



CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCION

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCION Y ESTRUCTURAS

TESIS

**EVALUACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DE BLOQUES
DE TIERRA COMPACTADA ELABORADOS EN AGUASCALIENTES
CON DIFERENTES DOSIFICACIONES DE CAL**

PRESENTA

Luis César López Manzur

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL
SALIDA EN CONSTRUCCION**

TUTOR

Dr. Gerardo Araiza Garaygordobil

COMITÉ TUTORAL

M. en A. Mauricio Ruiz Morales

M. en I. José Luis López López

Aguascalientes, Ags, 01 de Octubre de 2013



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS
P R E S E N T E

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **LUIS CÉSAR LÓPEZ MANZUR** con ID 36252 quien realizó la tesis titulada: **EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE BLOQUES DE TIERRA COMPACTADA ELABORADOS EN AGUASCALIENTES CON DIFERENTES DOSIFICACIONES DE CAL**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que la tesis pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 8 de Octubre de 2013.

Dr. Gerardo Araiza Garaygordobil
Tutor de tesis

M. en I. José Luis López López
Asesor de tesis

M. en A. Mauricio Ruiz Morales
Asesor de tesis

- c.c.p.- Luis César López Manzur
- c.c.p.- Secretario de Investigación y Posgrado, M.I. José Luis López López.
- c.c.p.- Jefatura del Depto. de Construcción y Estructuras, M.I. Manuel Andrei Murillo.
- c.c.p.- Consejero Académico, Dr. José Ángel Ortiz Lozano.
- c.c.p.- Minuta Secretario Técnico, Dr. Jesús Pacheco Martínez.

v.B.
MEZ

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a mi tutor el Dr. Gerardo Araiza Garaygordobil y a mis asesores el M. en A. Mauricio Ruiz Morales y el M. en I. José Luis López López por guiarme en todo este proceso para llevar a término este trabajo.

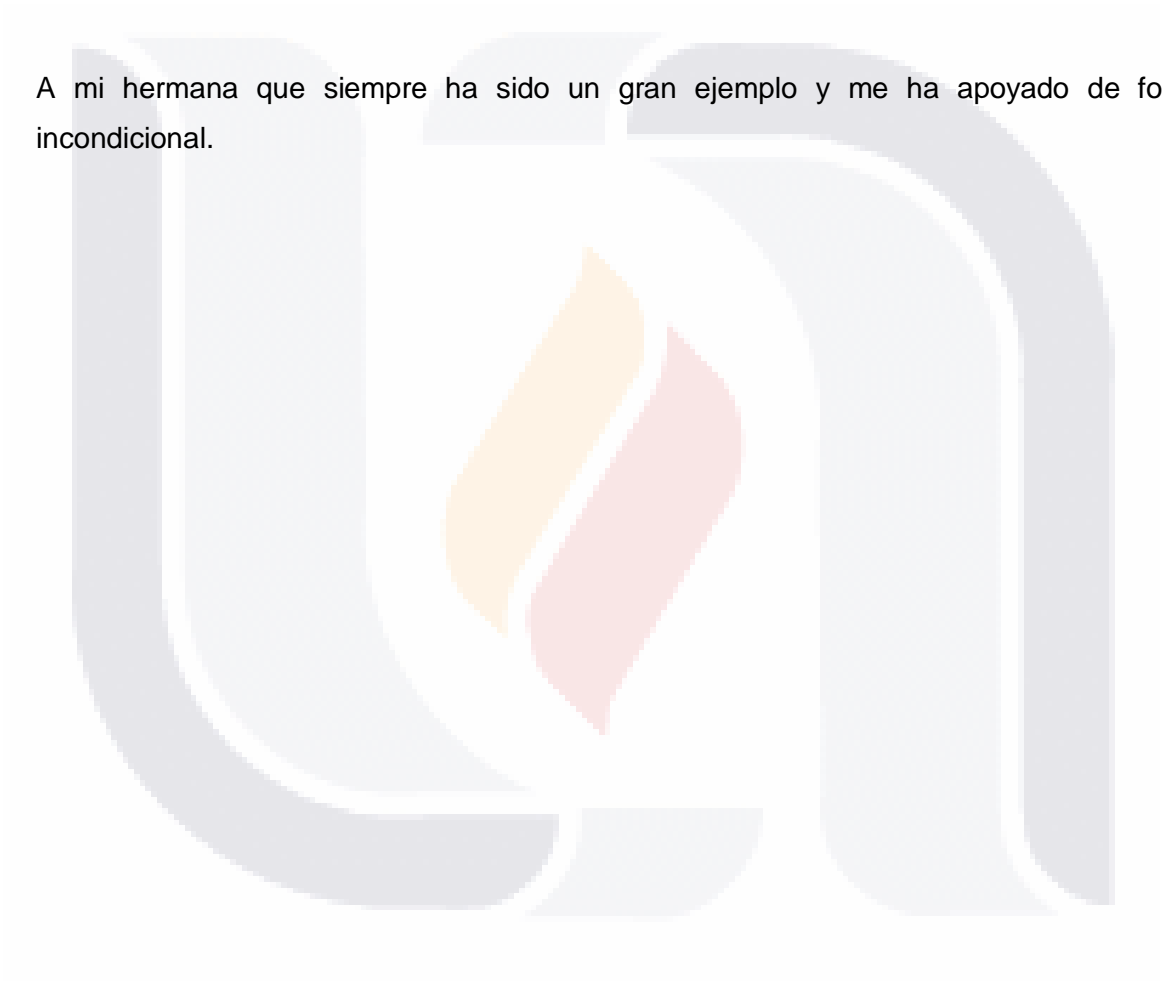
Agradezco el valioso apoyo de Adrián Perez y Jaime Reyes por todas las facilidades brindadas para la fabricación y ensaye de los bloques dentro del laboratorio de Grupo Calidra.

Agradezco también a al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado para realizar este trabajo.

DEDICATORIAS

A mis padres por apoyarme y guiarme en todo momento. Gracias por sus consejos, su cariño y todas las oportunidades que me han brindado.

A mi hermana que siempre ha sido un gran ejemplo y me ha apoyado de forma incondicional.



Índice General

Índice General	1
Índice de tablas	3
Índice de figuras	4
Acrónimos	6
Resumen.....	7
Abstract.....	8
Introducción	9
1. Objetivos y metodología	11
1.1 Objetivo General	11
1.2 Objetivos específicos.....	11
1.3 Metodología.....	11
1.4 Organización del documento	13
2. Antecedentes	15
2.1. Introducción	15
2.2. Técnicas de construcción con tierra.....	16
2.2.1 Adobe.....	16
2.2.2 Tapial	17
2.2.3 Superadobe	18
2.2.4 Bloque de tierra compactada	19
2.3. La utilización de BTC en México	21
2.3.1 Programa Échale a tu casa.....	21
2.3.2 Sistema constructivo de BTC Hydraform.....	22
2.2.3 La casa de tierra del Instituto Tamaulipeco de vivienda y urbanismo.....	22
2.3.4 Instituto Tierra y Cal A.C	23
2.4. Experimentación existente	23
2.4.1 Bloques de tierra comprimida (BTC) sin adición de cemento.....	24
2.4.2 Resistencia a la compresión de bloques de tierra comprimida estabilizada con materiales de sílice de diferente tamaño de partícula.....	24

2.4.3 Ventajas constructivas del uso de la tierra comprimida y estabilizada con cal en México	25
2.4.4 Construcción con tierra: materias primas	26
2.5. Materiales componentes de BTC	29
2.5.1 Tierra	29
2.5.2 Agua	30
2.5.3 Estabilizantes	30
2.6. Situación de la Normatividad	31
3. Diseño de la campaña experimental	35
3.1. Introducción	35
3.2 Consideraciones previas	35
3.3 Proceso propuesto	37
3.3.1 Ubicación del predio y extracción del suelo	38
3.3.2 Análisis granulométrico	40
3.3.3 Límites de consistencia	42
3.3.4 Clasificación de suelos muestreados	44
3.3.5 Determinación del porcentaje óptimo de cal	45
3.4 Pruebas de campo	45
3.4.1 Prueba de cohesión	46
3.4.2 Prueba de plasticidad	48
3.4.3 Otras pruebas	50
3.5 Fabricación de las probetas	51
3.5.1 Materiales y equipos	51
3.5.2 Proceso de fabricación	55
4. Pruebas de compresión simple	61
5. Análisis de resultados experimentales	64
Conclusiones	72
Glosario	76
Bibliografía	77
Anexos	80

Índice de tablas

Capítulo 2: Antecedentes

Tabla 2.1 Resultados obtenidos en la UAM-Xochimilco	25
Tabla 2.2 Cuadro Resumen (Cid,2009)	28
Tabla 2.3 Peso Volumétrico neto mínimo de las piezas en estado seco.....	33
Tabla 2.4 Resistencia de diseño a compresión de la mampostería de piezas de barro	33
Tabla 2.5 Valores de la resistencia a la compresión incluidos en las NMX-C-404-ONNCCE-2012	34

Capítulo 3: Diseño de la campaña experimental

Tabla 3.1 Índice plástico de los suelos analizados	43
Tabla 3.2 Peso volumétrico seco suelto	44
Tabla 3.3 Porcentaje óptimo de cal para estabilización del suelo.....	45
Tabla 3.4 Medidas y peso de los bloques terminados de las 4 series.	59

Capítulo 4: Pruebas de compresión simple

Tabla 4.1 Datos obtenidos de los ensayos de los cuatro suelos.....	62
Tabla 4.2 Valores medios de los ensayos	63

Capítulo 5: Análisis de resultados experimentales

Tabla 5.1 Resistencias promedio afectadas por el coeficiente de variación de la resistencia (Cp).....	68
Tabla 5.2 Densidades promedio por cada serie	70
Tabla 5.3 Coeficiente de correlación densidad-resistencia	70

Índice de figuras

Capítulo 2: Antecedentes

Figura 2.1 Mapa de distribución mundial de las construcciones ejecutadas con tierra (Barbeta, 2002)	15
Figura 2.2 Fabricación de una pieza de adobe (Minke,2001)	17
Figura 2.3 Distintos encofrados para el tapial (Minke, 2001)	18
Figura 2.4 Construcción de un ecodomo con superadobe del Cal-Earth Institute.....	19
Figura 2.5 Bloque de tierra compactada.....	21
Figura 2.6 Valores recomendados para diferentes sistemas constructivos (Cid, 2009)	27
Figura 2.7 Distribución por país de las normas vigentes en el mundo	32
Figura 2.8 Clasificación de las piezas según las NTCM-2004	33

Capítulo 3: Diseño de la campaña experimental

Figura 3.1 Carta geológica-minera de Aguascalientes F13-9 SGM	36
Figura 3.2 Proceso propuesto para la extracción, análisis, fabricación y ensayo de BTC.	38
Figura 3.3 Ubicación de los puntos de extracción (Imagen obtenida de Google Earth)	39
Figura 3.4 Disgregado y cuarteo de la muestra	41
Figura 3.5 Orden de los tamices para cribado de suelo.....	41
Figura 3.6 Pesado de material retenido en cada malla	42
Figura 3.7 Bolsa de barro luego del ensayo de la caída (Mchenry,1996)	46
Figura 3.8 Prueba de cohesión del suelo 1	47
Figura 3.9 Prueba de cohesión del suelo 2	47
Figura 3.10 Prueba de cohesión del suelo 3	47
Figura 3. 11 Prueba de cohesión del suelo 4.....	48
Figura 3.12 Pruebas de plasticidad suelo 1	48
Figura 3.13 Pruebas de plasticidad del suelo 2	49
Figura 3.14 Pruebas de plasticidad suelo 3.....	49
Figura 3.15 Pruebas de plasticidad suelo 4.....	49
Figura 3.16 Muestra de suelo 4 adherida a la mano.....	51
Figura 3.17 Cribadora automática	52
Figura 3.18 Balanza digital.....	52
Figura 3.19 Prensa manual Tecnoadobe.....	53
Figura 3.20 Revolvedora de medio saco	53
Figura 3.21 Prensa para el ensayo de los bloques.....	54
Figura 3.22 (a,b,c,d,e) Proceso de fabricación de los BTC.....	56

Figura 3.23 Bloques de diferentes tipos de suelo y edades de curado. 57
 Figura 3.24 Bloques terminados (izquierdo con adición de cal, derecho sin cal) 57
 Figura 3.25 Deficiencias de mezclado debido a ausencia de cal en el suelo 60
 Figura 3.26 Bloques no utilizados de serie 2 y 3 60

Capítulo 4: Pruebas de compresión simple

Figura 4.1 Fallas presentadas en las series 1,2 y 3..... 61
 Figura 4.2 Fallas presentadas en la serie 4..... 62

Capítulo 5: Análisis de resultados experimentales

Figura 5.1 Gráfica de la resistencia a la compresión de las diferentes series 64
 Figura 5.2 Gráfica de la resistencia a la compresión serie 1 65
 Figura 5.3 Gráfica de la resistencia a la compresión serie 2..... 65
 Figura 5.4 Gráfica de la resistencia a la compresión serie 3..... 66
 Figura 5.5 Gráfica de la resistencia a la compresión serie 4..... 66
 Figura 5.6 Gráfica de resistencia a la compresión promedio 67
 Figura 5.7 Gráfica resistencia-densidad serie 1..... 68
 Figura 5.8 Gráfica resistencia-densidad serie 2..... 69
 Figura 5.9 Gráfica resistencia-densidad serie 3..... 69
 Figura 5.10 Gráfica resistencia-densidad serie 4..... 69
 Figura 5.11 Bloques de las 4 series 71

Acrónimos

BTC: Bloque de tierra compactada

ITyC: Instituto Tierra y Cal

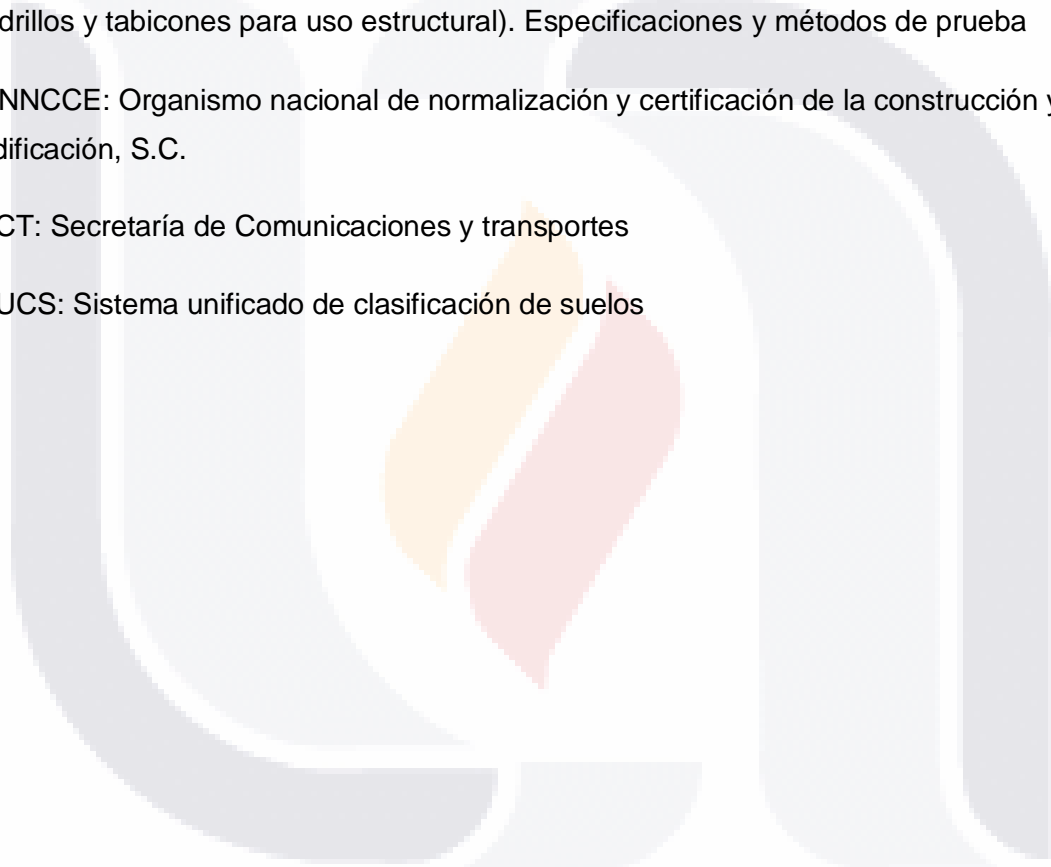
NTCM 2004: Normas técnicas complementarias de mampostería

NMX-C-404-ONNCCE: Normas mexicanas para mampostería (Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural). Especificaciones y métodos de prueba

ONNCCE: Organismo nacional de normalización y certificación de la construcción y la edificación, S.C.

SCT: Secretaría de Comunicaciones y transportes

SUCS: Sistema unificado de clasificación de suelos



Resumen

Los bloques de tierra compactada (BTC) se presentan como una alternativa para la mitigar la huella ecológica que produce el uso del block de concreto o el tabique ya que la extracción de la materia prima puede ser en sitio, no requiere cocción por lo no consume recursos no renovables como la madera, mejora la envolvente térmica de las edificaciones y se consume menos energía dentro de su proceso de fabricación.

El objetivo de este trabajo es evaluar la resistencia a la compresión de bloques elaborados con suelos encontrados en el estado de Aguascalientes estabilizados con cal y revisar su correspondencia con la normatividad vigente para determinar si el sistema es una alternativa viable para la construcción, ya que actualmente no hay información sobre la aplicación de este material en el estado.

Para la ejecución de la campaña experimental se trabajó con una prensa manual y se seleccionaron cuatro suelos distintos que una vez extraídos se caracterizaron y clasificaron. Se utilizaron porcentajes de cal para cada tipo de suelo de 3 %, 7 %, 12 % y se realizaron muestras sin cal. Los suelos estudiados se clasificaron como limos de baja compresibilidad, dos de ellos como arena arcillosa con granulometría distinta y el último como arcilla de baja compresibilidad. Posteriormente se realizaron pruebas de los bloques a la compresión simple.

Por último se llevó a cabo un análisis comparativo de los datos obtenidos con las normas mexicanas NMX-C-404-ONNCCE y con la norma española UNE 41410.

Una vez realizadas las pruebas se concluyó que el suelo con mayor presencia de arcillas y un alto contenido de cal tiene una mayor resistencia a la compresión simple pero ninguno de los bloques cumple con las normas mexicanas NMX-C-404-ONNCCE ni con las NTCM-2004. Los bloques se compararon también con las normas especialmente diseñadas para BTC como lo son las normas españolas UNE 41410 donde los bloques cumplen y se clasifican como BT1 y BTC 3.

Abstract

Compressed earth blocks (CEB) are presented as an alternative to mitigate the ecological footprint produced by the use of concrete masonry unit because the extraction of the feedstock is in place, it requires no burning, consumes no resources non-renewable such as wood, improving the thermal envelope of buildings and less energy is consumed in its manufacturing process.

The aim of this work is to evaluate the strength of blocks made from soil found in the state of Aguascalientes stabilized with lime and review its correspondence with the current regulations to determine if the system is a viable alternative for the construction, since currently there is no information on the application of this material in the state.

To develop this experimental work it was done with a manual press and four different soils where selected that once extracted were characterized and classified. Lime percentages used for each soil type were 3%, 7%, 12% and some samples were made without lime. The studied soils were classified as silt of low compressibility, two of them as loamy sand with different grain size and the latter as low compressibility clay. Subsequently the compressive strenght was tested.

Finally, a comparative analysis of the data obtained was conducted with the Mexican standards NMX-C-404-ONNCCE and the Spanish standard UNE 41410.

Once the test were completed, it was concluded that the soil with greater presence of clays and a high content of Calcium oxide has a higher compressive strength but none of the blocks meet Mexican standards NMX-C-404-ONNCCE. The blocks were also compared to the rules specially designed for CBE, Spanish standard UNE 41410 where blocks meet requirements which are classified as BT1 y BTC 3.

Introducción

La construcción es uno de los principales responsables de la degradación del medio ambiente al afectar directamente el sitio de construcción deforestando, modificando la topografía y consumiendo una gran cantidad de energía en el proceso de construcción así como en la obtención, procesamiento y transportación de los materiales. Además una vez que la obra es terminada y se pone en funcionamiento esta genera emisiones contaminantes producto, en su mayoría, de la mejora del clima interior. Actualmente los materiales más utilizados para la construcción en México son el tabique o ladrillo, el block de concreto o el sistema de muros monolíticos de concreto que no ofrecen una respuesta efectiva ante los efectos contaminantes de la construcción antes mencionados.

El tabique es un material cuya producción afecta al medio ambiente ya que se utilizan suelos fértiles generalmente de lechos de ríos y, además, utiliza grandes cantidades de madera provocando la deforestación de las zonas aledañas. También se libera monóxido de carbono y partículas finas en suspensión al medio ambiente cuando los tabiques son cocidos.

El block de concreto y las viviendas integrales de concreto son ampliamente utilizadas en la construcción de la vivienda en serie por la facilidad y rapidez con la que se trabaja. Aunque estos sistemas constructivos tienen una mayor resistencia que el tabique, poseen una menor inercia térmica y al término de su vida útil su reciclado se hace complicado y costoso.

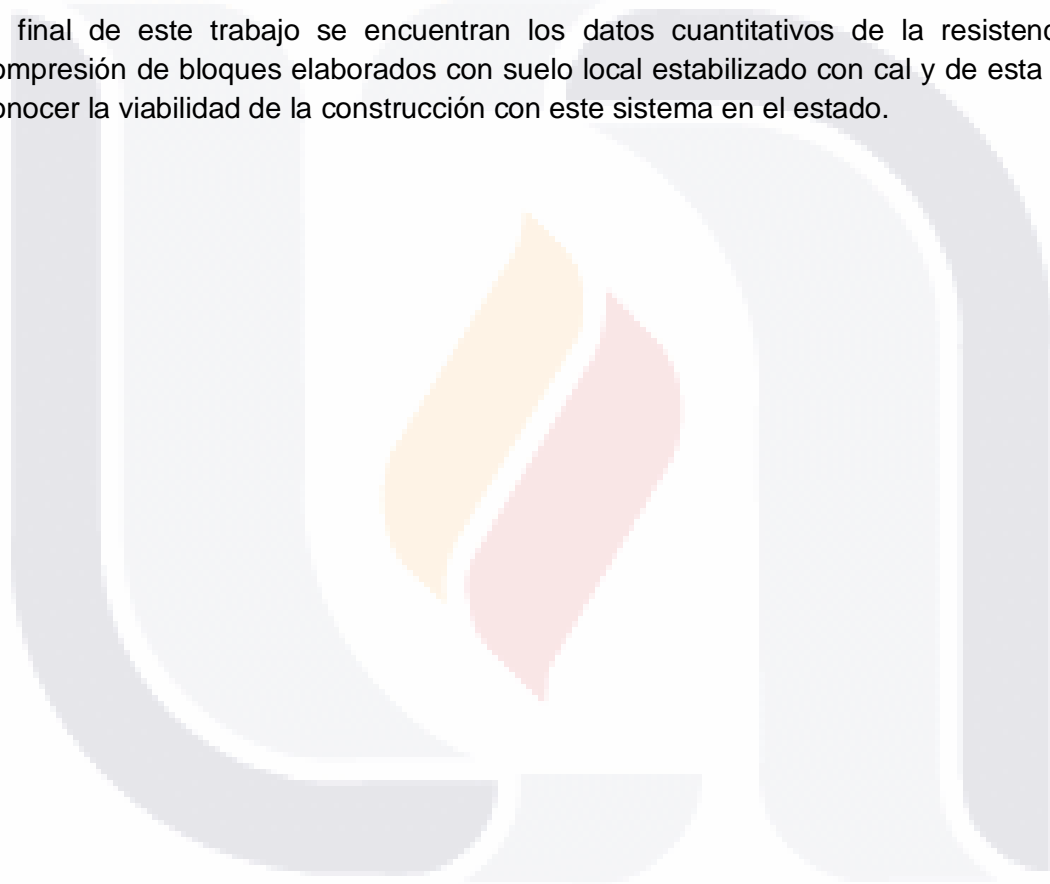
La construcción con tierra presenta una alternativa sustentable al encontrarse la materia prima en sitio, generalmente de manera abundante, al requerirse muy poca energía para su fabricación, al ser un regulador de la temperatura interior y al término de su vida útil puede ser reutilizado o se puede integrar otra vez al medio ambiente. A pesar de todas las ventajas que se plantean, este material no está debidamente normado en México y no se incluye en la norma mexicana NMX-C-404-ONNCE-2012 para bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural. En países como Perú, España, Francia, Colombia, Kenya, Brasil, por mencionar algunos, se cuenta con normas específicas para los BTC.

El interés sobre los BTC se ha incrementado en México y en el mundo en los últimos años y se han realizado investigaciones sobre todo por parte de universidades y organizaciones descentralizadas para lograr la implementación de este sistema en zonas marginadas de la población. Instituciones como el Craterre en Francia, el Instituto tierra y Cal en México, el Auroville Earth Institute en India o el Laboratorio de Investigación de Construcciones Experimentales de la Universidad de Kassel (Forschungslabor für Experimentelles Bauen, por su nombre en Alemán) han tratado de difundir este sistema constructivo mediante el desarrollo de manuales para la autoconstrucción con tierra,

enfocado en su mayoría para su aplicación en zonas marginadas ya que la construcción en la ciudades es dominada por los materiales industrializados.

A nivel estatal el BTC no es un materia popular y solo hay un proveedor comercial y está enfocado a la construcción de bardas y casas de campo. Tampoco se han generado trabajos de investigación sobre la utilización de este material en el estado, lo que se hace relevante ya que el éxito de este sistema constructivo está determinado, en gran parte, por el tipo de suelo encontrado en el la región donde se pretenda realizar la construcción, y en Aguascalientes el material más abundante es el suelo conocido como “tepetate” por lo que se deben de probar bloques con este tipo de suelo.

Al final de este trabajo se encuentran los datos cuantitativos de la resistencia a la compresión de bloques elaborados con suelo local estabilizado con cal y de esta manera conocer la viabilidad de la construcción con este sistema en el estado.



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

1. Objetivos y metodología

1.1 Objetivo General

Caracterizar a través de un estudio experimental la resistencia a la compresión de los bloques de tierra compactada y su correspondencia con la normatividad vigente, para valorar sus ventajas en la construcción de vivienda en Aguascalientes, aplicando el proceso de fabricación y de prueba a un caso práctico específico.

1.2 Objetivos específicos

Para poder llevar a cabo el objetivo general antes mencionado, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Revisión de la literatura existente relativa a los bloques de tierra compactada.
- Determinar si algunos tipos de suelos encontrados en Aguascalientes son aptos para la fabricación de BTC.
- Realización de un estudio de mecánica de suelo para conocer las características del material seleccionado para ser utilizado como banco para la fabricación de los bloques.
- Realizar pruebas a la compresión simple para evaluar la resistencia de las piezas.
- Realizar análisis comparativos de los resultados con las normas mexicanas vigentes para piezas de mampostería y con normas específicas para bloques de tierra compactada.
- Plantear futuras líneas de investigación a partir de las conclusiones dadas en este trabajo.

1.3 Metodología

La metodología a ejecutar para el alcance de los objetivos de esta tesis se ha establecido de acuerdo a su carácter experimental por lo que se ha seguido el proceso descrito a continuación.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- Revisión profunda del estado de conocimiento para lo que se consultaron artículos, libros, y publicaciones elaboradas por diversos investigadores.
 - En base a la revisión del estado del conocimiento y a la determinación del objetivo general se diseñó la campaña experimental y para ello;
 - Se definieron los objetivos específicos y el plan de trabajo.
 - Se estableció un convenio con la empresa Calidra para la fabricación de los bloques y el ensaye de los mismos dentro de su laboratorio.
 - Se seleccionaron 4 puntos de la ciudad para ser utilizados como banco de material. Posteriormente se caracterizó el material con el fin de conocer su granulometría, límites de consistencia y obtener su clasificación de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos.
 - Se fabricaron bloques con cuatro suelos diferentes que pueden ser encontrados en Aguascalientes mediante una prensa manual con molde de 15x10x30 centímetros. Se consideraron dosificaciones para cada suelo con 3%, 7%, 12% y se realizaron muestras sin cal y para cada dosificación se hicieron 5 bloques.
 - Posteriormente los bloques fabricados se sometieron a pruebas de compresión simple según lo establecido en las NMX-C-036-ONNCCE.
 - Se realizó un análisis comparativo de los resultados con las NTCM-2004 y con la norma española UNE 41410.
 - De los resultados obtenidos se plantearon futuras líneas de investigación.

1.4 Organización del documento

Capítulo I: Introducción

En el capítulo I se presenta la introducción general de la tesis que justifica la necesidad de la investigación así como el objetivo general, los objetivos específicos y la metodología para poder alcanzarlos.

Capítulo II: Antecedentes

En el capítulo II se describe el proceso de fabricación del BTC y de algunas otras técnicas de construcción con tierra como son el adobe, el tapial y el superadobe, además se hace una revisión del estado del arte sobre la fabricación, utilización e implementación del BTC en programas sociales en México y en varias partes del mundo.

Capítulo III: Diseño de la campaña experimental

En el capítulo III se establecen los métodos y procedimientos para la ejecución de las pruebas de laboratorio como son las pruebas de granulometría, límites de consistencia y resistencia a la compresión. Por lo que para cada prueba se describen los materiales, equipos, número de especímenes y número de muestras de suelo necesarios para realizar las pruebas de manera adecuada y apegada a la normatividad vigente.

Capítulo IV: Pruebas a compresión simple

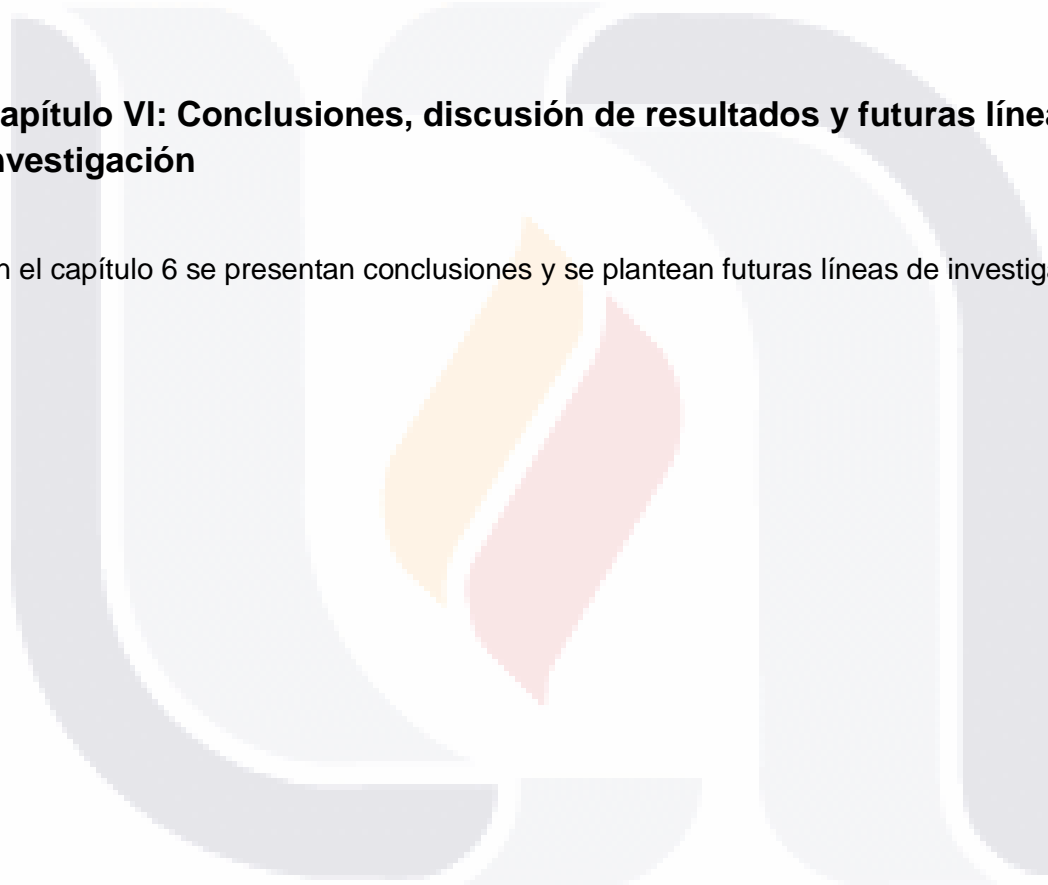
En el capítulo 4 se describe el proceso de las pruebas de resistencia a la compresión simple para las distintas series fabricadas y se obtendrán datos individuales para cada pieza y datos promedio para cada serie. El proceso se ilustrará con una serie de fotografías y esquemas.

Capítulo V: Análisis de resultados experimentales

En el capítulo 5 se analizan los datos obtenidos en el capítulo anterior donde se compararán los resultados con las normativas seleccionadas mediante gráficas y tablas.

Capítulo VI: Conclusiones, discusión de resultados y futuras líneas de investigación

En el capítulo 6 se presentan conclusiones y se plantean futuras líneas de investigación.



2. Antecedentes

2.1. Introducción

La construcción con tierra es una técnica utilizada por varios milenios y hay evidencia de su uso desde hace más de 9000 años. Algunas estructuras siguen en pie en la actualidad como es el templo mortuario de Ramses II en Gourná, Egipto construido hace más de 3000 años y es evidencia de la confiabilidad de la construcción con este material. Como lo menciona Barbeta (2002), un tercio aproximadamente de las viviendas que hay en pie en el planeta son de tierra y se ilustra en la figura 2.1.

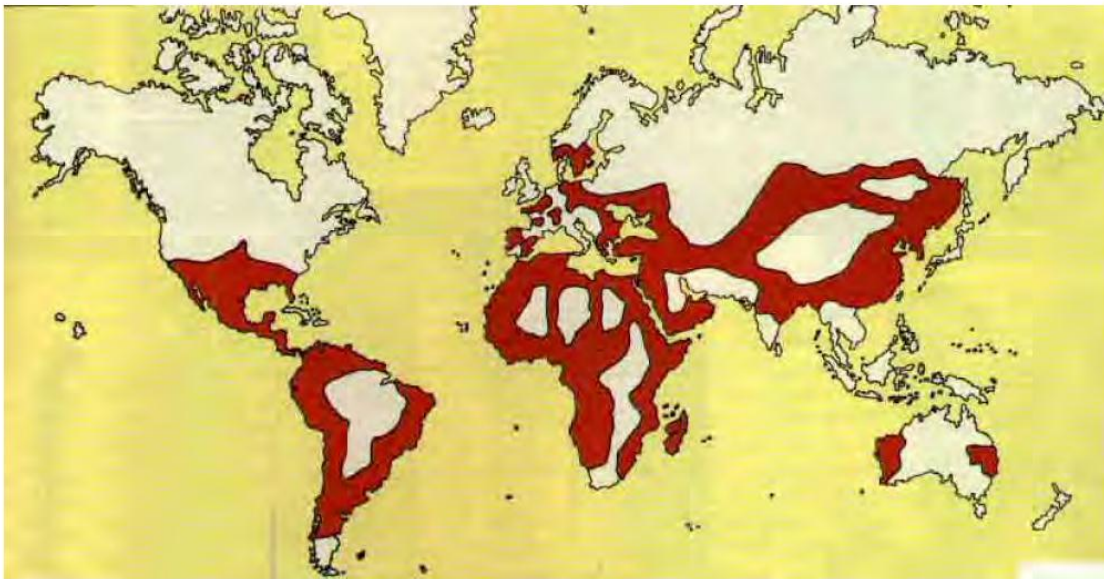


Figura 2.1 Mapa de distribución mundial de las construcciones ejecutadas con tierra (Barbeta, 2002)

La tierra se utiliza de distintas formas dependiendo del lugar, por lo que a continuación se mencionan varias técnicas que fueron utilizadas en el pasado y que siguen vigentes actualmente.

2.2. Técnicas de construcción con tierra

2.2.1 Adobe

Es llamado adobe a los bloques macizos de barro sin cocer de producción manual forjado en moldes y secados al aire libre cuyas medidas varían según la zona y el país donde se lleve a cabo la construcción.

El uso de adobe es más frecuente es en climas cálido-secos, subtropicales y templados del planeta y se pueden encontrar vestigios de su uso que datan del 8000 al 6000 a.n.e. y en Asiria del 4000 a.n.e (Minke,2001).

Las características del suelo para la fabricación de piezas de adobe idealmente deberá contener arenas gruesas, arenas finas, sedimentos y arcillas. Una de las ventajas de la construcción con tierra y especialmente en el adobe es que se pueden combinar distintos porcentajes de cada material para elaborar una pieza satisfactoria a pesar de no contar con alguno de los elementos antes mencionados. (Mchenry,1996)

La granulometría necesaria para la fabricación de adobes no es universal y dependerá del sitio y el material existente donde se planea realizar la construcción. McHenry (1996) menciona que la tolerancia de proporciones es extremadamente amplia y muchas tierras de ocurrencia natural requerirán algunas modificaciones casi siempre en presencia de demasiada arcilla en vez de la falta de ella pudiendo ser modificada con la adición de arena, agregados más gruesos o materia vegetal como paja, heno o estiércol.

El proceso de elaboración es sencillo y en la mayoría de los casos se realiza de manera artesanal. Una vez seleccionado el suelo, el cual como se ha mencionado puede tener distintos tamaños de partículas (arenas, finos y arcillas), se procede a la mezcla del barro, que puede ser por medio del pozo de remojo que es el procedimiento más simple. El tiempo de remojo o de humedecimiento del barro depende del productor y puede ser de una noche a un par de días. Se recomienda que el agua sea baja en sales.

Posteriormente se realiza el moldeado, hay diversos tipos de moldes y es recomendable utilizar algún desmoldante que puede ser aceite o en algunos lugares se utiliza solo agua. Los bloques son secados extendiéndolos sobre el piso bien nivelado. El tiempo de secado varía según la estación del año, en verano puede ser de dos a tres días mientras que en invierno puede durar semanas dependiendo del lugar donde se elabore. Una vez que el bloque alcance la resistencia para ser manipulado se ladea apoyándolo sobre el canto exponiendo la otra cara para su secado. También el almacenamiento es un proceso importante de la fabricación de adobes ya que se debe cuidar que las pilas no sean de más de dos bloques de ancho, esto para facilitar el secado completo.



Figura 2.2 Fabricación de una pieza de adobe (Minke,2001)

2.2.2 Tapial

El tapial, también llamado tierra apisonada, es una técnica antigua de construcción con tierra vaciada dentro de una cimbra y compactada en el sitio donde la construcción se lleve a cabo.

Los vestigios más antiguos encontrados de esta técnica se remontan al año 7000 a.n.e. en el Himalaya, Karakóum. En esta misma zona destacan construcciones como el palacio del Dalai Lama que se construyó con técnicas de adobe y tapial (Barbeta,2000). La construcción con tapial es común en el norte de África y gracias a la aportación de árabes y romanos se puede observar la influencia de este sistema en países europeos como Francia, Alemania incluso en países como Suecia, Finlandia y Dinamarca.

Las características del suelo del tapial son las mismas que para los adobes aunque para los sistemas constructivos donde la tierra es compactada se puede utilizar y se recomienda un contenido más alto de arcillas.

Además de la tierra el molde es una parte trascendental de esta técnica, este encofrado consiste en tablonces paralelos unidos por un travesaño aunque no es un sistema universal y varía según la zona donde se ejecute la construcción, pero a pesar de que los sistemas varían el molde debe ser rígido para evitar los pandeos. Ante todo las cimbras utilizadas deben ser relativamente ligeras para que sea práctico y económico su movimiento. En la mayoría de los sistemas se consideran capas de tierra compactada cuyo espesor varía entre 15 y 80 cms. Hay algunos sistemas que vacían y compactan el muro completo garantizando que quede monolítico evitando fisuras en las juntas. La compactación puede ser con pisón manual, eléctrico o neumático.

El curado del muro puede durar varios meses o incluso años, dependiendo del clima y la humedad (Mchenry,1996).

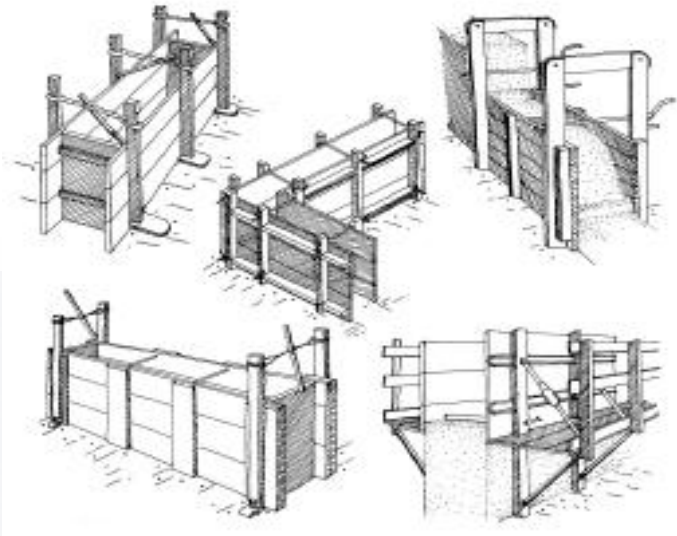


Figura 2.3 Distintos encofrados para el tapial (Minke, 2001)

2.2.3 Superadobe

El superadobe es una técnica constructiva con tierra creada por el arquitecto Nader Khalili para un proyecto de la Nasa (National Aeronautics and Space Administration) para crear hábitats en la luna y Marte. (Sitio web Cal-earth Institute)

La composición del suelo no es una limitante para este sistema, ya que al estabilizarlo con cal o cemento se puede utilizar casi cualquier tipo de suelo. La determinación de la humedad se hace mediante pruebas de campo formando terrones verificando que no tenga excesos de agua o que el suelo este muy seco, se abundara más sobre las pruebas de campo para la determinación de la humedad en los siguientes capítulos.

El método constructivo del superadobe se realiza mediante el llenado de tierra de sacos sintéticos compactados en capas y que son reforzados con alambre de púas compuesto por dos cables y 4 púas por nodo. La compactación puede ser por medio manual o con bailarinas. El alambre se coloca entre cada capa de sacos de tierra con dos líneas en paralelo con 10 cm de separación. Los alambres de púas se aseguran pisándolos.

Este sistema cumple con los lineamientos de los códigos de edificios sujetos a alta sismicidad de California, además el sistema es resistente a incendios, inundaciones y huracanes.

Utilizando el principio del arco, se crea el ecodomo con el superadobe que como lo especifica el Instituto de arte con tierra y Arquitectura de California, es una construcción de 40 m², que consiste en un domo central rodeado de 4 nichos, cuya utilización puede ser el siguiente paso en la construcción de refugios en una situación de desastre, puede ser utilizada como cuarto de huéspedes o un área común en una aldea ecológica de bóvedas y domos.



Figura 2.4 Construcción de un ecodomo con superadobe del Cal-Earth Institute

2.2.4 Bloque de tierra compactada

Los bloques de tierra compactada llamado comúnmente BTC , es un bloque que puede ser sólido o tener celdas para utilizarse como un muro de mampostería reforzado interiormente. La diferencia principal con el adobe es la compactación que recibe la cual se puede hacer por medio manual o mecánico. Además de la compactación que recibe el bloque, se acostumbra a agregar un estabilizador tanto para aumentar la resistencia a la compresión como para aumentar la resistencia a los efectos que la intemperie ejerce sobre la edificación.

El BTC tiene su origen en la década de 1950 en Colombia cuando el ingeniero chileno Raúl Ramírez fabrico, para un proyecto con el Centro Interamericano de Vivienda (CINVA), una maquina manual móvil capaz de compactar la tierra y de esta forma incrementar las propiedades mecánicas del bloque de tierra y así obtener un material de construcción de bajo costo.

Aunque la mayoría de la tierra puede ser utilizada para la fabricación de los bloques, se debe de descartar la capa de tierra vegetal del suelo que puede ser variable pero normalmente se encuentra a 20 o 30 centímetros de profundidad, dependiendo de la zona. La granulometría es un factor muy relativo y no se puede dar por un hecho que un suelo será bueno o malo ya que puede ser mejorado con un pequeño porcentaje de cierto árido que esté ausente o incluso dejando el mismo suelo y solamente utilizando un estabilizador.

Los estabilizadores más utilizados en los BTC son el cemento y la cal, de los cuales se manejan diferentes porcentajes de estabilización que van del 3 al 12%.

El proceso constructivo del BTC inicia con el cribado del suelo, donde se deben utilizar las mallas necesarias para obtener la granulometría deseada, después se debe agregar la humedad al suelo, para esto se pueden hacer pruebas de campo o de laboratorio, que como se mencionó se describirán más a detalle en capítulos posteriores. Una vez que el material es humedecido se procede al mezclado el cual se puede hacer de manera manual o mecánica, se debe de tener en cuenta que estabilizador se utilizará ya que si se agrega cemento se cuenta con menos tiempo para utilizar la mezcla antes de que empiece a fraguar.

Hay distintas prensas desde las más sencillas, que son manuales y de un solo bloque, hasta las eléctricas que fabrican varios bloques a la vez y cuentan con un proceso automatizado. También la geometría varía de acuerdo al país y a la máquina que se utilice, las medidas del bloque también varían de máquina a máquina pero la resistencia a la compresión que se debe alcanzar debe cumplir con los códigos locales de construcción.

Una vez fabricado el bloque se procede a curar el bloque. Los tiempos de curado al igual que la fabricación varían desde que puede ser utilizado inmediatamente después de su elaboración o hasta 28 días después.



Figura 2.5 Bloque de tierra compactada

2.3. La utilización de BTC en México

A pesar de que los BTC son utilizados desde mediados del siglo 20, es un sistema poco utilizado en México para sistemas de mampostería. El block y el tabicón de concreto, el tabique rojo recocido y las viviendas monolíticas de concreto son los sistemas de mampostería más utilizados por la población actualmente, esto por su gran disponibilidad y precio accesible respecto a otros sistemas. El block de concreto, el tabicón y el tabique, son los materiales más accesibles para la autoconstrucción. El BTC presenta ciertas ventajas ante estos materiales ya que la materia prima está al alcance de todos, no requiere de mucha energía para su elaboración y no requiere un proceso de cocción, es por eso que Universidades, Asociaciones civiles, gobiernos y la iniciativa privada han realizado investigaciones y han ejecutado obras con este material. A continuación se describen algunos ejemplos de ello.

2.3.1 Programa Échale a tu casa

Es un programa de producción organizada en la que integra a la comunidad para la construcción de vivienda digna. Para lograr esto se dan asesorías técnicas y se apoya a las familias para obtener créditos.

Este programa utiliza el ecoblock para la construcción de la vivienda, este es producido mediante una prensa de tierra llamada Adopress, maquina desarrollada en conjunto con el Instituto CRATerre de la Universidad de Grenoble, Francia. La adopress es móvil y opera con energía eléctrica, gasolina o diésel, lo que la hace accesible para cualquier lugar donde se proyecte la construcción de la vivienda. De esta forma la gente de la comunidad fabrica sus bloques y construye sus viviendas de manera sustentable.

Se ha probado con éxito la eficacia del programa en lugares como Michoacán, Veracruz, Tamaulipas, Tabasco, Puebla, Oaxaca, Morelos, Estado de México e incluso en Venezuela.

2.3.2 Sistema constructivo de BTC Hydraform

El sistema constructivo Hydraform nació en Sudáfrica en 1988 y actualmente se utiliza en cuarenta países del mundo.

Se fabrican cuatro tipos de geometrías: HF220 (220 mm interlocking drystacking block), HF 140: (140 mm interlocking semi-drystack block), conduit interlocking dry stacking block, coping block (Diseño a dos aguas para escurrimientos de agua). Estos bloques se estabilizan con 5 % de cemento obteniendo una resistencia de 45 kg/cm² y utilizando 8% de cemento de hasta 80 kg/cm².

Para la utilización de este tipo de bloque en México se debe traer la prensa de Sudáfrica, tardando aproximadamente 6 meses en llegar a México. Para esta prensa se pueden utilizar distintos tipos de moldes y funciona con diésel, energía eléctrica o energía independiente. El concepto de hydraform se basa en unidades de bloques modulares que embonan entre sí tanto en sentido horizontal como vertical, lo que se conoce como junta candado, para formar elementos de albañilería como muros y techos.(Cicero, 2008)

La empresa encargada de la filial en México de Hydraform ahora tiene el nombre de Adoblock y fabrica bloques modulares que funcionan también como junta candado.

2.2.3 La casa de tierra del Instituto Tamaulipeco de vivienda y urbanismo

El programa del ITAVU, conocido como La casa de tierra, tenía como finalidad la reducción de costos y la construcción de viviendas dignas en las zonas rurales.

Se eligió el BTC como alternativa para este tipo de viviendas por contribuir a la sustentabilidad al disminuir el empleo de cemento y acero en la edificación, promover el

ahorro de energía, tanto en la fabricación como en el uso de la vivienda, contribuir al mantenimiento de los ecosistemas al disminuir su deterioro mediante la reducción en el consumo de combustibles y de emisiones atmosféricas, por incrementar el confort térmico y ambiental dentro de la vivienda, para aprovechar la integración de los recursos humanos. (Cicero,2008).

En este proyecto se construyeron 375 casas de interés social y se utilizó una prensa basada en la Cinva Ram que fabrica un bloque de 10x15x30 centímetros. Al utilizar una tierra arcillosa-limosa se agregó un estabilizador de 6 a 10 % y se lograron resistencias entre los 35 y 60 kg/cm² dependiendo de la proporción de tierra.

2.3.4 Instituto Tierra y Cal A.C

Instituto Tierra y Cal, A.C. es una organización sin fines de lucro, que prevé un resurgir de las comunidades rurales, basados en la tradición cultural y un sentimiento compartido de pertenencia y responsabilidad. El ITyC tiene como misión el mejorar la calidad de vida de personas que viven en comunidades rurales y marginadas así como de bajos recursos, proporcionándoles la capacitación y asistencia técnica, impulsando en las comunidades el desarrollo de construcciones hechas con bloques de tierra comprimida, materiales de construcción sustentables y otras tecnologías apropiadas.

El BTC utilizado por el ITyC utiliza suelos con contenidos de arcilla idealmente de 12 a 25 %, pero de encontrarse suelos no aptos los mejoran con arenas o arcillas según sea el caso. Para la estabilización puede ser usado cemento o cal de 4 a 10 %. El tiempo de curado necesario para estos bloques es de 1 mes.

El ITyC ha participado en varios proyectos a nivel internacional utilizando el BTC, como la participación en Haití en la construcción de una escuela de 855 metros cuadrados. El instituto también ha colaborado en proyectos en el país dando talleres, asesorías para que las comunidades puedan fabricar sus propios BTC y suministrando bloques para proyectos de vivienda sustentable.

2.4. Experimentación existente

En esta sección del documento se describirán algunos documentos que incluyen artículos, libros y tesis que tratan sobre experimentos relativos a la resistencia a la compresión de BTC a nivel nacional e internacional.

2.4.1 Bloques de tierra comprimida (BTC) sin adición de cemento

Este trabajo de investigación se realizó en la Universidad Católica de Salta donde se realizaron probetas del mismo tipo de tierra compactadas a diferentes presiones. Se demostró que la resistencia a la compresión aumenta conforme al aumenta la presión de compactación y a la plasticidad de los suelos. Se analizaron 3 tipos de suelos, todos clasificados como arenas arcillosas (SM), variando la plasticidad. Se obtuvo que para un índice de plasticidad de 15.81 se tiene una resistencia a la compresión de 45 kg/cm², para un índice plástico de 13.38 se tiene una resistencia a la compresión de 32.2 kg/cm² y para un índice plástico de 7.69 se tiene una resistencia a la compresión de 25 kg/cm².

La presión de compactación se varió para cada tipo de suelo obteniendo que para un peso específico de 1.66 gr/cm², corresponde una resistencia de 15.1 kg/cm², para un peso específico de 1.71 gr/cm² una resistencia de 25.49 kg/cm² y para un peso específico de 1.74 gr/cm² una resistencia de 35.2 kg/cm².

Se puede observar que la resistencia a la compresión aumenta debido a una mayor densidad del bloque producto del aumento de la energía de compactación. Así mismo se demuestra que a mayor índice de plasticidad se obtiene una mayor resistencia a la compresión.

2.4.2 Resistencia a la compresión de bloques de tierra comprimida estabilizada con materiales de sílice de diferente tamaño de partícula

Este trabajo se realizó en la Universidad Politécnica de Madrid y su objetivo es evaluar cómo afecta el tamaño de la partícula de sílice en la resistencia a la compresión de bloques de tierra compactada. Para este estudio se tomaron las recomendaciones de la norma española UNE 41410. Las probetas se realizaron sin tierra extraída para controlar la cantidad de sílice añadida a cada serie. Se fabricaron 4 series de 4 probetas de la siguiente forma:

- Serie I: Bloque estabilizado con cal y arcilla y compactado manualmente sobre el molde.
- Serie II: Bloque estabilizado con cal y arcilla y compactado con prensa neumática sobre el molde.
- Serie IIIa: Bloque estabilizado con cal, arcilla y nanosílice con la misma humedad que las anteriores probetas y compactado con prensa neumática sobre molde.

- Serie IIIb: Bloque estabilizado con cal, arcilla y nanosílice con mayor humedad que las anteriores probetas y compactado con prensa neumática sobre molde.

Las resistencia promedio obtenida para la serie I fue de 1.189 Mpa, para la serie II fue de 2.705 Mpa, para la serie IIIa fue de 4.466 Mpa y para la serie IIIb fue de 2.188 Mpa.

Se demostró que con la adición de una pequeña proporción de nanosílice se traduce en una mayor resistencia a la compresión y en una mayor capacidad de deformación gracias al aumento de plasticidad, propiciado también por el nanosílice. También se concluyó que se aumenta la resistencia a la compresión disminuyendo el tamaño de la partícula de sílice en su reacción con la cal.

2.4.3 Ventajas constructivas del uso de la tierra comprimida y estabilizada con cal en México

Este trabajo se realizó simultáneamente en la Universidad Autónoma Metropolitana de Xochimilco y en la Universidad Autónoma de Tamaulipas en dentro del proyecto denominado “desarrolló de técnicas de construcción de bajo impacto ambiental para el diseño arquitectónico y la conservación del patrimonio edificado”. Dentro de este programa se realizaron pruebas a los BTC para verificar el potencial del uso de la cal como estabilizante utilizando tierras disponibles en sitio con el fin de probar su resistencia mecánica y la absorción de humedad. También se realizaron pruebas con dos tipos de hidróxido de calcio, cal en pasta y cal en polvo.

Para las pruebas realizadas en la UAM-Xochimilco se determinó el porcentaje de cal necesario por medio de la prueba Eades & Grimm obteniendo el 6 % para el primer suelo y el 7 % para el segundo. Se utilizó una prensa neumática. También se realizaron cubos para determinar la absorción capilar. Se obtuvieron los siguientes resultados de las pruebas a compresión simple de ambos suelos:

TABLA 2
Registro de la resistencia a la compresión del suelo T1.

Tiempo	Suelo (T1) sin cal	Suelo (T1) 6% de cal	Suelo (T1) 10% de cal
7 días	8.17	15.59	33.9
14 días	8.64	18.56	34.72
28 días	12.83	20.56	48.78
60 días	12.11	16.49	45.55

TABLA 3
Registro de la resistencia a la compresión del suelo T2.

Tiempo	Suelo (T1) sin cal	Suelo (T1) 6% de cal	Suelo (T1) 10% de cal
7 días	11.61	10.13	16.65
14 días	11.65	11.43	18.44
28 días	31.43	18.51	31.69
60 días	41.83	36.46	50.04

*Resistencia en kg/cm²

Tabla 2.1 Resultados obtenidos en la UAM-Xochimilco

Se puede observar a mayor porcentaje de cal, mayor resistencia a la compresión, además que la resistencia máxima se alcanza hasta los 60 días.

Para las pruebas de absorción se logró observar una diferencia entre las muestras sin estabilizar y las que tenían diferentes porcentajes de cal. Para ambos suelos las muestras con 10 % de cal fueron las que absorbieron menor cantidad de agua, por lo que se puede concluir que a pesar de que la prueba Eades % Grimm determino que el porcentaje ideal de cal resulta en 6 y 7 % respectivamente para el suelo T1 y T2, se obtiene una mayor resistencia y una menor absorción al agua con el 10 % de cal.

Para el estudio realizado en la UAT se valoraron las cualidades de los BTC estabilizados con cal realizando bloques con cal en polvo y con cal en pasta. Se realizaron pruebas con proporciones de 3 %, 5 % y 7 % en ambos casos. A diferencia de las pruebas realizaron en la UAM-Xochimilco, los bloques se realizaron con una prensa CINVA-RAM.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Para el 3 % de cal la población de cal en polvo tuvo una resistencia de 4.671 kg/cm² y para la población con cal en pasta 2.186 kg/cm²
- Para el 5 % de cal la población de cal en polvo tuvo una resistencia de 5.242 kg/cm² y para la población con cal en pasta 2.796 kg/cm²
- Para el 7 % de cal la población de cal en polvo tuvo una resistencia de 7.967 kg/cm² y para la población con cal en pasta 4.130 kg/cm²

Se puede observar que la resistencia a la compresión simple es mayor para los bloques con cal en polvo y la mayor resistencia se obtuvo con el 7 % de cal, esto debido a que se forma un material poco homogéneo y por lo tanto menos resistente.

También se puede concluir que la resistencia es mucho mayor de los bloques fabricados con la prensa neumática que los fabricados con la prensa CINVA-RAM que es manual. A pesar de la diferencia de resistencia, en ambos casos la resistencia a la compresión y la resistencia ante los efectos del medio ambiente incrementaron cuando se le adicionó más cal.

2.4.4 Construcción con tierra: materias primas

En este trabajo hace recomendaciones para la selección de la tierra como materia prima de los BTC. Se recomienda que la plasticidad del suelo se encuentre dentro del área que se muestra en la Figura 2.4.1, es decir con IP entre 16 y 18 y LL entre 32 y 46.

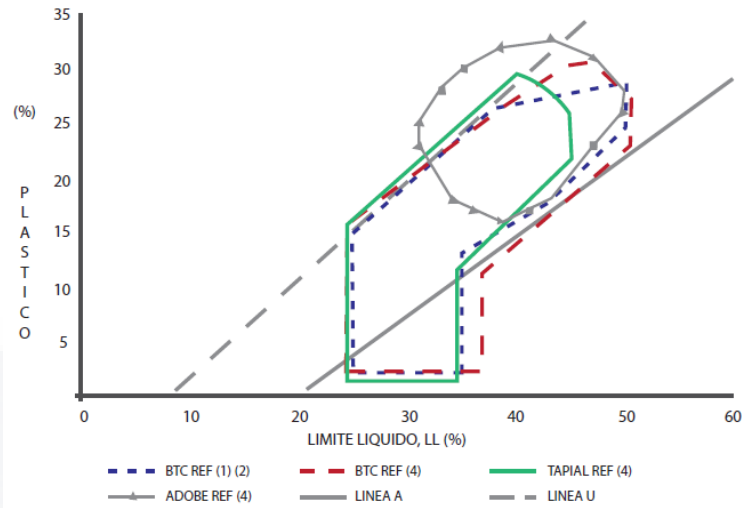


Figura 2.6 Valores recomendados para diferentes sistemas constructivos (Cid, 2009)¹

Se hace también la recomendación que el tamaño máximo de partícula sea de 20 mm. También se recomienda limitar el contenido de sales solubles a un contenido de 2 %.

A continuación, en la tabla 2.2, se muestra un cuadro resumen donde se muestra las diferentes texturas, tamaño de grano, plasticidad, porcentaje de sales solubles y contenido orgánico de diferentes sistemas constructivos con tierra de acuerdo a diferentes normas.

Este trabajo resulta útil para revisar como no hay una dosificación ideal para los BTC o cualquier otra técnica constructiva, los porcentajes de arcillas, limos, arena y grava varían de una fuente a otra, por lo que se hace imperante la necesidad de analizar el suelo encontrado en la zona de construcción.

¹ Figura 2.6 reproducida por el autor en base a Cid,2009

Técnica	Referencia	Textura			Tamaño máximo grano	Plasticidad		% Sales solubles	Contenido orgánico
		Arcilla	Limo	Arena		LL	IP		
Adobe	HB 195	10-40	10-30	Arena+ grava fina 30-75	25 mm			No usar capa vegetal. Prueba del olor	
	NTE E080	10-20	15-25	55-70	5 mm				
	NMAC 14.7.4	mezcla de arena, limo, arcilla natural o paja-aren, que de un adobe sin sentos alabeos y grietas					< 2		
	NZS 4298	Más arcilla que en tapial			Tamaños que no dañen resistencia y comport.			No m.o = pudrirse/ deteriorarse	
BTC	Houben y Guillaud	5-29				31-30	16-33		
	XP P 13-901	10-30				25-30	2,5-29		
	ARSO	8-30			10 mm (visto) 20 mm (ordinario)	25-30	2,5-29		
	HB 195	10-40	10-30	Arena+ grava fina 30-75				No usar capa vegetal. Prueba del olor. Eliminar restos orgánicos	
Tapial	MOPT	5-34			Tamaños que no dañen resistencia y comport.			Pr. del rolito, esponjoso no válido	
	RS 02-1070	6-22						Libre de m.o y material deéctro	
	NZS 4298	8-30	10-25	25-30	10-25 mm	25-51	2-31	No m.o = pudrirse/ deteriorarse	
	Houben y Guillaud	5-15	15-30	Arena+ grava fina 30-70	no < 1" de diametro				
Notas	HB 195 (1)	5-26						Pr. del rolito, esponjoso no válido	
	Prat 70	no < (1/2") de diametro						Libre de m orgánico	
	McHenry 1984 (5)	10-40	20-40	10-40 grava fina 10-20	38,1 mm 20 mm	< 40	6-22	Evitar tierras con restos orgánicos	
	Valores deducidos de los monogramas.	8-16	Menos arcilla que adobe		Tamaños que no dañen resistencia y comport.	< 35-45	< 15-30	No usar capa vegetal. Prueba del olor	
	Houben y Guillaud	8-16				25-46	2-30	No m.o = pudrirse/ deteriorarse	
	HB 195 (1)	arcilla < 0,002; limo de 0,002 a 0,06 mm; arena 0,06 a 2 mm; grava 2 - 60 mm							
	Prat 70	arcilla < 0,002 mm; limo de 0,002 a 0,5 mm; arenas de 0,5 a 5 mm; gravilla de 5-20 mm							
	McHenry 1984 (5)	según norma AASHO, arcilla < 0,005 mm; limo 0,005 - 0,075 mm; arena fina 0,075 - 0,425 mm; arena gruesa 0,425 - 2,0 mm; grava > 2,0 mm							

Tabla 2.2 Cuadro Resumen (Cid,2009)

2.5. Materiales componentes de BTC

Aunque para la producción de BTC requerimos pocos materiales como son tierra, agua y estabilizadores, es necesario conocer sus características, composición y dosificación para realizar un bloque que cumpla con los requisitos proyectados.

2.5.1 Tierra

La tierra es el principal componente de los bloques y es un recurso que se encuentra en grandes cantidades y generalmente es de fácil extracción. La tierra es producto de la erosión de las rocas en la corteza terrestre. No toda la tierra es apta para la fabricación de estos bloques pero con modificaciones menores esta tierra se puede utilizar.

En la actualidad es difícil encontrar una carta o mapa de suelos que describa con exactitud los suelos de cada región, estos mapas nos dan una aproximación del suelo que podemos encontrar por lo que se deben realizar pruebas en cada predio de donde se pretenda extraer el suelo.

Este sistema está enfocado generalmente a la autoconstrucción de vivienda sustentable, muchas veces con asesoría de asociaciones civiles, gobiernos y universidades, por lo que al edificar se trata de utilizar el suelo del sitio y se utilizan pruebas de campo sobre pruebas de laboratorio por su facilidad y rapidez. Las pruebas de laboratorio tampoco son muy complicadas pero requieren de ciertos materiales y equipo que no están usualmente a la mano para realizarlas.

No hay distribución granulométrica ideal del suelo para la fabricación de los bloques, esta variará de un lugar, proveedor e investigador a otro. A pesar de las diversas dosificaciones utilizadas la mayoría de los fabricantes e investigadores no incluyen las gravas dentro del proceso de fabricación. El suelo que se recomienda utilizar está conformado por arenas, limos y arcillas. Las arenas y los limos son el principal componente de los bloques ya que son quien dará el soporte para resistir las cargas, estos agregados no cuentan con fuerza aglutinante. Las arcillas actúan como aglomerante, aunque generalmente se pueden encontrar porcentajes recomendados, es difícil encontrar el porcentaje de arcillas haciendo una distribución granulométrica utilizando tamices, ya que para identificar las arcillas se debe de usar el método del hidrómetro o por medio de difracción de rayos X y si hemos mencionado que el BTC es comúnmente utilizado para autoconstrucción es difícil que esta prueba llegue a realizarse.

A pesar de esto debemos de considerar la presencia de las arcillas en los suelos sin importar si su cantidad es alta o baja en el suelo existente, esto por la existencia de

arcillas que al entrar en contacto con el agua o con la humedad se expanden, provocando daños en las estructuras.

De acuerdo a su estructura reticular los minerales de arcilla se clasifican en tres grandes grupos: Caolinitas, montmorilonitas e ilitas. (Juarez, Rico, 1963)

2.5.2 Agua

El agua juega un papel básico en la fabricación de BTC. Como lo señala Carcedo (2012), el agua es el agente que permite que las reacciones químicas de los estabilizantes se generen y el elemento que hace que la tierra gane plasticidad, básicamente mediante su absorción por parte de la arcilla. Por lo tanto el agua es el componente que activa las propiedades de todos los demás para producir la pieza de tierra.

La humedad óptima del material es medida con pruebas de compactación estática de laboratorio como la prueba Porter, que por los tipos de prensa comúnmente utilizados es la más adecuada. El exceso o la ausencia de agua afectarán el comportamiento estructural del bloque, afectando su resistencia. En campo la determinación de la humedad se hace tomando un puñado de la mezcla de tierra y se aprieta, cuando se deja caer la deberá mantener la forma definida, si se desmorona significa que le falta agua, si quedan residuos de la mezcla de tierra en la mano es que tiene exceso de agua.

2.5.3 Estabilizantes

La estabilización dentro de un BTC es de vital importancia al aumentar su resistencia contra los efectos de la intemperie y al mejorar su estructura interna.

Existen multitud de sustancias como ejemplos de estabilizadores: cal, yeso, cemento, resinas, polímeros, hidrofugantes, impermeabilizantes, aceites, grasas, emulsiones asfálticas, ceras, sosa, orín, estiércol, yema de huevo, caseína, puzolanas, paja, pelo, crin, hierba, corteza de coco, algodón, nylon. (Carcedo,2012)

También ante la posible presencia de arcillas expansivas un estabilizador suele ser la solución, para fines de este trabajo se elegirá la cal.

Como lo señalan Baca, Roux, Soria (2010), en la actualidad se sabe que existen cuatro procesos de interacción de ambos materiales.

1. Intercambio iónico. Las arcillas suelen tener cationes de sodio, potasio y magnesio que atraen con fuerza el agua como resultado de un desequilibrio en sus cargas superficiales. Si se incorpora cal a la tierra, se integran iones de calcio que remueven a los de sodio, potasio y magnesio, con lo que se compensan las cargas superficiales y se controla la atracción del agua.

2. Floculación. Después de algunas horas de haber agregado un poco de cal al suelo, las partículas de arcilla pierden agua, se agrupan y se comportan como componentes de mayor tamaño con lo que se desplaza la curva granulométrica hacia la “zona gruesa” y se consigue un comportamiento más estable del conjunto.

3. Acción puzolánica. Proceso lento en el que reacciona la cal con óxidos presentes en las arcillas generando silicatos y aluminatos de calcio que tienen un alto poder cementante.

4. Carbonatación. Reacción todavía más lenta en la que el hidróxido de calcio se combina con el bióxido de carbono del aire y forma cristales que atrapan a los minerales a su alrededor aumentando la cohesión del conjunto. Esta reacción sólo se presenta en las zonas superficiales del material que son las que están en contacto con la atmósfera.

Los suelos que contienen mayor presencia de arcillas montmoriloníticas o caoliníticas suelen responder mejor a la estabilización con cal que aquellos que contienen arcillas illíticas o cloríticas.

Se deberá realizar la prueba Eades & Grimm para determinar el porcentaje de cal adecuado para la estabilización de cada tipo de suelo.

2.6. Situación de la Normatividad

La situación de la normativa para la construcción con tierra, en especial para los BTC, no es tan escasa como se pudiera pensar. Como lo señalan Cid, Mazarrón y Cañas (2011), podemos encontrar 55 documentos normas vigentes en el mundo que se distribuyen de la siguiente forma:

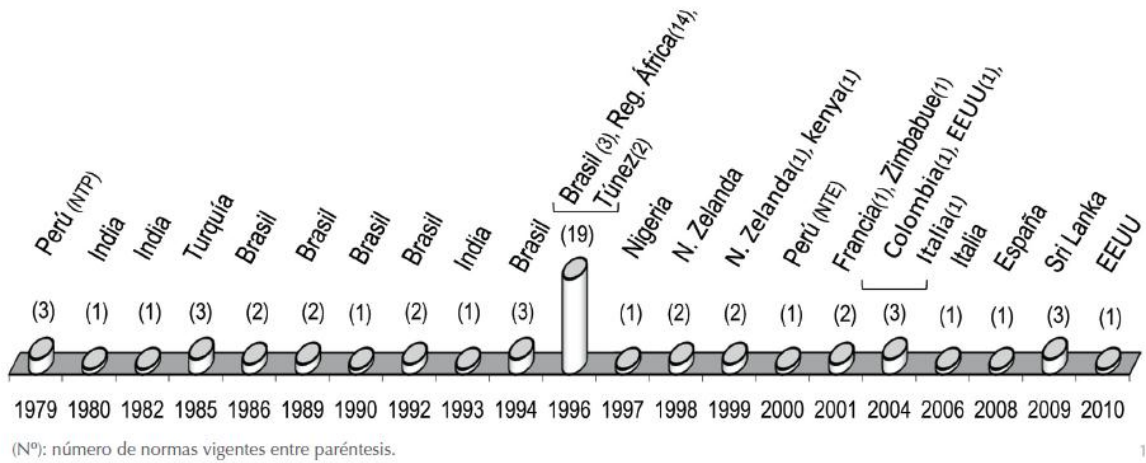


Figura 2.7 Distribución por país de las normas vigentes en el mundo

Como se puede observar en Sudamérica, África y en algunos países de Europa es donde se tiene el mayor desarrollo de normatividad para la construcción con tierra.

Cid, Mazarrón y Cañas (2011) señalan que “En cuanto a contenido, podemos decir que el documento más amplio y completo es el trio neozelandés, pues comprende desde requisitos de materiales y construcción a cuestiones de diseño estructural y de durabilidad de los edificaciones de tierra, y tanto para adobe como para bloque de tierra comprimido o tapial”. También mencionan que las normas Neozelandesas son las que más contenido dedican al diseño estructural. Las normas NMAC 14.7.4 de Nuevo México, las SAZS 724 de Zimbabue, la NTE E 0.80 de Perú, la NZS 4298 de Nueva Zelanda y la africana ARS 682 son las únicas que especifican sobre disposiciones de construcción y ejecución.

En México los lineamientos que deben de cumplir las piezas de mampostería se ajustan a lo descrito en las Normas Técnicas Complementarias de Mampostería del Distrito Federal donde se definen los tipos de piezas y se describen los parámetros y procedimientos a cumplir para peso volumétrico, resistencia a la compresión simple de piezas y muretes, resistencia a la compresión diagonal, módulo de elasticidad y módulo de cortante.

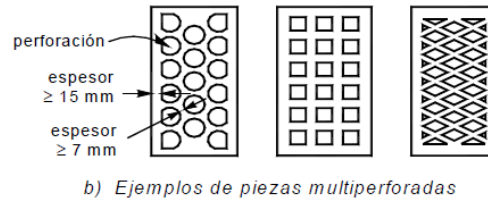
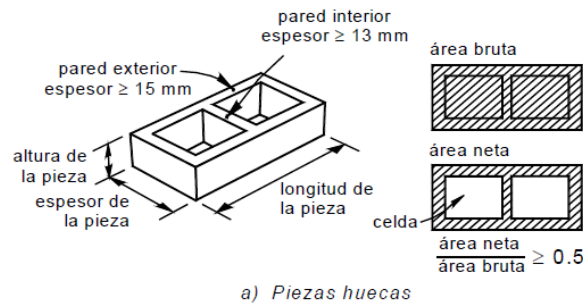


Figura 2.8 Clasificación de las piezas según las NTCM-2004

Tipo de pieza	Valores en kN/m ³ (kg/m ³)
Tabique de barro recocido	13 (1300)
Tabique de barro con huecos verticales	17 (1700)
Bloque de concreto	17 (1700)
Tabique de concreto (tabicón)	15 (1500)

Tabla 2.3 Peso Volumétrico neto mínimo de las piezas en estado seco

f _p [*] , MPa (kg/cm ²) ¹	f _m [*] , MPa (kg/cm ²)		
	Mortero I	Mortero II	Mortero III
6 (60)	2 (20)	2 (20)	2 (20)
7.5 (75)	3 (30)	3 (30)	2.5 (25)
10 (100)	4 (40)	4 (40)	3 (30)
15 (150)	6 (60)	6 (60)	4 (40)
20 (200)	8 (80)	7 (70)	5 (50)
30 (300)	12 (120)	9 (90)	7 (70)
40 (400)	14 (140)	11 (110)	9 (90)
≥ 50 (500)	16 (160)	13 (130)	11 (110)

Tabla 2.4 Resistencia de diseño a compresión de la mampostería de piezas de barro

En capítulos posteriores de las NTCM 2004 se establecen las especificaciones generales de análisis y diseño.

Las resistencias establecidas en las NTCM 2004 contrastan con las que se pueden encontrar en las NMX-C-404-ONNCCE-2012, ya que las resistencias se incrementan para piezas de barro macizo a 110 Mpa, aunque se debe tomar en cuenta que las NMX o normas mexicanas son solo recomendaciones que cuando se incluyan en las especificaciones del proyecto deben ser tomadas en cuenta y en ausencias de estas los valores incluidos en las NTCM deben ser respetados.

Tipo de pieza	Configuración	Resistencia media f_p Mpa (kg/cm ²)	Resistencia Mínima individual $f_{p\ min}$ Mpa (kg/cm ²)
Bloque	Macizo	15 (150)	12 (120)
	Hueco	9 (90)	7 (70)
	Multiperforado	15 (150)	12 (120)
Tabique (largo > 300 mm)	Hueco	9 (90)	7 (70)
	Multiperforado	9 (90)	7 (70)
Tabique (largo < 300 mm)	Macizo	11 (110)	7 (70)
	Hueco	9 (90)	7 (70)
	Multiperforado	15 (150)	12 (120)

Tabla 2.5 Valores de la resistencia a la compresión incluidos en las NMX-C-404-ONNCCE-2012²

A pesar de que solo se incluyen materiales como el tabique de barro recocido, el tabique de barro recocido con huecos verticales, el bloque de concreto y el tabicón de concreto, se pueden seguir los procedimientos para realizar las pruebas necesarias a materiales no especificados como el BTC. A pesar de esto es necesario tener una normativa exclusiva para la construcción con tierra ya sea para la construcción con tapial, adobe o BTC, ya que se deben de hacer recomendaciones para la fabricación de las piezas para cada zona del país, ya que la composición del suelo varía de un lugar a otro. También se debe de establecer el grado de compactación adecuado, la forma de estabilización y el tiempo de curado.

² Figura 2.5 reproducida por el autor en base a tabla 2. Resistencia a compresión en NMX-C-404-ONNCCE-2012

3. Diseño de la campaña experimental

3.1. Introducción

Este capítulo corresponde a la parte práctica de la tesis y aquí se describirán los motivos para la selección de cada tipo de suelo, así como los procedimientos aplicados para la realización de las pruebas de laboratorio.

Las pruebas del comportamiento del suelo se realizaron en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. La elaboración de los bloques, el curado y ensayo de los mismos se realizó en el laboratorio de calidad de la empresa Calidra, con quien se realizó un acuerdo para la utilización de la prensa manual ubicada en la planta de Aguascalientes.

La campaña experimental aquí descrita persigue la consecución del objetivo general de esta tesis donde se busca evaluar la resistencia a la compresión de BTC elaborados en Aguascalientes y estabilizados con cal como un sistema constructivo alternativo.

3.2 Consideraciones previas

En Aguascalientes los BTC son poco utilizados como sistema constructivo, por lo que no hay literatura que trate sobre la implementación de este sistema constructivo en el estado.

A diferencia de las múltiples tabiquerías que podemos encontrar en la ciudad, es muy difícil encontrar fabricantes en masa de BTC por lo que para poder concluir este estudio se fabricarán los bloques mediante una prensa manual de un bloque marca Tecnoadobe modelo TA-100. La ficha técnica se encuentra en el anexo A y muestra las características de la prensa.

En vista de la falta de dosificaciones ideales para Aguascalientes se realizarán pruebas con distintos suelos y se variará el porcentaje de cal de cada uno de ellos, de esta manera se determinará cual serie obtiene una mayor resistencia a la compresión.

Mediante la carta geológica-minera del Servicio Geológico Mexicano F13-9 correspondiente al estado de Aguascalientes, podemos observar que una gran parte de la zona aledaña a la capital del estado se encuentra clasificada como conglomerado policlástico o arenisca-conglomerado policlástico, comúnmente llamado "tepetate". Este material es ampliamente utilizado en la construcción, ya sea en su estado inalterado para cimentaciones por la gran capacidad de carga que ofrece o como material para relleno en terracerías.

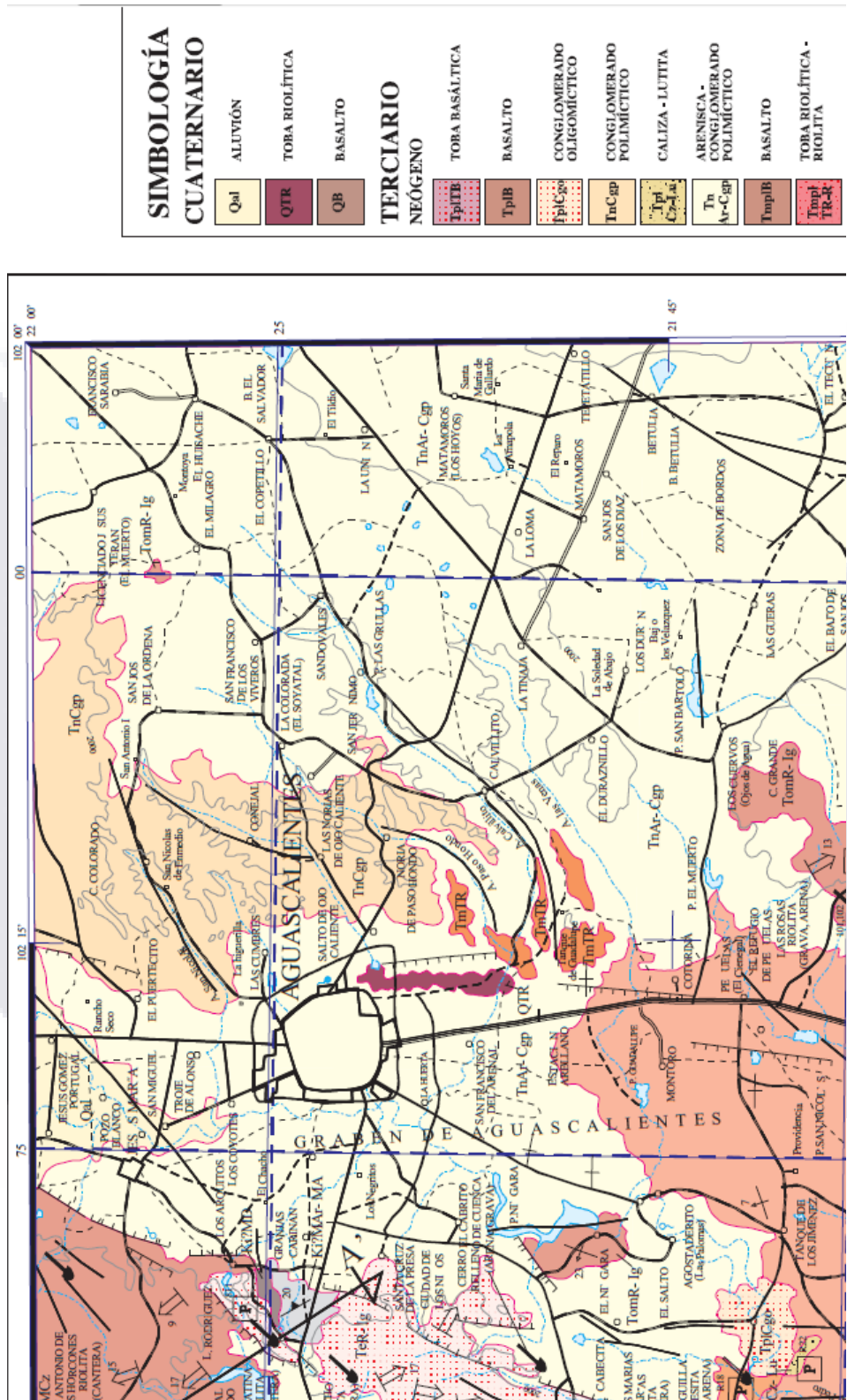


Figura 3.1 Carta geológica-minera de Aguascalientes F13-9 SGM

La carta geológica-minera del SGM nos da una idea de la zonificación de los suelos en Aguascalientes, pero en la práctica la composición del suelo variará de un predio a otro por lo que para realizar un proceso de fabricación adecuado se aplicará el proceso descrito en 3.3.

Para la fabricación de los bloques se tomaron cuatro tipos de suelos y siguiendo lo estipulado en 3.3 se les realizaron pruebas granulométricas, pruebas de límites de consistencia y la prueba Eades&Grim para la determinación del porcentaje óptimo de cal.

Posteriormente se realizaron probetas con un molde de 15x10x30 cms. Para cada tipo de suelo vario el porcentaje de cal y se verifico si se cumple con una resistencia media a la compresión de 60 kg/cm².

Entonces se fabricaron probetas para 4 tipos de suelo de la siguiente manera:

-Suelo 1: Se hicieron probetas con porcentajes de cal del 3 %, 7 % y 12 % y un testigo sin cal. Fabricando 5 probetas para cada serie. Por lo que se fabricaron 20 bloques.

-Suelo 2: Se hicieron probetas con porcentajes de cal del 3 %, 7 % y 12 % y un testigo sin cal. Fabricando 5 probetas para cada serie. Por lo que se fabricaron 20 bloques.

-Suelo 3: Se hicieron probetas con porcentajes de cal del 3 %, 7 % y 12 % y un testigo sin cal. Fabricando 5 probetas para cada serie. Por lo que se fabricaron 20 bloques.

-Suelo 4: Se hicieron probetas con porcentajes de cal del 3 %, 7 % y 12 % y un testigo sin cal. Fabricando 5 probetas para cada serie. Por lo que se fabricaron 20 bloques

3.3 Proceso propuesto

En este apartado se describirá el proceso a seguir para fabricar las piezas, analizarlas y ensayarlas. Para ejecutar el proceso se tomará en cuenta la normativa vigente para cada tipo de análisis y se respetará el orden propuesto en la figura 3.3.1.

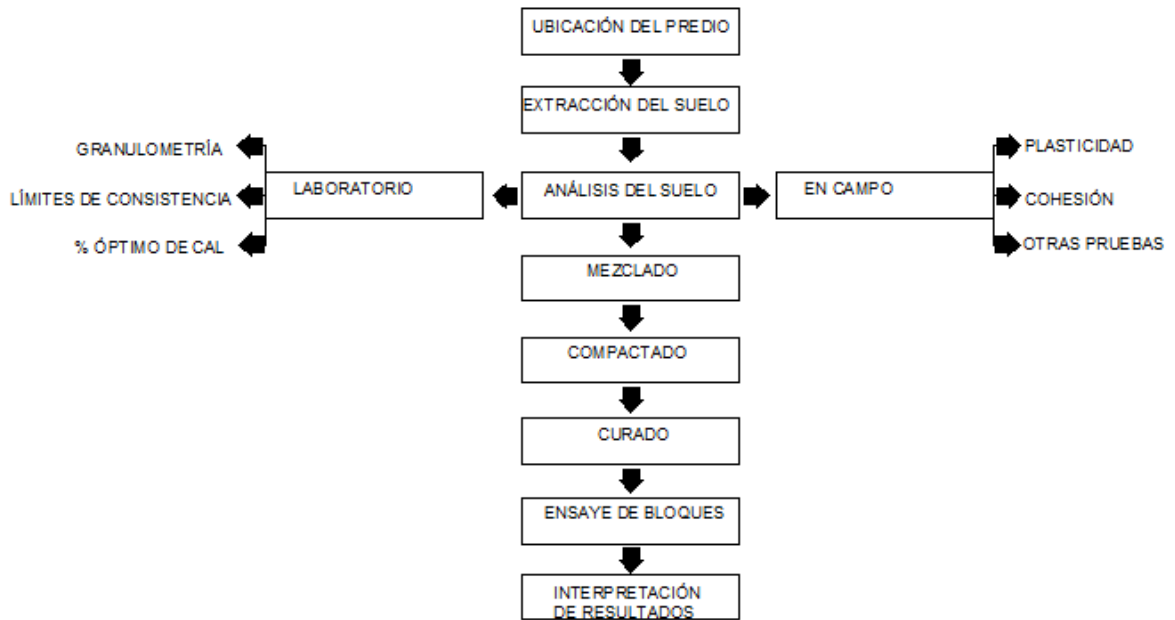


Figura 3.2 Proceso propuesto para la extracción, análisis, fabricación y ensayo de BTC.

3.3.1 Ubicación del predio y extracción del suelo

Para la selección del banco de material a utilizar se buscaron obras en diferentes puntos de la ciudad donde se estuviera excavando material para la cimentación o donde se estuviera haciendo corte para la ubicación de calles o carreteras. Para la extracción de todos los suelos se utilizó equipo mecánico y se despalmó la primer capa de suelo de aproximadamente 30 centímetros que contiene materia vegetal.

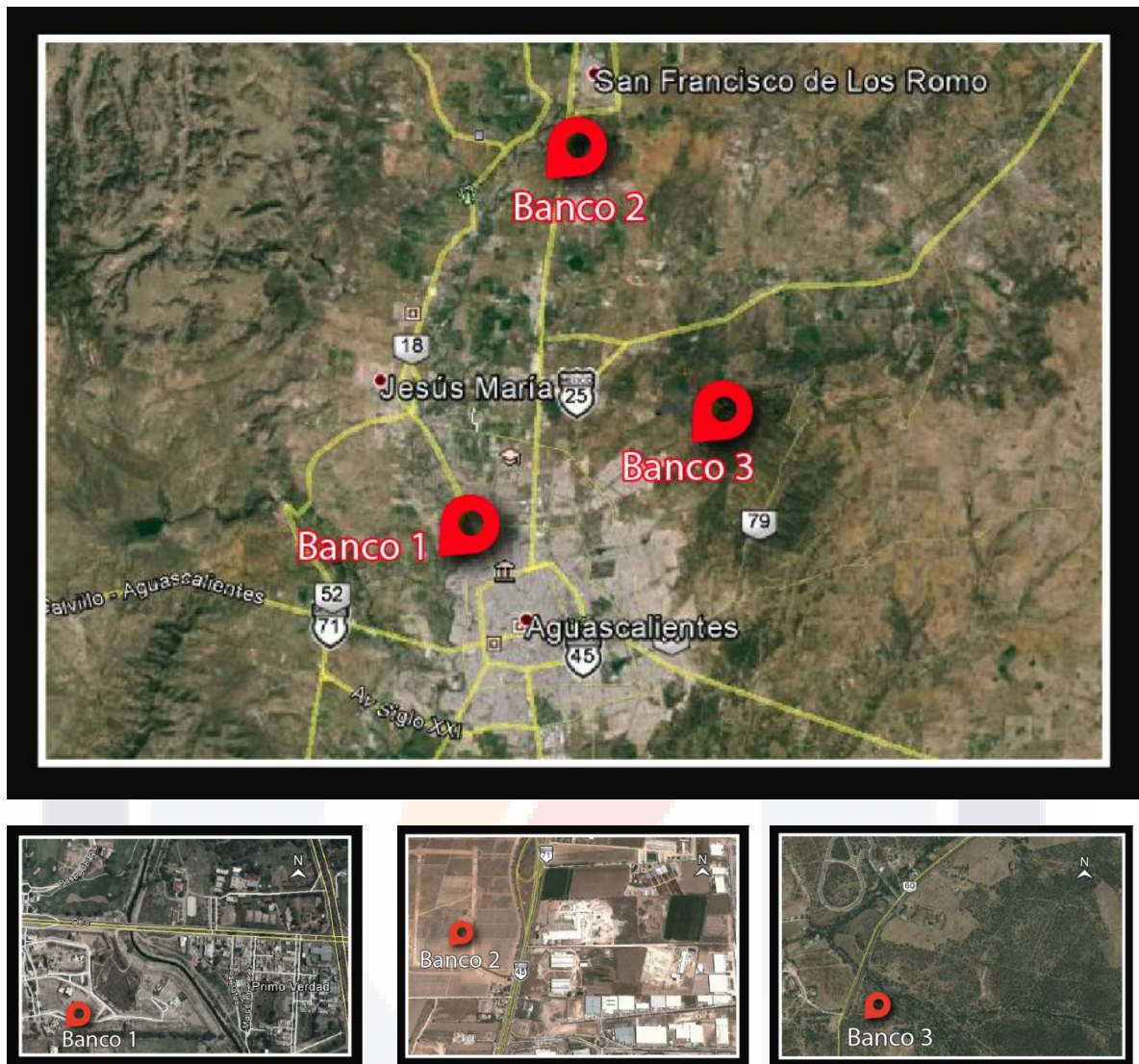


Figura 3.3 Ubicación de los puntos de extracción (Imagen obtenida de Google Earth)

El suelo I se obtuvo del material producto de excavación de la cimentación de una vivienda ubicada al poniente de la ciudad de Aguascalientes y que se ubica en una zona próxima al río San Pedro y presenta una gran cantidad de limos (banco 1).

El suelo II se obtuvo del material producto del corte del suelo para la construcción de una vialidad en el parque industrial de San Francisco de los Romo, Aguascalientes (banco 2). Para estos dos suelos se tomaron dos predios en donde se estaban extrayendo tierras para mantener una de las principales ventajas del BTC que es la sustentabilidad.

Para el suelo III se utilizó un “tepetate” por su gran abundancia en el estado, por lo que se debe de probar la factibilidad de la fabricación de bloques con este suelo ya que el

acarreo de este material dentro de la zona urbana y conurbada de la ciudad hace que el costo del bloque terminado no se eleve por falta de disposición de materia prima. Para esta serie se había decidido utilizar material de un banco de tepetate. Se seleccionaron varios bancos ubicados al oriente de la ciudad, pero ninguno de ellos presentaba un porcentaje de mayor al 9 % de finos, lo que hacía muy difícil la fabricación del bloque ya que con este material no era posible el retiro del bloque de la prensa ya que se desmoronaba. Se identificó que en el banco I había una capa de tepetate con mayor cantidad de finos por lo que se muestreo y se clasificó como una arena arcillosa con un porcentaje mayor de finos lo que facilitaba la fabricación del bloque, su granulometría se discutirá en 3.3.2

El suelo IV corresponde a un material utilizado para fabricar ladrillo rojo recocido y que es extraído de los lechos de los ríos y que por su formación contiene arcillas.

3.3.2 Análisis granulométrico

Los análisis granulométricos se hicieron de acuerdo a los estipulado por la SCT (Secretaría de comunicaciones y transportes) en el manual M-MMP-1-06/03 (métodos de muestreo y prueba de materiales, parte 1 suelos y materiales para terracerías, título 6 granulometría de materiales compactables para terracerías).

Aunque en ninguna norma mexicana se establece el proceso para la realización de análisis granulométricos para la fabricación de BTC, el M-MMP-1-06/03 cumple con el objetivo deseado que es la determinación de la composición por tamaños de las partículas que integran los materiales empleados en la fabricación de BTC.

Como se indica en el manual se apartaron 15 kg, posteriormente se secó, disgregó y cuarteó de acuerdo a lo descrito en el manual M-MMP-1-03.



Figura 3.4 Disgregado y cuarteo de la muestra

Para cribar la muestra de suelo las mallas se ordenaron de acuerdo a la Tabla 1 del M-MMP-1-06/03.



Figura 3.5 Orden de los tamices para cribado de suelo

A el material que pasa la malla no.4 se le agregan 500 cm³ de agua y se deja reposar 12 horas como mínimo. Al concluir el tiempo se debe lavar la muestra a través de la malla del no.200 según lo descrito en el inciso D.3.3.2 del manual.

Una vez lavado el material el material se secó por 16 horas para poder realizar el cribado por las mallas. Una vez cribado el material se obtuvieron las masas retenidas en cada una de las mallas.



Figura 3.6 Pesado de material retenido en cada malla

El informe realizado para cada tipo de suelo se puede revisar en el anexo C.

3.3.3 Límites de consistencia

El análisis de los límites de consistencia de los diferentes tipos de suelos se hicieron de acuerdo a los estipulado por la SCT en el manual M-MMP-1-07/07 (métodos de muestreo y prueba de materiales, parte 1 suelos y materiales para terracerías, título 7 límites de consistencia).

Para clasificar un suelo adecuadamente se debe de realizar esta prueba que nos permite conocer las características de plasticidad de la porción de los materiales para terracerías que pasan la malla no.40. Como lo indica el manual en su inciso B, las pruebas consisten en determinar el límite líquido, es decir, el contenido de agua para el cuál un suelo plástico adquiere una resistencia al corte de 2.45 KPa (25 g/cm²); este se considera como la frontera entre los estados semilíquido y plástico.

Para la realización de esta prueba se utilizó el equipo descrito en el inciso D del M-MMP-1-07/07.

El material disgregado y cuarteado se cribó por la malla no. 40, posteriormente se humedeció y se dejó 24 horas. Posteriormente se tomaron 150 gramos, se homogenizaron y se colocaron en la cápsula de casa grande, se hizo una ranura al centro de la cápsula. Una vez ranurada la muestra dentro de la cápsula se hizo caer y se contó el número de golpes para que los bordes interiores de la muestra ranurada se pusieran en contacto en una longitud de 13 mm. Una vez realizado este paso se tomaron 10 gramos de la muestra para determinar su contenido de humedad. El procedimiento se realizó 4 veces adicionando agua con un cuentagotas para que las 4 pruebas quedaran entre los 10 y 35 golpes, de los cuales dos quedaron por arriba y dos por debajo

Una vez obtenidos las cuatro pruebas se trazó la curva de fluidez para los tres tipos de tierra utilizados.

Para determinar el límite plástico se utilizó la muestra preparada para la determinación del límite líquido. Se formaron esferas de 12 mm aproximadamente y se manipularon en forma de cilindros. Estos cilindros se hicieron girar hasta reducir su diámetro a 3 mm aproximadamente. Cuando los cilindros, al alcanzar los 3 mm no se rompían en 3 partes, se repetía el proceso manipulando con los dedos para hacerlo perder humedad. Cuando los cilindros rompían en 3 partes una vez alcanzados los 3 mm se procedía a determinar el contenido de humedad.

Una vez determinado el límite líquido y plástico se procedió a obtener el índice plástico que no es más que el límite líquido menos el plástico.

A continuación se presentan los resultados de límites de consistencia para los tres tipos de suelo:

	SUELO 1	SUELO 2	SUELO 3	SUELO 4
LIMITE LIQUIDO (LL)	39.52	26.69	39.86	40.12
LIMITE PLASTICO (LP)	25.62	13.87	24.39	17.48
INDICE PLASTICO (IP)	13.90	12.82	15.47	22.64

Tabla 3.1 Índice plástico de los suelos analizados

3.3.4 Clasificación de suelos muestreados

De acuerdo a los datos obtenidos en las pruebas granulométricas y de límites de consistencia, los suelos se clasificaron de la siguiente forma:

- El suelo 1 tiene color café oscuro-negro cuya clasificación según el sistema unificado de clasificación de suelos es un limo de baja compresibilidad (ML) y su granulometría está formada por 1.15 % de grava, 11.96 % arena y 86.89 % de finos.
- El suelo 2 tiene color marrón cuya clasificación según el sistema unificado de clasificación de suelos es una arena arcillosa (SC) y su granulometría está formada por 2.32 % de grava, 54.89 % arena y 42.78 % de finos.
- El suelo 3 tiene color café claro cuya clasificación según el sistema unificado de clasificación de suelos es una arena arcillosa (SC) y su granulometría está formada por 4.90 % de grava, 67.05 % arena y 28.05 % de finos.
- El suelo 4 tiene color café oscuro cuya clasificación según el sistema unificado de clasificación de suelos es una arcilla de baja compresibilidad (CL) y su granulometría está formada por .72 % de grava, 9.46 % arena y 89.81 % de finos.

Se puede observar que el suelo 1 y el suelo 4 presentan una mayor cantidad de finos, mientras que el suelo 2 y el 3 presentan menos del 50%. Aunque los suelos 2,3 y 4 presentan arcillas en su composición, es muy difícil conocer la cantidad exacta de las mismas ni cómo afectará la resistencia del bloque.

También se obtuvo el peso volumétrico seco suelto de cada tipo de suelo.

	SUELO 1	SUELO 2	SUELO 3	SUELO 4
PESO VOLUMÉTRICO SECO SUELTO	934.29	1248.57	1134.71	945.39

Tabla 3.2 Peso volumétrico seco suelto

3.3.5 Determinación del porcentaje óptimo de cal

La cantidad de cal agregada al suelo dependerá de la composición mineralógica del suelo. Cuando se le agrega cal al suelo se modifican sus características generando un aumento de resistencia, estabilidad y su durabilidad ante los efectos del agua. La cantidad de cal necesaria se determinará mediante una prueba de laboratorio para indicar la proporción de suelo-cal necesaria para mantener elevado el PH para soportar las reacciones requeridas para estabilizar el suelo.

El proceso consiste en cribar el suelo por la malla no.40. Se debe de pesar el recipiente donde se realizará la prueba. Se agrega el suelo más el agua y se agita por 30 segundos. Posteriormente se mide el PH de la mezcla y se toma como óptimo el que más se acerque a 12.4.

Para los cuatro suelos utilizados se obtuvieron los siguientes porcentajes:

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE CAL (EADES & GRIMM)				
	SUELO 1	SUELO 2	SUELO 3	SUELO 4
% DE CAL	6%	1%	1%	7%

Tabla 3.3 Porcentaje óptimo de cal para estabilización del suelo

Como se puede observar en la tabla 3.3 los porcentajes óptimos de estabilización varían mucho de un suelo con una presencia predominante de finos a uno con mayor presencia de arenas. En el capítulo 6 se discutirán los resultados obtenidos al variar el porcentaje de cal hasta un 12 % y los datos obtenidos en esta prueba.

3.4 Pruebas de campo

Paralelamente a las pruebas realizadas en 3.3.2 y 3.3.3, se realizaron pruebas de campo o empíricas, esto para darnos una idea de las características del suelo cuando un material sea extraído en sitio o suministrado por un banco. Estas pruebas no son determinantes y no sustituyen a las pruebas de laboratorio pero en campo pueden ser útiles para aceptar o rechazar el suelo.

3.4.1 Prueba de cohesión

Para realizar esta prueba se formaron esferas de 4 centímetros de diámetro y se dejaron caer de aproximadamente 1.5 metros. Mchenry(1996) recomienda que cuando la esfera se aplane levemente y muestre pocas o ninguna fisura, está tiene una alta capacidad aglutinante. Si la esfera se deshace completamente, el material tiene una baja capacidad aglutinante. Mchenry recomienda la consistencia de la tercera muestra de izquierda a derecha.

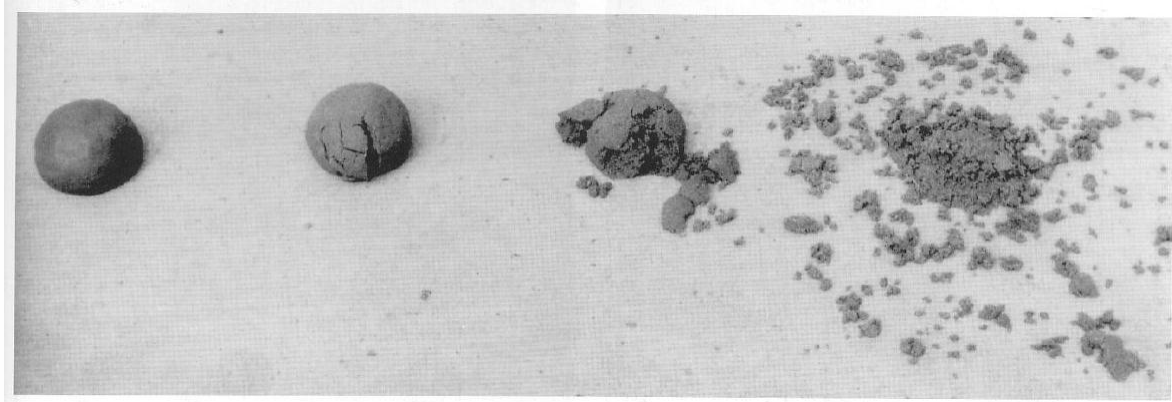


Figura 3.7 Bolsa de barro luego del ensayo de la caída (Mchenry,1996)

Los resultados de las esferas probadas de los 4 tipos de suelos fueron consistentes con los resultados del análisis granulométrico. En la figura 3.8, correspondiente al suelo 1, se puede observar que la forma de la bola de tierra se mantiene y presenta pocas fisuras.

En la figura 3.9 correspondiente al suelo 2, se puede observar que la esfera mantiene una forma uniforme presentando pocas fisuras.

En la figura 3.10, correspondiente al suelo 3, se puede observar que la esfera no mantiene una forma uniforme presentando muchas fisuras y desprendimiento de partículas.

En la figura 3.11, correspondiente al suelo 4, se puede observar que la esfera mantiene una forma uniforme y no presenta fisuras.

De acuerdo a las pruebas de cohesión realizadas con la caída de las esferas, el suelo 4 es el que menos fisuras presenta, manteniendo su forma y sin presentar desprendimientos. Se puede relacionar este comportamiento con la granulometría observada en 3.3.4 ya que el suelo 4 está clasificado como arcilla.



Figura 3.8 Prueba de cohesión del suelo 1



Figura 3.9 Prueba de cohesión del suelo 2



Figura 3.10 Prueba de cohesión del suelo 3



Figura 3. 11 Prueba de cohesión del suelo 4

3.4.2 Prueba de plasticidad

Otra prueba utilizada es la de plasticidad del suelo y consiste en formar esferas de 3 centímetros para posteriormente hacer rollos que alcancen los 3 mm de diámetro. Se hacen los rollos lo más largo que se pueda hasta que el rollo presente fisuras o se rompa por completo. Si la tira se rompe entre los 5 y 15 centímetros se considera que el suelo presenta una plasticidad adecuada.



Figura 3.12 Pruebas de plasticidad suelo 1



Figura 3.13 Pruebas de plasticidad del suelo 2



Figura 3.14 Pruebas de plasticidad suelo 3



Figura 3.15 Pruebas de plasticidad suelo 4

Por el largo se podría concluir que los suelos 1 y 2, presentan una plasticidad alta con un contenido alto de arcillas pero como se ha mencionado antes esto se debe a la presencia de material fino.

En el suelo 3 no fue posible hacer el rollo, lo que indica una baja plasticidad por su baja cantidad de material fino y posteriormente se revisará como se comportó ante la presencia de cal.

El suelo 4 es totalmente plástico y excede casi al doble los parámetros establecidos aunque cabe mencionar que ninguno de los 4 suelos cumple.

3.4.3 Otras pruebas

Otras pruebas que se hacen en campo son las pruebas de sedimentación y de mordedura. La prueba de sedimentación consiste en llenar 2/3 partes de un vaso con tierra y el resto con agua, se mueve el contenido durante 30 segundos aproximadamente, se deja reposar por varias horas para observar la separación de las partículas. Minke (1994) señala que es una interpretación errónea asumir que la medida de cada capa corresponde a la proporción de arcilla, limo, arena y grava. Diferentes experimentos mostraron que el error puede ser de 1700 %.

La prueba de la mordedura indica que si el suelo no rechina al morderlo es arcilloso, si rechina poco es limoso y si rechina mucho es arenoso.

La prueba de sedimentación y mordedura son muy impresas para poder clasificar un suelo por lo que no se recomiendan para aceptar o descartar un material.

Otra prueba utilizada es la de la adherencia de las partículas en la mano al manipular el suelo. El suelo tiene un alto contenido de arcillas cuando la mezcla se quede pegada en la mano como lo indica la figura 3.16, mientras que cuando se la mezcla de suelo se pueda quitar sin necesidad de utilizar agua, esta no cuenta con capacidad aglutinante.



Figura 3.16 Muestra de suelo 4 adherida a la mano

3.5 Fabricación de las probetas

3.5.1 Materiales y equipos

En este apartado se describirán los materiales y equipos utilizados durante el proceso de fabricación.

- Suelo. Como se comentó en 3.3.1, se utilizaron 4 suelos de diferentes ubicaciones en el estado de Aguascalientes. Los suelos 1,2 y 3 son materiales producto de excavación y solamente se cribaron por la malla no.4.
- Cal. Se utilizó Hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, marca Calidra cuya ficha técnica se puede encontrar en el Anexo B.
- Agua. Se utilizó agua potable directamente de la red de abastecimiento de la ciudad de Aguascalientes.

La herramienta y equipo utilizado para el cribado, mezcla, compactación y ensayo de las probetas se describirán a continuación:

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- Herramienta. Adicional a la herramienta utilizada en las pruebas granulométricas como probetas, tamices de diferentes aberturas, tazón de casa grande, balanzas, horno, se utilizaron para la fabricación de los bloques palas, carretillas, pisones, espátulas, brochas entre otros.
 - Cribadora automática: Está cribadora marca Controls modelo 15-D0420/AZ. Este equipo cuenta con la capacidad de colocar diferentes tamices al mismo tiempo, pero para las necesidades de este trabajo solo se utilizó la malla del no.4 y el fondo para contener el material que pasa esta malla.



Figura 3.17 Cribadora automática

- Balanza digital. Con capacidad para 150 kg mca. Controls



Figura 3.18 Balanza digital

- Prensa manual. Para la compactación de la tierra se utilizó una maquina manual de un bloque marca Tecnoadobe modelo TA-100.



Figura 3.19 Prensa manual Tecnoadobe

- Revolvedora. Para la obtención de un mezclado homogéneo se utilizó una revolvedora de medio saco.



Figura 3.20 Revolvedora de medio saco

- Prensa hidráulica. Una vez elaborado y curado el BTC, se procedía a colocarlo en la prensa para ensayarlo. Para esto se utilizó una prensa Digimax Plus marca Controls.



Figura 3.21 Prensa para el ensayo de los bloques

3.5.2 Proceso de fabricación

Una vez realizado el análisis granulométrico y los límites de consistencia se procedió a la fabricación de las probetas. El proceso fue repetitivo para los 4 tipos de suelos.

El primer paso fue el cribado del material por la malla del no.4, esto para separar las gravas y trabajar solo con arenas y finos. Para este proceso se utilizó una cribadora automática. Una vez cribado el suelo se pesaba hasta obtener 35 kg, los cuales alcanzaban para fabricar 5 bloques para las pruebas de compresión a 28 días. El contenido de agua variaba según el contenido de cal agregado y se realizaban pruebas de amasamiento para controlar la humedad. La cal se pesaba según el porcentaje requerido y se agregaba a la revolvedora. El agua se agregaba con probetas de 500 ml.

Una vez mezclada la tierra se vació en charolas para transportar la mezcla de la revolvedora a la tolva de la prensa manual.

Antes de empezar a aplicar la presión a los bloques, el molde debía ser limpiado y se le aplicaba diésel con una brocha en la cara inferior y en las laterales para facilitar el desmoldado. Esto se realizaba una vez por serie de 5 bloques. Terminado este paso se iniciaba con el proceso de prensado jalando la charola debajo de la tolva para que el material cayera dentro del molde. Antes de dejar caer la tapa se cuidaba que el material se encontrara al ras del molde. Entonces se dejaba caer la tapa y se retiraba el seguro de la palanca y se aplicaba la presión. Los bloques que no oponían resistencia al jalar de la palanca generalmente se volvían a hacer ya que no recibían la compactación suficiente y no era posible manipularlos para los pasos siguientes. Una vez aplicada la presión se regresaba la palanca hasta la tapa del molde, se colocaba el seguro y se jalaba, levantando la tapa y haciendo que la parte inferior del molde empujara el bloque hacia arriba permitiendo el retiro del mismo.



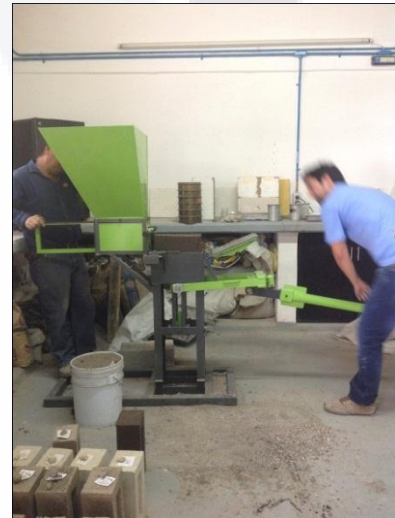
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.22 (a,b,c,d,e) Proceso de fabricación de los BTC

Los bloques terminados se medían y pesaban, esto para compararlos con sus medidas y su peso final para determinar la contracción del bloque y la pérdida de humedad. Posteriormente se colocaban en posición vertical para iniciar con el proceso de curado de 28 días.

Los bloques se curaron dentro del laboratorio a una temperatura promedio de 27°C, todo el tiempo a la sombra y protegidos de las corrientes de aire. Algunas piezas de cada serie se metieron al cuarto de curado, que tenía una temperatura promedio de 23°C y donde la humedad es controlada.



Figura 3.23 Bloques de diferentes tipos de suelo y edades de curado.



Figura 3.24 Bloques terminados (izquierdo con adición de cal, derecho sin cal)

Los datos obtenidos de la fabricación de los bloques de cada tipo de suelo se muestran en las tablas siguientes:

PROBETA	SUELO 1								
	MEDIDAS INICIALES (CMS)			PESO (KG)	% AGUA (LT)/PZA	MEDIDAS FINALES (CMS)			PESO (KG)
	A	H	L			A	H	L	
T.1	15	10.4	30	6.43	0.18	14.6	10.2	29.3	6
T.2	15	10.4	30	6.92		14.6	10.2	29.6	6.58
T.3	15	10.6	30	7.1		14.6	10.4	29.6	6.7
T.4	15	10.4	30	7.14		14.6	10.2	29.4	6.72
T.5	15	10.6	30	6.82		14.4	10.4	29.4	6.42
PROMEDIO	15	10.48	30	6.88	2.7%	14.56	10.28	29.46	6.484
3.1	15	10.3	30	6.72	0.21	14.8	10	29.5	6.29
3.2	15	10.5	30	7.15		14.8	10	29.5	6.82
3.3	15	10.5	30	7.32		14.6	10.4	29.6	7
3.4	15	10.5	30	7.02		14.6	10	29.6	6.7
3.5	15	10.5	30	6.65		14.6	10	29.4	6.29
PROMEDIO	15	10.46	30	6.97	3.0%	14.68	10.08	29.52	6.62
7.1	15	10	30	7.24	0.27333	14.7	10.2	29.5	5.66
7.2	15	10	30	7.18		14.9	10.7	29.7	6.61
7.3	15	10	30	7.18		14.9	10.3	29.6	6.63
7.4	15	10	30	7.12		14.9	10.3	29.6	6.56
7.5	15	10	30	7.12		14.8	10.4	29.6	6.67
PROMEDIO	15	10	30	7.17	3.8%	14.88	10.43	29.625	6.426
12.1	15	10.5	30	8.35	0.08333	14.9	10.5	29.9	7.38
12.2	14.9	10.7	30	7.98		14.8	10.5	29.9	7.04
12.3	15	10.5	30	8		14.8	10.5	30	7.06
12.4	14.9	10.6	30	8.03		15	10.6	29.8	7.01
12.5	15	10.8	30	8.12		15	10.6	29.8	7.17
PROMEDIO	14.95	10.65	30	8.0325	1.0%	14.90	10.55	29.875	7.07

PROBETA	SUELO 2								
	MEDIDAS INICIALES (CMS)			PESO (KG)	% AGUA (LT)	MEDIDAS FINALES (CMS)			PESO (KG)
	A	H	L			A	H	L	
T.1	15	10.3	30	7.34	0.15	14.4	10.2	29.8	6.59
T.2	15	10.3	30	7.7		14.9	10.3	30	7.03
T.3	15	10.6	30	7.75		14.9	10.6	30	7.03
T.4	15	10.5	29.8	7.7		15	10.5	29.8	7.01
T.5	15	10.7	29.9	7.9		14.9	10.7	29.8	7.3
PROMEDIO	15	10.48	29.94	7.68	2.0%	14.82	10.46	29.88	6.99
3.1	15	10.3	30	7.79	0.18	15	10.4	30	7.07
3.2	14.9	10.6	29.9	7.46		15	10.4	30	8.85
3.3	14.9	10.3	30	7.48		14.9	10.4	30	6.78
3.4	15	10.4	30	7.45		-	-	-	-
3.5	15	10.3	30	7.81		14.8	10.5	29.9	7.1
PROMEDIO	14.96	10.38	29.98	7.60	2.4%	14.925	10.43	29.98	7.45
7.1	14.9	10.5	30	8.12	0.22	15	10.6	29.8	7.13
7.2	14.9	10.5	30	7.9		14.9	10.5	30	6.54
7.3	14.9	10.4	30	7.95		14.5	10.3	29.9	6.7
7.4	14.9	10.4	30	7.57		14.9	10.4	30	7.02
7.5	14.9	10.3	30	7.44		15	10.5	29.9	7.01
PROMEDIO	14.90	10.4	30.00	7.80	2.8%	14.825	10.43	29.95	6.88
12.6	14.8	10.5	30	8.47	0.19833	14.8	10.7	30	7.45
12.2	14.8	10.3	30	8.23		14.8	10.7	29.9	7.23
12.3	14.9	10.7	30	8.95		14.8	10.6	29.9	7.86
12.4	14.7	10.3	30	8.44		14.9	10.5	29.9	7.48
12.5	15	10.3	30	8.34		14.9	10.5	29.8	7.37
PROMEDIO	14.84	10.42	30.00	8.49	2.3%	14.84	10.60	29.90	7.48

PROBETA	SUELO 3								
	MEDIDAS INICIALES (CMS)			PESO (KG)	% AGUA (LT)	MEDIDAS FINALES (CMS)			PESO (KG)
	A	H	L			A	H	L	
T.1	15	10.6	30	7.71	0.09	14.9	10.8	29.8	6.76
T.2	15	10.9	30	8.32		14.9	10.6	30	7.42
T.3	15	10.4	30	7.23		14.7	10.3	29.6	6.3
T.4	15	10.3	30	7.85		se quebro	-	-	0
T.5	15	10.4	30	7.44		14.8	10.3	29.6	6.51
PROMEDIO	15	10.52	30	7.71	1.2%	14.825	10.50	29.75	5.398
3.1	15	10.5	30	8.03	0.18	14.9	10.4	29.9	7.11
3.2	15	10.6	30	7.99		14.9	10.5	29.4	7.01
3.3	15	10.7	30	7.98		14.9	10.5	29.9	6.95
3.4	15	10.8	30	8.14		se quebro	-	-	7.00
3.5	14.9	10.8	29.9	7.92		se quebro	-	-	-
PROMEDIO	14.98	10.68	29.98	8.01	2.2%	14.9	10.47	29.73	7.02
7.1	15	10.6	30	8.11	0.18	14.8	10.6	29.7	7.05
7.2	15	10.5	30	8.12		14.8	10.6	29.7	7.11
7.3	15	10.8	30	8.22		14.8	10.6	29.8	7.22
7.4	15	10.5	30	8.11		14.8	10.5	29.8	7.12
7.5	15	10.8	30	8.13		14.8	10.5	29.9	7.16
PROMEDIO	15.00	10.65	30.00	8.138	2.2%	14.8	10.55	29.80	7.132
12.6	14.9	10.6	30	7.85	0.15	14.7	10.3	29.7	6.95
12.2	14.9	10.4	30	7.8		14.8	10.3	29.8	6.9
12.3	14.9	10.6	30	8.02		14.7	10.3	29.9	7.09
12.4	14.9	10.4	30	7.68		14.8	10.4	29.9	6.78
12.5	14.9	10.5	29.9	7.78		14.7	10.2	29.7	6.89
PROMEDIO	14.90	10.50	29.98	7.83	2.0%	14.74	10.30	29.80	6.96

PROBETA	SUELO 4								
	MEDIDAS INICIALES (CMS)			PESO (KG)	% AGUA (LT)	MEDIDAS FINALES (CMS)			PESO (KG)
	A	H	L			A	H	L	
T.1	15	10.5	30	6.83	0.18	15	10.5	29.6	5.98
T.2	15	10.6	30	7.03		14.5	10.4	29.4	6.1
T.3	15	10.5	30	6.8		14.6	10.2	29.3	5.83
T.4	15	10.6	30	6.84		14.6	10.5	29.5	5.92
T.5	15	10.5	30	6.82		14.6	10.2	29.3	5.86
PROMEDIO	15	10.54	30	6.86	2.6%	14.66	10.36	29.42	5.94
3.1	15	10.8	30	7.36	0.09	14.6	10.4	29.7	6.34
3.2	15	10.8	30	7.35		14.6	10.6	29.5	6.37
3.3	15	10.6	30	7.05		14.7	10.5	29.7	6.13
3.4	15	10.8	30	7.1		14.7	10.5	29.7	6.15
3.5	15	10.7	30	7.11		14.7	10.5	29.8	6.15
PROMEDIO	15	10.74	30	7.19	1.3%	14.66	10.50	29.68	6.23
7.1	15	10.5	30	7.68	0.12	14.7	10.2	29.8	6.33
7.2	15	10.4	30	7.8		14.7	10.3	29.8	6.43
7.3	15	10.4	30	7.42		14.8	10.2	29.7	6.11
7.4	15	10.5	30	7.5		14.8	10.2	29.5	6.16
7.5	15	10.5	30	7.24		14.6	10.2	29.5	5.97
PROMEDIO	15	10.45	30	7.53	1.6%	14.725	10.23	29.625	6.20
12.6	14.9	10.5	30	7.79	0.17	14.6	10.3	29.4	6.64
12.2	15	10.5	30	7.82		14.7	10.2	29.8	6.66
12.3	15	10.6	30	7.82		14.6	10.3	29.4	6.64
12.4	15	10.5	30	7.82		14.8	10.4	29.6	6.71
12.5	14.8	10.4	30	7.54		14.6	10.3	29.4	6.64
PROMEDIO	14.94	10.50	30	7.758	2.2%	14.66	10.30	29.52	6.66

Tabla 3.4 Medidas y peso de los bloques terminados de las 4 series.

Las medidas del bloque en estado húmedo y seco variaron según el tipo de suelo y la cal agregada. Los suelos 1 y 4 presentaron una mayor contracción que los suelos 2 y 3, esto es ocasionado por la distribución granulométrica de los suelos, ya que los suelos 1 y 4 presentan una mayor cantidad de finos, mientras que los suelos 3 y 4 están predominados por arenas.

El suelo 1 y el 4, correspondientes a los limos y arcillas de baja compresibilidad y que no fueron estabilizados con cal presentaron grumos aun cuando no se había agregado agua en exceso, provocando un mezclado deficiente como se observa en la figura 3.4.7. La consistencia de la mezcla mejoro cuando se le adicio cal al suelo.



Figura 3.25 Deficiencias de mezclado debido a ausencia de cal en el suelo

Algunos de los bloques con menores cantidades de finos como fueron los de la serie 2 y 3, que estaban clasificados como arena-arcillosa, se rompieron al manipularlos para el pesado final después de los 28 días. Esto es consecuencia de la falta de capacidad de cohesión del suelo en cuestión.



Figura 3.26 Bloques no utilizados de serie 2 y 3

4. Pruebas de compresión simple

Una vez terminado el tiempo de curado se realizaron las pruebas de compresión simple a los bloques. El procedimiento se realizó de acuerdo a lo especificado en las NMX-C-036-ONNCE 2004. Aunque el BTC no está especificado exactamente dentro de esta norma se considerará como un ladrillo o tabique para la realización de estas pruebas.

Antes de colocar los bloques dentro de la prensa se pesaban y se medían para determinar el área efectiva de carga. Estos datos se introducían en la prensa. Para determinar el área efectiva del bloque, se restó el área de machihembrado ubicada al centro de la pieza.

Para el cabeceo de los bloques se trató de utilizar mortero de azufre pero este se desprendía de los bloques de la serie 2 y 3, por lo que se utilizó neopreno en todos los bloques. La prueba se daba por terminada cuando la prensa se detenía automáticamente dejando de aplicar carga. El bloque se retiraba de la prensa, se limpiaban los escombros para que no afectaran a la pieza siguiente.

La serie 1 correspondiente al limo de baja compresibilidad presentó fisuras en el perímetro del bloque, lo que es congruente con el diseño de la pieza, ya que la carga se distribuye fuera del “machihembrado” ubicado al centro de la pieza. La parte central del bloque se mantiene casi intacta ya que no recibe carga, los esfuerzos localizan hacia las caras laterales. La serie 2 y 3 fallaron de la misma forma que la serie 1. La falla de estas tres series se presentaba de manera constante.



Figura 4.1 Fallas presentadas en las series 1,2 y 3

Para la serie 4, los bloques fallaron de manera distinta a las otras 3 series. Los bloques presentaron una mayor resistencia como se puede observar en la fig. 4.2, lo que provoco que las fisuras aparecieran, en la parte longitudinal, más tendidas hacia el centro, mientras que en las caras superiores e inferiores, solo algunas piezas se manifestaron de la misma manera que las 3 series anteriores.



Figura 4.2 Fallas presentadas en la serie 4

Los datos obtenidos de la fabricación de los bloques de cada tipo de suelo se muestran en las tablas siguientes:

PROBETA	SUELO 1			SUELO 2			SUELO 3			SUELO 4		
	Q (kg)	A (cm ²)	R (kg/cm ²)	Q (kg)	A (cm ²)	R (kg/cm ²)	Q (kg)	A (cm ²)	R (kg/cm ²)	Q (kg)	A (cm ²)	R (kg/cm ²)
T.1	1127	327.78	3.44	2140	329.12	6.50	2788	344.02	8.10	4282	329.2	13.01
T.2	1552	332.16	4.67	2465	327.78	7.52	2886	347	8.32	4726	326.3	14.48
T.3	703	332.16	2.12	3156	347	9.10	2252	335.12	6.72	4126	327.78	12.59
T.4	883	329.24	2.68	3134	347	9.03	*			3690	330.7	11.16
T.5	536	323.36	1.66	2938	344.02	8.54	2814	338.08	8.32	4258	327.78	12.99
PROMEDIO	960.2	328.94	2.91	2766.6	338.984	8.14	2685	341.055	7.87	4216.4	328.352	12.85
3.1	5360	336.6	15.92	3297	350	9.42	2035	345.51	5.89	3840	333.62	11.51
3.2	6128	336.6	18.21	2612	350	7.46	2521	338.06	7.46	4722	330.7	14.28
3.3	7364	333.62	22.07	2275	347	6.56	2492	345.51	7.21	3805	335.12	11.35
3.4	5515	330.7	16.68	-	-	-	*			4215	336.59	12.52
3.5	4279	329.24	13.00	2959	350	8.45	*			4009	338.06	11.86
PROMEDIO	5729.2	333.352	17.18	2785.75	349.25	7.97	2349.3333	343.02667	6.85	4118.2	334.818	12.30
7.1	6610	342.53	19.30	4480	350	12.80	4985	342.52	14.55	7288	338.06	21.56
7.2	5645	341.04	16.55	2572	347	7.41	4891	339.56	14.40	7226	338.06	21.37
7.3	5076	341.04	14.88	2448	333.55	7.34	5506	341.04	16.14	5801	339.56	17.08
7.4	6290	338.08	18.61	3640	303.65	11.99	5063	341.04	14.85	5337	336.6	15.86
7.5	7795	338.08	23.06	3229	348.5	9.27	4469	342.52	13.05	4633	330.7	14.01
PROMEDIO	6283.2	340.154	18.48	3273.8	336.54	9.76	4982.8	341.336	14.60	6057	336.596	17.98
12.6	9832	345.51	28.46	7651	344	22.24	5732	336.59	17.03	12627	329.24	38.35
12.2	7215	342.52	21.06	6122	342.52	17.87	6665	338.06	19.72	13675	329.24	41.54
12.3	7396	344	21.50	9143	342.52	26.69	8156	339.53	24.02	12928	329.24	39.27
12.4	7379	347	21.27	8403	345.51	24.32	6358	342.52	18.56	13213	338.08	39.08
12.5	6403	347	18.45	5580	344.02	16.22	6031	336.59	17.92	12928	329.24	39.27
PROMEDIO	7645	345.206	22.15	7379.8	343.714	21.47	6588.4	338.658	19.45	13074.2	331.008	39.50

Q = Carga aplicada
 A = Área efectiva neta
 R = resistencia a la compresión
 * = Bloques no utilizados

Tabla 4.1 Datos obtenidos de los ensayos de los cuatro suelos

PROBETA	SUELO 1			SUELO 2			SUELO 3			SUELO 4		
	Q (kg)	A (cm ²)	R (kg/cm ²)	Q (kg)	A (cm ²)	R (kg/cm ²)	Q (kg)	A (cm ²)	R (kg/cm ²)	Q (kg)	A (cm ²)	R (kg/cm ²)
TESTIGO	960.2	328.94	2.91	2766.6	338.984	8.14	2685	341.055	7.87	4216.4	328.352	12.85
3%	5729.2	333.352	17.18	2785.75	349.25	7.97	2349.3333	343.02667	6.85	4118.2	334.818	12.30
7%	6283.2	340.154	18.48	3273.8	336.54	9.76	4982.8	341.336	14.60	6057	336.596	17.98
12%	7645	345.206	22.15	7379.8	343.714	21.47	6588.4	338.658	19.45	13074.2	331.008	39.50

Tabla 4.2 Valores medios de los ensayos



5. Análisis de resultados experimentales

Para el análisis de los datos generados se realizaron gráficas distinguiendo las cuatro series con colores diferentes y distinguiendo cada bloque de la misma serie con un tono diferente.

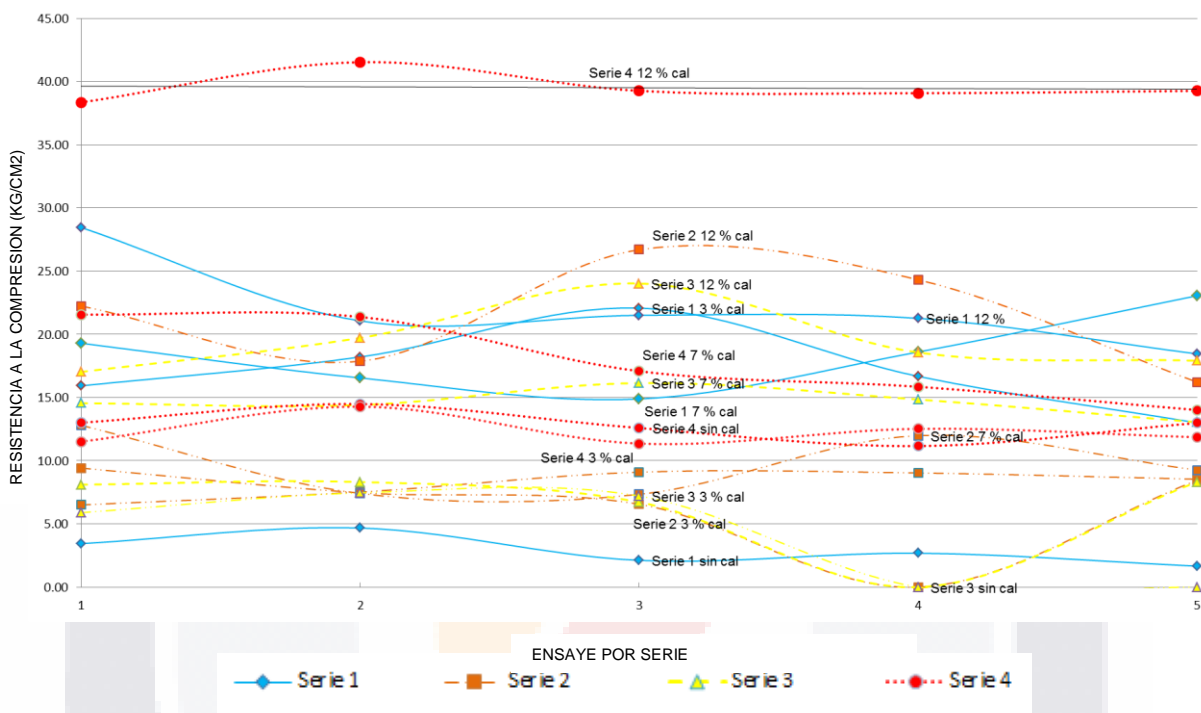


Figura 5.1 Gráfica de la resistencia a la compresión de las diferentes series

En la figura 5.1 se puede observar que la serie 4 con 12 % de cal alcanzo la mayor resistencia de todos los bloques, alcanzando el bloque no.2 una resistencia de 41.54 kg/cm². La serie que presentó las resistencias menores fue la serie 1, correspondiente al limo de baja compresibilidad.

En las figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 se pueden observar las resistencias de cada serie, los valores están graficados de menor a mayor dosificación de cal.

Para la serie 1 presentó un incremento de la resistencia de las probetas sin adición de cal a las que se les añadió un 3 % de cal, pero no se observó un incremento significativo de las probetas con 3% a las que tenían 7%, incluso solo se registró un incremento del 20% de las probetas con 12 % en comparación con las que tenían 7%. Pero la resistencia de las probetas sin cal comparadas con las que contenían el 12 % de cal aumento 660 %. Cada barra representa un bloque y se ordenan de menor a mayor dosificación de cal de izquierda a derecha respectivamente.

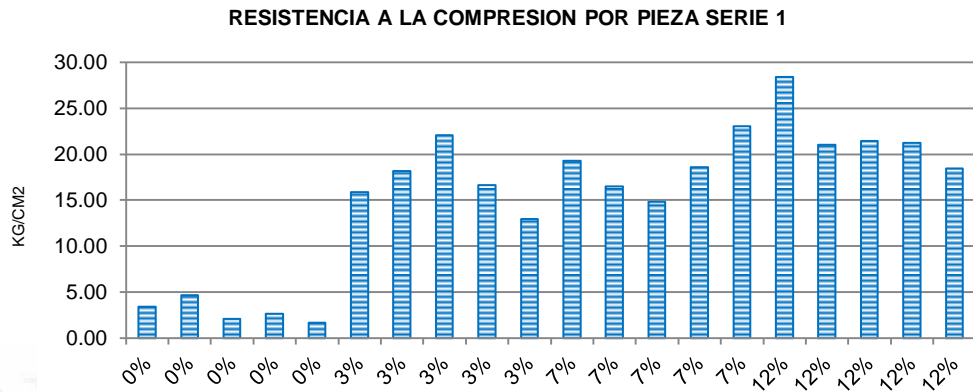


Figura 5.2 Gráfica de la resistencia a la compresión serie 1

Contrario a lo que se pudiera pensar, las probetas a las que no se les adiciono cal para la serie 2 presentaron una resistencia 2% mayor, en promedio que las que fueron adicionadas con 3 % de cal. Las piezas con 7 % de cal aumentaron 20% con respecto a las piezas sin cal. Finalmente la resistencia de las piezas con 12 % de cal aumento 164 % con respecto a las piezas sin cal y 120 % con respecto a las piezas con 7% de cal.

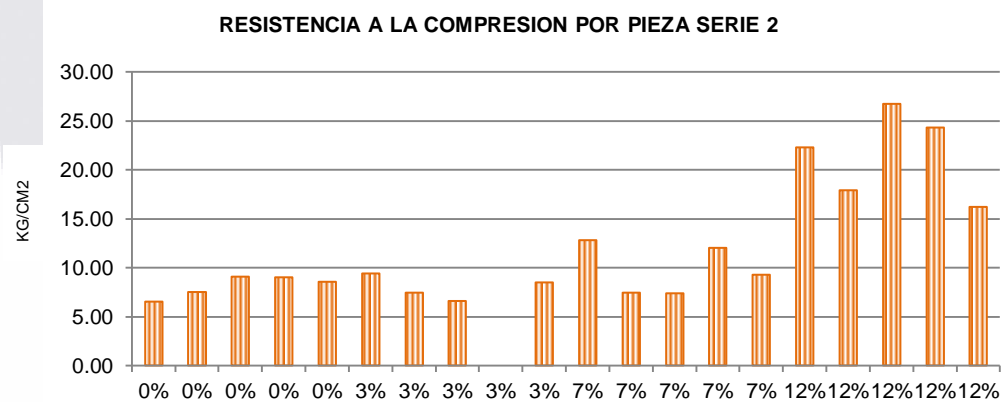


Figura 5.3 Gráfica de la resistencia a la compresión serie 2

La serie 3 se comportó de manera similar a la serie 2 ya que la resistencia de los bloques sin cal resulto mayor que la serie adicionada con 3 %. Los bloques con 7 % de cal aumentaron 113 % con respecto a los que contenían 3 % y la resistencia de los bloques con 12 % de cal aumento 33 % respecto a los que contenían 7 % y 147 % respecto a los que no contenían cal.

RESISTENCIA A LA COMPRESION POR PIEZA SERIE 3

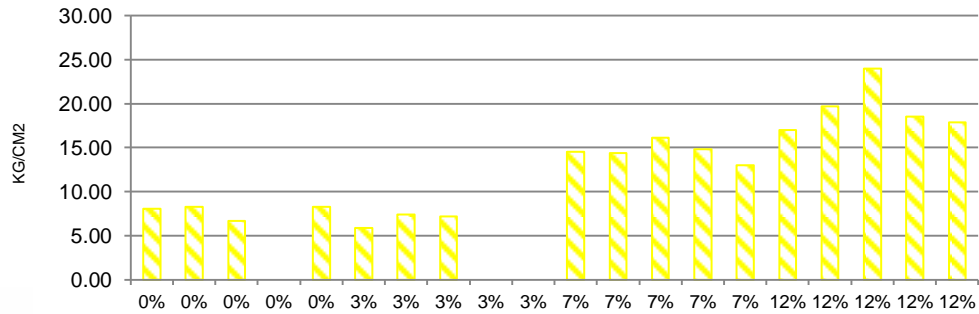


Figura 5.4 Gráfica de la resistencia a la compresión serie 3

La serie 4 también presento mayores resistencias en los bloques sin cal que los que los que contenían 3 %. Los bloques con 7 % de cal aumentaron 46 % con respecto a los que contenían 3 %. Los bloques con 12 % presentaron una resistencia 120 % mayor que los de 7 % de cal y 208 % respecto a los bloques sin cal. Los bloques de esta serie son los que presentaron resistencias más altas en las series sin cal y con 12 %.

RESISTENCIA A LA COMPRESION POR PIEZA SERIE 4

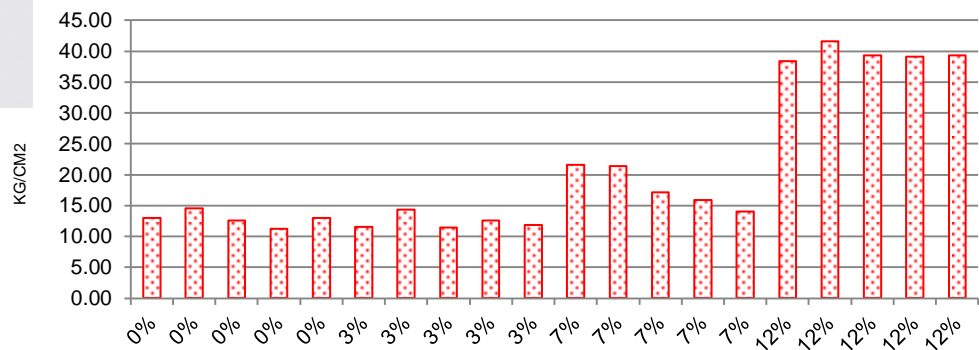


Figura 5.5 Gráfica de la resistencia a la compresión serie 4

En la figura 5.6 se muestran las resistencias promedio por cada dosificación y serie. Se puede observar que en todas las series las resistencias mayores se registran con la adición del 12 % de cal. El suelo arcilloso presenta resistencias más equilibradas entre las piezas sin cal, con 3 % y con 7 %, pero se dispara la resistencia cuando se le agrega el 12 %.

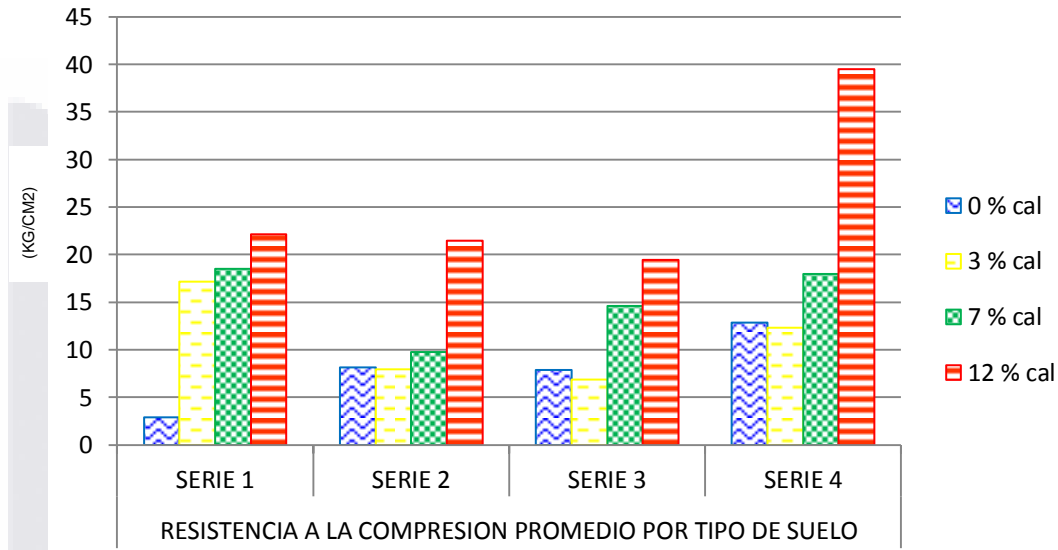


Figura 5.6 Gráfica de resistencia a la compresión promedio

Los valores promedio obtenido se deben de sustituir en la fórmula que aparece en el capítulo 2 de las NTCM-2044, resistencia a la compresión de piezas de mampostería.

$$f_p^* = \frac{\overline{f_p}}{1 + 2.5 c_p}$$

Dónde:

f_p^* = Media de la resistencia a compresión de las piezas, referida al área bruta

C_p = Coeficiente de la variación de la resistencia a compresión de las piezas

Las NTCM (2004) establecen que el C_p no se tomará menor que .20 piezas provenientes de plantas mecanizadas que evidencien un sistema de control de calidad como el

requerido en la NMX-C-404-ONNCCE, no que .30 para piezas de fabricación mecanizada, pero que no cuenten con un sistema de control de calidad, ni que .35 para piezas de producción artesanal. Para este trabajo se considerará .30 ya que la producción no se realizó de forma mecanizada.

f^*p (kg/cm ²)	SUELO 1	SUELO 2	SUELO 3	SUELO 4
<i>sin cal</i>	1.66	4.65	4.49	7.34
3%	9.81	4.56	3.92	7.03
7%	10.56	5.58	8.34	10.27
12%	12.66	12.27	11.11	22.57

Tabla 5.1 Resistencias promedio afectadas por el coeficiente de variación de la resistencia (Cp)

Como se presentó en el proceso de fabricación de los bloques (3.5.2), los bloques se pesaron al inicio y una vez cumplidos los 28 días, en la figuras 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 se pueden revisar la resistencias de los bloques de cada una de las series y su densidad final. Cada barra representa un bloque y se ordenan de menor a mayor dosificación de cal de izquierda a derecha respectivamente.

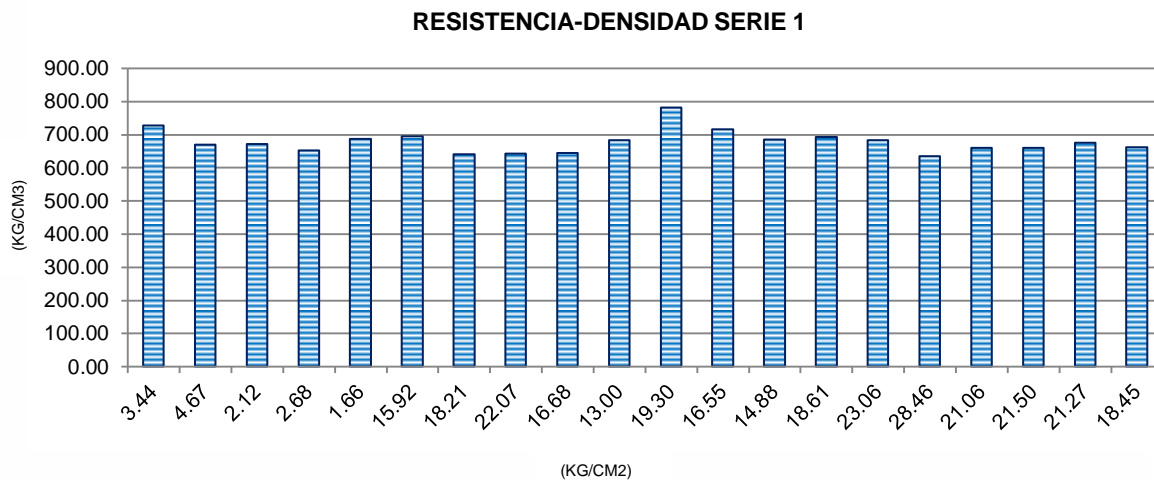


Figura 5.7 Gráfica resistencia-densidad serie 1

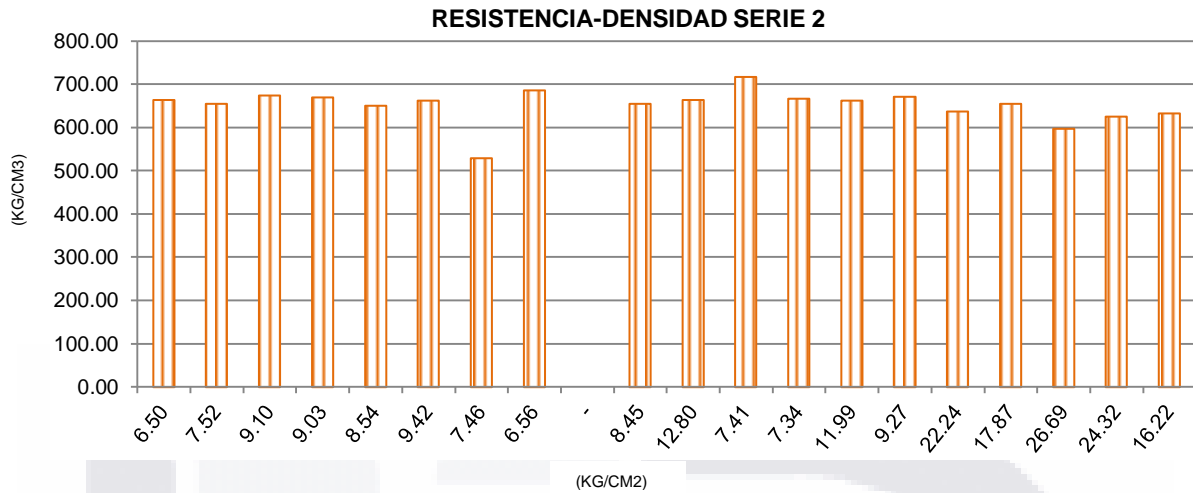


Figura 5.8 Gráfica resistencia-densidad serie 2

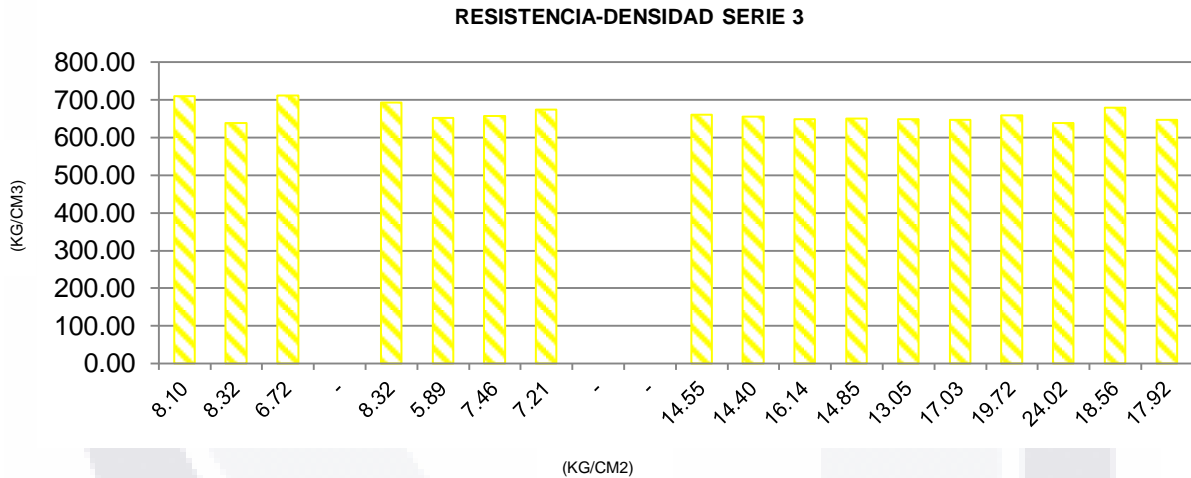


Figura 5.9 Gráfica resistencia-densidad serie 3

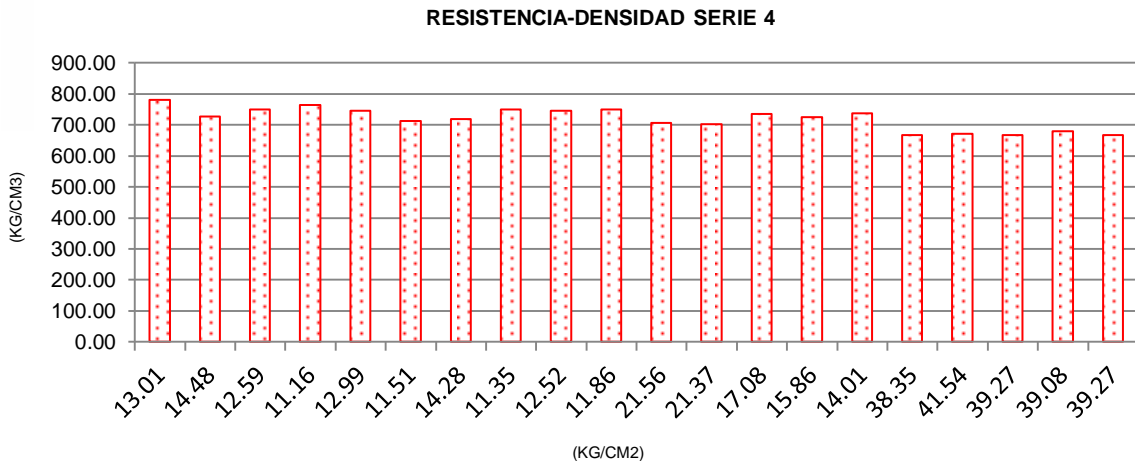


Figura 5.10 Gráfica resistencia-densidad serie 4

DENSIDADES PROMEDIO								
	SERIE 1		SERIE 2		SERIE 3		SERIE 4	
	RESISTENCIA (kg/cm ²)	DENSIDAD (kg/m ³)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	DENSIDAD (kg/m ³)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	DENSIDAD (kg/m ³)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	DENSIDAD (kg/m ³)
0%	2.91	681.06	8.14	662.70	7.87	688.12	12.85	752.67
3%	17.18	660.76	7.97	632.72	6.85	660.30	12.30	733.83
7%	18.48	711.71	9.76	676.54	14.60	652.62	17.98	720.04
12%	22.15	658.19	21.47	629.47	19.45	653.81	39.50	669.48

Tabla 5.2 Densidades promedio por cada serie

Suelo	1	2	3	4
Coef. Correlación	-0.17	-0.37	-0.47	-0.90

Tabla 5.3 Coeficiente de correlación densidad-resistencia

Para todas las series, la premisa que a mayor densidad se consigue una mayor resistencia no es válida que los coeficientes de correlación arrojan un valor negativo. Además se puede observar en la figura 3.5.9, los bloques con menor densidad promedio son los de mayor resistencia. Solo en la serie 3 la densidad de los bloques con 7 % y 12 % es prácticamente la misma. Aun así la variación de las densidades de los bloques sin cal a los que tenían el 12 % de las series 1,2 y 3 es mínima, 3.36 %, 5.01 % y 4.99 respectivamente. La serie 4 presentó una variación del 11.05 %, resultado de la existencia de arcillas en el suelo.

Analizando las piezas cualitativamente se puede mencionar que una vez fabricadas y curadas las piezas se revisó en cuanto a apariencia y resistencia a la manipulación. Los bloques de la serie 1 mantuvieron su forma adecuadamente pero se podía percibir la erosión del bloque producto de la pérdida de agua y de la falta de cohesión entre las partículas sobre todo en los bloques con 3 % y sin cal.

Los bloques de la serie 2 presentaron muy pocos desmoronamientos y bloque mantuvo su forma de manera adecuada. Solo un bloque de la serie con 3 % de cal se rompió antes de ser ensayado.

Los bloques de la serie 3 se realizaron con el suelo con la menor cantidad de finos y presentaron una textura porosa. Tres bloques se rompieron al ser manipulados antes del ensayo producto de la poca cohesión entre sus partículas.

La serie 4 fue la más difícil para elaborar, ya que por su alta plasticidad resultaba complicado hacer un desmoldado eficiente, sobre todo en el área del machihembrado del molde, ya que se quedaba el suelo pegado en la máquina. Esta gran cohesión hacía que

una vez desmoldado el bloque, las caras lateral tuvieron una apariencia brillante y muy cerrada.



Figura 5.11 Bloques de las 4 series

Conclusiones

Para el planteamiento de las conclusiones primero se hacen las pertinentes al estado del conocimiento y en seguida se hacen las correspondientes a la campaña experimental. Por último se harán recomendaciones para la generación de futuras líneas de investigación.

Conclusiones del estado del conocimiento

En la actualidad existe mucha literatura en el mundo sobre BTC, y hay organizaciones, institutos y universidades que llevan la delantera ya que han investigado sobre a construcción con tierra desde hace muchos años como lo son el Craterre en Francia, el Instituto tierra y Cal en México, el Auroville Earth Institute en India o el Laboratorio de Investigación de Construcciones Experimentales de la Universidad de Kassel, entre otras.

En México y especialmente en Aguascalientes no es fácil conseguir este tipo de bloques en el mercado lo que dificulta su estudio y su difusión.

Sobre los trabajos encontrados, la mayoría aborda el ensaye a la compresión simple del bloque y la caracterización del suelo. Muy pocos trabajos se centran en el estudio del esfuerzo cortante en muros. Sobre los procesos de fabricación y de ensayo, se encuentran algunos con las muestras realizadas con moldes fabricados exclusivamente para el experimento y compactados con la misma prensa que se ensayan y otros trabajos utilizan prensas manuales tipo CINVA RAM. Ninguno de los trabajos encontrados utilizó una prensa hidráulica diseñada exclusivamente para fabricar BTC.

En la mayoría de los trabajos encontrados se encontraron resistencias a la compresión menores a 60 kg/cm², lo que sería menor a lo solicitado por las NTCM-2004 para el caso de nuestro país.

La mayoría de los trabajos hace recomendaciones en cuanto a la caracterización del suelo (granulometrías y límites de consistencia) pero estas recomendaciones podrían no ser muy útiles en campo cuando el BTC está destinado a la autoconstrucción. Cuando se sigue un proceso industrializado estas variables pueden ser controladas para cuidar la resistencia.

Conclusiones sobre la influencia de la adición de cal

La cal es comúnmente utilizada para estabilizar los suelos, es decir, la cal actúa químicamente con el suelo, en especial con las arcillas para mejorar los componentes del mismo. Aunque se pudo comprobar que se incrementaba la resistencia de los bloques con la adición de cal, los bloques que mejor trabajaron con la cal fueron los clasificados por el S.U.C.S como arcillas, es decir la serie 4. Esta resistencia se alcanzó dosificando con el 12 % de cal. A excepción de la serie 4 con 12 % de cal, las mayores resistencias se obtuvieron con los suelos con mayores cantidades de finos, esto para la serie 1 y serie 4, que tenían una cantidad de finos arriba del 80 %.

Las mayores resistencias en todas las series se obtuvieron cuando se le agregó la mayor cantidad de cal, lo que contrasta con los resultados obtenidos de las pruebas para determinar el porcentaje óptimo de cal, por lo que se puede concluir que a mayor porcentaje de cal, mayor resistencia en los cuatro suelos probados.

Los suelos clasificados como arenas arcillosas o comúnmente llamados “tepetate” mostraron resistencias más bajas, en este tipo de suelos predominan las arenas por lo que se puede concluir que para la utilización de estos suelos para la fabricación de BTC en Aguascalientes es esencial mejorar la granulometría del suelo agregando finos, lo que puede generar un incremento al costo ya que no se puede utilizar el material tal y como se encuentra en el banco. Para estos suelos se debe de buscar un cementante y no un estabilizador debido a sus características granulométricas y mineralógicas.

Los suelos que se podrían considerar mejores para la fabricación de los bloques, se ubican generalmente en los lechos de los ríos, lo que afecta a la sustentabilidad del sistema, ya que de utilizarse ese tipo de suelos se continuaría con la erosión de zonas ricas en flora y fauna, como hasta ahora lo han hecho las ladrilleras.

Conclusiones sobre Influencia de la densidad del bloque

De las cuatro pruebas realizadas, se concluyó que en los bloques fabricados con la prensa manual utilizada en este trabajo la densidad no es un factor determinante, ya que los bloques adicionados con 12 % de cal, presentaron las menores densidades de cada serie pero las mayores resistencias. La serie 4 presentó las mayores densidades por dosificación de los cuatro tipos de suelos, lo que sugiere un mejor acomodo de las partículas al interactuar con las arcillas del suelo.

El problema de las máquinas manuales como la utilizada, es la variación en la presión de compactación, ya que esta variará según la energía de compactación aplicada por el

operador, que es muy difícil que pueda ser mantenida de manera uniforme por varias horas. Esto afecta directamente la densidad y la resistencia del bloque.

Conclusiones sobre el cumplimiento con la normatividad

Ninguno de los bloques cumplió con la resistencia mínima establecida en la NTCM-2004, que son 60 kg/cm². Lo que hace imperativo que para su utilización que se haga el diseño estructural considerando esta condición de baja resistencia a la compresión simple. Cabe mencionar que se compara con la resistencia de un tabique rojo recocido, ya que no está estipulado este material en la normativa. Las resistencias obtenidas se compararon también con las normas españolas UNE 41410, que son normas específicas para este tipo de material. La resistencia mínima para esta norma son 1.3 n/mm² (13.256 kg /cm²), por lo que no todos los bloques estudiados pudieron ser clasificados ya que presentaron resistencias menores. Los que presentaron resistencias mayores a este valor se clasificaron como BTC 1 y BTC 3.

Futuras Líneas de investigación

Sobre los aspectos analizados en este trabajo, así como de temas relacionados se hacen algunas recomendaciones para futuras investigaciones:

- El estudio de los bloques al esfuerzo cortante producido al ser utilizados como un sistema de mampostería confinado podría generar datos importantes para ser considerados en los análisis estructurales de edificaciones construidas con este sistema. También el diseño de los morteros para el junteo de los BTC puede ser de utilidad para la aplicación con éxito de este sistema ya que se pone mucha importancia en la resistencia de la pieza, pero la resistencia y adherencia del mortero es de igual importancia.
- El uso del agua para el mezclado se realizó de acuerdo a la trabajabilidad de la mezcla, sería provechoso conocer cómo afecta a la resistencia la variación del porcentaje de humedad en la mezcla.
- La comparación de piezas fabricadas con prensas manuales y prensas hidráulicas ofrecería información valiosa de cómo afecta a la resistencia compactar los bloques a diferentes presiones.

- En cuanto a los estabilizadores se podrían probar distintos agregados para conocer cual ofrece la mayor resistencia de los bloques con el suelo local. Ya que al ser la arena el árido predominante es probable que sea más necesario un cementante que un estabilizador para este tipo de suelo.
- Finalmente la elaboración de una norma mexicana específica para la construcción con tierra unificaría criterios para la utilización de este material y facilitaría la validación, difusión y utilización de este material.



Glosario

-Arena: Árido que pasa la malla no.4 y se retiene en la malla no.200 en la prueba granulométrica.

-Caolinitas: Mineral de arcilla formada por una lámina sílica y otra alumínica, que se superponen indefinidamente. Son relativamente estables en presencia de agua.

-Finos: Árido que pasa la malla no.200 en la prueba granulométrica.

-Granulometría: Es la medición de los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica. El método de determinación granulométrico más sencillo es obtener partículas por una serie de mallas de distintos anchos de entramado (a modo de coladores), que actúen como filtros de granos.

-Grava: Árido que se retiene en la malla no.4 en la prueba granulométrica.

-Hidrofugantes: Son compuestos que impiden el paso de las gotas de agua pero si permiten el paso del vapor de agua

-Illitas: Estructuradas análogamente a una Montmorilonita pero su expansividad es menor.

-Montmorilonitas: Mineral de arcilla formada por una lámina alumínica y dos sílicas, que se superponen indefinidamente. Tienen tendencia a la inestabilidad en presencia del agua.

-PH: Es una medida de la acidez o de la alcalinidad de una sustancia. La escala del pH mide qué tan ácida o básica es una sustancia. Varía de 0 a 14. Un pH de 7 es neutro. Si el pH es inferior a 7 es ácido y si es superior a 7 es básico. Cada valor entero de pH por debajo de 7 es diez veces más ácido que el valor siguiente más alto.

-Puzolanas: son materiales con alto contenido en sílice vítrea o amorfa. En polvo, las puzolanas reaccionan en medio acuoso con hidróxido cálcico a temperatura ambiente dando lugar a fases hidratadas análogas a las formadas durante el fraguado del cemento:

Bibliografía

- AENOR. (2008). UNE 41410 Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo: autor
- ASTM (2006). Standard test method for using ph to estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization. Recuperado el 15 de enero de 2013. De autor Sitio web: <http://www.astm.org/Standards/D6276.htm>
- Barbeta, Gabi (2002) Mejora de la tierra estabilizada en el desarrollo de una arquitectura sostenible hacia el siglo XXI. Escuela superior de arquitectura de Barcelona. Barcelona, España
- Cal-Earth (s.f). What is superadobe? Recuperado el 15 de enero de 2013. De autor Sitio web: <http://calearth.org/building-designs/what-is-superadobe.html>
- Cid Falceto, Jaime; Cañas Guerrero, Ignacio. (s.f). Construcción con tierra: materias primas. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela superior de ingenieros agrónomos. Madrid, España.
- Carcedo, F. M. (2012). Resistencia a compresión de bloques de tierra comprimida estabilizada con materiales de sílice de diferente tamaño de partícula. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Echale a tu casa. (s.f). Adoblock. Recuperado el 13 de Noviembre de 2012, de autor Sitio web: <http://www.echale.com.mx/adoblock/>
- Cicero Gonzalez,L. (2008) Implicaciones del uso del bloque de tierra comprimida en el diseño de vivienda de interes social en Monterrey, Nuevo Leon. Instituto tecnologico y de estudios superiores de Monterrey. Monterrey, Mexico
- Galindez Fernando (2007) Bloques de tierra comprimida (btc) sin adición de cemento. Universidad Católica de Salta. Salta, Argentina.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- Guerrero Baca, Luis fernando; Roux Gutierrez, Ruben Salvador; Soria López, Fernando Javier. (enero-junio 2010). Ventajas constructivas del uso de tierra comprimida y estabilizada con cal en México. Palapa, V. núm 10, 45-57. Enero 2012, De Redalyc Base de datos
 - Juarez Badillo, Eulalio, Rico Rodriguez, Alfonso. (1963). Mecánica de suelos Tomo I (3^{ra}). México, D.F: Limusa.
 - Mchenry, Paul. (1996). Adobe: cómo construir fácilmente. México: Trillas. Traducción de: Adobe and ramed earth buildings.
 - Minke, Gernot. (1994). Manual de construcción en tierra (2^{da}). Kassel, Alemania: Fin de siglo. Traducido de: Lehmbau-Handguch
 - Gobierno del Distrito Federal (2004) Normas técnicas complementarias de mampostería.
 - ONNCCE. (2012). NMX-C-404 Mampostería. Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural. Especificaciones y método de ensayo: autor
 - ONNCCE. (2004). NMX-C-036 Bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines. Resistencia a la compresión. Método de prueba: autor
 - SEDESOL, Delegación estatal Chiapas (s.f) Asistencia Técnica en el manejo de maquinaria, asesoría y capacitación a autoconstructores: autor
 - SCT. (2003). Suelos y materiales para terracerías. Título 02. Clasificación de fragmentos de roca y suelos. En Métodos de muestreo y prueba de materiales. México, D.F: autor

- SCT. (2003). Suelos y materiales para terracerías. Título 06. Granulometría de materiales compactables para terracerías. En Métodos de muestreo y prueba de materiales. México, D.F: autor
- SCT. (2003). Suelos y materiales para terracerías. Título 07.Límites de consistencia. En Métodos de muestreo y prueba de materiales. México, D.F: autor



Anexos

Anexo A. Ficha Técnica prensa Tecnoadobe

Anexo B. Ficha técnica de la cal

Anexo C. Análisis granulométricos de los suelos

Anexo D. Determinación de los límites de consistencia



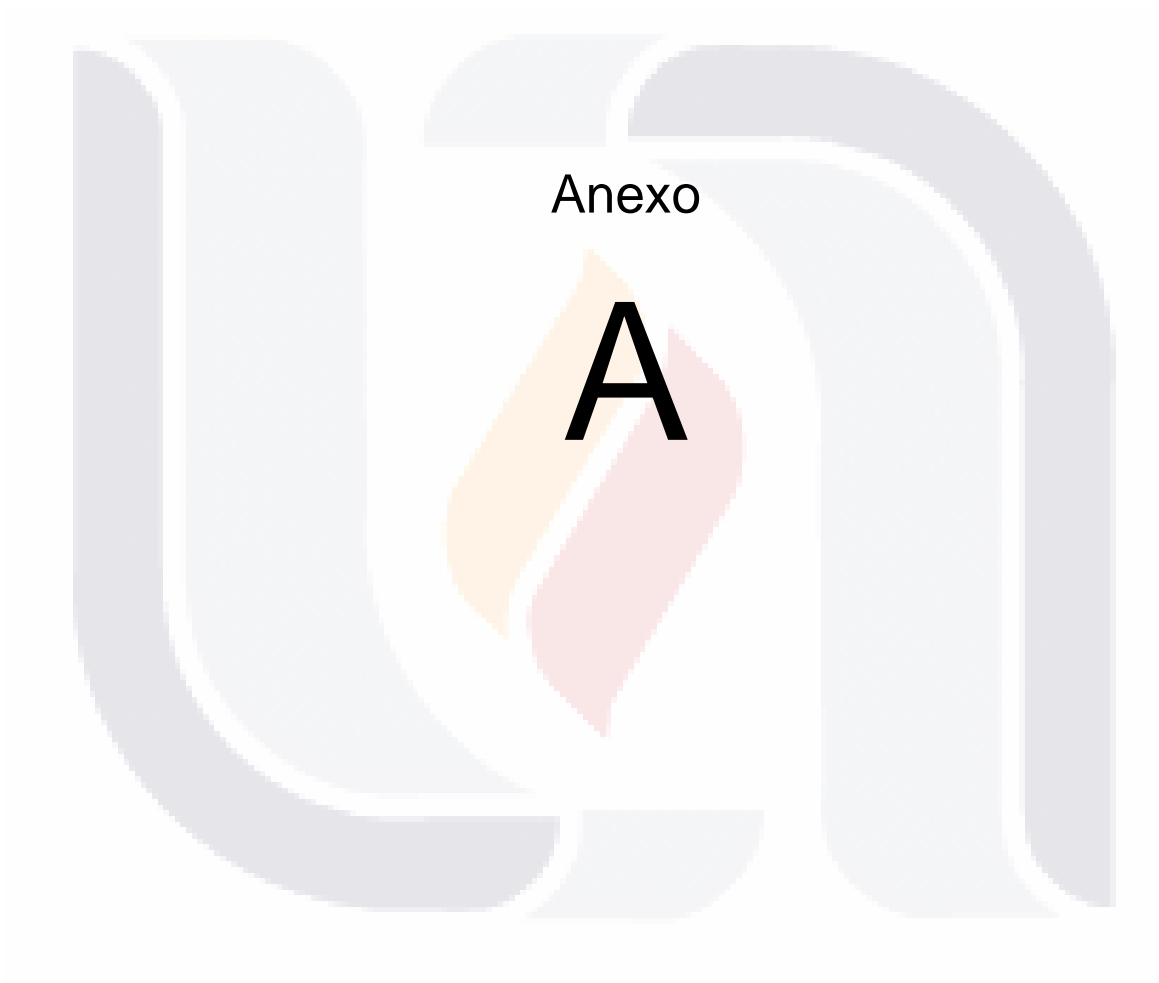
TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS




TESIS

TESIS

TESIS


TESIS

TESIS



TA-100


Maquinaria



Beneficios

- La TA-100 es una máquina manual móvil para fabricar Bloques Ecológicos de Tierra Compactada que, con la composición adecuada de la tierra, cumplen con las normas oficiales de resistencia estructural y de absorción de agua.
- Fácil de operar.
- No requiere energía eléctrica ni combustible.
- Fabricada en acero de alta calidad, corte en plasma y laser.
- Pintura electrostática horneada a dos tonos
- Actualizable a modelo hidráulico TA-100H mediante el Kit-100

Descripción	<ul style="list-style-type: none"> • Máquina manual para fabricar Block Ecológico de Adobe Estructural 	
Tipo de block que fabrica	<ul style="list-style-type: none"> • Tradicional • Sismo-resistente • Machi-hembrado* 	<p>Todos en macizo, hueco y dala</p>
Tamaño de block	<p>Largo: 30 cm Ancho: 15 cm Altura: Block: 10 cm Tabicón: 7.5 cm*</p> <p><small>* Requiere inserto adicional</small></p>	
Productividad	<p>Promedio: 550 / Jornada - Máxima: 700 / Jor.</p>	
Moldes incluidos	<ul style="list-style-type: none"> • Block tradicional y Sismoresistente macizo 	
Moldes opcionales	<ul style="list-style-type: none"> • Block machi-hembrado macizo, hueco y dala • Block tradicional hueco y dala • Inserto para tabicón 	
Empaque	<ul style="list-style-type: none"> • Se entrega empacado sobre una tarima de 1 x 1.2 mts, h= 1.1m • Peso bruto: 180 Kg 	
Dimensiones	<ul style="list-style-type: none"> • Espacio requerido para operar: • Piso: 3.50 m x 1.50 m • Altura libre: 2.50 m 	




Distribuidor Autorizado

ATA CALIDAD Y SOSTENIBILIDAD

T: (222) 197-01-88 / 601-23-23
info@tecnoadobe.com.mx

www.tecnoadobe.com.mx



TecnoAdobe

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS



TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS



CAL QUIMICA MEXICANA S.A. de C.V.
PLANTA AGUASCALIENTES



Héroe de Nacozari s/n , Fracc. Las Hadas
Aguascalientes, Ags. C.P. 20130
Tels. 01 (449) 914 2544



Nombre Comercial	Cal Hidratada
Marca	Calidra
Formula Química	Ca(OH) ₂
Nombre Químico	Hidróxido de Calcio

CARACTERISTICAS QUIMICAS

Ca(OH) ₂ Disponible	(%)		80 % Min.
Análisis Químico			
Al ₂ O ₃	(%)	≤	0.40
Fe ₂ O ₃	(%)	≤	0.15
MgO	(%)	≤	1.00
SO ₃	(%)	≤	1.00
SiO ₂	(%)	≤	1.20

CARACTERISTICAS FISICAS

Distribución Granulométrica

Malla # 100	(%)	10.0
Malla # 200	(%)	0.0
Densidad a Granel	(Kg/m ³)	600

Referencia: Norma ASTM C-25

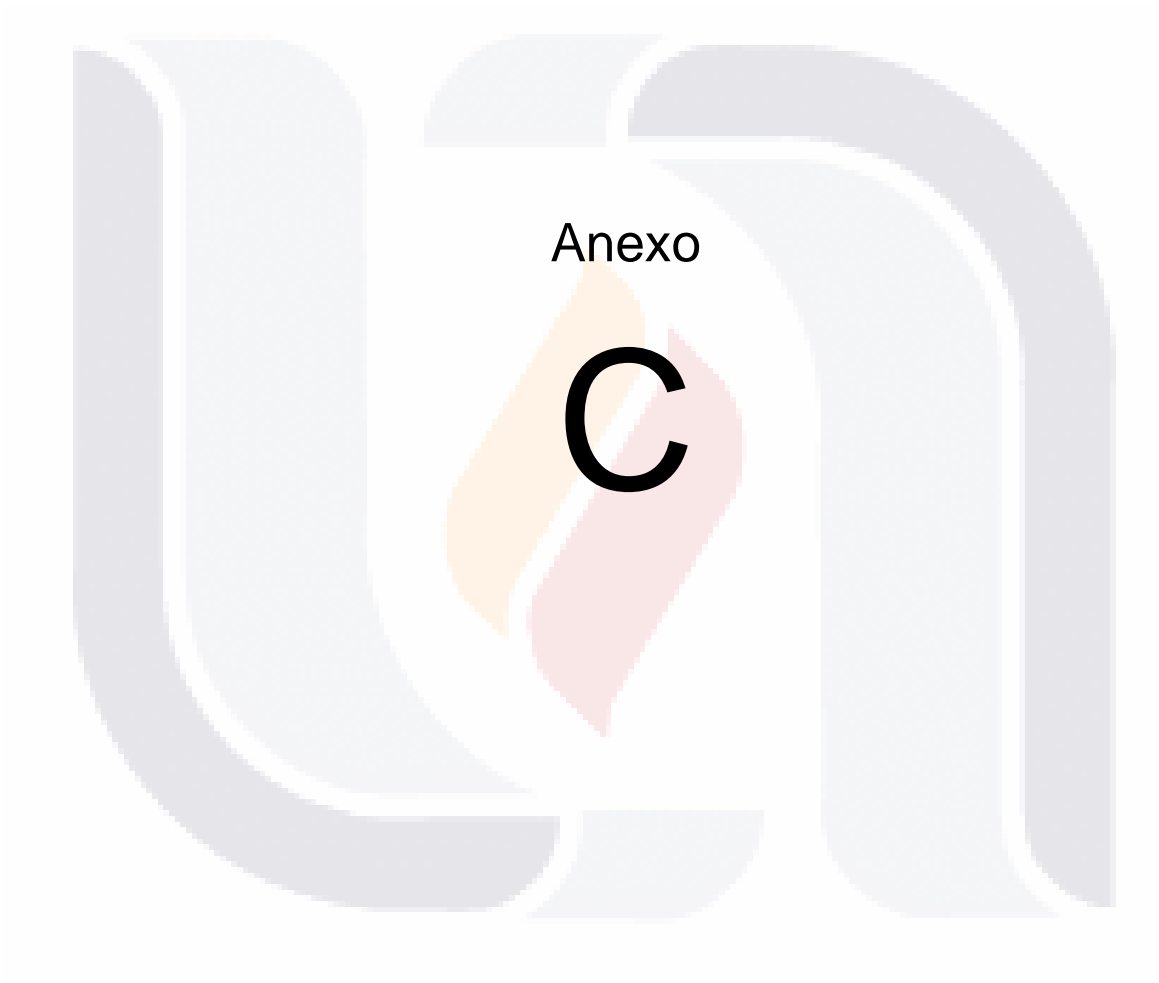
TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS



TESIS

TESIS

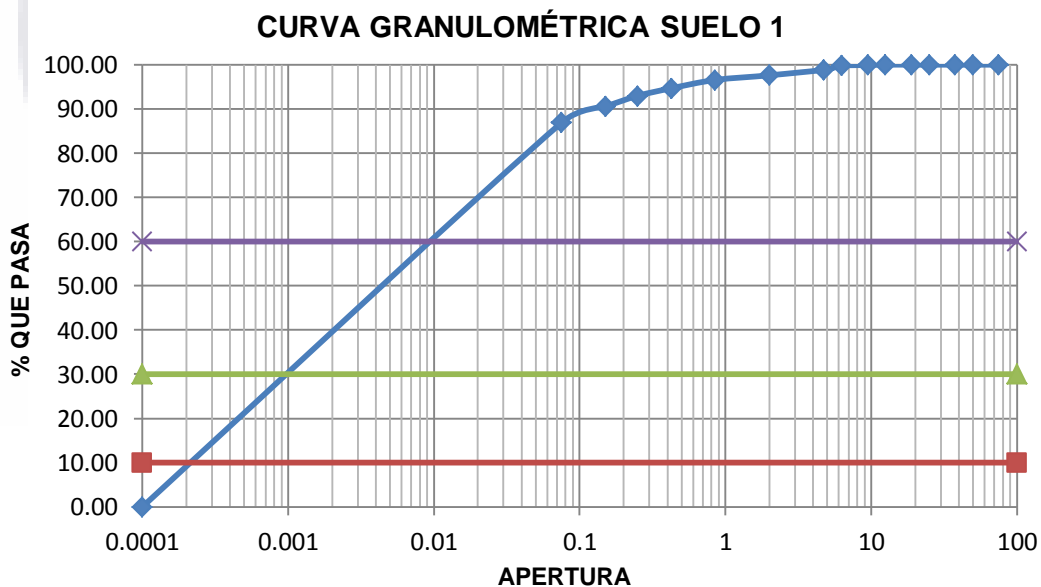
TESIS

TESIS

TESIS

Análisis granulométrico suelo 1

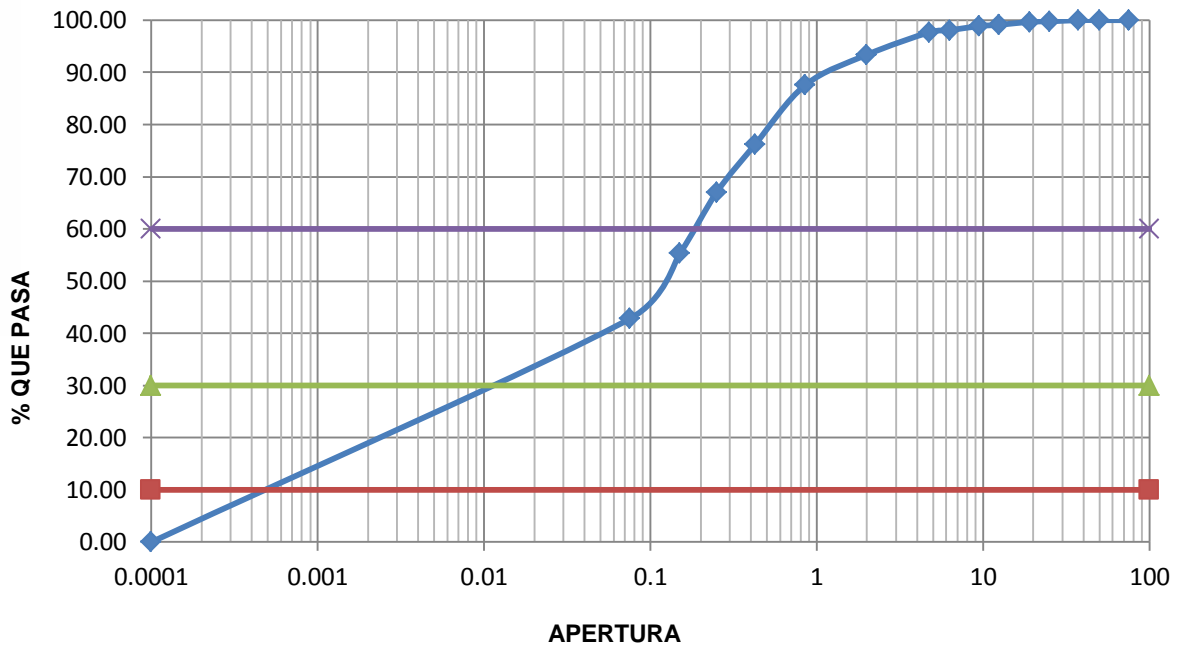
ANALISIS GRANULOMÉTRICO SUELO I					
MALLA		MASA RETENIDA (grs.)	RETENIDO PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULATIVO (%)	MATERIAL QUE PASA (%)
3"	75.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	37.50 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	25.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.50 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50 mm	5.00	0.08	0.08	99.92
1/4"	6.30 mm	10.00	0.15	0.23	99.77
No. 4	4.75 mm	60.00	0.92	1.15	98.85
PASA No. 4		6465.00	98.85	100.00	
SUMA		6540.00	100.00		
10	2.00 mm	3.80	1.25	2.40	97.60
20	0.850 mm	3.20	1.05	3.45	96.55
40	0.425 mm	5.70	1.88	5.33	94.67
60	0.250 mm	5.20	1.71	7.05	92.95
100	0.150 mm	7.40	2.44	9.48	90.52
200	0.075 mm	11.00	3.62	13.11	86.89
CHAROLA		263.70	86.89	100.00	0.00
SUMA		300.00	98.85		



Análisis granulométrico suelo 2

ANALISIS GRANULOMÉTRICO SUELO 2					
MALLA		MASA RETENIDA (grs.)	RETENIDO PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULATIVO (%)	MATERIAL QUE PASA (%)
3"	75.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.50 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.00 mm	20.00	0.23	0.23	99.77
3/4"	19.00 mm	8.00	0.09	0.32	99.68
1/2"	12.50 mm	50.00	0.57	0.89	99.11
3/8"	9.50 mm	20.00	0.23	1.12	98.88
1/4"	6.30 mm	70.00	0.80	1.92	98.08
No. 4	4.75 mm	35.00	0.40	2.32	97.68
PASA No. 4		8537.00	97.68	100.00	
SUMA		8740.00	100.00		
10	2.00 mm	13.20	4.30	6.62	93.38
20	0.850 mm	17.90	5.83	12.45	87.55
40	0.425 mm	34.90	11.36	23.81	76.19
60	0.250 mm	28.10	9.15	32.96	67.04
100	0.150 mm	35.90	11.69	44.65	55.35
200	0.075 mm	38.60	12.57	57.22	42.78
CHAROLA		131.40	42.78	100.00	0.00
SUMA		300.00	97.68		

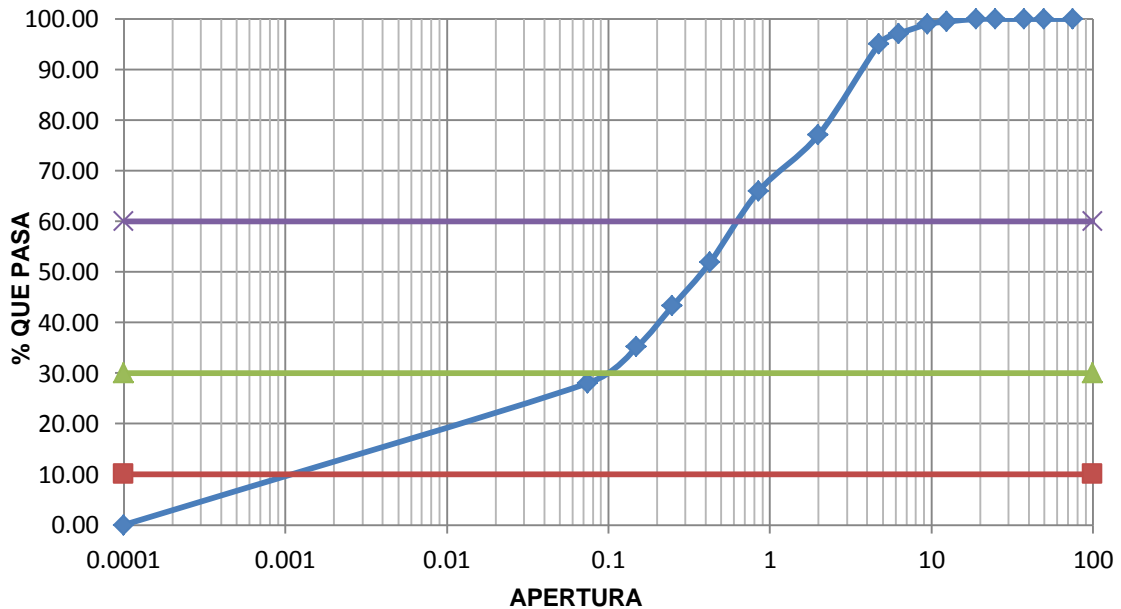
CURVA GRANULOMÉTRICA SUELO 2



Análisis granulométrico suelo 3

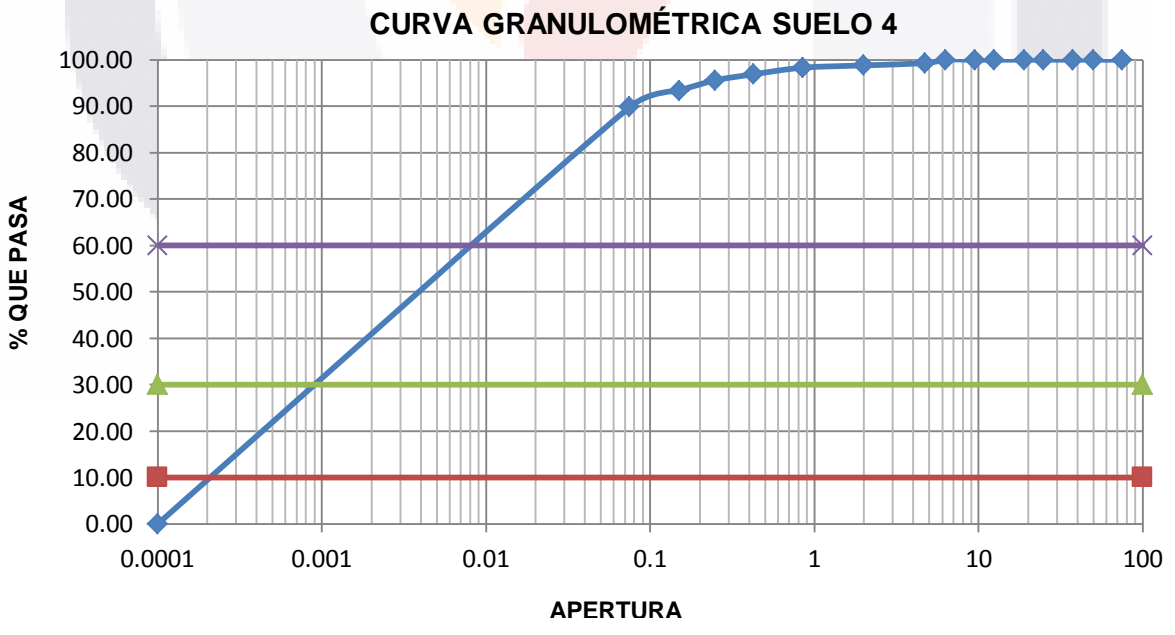
ANALISIS GRANULOMÉTRICO SUELO 3					
MALLA		MASA RETENIDA (grs.)	RETENIDO PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULATIVO (%)	MATERIAL QUE PASA (%)
3"	75.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.50 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.50 mm	40.00	0.50	0.50	99.50
3/8"	9.50 mm	40.00	0.50	1.01	98.99
1/4"	6.30 mm	150.00	1.88	2.89	97.11
No. 4	4.75 mm	160.00	2.01	4.90	95.10
PASA No. 4		7570.00	95.10	100.00	
SUMA		7960.00	100.00		
10	2.00 mm	56.70	17.97	22.87	77.13
20	0.850 mm	35.20	11.16	34.03	65.97
40	0.425 mm	44.40	14.07	48.11	51.89
60	0.250 mm	27.10	8.59	56.70	43.30
100	0.150 mm	25.50	8.08	64.78	35.22
200	0.075 mm	22.60	7.16	71.95	28.05
CHAROLA		88.50	28.05	100.00	0.00
SUMA		300.00	95.10		

CURVA GRANULOMÉTRICA SUELO 3



Análisis granulométrico suelo 4

ANALISIS GRANULOMÉTRICO SUELO 4					
MALLA		MASA RETENIDA (grs.)	RETENIDO PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULATIVO (%)	MATERIAL QUE PASA (%)
3"	75.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	37.50 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.50 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.50 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
1/4"	6.30 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 4	4.75 mm	20.00	0.72	0.72	99.28
PASA No. 4		2750.00	99.28	100.00	
SUMA		2770.00	100.00		
10	2.00 mm	1.50	0.50	1.22	98.78
20	0.850 mm	1.50	0.50	1.71	98.29
40	0.425 mm	4.30	1.42	3.14	96.86
60	0.250 mm	3.90	1.29	4.43	95.57
100	0.150 mm	6.70	2.22	6.65	93.35
200	0.075 mm	10.70	3.54	10.19	89.81
CHAROLA		271.40	89.81	100.00	0.00
SUMA		300.00	99.28		



TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS



TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

Datos para determinar los límites de consistencia

	SUELO 1	SUELO 2	SUELO 3	SUELO 4
Pw + RECIPIENTE	49.30	59.47	48.90	51.60
Ps + RECIPIENTE	43.55	52.97	43.10	45.00
AGUA	5.75	6.50	5.80	6.60
PESO DE RECIPIENTE	29.00	28.62	28.55	28.55
PESO SECO	14.55	24.35	14.55	16.45
LIMITE LIQUIDO	39.52	26.69	39.86	40.12
Pw + RECIPIENTE	36.85	36.70	35.80	36.40
Ps + RECIPIENTE	35.40	35.88	34.70	35.40
AGUA	1.45	0.82	1.10	1.00
PESO DE RECIPIENTE	29.74	29.97	30.19	29.68
PESO SECO	5.66	5.91	4.51	5.72
LIMITE PLASTICO	25.62	13.87	24.39	17.48
INDICE PLASTICO	13.90	12.82	15.47	22.64

