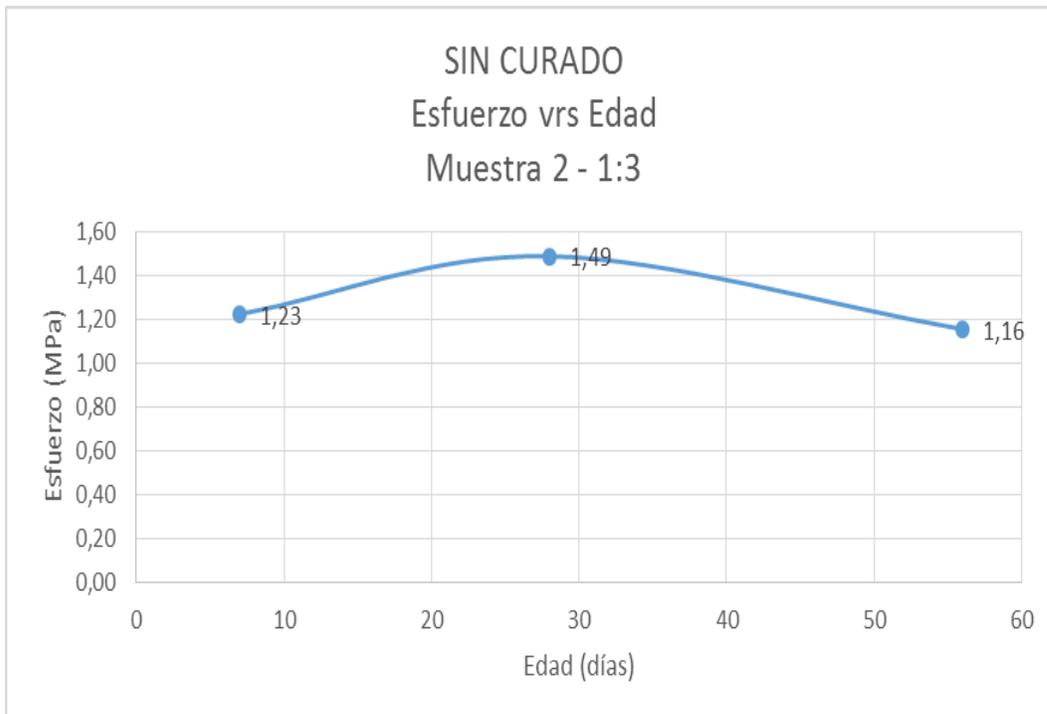
- Sin curado

Tabla XIII. **Esfuerzos de la mezcla 2 respecto a la edad de ensayo de la muestra**

Tiempo (días)	Esfuerzo (MPa)
7	1,23
28	1,49
56	1,16

Fuente: elaboración propia.

Figura 65. **Esfuerzos de la mezcla 2 respecto a la edad de ensayo de la muestra**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2013.

5.2.2. Caracterización de los materiales

A continuación se muestran los resultados de los ensayos que se requirieron para la caracterización de los materiales utilizados para la fabricación de los BTC.

El estudio de los materiales se realizó en el Laboratorio de Mecánica de Suelos, del Centro de Investigaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Granulometría

En las siguientes tablas XVI y XV se muestra la granulometría por lavado y por tamizado de la mezcla de material base, utilizada para la elaboración de los BTC. Esta mezcla estaba conformada por un 80 % de puzolana natural como agregado y 20 % de limo altamente plástico como aglomerante natural.

Tabla XIV. **Granulometría por lavado, 80 % puzolana y 20 % de limo**

Tamiz	Abertura (mm)	Peso Bruto (g)	Tara (g)	Peso Neto (g)	Por Ciento
3/8"	9,5	153,47	72,54	80,93	100,00
4	4,75	153,23	72,54	80,69	99,84
10	2	144,27	72,54	71,73	93,85
20	0,85	128,84	72,54	56,3	83,54
40	0,43	114,21	72,54	41,67	73,77
60	0,25	100,68	72,54	28,14	64,72
100	0,15	88,31	72,54	15,77	56,46
140	0,11	79,27	72,54	6,73	50,42
200	0,075			68,72	45,92

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Granulometría por tamizado, 80 % puzolana y 20 % de limo**

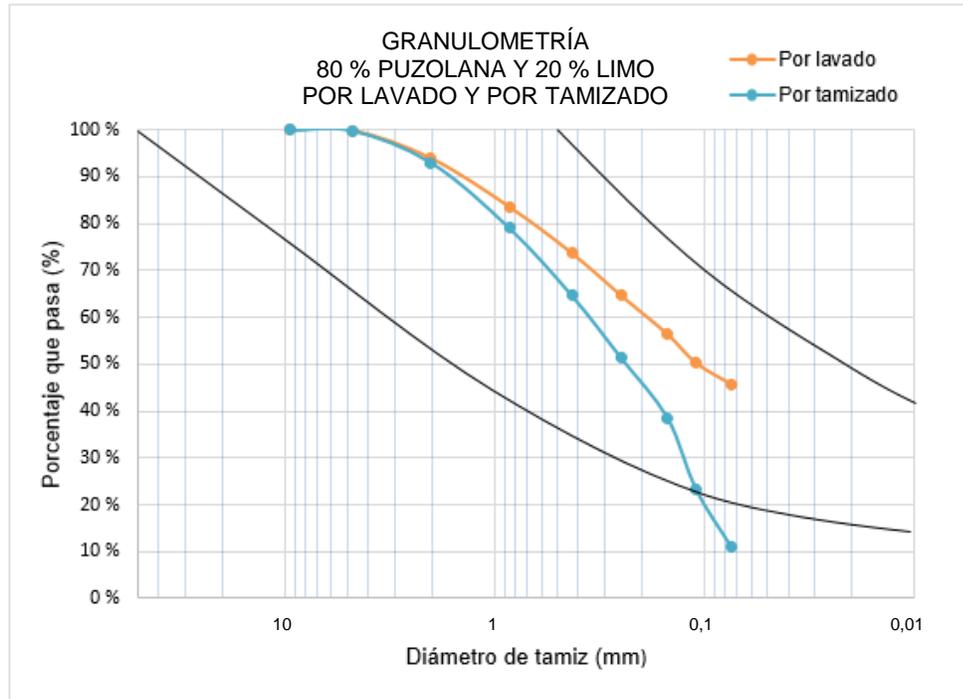
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Bruto (gr)	Tara (gr)	Peso Neto (gr)	Por Ciento
3/8"	9,5	349,92	72,58	277,34	100,00
4	4,75	349,6	72,58	277,02	99,90
10	2	328,11	72,58	255,53	93,01
20	0,85	284,64	72,58	212,06	79,09
40	0,43	239,87	72,58	167,29	64,74
60	0,25	198,12	72,58	125,54	51,37
100	0,15	158,06	72,58	85,48	38,54
140	0,11	110,6	72,58	38,02	23,33
200	0,075			34,81	11,15

Fuente: elaboración propia.

En la gráfica de la figura 66, se muestran las curvas granulométricas del material base, de acuerdo los resultados de las tablas anteriores.

Las líneas marcadas en color negro, en la misma gráfica, marcan los límites establecidos por la Norma UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”, donde recomienda que la granulometría del material utilizado debe estar dentro de los límites establecidos.

Figura 66. **Granulometría del material base, por lavado y por tamizado**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2013.

- Límites de Atterberg

En la tabla XVI se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de límites de Atterberg que se aplicó al limo. Este material se utilizó como aglomerante natural en la elaboración de los BTC.

Tabla XVI. **Límites de Atterberg del aglomerante natural**

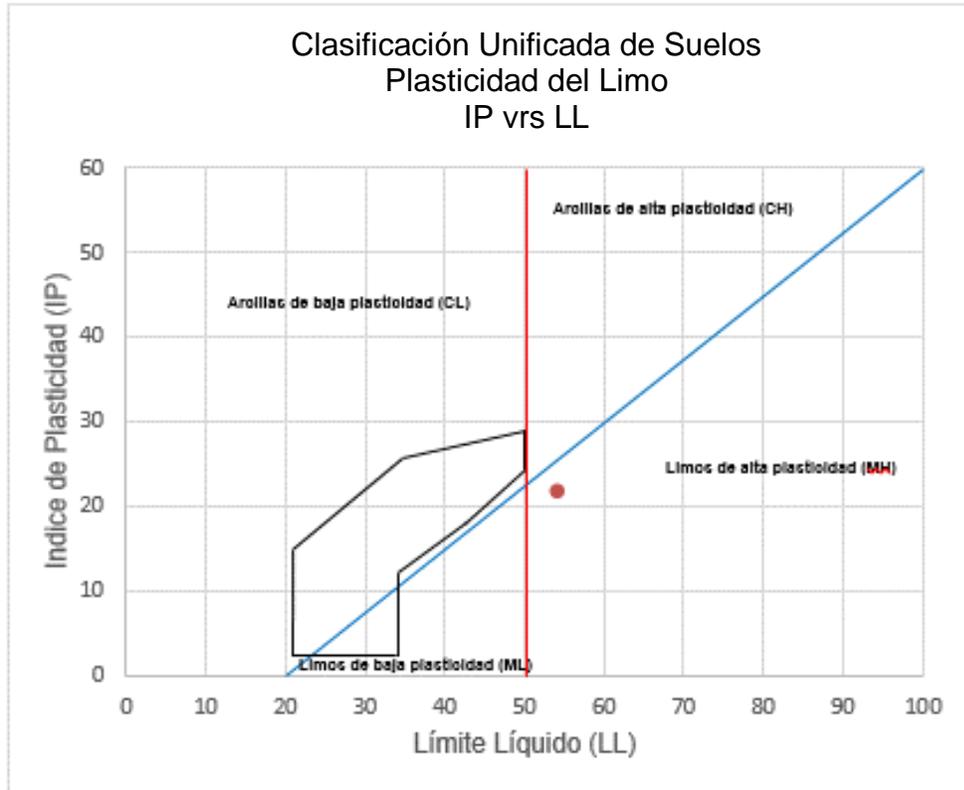
Ensayo	Límite líquido		Límite plástico	
	Golpes	28	28	
Factor (k)	1,0138			
Tarro	S-12	S-8	A-37	A-45
PBH (g)	45,85	47,68	36,95	37,08
PBS (g)	41,76	43,43	34,06	33,98
Tara (g)	34,14	35,45	25,01	24,61
DIF (g)	4,09	4,25	2,89	3,1
PNS (g)	7,62	7,98	9,05	9,37
Humedad	53,67	53,26	31,93	33,08
Promedio	53,47		32,50	
	Límite líquido	54,20	Índice de plasticidad	21,70

Fuente: elaboración propia.

En la gráfica de la figura 67, se muestra la clasificación del mismo material, acorde a los resultados de la tabla XVI. Ubicando los valores de límite líquido e índice de plasticidad dentro de la gráfica (ver el punto color rojo), el material se clasificó como un limo de alta plasticidad, según la Clasificación Unificada de Suelos.

El polígono marcado en color negro, en la misma gráfica, marca los límites establecidos por la Norma UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”, donde recomienda que la plasticidad del material debe estar comprendida dentro de la zona del polígono.

Figura 67. **Clasificación del material utilizado como aglomerante natural**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2013.

5.2.3. **Bloques de tierra compactada (BTC) estabilizados con aglomerante natural cal puzolana y los estabilizados con cemento tipo UGC**

En el apartado siguiente se muestran los resultados de los ensayos, requeridos por la normativa internacional, que se realizaron a los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana y los estabilizados con cemento tipo UGC, para una edad de 65 días.

En la tabla XVII se muestra la nomenclatura que se utilizó para identificar los BTC conforme al porcentaje de material estabilizante.

Tabla XVII. **Nomenclatura utilizada para los BTC**

BTC estabilizado	Nomenclatura
Cal Puzolana	
5 %	CP5
10 %	CP10
15 %	CP15
Cemento	
5 %	C5
10 %	C10
15 %	C15

- Ensayo a compresión

En las tablas XVIII a la XXVIII, se muestran los resultados obtenidos del ensayo a compresión, donde se detallan las dimensiones, pesos, densidades, esfuerzos de la primera grieta y los esfuerzos de ruptura respecto al área bruta y neta de cada uno de los BTC que se ensayaron.

Tabla XVIII. **Esfuerzos de primera grieta y ruptura de los BTC sin estabilizar ensayados a compresión**

ESFUERZOS DE PRIMERA GRIETA Y RUPTURA DE LOS BTC SIN ESTABILIZAR						
Muestra	Carga de Primera Grieta (N)	Carga de Ruptura (N)	Bruto (MPa)		Neto (MPa)	
			Esfuerzo de Primera Grieta	Esfuerzo de Ruptura	Esfuerzo de Primera Grieta	Esfuerzo de Ruptura
1	5 880	15 680	0,13	0,35	0,17	0,45
2	5 292	17 052	0,12	0,38	0,15	0,49
3	3 920	18 424	0,09	0,41	0,11	0,53
Promedio	5 030,67	17 052	0,11	0,38	0,15	0,49

Fuente: elaboración propia.

Los datos de la tabla XVIII fueron tomados del ensayo a compresión de los BTC sin estabilizar, del trabajo de graduación *Evaluación experimental de los parámetros de diseño de mampostería elaborada con bloques de tierra compactada (BTC)*, que aún está en proceso de investigación, de la estudiante Génesis Argentina Cap Morales.

Para los BTC sin estabilizar, utilizados en el ensayo a compresión, la estudiante Génesis Cap utilizó una mezcla base de 80 % de puzolana natural como agregado y 20 % de limo altamente plástico como aglomerante natural, para la fabricación de los mismos.

Tabla XIX. Dimensiones de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana ensayados a compresión

DIMENSIONES DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE NATURAL CAL PUZOLANA
--

Nomenclatura	Núm.	Peso (kg)	Dimensiones (cm)			Densidad (Kg/m ³)	Área (cm ²)	
			Ancho	Largo	Altura		Bruta	Neta
CP5	1	4,980	14,9	29,9	10	1 117,82	445,51	341,97
	2	5,150	14,8	29,8	10	1 167,69	441,04	337,50
	3	5,100	14,9	29,8	10	1 148,60	444,02	340,48
CP10	1	5,075	14,8	29,8	10	1 150,69	441,04	337,50
	2	5,326	14,9	29,9	10	1 195,48	445,51	341,97
	3	5,126	15	29,9	10	1 142,92	448,50	344,96
CP15	1	5,079	14,8	29,9	10	1 147,74	442,52	338,98
	2	5,180	14,9	29,9	10	1 162,71	445,51	341,97
	3	5,175	14,9	29,8	10	1 165,49	444,02	340,48

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Esfuerzos de primera grieta de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana ensayados a compresión**

ESFUERZOS DE PRIMERA GRIETA DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE NATURAL CAL PUZOLANA
--

Nomenclatura	Núm.	Carga de Primera Grieta (N)	Esfuerzo de Primera Grieta (MPa)	
			Bruto	Neto
CP5	1	6 864,62	0,15	0,20
	2	22 555,18	0,51	0,67
	3	10 787,26	0,24	0,32
CP10	1	28 635,27	0,65	0,85
	2	35 303,76	0,79	1,03
	3	36 284,42	0,81	1,05
CP15	1	37 265,08	0,84	1,10
	2	24 516,50	0,55	0,72
	3	26 477,82	0,60	0,78

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Esfuerzos de ruptura de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana ensayados a compresión**

ESFUERZOS DE RUPTURA DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE NATURAL CAL PUZOLANA				
Nomenclatura	Núm.	Carga de ruptura (N)	Esfuerzo de ruptura (MPa)	
			Bruto	Neto
CP5	1	26 968,15	0,61	0,79
	2	28 243,00	0,64	0,84
	3	17 651,88	0,40	0,52
CP10	1	41 187,72	0,93	1,22
	2	38 834,13	0,87	1,14
	3	48 444,60	1,08	1,40
CP15	1	40 403,19	0,91	1,19
	2	31 871,45	0,72	0,93
	3	30 008,19	0,68	0,88

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Datos estadísticos de los esfuerzos de ruptura respecto al área neta de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana**

DATOS ESTADÍSTICOS DE LOS ESFUERZOS DE RUPTURA RESPECTO AL ÁREA NETA			
Nomenclatura	CP5	CP10	CP15
Promedio	0,71	1,25	1,00
Desviación estándar	0,172	0,137	0,167
Coficiente de variación (%)	24,01	10,96	16,63

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXIII se clasifican los BTC, estabilizados con aglomerante natural cal puzolana, respecto a los resultados obtenidos (ver tabla VIII).

Tabla XXIII. **Valores de resistencias a compresión de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana**

RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE NATURAL CAL PUZOLANA		
Nomenclatura	Resistencia a compresión (MPa)	Clasificación
CP5	0,81	No cumple
CP10	1,25	No cumple
CP15	0,91	No cumple

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. Dimensiones de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC ensayados a compresión

**DIMENSIONES
DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON CEMENTO TIPO UGC**

Nomenclatura	Núm.	Peso (kg)	Dimensiones (cm)			Densidad (Kg/m ³)	Área (cm ²)	
			Ancho	Largo	Altura		Bruta	Neta
C5	1	5,123	14,9	29,8	10	1 153,78	444,02	340,48
	2	4,965	14,9	29,9	10	1 114,45	445,51	341,97
	3	5,113	14,8	29,8	10	1 159,31	441,04	337,50
C10	1	4,996	14,8	29,9	10	1 128,99	442,52	338,98
	2	5,196	14,9	29,9	10	1 166,30	445,51	341,97
	3	5,084	14,9	30	10	1 137,36	447,00	343,46
C15	1	5,369	14,7	29,8	10	1 225,63	438,06	334,52
	2	5,560	15	29,9	10	1 239,69	448,50	344,96
	3	5,453	14,9	28,7	10	1 275,17	427,63	324,09

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Esfuerzos de primera grieta de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC ensayados a compresión**

ESFUERZOS DE PRIMERA GRIETA DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON CEMENTO TIPO UGC
--

Nomenclatura	Núm.	Carga de Primera Grieta (N)	Esfuerzo de Primera Grieta (MPa)	
			Bruto	Neto
C5	1	63 546,76	1,4	1,9
	2	32 361,78	0,7	0,9
	3	38 638,00	0,9	1,1
C10	1	28 831,40	0,7	0,9
	2	44 521,96	1,0	1,3
	3	25 301,02	0,6	0,7
C15	1	107 872,60	2,5	3,2
	2	147 099,00	3,3	4,3
	3	116 698,54	2,7	3,6

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Esfuerzos de ruptura de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC ensayados a compresión**

ESFUERZOS DE RUPTURA DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON CEMENTO TIPO UGC				
Nomenclatura	Núm.	Carga de ruptura (N)	Esfuerzo de ruptura (MPa)	
			Bruto	Neto
C5	1	70 607,52	1,6	2,1
	2	50 405,92	1,1	1,5
	3	58 643,47	1,3	1,7
C10	1	36 872,82	0,8	1,1
	2	67 273,28	1,5	2,0
	3	45 110,36	1,0	1,3
C15	1	120 621,18	2,8	3,6
	2	160 828,24	3,6	4,7
	3	136 802,07	3,2	4,2

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Datos estadísticos de los esfuerzos de ruptura respecto al área neta de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC**

DATOS ESTADÍSTICOS DE LOS ESFUERZOS DE RUPTURA RESPECTO AL ÁREA NETA DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON CEMENTO TIPO UGC			
Nomenclatura	C5	C10	C15
Promedio	1,8	1,5	4,2
Desviación estándar	0,30	0,46	0,53
Coficiente de variación (%)	17,06	31,37	12,75

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXVIII se clasifican los BTC, estabilizados con cemento tipo UGC, respecto a los resultados obtenidos (ver tabla VIII).

Tabla XXVIII. **Valores de resistencias a compresión de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC**

RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON CEMENTO TIPO UGC		
Nomenclatura	Resistencia a compresión (MPa)	Clasificación
C5	1,6	BTC 1
C10	1,2	No cumple
C15	4,4	BTC 3

Fuente: elaboración propia.

- Ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)

En las tablas XXIX a la XXXI se muestran los resultados obtenidos del ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET), donde aparecen las profundidades de las oquedades, en milímetros, producto del impacto del flujo de agua sobre la cara de los BTC que se ensayaron.

Tabla XXIX. **Profundidad de las oquedades de los BTC sin estabilizar mediante el ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)**

OQUEDADES BTC SIN ESTABILIZAR			
Muestra	Profundidad (cm)	Tiempo (s)	Observaciones
1	1	3	Los bloques no soportaron el ensayo
2	1	5	

Fuente: elaboración propia.

Los datos de la tabla XXIX fueron tomados del ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET) de los BTC sin estabilizar del trabajo de graduación *Evaluación experimental de los parámetros de diseño de mampostería elaborada con bloques de tierra compactada (BTC)*, que aún está en proceso de investigación, de la estudiante Génesis Argentina Cap Morales.

Para los BTC sin estabilizar, utilizados en este ensayo, la estudiante Génesis Cap empleó una mezcla base de 80 % de puzolana natural como agregado y 20 % de limo altamente plástico como aglomerante natural, para la fabricación de los mismos.

Tabla XXX. **Profundidad de las oquedades de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana mediante el ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)**

**OQUEDADES DE LOS
BTC ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE NATURAL
CAL PUZOLANA**

Nomenclatura	Núm.	Tiempo (min)	Profundidad de huella (mm)
CP5	1	10	9,9
	2	10	7,8
CP10	1	10	6,7
	2	10	9,5
CP15	1	10	4,1
	2	10	6,3

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Profundidad de las oquedades de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC mediante el ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)**

**OQUEDADES DE LOS
BTC ESTABILIZADOS CON CEMENTO TIPO UGC**

Nomenclatura	Núm.	Tiempo (min)	Profundidad de huella (mm)
C5	1	10	Ninguna
	2	10	Ninguna
C10	1	10	1,73
	2	10	1,72
C15	1	10	Ninguna
	2	10	Ninguna

Fuente: elaboración propia.

- Ensayo de absorción de agua por capilaridad

En las tablas XXXII a la XLIII se muestran los resultados obtenidos del ensayo de absorción de agua por capilaridad, donde se detallan las dimensiones, pesos, densidades, y los coeficientes de capilaridad de los BTC ensayados.

Tabla XXXII. **Dimensiones de los BTC sin estabilizar, ensayo de absorción de agua por capilaridad**

DIMENSIONES DE LOS BTC SIN ESTABILIZAR							
Muestra	Dimensiones (cm)			Peso (g)		Densidad (kg/m³)	
	Ancho	Largo	Altura	Seco	Húmedo	Seca	Húmeda
1	14,7	29,8	9,8	4 458	4 808	1 038,44	1 119,97
2	14,8	29,8	10	4 707	4 973	1 067,25	1 127,56
Promedio	14,8	29,8	9,9	4 582,5	4 890,5	1 052,8	1 123,8

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Coefficientes de absorción de los BTC sin estabilizar, ensayo de absorción de agua por capilaridad**

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DE LOS BTC SIN ESTABILIZAR			
Muestra	Área Bruta (m²)	Tiempo total de inmersión (s)	Coefficiente x10⁶ (g/m²*s^{0,5})
1	4,38	70	9,55
2	4,41	67	7,37
Promedio	4,4	68,5	8,5

Fuente: elaboración propia.

Los datos de las tablas anteriores fueron tomados del ensayo de absorción de agua por capilaridad de los BTC sin estabilizar, del trabajo de graduación *Evaluación experimental de los parámetros de diseño de mampostería elaborada con bloques de tierra compactada (BTC)*, que aún está en proceso de investigación, de la estudiante Génesis Argentina Cap Morales, donde utilizó una mezcla base de 80 % de puzolana natural como agregado y 20 % de limo altamente plástico como aglomerante natural, para la fabricación de los mismos.

Tabla XXXIV. **Dimensiones de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana, ensayo de absorción de agua por capilaridad**

DIMENSIONES DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE NATURAL CAL PUZOLANA								
--	--	--	--	--	--	--	--	--

N.	Núm.	Dimensiones (cm)			Peso (g)		Densidad (kg/m ³)	
		Ancho	Largo	Altura	Seco	Húmedo	Seca	Húmeda
CP5	1	14,8	29,8	10	4 974	5 164	1 127,79	1 170,87
	2	14,7	29,8	10	5 103	5 305	1 164,91	1 211,02
	3	14,8	29,8	10	5 185	5 365	1 175,63	1 216,44
CP10	1	14,8	29,9	10	5 345	5 730	1 207,86	1 294,86
	2	14,9	29,8	10	5 160	5 654	1 162,11	1 273,37
	3	15	29,8	10	5 323	5 698	1 190,83	1 274,72
CP15	1	14,8	29,8	10	5 073	5 613	1 150,24	1 272,67
	2	14,9	29,8	10	5 079	5 675	1 143,87	1 278,10
	3	14,9	29,8	10	5 168	5 713	1 163,91	1 286,65

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Coefficientes de absorción de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana, ensayo de absorción de agua por capilaridad**

**COEFICIENTES DE ABSORCIÓN
DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE NATURAL
CAL PUZOLANA**

Nomenclatura	Núm.	Área Bruta (m²)	Tiempo total de inmersión (s)	Coefficiente x10⁶ (g/m²*s^{0,5})
CP5	1	4,41	600	1,76
	2	4,38	600	1,88
	3	4,41	600	1,67
CP10	1	4,43	600	3,55
	2	4,44	600	4,54
	3	4,47	600	3,42
CP15	1	4,41	600	5,00
	2	4,44	600	5,48
	3	4,44	600	5,01

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Datos estadísticos de los coeficientes de absorción de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana**

**DATOS ESTADÍSTICOS DE LOS COEFICIENTES DE ABSORCIÓN
DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE
NATURAL CAL PUZOLANA**

Nomenclatura	CP5	CP10	CP15
Promedio	1,77	3,84	5,16
Desviación Estándar	0,11	0,61	0,27
Coefficiente de Variación (%)	5,95	15,97	5,31

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Valores de los coeficientes de absorción de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana**

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE NATURAL CAL PUZOLANA
--

Nomenclatura	Coficiente x10⁶ (g/m²*s^{0,5})
CP5	1,80
CP10	3,49
CP15	5,20

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. Dimensiones de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC, ensayo de absorción de agua por capilaridad

DIMENSIONES DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON CEMENTO TIPO UGC
--

N.	Núm.	Dimensiones (cm)			Peso (g)		Densidad (kg/m ³)	
		Ancho	Largo	Altura	Seco	Húmedo	Seca	Húmeda
C5	1	15	29,8	10	5 115	5 490	1 144,30	1 228,19
	2	14,9	29,7	10	4 962	5 401	1 121,28	1 220,48
	3	15	29,8	10	4 954	5 460	1 108,28	1 221,48
C10	1	14,7	29,9	10	4 888	5 610	1 112,10	1 276,36
	2	15	29,9	10	4 954	5 600	1 104,57	1 248,61
	3	14,8	29,8	10	5 054	5 595	1 145,93	1 268,59
C15	1	14,8	29,6	10	5 382	5 611	1 228,54	1 280,82
	2	14,8	29,8	10	5 512	5 705	1 249,77	1 293,53
	3	14,8	29,8	10	5 350	5 599	1 213,04	1 269,50

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Coefficientes de absorción de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC, ensayo de absorción de agua por capilaridad**

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON CEMENTO TIPO UGC

Nomenclatura	Núm.	Área Bruta (m ²)	Tiempo total de inmersión (s)	Coefficiente x10 ⁶ (g/m ² *s ^{0,5})
C5	1	4,47	600	3,42
	2	4,43	600	4,05
	3	4,47	600	4,62
C10	1	4,4	600	6,71
	2	4,49	600	5,88
	3	4,41	600	5,01
C15	1	4,38	600	2,13
	2	4,41	600	1,79
	3	4,41	600	2,3

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Datos estadísticos de los coeficientes de absorción de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC**

DATOS ESTADÍSTICOS DE LOS COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON CEMENTO TIPO UGC			
Nomenclatura	C5	C10	C15
Promedio	4,03	5,87	2,07
Desviación Estándar	0,60	0,85	0,26
Coefficiente de Variación (%)	14,89	14,49	12,52

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Valores de los coeficientes de absorción de los BTC estabilizados con cemento tipo UGC**

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON CEMENTO TIPO UGC
--

Nomenclatura	Coeficiente x10 ⁶ (g/m ² *s ^{0,5})
C5	4,34
C10	6,30
C15	2,22

Fuente: elaboración propia.

- Ensayo de humectación/secado

En el proceso de investigación del trabajo de graduación *Evaluación experimental de los parámetros de diseño de mampostería elaborada con bloques de tierra compactada (BTC)*, de la estudiante Génesis Argentina Cap Morales, se tuvo un inconveniente en la realización de este ensayo. Los bloques presentaron daños considerables durante el desarrollo del mismo, por lo que se suspendió. Por esta razón no se cuenta con resultados para BTC sin estabilizar.

En las tablas siguientes se muestran los resultados obtenidos del ensayo de humectación/secado, donde se enumeran las condiciones de rechazo, de los BTC que se ensayaron.

Tabla XLII. **Condiciones de rechazo para los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana, ensayo humectación/secado**

CONDICIONES DE RECHAZO DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON AGLOMERANTE NATURAL CAL PUZOLANA			
N.	Condiciones de rechazo	1	2
CP5	Grietas	No	
	Hinchamiento	No	
	Picado local en 5 zonas	No	
	Pérdida de capa de suelo	Sí	
	Agua en más del 70 % de base (10,5 cm)	No	
	Pérdida de fragmentos a 50 mm	No	
	Eflorescencia en superficie	No	
	Altura columna de agua (cm)	2,3	
CP10	Grietas	No	No
	Hinchamiento	No	No
	Picado local en 5 zonas	No	No
	Pérdida de capa de suelo	No	Sí
	Agua en más del 70 % de base (10,5 cm)	No	No
	Pérdida de fragmentos a 50 mm	No	No
	Eflorescencia en superficie	No	No
	Altura columna de agua (cm)	2,1	1,2
CP15	Grietas	No	No
	Hinchamiento	No	No
	Picado local en 5 zonas	No	No
	Pérdida de capa de suelo	No	Sí
	Agua en más del 70 % de base (10,5 cm)	No	No
	Pérdida de fragmentos a 50 mm	No	No
	Eflorescencia en superficie	No	No
	Altura columna de agua (cm)	2	1,5

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **Condiciones de rechazo para los BTC estabilizados con cemento tipo UGC, ensayo humectación/secado**

CONDICIONES DE RECHAZO DE LOS BTC ESTABILIZADOS CON CEMENTO TIPO UGC						
N.	Condiciones de rechazo	1	2	3	4	5
C5	A	No	No	No	No	No
	B	No	No	No	No	No
	C	No	No	No	No	No
	D	No	No	No	No	No
	E	No	No	No	No	No
	F	No	No	No	No	No
	G	No	No	No	No	No
	H	2,1	1,7	2,6	2,3	2,1
C10	A	No	No	No	No	No
	B	No	No	No	No	No
	C	No	No	No	No	No
	D	No	No	No	No	No
	E	No	No	No	No	No
	F	No	No	No	No	No
	G	No	No	No	No	No
	H	2,5	2	2,3	2,2	2,1
C15	A	No	No	No	No	No
	B	No	No	No	No	No
	C	No	No	No	No	No
	D	No	No	No	No	No
	E	No	No	No	No	No
	F	No	No	No	No	No
	G	No	No	No	No	No
	H	1,6	1,3	1,4	1,6	1,9

Fuente: elaboración propia.

Las condiciones de rechazo para la tabla XLIII, son las mismas que las de la tabla XLII. Estas condiciones se nombraron con letras mayúsculas, como una manera de representación, debido al poco espacio entre márgenes para colocar completa la tabla.

Las condiciones de rechazo, representadas por letras mayúsculas en la tabla XLIII, son las siguientes:

A: hinchamiento

B: picado local en 5 zonas

C: pérdida de capa de suelo

D: agua en más del 70 % de base (10,5 cm)

E: pérdida de fragmentos a 50 mm

F: eflorescencia en superficie

G: altura de columna de agua (cm)

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Mezclas de aglomerante natural cal puzolana y agregado de origen volcánico

De los resultados que se obtuvieron de los ensayos a compresión de los cubos elaborados con aglomerante natural cal puzolana y agregado de origen volcánico, para distintas proporciones de mezcla y distintos tipos de curado; los mejores resultados se obtuvieron de la mezcla 3, curado en inmersión en agua a temperatura ambiente. Este tipo de curado es muy favorable debido a que el consumo de energía es nulo y por medio del cual, se obtienen buenos resultados de resistencia a compresión.

Con base en el párrafo anterior, el tipo de curado en inmersión en agua a temperatura ambiente fue el seleccionado para el curado de los BTC, para obtener una buena reacción química del aglomerante natural cal puzolana en la estabilización del material base utilizado en la fabricación de los bloques.

Los bloques se sometieron a un tipo de curado cercano a las condiciones de inmersión, para obtener resultados propicios en la resistencia a compresión de los mismos. Para ello, se curaron mediante regado, en condiciones distintas de exposición tanto para los bloques estabilizados con aglomerante natural cal puzolana como los estabilizados con cemento tipo UGC.

Conforme a la teoría, el aglomerante natural cal puzolana reacciona en presencia de humedad a temperatura ambiente, para formar compuestos con propiedades cementantes. Por lo que se utilizó la cámara tipo invernadero para

el curado de los BTC estabilizados con este aglomerante, con el fin de acelerar la capacidad mecánica de resistencia

Los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana se regaron 3 veces al día; a las 9:00 am, 12:00 pm y 15:00 pm, para mantenerlos húmedos el mayor tiempo posible. Este proceso de curado se realizó durante 14 días. Luego, se dejaron dentro de la cámara para su secado.

Los BTC estabilizados con cemento tipo UGC se sometieron al mismo proceso de curado que los bloques estabilizados con aglomerante natural cal puzolana; se colocaron en un lugar bajo condiciones naturales del ambiente. Luego, se dejaron en el mismo sitio para su secado.

6.2. Caracterización de los materiales

Se realizaron dos tipos de granulometría, una por lavado y otra por tamizado para una muestra del material base que se utilizó en la elaboración de los BTC, con el objetivo de verificar la curva granulométrica del mismo. Ya que la puzolana por ser un material poroso, el material fino puede quedar dentro de huecos de las pómez y afectar en los resultados de la granulometría.

Según los requerimientos de la norma española UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”, exige la utilización de una arcilla como aglomerante natural en el material utilizado para la fabricación de los BTC.

Con base en los resultados obtenidos de laboratorio, mediante el ensayo de límites de Atterberg, de varias muestras de suelos que servirían como aglomerante natural, se eligió trabajar con el material más plástico, que fue el

material que se acercaría a la plasticidad de una arcilla. Según la Clasificación Unificada de Suelos, el material seleccionado se clasificó como un limo de alta plasticidad.

6.3. Bloques de tierra compactada (BTC) estabilizados con aglomerante natural cal puzolana y estabilizados con cemento tipo UGC

- Ensayo de compresión

Según la Norma UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”, la resistencia mínima a compresión que debe soportar un BTC es de $1,3 \text{ N/mm}^2$, que aproximadamente son $1,3 \text{ MPa}$. Y la Norma UNE-EN 772-1 “Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión”, requiere que la resistencia a compresión de cada BTC sea calculada sobre el área bruta del bloque.

Cada uno de los BTC que se elaboraron, poseen en su cara inferior unos trabes tipo hembra, por lo que cada uno de los bloques no tiene la capacidad de cargar en toda su área bruta. Por lo que se calculó la resistencia a compresión para el área bruta así como para el área neta de cada BTC.

En los resultados se evidenció que la estabilización mediante el aglomerante natural cal puzolana mejora la resistencia de los bloques de tierra.

Se realizó un análisis estadístico a los resultados que se obtuvieron en laboratorio, de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana y los de cemento tipo UGC, para verificar la confiabilidad de los mismos. Para cada porcentaje de estabilización en los bloques se obtuvieron tres resultados, cuando

el coeficiente de variación fue mayor del 10 %, entonces se tomaron los dos resultados más cercanos, y se realizó el mismo análisis, con ello se determinó un promedio, tomando ese valor como el resultado de la resistencia a compresión de cada BTC.

Para cada porcentaje y tipo de material utilizado en la estabilización de los BTC, se obtuvieron resultados muy variables. Los únicos bloques que cumplieron con lo requerido por la normativa internacional fueron los BTC estabilizados con cemento tipo UGC en un 5 y 15% del mismo, con 1,6 MPa y 4,4 MPa, respectivamente.

- Ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)

Para el ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET), según la Norma UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”, exige una oquedad no máxima de 10 mm de profundidad para cada BTC ensayado.

Los BTC sin estabilizar no soportaron el ensayo por lo que se tuvo que suspender. Comparando estos bloques con los estabilizados con aglomerante natural cal puzolana, la estabilización mejora grandemente las propiedades mecánicas de los bloques.

Tanto los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana como los estabilizados con cemento tipo UGC cumplieron con lo requerido por la norma. Los primeros, presentaron oquedades variables dentro del rango establecido y los segundos, no presentaron daños mayores a 2 mm.

- Ensayo de absorción de agua por capilaridad

La capilaridad es una propiedad física del agua por la que ella puede avanzar a través de un canal minúsculo (desde unos milímetros hasta micras de tamaño) siempre y cuando el agua se encuentre en contacto con ambas paredes de este canal y estas paredes se encuentren suficientemente juntas.

En los resultados obtenidos de los valores de coeficiente de capilaridad para los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana y los estabilizados con cemento tipo UGC, se puede apreciar que la estabilización con aglomerante natural cal puzolana produce una mayor reducción de porosidad en los bloques que los estabilizados con cemento tipo UGC. Asimismo, reduce la porosidad de los bloques sin estabilizar.

Entre mayor sea el valor del coeficiente de capilaridad de un material, mayor cantidad de poros posee y, por ende, mayor cantidad de agua absorberá.

- Ensayo de humectación/secado

En el ensayo de humectación/secado, conforme los requerimientos de la Norma española UNE 41410:2008 “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo”, se enumeran las condiciones de rechazo que no debían presentar los BTC.

Los BTC sin estabilizar no soportaron el ensayo por lo que se tuvo que suspender. Los bloques estabilizados con aglomerante natural cal puzolana, estabilizados en un 5 % del mismo, presentaron pérdida de capa del suelo en el primer día de ensayo, por lo que se tuvieron que descartar; los estabilizados en

un 10 y 15 % del mismo, presentaron la misma característica de rechazo al segundo día de ensayo, por lo que también se descartaron.

Los BTC estabilizados con cemento tipo UGC, no presentaron ninguna característica de rechazo durante el ensayo. Por lo que fueron los únicos en cumplir satisfactoriamente con lo requerido por la normativa internacional.

CONCLUSIONES

1. Los materiales que se utilicen en la elaboración de BTC, primero, deben caracterizarse mediante ensayos de laboratorio de mecánica de suelos, basados en requerimientos de normativas nacionales o internacionales.
2. El tipo de curado que mayor incidencia tuvo en el aumento de la resistencia a compresión del aglomerante natural cal puzolana, utilizado en la estabilización de los BTC, fue mediante inmersión en agua a temperatura ambiente.
3. Las condiciones, más aproximadas, para el curado de los BTC mediante inmersión en agua a temperatura ambiente, fue mediante regado, en distintas condiciones de exposición según el material utilizado en la estabilización.
4. La resistencia a compresión para los BTC estabilizados en un 5 % de aglomerante natural cal puzolana duplican su valor a los BTC sin estabilizar. De la misma manera, los BTC estabilizados con cemento tipo UGC duplican su resistencia a compresión respecto a los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana, para el mismo porcentaje de estabilización. Los BTC estabilizados en un 5 % de cemento tipo UGC se clasificaron como BTC 1, según la normativa internacional. Siendo este el porcentaje más económico utilizado en la estabilización de los bloques de tierra compactada.

5. Para el ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET), tanto los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana como los estabilizados con cemento tipo UGC, cumplieron con lo requerido por la normativa internacional. Dando mejores resultados los segundos que los primeros.
6. Los resultados obtenidos de los valores de coeficiente de capilaridad, en el ensayo de absorción de agua por capilaridad, indican que la estabilización con aglomerante natural cal puzolana produce una mayor reducción de porosidad en los bloques que los estabilizados con cemento tipo UGC.
7. Para el ensayo de humectación/secado, los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana presentaron pérdida de capas de suelo, por lo que fueron descartados por no cumplir con lo requerido por la normativa. Los BTC estabilizados con cemento tipo UGC si cumplieron con los requerimientos de la misma.
8. La granulometría y la humedad del material deben controlarse, en la fabricación de los BTC, para obtener una mayor estabilización mecánica en el bloque, al momento de compactar el material dentro de la prensa.
9. El estabilizante natural cal puzolana tiene una incidencia importante en el mejoramiento de las propiedades mecánicas del material tierra. Cuestión que se comprueba, en los resultados que se obtuvieron de laboratorio, para los BTC sin estabilizar con los estabilizados con este aglomerante.

RECOMENDACIONES

1. Para el curado utilizado para los BTC, se recomienda colocar un sistema de regado o bien regarlos manualmente por mayor tiempo, para mantener los bloques húmedos el mayor tiempo posible.
2. Evaluar las características y propiedades de los BTC con un aglomerante ternario, con respecto a los requerimientos de la normativa internacional.
3. Un problema que se presentó en la fabricación de los BTC, fue que en la cara inferior del bloque, al salir de la prensa, presentaba una menor densidad del material compactado. Se debe tener un mayor control en el contenido de humedad en la fabricación de BTC, para lograr obtener una buena compresión del material dentro de la prensa y con ello obtener una misma densidad en la cara superior como inferior del bloque.
4. Para el mezclado del material utilizado en la fabricación de los BTC, es necesario utilizar una mezcladora, para una mejor homogenización de los materiales con el agua.
5. Para materiales con piedra pómez se debe realizar una granulometría por lavado, para evitar que los materiales finos queden dentro de los huecos de los agregados pómez.
6. Evaluar los parámetros de diseño de la mampostería elaborada con bloques BTC estabilizados, tomando en cuenta los resultados de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARRIVILLAGA OCHAETA, Manuel Alfredo. *Evaluación de bancos de puzolana y calizas en el occidente de Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro de Investigaciones de Ingeniería, 1993. 19 p.
2. 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.
3. DAY, Robert L. *Pozzolans for use in low-cost housing*. Alberta, Canada: University of Calgary, Department of Civil Engineering, 1990. 165 p.
4. MINKE, Gernot. *Manual de construcción en tierra*. Montevideo, Uruguay: Editorial Nordan-Comunidad, 1994. 222 p.
5. National Lime Association. *Manual de estabilización de suelo tratado con cal*. 2a ed., Virginia, Estados Unidos de América: National Lime Association, 2006. 42 p.
6. OCHOA MARROQUÍN, Luis Alfredo. *Caracterización geológica y física de 8 muestras de puzolanas de origen volcánico de la región del occidente de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil.

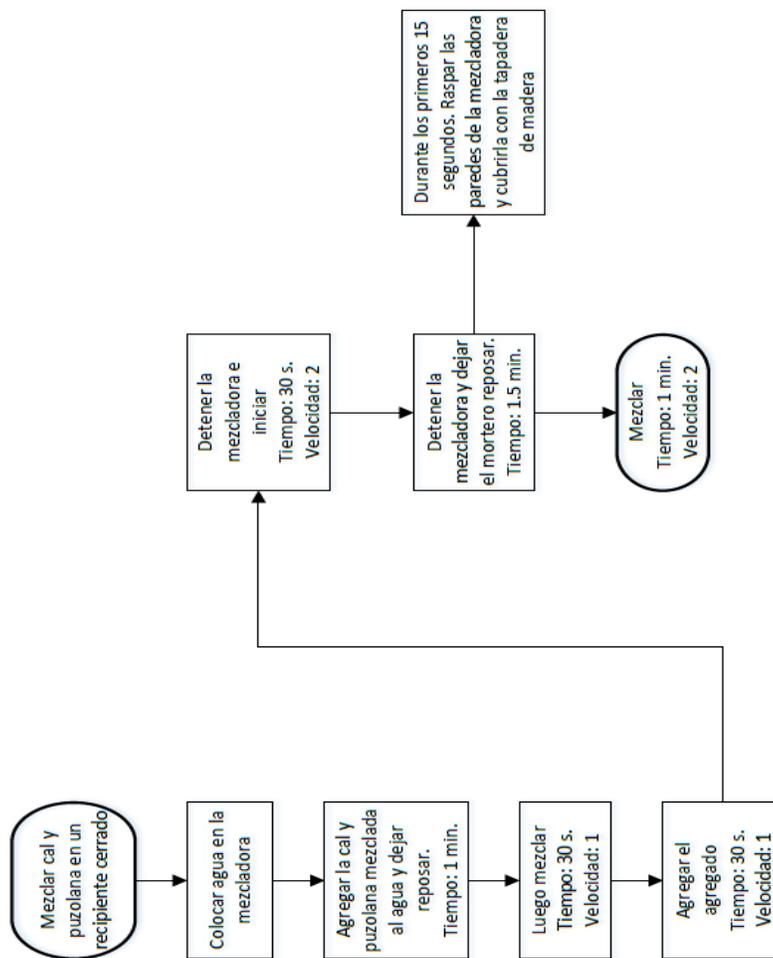
Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 166 p.

7. QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ, Francisco Javier. *Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos*. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro de Investigaciones de Ingeniería, 2010. 95 p.
8. QUIÑÓNEZ GUZMÁN, Sergio Vinicio. *CP-40 en Guatemala experiencias en su producción y aplicación*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2003. 72 p.
9. ROUX GUTIÉRREZ, Rubén Salvador. *Los bloques de tierra comprimida (BTC) en zonas húmedas*. México: Universidad Autónoma de Tamaulipas, 2009. 188 p.
10. Soiltest. *Manual de ensayos de suelos para construcción de caminos: identificación de los suelos en el campo*. Washington D. C., Estados Unidos de América: Soiltest, 2007. 94 p.
11. VELÁSQUEZ SOLÍS, Edwin Estuardo. *Elaboración de unidades de mampostería, utilizando cementos puzolánicos y desechos de vidrio*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2004. 143 p.
12. ZECEÑA GIRÓN, Carlos Efraín. *Caracterización física-mecánica y química del cemento puzolánico*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1989. 120 p.

APÉNDICES

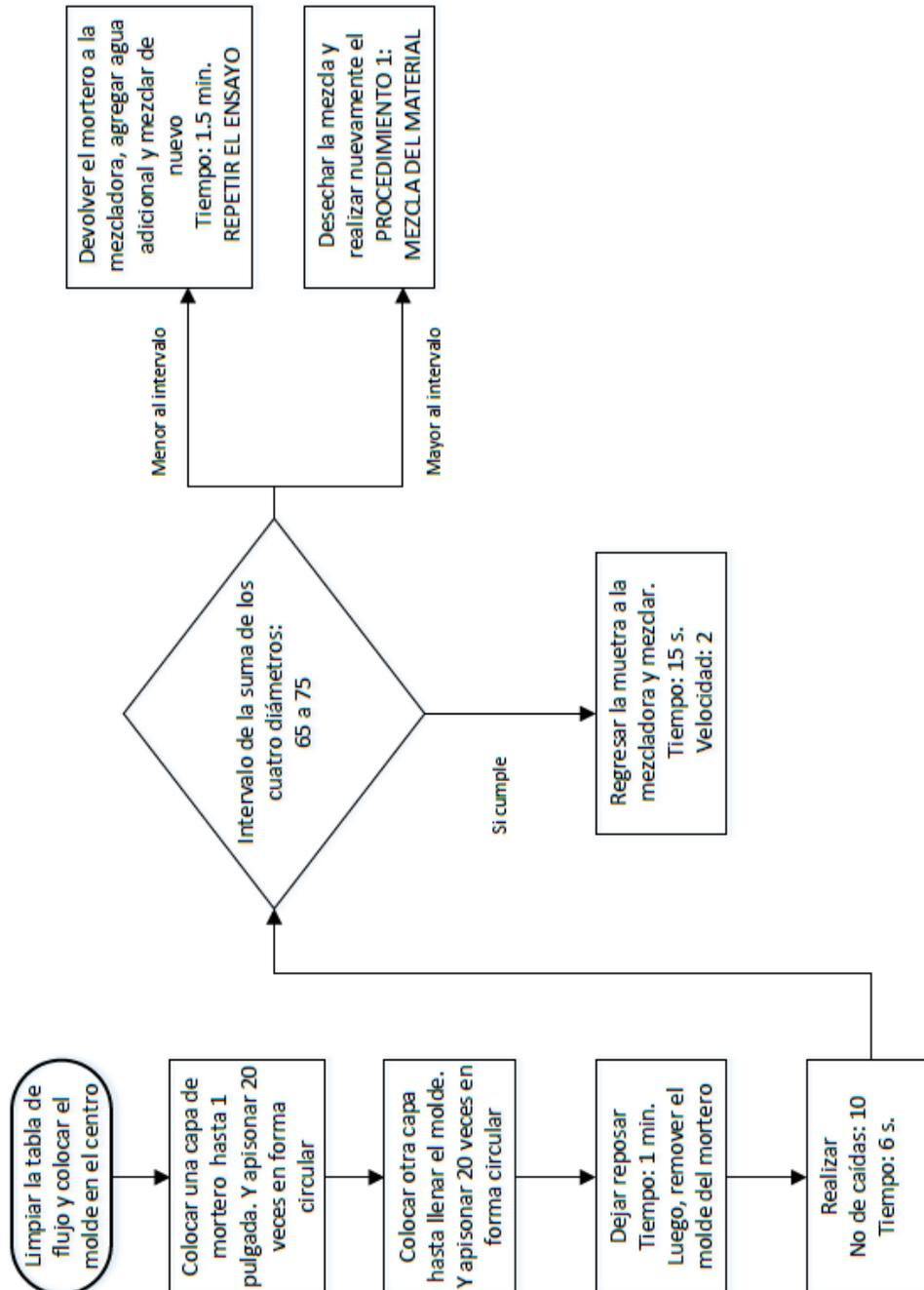
Apéndice 1. Diagramas de flujo del procedimiento de elaboración de los cubos elaborados con aglomerante natural cal puzolana y agregados de origen volcánico

DIAGRAMA DE FLUJO
PROCEDIMIENTO 1: MEZCLA DE MATERIAL
ASTM C-593



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Publisher 2013.

DIAGRAMA DE FLUJO
PROCEDIMIENTO 2: DETERMINACION DEL FLUJO
ASTM C-593



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Publisher 2013.

**DIAGRAMA DE FLUJO
PROCEDIMIENTO 3: LLENADO DE MOLDES
ASTM C-593**



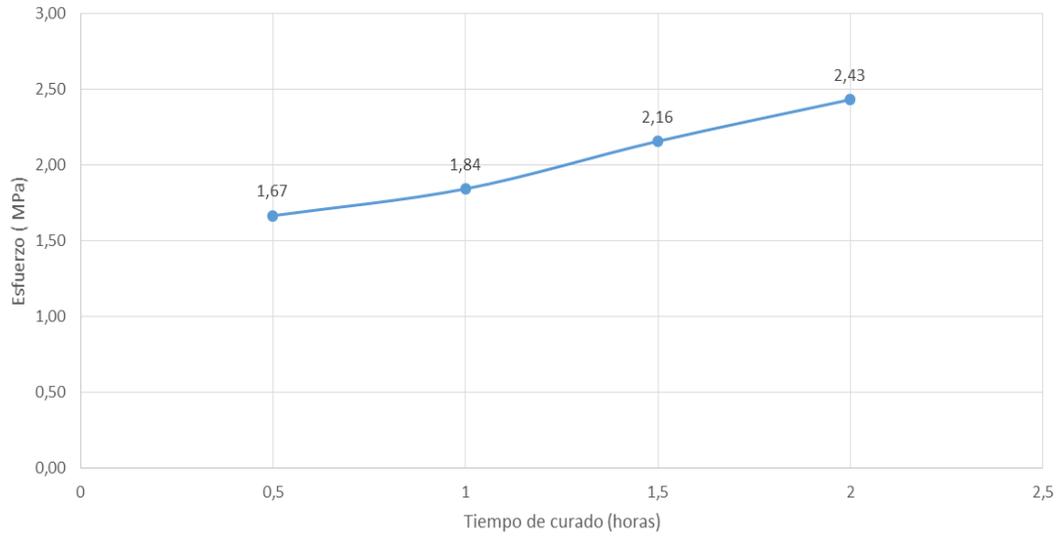
Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Publisher 2013.

Apéndice 2. Resultados de laboratorio de los cubos elaborados con aglomerante natural cal puzolana y agregados de origen volcánico

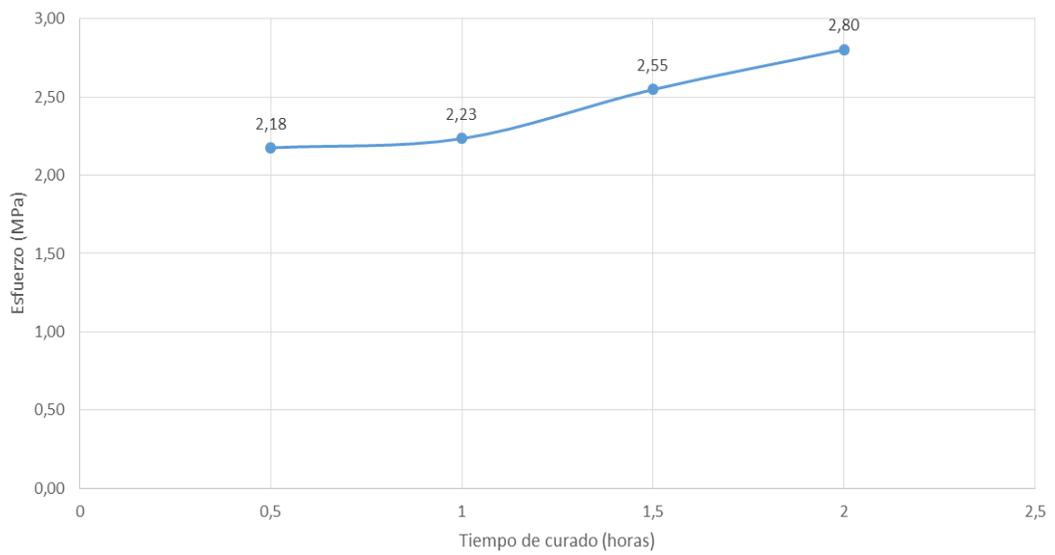
MEZCLA 1									
CURADO	MUESTRA	AREA (m ²)	PESO (g)	CARGA PRIMERA GRIETA (N)	CARGA DE RUPTURA (N)	ESFUERZO DE RUPTURA (MPa)	FECHA (d/m/a)	EDAD DE LA MUESTRA (días)	
A VAPOR	1A	0,0025	192,1	4 116	4 165	1,67	30/07/2014	8	
	1B	0,0025	168	5 145	5 439	2,18	06/08/2014	15	
	1C	0,0025	162,4	4 900	6 174	2,47	20/08/2014	29	
	2A	0,0025	196	4 361	4 606	1,84	30/07/2014	8	
	2B	0,0025	174	4 410	5 586	2,23	06/08/2014	15	
	2C	0,0025	167,8	3 920	5 733	2,29	20/08/2014	29	
	3A	0,0025	197,9	5 292	5 390	2,16	30/07/2014	8	
	3B	0,0025	172,9	6 223	6 370	2,55	06/08/2014	15	
	3C	0,0025	167,1	4 410	6 615	2,65	20/08/2014	29	
	4A	0,0025	206,6	6 076	6 076	2,43	30/07/2014	8	
	4B	0,0025	170,5	4 704	7 007	2,80	06/08/2014	15	
	4C	0,0025	164,6	5 635	6 909	2,76	20/08/2014	29	
INMERSIÓN EN AGUA A 80 °C	5A	0,0025	199,8	4 165	4 361	1,74	30/07/2014	8	
	5B	0,0025	169,8	5 635	5 635	2,25	06/08/2014	15	
	5C	0,0025	163	3 185	5 194	2,08	20/08/2014	29	
	6A	0,0025	201,5	4 655	4 802	1,92	30/07/2014	8	
	6B	0,0025	172,7	5 341	5 684	2,27	06/08/2014	15	
	6C	0,0025	166,4	4 900	6 370	2,55	20/08/2014	29	
	7A	0,0025	199,3	5 047	5 145	2,06	30/07/2014	8	
	7B	0,0025	173,3	6 370	6 566	2,63	06/08/2014	15	
	7C	0,0025	167,1	4 165	6 860	2,74	20/08/2014	29	
	8A	0,0025	200,3	6 223	6 419	2,57	30/07/2014	8	
	8B	0,0025	173,5	7 546	7 546	3,02	06/08/2014	15	
	8C	0,0025	166,6	4 704	8 624	3,45	20/08/2014	29	

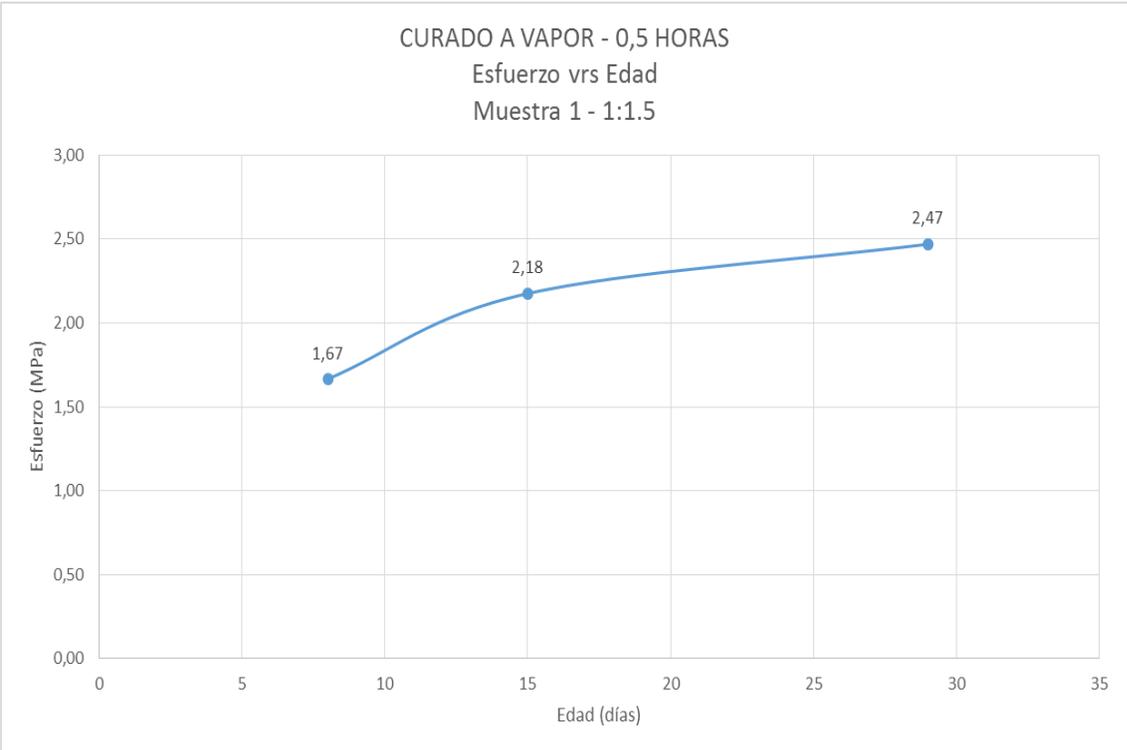
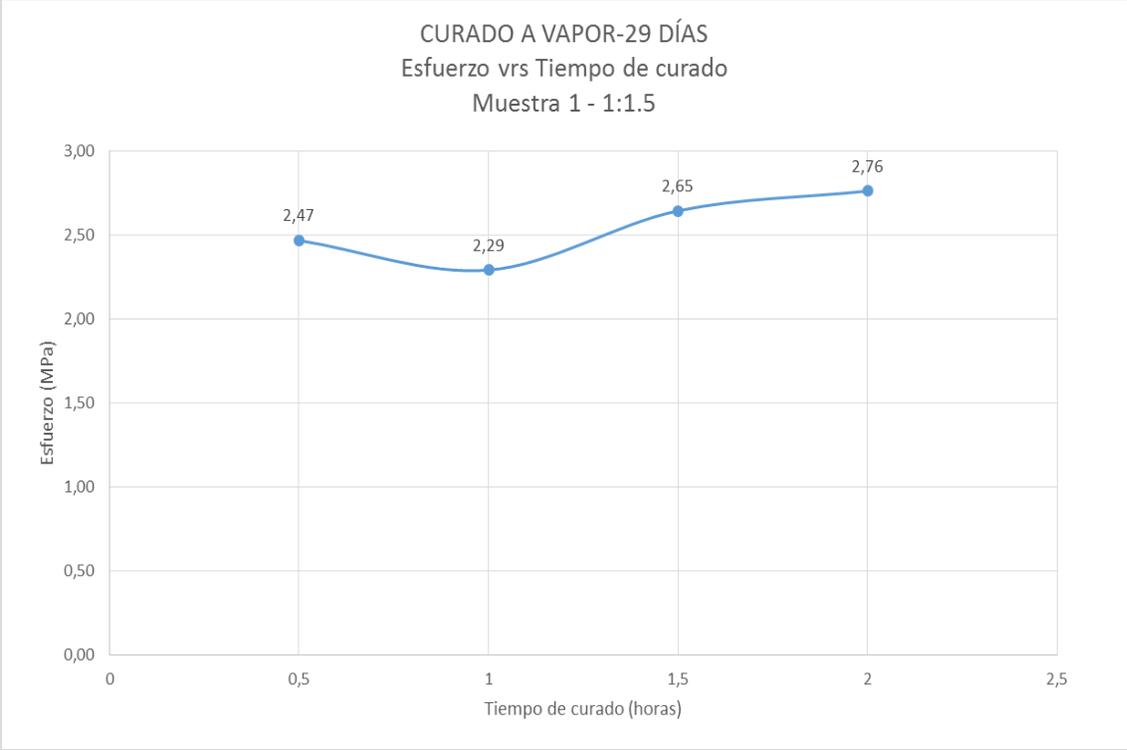
Fuente: elaboración propia.

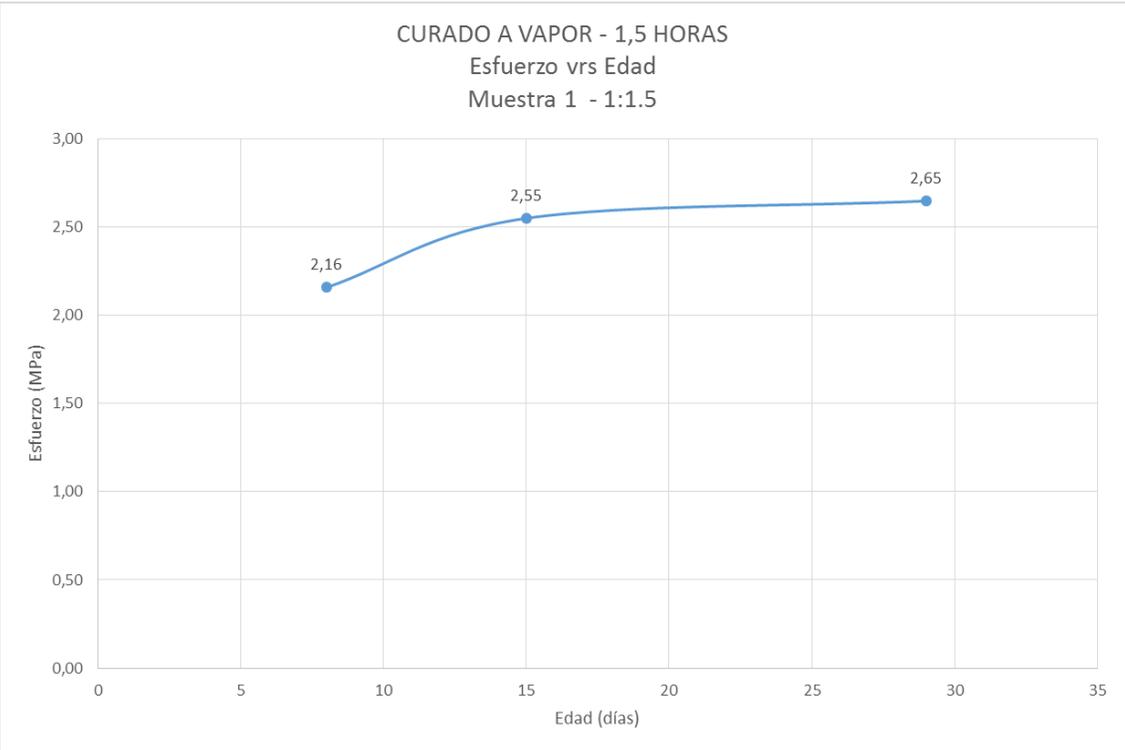
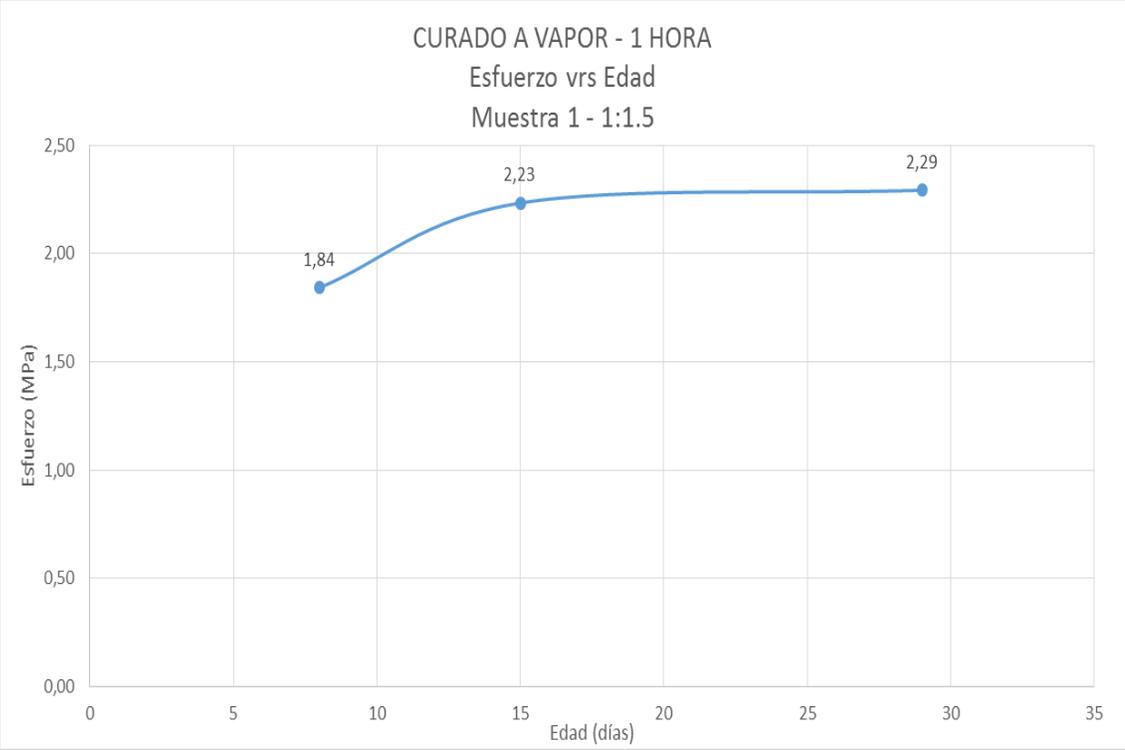
CURADO A VAPOR - 8 DÍAS
Esfuerzo vs Tiempo de curado
Muestra 1 - 1:1.5

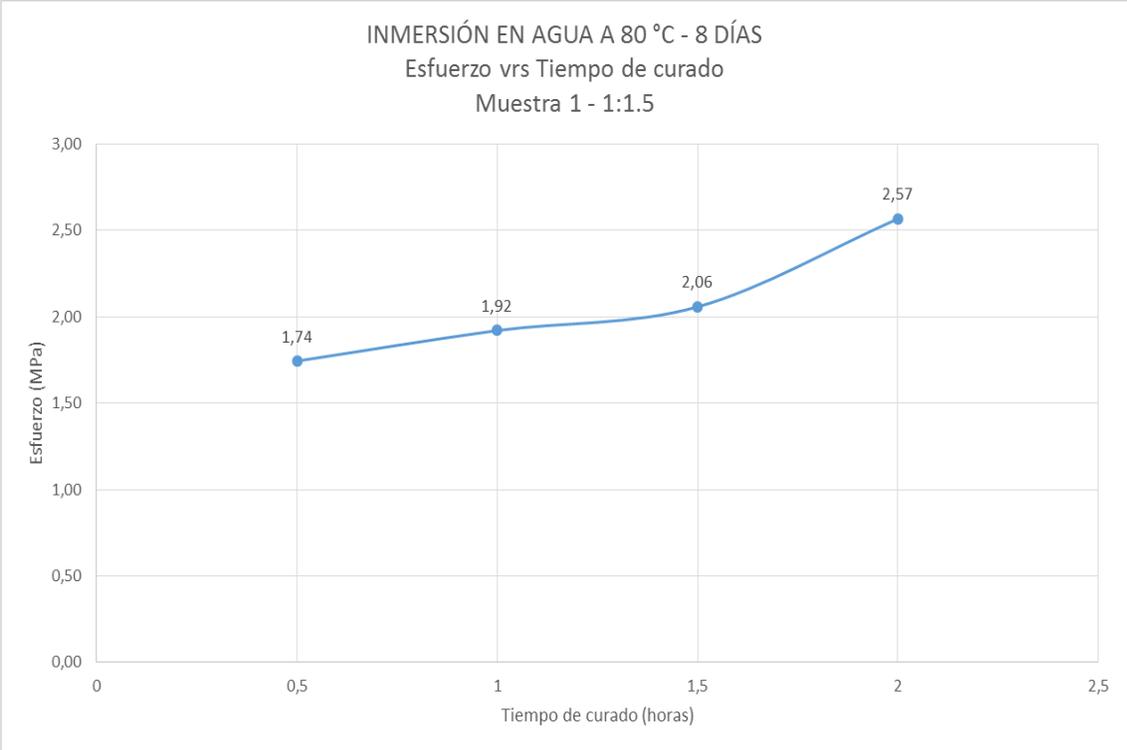
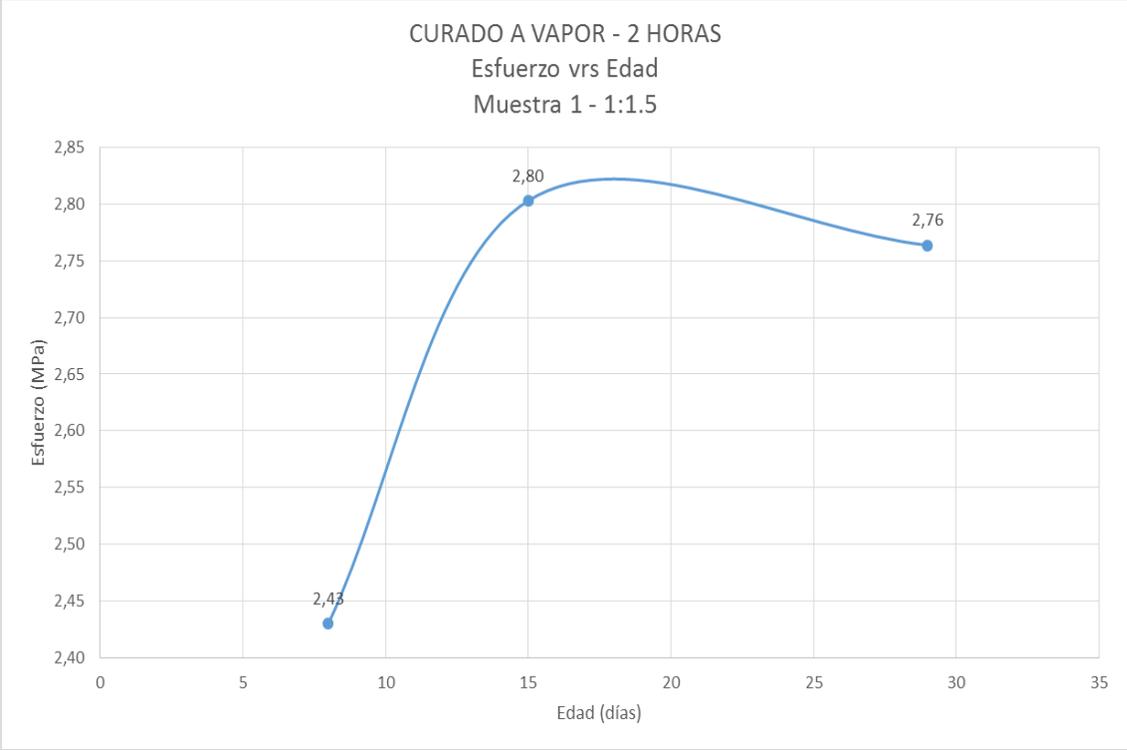


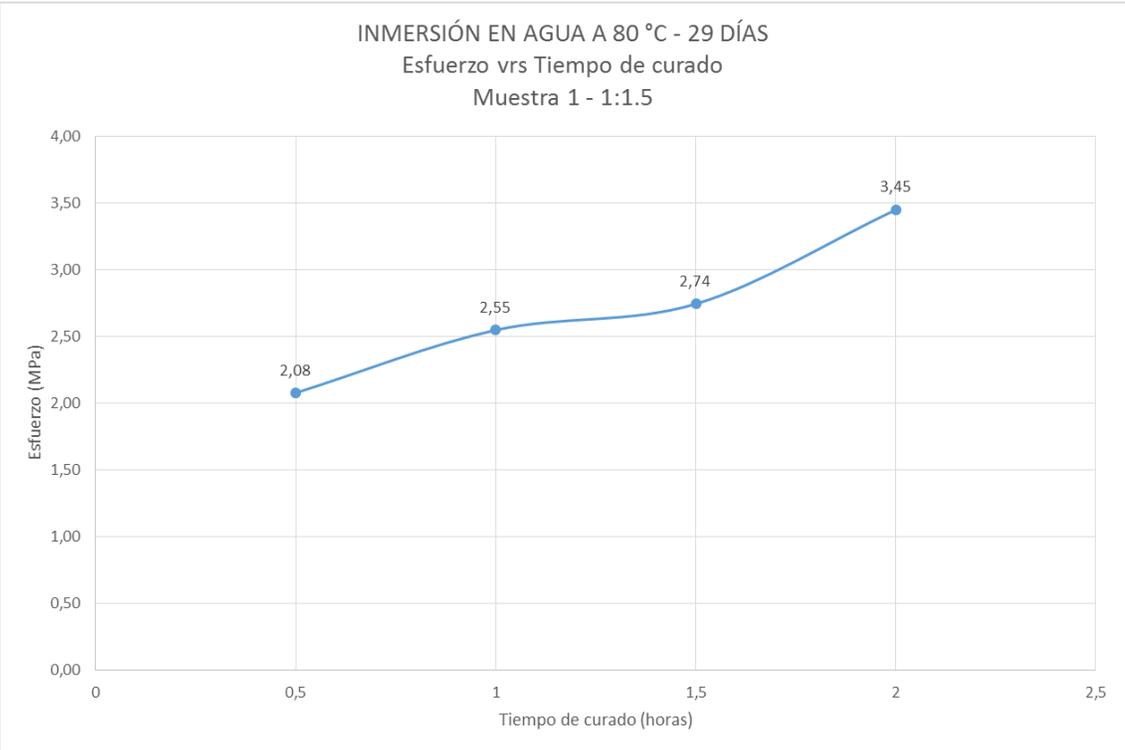
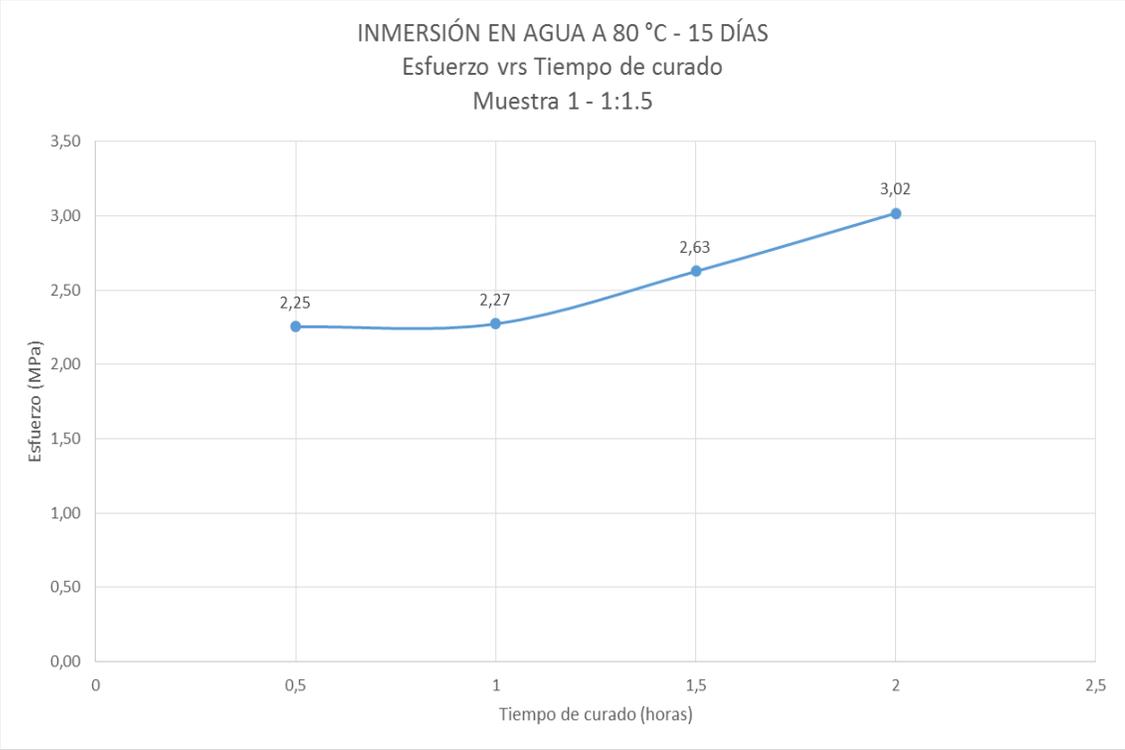
CURADO A VAPOR-15 DÍAS
Esfuerzo vs Tiempo de curado
Muestra 1 - 1:1.5

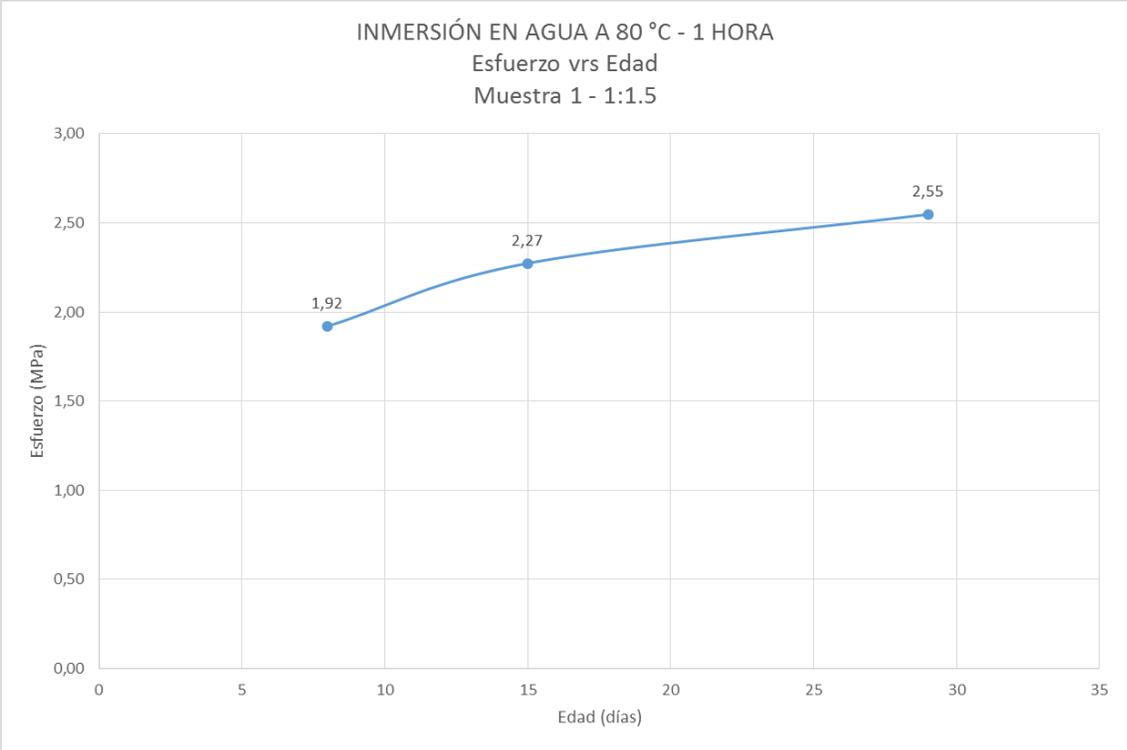
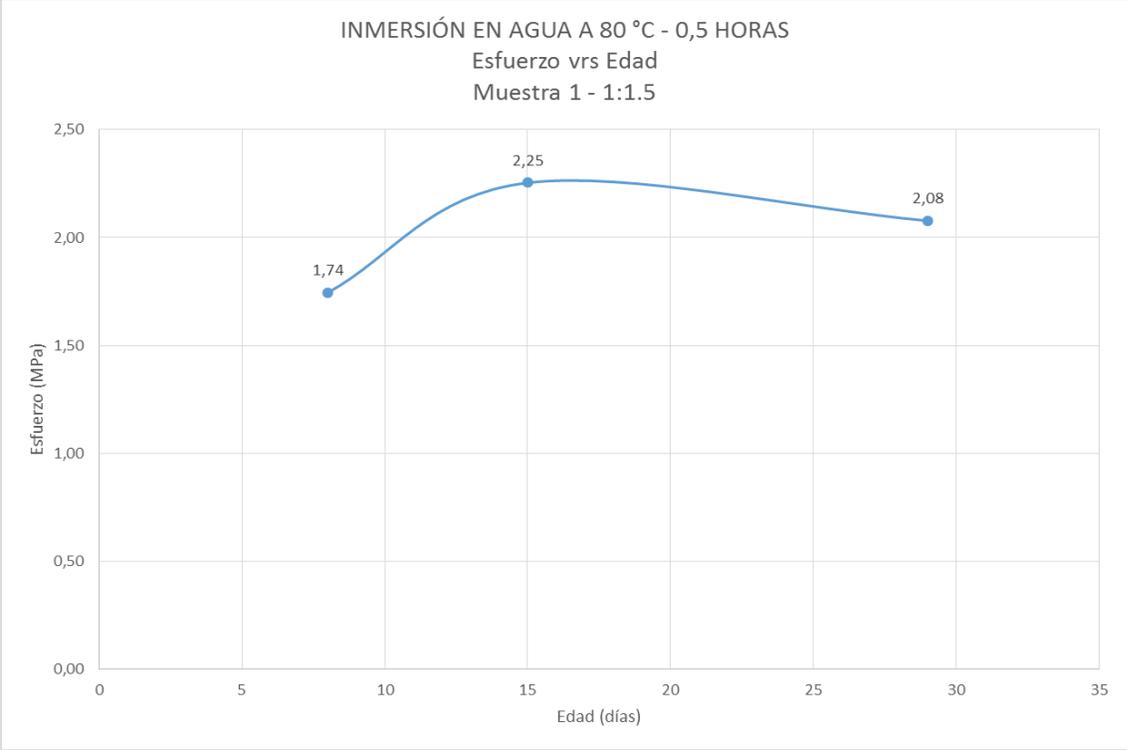


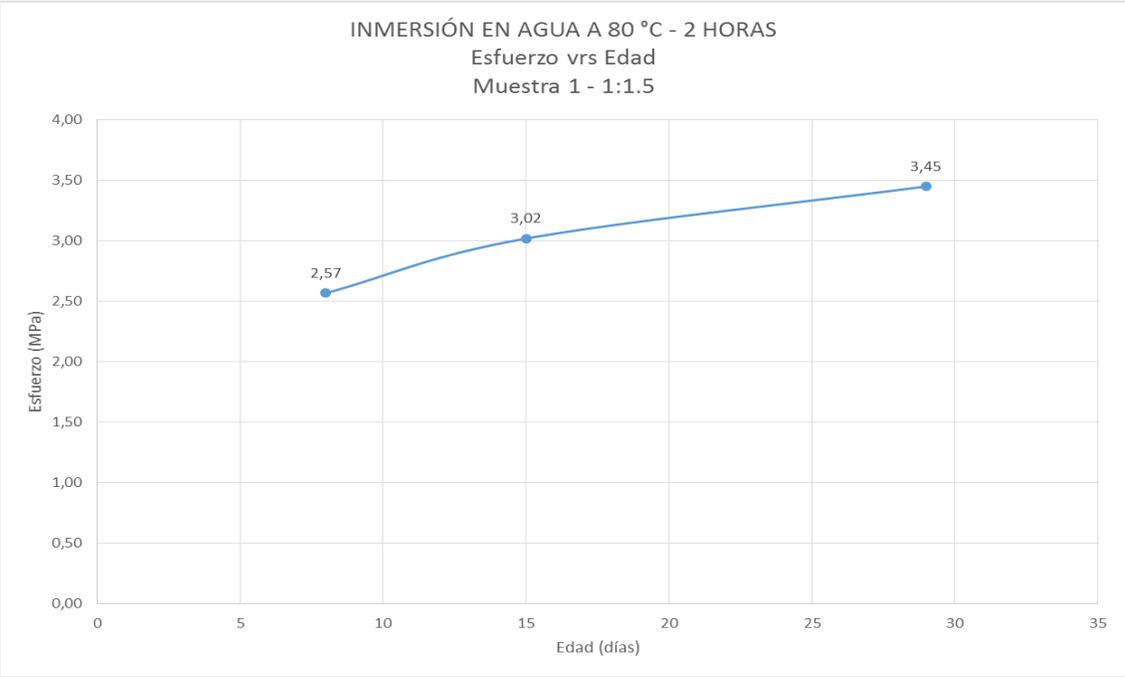
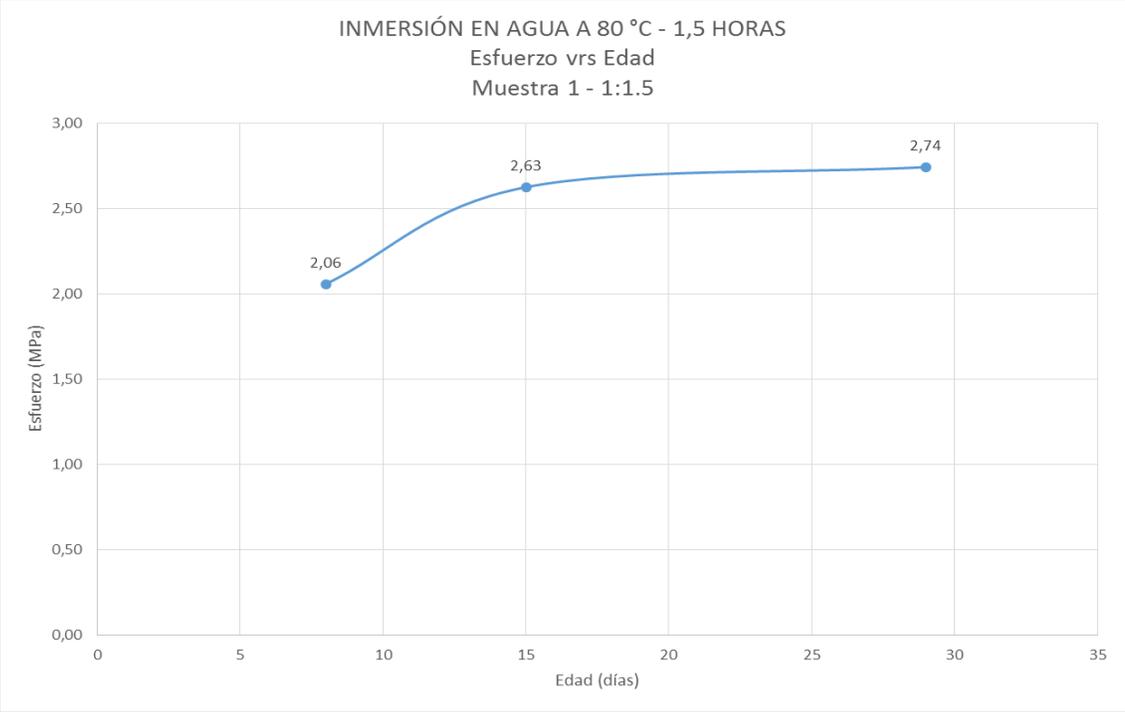










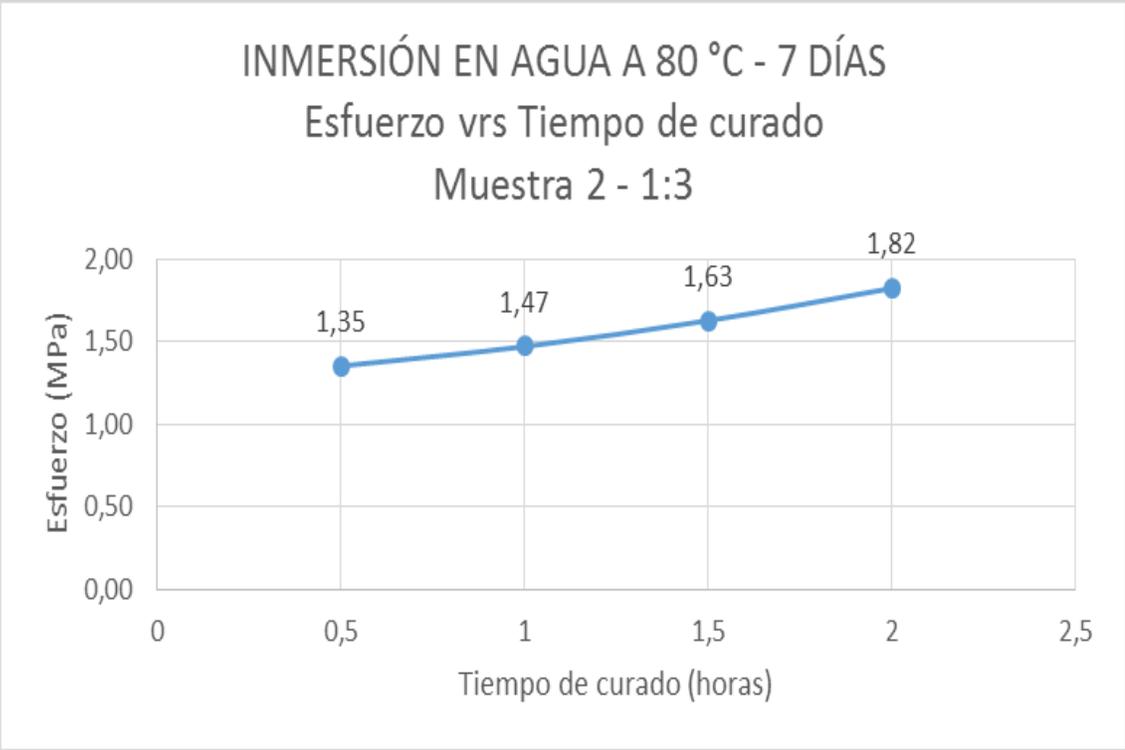
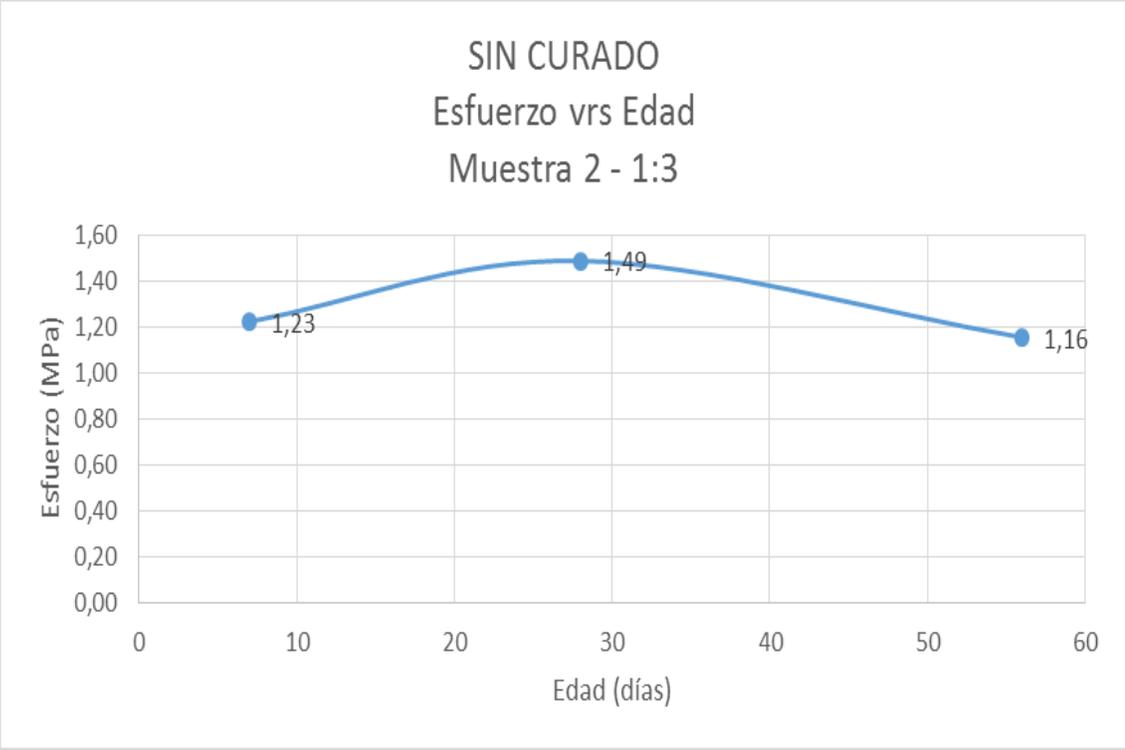


Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2013.

MEZCLA 2

CURADO	MUESTRA	ÁREA (m²)	PESO (g)	CARGA PRIMERA GRIETA (N)	CARGA DE RUPTURA (N)	ESFUERZO DE RUPTURA (MPa)	FECHA (d/m/a)	EDAD DE LA MUESTRA (días)
SIN CURADO	0A	0,0025	-	3 038	3 136	1,25	06/08/2014	7
	0B	0,0025	-	2 989	2 989	1,20	06/08/2014	7
	0C	0,0025	156,3	3 332	3 430	1,37	27/08/2014	28
	0D	0,0025	157,8	3 528	4 018	1,61	27/08/2014	28
	0E	0,0025	157	3 087	3 724	1,49	27/08/2014	28
	0F	0,0025	159,3	2 303	2 891	1,16	24/09/2014	56
	0G	0,0025	158,5	2 352	2 744	1,10	24/09/2014	56
	0H	0,0025	157	3 038	3 038	1,22	24/09/2014	56
	1A	0,0025	-	3 381	3 381	1,35	06/08/2014	7
	1B	0,0025	160,8	4 410	4 655	1,86	27/08/2014	28
INMERSIÓN EN AGUA A 80 °C	1C	0,0025	161	2 450	3 773	1,51	24/09/2014	56
	2A	0,0025	-	3 675	3 675	1,47	06/08/2014	7
	2B	0,0025	156,7	3 773	4 704	1,88	27/08/2014	28
	2C	0,0025	157	3 136	3 724	1,49	24/09/2014	56
	3A	0,0025	-	4 067	4 067	1,63	06/08/2014	7
	3B	0,0025	162,5	5 635	5 978	2,39	27/08/2014	28
	3C	0,0025	164	4 410	5 145	2,06	24/09/2014	56
	4A	0,0025	-	4 557	4 557	1,82	06/08/2014	7
	4B	0,0025	154,7	2 793	6 174	2,47	27/08/2014	28
	4C	0,0025	161,8	3 185	5 243	2,10	24/09/2014	56

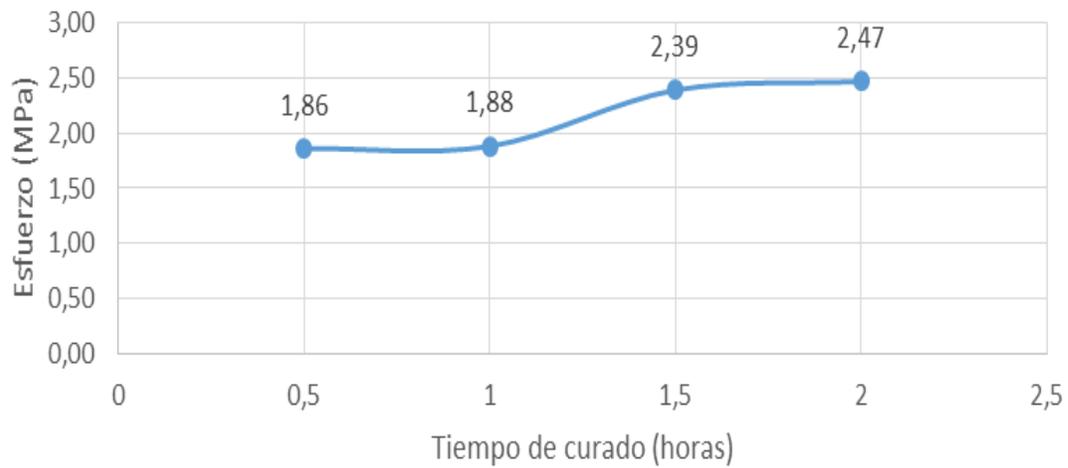
Fuente: elaboración propia



INMERSIÓN EN AGUA A 80 °C - 28 DÍAS

Esfuerzo vrs Tiempo de curado

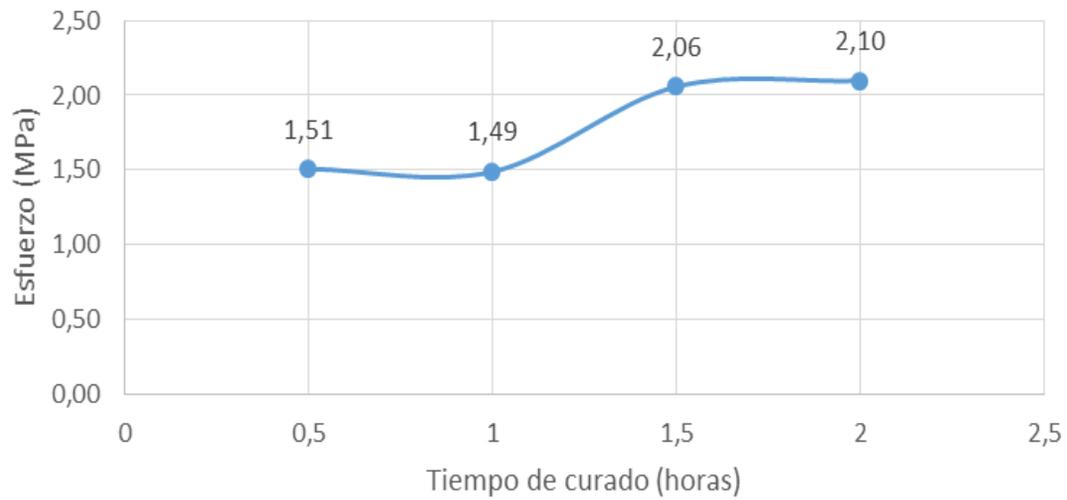
Muestra 2 - 1:3

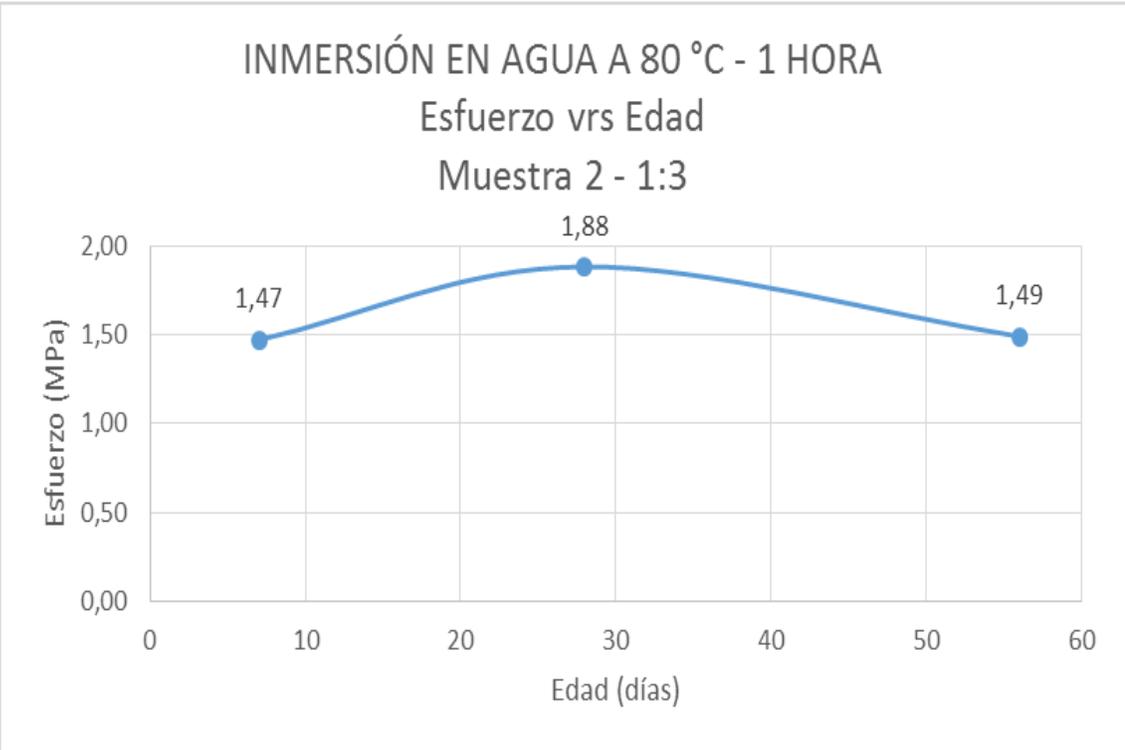
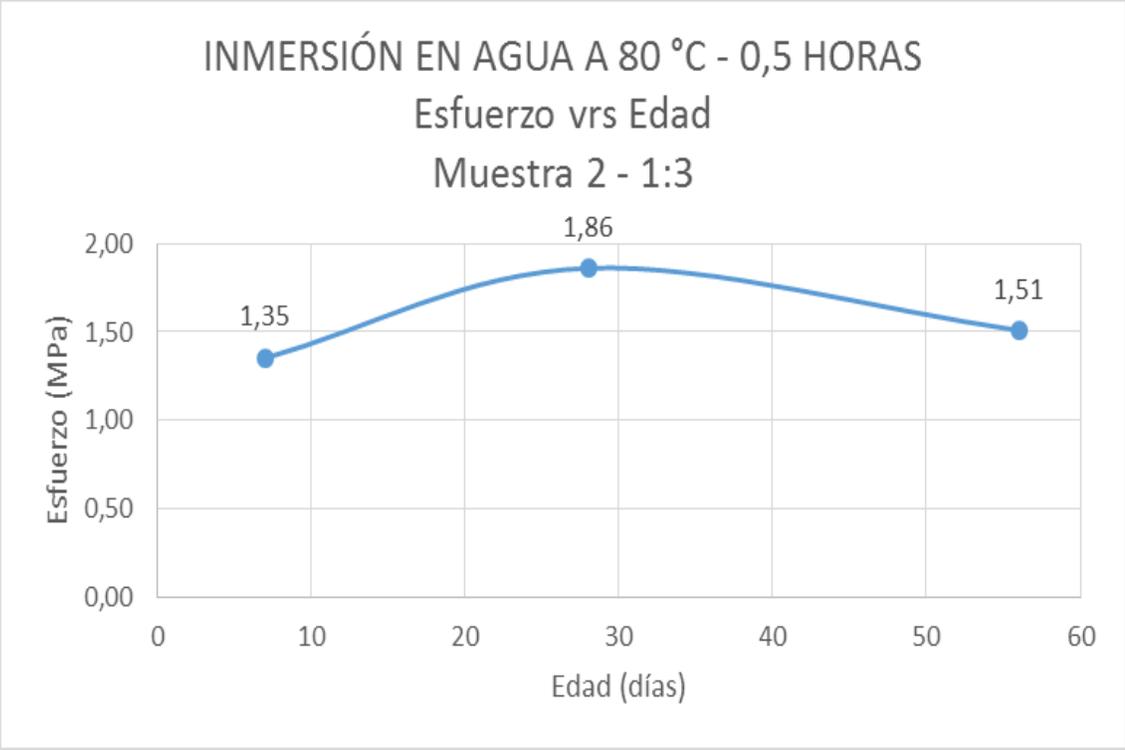


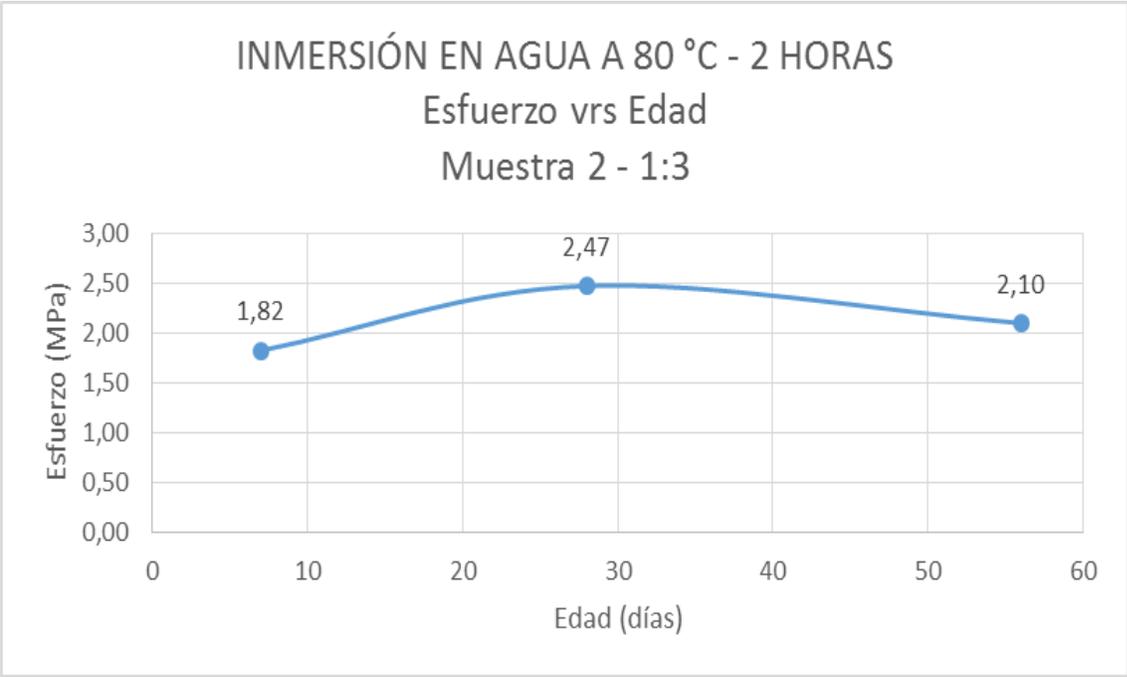
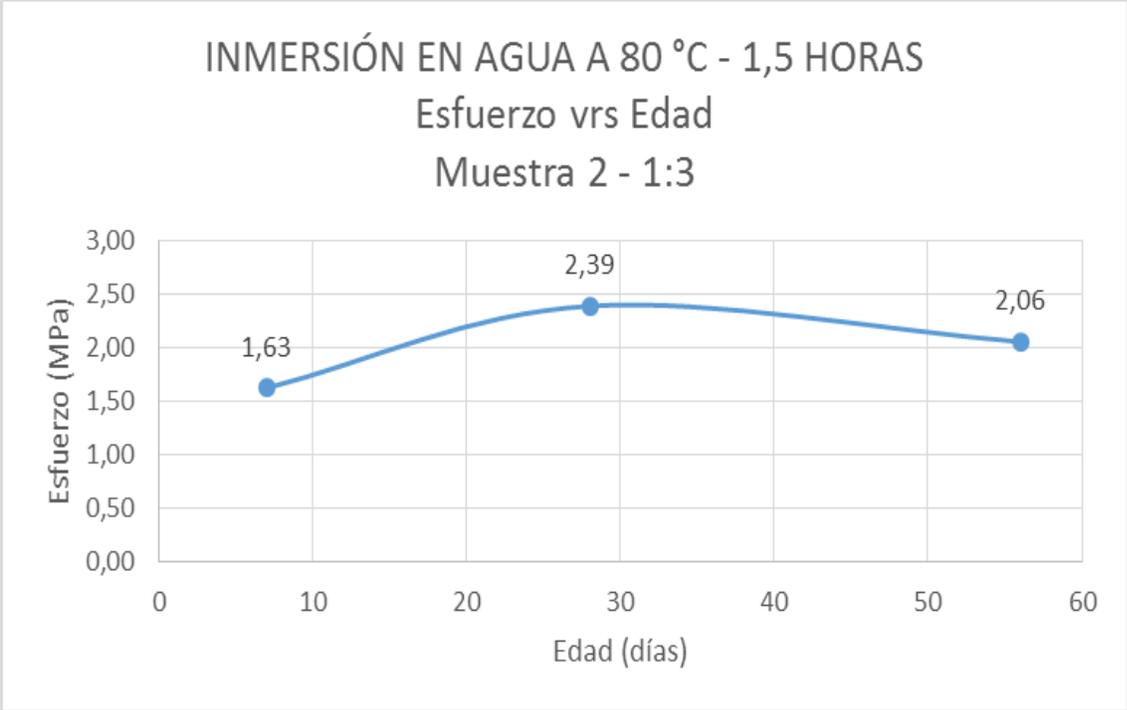
INMERSIÓN EN AGUA A 80 °C - 56 DÍAS

Esfuerzo vrs Tiempo de curado

Muestra 2 - 1:3





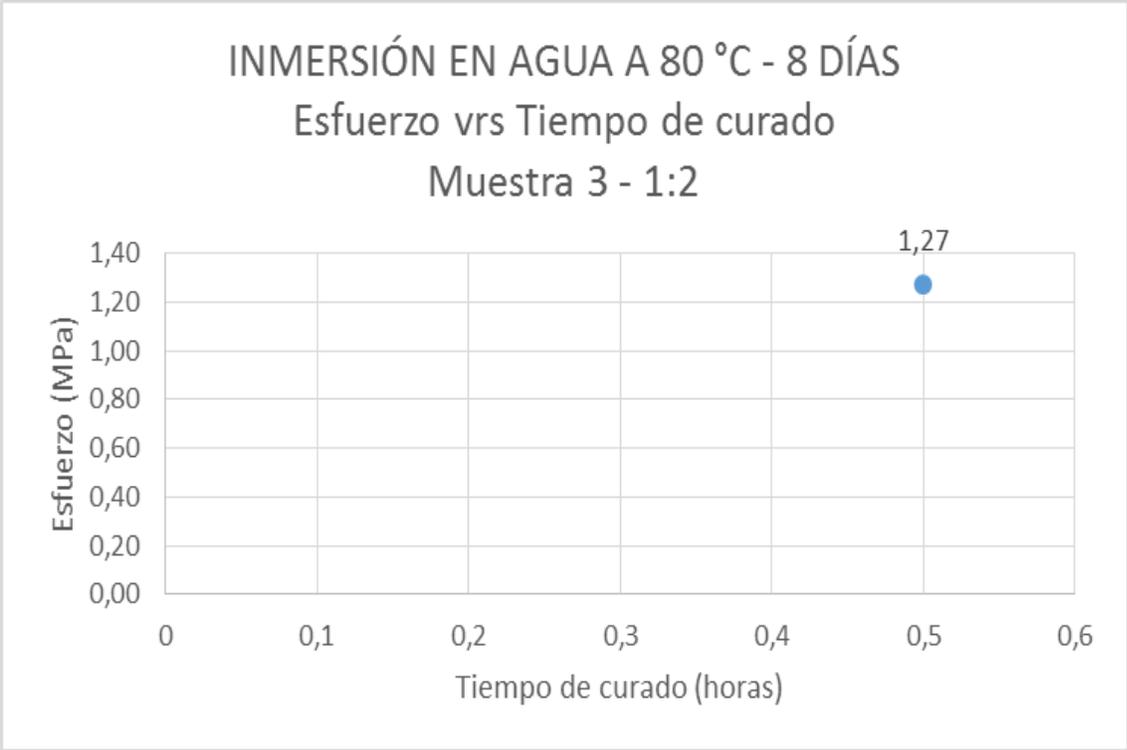
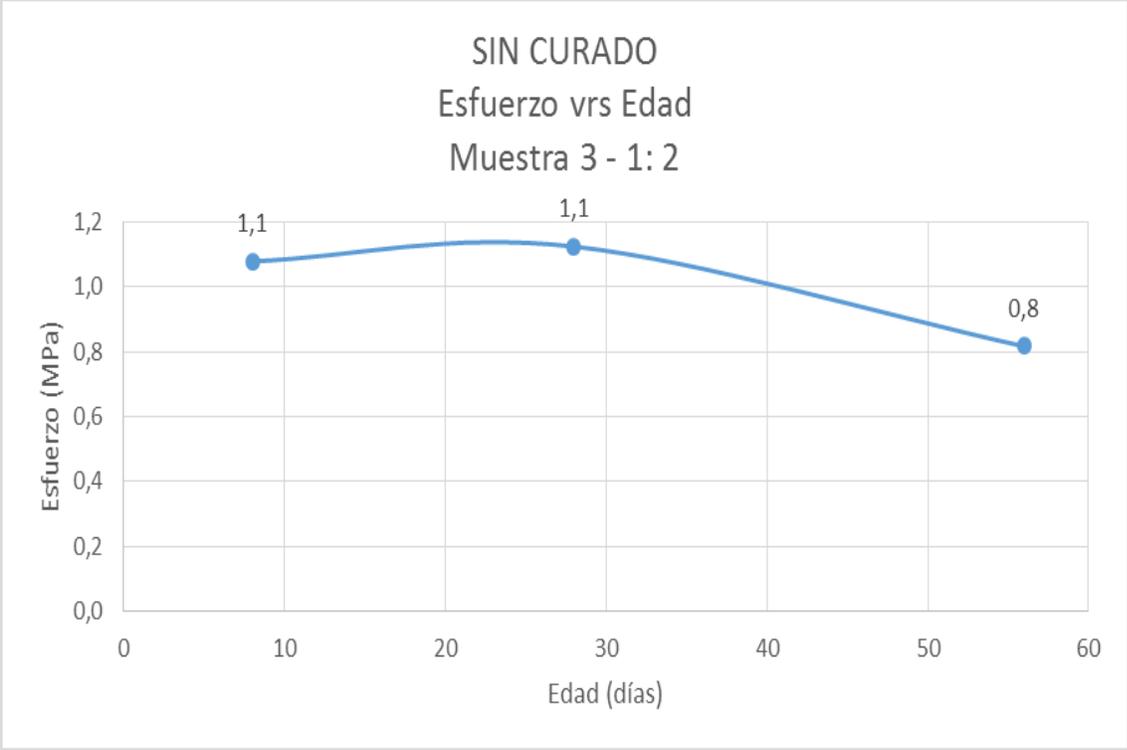


Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2013.

MEZCLA 3

CURADO	MUESTRA	ÁREA (m ²)	PESO (g)	CARGA PRIMERA GRIETA (N)	CARGA DE RUPTURA (N)	ESFUERZO DE RUPTURA (MPa)	FECHA (d/m/a)	EDAD DE LA MUESTRA (Días)
SIN CURADO	A	0,0025	-	2 793	3 038	1,22	14/08/2014	8
	A	0,0025	169,2	2 058	2 744	1,10	03/09/2014	28
	A	0,0025	171	2 058	2 107	0,84	01/10/2014	56
	B	0,0025	-	2 205	2 450	0,98	14/08/2014	8
	B	0,0025	166,7	2 254	2 499	1,00	03/09/2014	28
	B	0,0025	169,2	1 715	1 715	0,69	01/10/2014	56
	C	0,0025	-	2 450	2 597	1,04	14/08/2014	8
	C	0,0025	167,1	3 038	3 185	1,27	03/09/2014	28
	C	0,0025	167,2	2 205	2 303	0,92	01/10/2014	56
	A1	0,0025	-	3 185	3 185	1,27	14/08/2014	8
	A2	0,0025	169,2	3 969	4 116	1,65	03/09/2014	28
	A3	0,0025	167,1	3 283	3 528	1,41	01/10/2014	56
INMERSIÓN EN AGUA A 80 °C	B1	0,0025	168,4	3 038	3 185	1,27	20/08/2014	14
	B2	0,0025	159,6	2 695	2 842	1,14	03/09/2014	28
	B3	0,0025	159,8	2 940	2 940	1,18	01/10/2014	56
	C1	0,0025	164,9	2 695	2 989	1,20	20/08/2014	14
	C2	0,0025	159,7	3 479	3 479	1,39	03/09/2014	28
	C3	0,0025	158,8	2 793	2 793	1,12	01/10/2014	56
	A1	0,0025	197,3	4 165	4 410	1,76	20/08/2014	14
	A2	0,0025	208,2	7 987	7 987	3,19	03/09/2014	28
	A3	0,0025	206,4	5 880	10 241	4,10	01/10/2014	56
INMERSIÓN EN AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE	B1	0,0025	191,5	3 675	3 675	1,47	20/08/2014	14
	B2	0,0025	198,9	6 468	6 468	2,59	03/09/2014	28
	B3	0,0025	200,8	8 820	9 016	3,61	01/10/2014	56
	C1	0,0025	187,8	3 234	3 234	1,29	20/08/2014	14
	C2	0,0025	199,2	6 272	6 272	2,51	03/09/2014	28
	C3	0,0025	195,8	8 918	9 310	3,72	01/10/2014	56

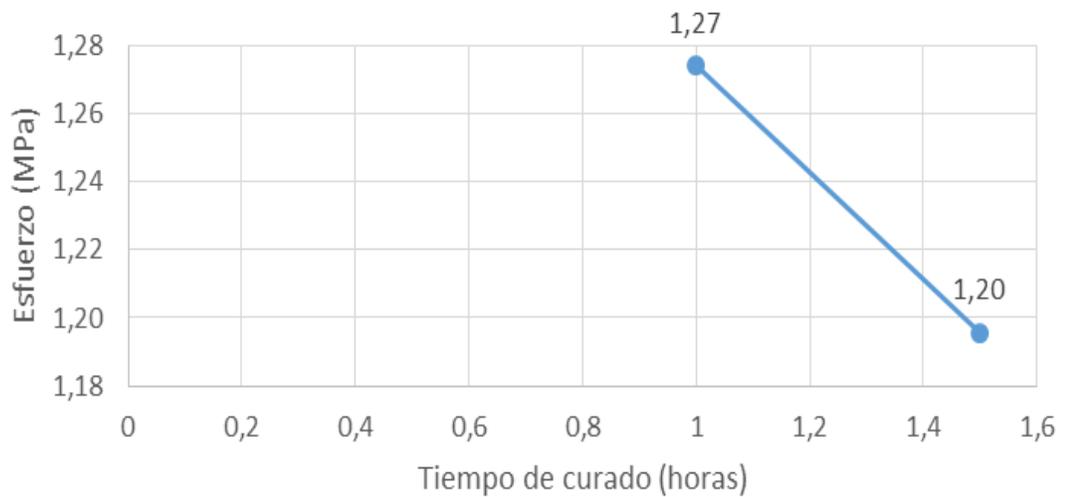
Fuente: elaboración propia.



INMERSIÓN EN AGUA A 80 °C - 14 DÍAS

Esfuerzo vrs Tiempo de curado

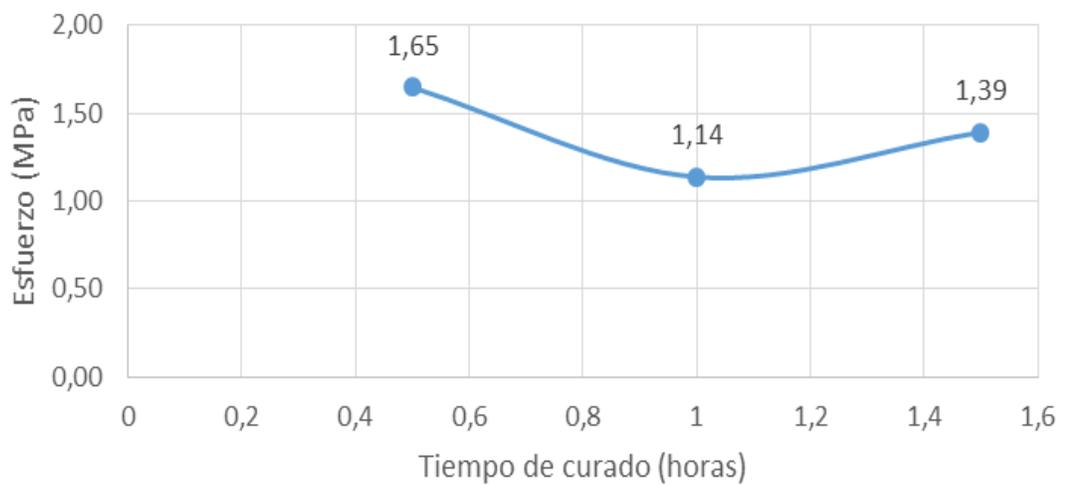
Muestra 3 - 1:2



INMERSIÓN EN AGUA A 80 °C - 28 DÍAS

Esfuerzo vrs Tiempo de curado

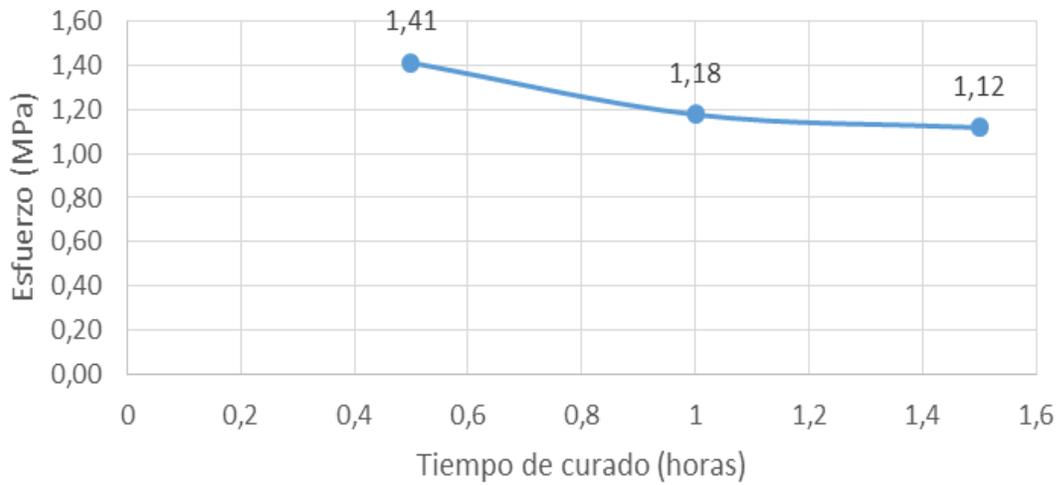
Muestra 3 - 1:2



INMERSIÓN EN AGUA A 80 °C - 56 DÍAS

Esfuerzo vrs Tiempo de curado

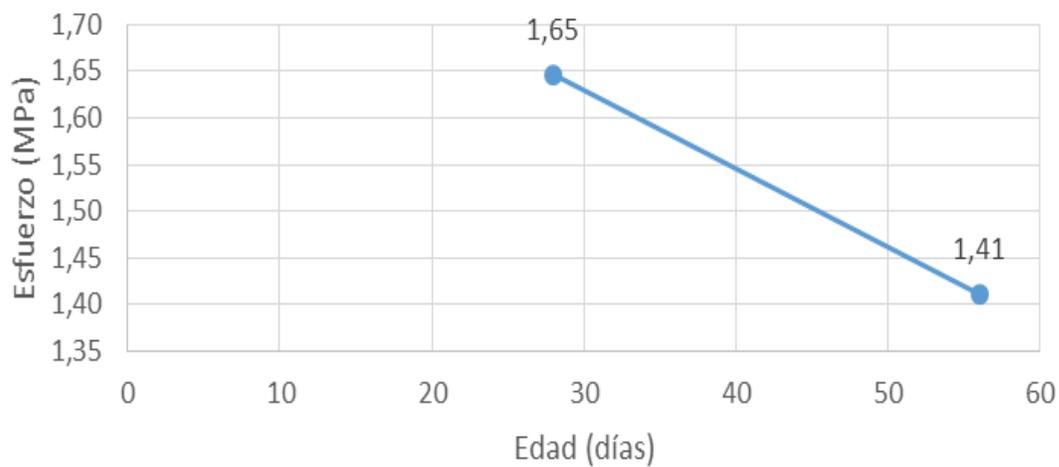
Muestra 3 - 1:2



INMERSIÓN EN AGUA A 80 °C - 0,5 HORAS

Esfuerzo vrs Edad

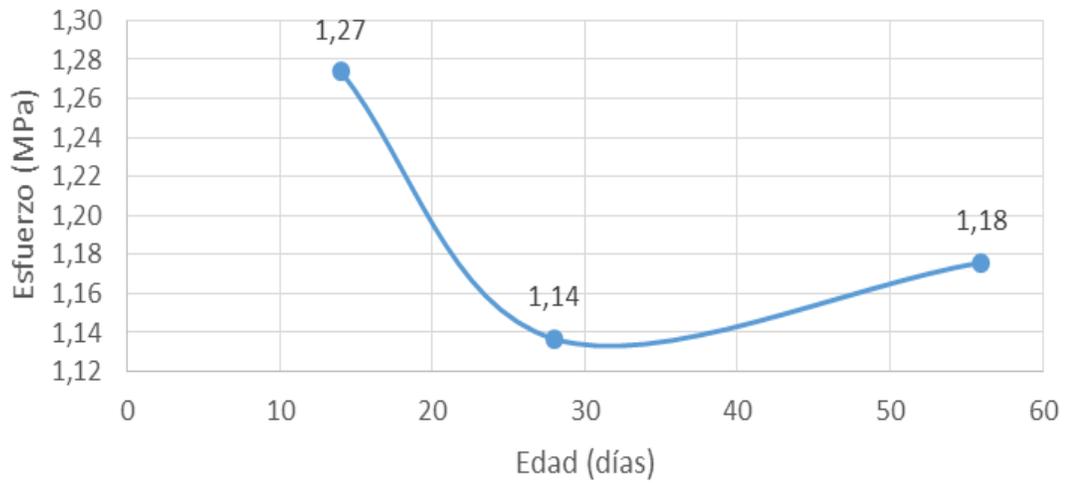
Muestra 3 - 1:2



INMERSIÓN EN AGUA A 80 °C - 1 HORA

Esfuerzo vrs Edad

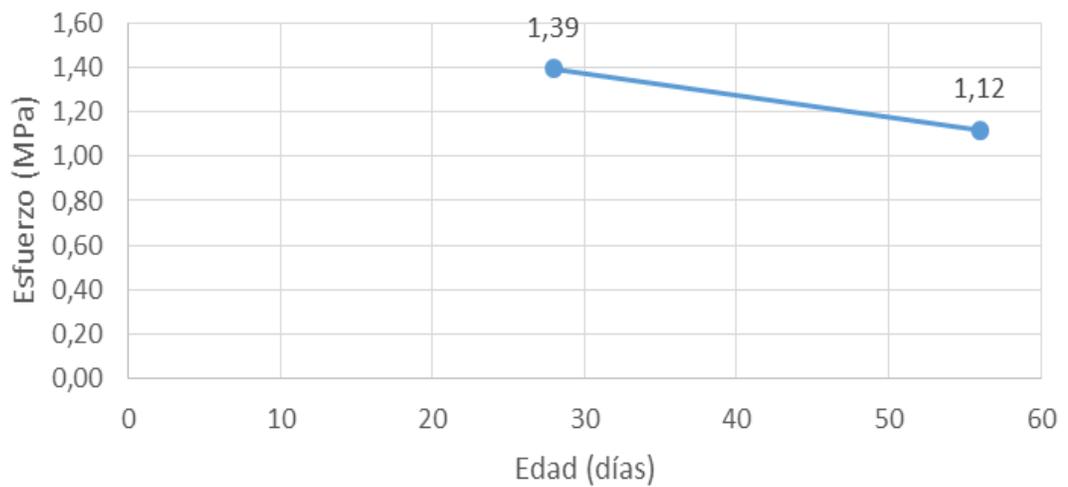
Muestra 3 - 1:2

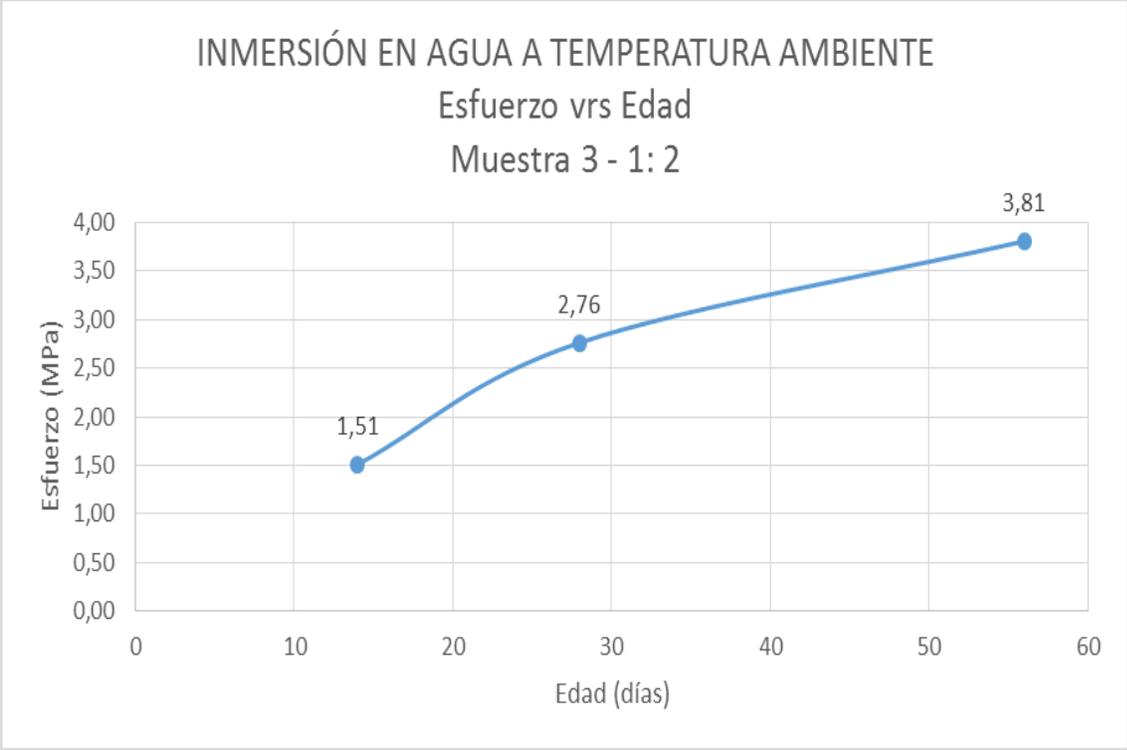


INMERSIÓN EN AGUA A 80 °C - 1,5 HORAS

Esfuerzo vrs Edad

Muestra 3 - 1:2

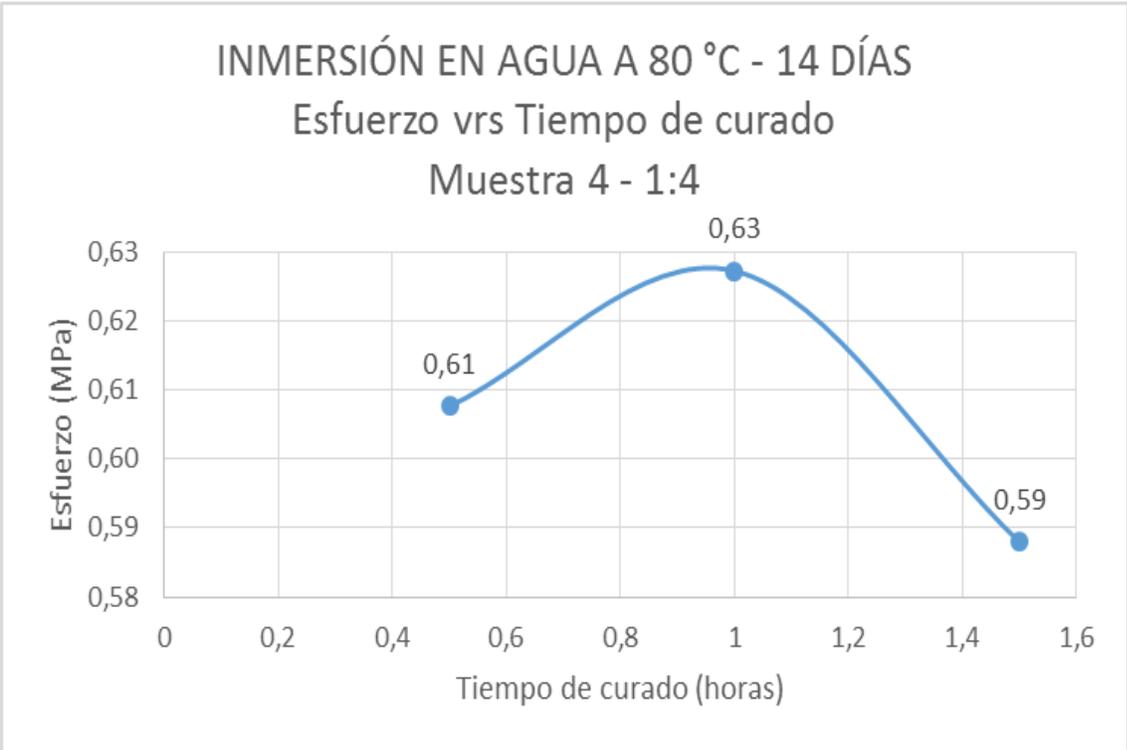
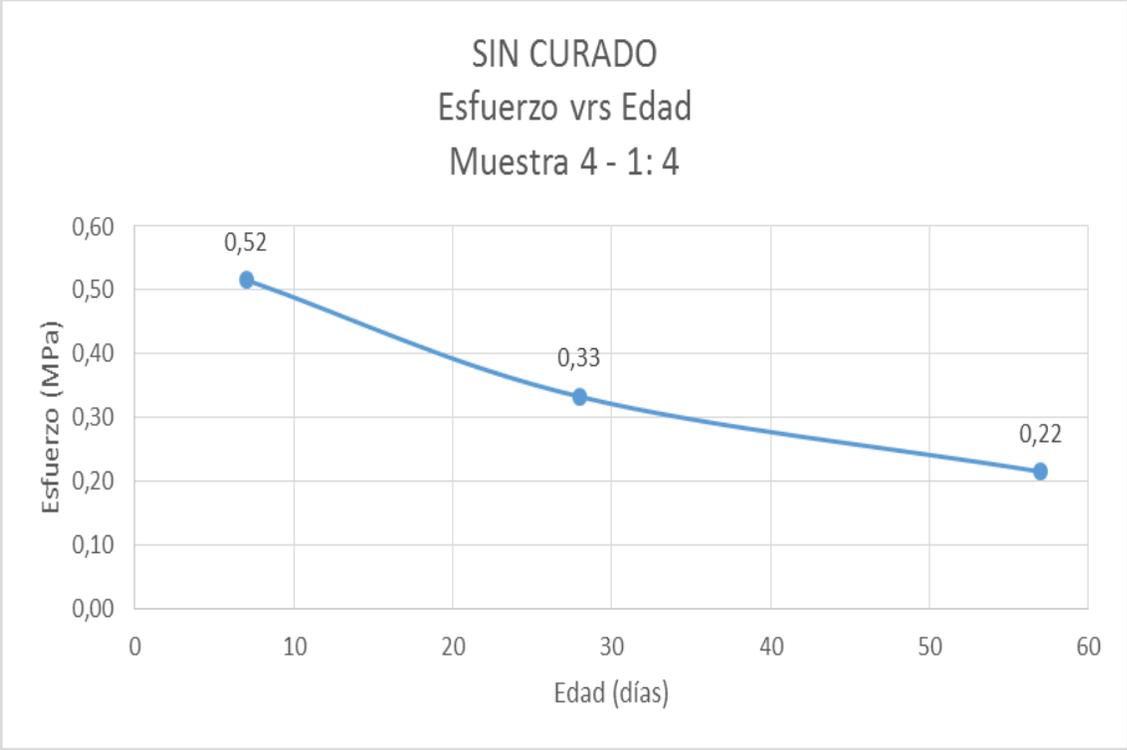




Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2013.

MEZCLA 4									
CURADO	MUESTRA	ÁREA (m ²)	PESO (g)	CARGA PRIMERA GRIETA (N)	CARGA DE RUPTURA (N)	ESFUERZO DE RUPTURA (MPa)	FECHA (d/m/a)	EDAD DE LA MUESTRA (días)	
SIN CURADO	A	0,0025	168,8	1 323	1 372	0,55	27/08/2014	7	
	A	0,0025	147,3	441	882	0,35	17/09/2014	28	
	A	0,0025	146,8	490	686	0,27	16/10/2014	57	
	B	0,0025	165,3	1 176	1 323	0,53	27/08/2014	7	
	B	0,0025	144,9	735	735	0,29	17/09/2014	28	
	B	0,0025	143,5	245	392	0,16	16/10/2014	57	
	C	0,0025	160,7	1 078	1 176	0,47	27/08/2014	7	
	C	0,0025	144,2	784	882	0,35	17/09/2014	28	
	C	0,0025	141,3	490	539	0,22	16/10/2014	57	
INMERSIÓN EN AGUA A 80 °C	A1	0,0025	168,4	1 470	1 519	0,61	03/09/2014	14	
	A2	0,0025	148,3	1 176	1 176	0,47	17/09/2014	28	
	A3	0,0025	146,1	882	980	0,39	16/10/2014	57	
	B1	0,0025	166,2	1 421	1 568	0,63	03/09/2014	14	
	B2	0,0025	148	1 078	1 127	0,45	17/09/2014	28	
	B3	0,0025	145,2	245	686	0,27	16/10/2014	57	
	C1	0,0025	165,3	1 421	1 470	0,59	03/09/2014	14	
	C2	0,0025	148,5	1 176	1 176	0,47	17/09/2014	28	
	C3	0,0025	143,9	784	980	0,39	16/10/2014	57	
INMERSIÓN EN AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE	A1	0,0025	170,1	1 617	1 617	0,65	03/09/2014	14	
	A2	0,0025	180	3 185	3 283	1,31	17/09/2014	28	
	A3	0,0025	182,3	3 675	3 675	1,47	16/10/2014	57	
	B1	0,0025	179,9	1 568	1 666	0,67	03/09/2014	14	
	B2	0,0025	189,8	3 136	3 381	1,35	17/09/2014	28	
	B3	0,0025	193,7	4 067	4 067	1,63	16/10/2014	57	
	C1	0,0025	173,7	1 666	1 666	0,67	03/09/2014	14	
	C2	0,0025	183,6	3 087	3 087	1,23	17/09/2014	28	
	C3	0,0025	191,8	3 822	3 822	1,53	16/10/2014	57	

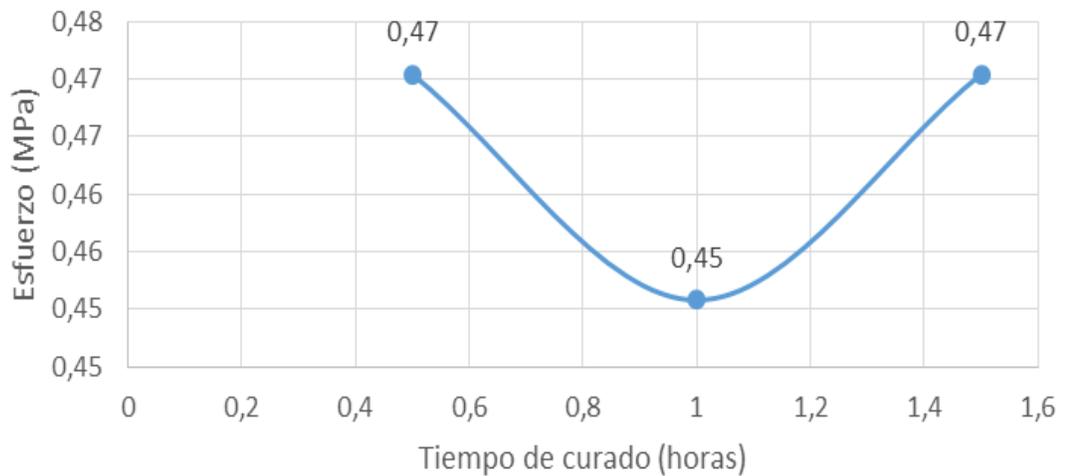
Fuente: elaboración propia.



INMERSIÓN EN AGUA A 80 °C - 28 DÍAS

Esfuerzo vrs Tiempo de curado

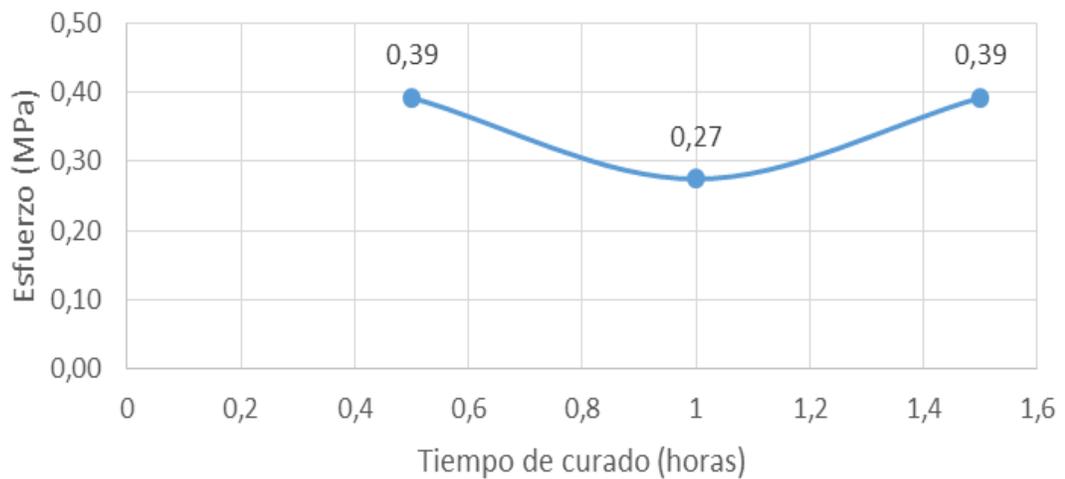
Muestra 4 - 1:4



INMERSIÓN EN AGUA A 80 °C - 57 DÍAS

Esfuerzo vrs Tiempo de curado

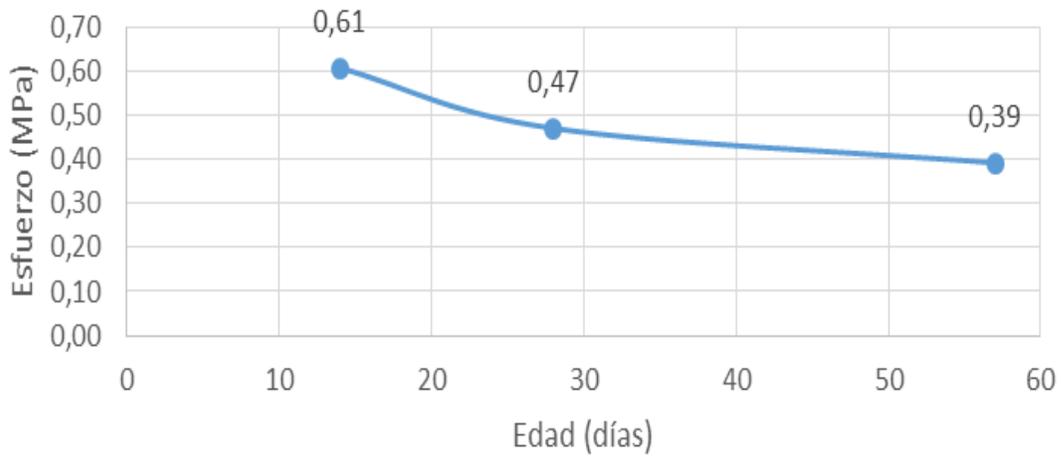
Muestra 4 - 1:4



INMERSIÓN EN AGUA A 80 °C - 0,5 HORAS

Esfuerzo vrs Edad

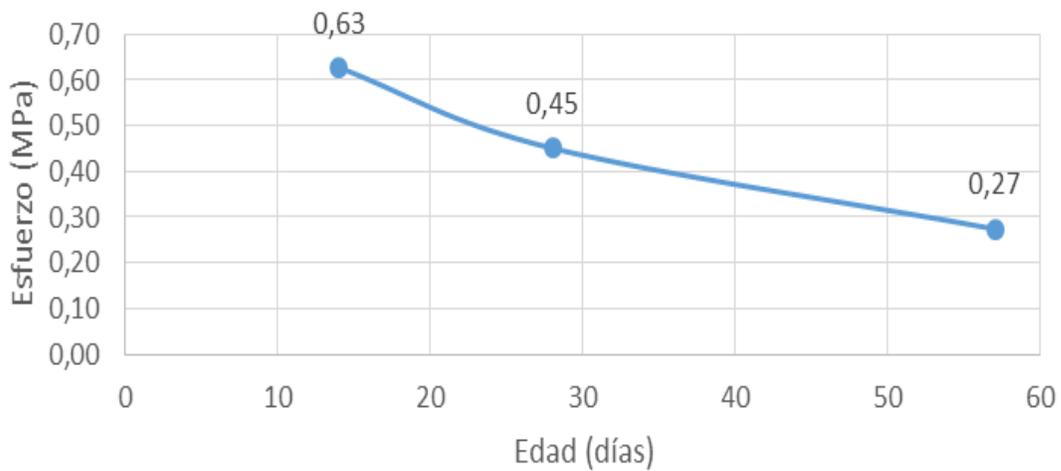
Muestra 4 - 1:4

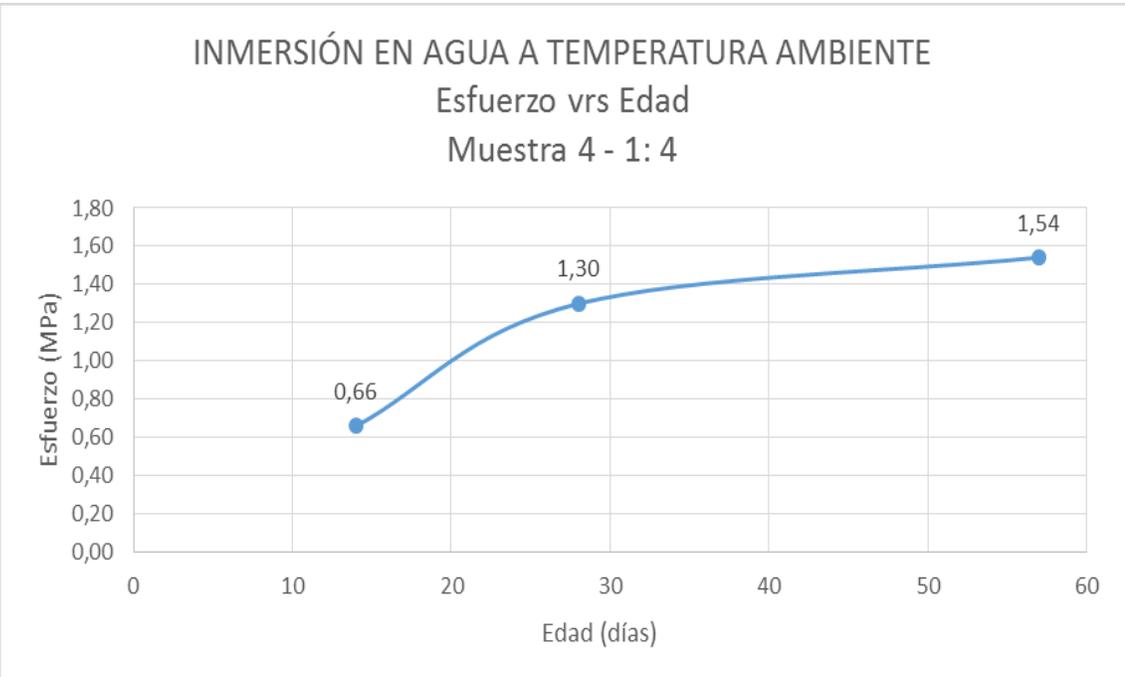
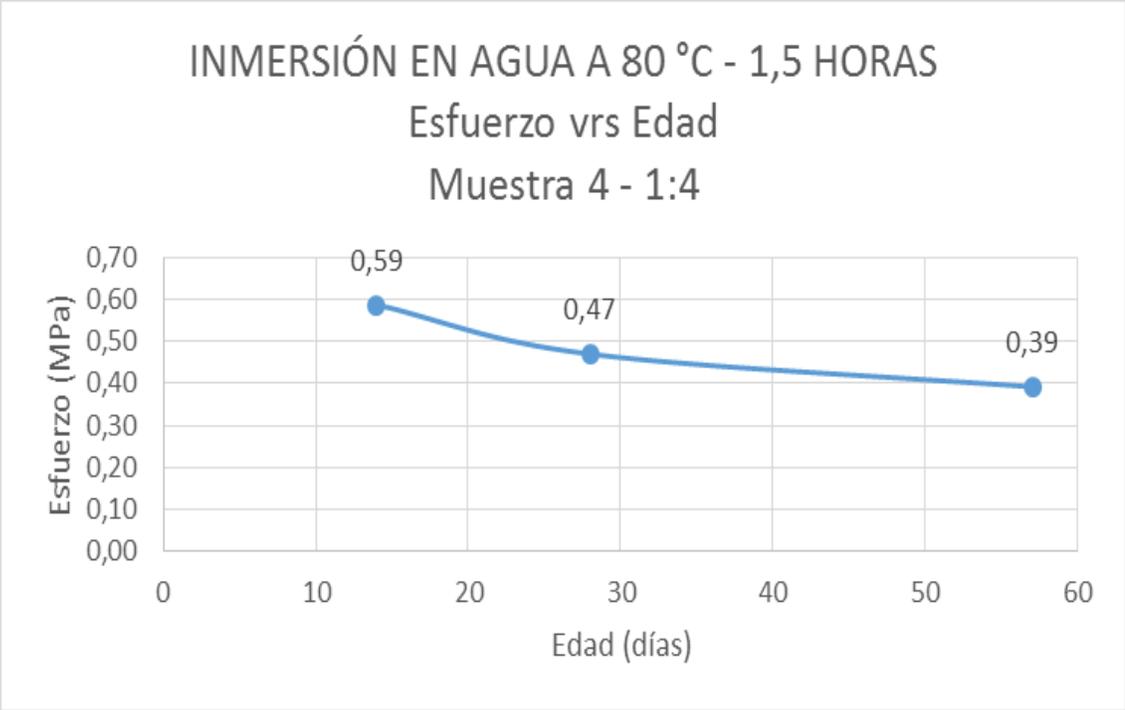


INMERSIÓN EN AGUA A 80 °C - 1 HORAS

Esfuerzo vrs Edad

Muestra 4 - 1:4





Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2013.

Apéndice 3. Registro de temperaturas en grados centígrados dentro de la cámara de curado tipo invernadero y del ambiente

Se utilizó la cámara de curado tipo invernadero para el curado de los BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana (CP) y los estabilizados con cemento tipo UGC (C), se curaron al ambiente. Por lo que se tomaron las temperaturas, en ambos sitios, durante sus 14 días de curado.

Fecha	23-feb-15		24-feb-15	
	Cámara de curado	Al ambiente	Cámara de curado	Al ambiente
Tiempo (h)	BTC - CP	BTC - C	BTC - CP	BTC - C
9:00 a. m.	25	18	27	19
10:00 a. m.	34	21	35	22
11:00 a. m.	37	23	35	23
12:00 p. m.	38	25	37	24
1:00 p. m.	39	27	38	24
2:00 p. m.	39	27	38	26
3:00 p. m.	38	25	39	27

Fecha	25-feb-15		26-feb-15	
	Cámara de curado	Al ambiente	Cámara de curado	Al ambiente
Tiempo (h)	BTC - CP	BTC - C	BTC - CP	BTC - C
9:00 a. m.	25	17	29	19
10:00 a. m.	33	22	34	22
11:00 a. m.	38	25	35	22
12:00 p. m.	38	27	37	23
1:00 p. m.	38	27	39	24
2:00 p. m.	37	26	40	25
3:00 p. m.	36	24	40	24

Fecha	27-feb-15		02-mar-15	
	Cámara de curado	Al ambiente	Cámara de curado	Al ambiente
Tiempo (h)	BTC - CP	BTC - C	BTC - CP	BTC - C
9:00 a. m.	31	19	33	20
10:00 a. m.	35	23	36	22
11:00 a. m.	40	25	39	24
12:00 p. m.	42	27	40	26
1:00 p. m.	42	28	40	27
2:00 p. m.	42	29	41	26
3:00 p. m.	43	29	40	26

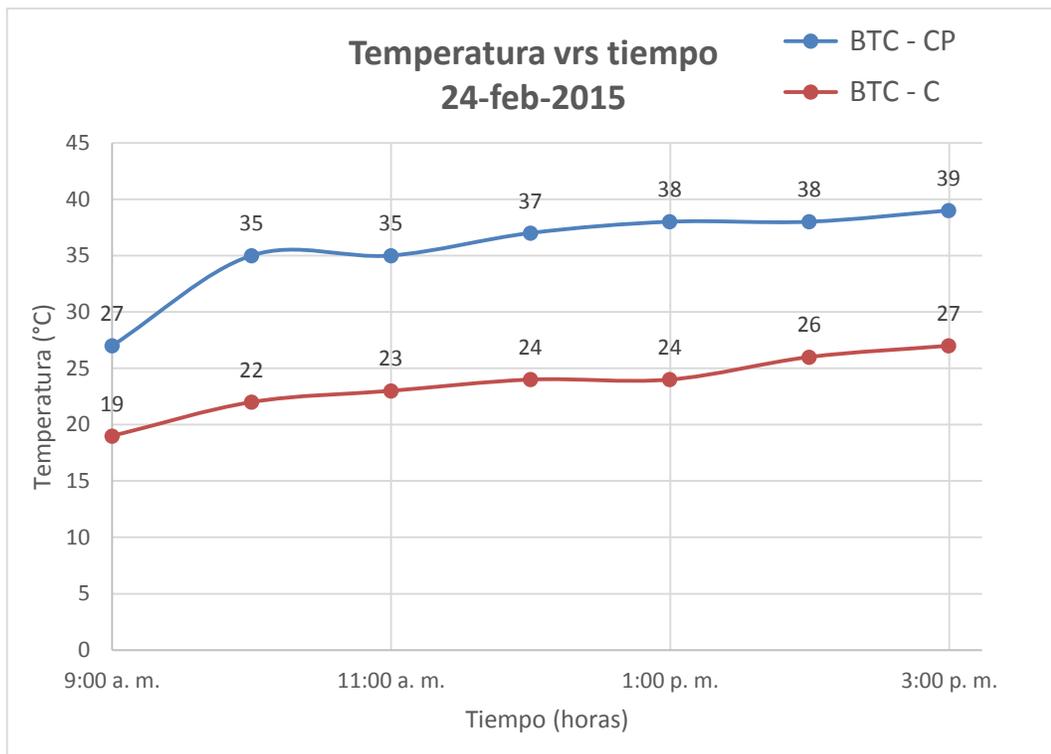
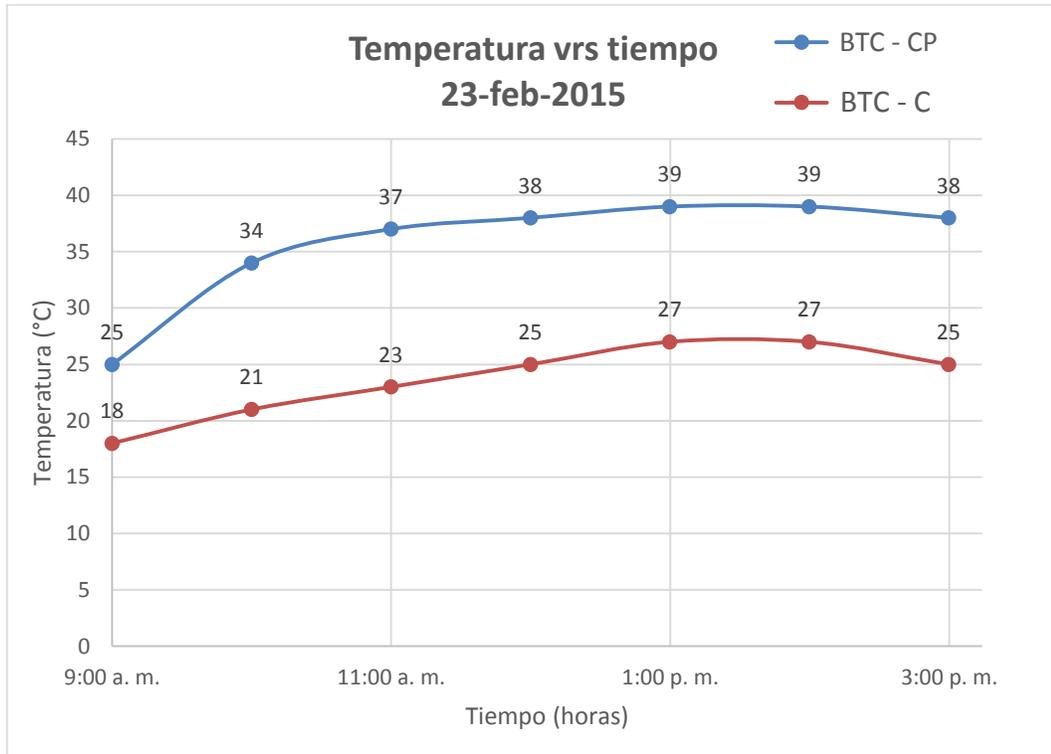
Fecha	03-mar-15		04-mar-15	
	Cámara de curado	Al ambiente	Cámara de curado	Al ambiente
Tiempo (h)	BTC - CP	BTC - C	BTC - CP	BTC - C
9:00 a. m.	33	20	34	19
10:00 a. m.	37	22	39	22
11:00 a. m.	39	24	41	25
12:00 p. m.	40	25	41	27
1:00 p. m.	42	26	43	28
2:00 p. m.	40	26	44	28
3:00 p. m.	40	25	42	28

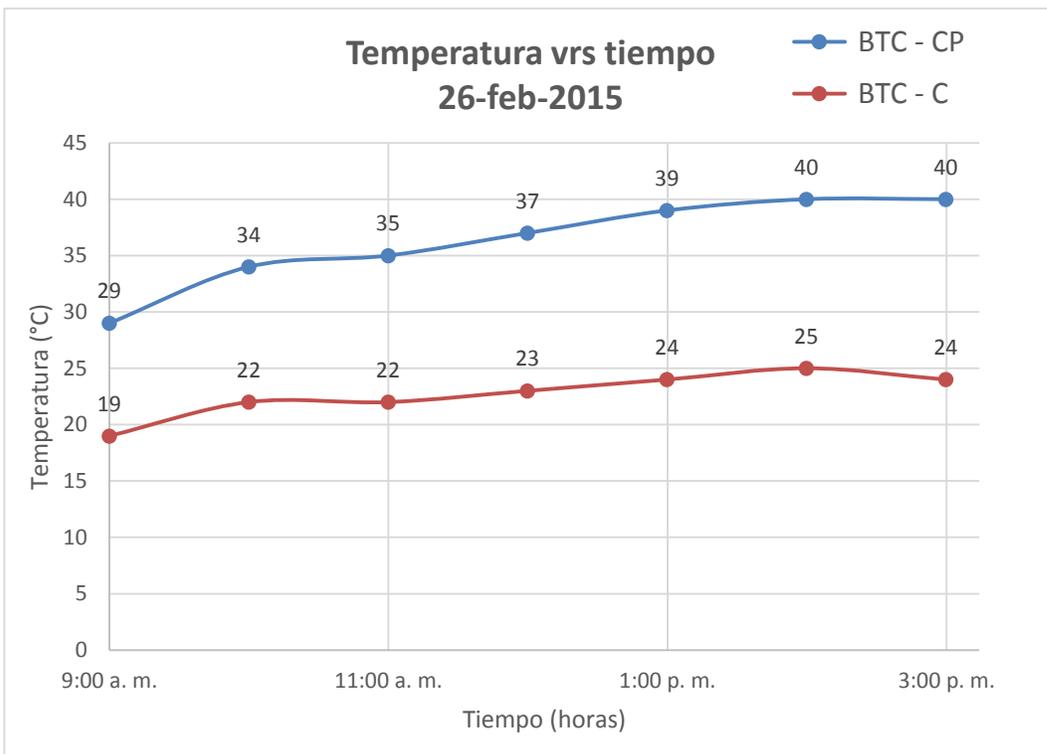
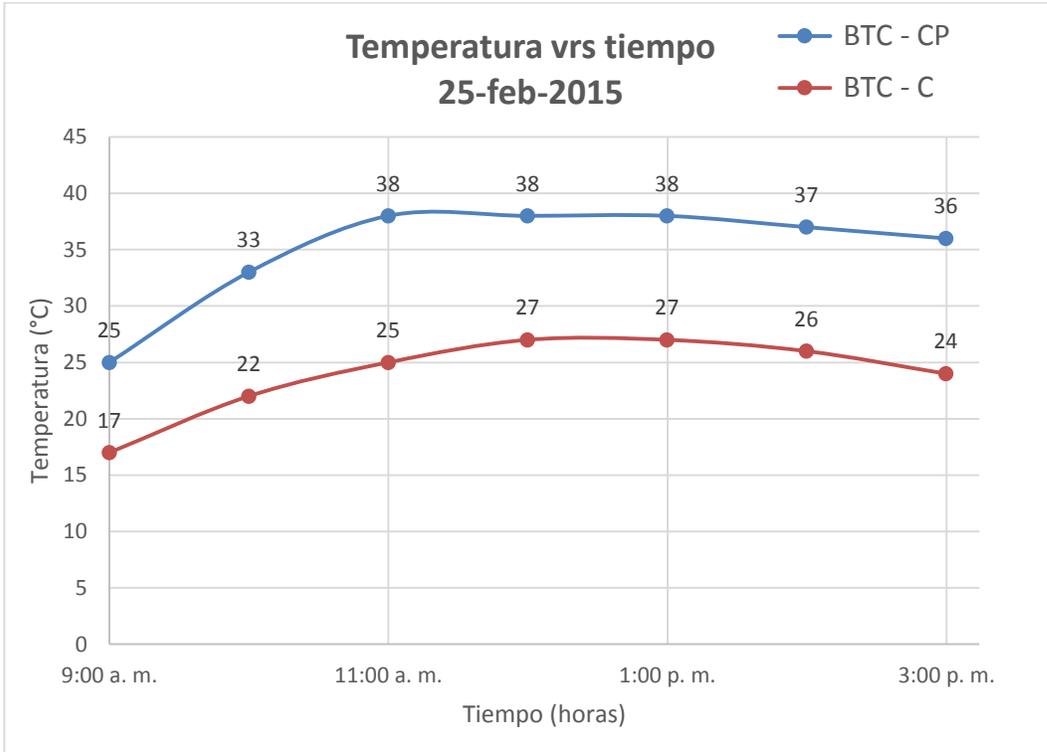
Fecha	05-mar-15		06-mar-15	
	Cámara de curado	Al ambiente	Cámara de curado	Al ambiente
Tiempo (h)	BTC - CP	BTC - C	BTC - CP	BTC - C
9:00 a. m.	32	20	33	18
10:00 a. m.	34	23	36	21
11:00 a. m.	35	25	37	24
12:00 p. m.	37	28	39	25
1:00 p. m.	39	29	41	27
2:00 p. m.	41	29	41	28
3:00 p. m.	40	28	39	28

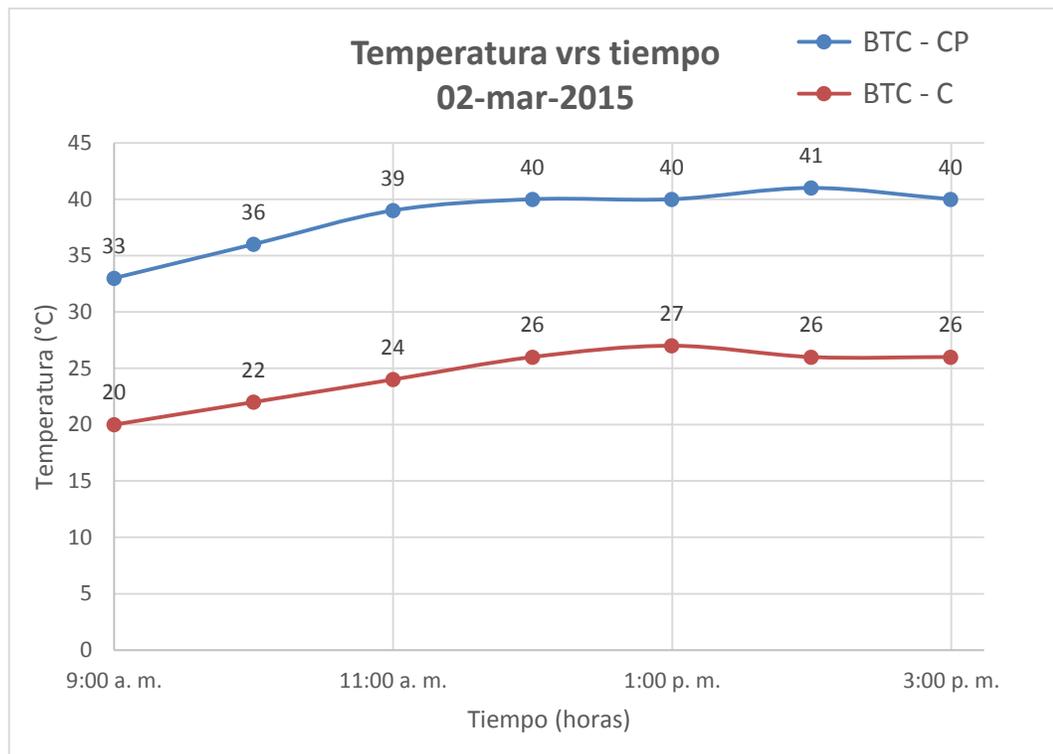
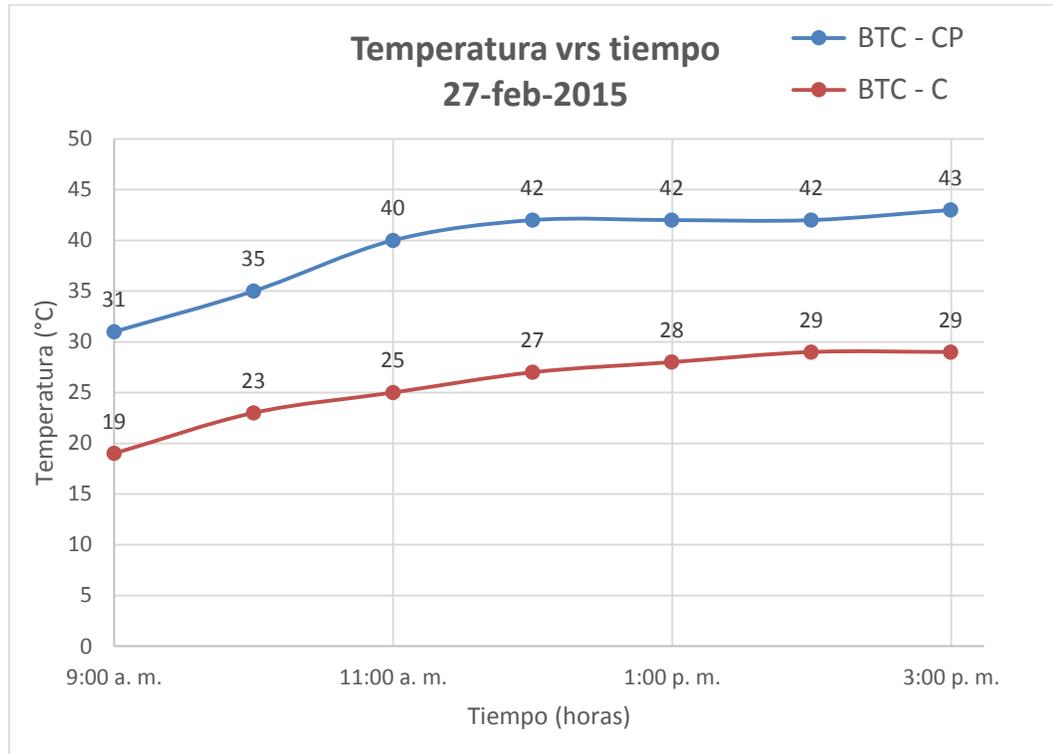
Fecha	09-mar-15		10-mar-15	
	Cámara de curado	Al ambiente	Cámara de curado	Al ambiente
Tiempo (h)	BTC - CP	BTC - C	BTC - CP	BTC - C
9:00 a. m.	31	19	29	20
10:00 a. m.	33	21	34	23
11:00 a. m.	36	24	36	25
12:00 p. m.	38	25	39	26
1:00 p. m.	40	27	42	28
2:00 p. m.	41	27	42	28
3:00 p. m.	40	26	41	27

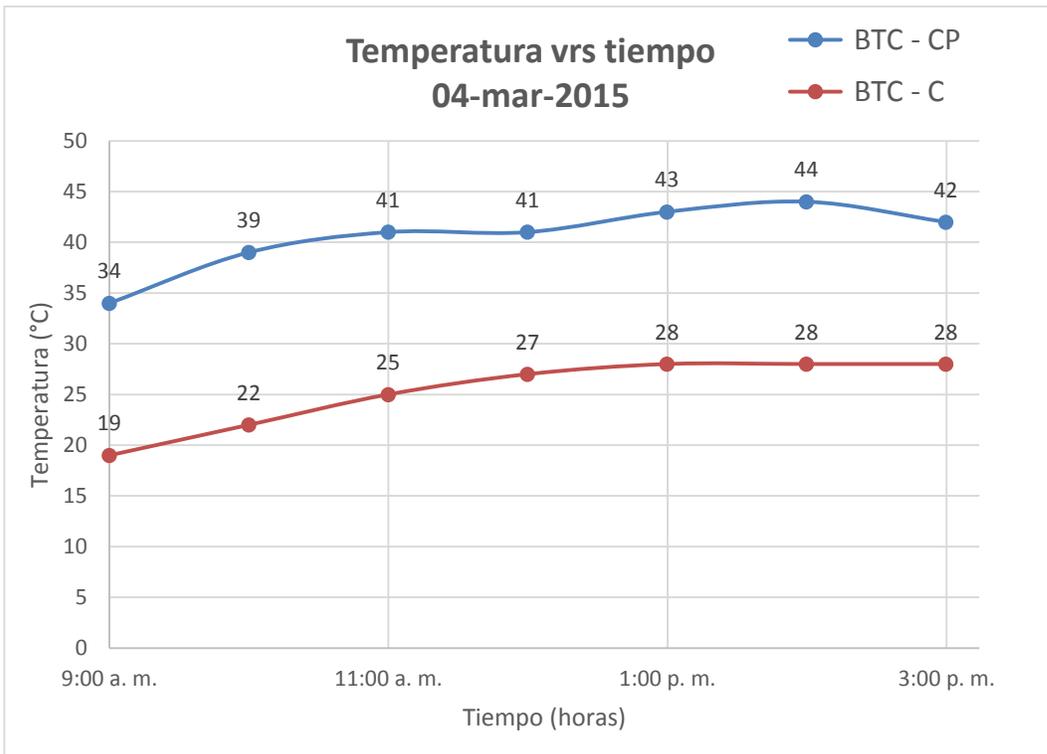
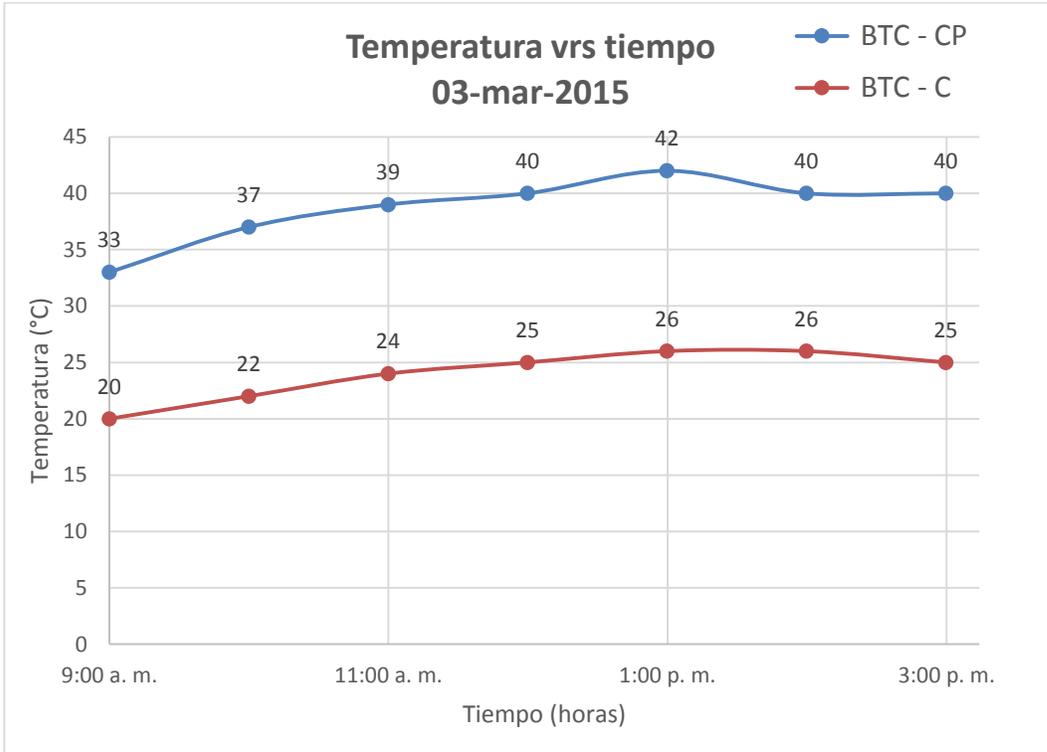
Fecha	11-mar-15		12-mar-15	
	Cámara de curado	Al ambiente	Cámara de curado	Al ambiente
Tiempo (h)	BTC - CP	BTC - C	BTC - CP	BTC - C
9:00 a. m.	30	18	28	19
10:00 a. m.	33	21	31	22
11:00 a. m.	37	24	35	24
12:00 p. m.	39	26	37	26
1:00 p. m.	41	28	40	27
2:00 p. m.	42	28	40	27
3:00 p. m.	42	27	38	26

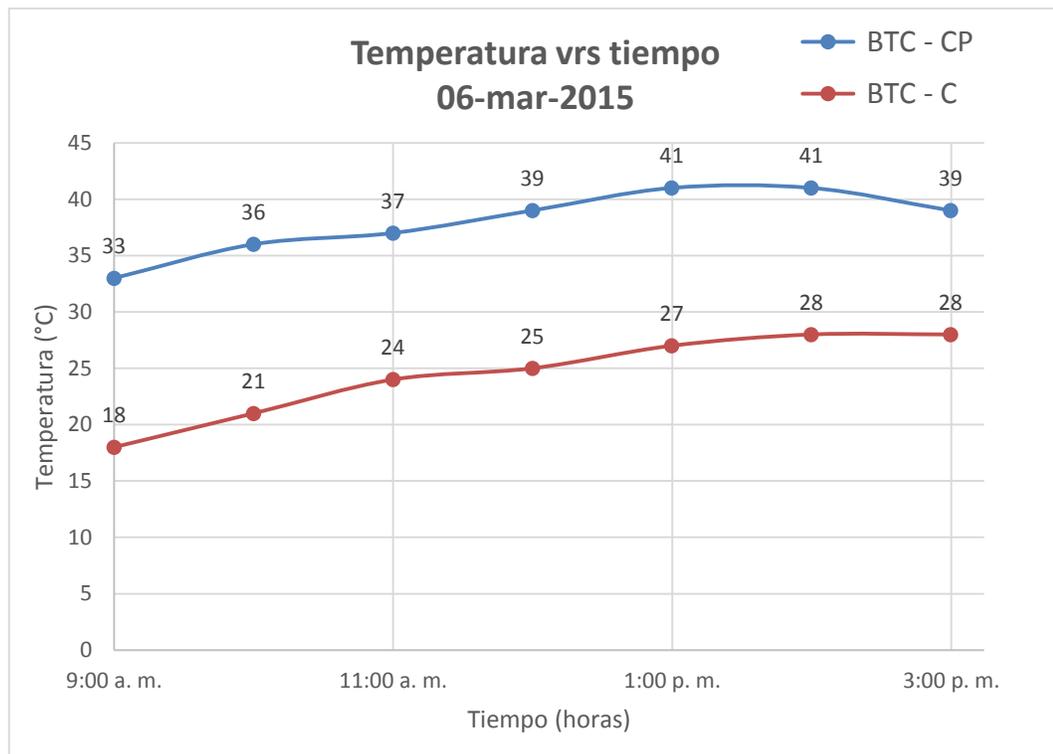
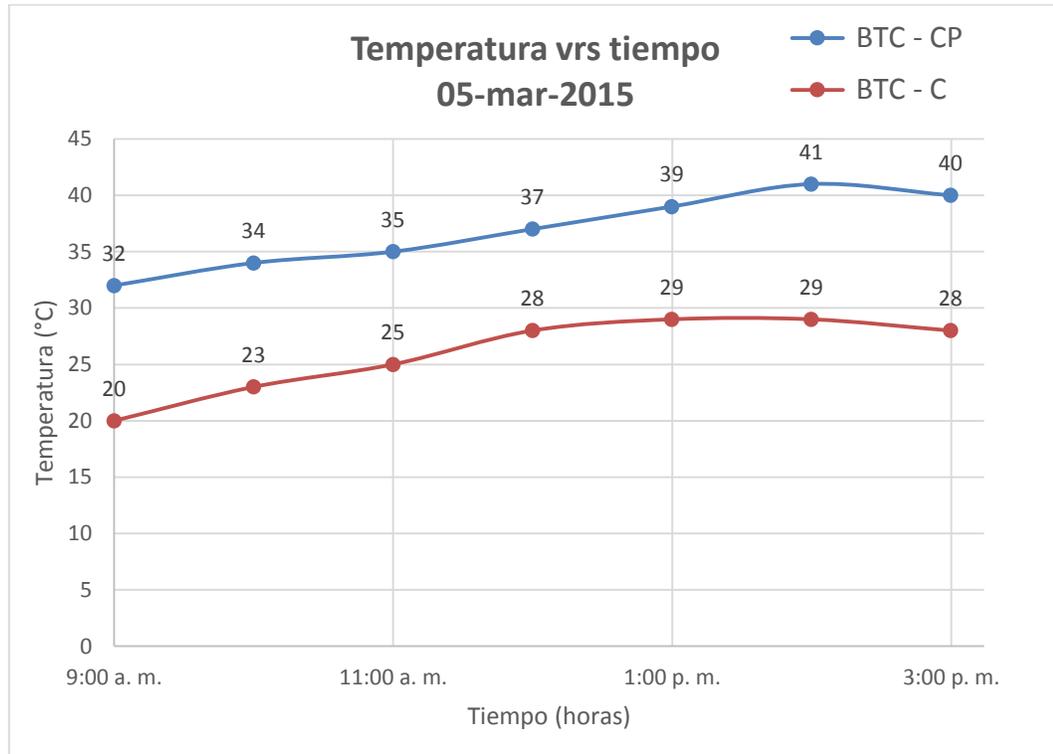
Fuente: elaboración propia.

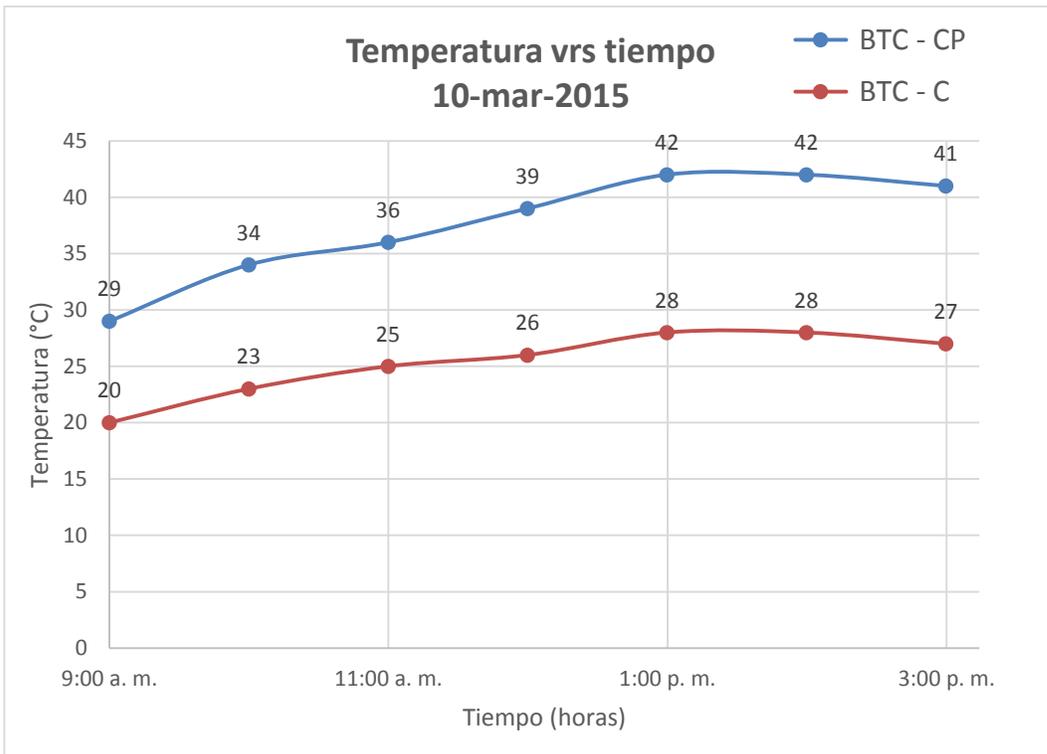
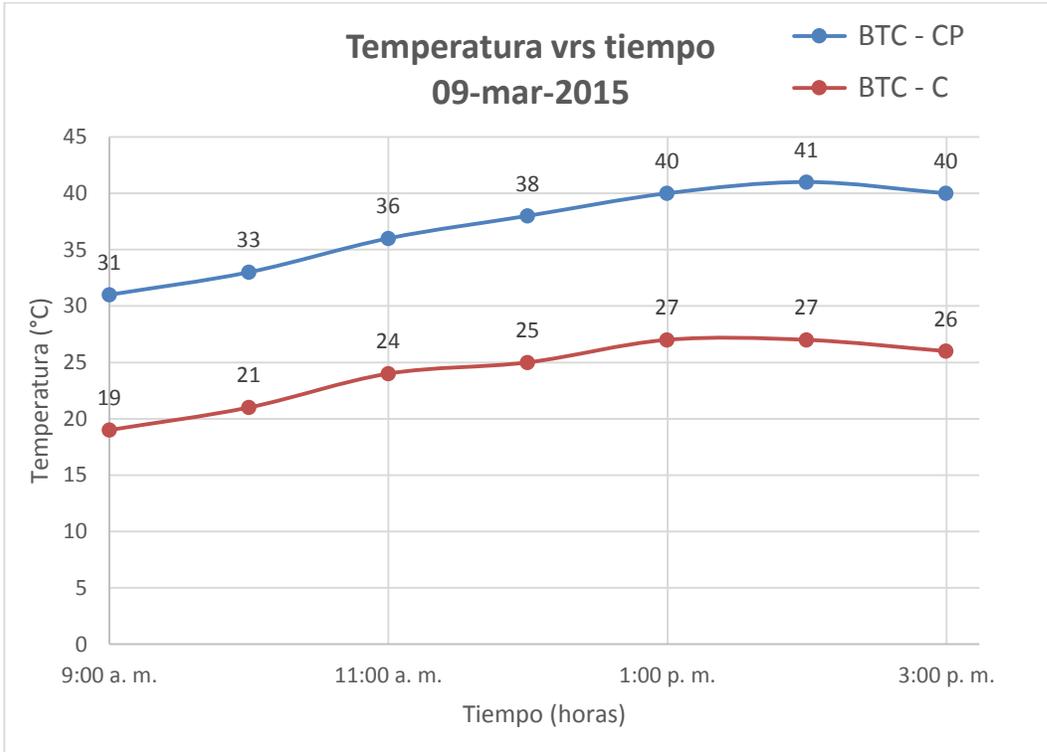


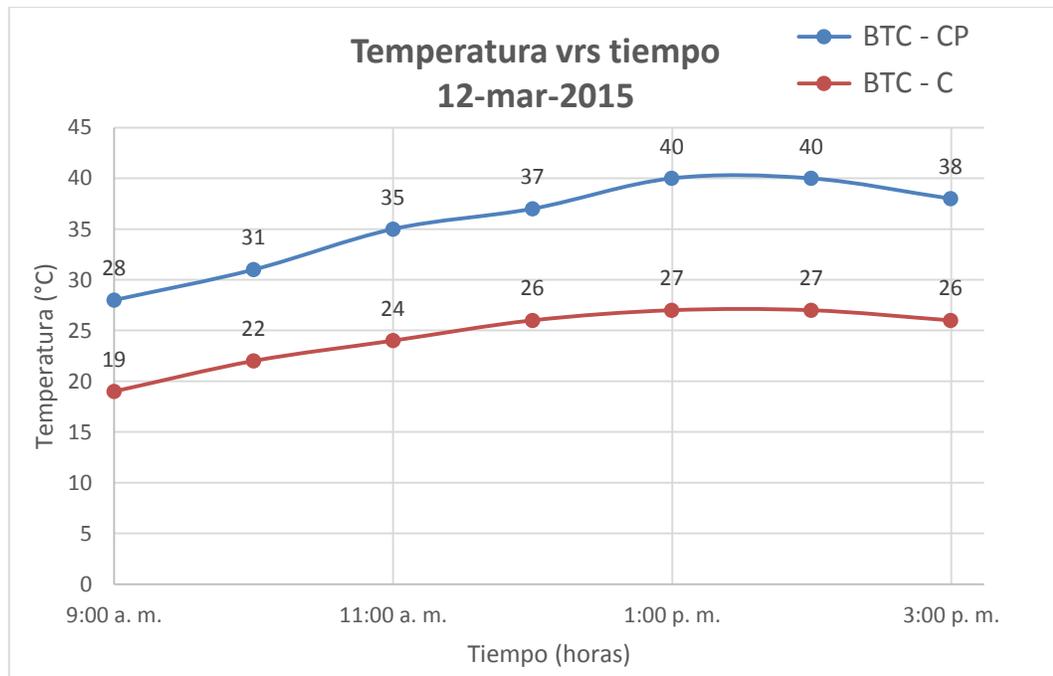
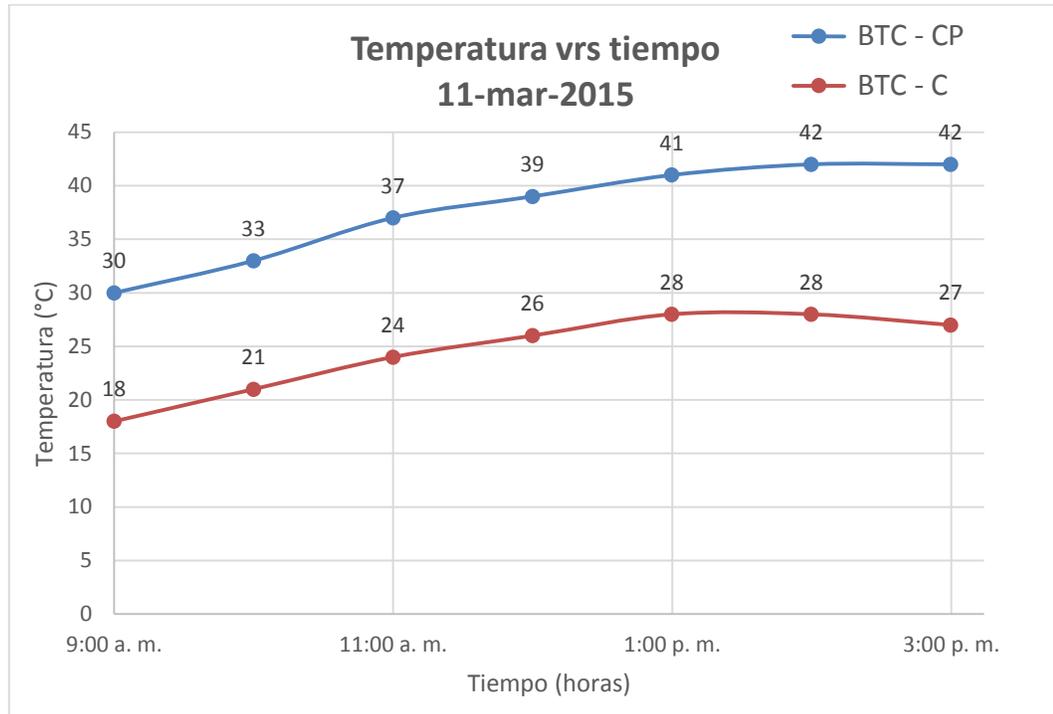












Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2013.

ANEXOS

Anexo 1. Proceso de construcción del prisma elaborado con BTC.

A continuación se muestra, mediante fotografías, el proceso de construcción de un prisma elaborado con BTC, siendo este un prototipo de una parte de muro.

Esta construcción se realizó en la sección de Ecomateriales del Centro de Investigaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Armado y formateado del cemento

Las dimensiones del cemento son de 25 cm de ancho, 70 cm de longitud y 10 cm de peralte. (Ver figura 1).

Figura 1. Armado y formateado del cemento del prisma



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Fundición del cimiento

Se utilizó una proporción en volumen de cemento, arena y pedrín de 1:1:1; hasta obtener una mezcla fluida. (Ver figura 2).

Figura 2. Fundición del cimiento del prisma



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Levantado del prisma

En la fundición de los pines y llaves de los bloques, se utilizó un mortero con una proporción en volumen de cemento y arena de 1:1, hasta obtener una mezcla lo bastante consistente, para que el agua de mezcla no escurriera por los bloques y de esta manera no ensuciar las paredes del prisma. (Ver figura 3).

Figura 3. Mortero utilizado para la fundición de los pines y llaves del prisma



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Sobre el cemento se fueron colocando hilada por hilada de BTC (ver figura 4), por cada hilada que se fue colocando se fundieron los pines y las llaves de los bloques (ver figura 5).

Figura 4. Colocacion de hilera de BTC en el levantado del prisma



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 5. Fundición de pines y llaves de los BTC en el levantado del prisma



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Armado y formateado de la solera de confinamiento del prisma

Las dimensiones de la solera de confinamiento son de 15 cm de ancho, 60 cm de longitud y 10 cm de peralte. (Ver figura 6).

Figura 6. Armado y formateado de la solera de confinamiento del prisma



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- **Fundición de la solera de confinamiento**

Se utilizó la misma proporción de mezcla que la utilizada en la fundición del cemento, hasta obtener una mezcla consistente, poco fluida, para evitar que el agua se derramara por las paredes del prisma. (Ver figura 7).

Figura 7. Armado y formateado de la solera de confinamiento del prisma



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

- Producto final

Los BTC que se utilizaron para la construcción del prisma fueron los bloques sobrantes que se elaboraron para el desarrollo de este trabajo de investigación, por lo que el prisma está conformado por BTC estabilizados con aglomerante natural cal puzolana y estabilizados con cemento tipo UGC.

Las dimensiones del prisma son 60 cm de longitud, 15 cm de ancho y 80 cm de altura. Pesando aproximadamente 125 kilos. (Ver figuras 8 y 9).

Figura 8. Prisma contruido con BTC



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 9. Perspectivas del prisma construido con BTC



Fuente: Sección de Ecomateriales. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.