



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Licenciatura en Ingeniería Civil



**BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC) SIN ADICIÓN DE CEMENTO
UTILIZANDO SUELO DE UN PREDIO UBICADO EN EL MARQUÉS,
QUERÉTARO**

Opción de Titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Ingeniero Civil

Presenta:

Dafne Arellano Sánchez
Damaris de Jesús Rubio Ordaz
Natalia Olvera Girón

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

SINODALES

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza.
Director

M.I. Gerardo Medellín Aguilar
Secretario

Dr. Teresa López Lara
Vocal

Firma

Firma

Firma

Centro Universitario Querétaro, Qro.
OCTUBRE-2019

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Coordinadora de Carrera

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de La Facultad

El ingenio para crear, no para destruir.
(Facultad de Ingeniería, UAQ)

Dirección General de Bibliotecas UAQ

DEDICATORIA

Dedicado de una manera especial hacia mis padres, hermanos, mi perro y mi novio que siempre estuvieron para mí de todas las formas posibles sin esperar nada a cambio, por ustedes llegue a donde estoy y seguiré por ustedes, porque siempre serán la base de mi felicidad y el motivo de mi persistencia.

Dafne

El esfuerzo que el presente trabajo conlleva va dedicado a mis hermanos porque el logro de uno es el de los tres, a mis amigos con quien he compartido tanto y especialmente a mis padres por apoyarme y guiarme con un gran ejemplo y todo el cariño desde mi primer suspiro hasta el día de hoy.

Damaris

Este trabajo lo dedico a mi familia y amigos quienes por 5 años entendieron mis ausencias y hoy siguen a mi lado. A mis padres, por darme la libertad de tomar mis decisiones y apoyarme incondicionalmente en cada una; es su inconcebible esfuerzo, sabiduría, cariño y ejemplo lo que nos ha traído hasta aquí.

Natalia

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto no pudo ser llevado a cabo sin el respaldo y apoyo de nuestra segunda casa, agradecemos a La Universidad Autónoma de Querétaro y Facultad de Ingeniería por darnos el acceso a equipo, materiales, libros, instalaciones durante la realización de esta investigación, haciendo especial mención a la educación de calidad que en nuestros años de permanencia en la institución se nos brindó.

A todos nuestros maestros quienes fueron puntuales en sus clases, procuraron terminar los programas a tiempo, esmerándose en compartir sus conocimientos y experiencias en la vida profesional, consiguiendo acceso a visitas de obra, proporcionándonos material para realizar prácticas, que enriquecieron nuestra formación académica, que aún con los proyectos que dirigen y el poco tiempo del que disponen estuvieron siempre dispuestos a apoyarnos.

Agradecemos al M.I. Gerardo Medellín Aguilar, Ing. Humberto Galeana Rivera, M.C. Alejandro Clemente Chávez por el apoyo y la confianza al permitirnos participar en diversos proyectos a su cargo, llevándonos de la mano e impulsándonos para formarnos profesionalmente.

En especial, agradecemos al Dr. Omar Chávez que además de coordinador de nuestra carrera durante los cinco años de permanencia en nuestra universidad, se convirtió en un guía y ejemplo a seguir como ser humano e ingeniero.

A los laboratoristas y prestadores de servicio en el laboratorio de suelos de nuestra facultad por su paciencia, amabilidad y alegría que mantuvieron durante toda nuestra estancia y especialmente durante el desarrollo de nuestra investigación.

Finalmente, queremos agradecer al coordinador del presente trabajo, el Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza, quien fue nuestro guía durante todo el proceso de investigación, que junto al M.I. Gerardo Medellín Aguilar y a la Dr. Teresa López Lara mostraron su apoyo a lo largo del proceso de desarrollo del presente.

RESUMEN

La industria de la construcción es una de las principales generadoras de residuos que afectan el ambiente, por ello es necesario optar por cambiar las técnicas actualmente usadas, siendo la tierra un material de construcción alternativo con potencial para reducir la huella de carbono. En el presente trabajo de investigación se elaboran Bloques de Tierra Comprimida usando fibras naturales y el suelo de un predio ubicado en el municipio de El Marqués, Querétaro, sin el uso de cemento Portland con la finalidad de conocer el comportamiento del suelo de la zona y así aprovechar los recursos de la región generando el menor impacto ambiental posible. Con los BTC (Bloques de Tierra Comprimida) elaborados se determina la resistencia a la compresión y a la flexión a los 7, 14 y 28 días de edad. Comparando los resultados con la norma mexicana NMX-C-404-OONCCE-2005 se tiene que con los materiales, dosificaciones y procedimiento aquí utilizados no es factible elaborar los BTC sin la adición de cemento para uso estructural ya que no cumple con la resistencia mínima solicitada por la norma. Entre los principales factores que influyen para el bajo desempeño de estos BTC está el suelo muestreado que es un Limo de alta compresibilidad, la resistencia del molde empleado y el control de la humedad durante el curado.

Palabras clave: Bloques de Tierra Comprimida, BTC, Producción del Cemento, Fibras Naturales, Suelo de Querétaro, Piezas de mampostería.

SUMMARY

Construction industry is one of the main generators of waste that affect the environment, therefore it is necessary to change the techniques currently used and the soil is an alternative construction material with the potential to reduce the carbon footprint. In this research, BTC (Bloques de Tierra Comprimida) are made using natural fibers and the soil of a property located in the municipality of El Marqués, Querétaro, without adding Portland cement with the purpose to know the behavior of the soil in this area and thus be able to take advantage of the resources of the region, generating the least possible environmental impact. With the elaborated BTC the compression strength and flexion is determined at 7, 14 and 28 days. Comparing the results with the Mexican standard NMX-C-404-OONCCE-2005, we have that with the materials, dosages and procedure used here it is not feasible to produce the BTC without the addition of cement for structural use because it doesn't meet with the minimum strength required by the standard norm. The main factors that are part of the low performance of these BTC are the soil that is a high compressibility Silt, the strength of the mold used and the humidity control during curing.

Keywords: Bloques de Tierra Comprimida, BTC, Cement production, Natural fibers, Soil in Queretaro, Masonry pieces.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS.....	II
RESUMEN.....	III
SUMMARY	IV
ÍNDICE GENERAL	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE GRÁFICAS	XII
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Planteamiento del problema.....	6
1.3. Justificación	6
1.4. Hipótesis.....	7
1.5. Objetivos	7
1.5.1. Objetivo General	7
1.5.2. Objetivos Particulares	7
2. Fundamentación Teórica.....	8
1.1 Suelo	9
1.1.1 Formación de los suelos	9
1.1.2 Clasificación de los suelos	10
1.2 El suelo en Querétaro.....	11
1.3 Técnicas de construcción con tierra	11
1.3.1 Adobes.....	14
1.3.2 Tierra apisonada	16
1.3.3 BTC.....	17
1.3.4 Fibras	20
1.4 El Cemento.....	21
1.4.1 Producción del cemento.....	22
1.4.2 Efectos ambientales.....	24
1.5 Piezas de mampostería.....	24

1.5.1	Bloque.....	25
1.5.2	Tabique (ladrillo)	25
1.5.3	Tabicón	25
1.6	Normativa	25
1.6.1	NMX-C-036-ONNCCE-2004	25
1.6.2	NMX-C-404-OONCCE-2005	26
1.6.3	NMX- C-464-ONNCCE-2010	28
1.7	Caracterización de material	29
1.7.1	SUCS	29
1.7.2	Granulometría	31
1.7.3	Límites de Atterberg	33
1.7.4	Ensaye AASHTO	36
3.	Metodología	38
3.1.	Investigación.....	39
3.2.	Muestreo.....	39
3.3.	Clasificación del Material	41
3.3.1.	Granulometría	41
3.3.2.	Límites de Atterberg.....	45
3.3.3.	Ensaye AASHTO	54
3.4.	Preparación de la muestra.....	61
3.5.	Selección de fibras	61
3.6.	Dimensionamiento de molde	64
3.7.	Pruebas preliminares.....	67
3.8.	Elaboración de los BTC	68
3.8.1.	Curado de BTC	70
3.9.	Elaboración de Pila.....	72
3.10.	Ensayos.....	74
3.10.1.	Ensayo a compresión	74
3.10.2.	Ensaye a flexión.....	76
3.10.3.	Ensaye de Pila.....	77
4.	Resultados.....	79
4.1.	Clasificación del Suelo.....	80
4.1.1.	Granulometría	80
4.1.2.	Porcentaje de humedad natural del suelo	80

4.1.3. Limite plástico	81
4.1.4. Limite líquido	81
4.2. Ensayo AASHTO estándar	82
4.3. Resultados previos	84
4.4. Selección de fibras	89
4.5. Resultados finales	89
4.5.1. Bloques	89
4.5.2. Pilas	99
4.6. Resumen de Resultados	100
5. Conclusiones	104
5.1. Conclusiones	105
5.2. Líneas futuras de investigación.	106
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
7. ANEXOS.....	113
ANEXO. I Hoja de registro y curva de compactación para prueba dinámica AASHTO.	113
ANEXO. II Prueba AASHTO de material muestreado.....	114
ANEXO. III Carta de plasticidad, Juárez Badilla y Rico Rodríguez Tomo I (2005)	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Proceso de elaboración de cemento	23
2. Prueba a compresión de la mampostería en el laboratorio	29
3. Recolección de la muestra a estudiar	40
4. Predio de recolección de suelo en Zákia, Qro.	40
5. Suelo recolectado en saco.	41
6. Ebullición del material saturado.	42
7. Obtención del peso del testigo de humedad	42
8. Lavado de material para eliminar finos de arenas.....	43
9. Colocación de muestras en horno para eliminar humedad.....	44
10. Peso de suelo seco.....	44
11. Muestra de Suelo tomada.....	46
12. Vaso de aluminio con suelo	46
13. Muestra saturada por 24 hrs.	47
14. Calibración de copa Casagrande.....	48
15. Muestra de material mezclado en capsula de porcelana.....	49
16. Ranura en copa de casa grande.....	49
17. Unión de suelo posterior a golpes.....	50
18. Secado al horno de testigos de humedad.....	51
19. Toma de Testigos de humedad.....	51
20. Secado de suelo en placa de vidrio.	52
21. Realización de rollitos de suelo.....	53
22. Muestra de rollitos de suelo en punto requerido.	54
23. Cribado de material por malla No.4.....	55
24. Peso de molde prueba AASHTO.	56
25. Humectación y homogeneización del suelo.	57
26. Vaciado de suelo en molde.	57
27. Compactación de primera capa con pisón.....	58
28. Enrasado de muestra con regla metálica.....	59
29. Pesado de molde con suelo compactado.	59
30. Colocación de testigos de humedad en horno.....	60
31. Fibras de pino recolectadas en la Universidad Autónoma de Querétaro.	63
32. Zona de recolección de estiércol de vaca.....	63
33. Estiércol de vaca para BTC.	64
34. Molde de BTC elaborado con madera de pino.....	65
35. Base de molde para BTC elaborada de pino.	65
36. Molde y Bloque metálico para pruebas finales.....	66
37. Piezas de molde metálico.	66
38. Bloque elaborado con estiércol de vaca.	67
39. Bloque elaborado con fibras de pino.....	68
40. Elaboración de bloque con molde metálico y prensa hidráulica.....	70
41. Acabado en bloque al ser elaborado.....	71

42. Agrietamiento en Bloques al segundo día de elaboración.	71
43. Humectación de bloques con piseta.	72
44. Vista 1 de pila.....	73
45. Vista 2 de pila.....	73
46. Ensayo de compresión en bloques, con medición de deformación.....	74
47. Falla lateral de bloques ensayados.....	75
48. Vista inferior de falla de bloques.	75
49. Ensayo a flexión.....	76
50. Falla a flexión en bloques.	77
51. Colocación de pila en base de arena.	78
52. Ensayo de compresión de pila.	78

Dirección General de Bibliotecas UAO

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Porcentajes de arcilla según autores	15
2. Resistencia mínima a la compresión sobre área bruta	27
3. Coeficientes de uniformidad y curvatura	33
4. diferencias entre prueba estándar y modificada.....	37
5. Obtención de la granulometría del material	80
6. Obtención del porcentaje de humedad del suelo.	80
7. Obtención del límite plástico.	81
8. Obtención del límite líquido.....	81
9. Registro de datos para ensayo AASHTO.....	83
10. Propiedades de especímenes previos a pruebas finales.....	84
11. Resultados a compresión Bloque A1 (resultados previos).....	85
12. Resultados a compresión Bloque A2 (resultados previos).....	86
13. Resultados a compresión Bloque A3 (resultados previos).....	87
14. Datos de bloques antes de ser probados (7 días).....	89
15. Datos de bloques antes de ser probados (14 días).....	90
16. Datos de bloques antes de ser probados (28 días).....	90
17. Parámetros obtenidos antes de los ensayos de BTC.	91
18. Prueba de compresión Bloque B2 (7 días).	91
19. Prueba de compresión Bloque B3 (7 días).	92
20. Prueba de compresión Bloque A1 (14 días).	93
21. Prueba de compresión Bloque A2 (14 días).	93
22. Prueba de compresión Bloque B1 (28 días).	94
23. Prueba de compresión Bloque B3 (28 días).	94
24. Resultados de prueba a cortante (7,14 y 28 días).	99
25. Resultados de ensayo de pila.	99
26. Comparación de resultados.	100

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica	Página
1. Curva fluidez.....	82
2. Gráfica de prueba Proctor Estándar.....	84
3. Gráfica de pruebas preliminares.....	88
4. Esfuerzo deformación Bloque B2 (7 días).....	95
5. Esfuerzo deformación Bloque B3 (7 días).....	96
6. Esfuerzo deformación Bloque A1 (14 días).....	97
7. Esfuerzo deformación Bloque A2 (14 días).....	97
8. Esfuerzo deformación Bloque B1 (28 días).....	98
9. Esfuerzo deformación Bloque B3 (28 días).....	98
10. Esfuerzo - deformación unitaria de pila.....	100
11. Comparativa esfuerzo – deformación a los 7 días.....	101
12. Comparativa esfuerzo – deformación a los 14 días.....	102
13. Comparativa esfuerzo – deformación a los 28 días.....	103

Capítulo 1

1. Introducción

Dirección General de Bibliotecas

1.1. Antecedentes

Es bien sabido que de los principales problemas que actualmente aquejan a nuestra sociedad se encuentran aquellos relacionados con la contaminación ambiental; y la industria de la construcción es una de las principales generadoras de residuos que afectan el ambiente, por ello es necesario optar por cambiar las técnicas actualmente usadas, siendo la tierra un material de construcción alternativo con potencial para reducir la huella de carbono. La tierra apisonada ya es un material común y prometedor para edificaciones pequeñas, ésta se puede encontrar como bloques, paredes y ladrillos. Gran parte de la sustentabilidad de estos métodos es debido a que el material es obtenido en la misma zona de implementación, lo que dificulta su estandarización, por lo que surge la necesidad de estabilizar el material de manera física, química y mecánica para cumplir con los lineamientos de construcción, la norma NMX 508-ONNCCE-2015 y la NTC-2017 para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería.

Hall, et al. (2003) han realizado un estudio de las propiedades físicas de la tierra apisonada para probar si es adecuada para la elaboración de obras civiles. Los resultados de la densidad y las pruebas de compactación, fueron aptas, pero para ese suelo específico; los resultados han de variar dependiendo al suelo de estudio. Otros autores, Maniatidis & Walker (2003), realizaron una revisión extensa de la literatura sobre tierra apisonada trabajada en Europa y el mundo hablando de las diferentes especificaciones del suelo como las distribuciones de partículas, métodos de prueba y los criterios para selección de suelo para tierra apisonada natural y para la tierra estabilizada con cemento, cal, fibras y silicato de sodio, obteniendo resultados diversos, dependiendo el material de estudio. Mientras que Ciurileanu, et al. (2012) proponen la realización de una pared de tierra apisonada de manera ecológica y económica, mencionando las diferentes cualidades que la tierra tiene para ser un buen material de construcción; para su objetivo realizaron estudios de compresión, pruebas de estabilización con cemento y diferentes pruebas geotécnicas para verificar su viabilidad.

Jayasinghe & Kamaladasa (2005) lograron probar que la tierra apisonada como pared puede ser no sólo utilizada en pisos sencillos sino incluso en viviendas de dos niveles, obteniendo una buena estabilidad. Ciancio, et al. (2013) dan una guía de estudios a realizar en especímenes de tierra comprimida y la importancia que tienen las pruebas para obtener una buena durabilidad destacando la prueba de erosión, también mencionando que no siempre la estabilización física mediante una buena distribución de partículas representa factibilidad.

Kariyawasam & Jayasinghe (2016) señalan la importancia de la selección del suelo, su relación con la densidad y las propiedades de resistencia, encontrando a la laterita como uno de los materiales más adecuados para trabajar como tierra apisonada, realizando en conjunto pruebas sobre la estabilización con cemento en diferentes proporciones. En Francia, Bui, et al. (2008) han optado por el uso de la tierra apisonada en paredes, con diferentes porcentajes de morteros para evitar la erosión del mismo, arrojando como resultados que los morteros proporcionan mayor durabilidad del elemento. El autor Steve Burroughs (2008), realizó pruebas a diferentes suelos compactados estabilizándolos con cemento, limo y asfalto en diferentes proporciones encontrando mediante estudios geotécnicos indicadores para la factibilidad de los suelos, siendo una herramienta para una fácil selección de suelo. Otros autores que dan una herramienta son los arquitectos Guzmán & Iñiguez (2016), desarrollando una metodología para la elección más adecuada de los estabilizantes químicos, tomando en cuenta aspectos económicos, ambientales y las propiedades finales del material.

Se encontró el artículo de Galíndez (2009), como gran importancia para este artículo, en donde investigó el comportamiento de los BTC sin la adición de cemento, enfocándose más en las características físicas del suelo, encontrando buenos resultados al incrementar la compactación del material lo cual es lo que más se asemeja a esta investigación.

Se mencionó anteriormente que una presentación de la tierra apisonada son los Bloques de Tierra Comprimida (BTC), éstos son piezas para mampostería fabricados con suelo, el cual comúnmente es del mismo lugar donde se llevará a cabo la edificación. El suelo por sí solo no es capaz de soportar cargas por lo que para mejorar sus propiedades químicas, físicas y mecánicas se mezcla con otros materiales (fibras y/o cementantes) que actúan como estabilizadores, posteriormente se compacta para formar los bloques y se da un tiempo de curado bajo la sombra. Es por los materiales y proceso de fabricación de estas piezas que se tiene una disminución de las emisiones de CO₂ y los costos en materia prima, transporte y en los combustibles de horneado, comparado con los sistemas convencionales de ladrillo recocido y block de concreto.

Para incrementar la resistencia mecánica y la resistencia al desgaste es conveniente minimizar la proporción de vacíos (e) llenándolos con partículas más pequeñas como lo son las arcillas (Ciancio, et al., 2013). El suelo tendrá que ser clasificado basándose en la proporción de tamaños de sus componentes principales, siendo estos: grava, de 50 a 4.7mm, arena, 4.7 a 0.074 mm y limos de 0.074 a 0.002 mm (Juárez & Rico, 2005). El suelo debe estar bien graduado teniendo desde arcillas hasta gravas, según Guzmán e Iñiguez, los porcentajes óptimos son 60% del volumen para arenas, 15 a 40% en arcillas y limos y varios autores mencionan un 10% de estabilizantes (Guzmán & Iñiguez, 2016). Para el diseño de los BTC también se toman en cuenta el contenido de materia orgánica y de arcilla expansiva, donde ambos deben ser bajos para evitar un alto encogimiento y posible bio deterioración (Galíndez, 2009); (Arteaga, et al., 2011). En la tierra apisonada, formada por suelo y estabilizantes, el contenido óptimo de humedad va desde un 9.5% hasta un 11% y con una densidad máxima que oscila entre los 20 KN/m³ por nivel de compactación (Jayasinghe & Kamaladasa, 2006). Para caracterizar el suelo y los bloques de tierra compactada se realizan diferentes pruebas geotécnicas, la cuales se mencionan a continuación: inspección visual, pruebas a compresión húmeda, prueba de absorción del agua, prueba de erosión acelerada, prueba de contracción, prueba de sedimentación, prueba de caída,

ensaye de resistencia en seco, granulometría, prueba de Proctor, prueba de compresión, cuchara de Casa Grande, cono inglés y ensayos de abrasión hídrica por goteo (Jayasinghe & Kamaladasa, 2005); (Kariyawasam & Jayasinghe, 2016); (Galíndez, 2009); (Rui, et al., 2013).

Galíndez (2009) elaboró Bloques de Tierra comprimida sin la utilización de cemento, con tres diferentes tierras arcillosas aplicando diferentes grados de compactación, donde se obtuvieron resultados generales demostrando que la resistencia a la compresión es directamente proporcional al grado de compactación y que a mayor IP mayor resistencia a la compresión posee. Se pudo inferir que la contracción ocasiona problemas de fisuras asociadas con el límite plástico; para un alto grado de compactación el tiempo de disgregación también aumenta. Uno de los suelos tuvo resultados de resistencia a la compresión cercanos a los BTC estabilizados con cemento; las características de este suelo son arena bien graduada con 23.19% de finos, LL de 37.45, LP de 21.64 y un IP de 15.81, clasificado como arena arcillosa de mediana plasticidad.

Actualmente en México se encuentran pocas normativas para Bloques de Tierra Comprimida, a pesar de ser considerado un material tradicional, se sabe que aproximadamente existen 55 normas en el mundo que hablan de la construcción con tierra, siendo Brasil quien posee la mayoría publicadas Cid et al. (2011). De las normas más completas y actualizadas se encuentra la norma española UNE 41410, que nos habla sobre propiedades técnicas como dimensiones, pruebas, ensayos y clasificaciones entre otros (norma UNE 41410, 2008). Se encontraron pocos archivos de normatividad mexicana respecto al tema, se tiene la norma NMX 508-ONNCCE-2015 la cual se enfoca en “establecer las especificaciones y métodos de ensayo de los Bloques de Tierra Comprimida (BTC) estabilizados con cal, usados en muros de carga, divisorios pudiendo o no ser aparentes y techos en bóvedas” (norma NMX-C-508-ONNCCE, 2015).

1.2. Planteamiento del problema

El cemento, por excelencia, es la materia prima para la construcción en el país, teniendo en cuenta el incremento desmesurado de su precio se afecta directamente el desarrollo económico y la industria de la construcción, por otra parte, la alta demanda del consumo del cemento debido el crecimiento de la población da pie a una contaminación excesiva ya que su producción contribuye al 7% de las emisiones del Dióxido de Carbono (CO₂), así como parte del Dióxido de Sulfuro (SO₂). Por las problemáticas anteriores es necesario que la industria de la construcción opte por soluciones sustentables (Ali, et al., 2011).

Existen investigaciones previas que buscan dar solución a estos problemas con enfoques diferentes, tales propuestas reducen significativamente el uso de cemento, sin embargo, la mayoría no lo eliminan en su totalidad. Mediante esta investigación se pretenden confirmar metodologías que eliminan el uso del cemento, y verificar su viabilidad. El suelo a usar es producto de desecho del predio donde se construye el fraccionamiento Zákia, ubicado en el municipio de El Marqués, Querétaro.

Se busca usar energía para comprimir Bloques elaborados con un suelo específico, buscando mejorar las propiedades mecánicas con diferentes energías de compactación adicionando fibras naturales.

1.3. Justificación

El crecimiento exponencial de la ciudad de Querétaro ha dado pie a la construcción de nuevos espacios destinados a la vivienda, en los cuales usualmente se tienen suelos con características físicas aparentemente aptas para realizar bloques comprimidos, por lo anterior, es importante que el sitio de estudio posea el material deseado y que además sea un sitio de impacto, tal es el caso de la zona donde se ubica el fraccionamiento Zákia, perteneciente al municipio de El Marqués, Querétaro, ya que el lugar proporciona las características de estudio deseadas por

las grandes áreas de desarrollo de urbanización futura y posee un suelo limoso con contenido de arenas de color negro, el cual es adecuado para la presente investigación. Aprovechando el material del sitio se evita el traslado y el uso de materiales que contribuyan a la generación de gases contaminantes.

1.4. Hipótesis

Se pueden fabricar bloques de tierra comprimida (BTC) sin el cemento Portland igualando o mejorando las propiedades físicas de las piezas de mampostería tradicionales.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

- Obtener Bloques de Tierra Comprimida (BTC) sin cemento que tengan características iguales o similares a las de las piezas de mampostería tradicionales.

1.5.2. Objetivos Particulares

- Obtener y caracterizar suelo de la zona de estudio, asegurando que sea material de excavación.
- Diseñar y construir moldes con la capacidad de soportar grandes presiones para formar los BTC.
- Encontrar combinaciones entre dosificaciones de suelo y aditivo natural que permitan la trabajabilidad del material y con ayuda de la presión generen bloques resistentes.
- Elaborar BTC con suelo de desecho a diferentes energías de compactación, sin adición de cemento portland.
- Realizar ensayos y pruebas, a los especímenes seleccionados, que determinen sus características físicas y mecánicas.

- Analizar los resultados y comparar con los valores dados por la literatura y las normas.

Capítulo 2

2. Fundamentación Teórica

Dirección General de Bibliotecas UAO

1.1 Suelo

Los suelos son grupos formados por partículas de diferentes tamaños y formas, producto de la degradación de las rocas; su composición es de sólidos, líquidos y gases (agua y aire, respectivamente). Las características de los suelos son variadas y dependen de las partículas que los conforman (Addleson, 1983). Los dos principales tipos de suelos son los residuales, que se encuentran cerca de la roca de origen por lo que suelen presentar las mismas características que ésta y los suelos transportados por efectos de la gravedad, viento, mareas y deshielos; los suelos transportados están comúnmente compuestos por partículas de diferentes rocas (Gliessman, 2002).

1.1.1 Formación de los suelos

El suelo es producto de la meteorización, es decir, procesos de desintegración física, descomposición química y biológica de las rocas y minerales como resultado de estar en contacto con la atmósfera, hidrosfera y biosfera. La meteorización puede ser química o física, en el caso de la física son muchos los factores como el hielo y deshielo que por el cambio de volumen del agua durante el proceso se fractura la roca, lo mismo sucede si existe la disolución y cristalización de sales, se tienen los factores mecánicos como el crecimiento de raíces en los huecos, o la abrasión por viento y glaciares, otro factor es el cambio de la temperatura que provoca el desprendimiento de las capas superficiales de las rocas. La meteorización química se da principalmente por el contacto de la roca de origen con el agua, dando paso a procesos como la oxidación, disolución e hidrólisis que producen reacciones que transforman a los minerales (Porta, et al., 2014).

Posterior a la meteorización o simultánea a ésta las partículas se van depositando in situ o son transportadas a otras zonas, con el paso del tiempo la acumulación de las partículas genera perfiles (Fassbender, 1975). Generalmente los perfiles están formados por varias capas de suelos, es decir, un grupo de partículas con ciertas características se depositó sobre otro grupo de partículas anteriormente depositado

en la misma zona, las capas varían principalmente en profundidad, color y composición de los suelos.

1.1.2 Clasificación de los suelos

Las características de cada suelo son variadas debido a que son muchos los factores que intervienen en su desarrollo, para poder facilitar la identificación y propiedades de cada suelo se han creado sistemas de clasificación para estos, el más aceptado en la actualidad es el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S) que por medio de pruebas de laboratorio ya establecidas caracteriza, clasifica y da nombre al suelo.

Los suelos pueden clasificarse en dos grandes grupos de acuerdo al tamaño de las partículas, suelos gruesos (gravas y arenas) y suelos finos (limos y arcillas). Las gravas son suelos gruesos con un tamaño mayor a 4.75 mm y las arenas menores a 4.75 mm, pero mayor a 0.075 mm. Los suelos finos se tienen cuando el 50% de las partículas son de tamaños menores a 0.075 mm, en este grupo existen los limos y las arcillas, aunque la diferencia entre estos dos ya no es por tamaños de partículas sino por las características de plasticidad de cada uno; los limos se ubican, según los límites de consistencia, en las zonas I y III de la Carta de Plasticidad. Si el límite líquido (LL) del limo es mayor a 50 se tiene un limo de alta compresibilidad (MH), si es menor es un limo de baja compresibilidad (ML). En el caso de las arcillas es igual, se ubican en las zonas II y IV de la carta de plasticidad, donde debajo de un LL menor a 50 es arcilla de baja compresibilidad (CL) y arriba arcilla de alta compresibilidad (CH). Los limos tienen la característica de ser inestables en presencia de agua, con poca resistencia en estado seco y aumento de volumen en heladas, las arcillas también son inestables cuando tienen agua ya que se expanden cuando tienen agua y se contraen cuando la pierden, aunque no pueden perder toda el agua por métodos convencionales, sin embargo, tiene mayor resistencia en estado seco que los limos (M-MMP-1-02/03, SCT).

1.2 El suelo en Querétaro

Como en la mayoría de las zonas geográficas, el suelo en los municipios de Querétaro y El Marqués no tiene espesores ni características uniformes. Según el Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, el municipio de Querétaro tiene como suelos dominantes Vertisol en un 59.9%, suelos minerales con un alto contenido de arcillas expansibles, 17.7% de Phaeozem, suelos oscuros ricos en materia orgánica y 6% de Leptosol suelos superficiales extremadamente gravillosos. El municipio de El Marqués tiene los mismos tipos de suelo, aunque en diferentes porcentajes, 52.8% de Vertisol, 26.7% de Phaeozem, 17.6% de Leptosol y sólo el 1% de Umbrisol, suelos oscuros, ácidos y con alto contenido orgánico (FAO, 2008).

En cuanto a los estratos, el Instituto Mexicano del Transporte encontró que gran parte de este territorio cuenta con un primer estrato de arcilla con un promedio de medio metro de profundidad. Hay algunas zonas escasas donde sólo hay arcilla, pero en su mayoría esta primera capa descansa sobre otras más amplias formadas por basaltos, tobas o limos. Las pocas zonas sin arcilla tienen un primer estrato formado por tobas, basaltos sobre toba, carbonatos que descansan sobre basalto, limo arenoso sobre toba e incluso zonas con suelo antropogénico (Alvarez, et al., 2002).

1.3 Técnicas de construcción con tierra

La industria de la construcción tiene un papel importante en el desarrollo de la sociedad, sin embargo, también es de las principales causas de consumo de recursos y generación de residuos, provocando contaminación, debido a esto es necesario que se empiecen a tomar alternativas para disminuir la contaminación.

A lo largo de los años la construcción con tierra ha ido perdiendo su popularidad, pudiéndose dar por diversos factores como; tiempo de construcción, mano de obra, falta de difusión y de investigación, e inclusive el asociar la construcción de tierra con la pobreza. Aunque se ha perdido la costumbre de construcción con tierra, sí

ha habido mejoras en las técnicas de fabricación con tierra, existen diversas investigaciones que se enfocan en perfeccionar las cualidades mecánicas y el uso de combinaciones con distintos materiales.

Conforme se han realizado más investigaciones se puede inferir que la construcción con tierra es una de las maneras más sostenibles de construcción que hay, puesto que se aprovechan los recursos naturales que poseemos. Este tipo de construcción, empezando con el lodo o barro y mezclas con algunas fibras naturales que estuvieran al alcance, corresponde a diferentes sistemas tradicionales que dependían de la zona de implementación y de las características del suelo de la región.

Actualmente la tierra es un material que está comenzando a tener un incremento en su utilización por la necesidad ecológica que se ha venido presentando. Otra ventaja del sistema es su bajo costo y la adaptación climática que el material presenta.

Debido a este nuevo resurgimiento como material de construcción, diferentes investigadores han empezado a intentar resolver los problemas de normatividad y reglamentos sobre la construcción con tierra, algunos países como Colombia, España, Chile, México, Perú, Nicaragua, entre otros, han empezado a crear dichas normas y estándares de los sistemas de tierra cruda, de esto se hablará más adelante (Cid, et al., 2011).

El daño ambiental se ha ido incrementando debido a la explotación de recursos naturales y de la contaminación antrópica que la humanidad se empeña en aumentar, afectando nuestra atmósfera y a su vez eliminando los pocos recursos que nos quedan.

Una de las principales comparaciones que se pueden hacer es con el ladrillo, es muy común utilizarlo en las construcciones debido a su práctica elaboración, así como su costo, el cual se presume que es económico, claro esto sin tomar en cuenta el costo real ambiental que presenta, en Galíndez (2007) se mencionan los

efectos ambientales que provoca la actividad ladrillera que enlistamos a continuación.

- Inducción de inundaciones.
- Cambios en el nivel freático.
- Peligro de salinización.
- Alteración de ecosistemas.
- En las zonas de explotación y tratamiento desaparecen la fauna y flora.
- Contaminación de aguas subterráneas y superficiales.
- Los ladrillos antes de ser cocidos en el horno, se dejan secar, ya moldeados, 2 días a la intemperie. Si durante esos dos días llueve, habrá un arrastre de material hacia los cursos de agua cercanos.
- Emisión de gases, polvo y partículas. La combustión de la leña produce dióxido de carbono, monóxido de carbono, vapor de agua y partículas finas en suspensión (hollín).
- Pérdida de tierras productivas.
- Transformación de estas áreas en zonas de relleno.
- Inducción de erosión.
- Alteración morfológica (cavas, montículos).
- Inestabilidad de pendientes.
- Impacto visual en el paisaje.
- Inapropiado uso del suelo una vez finalizada la actividad (basurales clandestinos).
- Impacto sobre las poblaciones humanas adyacentes
- Ocupación de terreno por infraestructura e instalaciones.

Los bloques de tierra comprimida comunes utilizan cemento, lo cual los hace un porcentaje no ecológicos pero entre otras literaturas, en Galíndez (2007) se mencionan algunas características positivas sobre el uso de bloques sin cemento

como el ahorro energético debido a que no se utiliza maquinaria especial, uso de residuos donde estos pueden ser reciclados o mezclados con otro tipo de residuos, tecnología limpia porque la fabricación no produce ningún tipo de contaminación y solo se producen residuos que podrán ser utilizados para formar nuevamente otros bloques, no son tóxicos, son altamente durables con el recubrimiento adecuado y son fáciles de fabricar.

1.3.1 Adobes

Los adobes se han utilizado desde la antigüedad en diferentes lugares del mundo como, por ejemplo, el Hotel Abbasi en Irán con una arquitectura de tierra, en Estados Unidos se encuentran pueblos de adobes descubiertos en 1540 por españoles, en África se sitúa el edificio sagrado más grande del mundo hecho de adobes, en Chan Chan Perú la ciudad de adobe más grande del mundo (García, 2017).

Originalmente se elaboraban a mano dándoles forma, con el tiempo comenzaron utilizarse moldes con dimensiones establecidas para producir mayor cantidad, a su vez también se han realizado moldes con diferentes geometrías para ayudar a su estabilidad estructural, así como los bloques huecos donde se les coloca un refuerzo con varillas. Comúnmente los adobes miden 25x 35 x10 cm pesando 14 kg.

Para su elaboración la tierra debe estar húmeda y conservarse así un mínimo de 2 días para que la tierra pueda tomar la consistencia deseable para usarse; respecto a varios estudios la humedad ronda entre el 10%, esto dependiendo del tipo de material. El material está compuesto por arena gruesa, arena fina, sedimento y arcilla, aunque en mayor porcentaje se presenta arena, pero para poseer un mejor desempeño es común que se les adicione un poco de cemento o alguna materia vegetal como heno, paja, cenizas de madera, estiércol de burro o de vaca y hasta excremento de toro.

La tierra que se usa en los adobes comúnmente se obtiene de 50 cm a 2 m de profundidad de la zona de explotación, esto debido a la variedad granulométrica que se suele tener en el suelo, los bancos de extracción comúnmente son yacimientos de arcilla o bancos de material, García (2017) menciona diferentes autores que proponen diferentes porcentajes de arcilla, se muestran a continuación en la tabla.

Tabla 1. Porcentajes de arcilla según autores

Autor	Porcentaje de Arcilla (A)
Mc Henry (1996, p. 65)	A= 15%
Doat et al (1996, p.143)	15% > A > 18%
Houben y Doat (1982, p. 7)	A= 20%
Tejeda (2001, p. 31)	A <18%
Bardou (1981, p.11)	A <20%

Fuente: Propia

En cuanto a la técnica de elaboración, la tierra se comprime con las manos o los pies colocando el material extendiéndolo por todo el molde, que suele ser un marco de madera, para abarcar todo el espacio sin dejar huecos, así quitando los excesos. Después se desmolda moviendo el marco de lado a lado y se dejan secar a la intemperie, si es una región con calor extremo las piezas se protegen con una cubierta ligera o paja durante el tiempo necesario para evitar agrietamientos. Se pueden colocar de canto hasta pasar aproximadamente cuatro días y apilarse en un par de semanas más, siempre permitiendo el paso del aire entre ellos (García, 2017).

Algunas de las ventajas que se presentan en muros de adobe empiezan por el aislamiento acústico y térmico que brinda, como desventaja se tiene que el proceso de construcción puede ser lento debido al tiempo de fabricación de las piezas que depende del lugar de secado y resguardo.

Lo que condujo a la disminución del uso de adobes y el remplazo por ladrillos u hormigón, fue una mala transmisión de tradiciones, presentando un faltante en la

cultura constructiva que provocó problemas en construcciones y baja resistencia ante sismos, sacrificando el costo y calidad térmica, actualmente se siguen realizando estudios en algunos países como Colombia, Perú y Chile para mejorar las características de los adobes.

1.3.2 Tierra apisonada

La técnica constructiva de Tierra Apisonada tiene sus antecedentes siglos atrás en todos los continentes, inclusive en zonas húmedas como la de Europa Central y en lugares como Asiria se hallaron cimientos de tierra apisonada de 5.000 años de antigüedad (Galíndez ,2007).

El tapial o mejor dicho tierra apisonada es un método de construcción que utiliza una cimbra de madera a lo que realmente se le conoce como tapial, este se compone de dos tablas de madera que se sujetan a una distancia previamente determinada por barras agujeradas, esto para poder fijarlas y construir un muro de carga.

Las diferentes técnicas para los tapias varían en el soporte y movimiento que puedan tener, un a técnica es clavar estacas en el suelo con puntales reforzados para evitar la separación y con barras transversales, otra técnica es realizar cajones en donde la tierra se va compactando en capas de 15 a 25 cm de espesor.

El material de la tierra apisonada debe mantenerse húmedo durante el proceso, esta humedad debe ser la óptima para su compactación, puede obtenerse con una prueba Proctor simple, con la que se encuentra el punto exacto donde la tierra podrá ser compactada a su máximo.

El tapial ofrece ventajas constructivas por su capacidad higrotérmica, siendo capaz de intercambiar la humedad del ambiente absorbiendo y transpirándola, provocando una disminución de las necesidades de climatización en los hogares al tener estabilidad térmica y a su vez el uso de energía (Mag & Rauch, 2011). Otra ventaja es su sustentabilidad logrando reciclar el material las veces que se desee

sin dejar residuos. Aunque una de sus desventajas es que esta técnica necesita mano de obra especializada y en gran cantidad para una correcta ejecución.

En la actualidad el tapial ha ido abriéndose posibilidades en la prefabricación de elementos, siendo una variante del tapial tradicional. La desventaja que se presenta en los tapiales prefabricados es en la parte del transporte, ya que su traslado puede originar agrietamiento o disminución de su resistencia. También se han realizado diferentes investigaciones donde se utilizan materiales para mejorar diferentes características de los tapiales como; la adición de paja de cebada para mejorar más el comportamiento térmico o la adición de cal para mejorar la durabilidad y resistencia contra el agua.

Para brindar mayor economía se recomienda que por lo menos el 80% del material de construcción de la tierra utilizada no se encuentre a más de 1 kilómetro de la zona.

1.3.3 BTC

Los bloques de tierra comprimida (BTC), presentan una composición granulométrica a base de una mezcla de materiales, para lo cual la más óptima que puede tener un BTC es a base de arena, limo, arcilla, cemento, agua y aire.

De acuerdo a Vásquez, et al. (2015) la tierra con una distribución granulométrica para elaborar un BTC se compone de no más de un 14% de arcilla 22% de limo y 64% de arena, debido a esto se infiere que usualmente debe agregarse arena a la tierra extraída para completar esta granulometría.

Del material arcilloso se puede decir que tiende a expandirse y genera inestabilidad en el bloque. La arcilla presenta diferentes grados de cohesión por lo que los bloques suelen necesitar ser estabilizados para su mejora. Las arcillas son elementos activos, plásticos y aglomerantes, son peligrosas al contacto con el agua en el ámbito de la construcción, las partículas de arcilla ya sea de baja o alta compresibilidad, son menores que las partículas del cemento, debido a esto

primero debe darse la unión de las partículas de arcilla antes que de las de cemento, razón por la cual se requieren grandes cantidades de cemento para ser estabilizadas (Galíndez, 2007). Dicha estabilización puede ser homogénea o heterogénea, el propósito de la estabilización es lograr equilibrar la cohesión que contiene la arcilla, para esto hay que saber que con poca cohesión contenida en la arcilla se podrá usar en mayor cantidad y con una alta cohesión se deberá adicionar arena (Arteaga, et al., 2011).

Acorde Arteaga, et al., (2011) de los dos tipos de estabilización de los que ya se mencionó la más usada es la estabilización heterogénea en donde se mezcla la tierra con otro material para brindar estabilidad, dentro de esta misma se encuentran diversas variantes.

- ❖ Procesos consolidantes: en este proceso se estabiliza con cal a los limos y arcillas, aumentando su resistencia los esfuerzos de compresión y cortante, aparte se suma la mejora de la adherencia.
- ❖ Fibras: gracias a las fibras (usualmente de origen vegetal) se logra mejorar el comportamiento del suelo contra la dilatación y contracción por causa de la incorporación o evaporación del agua. Las fibras también ayudan a evitar la ocurrencia de fisuras haciendo el bloque más flexible.
- ❖ Impermeabilizantes: Cumplen con la función de aislar el exceso del agua que entra en contacto con los bloques expuestos en el exterior, esto evita que el material comience a disgregarse o sufra erosión.

Un punto importante para poder proceder a su elaboración es tener el material perfectamente cribado para que pueda tener una mejor incorporación.

El método de elaboración de los bloques suele ser sencillo, para realizar los bloques se cuenta con un molde metálico o de madera al cual se le coloca determinada cantidad de suelo; los bloques pueden ser sólidos o perforados. A dicho molde se le aplica presión ya sea con una prensa manual o con una prensa hidráulica, cabe resaltar que los bloques más tradicionales o artesanales se

realizan manualmente. Al terminar su compresión, el bloque se saca del molde y se pone a secar hasta perder humedad. Los bloques más comunes suelen ser de 14 cm x 9.5 cm x 29.5 cm.

Como ya se mencionó anteriormente se han realizado mejoras a los BTC en diferentes frentes, Vásquez, et al. (2015) realizaron bloques a partir de una alternativa diferente, se elaboraron bloques de tierra comprimida con tierra proveniente de los procesos de excavación combinándolos con residuos de construcción y demolición (RCD) sustituyendo en su totalidad el agregado tradicional. Sus resultados salieron positivos al cumplir con las especificaciones físicas y mecánicas de la norma NTC (Norma Técnica Colombiana).

En Colombia para obtener un bloque de tierra comprimida, se utiliza como referencia la norma NTC 5324 “Bloques de suelo cemento”, en esta norma vienen integrados los ensayos de desempeño que hay que realizarle.

Vásquez, et al., (2015) menciona que se realizaron diferentes relaciones en porcentajes de agregados para poder conocer las diferencias mecánicas y físicas de los BTC tradicionales y los modificados con RCD. Este autor utilizó limo de alta compresibilidad producto de material excavación de una zona residencial el cual fue triturado. Para la elaboración se utilizó la máquina CINVA RAM (máquina para elaboración de bloques), la cual fue probada por investigaciones del Centro Interamericano de Vivienda y Planteamiento. Colocaron los bloques en un lugar que no fuera afectado por la intemperie, pero a su vez estuviera seco, cada día se roció agua en todas sus caras como curado y a los 28 días se realizaron ensayos de compresión, capilaridad y abrasión. Al final se pudo concluir que los bloques modificados presentan mejor resistencia a la compresión, aunque se notaron grietas constantes y fallas plásticas, debido a esto los bloques realizados con RCD se consideran mejores en el comportamiento mecánico que los BTC tradicionales.

Galíndez (2007) realizó un estudio de BTC sin adición de cemento para construcción de muros, justificando la eliminación del cemento como un enemigo

de lo económico y el impacto ambiental que genera por su producción. En la investigación se trabajó con tres tipos de suelos arcillosos, los cuales se compactaron a presiones diferentes 4, 6 y 8 kg/cm² para corroborar la hipótesis que, a mayor plasticidad con más presión, se logra el aumento de la resistencia a la compresión.

Una característica particular de este estudio es que se apoyó en la utilización de impermeabilizante de acetite usado de vehículos, para poder proteger el bloque de la presencia del agua. Se menciona de gran importancia en el documento que para poder lograr resistencias adecuadas debe haber menor contenido de arcillas para evitar el uso excesivo de cemento en comparación de arena, ya que en suelos arcillosos suele agregarse un 15% de cemento. Se afirma que los bloques presentan un moderado impacto ambiental, ya que se ahorra energía en el proceso de fabricación y transporte, reciclaje de residuos, tecnología limpia, no toxicidad y altamente durable, la parte de afectación es la explotación de recurso natural, pero ésta es mínima debido a la abundancia del material.

1.3.4 Fibras

El uso de fibras para aumentar alguna propiedad en bloques y adobes ha comenzado a ser parte de nuevas investigaciones, teniendo como fines diversas causas.

Chuya & Ayala (2018) hablan del uso de fibra de vidrio, presentan ensayos donde demuestran que la adición de esta fibra aumenta la resistencia a la ruptura en comparación con el adobe tradicional, considerándolo viable en la mejora de sus propiedades mecánicas.

Por otro lado, también hay fibras naturales como la fibra de coco la cual mencionan Roux & Olivares (2002), en esta fibra la combinan al 1% junto con bloques estabilizados al 6%, la utilización de esta fibra es debido a la abundancia en la zona (Tampico) y por sus buenas características físicas y químicas logrando un

incremento de resistencia a la compresión de 1.94% en estado seco y un 5.6% en estado húmedo.

Sin embargo, también se encuentran estudios como Paredes & De la Cruz) (2017) donde se realizaron bloques con 3 fibras diferentes, paja de páramo, fibra de coco y cáscara de arroz. Se realizaron bloques con diferentes proporciones de cada fibra y con tierra sin adición de ninguna fibra, los resultados no fueron favorables por lo que se comprobó que la adición de estas fibras disminuía la resistencia de los bloques, también se observó que aunque los bloques sin adición de fibras resistieron más , estos no lograban una buena cohesión por lo que se afirmó que en muchas comunidades se sacrifica la cohesión por resistencia de elementos y evitar rupturas por diferentes factores.

1.4 El Cemento

El cemento es el ingrediente más importante del concreto, el cual es usado en todo el mundo como un material de construcción (Klee, 2004). La demanda del cemento en el sector de la construcción lleva a tasas de crecimiento anual de alrededor del 6% para este material, como dice el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2012). La Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) publicó en 2007 que la producción global de cemento era de 2.8 mil millones de toneladas por año y aproximadamente de 6 mil millones de concreto, para el 2050 se calcula que serán 4.4 mil millones de toneladas por año. (Gielen, et al., 2007; Joseph et al., 2010).

El cemento es un aglomerante hidráulico, lo que significa que se endurece cuando se le agrega agua. Existen 27 tipos comunes de cemento, los cuales pueden ser agrupados en cinco categorías generales (normal, resistencia moderada a los sulfatos, alta resistencia temprana, bajo calor de hidratación y alta resistencia a los sulfatos) y tres clases de resistencias: ordinaria, alta y muy alta (CEMBUREAU,2009).

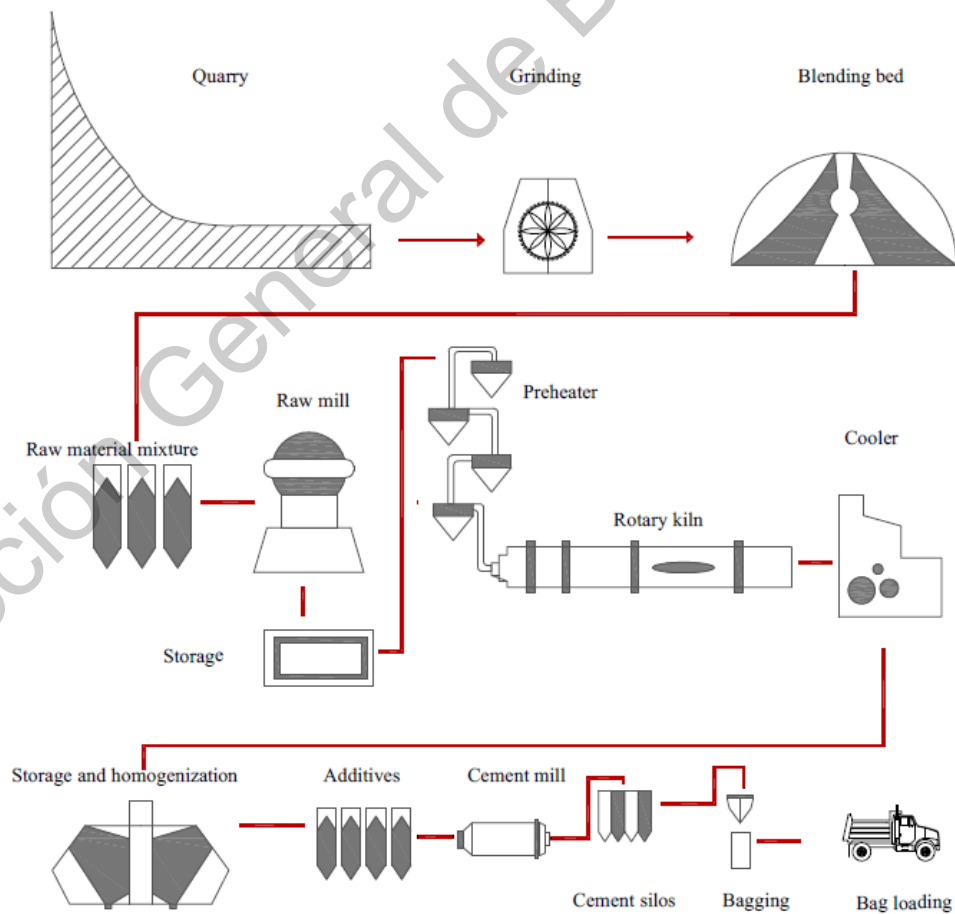
1.4.1 Producción del cemento

El proceso de manufactura del cemento incluye la extracción y preparación de la materia prima, precalentado, horneado, enfriamiento, trituración, almacenamiento y distribución. El proceso inicia con la descomposición del Carbonato de Calcio (CaCO_3) a 900°C para crear Óxido de Calcio y liberar Dioxido de Carbono (CO_2); este proceso es conocido como Calcinación. Después inicia el proceso para crear los Clinker dentro de un horno llamado Kiln, donde el CaO reacciona a las altas temperaturas (normalmente de 1400°C a 1500°C) con Sílice, Alúmina Al_2O_3 y Óxido Ferroso (FeO) para formar los Silicatos, Aluminatos y Ferritas, respectivamente, los cuales conforman el Clinker. El Clinker es enfriado y mezclado con yeso y otros aditivos para producir el cemento (Kaddatz et al., 2013).

El proceso puede realizarse de diferentes maneras, pero las fases más comunes, según (Ali, et al., 2011; Queiroz, et al., 2013; Madloul, et al., 2011; Kaddatz, et al., 2013) se describen a continuación: a) Extracción: caliza, arcilla y otras materias primas son extraídas y transferidas a la planta de producción, donde se trituran. Se mezclan en cantidades específicas, donde las proporciones de las mezclas dependen de la calidad y las propiedades que cada cemento demande. b) Mezcla y molienda: después de la extracción la roca es triturada. La primera trituración reduce el tamaño de la roca a casi 6 pulgadas, luego se da una segunda trituración para obtener rocas menores a 3 pulgadas. c) Precalentado: para ahorrar dinero, algunas cementeras precalientan la materia triturada antes de llevarla al horno, para esto se pasa la materia por la torre precalentadora la cual está formada por los ciclones de transmisión en ordenación vertical. d) Horneado: en esta etapa la materia prima entra a un horno giratorio de grandes dimensiones, llamado Kiln. Aquí la materia es expuesta a temperaturas entre 1400°C y 1500°C , por lo que es la etapa con mayor demanda de energía. Este proceso genera cambios físicos y químicos que transforman a la materia prima en Clinker. e) Enfriamiento del Clinker: el Kiln se encuentra ligeramente inclinado permitiendo que el clinker Clinker se dirija lentamente al otro extremo del horno, donde es enfriado rápidamente entre

100 °C y 200 °C con aire. f) De Clinker a cemento: una vez enfriado se agrega al clinker sulfato de calcio (yeso) y en ocasiones otros cementantes como escoria de alto horno, cenizas de carbón, puzolanas naturales o materiales inertes. g) Molienda y embalaje: todos los materiales son molidos hasta obtener un polvo fino y homogéneo que se almacena en silos antes de embalsarse.

Ilustración 1. Proceso de elaboración de cemento



Fuente: Propia

1.4.2 Efectos ambientales

El proceso de elaboración del cemento es uno de los mayores contribuyentes en emisiones de gases de efecto invernadero con un 5% mundial y cerca del 7% de Dioxido de Carbono (CO₂), esto se debe a la calcinación de su materia prima y la quema de combustibles necesarios para mantener las altas temperaturas en el horno (Kiln) (Ali, et al., 2011; Klee, 2004). El proceso genera la descomposición del Carbonato de Calcio (CaCO₃) en Óxido de Calcio (CaO), el cual produce grandes cantidades de emisiones de CO₂; además, durante el proceso se requiere una gran cantidad de electricidad para moler la materia prima y el cemento terminado. (Edenhofer, et al., 2011). Del total de Dioxido de Carbono emitido en la fabricación del cemento, el 65% se libera cuando se calcina la piedra caliza y el 35% en la quema del combustible necesario para calentar el Silicato Tricálcico (UCLA, 2016).

El tipo de cemento más utilizado en el mundo es el cemento Portland, que puede alcanzar hasta los 43.7 MPa de resistencia a la compresión a los 28 días con curado a 20 °C, y requiere de 1.756 kJ/Kg para su fabricación (Gallardo, et al., 2014; Janotka y Kraii, 2011). Cada tonelada de Cemento Portland producida libera casi una tonelada de dióxido de carbono a la atmosfera (Meyer, 2009).

Generalmente hablando, hay varios aspectos negativos en la producción del cemento, los más conocidos son respecto al medio ambiente pero aún más importantes son los efectos en el cuerpo humano. En el proceso de fabricación del cemento se libera mercurio, que, por su toxicidad, capacidad para transportarse largas distancias y bioacumulación se ha convertido en uno de los contaminantes más peligrosos. (UNEP, 2013).

1.5 Piezas de mampostería

La palabra mampuesto tiene sus orígenes de las palabras mano y puesto, puesto con las manos, por lo que definimos la mampostería como el conjunto de piezas o materiales acomodados con las manos, unidos mediante un aglutinante,

generalmente morteros. Existen diversos tipos de piezas de mampostería, hechas a base de concretos o suelos expuestos a altas temperaturas, a continuación, se enlistan las principales usadas en la industria de la construcción:

1.5.1 Bloque

Es un componente para uso estructural de forma prismática, que se obtiene por moldeo del concreto o de otros materiales, puede ser macizo o hueco. (NMX-C-404-ONNCCE-2005).

1.5.2 Tabique (ladrillo)

Es un componente para uso estructural, de forma prismática fabricado con arcillas comprimidas o extruidas, mediante un proceso de cocción o de otros materiales con procesos diferentes. (NMX-C-404-ONNCCE-2005)

1.5.3 Tabicón

Es un componente macizo para uso estructural de forma prismática fabricado de concreto u otros materiales. (NMX-C-404-ONNCCE-2005)

1.6 Normativa

Como se mencionó anteriormente, la mampostería está compuesta por las piezas y el mortero que las une. Existen normas enfocadas a las piezas y al mortero por sí solos y podemos encontrar las normas de los elementos de mampostería, ambas se enlistan y describen las apegadas al enfoque del presente trabajo.

1.6.1 NMX-C-036-ONNCCE-2004

“Industria de la construcción-bloques, tabiques o ladrillos y adoquines –resistencia a la compresión-método de prueba”. Esta norma mexicana como su nombre lo dice, establece el método de prueba para la determinación de la resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines fabricados de

concreto, cerámica, arcilla y otros materiales para la construcción y establece lo siguiente:

La muestra para hacer las determinaciones de resistencia de los productos a que se refiere esta norma se obtiene de manera aleatoria tomando 5 especímenes de cada lote de 10000 piezas o fracción si es en planta, en obra se puede tomar una muestra de 5 especímenes por cada entrega, de acuerdo con el cliente, se recomienda una muestra por cada 10000 a 40000 piezas suministrada

La superficie de las probetas que van a quedar en contacto con las placas de la máquina de prueba, se debe cabecear con mortero de azufre cuya resistencia mínima a la compresión sea de 34,4 MPa (350 kgf/cm²) para lograr que sean paralelas entre sí. Este mortero ya aplicado debe dejarse fraguar el tiempo necesario. Cuando se trate de unidades con huecos debe evitarse que el mortero penetre más de 5 mm dentro de ellos.

Los resultados se obtienen de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R = \frac{F}{A}$$

Donde:

R= Es la resistencia a la compresión MPa (Kgf/cm²)

F= La carga máxima (kgf)

A= El área transversal (cm²) (NMX-C-036-OONCCE-2004)

1.6.2 NMX-C-404-OONCCE-2005

“Industria de la construcción –bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural- especificaciones y métodos de prueba”

Esta norma mexicana establece las especificaciones y métodos de prueba que deben cumplir los bloques, tabiques (ladrillos) y tabicones para uso estructural en las edificaciones.

A continuación, se muestran los valores mínimos permisibles a la resistencia a la compresión en las piezas.

Tabla 2. Resistencia mínima a la compresión sobre área bruta

Tipo de pieza	Resistencia de diseño f^*p N/mm ² (kgf/cm ²)
Bloque de concreto vibrocomprimido	6 (60)
Tabicones	10 (100)
Tabique (Ladrillo) recocido	6 (60)
Tabique (Ladrillo) extruido o prensado (hueco vertical)	10 (100)
Tabique (Ladrillo) multiperforado	10 (100)

Fuente: NMX-C-404-OONCCE-2005.

Para calcular f^*p

$$f^*p = \frac{\overline{fp}}{1 + 2,5Cp}$$

Donde:

f^*p es la resistencia a la compresión de diseño, referida al área bruta.

Cp es el coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las piezas

\overline{fp} es la resistencia a la compresión media referida al área bruta.

El laboratorio está obligado a reportar \overline{fp} ya que no cuenta con datos para calcular el f^*p si el cliente requiere que lo calcule lo calculará de acuerdo a los siguientes casos:

- ❖ Si el laboratorio contratado por el cliente para obtener el valor de Cp de cierta planta u obra, tiene que tomar por lo menos 30 muestras al azar cada una de cinco especímenes y a razón de dos muestras por semana para hacer el cálculo con los resultados obtenidos. En ningún caso se debe utilizar un valor menor de $Cp=0,10$ donde:

$$f^*p = 0,80\overline{fp}$$

- ❖ Si no existen antecedentes confiables del coeficiente de variación de las piezas se toma 0,35 con lo que el

$$f^*p = 0,53\overline{fp}$$

- ❖ Considerando bajo la responsabilidad del cliente alguno de los tres valores que marcan las normas técnicas complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal:

- $C_p=0,20$ para plantas mecanizadas que evidencien contar con un sistema de control de calidad donde:

$$f^*p = 0,66\overline{fp}$$

- $C_p=0,30$ para plantas mecanizadas que no cuenten con un sistema de control de calidad donde:

$$f^*p = 0,57\overline{fp}$$

- $C_p=0,35$ para piezas de producción artesanal donde:

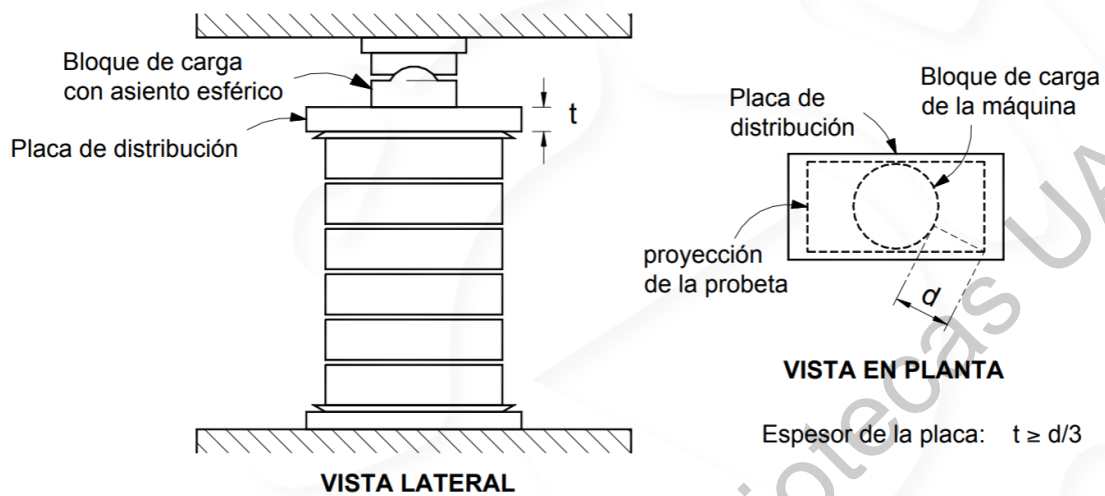
$$f^*p = 0,53\overline{fp} \text{ (NMX-C-404-OONCCE-2005)}$$

1.6.3 NMX- C-464-ONNCCE-2010

Esta de norma mexicana establece los métodos de ensayo para la determinación de la resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante de muretes, así como para la determinación de la resistencia a compresión y del módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla y de concreto. Los valores se deben utilizar en el procedimiento de diseño de estructuras de mampostería.

Se entiende por pila a la probeta formada por la superposición de al menos tres piezas (tabiques o bloques) y con el número suficiente de hiladas para que la relación altura-espesor se encuentre entre 2 y 5. La figura siguiente muestra la forma en que se debe probar el elemento. (NMX-C-464-OONCCE-2010)

Ilustración 2. Prueba a compresión de la mampostería en el laboratorio



Fuente: NMX- C-464-ONNCCE-2010

De la prueba obtienes el módulo elástico de la mampostería, el cual se calcula con la siguiente expresión:

$$E_m = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.0005}$$

(NMX-C-464-OONCCE-2010)

1.7 Caracterización de material

Para clasificar el tipo de suelo con el que se cuenta es necesario realizar una serie de pruebas de laboratorio que permiten agruparlo, por sus características física en una clasificación, en esta investigación, dicha clasificación se llevó a cabo por el método del Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS), para el cual se enlistan las pruebas necesarias para obtener los resultados que permiten realizar la clasificación.

1.7.1 SUCS

La norma ASTM D-2487 describe un sistema de clasificación de suelo mineral y órgano-mineral para los propósitos de ingeniería basados en la determinación del

tamaño de las partículas, el límite líquido y el índice de plasticidad y, debe ser usada cuando la precisión de clasificación es requerida.

Al usar este método, resultará un símbolo de grupo con una sólo letra y un nombre de grupo excepto cuando un suelo contenga de 5 a 12% de finos o cuando los valores del límite líquido y el índice de plasticidad queden dentro del área punteada de la carta de plasticidad mostrada abajo (figura 4.6). En estos dos casos, un símbolo de dos letras será usado, por ejemplo, GP-GM, CL-ML. Cuando los resultados de las pruebas de laboratorio indiquen que el suelo está cercano a otro grupo de clasificación, la condición de la línea de frontera puede ser indicada con dos símbolos separados por una diagonal. El primer símbolo deberá ser el basado en esta normatividad, por ejemplo, CL/CH, GM/SM, SC/CL. Los símbolos de la línea de frontera son particularmente útiles cuando el valor del límite líquido de un suelo arcilloso está cercano a 50. Estos suelos pueden tener características de expansión y el uso de un símbolo de frontera (CL/CH, CH/CL) alertará al asignado de la clasificación de un potencial de expansión. (ASTM D2487, 2000)

Para ser más específicos, la clasificación de los suelos de acuerdo al S.U.C.S. se hace en cuatro principales categorías, cada una de estas categorías usa un símbolo que define la naturaleza del suelo:

- ❖ Suelos de grano grueso: Son de naturaleza tipo grava y arena con menos del 50% pasando por el tamiz N° 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo G para la grava o suelo gravoso del inglés “Gravel” y S para la arena o suelo arenoso del inglés “Sand”.
- ❖ Suelos de grano fino: Son aquellos que tienen 50% o más pasando por el tamiz N° 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo M para limo inorgánico del sueco “mo y mjala”, C para arcilla inorgánica del inglés “Clay”.
- ❖ Suelos orgánicos: Son limos y arcillas que contienen materia orgánica importante, a estos se los denomina con el prefijo O del inglés “Organic”.

Turbas: El símbolo Pt se usa para turbas del inglés “peat”, lodos y otros suelos altamente orgánicos.

Para este sistema de clasificación son también usados sufijos que identifican algunas características particulares del suelo:

- ❖ W = Bien gradado del inglés “Well graded”.
- ❖ P = Mal gradado del inglés “Poorly graded”.
- ❖ L = Baja plasticidad, límite líquido menor a 50%, del inglés “Low plasticity”.
- ❖ H = Alta plasticidad, límite líquido mayor a 50%, del inglés “High plasticity”.

Con los prefijos y sufijos anteriormente mencionados se pueden hacer combinaciones que ayudan a clasificar el suelo de acuerdo a sus características físicas. (Juárez B. E. y Rico R. A, 2005).

En el anexo II se muestra la Carta de plasticidad, Juárez Badilla y Rico Rodríguez Tomo I (2008), Clasificación de Suelos, por la metodología S.U.C.S.

1.7.2 Granulometría

El tamaño de los granos de un suelo se refiere a los diámetros de las partículas que lo forman, cuando es indivisible bajo la acción de una fuerza moderada. Las partículas mayores son las que se pueden mover con las manos, mientras que las más finas por ser tan pequeñas pueden ser observadas con un microscopio.

El análisis granulométrico es la distribución de tamaños de un suelo y normalmente se representa a través de la curva granulométrica. La obtención de la curva granulométrica se hace partiendo de muestras alteradas o inalteradas. La muestra representativa deberá contener por lo menos 500gr de material que pase la malla No. 200 y 300gr que pase la malla No. 4. (CFE Manual de diseño de obras civiles, 1983).

El análisis por mallas consiste en pasar la muestra de suelo a través de mallas cuyas aberturas progresivamente son más pequeñas. Existen mallas básicas las cuales nos permiten diferenciar gravas, arenas y finos, dentro de las cuales están la malla de 3 pulgadas, la malla número 4 (4.76 mm) y la número 200 (0.075 mm). Aquel material retenido en la malla no. 4 se considera grava, el material que pasa la malla no. 200 se consideran finos y el material ubicado entre las dos mallas anteriores se consideran como arenas (Juárez B. E. y Rico R. A, 2005),

Los resultados del análisis por mallas son generalmente expresados en términos de porcentaje total en peso de suelo seco que pasa a través de las diferentes mallas y representados gráficamente a través de la curva granulométrica que nos permite definir los porcentajes de las diferentes fracciones de suelo, como gravas, arenas y finos, además si el suelo se encuentra bien o mal graduado mediante la obtención de los coeficientes de uniformidad (C_u) y de curvatura (C_c) los cuales se definen como sigue:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_c = \frac{D_{30}}{D_{60}D_{10}}$$

Donde:

D_{60} = Tamaño tal, que el 60%, en peso, del suelo, sea igual o menor, D_{10} = Diámetro efectivo; es el tamaño tal que sea igual o menor que el 10%, en peso, del suelo D_{30} = Se define análogamente de los anteriores

La tabla 3 muestra parámetros de comparación que nos permitirán conocer si un suelo se encuentra bien o mal graduado mediante la obtención de los coeficientes de uniformidad y curvatura. Hay que hacer notar que si no se cumplen ambas condiciones se dice que es un suelo mal graduado. (Juárez B. E. y Rico R. A, 2005)

Tabla 3. Coeficientes de uniformidad y curvatura

Clasificación	Coeficientes de uniformidad	Coeficientes de Curvatura
Arena bien graduada	$Cu > 6$	$1 \leq Cc < 3$
Grava bien graduada	$Cu > 4$	$1 \leq Cc < 3$

Fuente: Juárez B. E. y Rico R. A., 2008.

1.7.3 Límites de Atterberg

Las propiedades de un suelo formado por partículas finamente divididas, como una arcilla no estructurada dependen en gran parte de la humedad. El agua forma una película alrededor de los granos y su espesor puede ser determinante del comportamiento diferente del material. Cuando el contenido de agua es muy elevado, en realidad se tiene una suspensión muy concentrada, sin resistencia estática al esfuerzo cortante; al perder agua va aumentando esa resistencia hasta alcanzar un estado plástico en que el material es fácilmente moldeable; si el secado continúa, el suelo llega a adquirir las características de un sólido pudiendo resistir esfuerzos de compresión y tensión considerable. Arbitrariamente Atterberg marcó las fronteras de los cuatro estados en que pueden presentarse los materiales granulares muy finos mediante la fijación de los límites siguientes: líquido (LL), plástico (LP), y de contracción (LC) y mediante ellos se puede dar una idea del tipo de suelo en estudio.

La plasticidad es una propiedad útil para clasificar suelos y tiene relación con las propiedades fisicoquímicas determinantes del comportamiento mecánico de las arcillas (Juárez B. E. y Rico R. A., 2005).

Para la mecánica de suelos, la plasticidad es la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse (Juárez B. E. y Rico R. A., 2005).

La plasticidad no es una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua. Una arcilla muy seca puede tener la consistencia de un ladrillo, con una plasticidad nula, y esa misma, con gran

contenido de agua, puede presentar las propiedades de un lodo semilíquido o, inclusive, las de una suspensión líquida. Entre ambos extremos existe un intervalo del contenido de agua en que la arcilla se comporta plásticamente (Juárez B. E. y Rico R. A., 2005).

Dependiendo de la cantidad de agua se pueden distinguir los siguientes estados de consistencia para un suelo (Juárez B. E. y Rico R. A., 2005):

- ❖ Estado líquido. Cuenta con la apariencia y propiedades de una suspensión, se comporta como un fluido.
- ❖ Estado semilíquido. Cuenta con la apariencia de un gel que se adhiere fácilmente a otras superficies, no es moldeable y no toma la forma del recipiente que lo contiene.
- ❖ Estado plástico. El suelo se comporta plásticamente de acuerdo a la definición de plasticidad.
- ❖ Estado semisólido. El suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aún disminuye de volumen al estar sujeto a secado.
- ❖ Estado sólido. El volumen del suelo no varía con el secado.

Existen además las siguientes fronteras convencionales entre los estados de consistencia anteriormente mencionados:

- ❖ Límite líquido. Es la frontera entre el estado semilíquido y plástico, corresponde a una resistencia al corte de 25 g/cm².
- ❖ Límite plástico. Frontera entre el estado plástico y semisólido.

Al límite líquido y el límite plástico, de manera conjunta se les denomina límites de plasticidad.

Otro parámetro que es muy importante para la clasificación de suelos es el Índice de plasticidad, el cual se define como la diferencia del límite líquido y el límite plástico:

$$PI = LL - LP$$

Donde:

PI = Índice plástico (%) LL = Límite líquido (%) LP = Límite plástico (%)

Límite de contracción.

Es la frontera entre el estado semisólido y sólido, se define como el contenido de agua a partir del cual a través de un proceso de secado ya no sufre cambio alguno de volumen. Para límites de contracción con valores menores a 10 el suelo es peligrosamente expansivo, para valores de 20 a 25% es un suelo muy estable volumétricamente.

Es muy importante la determinación de los límites de consistencia ya que nos permite inferir el comportamiento mecánico e hidráulico de los suelos finos como son las arcillas, ello debido a que la plasticidad del suelo es un reflejo de la presencia de la fracción coloidal del suelo.

Los suelos son susceptibles de sufrir cambios volumétricos cuando se someten a cambios en su contenido de agua, son problemáticos si se usan para rellenos en carreteras o ferrocarriles, o si se utilizan para la cimentación de elementos estructurales. Los cambios de volumen pueden motivar ondulaciones en las carreteras y grietas en las estructuras debido a que los cambios volumétricos usualmente no son uniformes (Juárez B. E. y Rico R. A., 2005).

Determinación del límite líquido.

Del material preparado en el vaso de aluminio, tomar una porción de 150 a 200 g de material y mezclarla en una cápsula de porcelana utilizando una espátula hasta lograr una pasta homogénea.

De esta pasta homogénea, colocar una cantidad suficiente sobre la copa cuidando que no queden burbujas de aire y de tal forma que al enrasar y nivelar la superficie se pueda labrar con el ranurador un corte a lo largo de aproximadamente 4 cm.

El material debe ser extendido desde el centro hacia los lados y quedando una superficie horizontal de aproximadamente 8 mm de espesor a partir de punto más profundo de la copa de Casagrande, (ASTM D 4318, 2005).

El límite líquido se define como el contenido de agua que tiene un suelo sí al ser colocado sobre la Copa de Casagrande la ranura que se hace sobre el suelo se cierra una longitud de 13 mm ($1\frac{1}{2}$ ") a 25 golpes (dados a razón de 2 golpes por segundo). Para tener una buena precisión en la determinación de este parámetro, la norma específica recomienda que se ensaye un suelo con diferente consistencia, 4 ó 5 determinaciones entre 6 y 35 golpes, y se determina el número de golpes y contenido de agua cuando la ranura se cierre una longitud de 13 mm ($\frac{1}{2}$ "). Con el número de golpes y su contenido de agua correspondiente, se hace un gráfico semilogarítmico o curva de fluidez que nos permitirá determinar el límite líquido con mayor precisión (ASTM D 4318, 2005).

Con los resultados de humedad y número de golpes se traza la curva de fluidez y se determina exactamente el límite líquido, o sea, la humedad correspondiente a los 25 golpes.

1.7.4 Ensaye AASHTO

Esta prueba permite determinar la curva de compactación de los materiales para terracerías y a partir de ésta inferir su masa volumétrica seca máxima y su contenido de agua óptimo. Consisten en determinar las masas volumétricas secas de un material compactado con diferentes contenidos de agua, mediante la aplicación de una misma energía de compactación en prueba dinámica y, graficando los puntos correspondientes a cada determinación, trazando la curva de compactación del material.

Existen dos variantes de la prueba, la estándar y la modificada, que difieren en la energía de compactación, materiales y procedimiento. A continuación, se enlistan las diferencias expuestas en tablas 2 y 3 de la norma M-MMP-1-09/06:

Tabla 4. diferencias entre prueba estándar y modificada.

Tipo de prueba	Estándar	Modificada
Masa del pistón, kg	2,5 \pm 0,01	4,5 \pm 0,01
Número de capas de la materia	3	5
Diámetro del pistón, mm	50,8	50,8
Altura de caída del pistón, mm	30,5 \pm 0,1	45,7 \pm 0,1

Fuente: M-MMP-1-09/06.

Se puede encontrar en el anexo A. I una muestra del formato en el cual se colocan los resultados obtenidos de la prueba y la gráfica resultante para obtener el contenido humedad óptimo del suelo

Capítulo 3

3. Metodología

Dirección General de Bibliotecas UAQ

3.1. Investigación

El sector de los bloques de Tierra Comprimida es bastante amplio por lo que fue importante iniciar por abastecerse de información con las investigaciones previas, sus metodologías y resultados. En varios países se ha estudiado a los BTC y hay mucha información al respecto de modo que el objetivo principal fue adoptar las técnicas y pruebas de las investigaciones que más se asemejan al proyecto.

3.2. Muestreo

Para establecer el sitio que fungió como banco de material se realizó una investigación de los lugares en construcción de la zona metropolitana del Estado de Querétaro y se encontró un condominio en proceso de excavación en el fraccionamiento Zákia ubicado en el municipio de El Marqués, Querétaro. Como primera instancia se contactó a la empresa Urbana México, encargada del desarrollo del fraccionamiento, así fue como se proporcionó el contacto del ingeniero Jerónimo Nieto, encargado de la obra. Se procedió a hacer la solicitud de acceso a la zona así como la extracción del material excavado, los trámites de acceso constaron de dos citas con el Ingeniero Jerónimo, quien accedió, otorgando el permiso de extracción del material.

La recolección del material se realizó del primer metro de suelo suelto previamente excavado por la constructora, evitando extraer la materia orgánica de la superficie y almacenándolo en costales para ser manipulado posteriormente. Se delimitó la zona de extracción de material, así se evitó la contaminación del suelo con rellenos provenientes de otros bancos.

Ilustración 3. Recolección de la muestra a estudiar



Fuente: Propia

Ilustración 4. Predio de recolección de suelo en Zákia, Qro.



Fuente: Propia

Ilustración 5. Suelo recolectado en saco.



Fuente: Propia

3.3. Clasificación del Material

Con el fin de conocer y clasificar el suelo, se realizaron las pruebas geotécnicas requeridas por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS), es decir, Granulometría y Límites de consistencia. Como el proyecto requiere la compactación del suelo se realizó la Prueba Proctor para obtener la humedad óptima de compactación.

3.3.1. Granulometría

Materiales

Los materiales necesarios son los siguientes: 400 gr. de suelo, malla No. 4, malla No. 200, charola redonda (del tamaño de las mallas), báscula de 2.5kg, horno, flanera, vaso de aluminio y varilla punta de bala.

Procedimiento

1. Se toma la muestra representativa del material (300gr), los cuales se colocan en el vaso de aluminio adicionándole agua para posteriormente someterlos al fuego y así ebullición la mezcla durante 15 minutos.

Ilustración 6. Ebullición del material saturado.



Fuente: Propia

2. Con el material restante se obtiene el testigo de humedad, colocándolo en una flanera previamente pesada y marcada.

Ilustración 7. Obtención del peso del testigo de humedad



Fuente: Propia

3. Se procede a colocar la malla 4 sobre la 200 para lavar el material con agua abundante. Se prosigue hasta que el agua que salga por las mallas sea cristalina.

Ilustración 8. Lavado de material para eliminar finos de arenas



Fuente: Propia

4. Se coloca el material retenido en las mallas 4 y 200 en flaneras previamente pesadas y marcadas para ser identificadas, se vuelven a pesar con el material y se colocan en el horno, lugar en el cual se dejarán 24 horas.

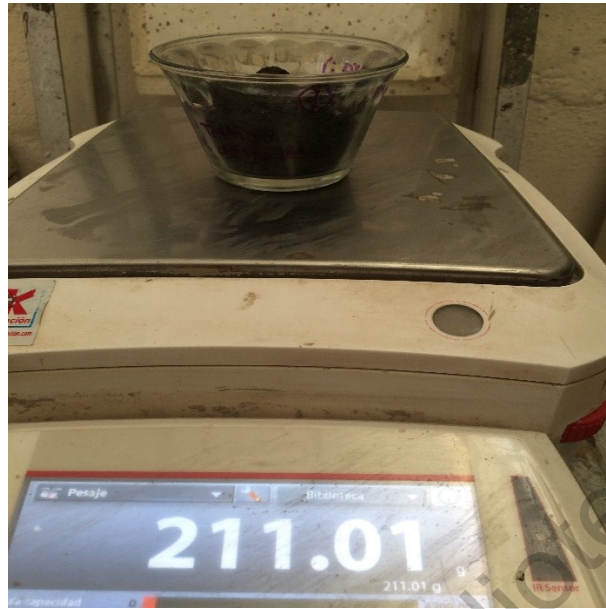
Ilustración 9. Colocación de muestras en horno para eliminar humedad.



Fuente: Propia

5. Se lleva a pesar el material seco, obteniéndose las cantidades de material que se tiene de gravas (retenido en la malla no. 4) y arenas (retenido en la malla no. 200), por diferencia de masas y corrección por humedad se obtiene la cantidad de material fino presente en la muestra.

Ilustración 10. Peso de suelo seco.



Fuente: Propia

3.3.2. Límites de Atterberg

Materiales

Se utilizará el siguiente material: vaso de aluminio, mortero, copa de Casagrande, espátula, cuchillo, flaneras, estufa, placa de vidrio, regla.

Procedimiento

1. Se obtiene una pequeña porción del suelo muestreado.

Ilustración 11. Muestra de Suelo tomada.



Fuente: Propia

2. Se procede a calentar en la estufa el suelo y se lleva a disgregar con el mortero.

Ilustración 12. Vaso de aluminio con suelo



Fuente: Propia

3. Se disgrega el suelo en el mortero hasta obtener aproximadamente 500gr de suelo que pasa la malla n°40.
4. El suelo se satura por 24 horas para poder usarlo dejándose en un vaso de aluminio tapado con plástico adherible para que la misma humedad se conserve en toda la muestra.

Ilustración 13. Muestra saturada por 24 hrs.



Fuente: Propia

5. Al día siguiente se homogeniza bien la mezcla y se saca el material para realizar las pruebas de límites de consistencia.
6. Para el límite líquido se usa la copa de Casagrande, se calibra la copa verificando que de 120 golpes en 1 minuto y que la altura de los golpes sea de 1 cm.

Ilustración 14. Calibración de copa Casagrande.



Fuente: Propia

7. Se coloca un poco de suelo preparado en una capsula de porcelana, ya calibrada la copa se pone el suelo dentro de manera uniforme y se realiza una división con la herramienta.

Ilustración 15. Muestra de material mezclado en capsula de porcelana.



Fuente: Propia

Ilustración 16. Ranura en copa de casa grande.



Fuente: Propia

8. Se pone a funcionar la copa y se cuentan los golpes hasta que la ranura se cierre 13mm esto con ayuda de la herramienta de la copa.

Ilustración 17. Unión de suelo posterior a golpes.



Fuente: Propia

9. Se anota el número de golpes y en una flanera se coloca la muestra para sacar un testigo de humedad.

Ilustración 18. Secado al horno de testigos de humedad.



Fuente: Propia

Ilustración 19. Toma de Testigos de humedad.



Fuente: Propia

10. Como siguiente se añade más agua a la muestra, se mezcla y se realiza el mismo procedimiento.
11. Este procedimiento se realiza para obtener 3 valores superiores y 3 inferiores a 25 golpes y buscando obtener un resultado con 25, esto se obtiene añadiendo agua o suelo para variar su contenido de agua, para así tener 7 resultados.
12. En todos los casos se anota el número de golpes y se toma un testigo de humedad de cada ensaye, con estos datos se realiza la curva de fluidez.
13. El siguiente análisis que se realiza, es la obtención del límite de plasticidad. Con el mismo material que se encuentra saturado, se toman aproximadamente 20gr de muestra y se extiende sobre una placa de vidrio para que acelerar la pérdida de humedad.

Ilustración 20. Secado de suelo en placa de vidrio.



Fuente: Propia

14. Después se recolecta y moldea un poco para hacer rollitos de suelo con un diámetro aproximadamente de 3.2mm. Si al hacer estos rollitos de ese diámetro exactamente el empiezan a fisurarse, se ponen 6 gr de estos rollitos ya fisurados sobre una flanera y se obtiene la humedad. Esto se

realiza porque el límite plástico ocurre en el momento donde el material empieza a presentar grietas, dejando de lado el estado plástico para pasar a semisólido. Hay que tener cuidado de que los rollitos se tengan listos en un lapso de tiempo pequeño, ya que de no hacerlo la humedad original con la que se hicieron las fisuras cambiaría y por ende se tendrían errores en el procedimiento.

Ilustración 21 Realización de rollitos de suelo.



Fuente: Propia

Ilustración 22. Muestra de rollitos de suelo en punto requerido.



Fuente: Propia

15. Una vez realizados los puntos anteriores y efectuando los cálculos correspondientes se tiene determinados los límites de consistencia (líquido, plástico e índice de plasticidad), para así poder determinar la clasificación del suelo por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

3.3.3. Ensaye AASHTO

La prueba Proctor se realizó en la variante estándar, la cual consiste en compactar el suelo en tres capas dentro de un molde rígido metálico con 25 golpes por capa, de un pisón que pesa 2.5 kg y el cual se deja caer libremente desde una altura de 30.5 cm, dichos golpes son repartidos uniformemente en el área del cilindro. La Energía Específica de compactación es de $6 \text{ (kg}\cdot\text{cm)/cm}^3$.

Materiales

El equipo necesario para realizar este ensaye consiste en un Molde de Compactación Proctor constituido por un cilindro metálico de 10.16 cm de diámetro interior, 11.43 cm de altura y una extensión de 5 cm de altura; un Pisón metálico de

2.5 kg, guía metálica de forma tubular de 35 cm de largo, balanza, Regla metálica, Horno, Malla No.4, Cucharón, Charolas, Espátulas y Flaneras.

Procedimiento

1. Se pasa el material muestreado por la malla No. 4 y se forman cinco grupos del suelo de 3 kg cada uno.

Ilustración 23. Cribado de material por malla No.4



Fuente: Propia

2. Se pesa el molde de AASHTO estándar y después se coloca la extensión de 5 cm.

Ilustración 24. Peso de molde prueba AASHTO.



3. En una charola se coloca una porción de suelo y se le agrega agua. Se mezcla hasta homogeneizar toda la muestra, este procedimiento se realiza al menos 4 veces con diferentes cantidades de agua y el material se deja reposando por 24 horas para que la humedad sea constante en todo el material y en cada muestra representativa.

Ilustración 25. Humectación y homogeneización del suelo.



4. Una vez teniendo la muestra preparada con las diferentes humedades en el molde se vierte una tercera parte de la muestra procurando que la capa quede distribuida en todo el molde.

Ilustración 26. Vaciado de suelo en molde.



Fuente: Propia

5. Con el pisón se dan 25 golpes, esto significa que para cada golpe se coloca el pisón sobre un área de la muestra, se levanta hasta llegar al tope de la guía (30.5 cm) y se deja caer sobre la misma muestra. Los 25 golpes se distribuyen uniformemente en toda el área.

Ilustración 27. Compactación de primera capa con pisón.



Fuente: Propia

6. Antes de agregar la siguiente capa y realizar el mismo procedimiento se genera rugosidad en la superficie de la capa anterior con ayuda de las espátulas raspando en diferentes direcciones y con una profundidad aproximada de 1 a 2 mm.
7. Se repiten los procedimientos 4, 5 y 6 para una segunda y tercera vez.
8. Se retira la extensión de 5 cm, se enrasa la muestra con la regla metálica para eliminar el suelo sobresaliente con movimientos ligeros para no generar

desprendimientos y se limpia cualquier exceso o residuo que quedara en la parte exterior del molde.

Ilustración 28. Enrasado de muestra con regla metálica.



Fuente: Propia

9. El molde con la muestra de suelo se pesa y se registra.

Ilustración 29. Pesado de molde con suelo compactado.



Fuente: Propia

10. Se desmonta el molde para poder tomar una muestra del suelo compactado, la cual se pone en una flanera, se pesa y se coloca dentro del horno por 24 horas.

Ilustración 30. Colocación de testigos de humedad en horno.



Fuente: Propia

11. El procedimiento se repite para las otras cuatro muestras de suelo, con la diferencia que a cada muestra se agregó más agua que a la muestra anterior.
12. Pasadas las 24 horas se sacan las muestras del horno, se pesan y se registran los datos en la hoja de registro AASHTO, la cual se anexa en los resultados.
13. Las gráficas para la obtención de la humedad óptima se obtuvieron de las siguientes expresiones:

$$\omega_{\%} = \frac{W_m}{W_s} * 100$$

$$\gamma_m = \frac{W_m (\text{Peso del suelo} - \text{peso del molde})}{\text{Volumen del molde}}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{(1 + \omega)}$$

Donde:

W_m = Peso húmedo del suelo

W_s = Peso seco del suelo

γ_m = Peso volumétrico del suelo húmedo

γ_d = Peso volumétrico del suelo seco

$w\%$ = Porcentaje de agua

3.4. Preparación de la muestra

El material muestreado en campo contenía partículas de gravas que dificultarían el manejo del mismo, por ello se decidió cribarlo por la malla No.4. También fue necesario disgregar el material hasta que pasara por la malla No.40, ya que mostraba adherencia entre sus partículas aún en ausencia de agua; para el disgregado se trató con un molino de mano convencional. Para la presente investigación es fundamental que la muestra contenga la menor cantidad de materia orgánica y que se trate de evitar la capa orgánica y superficial del terreno de muestreo que contiene una gran cantidad de raíces.

3.5. Selección de fibras

En asesoría de investigadores de la Facultad de Ingeniería, en la línea de investigación de nuevos materiales se plantearon dos opciones de fibras a emplear en los bloques, Estiércol y Acícula de pino, las cuales se recolectaron en una ranchería de Santa Rosa Jáuregui y en las instalaciones del Centro Universitario UAQ, respectivamente. Esto fue en pro del aprovechamiento del estiércol de vaca, siendo éste un material natural que principalmente ha sido empleado como abono y desecho, pero que por diversas investigaciones se tiene fundamentado que puede ser utilizado dentro de la rama de la construcción; en el caso del pino se

contempló usarlo como material para la construcción porque actualmente no se logra un aprovechamiento de las ramas caídas, lo cual solo ha sido considerado hasta el momento como basura en el entorno.

Para la presente investigación y para poder conocer cuál de las fibras tendría el mejor comportamiento con el suelo muestreado y en estudio se elaboraron dos especímenes por cada una.

El porcentaje de fibra colocado en cada muestra fue del 12% del peso del suelo, este porcentaje se eligió debido a que proporcionaba trabajabilidad de la mezcla.

Dirección General de Bibliotecas UNO

Ilustración 31. Fibras de pino recolectadas en la Universidad Autónoma de Querétaro.



Fuente: Propia

Ilustración 32. Zona de recolección de estiércol de vaca.



Fuente: Propia

Ilustración 33. Estiércol de vaca para BTC.



Fuente: Propia

3.6. Dimensionamiento de molde

Para la obtención del molde, fue necesario buscar el material adecuado, la primer versión de este fue de dimensiones 30 x 15 x 8 cm, elaborado de madera, en el cual se colocó la mezcla de suelo, agua y fibra. El molde elaborado de madera resistió únicamente estas 4 pruebas; dado que sufrió deformaciones debido a la presión del suelo, por lo cual se optó por la elaboración de un molde metálico con las mismas dimensiones para las pruebas definitivas.

Ilustración 34. Molde de BTC elaborado con madera de pino.



Fuente: Propia

Ilustración 35. Base de molde para BTC elaborada de pino.



Fuente: Propia

Ilustración 36. Molde y Bloque metálico para pruebas finales.



Fuente: Propia

Ilustración 37. Piezas de molde metálico.



Fuente: Propia

3.7. Pruebas preliminares

La mezcla se compactó con ayuda de una Máquina Universal marca Forney de capacidad 180 toneladas, ubicada en el Laboratorio de Geotecnia, Materiales Y Geomática de la Facultad de Ingeniería (UAQ), el parámetro de compactación fue en función de que los bloques tuvieran una altura de 8 cm. Posteriormente se desmoldaron y se dejaron secar en un lugar cerrado donde no existen cambios bruscos de temperatura y humedad por 28 días. Durante la elaboración el agua agregada se controló en función de la trabajabilidad de la mezcla, y también se realizó una inspección visual donde se evaluó el agrietamiento y la facilidad de disgregación al tacto para la selección de la fibra más adecuada.

Ilustración 38. Bloque elaborado con estiércol de vaca.



Fuente: Propia

Ilustración 39. Bloque elaborado con fibras de pino.



Fuente: Propia

Las proporciones de la mezcla para los tabiques fueron 4 kg de material procedente de banco, 12% de fibra respecto al peso del suelo y la cantidad de agua necesaria para que la mezcla adquiriera una buena trabajabilidad.

En la realización de los especímenes se aprecia que la fibra de pino absorbe una gran cantidad de agua, lo que provoca un agrietamiento notorio sobre los bloques y provoca una menor resistencia ante las cargas de sometimiento, lo cual dio pauta a descartar el uso de fibras de pino y a que esta investigación se enfocara en el uso de estiércol como fibra para los bloques definitivos.

3.8. Elaboración de los BTC

Una vez conocidos los materiales y teniendo el molde optimo se elaboraron en total 15 Bloques.

- 4 bloques para ensayar a 7 días.
- 4 bloques para ensayar 14 días.

- 4 bloques para ensayar a 28 días.
- 3 bloques de 28 días para obtener un ensaye sobre pila.

Esto con la intención de probar 2 bloques a compresión y 2 bloques de acuerdo al Método de prueba estándar para determinar la resistencia a la flexión del concreto en vigas para cada tiempo de curado, así como 3 bloques para hacer una pila de acuerdo a las normativas aplicables a mampostería. La elaboración de todos los bloques se hizo con mezclas de los mismos materiales y con las mismas proporciones, es decir, 16.4 kg de Suelo, 1.97 kg de fibra (12% del peso del suelo) y 3600 ml (22% del peso del suelo) de agua. Las proporciones se obtuvieron de la siguiente manera:

- ❖ Se llenó el molde con suelo sin compactar y se pesó, de ese peso se colocó el 50% extra, es decir, cada bloque tiene 1.5 veces el peso del suelo suelto del volumen del molde.
- ❖ La humedad óptima para cada bloque se obtuvo con la prueba AASHTO en su variante estándar, siendo un 22% del peso sin fibra.
- ❖ De fibra se agregó el 12% de material respecto al peso del suelo compactado aún sin adición de agua.

El molde de madera se sustituyó por un molde metálico de dimensiones 30 x 15 x 8 cm ya que presentaba mayor resistencia a las presiones ejercidas por la Máquina Universal. Previo a la elaboración de los bloques se engrasó el molde con aceite para carro para facilitar el desmontaje, después la mezcla se vertió dentro del molde y se comprimió lentamente hasta que el bloque tuviera 8 cm de altura por lo que se obtuvieron bloques con dimensiones aproximadas de 15 x 29 x 8 cm, se separó el espécimen del molde, se colocó sobre una tabla de madera, se etiquetó y metió a la cámara de curado del Laboratorio de Geotecnia, Materiales y Geomatica de la UAQ. El procedimiento se realizó de la misma forma para cada uno de los 15 bloques hechos y se registró la presión ejercida por la Máquina Universal.

Ilustración 40. Elaboración de bloque con molde metálico y prensa hidráulica.



Fuente: Propia

3.8.1. Curado de BTC

Se mantuvo una supervisión visual diaria de los bloques y a los 3 días se observó agrietamiento superficial por lo que se optó por dar rehidratación en 3 ocasiones, la rehidratación se dio con pisetas y masajeando ligeramente la superficie de los bloques. Adicional a esto se colocaron franelas húmedas sobre los bloques para disminuir la rapidez en la pérdida de humedad.

Ilustración 41. Acabado en bloque al ser elaborado.



Fuente: Propia

Ilustración 42. Agrietamiento en Bloques al segundo día de elaboración.



Fuente: Propia

Ilustración 43. Humectación de bloques con piseta.



Fuente: Propia

3.9. Elaboración de Pila

Para conocer el comportamiento y resistencia de los BTC en una pila se elaboró una siguiendo la metodología de la Norma Mexicana NMX-ONNCCE-464-2010, usando una Mezcla de suelo y agua, y apilando 3 bloques. El tiempo de reposo fueron 28 días para los bloques y 28 días más para la pila.

Ilustración. 44 Vista 1 de pila.



Fuente: Propia

Ilustración 45. Vista 2 de pila.



Fuente: Propia

3.10. Ensayos

3.10.1. Ensayo a compresión

Una vez elaborados los especímenes y cumplido el tiempo de reposo. Se realiza el ensayo de 6 bloques a compresión, dos de cada tiempo de curado, siguiendo la metodología de la norma NMX-C-036-ONNCCE-2004

Esta prueba se realiza con la misma máquina universal del laboratorio de suelos. Al final de cada ensayo se tomó la presión ejercida por la máquina universal que provocó la falla del espécimen, así como la deformación transversal sufrida. Adicional a esto se tomó un testigo de humedad para conocer la humedad contenida por el bloque al momento de ensayarse.

Ilustración 46. Ensayo de compresión en bloques, con medición de deformación.



Fuente: Propia

Ilustración 47. Falla lateral de bloques ensayados.



Fuente: Propia

Ilustración 48. Vista inferior de falla de bloques.



Fuente: Propia

3.10.2. Ensaye a flexión

Siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C 78 – 09, se probaron especímenes a flexión. Los dos bloques con 7 días de curado se probaron con la máquina universal, sin embargo, los bloques resistieron presiones muy bajas que la máquina no pudo registrar, de modo que los ensayos de los dos bloques a 14 días y los dos a 28 días se realizaron con Máquina Marshall anillo 50KN del laboratorio de suelos con una constante 4.431. De cada bloque se registró el valor marcado por el manómetro de la máquina y se tomó una muestra para los testigos de humedad.

Los cálculos para obtener la resistencia a la flexión de cada bloque se realizaron multiplicando la constante de la Máquina Marshall anillo 50KN de manera mecánica y el número de líneas marcadas por el manómetro.

Ilustración 49. Ensayo a flexión.



Fuente: Propia

Ilustración 50. Falla a flexión en bloques.



Fuente: Propia

3.10.3. Ensayo de Pila

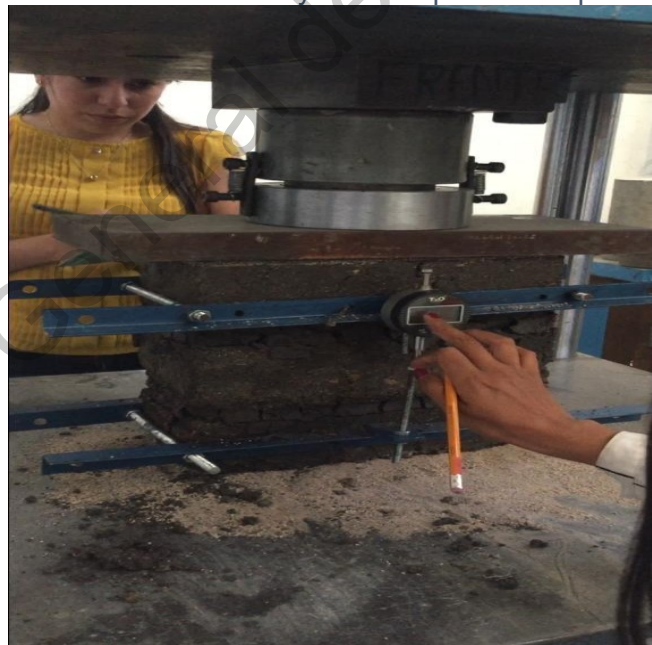
El ensayo de pila se realizó a los 28 días de haberse construido, siguiendo el procedimiento de ensayo marcado por la Norma Mexicana NMX-ONNCCE-464-2010, el cual consiste en ensayar el elemento a compresión, midiendo las deformaciones que se presentan debido a las fuerzas que se ejercen. Es importante mencionar que no se apegó totalmente a la norma y fue suficiente ensayar solamente un elemento para observar el comportamiento del material como mampostería. El procedimiento se llevó a cabo con ayuda de la máquina universal para ejercer la presión sobre la pila.

Ilustración 51. Colocación de pila en base de arena.



Fuente: Propia

Ilustración 52. Ensaye de compresión de pila.



Fuente: Propia

Capítulo 4

4. Resultados

Dirección General de Bibliotecas UAQ

4.1. Clasificación del Suelo

El material se clasificó como un limo de alta compresibilidad (MH) acorde al anexo A.3

4.1.1. Granulometría

En la tabla siguiente se muestran los porcentajes de finos, gravas y arenas, con un 70.58% de finos, con lo que se sabe que es un suelo fino (limos o arcillas).

Tabla 5. Obtención de la granulometría del material

PORCENTAJES DE MATERIAL	
Finos (%)	70.58
Arenas (%)	19.30
Gravas (%)	10.12

4.1.2. Porcentaje de humedad natural del suelo

La humedad natural del suelo fue de un 11.42%, su obtención se muestra en la siguiente tabla, calculada con la siguiente expresión:

$$w(\%) = \frac{\text{peso humedo de la muestra}(gr) - \text{peso seco de la muestra}(gr)}{\text{peso seco de la muestra}(gr)} \times 100$$

Tabla 6 Obtención del porcentaje de humedad del suelo.

TESTIGO DE HUMEDAD						
Flanera	Peso de la flanera	Peso Flanera + Muestra humedad (gr)	Peso Flanera + Muestra seca (gr)	Peso de la muestra humedad (gr)	Peso de la muestra seca (gr)	W(%)
1	121.25	221.25	211	100	89.75	11.42

4.1.3. Limite plástico

Al realizar la metodología para obtener el límite plástico, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 7.

Tabla 7. Obtención del límite plástico.

LIMITE PLASTICO		
Flanera+mh	Flanera+ms	Flanera
131.51	129.56	125.30

$$LP = 45.77$$

ms = muestra seca

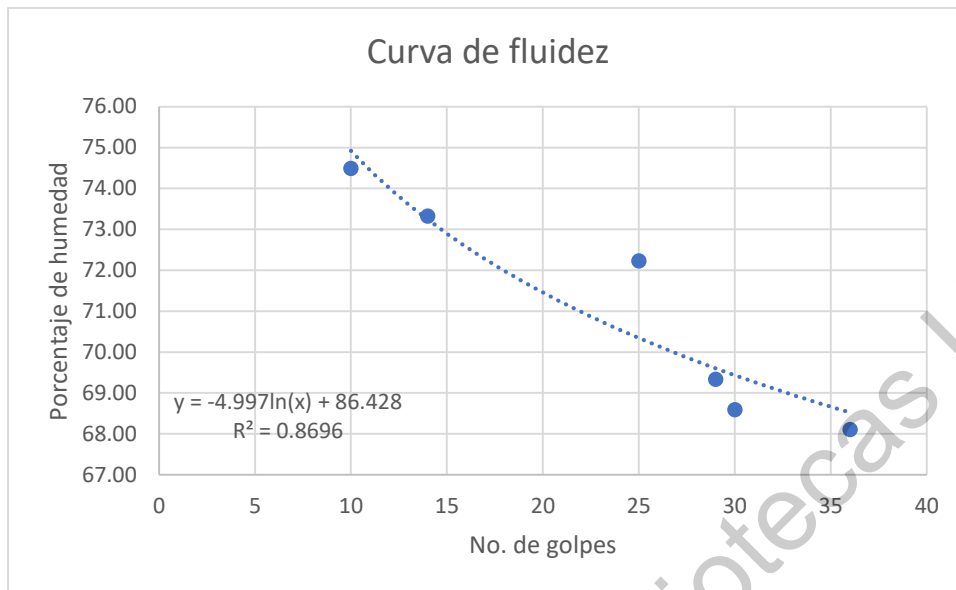
mh = muestra húmeda

4.1.4. Limite líquido

Al realizar el procedimiento de La Copa de Casagrande, se graficó lo siguiente, obteniendo así El Límite Líquido igual a 72.23%. La función obtenida se expresa en la gráfica 1.

Tabla 8. Obtención del límite líquido.

LIMITE LIQUIDO						
Flanera	Peso de la flanera	Peso Flanera + Muestra húmeda	Peso Flanera + Muestra seca	Ww (g)	Porcentaje de humedad W(%)	No. Golpes
1	125.42	161.26	145.96	15.30	74.49	10
2	119.04	150.88	137.41	13.47	73.33	14
4	127.55	147.48	139.43	8.05	67.76	19
5	124.46	144.06	136.13	7.93	67.95	25
6	117.28	136.77	128.79	7.98	69.33	29
3	111.71	143.64	130.65	12.99	68.59	30
7	123.41	145.65	136.64	9.01	68.10	36



Gráfica 1 Curva fluidez.

Obteniendo el límite líquido a partir de sustituir los 25 golpes dentro de la expresión mostrada en la gráfica se obtuvo el siguiente resultado:

$$LL = 70.34$$

Para la obtención del Índice de plasticidad se siguió la siguiente expresión

$$IP = LL - LP$$

$$IP = 24.57$$

En base a la clasificación SUCS podemos catalogar el suelo como MH, Limo de Alta Compresibilidad.

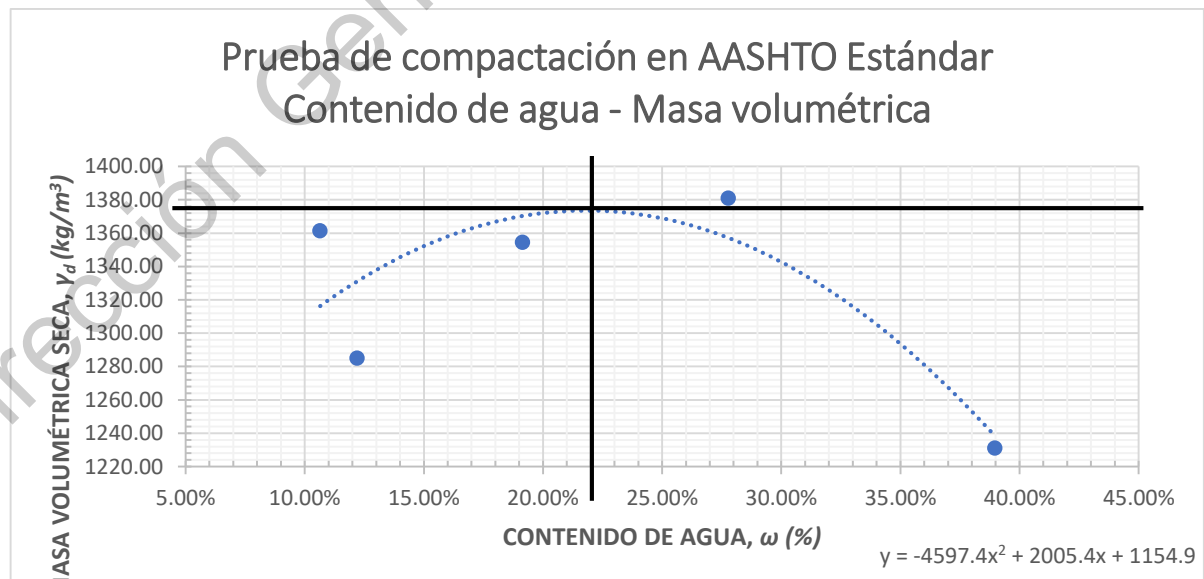
4.2. Ensayo AASHTO estándar

Los datos obtenidos de las 5 muestras de compactación se registraron en la siguiente tabla, al igual que los resultados de las operaciones realizadas con las fórmulas previamente dadas.

Tabla 9. Registro de datos para ensayo AASHTO

REGISTROS PROCTOR						
Número de ensayo		1	2	3	4	5
Contenido de agua	Flanera número:	-	-	-	-	-
	Peso de flanera (g):	-	-	-	-	-
	Peso flanera+suelo húmedo (g):	-	-	-	-	-
	Peso flanera+suelo seco (g):	-	-	-	-	-
	Peso suelo húmedo, w_m (g):	85,4	63,6	57	71,85	95,66
	Peso suelo seco, w_s (g):	76,11	57,48	47,84	56,23	68,84
	Contenido de agua, ω (%):	12,21%	10,65%	19,15%	27,78%	38,96%
Masa volumétrica	Peso del molde (g)	3760	3760	3760	3760	3760
	Peso del molde+suelo húmedo (g)	5100	5160	5260	5400	5350
	Peso del suelo húmedo (g):	1340	1400	1500	1640	1590
	Masa volumétrica húmeda, γ_m (g/cm ³)	1441,83	1506,39	1613,99	1764,63	1710,83
	Masa volumétrica seca, γ_d (g/cm ³)	1284,98	1361,44	1354,62	1381,00	1231,17

Una vez calculados el contenido de agua y la masa volumétrica seca de cada muestra de suelo se graficaron para obtener la ecuación de la curva que mejor se adapte a los datos y así conocer el porcentaje de agua que produce la mejor compactación, lo anterior se hizo encontrando el punto más alto de la curva y posteriormente sustituyendo este valor en la ecuación arrojada por el programa Excel, donde “y” es la masa volumétrica seca y “x” el contenido de agua.



Gráfica 2 Gráfica de prueba Proctor Estándar

$$y = -4597.4x^2 + 2005.4x + 1154.9$$

El punto más alto en la gráfica es 1373.59 kg/m^3 que al sustituir en la ecuación y resolver respecto a "x" se tiene un 22% de contenido de agua, por lo tanto, el contenido de agua óptimo para tener la máxima compactación es del 22% y a su vez, la masa volumétrica máxima que puede tener el suelo muestreado es de 1373.59 kg/m^3 .

4.3. Resultados previos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de compresión simple en los especímenes A1, A2 y A3, los cuales fueron hechos a base de dos distintas fibras, con las proporciones que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 10. Propiedades de especímenes previos a pruebas finales.

RESUMEN DE PROPIEDADES DE ESPECÍMENES ANTES DE SER PROBADOS			
Especimen	A1	A2	A3
Fibra	Estiércol	Estiércol	Pino
% de fibra	12	12	12
Carga de compresión (KN)	21	8.93	26.79
Masa (KG)	4760	4760	4760
Volumen (cm3)	3331.6	3509.93	4142.29
Peso vol. (kg/cm3)	1.42874295	1.3561524	1.14912283
W (%)	29.46	29.86	29.73

Las pruebas a compresión de los bloques presentaron los siguientes resultados:

En el espécimen A1, se obtuvo una resistencia a la compresión de 20.26 kg/cm^2 y una deformación de 6.67 mm con este esfuerzo.

Tabla 11 Resultados a compresión Bloque A1 (resultados previos).

PRUEBAS A COMPRESIÓN			
Bloque A1 28 días			
Esfuerzo (Kg/cm ²)	Carga (Kg)	Carga (KN)	Deformación (mm)
4.13622016	1799.7705	17.65	2.2
4.81348227	2094.4638	20.54	2.5
6.32736229	2753.19	27	3.75
7.11476737	3095.8092	30.36	3.8
7.74281667	3369.0888	33.04	3.96
8.15995388	3550.5954	34.82	4
8.36852249	3641.3487	35.71	4.1
8.78800318	3823.875	37.5	4.23
8.97313711	3904.4313	38.29	4.3
9.60821681	4180.77	41	4.3
9.83318969	4278.6612	41.96	4.4
10.0441018	4370.4342	42.86	4.4
10.2526704	4461.1875	43.75	4.45
10.461239	4551.9408	44.64	4.5
11.0892883	4825.2204	47.32	4.6
11.508769	5007.7467	49.11	4.66
11.7173376	5098.5	50	4.69
12.1368183	5281.0263	51.79	4.78
12.3453869	5371.7796	52.68	4.86
12.7625241	5553.2862	54.46	4.97
13.6014854	5918.3388	58.04	5
13.8100541	6009.0921	58.93	5.1
14.0186227	6099.8454	59.82	5.16
14.4381034	6282.3717	61.61	5.22
14.8552406	6463.8783	63.39	5.33
15.2747213	6646.4046	65.18	5.32
15.6918585	6827.9112	66.96	5.44
15.9027705	6919.6842	67.86	5.6
16.3199078	7101.1908	69.64	5.64
16.7393885	7283.7171	71.43	5.7
16.9479571	7374.4704	72.32	5.8
17.1565257	7465.2237	73.21	5.86

17.3674377	7556.9967	74.11	5.9
17.5760064	7647.75	75	5.9
17.784575	7738.5033	75.89	5.99
Esfuerzo (Kg/cm2)	Carga (Kg)	Carga (KN)	Deformación (mm)
17.995487	7830.2763	76.79	6.02
18.2040556	7921.0296	77.68	6.1
18.6211929	8102.5362	79.46	6.13
18.8321049	8194.3092	80.36	6.2
19.0406735	8285.0625	81.25	6.2
19.6007623	8528.7708	83.64	6.34
19.8679176	8645.0166	84.78	6.38
20.2686505	8819.3853	86.49	6.67
10.8947805	4740.5853	46.49	6.7

En el espécimen A2, se obtuvo una resistencia a la compresión de 4.65kg/cm² y una deformación de 9.66 mm con este esfuerzo.

Tabla 12 Resultados a compresión Bloque A2 (resultados previos).

PRUEBAS A COMPRESIÓN			
Bloque A2 28 días			
Esfuerzo (Kg/cm2)	Carga (Kg)	Carga (KN)	Deformación (mm)
0.20167798	90.7533	0.89	1.3
0.40562201	182.5263	1.79	1.8
0.6073	273.2796	2.68	2.1
0.80897798	364.0329	3.57	2.3
1.21459999	546.5592	5.36	2.4
1.41627798	637.3125	6.25	2.8
1.61795596	728.0658	7.14	2.9
1.64061641	738.2628	7.24	2.97
1.88761529	849.4101	8.33	3.25
2.22525596	1001.3454	9.82	3.57
2.38161304	1071.7047	10.51	3.7
2.63087797	1183.8717	11.61	3.81
3.03423394	1365.3783	13.39	3.99
3.23817796	1457.1513	14.29	4.62
3.43985595	1547.9046	15.18	4.99
3.64153393	1638.6579	16.07	5.06
3.84321192	1729.4112	16.96	5.73
4.04715594	1821.1842	17.86	6.09
4.24883393	1911.9375	18.75	6.4

4.45051191	2002.6908	19.64	6.5
4.65445594	2094.4638	20.54	8
4.65445594	2094.4638	20.54	9.66

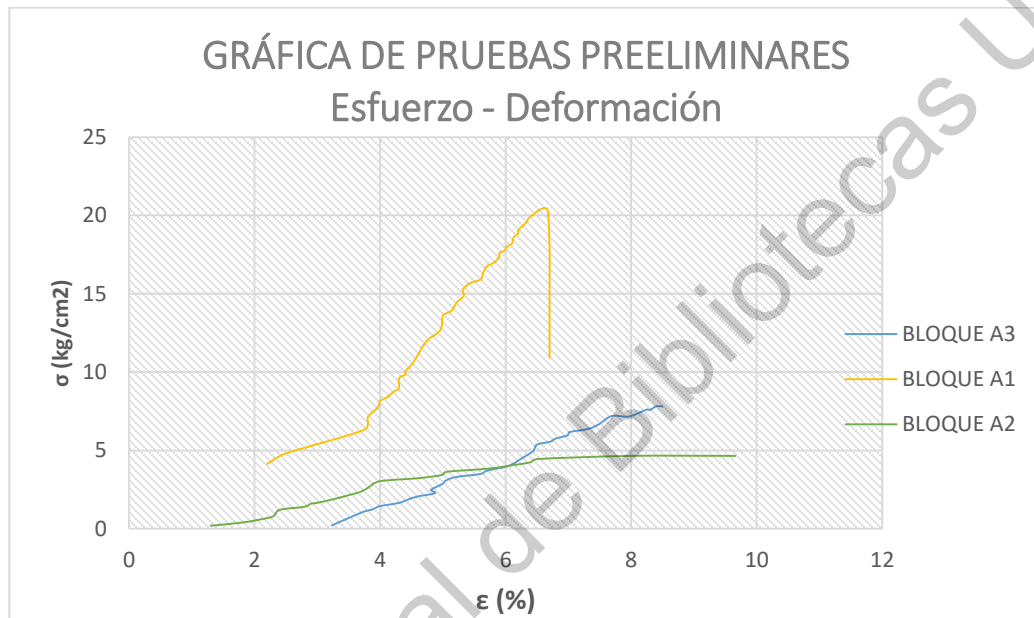
En el espécimen A3, se obtuvo una resistencia a la compresión de 7.80kg/cm² y una deformación de 8.5 mm con este esfuerzo.

Tabla 13 Resultados a compresión Bloque A3 (resultados previos).

PRUEBAS A COMPRESIÓN			
Bloque A3 28 días			
Esfuerzo (Kg/cm ²)	Carga (Kg)	Carga (KN)	Deformación (mm)
0.20484839	90.7533	0.89	3.23
1.02654362	454.7862	4.46	3.7
1.23369368	546.5592	5.36	3.88
1.43854207	637.3125	6.25	4
1.64339047	728.0658	7.14	4.3
1.85054052	819.8388	8.04	4.44
2.05538892	910.5921	8.93	4.6
2.26023731	1001.3454	9.82	4.87
2.4650857	1092.0987	10.71	4.81
2.67223576	1183.8717	11.61	4.9
2.87708415	1274.625	12.5	5
3.08193254	1365.3783	13.39	5.05
3.2890826	1457.1513	14.29	5.2
3.49393099	1547.9046	15.18	5.6
3.69877938	1638.6579	16.07	5.7
3.90362777	1729.4112	16.96	5.95
4.09696783	1815.066	17.8	6.1
4.37316791	1937.43	19	6.21
4.92556806	2182.158	21.4	6.43
5.36518652	2376.9207	23.31	6.5
5.54931991	2458.4967	24.11	6.71
5.7541683	2549.25	25	6.8
5.95901669	2640.0033	25.89	6.99
6.16616675	2731.7763	26.79	7.02
6.37101514	2822.5296	27.68	7.32
6.67483522	2957.13	29	7.49
7.19271037	3186.5625	31.25	7.69
7.16739203	3175.3458	31.14	7.97
7.60470882	3369.0888	33.04	8.25

7.57939048	3357.8721	32.93	8.3
7.80955721	3459.8421	33.93	8.4
7.80955721	3459.8421	33.93	8.5

Se puede observar en la gráfica 3 el comparativo de resistencia que obtuvieron los bloques preliminares, no se encuentra la existencia del bloque 4 debido a la no resistencia durante el curado del bloque.



Gráfica 3. Gráfica de pruebas preliminares.

Los bloques A1 y A3 fueron elaborados con fibra animal y el A2 con pino.

Los resultados que se obtuvieron, de acuerdo con la norma NMX- C-404-ONNCCE-2005, no cumplen la resistencia mínima para piezas de uso estructural, que son 60 kg/cm², el bloque A1, mostró la mayor resistencia con 17.80 kg/cm², antes de presentar algún tipo de falla, la otros dos resultados de las pruebas alcanzaron resistencias a la compresión notablemente bajas, soportando 4.45 y 6.70 kg/cm².

Se notó la necesidad de la adición de mayor cantidad de agua a las siguientes pruebas para lograr mayores resistencias, y que superen la mínima establecida en la normativa, así como mejoras en apariencia y porosidad.

4.4. Selección de fibras

Para las pruebas definitivas se utilizó el estiércol de vaca por un por mejor comportamiento ante la mezcla de los bloques.

4.5. Resultados finales

Los resultados finales se dividen en dos partes, pruebas realizadas a los bloques en su estado natural y pruebas a la pila ensayada.

4.5.1. Bloques

En total se elaboraron 12 bloques de tierra comprimida para probarse; 4 para 7 días, 4 para 14 días y 4 para 28 días, todos con una humedad del 22% y 12% de la fibra seleccionada. Se muestra a continuación el resumen de elaboración de los bloques realizados, especificando presiones de hechura, humedades y medidas obtenidas.

Se muestra en la tabla 14 los parámetros medidos de los bloques elaborados para ser probados a 27 días donde la carga de compresión varió significativamente en el Bloque B1, se puede decir que se tiene un promedio de 86 KN de presión de elaboración.

Tabla 14. Datos de bloques antes de ser probados (7 días).

DATOS DE LOS BLOQUES ANTES DE SER PROBADOS (7 DIAS)	
Nombre del Espécimen	Carga de compresión (KN)
B1 (7 Días)	117.88
B2 (7 Días)	71.43
B3 (7 Días)	67.86
B4 (7 Días)	87.19

En la tabla 15 la Carga de presión de elaboración disminuyó en comparación con los bloques de 7 días, pero entre ellos hubo una menor variación, teniendo un promedio de 26.6 KN en presión de elaboración.

Tabla 15. Datos de bloques antes de ser probados (14 días).

DATOS DE LOS BLOQUES ANTES DE SER PROBADOS (14 días)	
Nombre del Espécimen	Carga de compresión (KN)
A1 (14 Días)	25
A2 (14 Días)	29.46
A3 (14 Días)	26.79
A4 (14 Días)	25

Los bloques elaborados para 28 días obtuvieron presiones muy similares para la compactación de elaboración, con un promedio de 33.90 KN.

Tabla 16. Datos de bloques antes de ser probados (28 días).

DATOS DE LOS BLOQUES ANTES DE SER PROBADOS (28 días)	
Nombre del Espécimen	Carga de compresión (KN)
B1 (28 Días)	35.71
B2 (28 Días)	32.14
B3 (28 Días)	33.93
B4 (28 Días)	32.14

La tabla 23 muestra el resumen de las características físicas de cada bloque antes de ser probado. Las diferencias en las dimensiones se deben a la deformación que fue teniendo el molde metálico durante la compactación de los bloques.

Tabla 17. Parámetros obtenidos antes de los ensayos de BTC.

Parámetros obtenidos antes del ensayo						
	Nombre del Espécimen	Peso W (kg)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Altura (cm)	Área de la cara superior (cm ²)
7 días	B1 (7 Días)	6.27	29.32	14.82	7.80	434.522
	B2 (7 Días)	6.25	29.28	15.13	7.93	442.860
	B3 (7 Días)	6.24	29.32	14.68	7.83	430.271
	B4 (7 Días)	6.48	29.42	15.06	9.08	443.065
14 días	A1 (14 Días)	5.91	29.53	14.94	9.13	441.10
	A2 (14 Días)	5.86	29.98	14.82	8.95	444.30
	A3 (14 Días)	5.82	29.46	14.74	8.50	434.24
	A4 (14 Días)	5.82	29.85	15.00	8.68	447.75
28 días	B1 (28 Días)	5.67	29.16	14.74	8.55	429.818
	B2 (28 Días)	5.59	29.12	14.72	8.43	428.646
	B3 (28 Días)	5.74	29.28	14.82	8.60	433.930
	B4 (28 Días)	5.53	29.08	14.70	8.40	427.476

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el ensaye de compresión en la máquina universal para los bloques ensayados a 7, 14 y 28 días.

Tabla 18. Prueba de compresión Bloque B2 (7 días).

PRUEBAS A COMPRESIÓN			
Bloque B2 (7 días)			
Esfuerzo (Kg/cm ²)	Carga (Kg)	Carga (KN)	Deformación (mm)
0.00	0.00	0	0
1.15	509.85	5	0.04
2.30	1019.70	10	0.07
3.45	1529.55	15	0.01
4.61	2039.40	20	0.05
5.76	2549.25	25	0.1

6.91	3059.10	30	0.5
8.06	3568.95	35	0.93
9.21	4078.80	40	1.15
10.36	4588.65	45	1.65
11.51	5098.50	50	1.93
12.66	5608.35	55	2.4
Esfuerzo (Kg/cm²)	Carga (Kg)	Carga (KN)	Deformación (mm)
13.82	6118.20	60	2.84
14.97	6628.05	65	3.33
16.12	7137.90	70	3.77
17.27	7647.75	75	4.67
18.42	8157.60	80	6.61

Tabla 19 Prueba de compresión Bloque B3 (7 días).

PRUEBAS A COMPRESIÓN			
Bloque B3 (7 días)			
Esfuerzo (Kg/cm²)	Carga (Kg)	Carga (KN)	Deformación (mm)
0.00	0.00	0	0
1.18	509.85	5	0.17
2.37	1019.70	10	0.2
3.55	1529.55	15	0.32
4.74	2039.40	20	0.6
5.92	2549.25	25	0.83
7.11	3059.10	30	1.05
8.29	3568.95	35	1.35
9.48	4078.80	40	1.5
10.66	4588.65	45	1.71
11.85	5098.50	50	1.99
13.03	5608.35	55	2.17
14.22	6118.20	60	2.48
15.40	6628.05	65	2.69
16.59	7137.90	70	2.89
17.77	7647.75	75	3.11
18.96	8157.60	80	3.39
20.14	8667.45	85	3.79

La norma Mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2005 indica que la resistencia de diseño a la compresión tanto de los bloques de concreto como de los tabiques macizos de arcilla artesanal debe ser de 60 kg/cm² como mínimo, los BTC B2 y B3 a 7 días

alcanzaron una resistencia a la compresión de 18.42 y 20.14 kg/cm² respectivamente, 19.28 kg/cm² en promedio, es decir, una tercera parte de la resistencia requerida por norma.

Tabla 20. Prueba de compresión Bloque A1 (14 días).

PRUEBAS A COMPRESIÓN			
Bloque A1 (14 días)			
Esfuerzo (Kg/cm ²)	Carga (Kg)	Carga (KN)	Deformación (mm)
0.00	0.00	0	0
1.16	509.85	5	0
2.31	1019.70	10	0
3.47	1529.55	15	0
4.62	2039.40	20	0
5.78	2549.25	25	0.34
6.94	3059.10	30	1.6

Tabla 21. Prueba de compresión Bloque A2 (14 días).

PRUEBAS A COMPRESIÓN			
Bloque A2 (14 días)			
Esfuerzo (Kg/cm ²)	Carga (Kg)	Carga (KN)	Deformación (mm)
0.00	0.00	0	0
1.15	509.85	5	0
2.30	1019.70	10	0
3.44	1529.55	15	0.4
4.59	2039.40	20	3.35
5.12	2275.97	22.32	8.24

El bloque A1 alcanzó una resistencia a la compresión de 6.94 kg/cm² con una deformación de 1.6 mm, mientras que el bloque A2 tuvo una deformación de 8.24 mm y una resistencia de 5.12 kg/cm². La resistencia promedio presentada por ambos bloques a los 14 días es de 6.03 kg/cm², menor a la requerida por la norma NMX-C-404-ONNCCE-2005, la cual solicita una resistencia a la compresión de 60 kg/cm² para bloques de concreto y tabiques macizos de arcilla artesanal.

Tabla 22. Prueba de compresión Bloque B1 (28 días).

PRUEBAS A COMPRESIÓN			
Bloque B1 (28 días)			
Esfuerzo (Kg/cm ²)	Carga (Kg)	Carga (KN)	Deformación (mm)
0.00	0.00	0	0
1.19	509.85	5	0.09
2.37	1019.70	10	1.59
3.56	1529.55	15	1.77
4.74	2039.40	20	2.22
5.93	2549.25	25	2.57
7.12	3059.10	30	3.17
8.30	3568.95	35	3.59
9.49	4078.80	40	4.01
10.68	4588.65	45	4.97
11.86	5098.50	50	4.93
13.05	5608.35	55	5.47
14.23	6118.20	60	6.33
15.42	6628.05	65	6.95
16.61	7137.90	70	8.35
17.16	7374.47	72.32	10.95

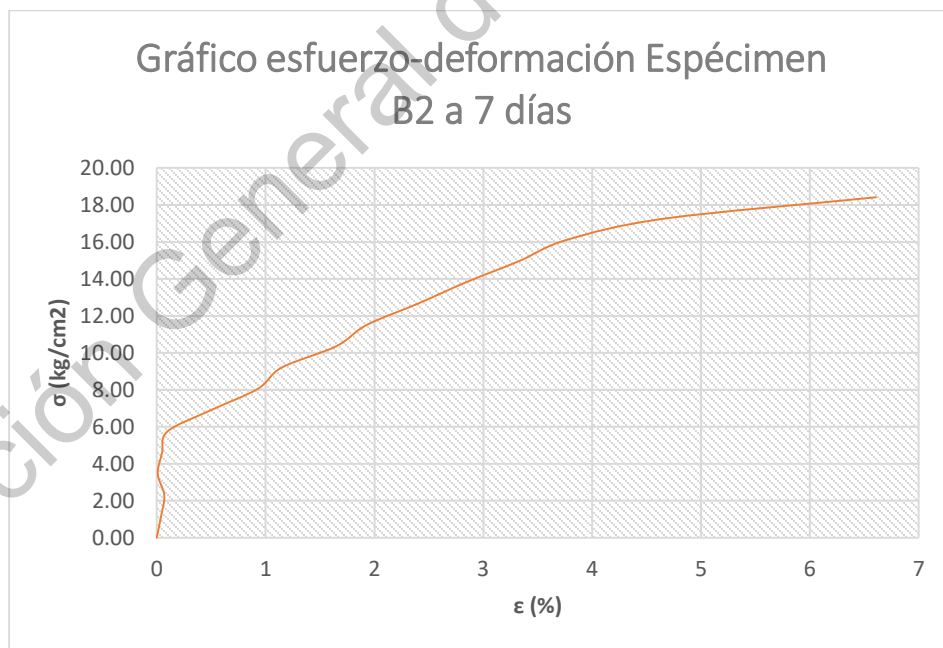
Tabla 23. Prueba de compresión Bloque B3 (28 días).

PRUEBAS A COMPRESIÓN			
Bloque B3 (28 días)			
Esfuerzo (Kg/cm ²)	Carga (Kg)	Carga (KN)	Deformación (mm)
0.00	0.00	0	0
1.17	509.85	5	1.37
2.35	1019.70	10	2.02
3.52	1529.55	15	2.45
4.70	2039.40	20	2.94
5.87	2549.25	25	3.35
7.05	3059.10	30	4.27
8.22	3568.95	35	4.37

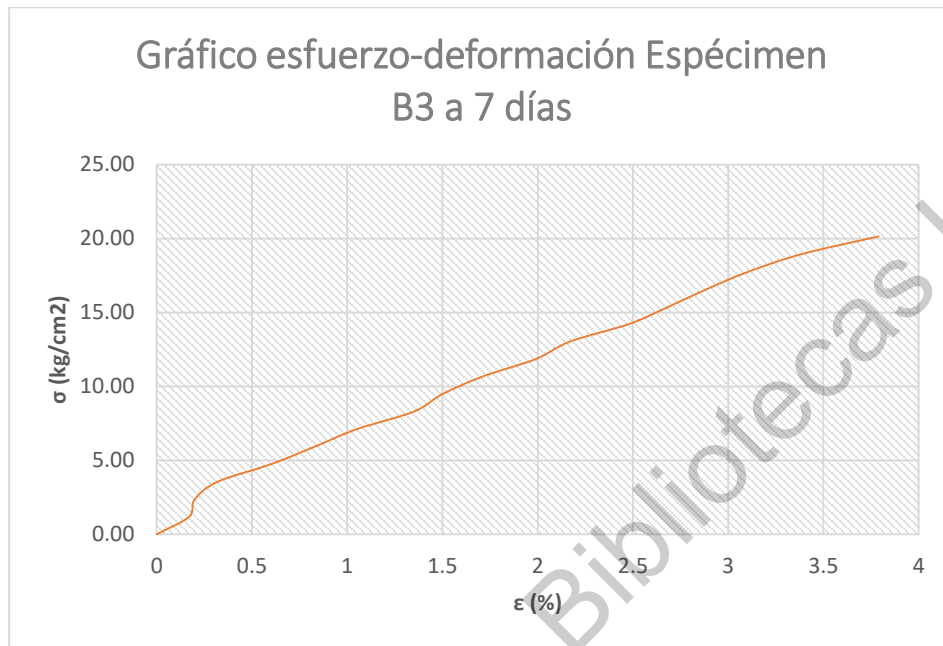
9.40	4078.80	40	5.47
10.57	4588.65	45	6.5
11.75	5098.50	50	7.68
12.92	5608.35	55	11.6
13.01	5645.06	55.36	15.21

La resistencia a la compresión del bloque B1 a 28 días fue de 17.16 kg/cm² con una deformación de 10.95 mm; el bloque B3 a 28 días tuvo menor resistencia con 13.01 kg/cm² y una deformación igual a 15.21mm. Por lo tanto, la resistencia a la compresión promedio alcanzada por los bloques a los 28 días es de 15.08 kg/cm². Esto es, una cuarta parte de la resistencia de diseño a la compresión indicada por la norma NMX-C-404-ONNCCE-2005 de 60 kg/cm².

A partir de las tablas de resultados se obtuvieron las siguientes gráficas que muestran los comportamientos de cada bloque.

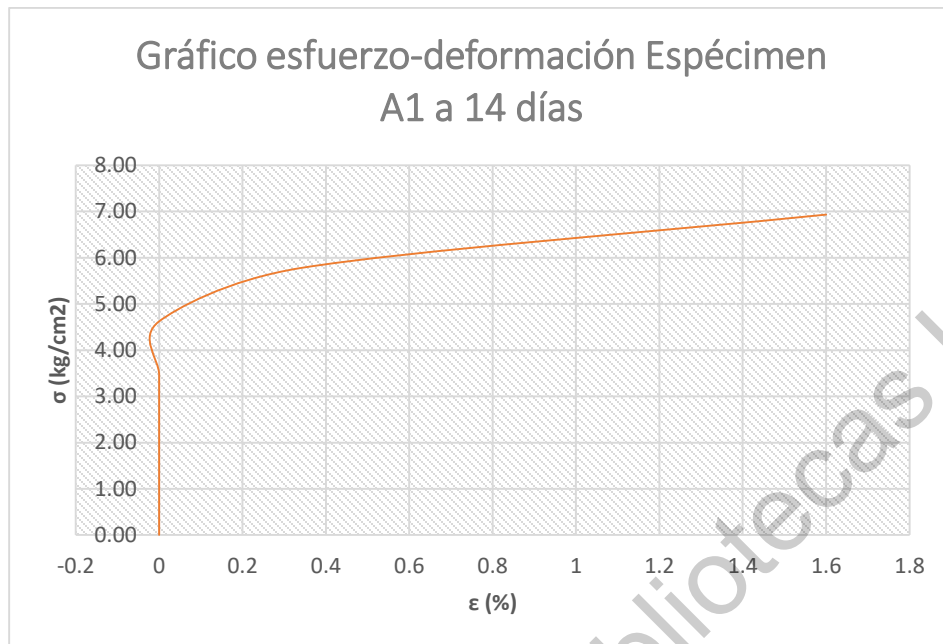


Gráfica 4. Esfuerzo deformación Bloque B2 (7 días).

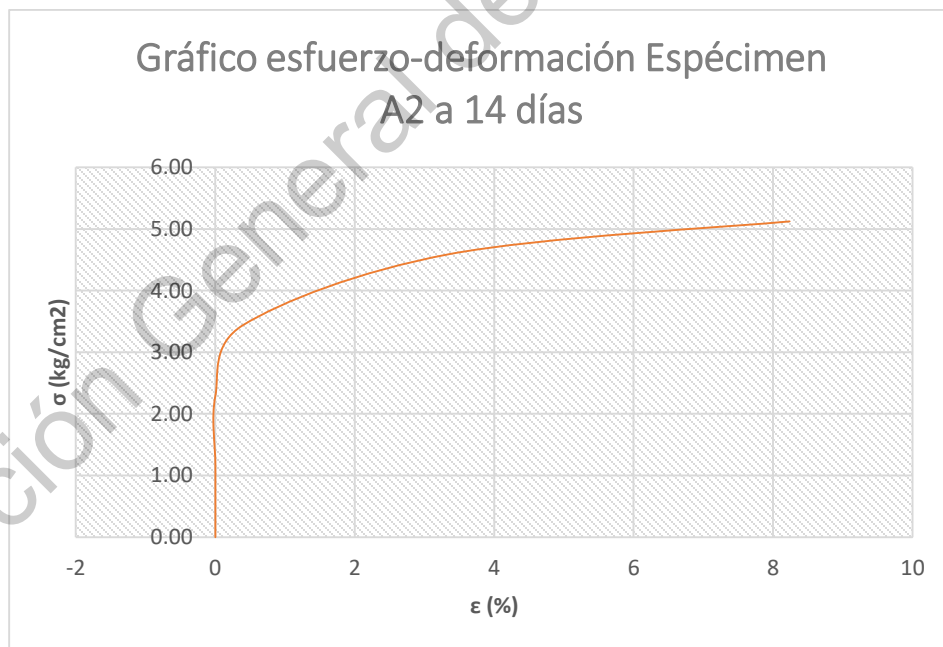


Gráfica 5. Esfuerzo deformación Bloque B3 (7 días).

Las gráficas 4 y 5 muestran el comportamiento entre los bloques B2 y B3 a 7 días el cual es distinto ya que el bloque B3 tiende a deformarse con la carga desde el inicio mientras que el bloque B2 lo hace hasta alcanzados los 6 kg/cm². Sin embargo, ambos tienen una resistencia a la compresión similar.

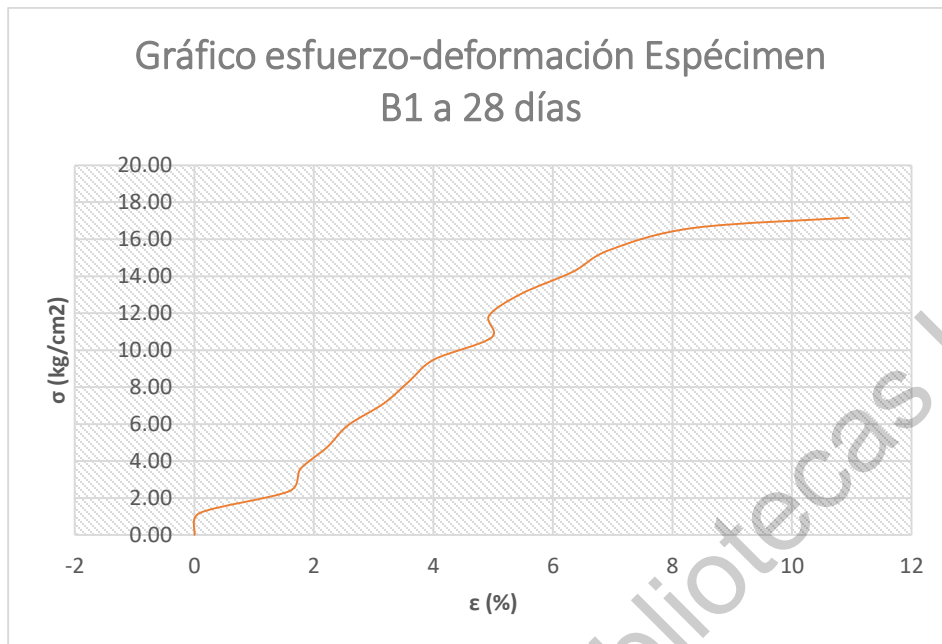


Gráfica 6. Esfuerzo deformación Bloque A1 (14 días).

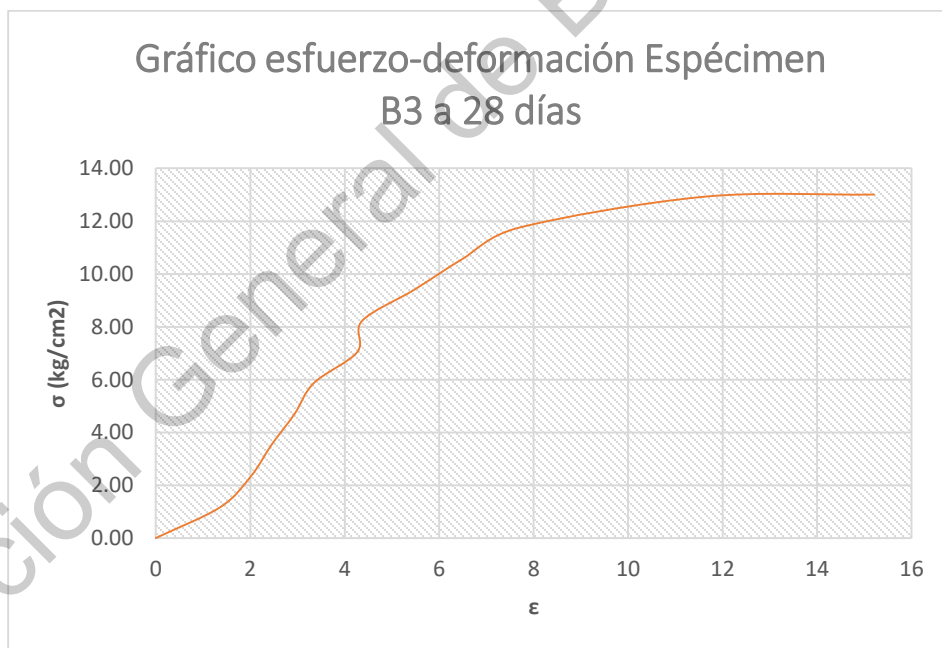


Gráfica 7. Esfuerzo deformación Bloque A2 (14 días).

Los bloques A1 y A2 presentan una resistencia a la compresión de entre 3 y 5 kg/cm² sin deformación, después sufren grandes deformaciones y su resistencia aumenta únicamente 2 kg/cm² cada uno, hasta que se manifiesta la falla.



Gráfica 8. Esfuerzo deformación Bloque B1 (28 días).



Gráfica 9. Esfuerzo deformación Bloque B3 (28 días).

En las gráficas 8 y 9 de los bloques B1 y B3 a 28 días se percibe que la relación esfuerzo deformación de ambos bloques es constante, diferente al comportamiento de los bloques a 14 días. Para ambos bloques la deformación aumenta rápidamente después de los 8mm.

Se realizaron pruebas de cortante a los bloques por fecha de prueba, se pueden ver los resultados en la siguiente tabla.

Tabla 24. Resultados de prueba a cortante (7, 14 y 28 días).

PRUEBAS A CORTANTE			
Ensayo a 7 días			
B1 7 días	*	B4 7 días	*
Carga (KN)=	0	Carga (KN)=	0
Ensayo a 14 días			
A3 14 días	^	A4 14 días	^
Carga (KN)=	31.017	Carga (KN)=	31.017
Ensayo a 28 días			
B2 28 días	^	B4 28 días	^
Carga (KN)=	26.586	Carga (KN)=	24.3705

*Para las pruebas a cortante se probó con la máquina universal y no se obtuvo carga.

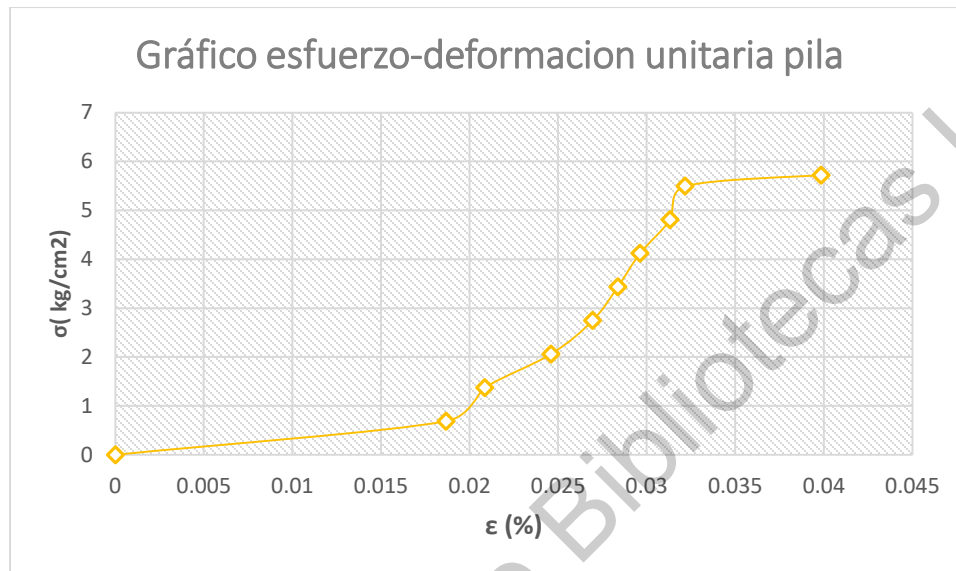
^ Para las pruebas a cortante se probó con la máquina Marshall.

4.5.2. Pilas

Tabla 25. Resultados de ensayo de pila.

PILA						
CARGA		EFUERZO	DEFORMACION		PROM (MM)	D. UNITARIA
KN	KG	KG/CM ²	MIC 1 (MM)	MIC 2 (MM)		
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	305.910	0.687	3.905	3.000	3.453	0.019
6	611.820	1.374	4.315	3.400	3.858	0.021
9	917.730	2.061	5.100	4.000	4.550	0.025
12	1223.640	2.748	5.500	4.470	4.985	0.027
15	1529.550	3.434	5.865	4.630	5.248	0.028
18	1835.460	4.121	6.109	4.850	5.480	0.030
21	2141.370	4.808	6.498	5.090	5.794	0.031
24	2447.280	5.495	6.360	5.540	5.950	0.032
25	2549.250	5.724	7.369	7.370	7.370	0.040

En la anterior tabla 25 se presenta que la mampostería alcanzó una resistencia máxima a la compresión de 5.72 kg/m², deformándose alrededor de 7.30 mm. De igual manera, se muestran los mismos resultados graficados a continuación.



Gráfica 10. Esfuerzo - deformación unitaria de pila.

4.6. Resumen de Resultados

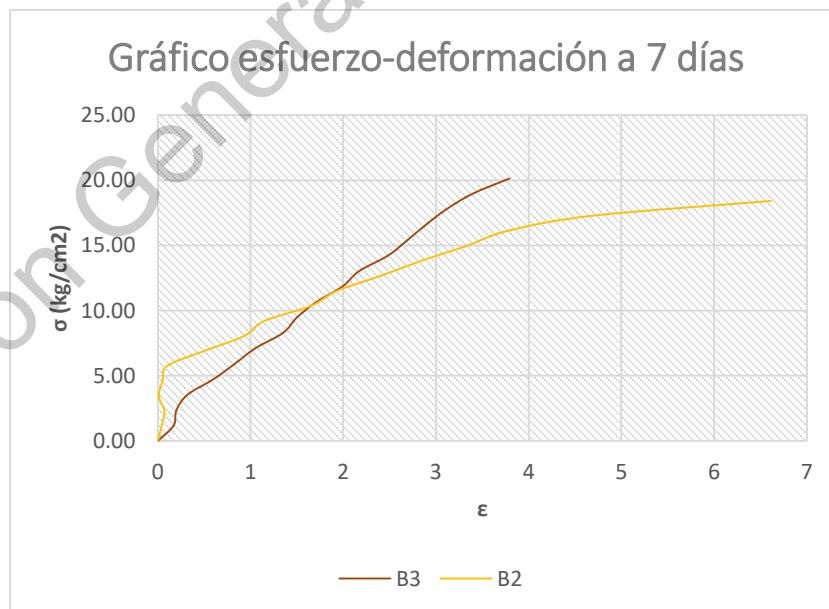
Resumiendo, los resultados anteriores de cada uno de los especímenes probados se tienen la tabla 26 y las gráficas 11, 12 y 13:

Tabla 26. Comparación de resultados.

Fecha de prueba	Bloque	Carga de compresión de elaboración (KN)	Esfuerzo máx. resistido (kg/cm ²)	% Humedad de prueba	Peso final kg
7 días	B2	71.43	18.42	18.6191	6.25
	B3	67.86	20.14	17.6503	6.24
14 días	A1	25.00	6.94	21.1653	5.91
	A2	29.46	5.12	29.0826	5.86
28 días	B1	35.71	17.16	23.8126	5.67
	B3	33.93	13.01	15.6069	5.74

En la Tabla 26 se puede observar que los bloques B2 y B3 probados a 7 días son los que tuvieron mayor carga de compresión de elaboración y también son los dos bloques que mostraron mayor resistencia a la compresión, con un promedio de 19.28 kg/cm², su porcentaje de humedad no fue el menor pero sí el segundo y tercer en menor porcentaje de humedad al momento de realizar la prueba (18.13% de humedad promedio). Los bloques a 14 días (A1 y A2) son los que presentaron menor resistencia con tan sólo 6.94 y 5.12 kg/cm², es decir, una tercera parte de la resistencia máxima alcanzada por los 6 bloques, y también son los bloques que presentan mayor porcentaje de humedad y menor carga de compresión de elaboración. Los bloques a 28 días B1 y B3 tienen una variación entre ellos de esfuerzo resistido de 4.01 kg/cm², al igual que un 8.2% en el porcentaje de humedad, siendo B1 el bloque con mayor resistencia y mayor humedad a los 28 días, 17.16 kg/cm² y 23.81% respectivamente.

A continuación, se presentan las gráficas comparativas de los dos especímenes ensayados para cada tiempo:



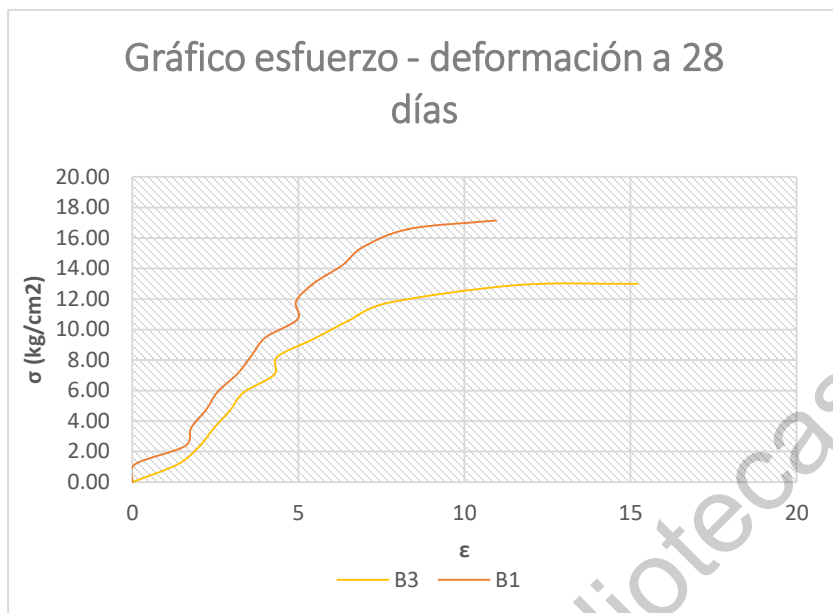
Gráfica 11. Comparativa esfuerzo – deformación a los 7 días.

La Gráfica 11 muestra la comparación en el comportamiento Esfuerzo – Deformación de los BTC B2 y B3 ensayados a los 7 días. En esta se aprecia que es el bloque B3 el que mostró mayor resistencia a la compresión con 20.14 kg/cm².



Gráfica 12. Comparativa esfuerzo – deformación a los 14 días.

En la gráfica anterior se tienen a los bloques A1 y A2 ensayados a los 14 días, donde se observa que el bloque A1 alcanzó mayor resistencia que el bloque A2, resistiendo el primero casi 7 kg/cm² y el segundo poco más de 5 kg/cm². Sin embargo, es el bloque A2 el que presentó mayor deformación.



Gráfica 13. Comparativa esfuerzo – deformación a los 28 días.

Los bloques B1 y B3 probados a los 28 días son los que mostraron un comportamiento similar durante los ensayos de resistencia a la compresión, como se puede apreciar en la Gráfica 13. Es el bloque B1 el que alcanzó mayor resistencia (17.16 kg/cm²) y menor deformación, por el contrario, el bloque B3 resistió 13.01 kg/cm² y tuvo mayor deformación.

Capítulo 5

5. Conclusiones

Dirección General de Bibliotecas UNQ

5.1. Conclusiones

El objetivo principal de esta investigación es diseñar bloques de tierra por medio de presión con suelo de la región y sin la adición de cemento que cumplan con las características de las piezas de mampostería de uso estructural, sin embargo la hipótesis ha sido nula, ya que la norma mexicana marca una resistencia a la compresión de 60kg/cm^2 y la mayor resistencia obtenida por los bloques fue de 20.14kg/cm^2 para un tiempo de curado de 7 días, es decir, un tercio de la resistencia mínima requerida.

Los bloques a 7 días también son los que recibieron mayor presión de compactación por lo que se encuentra que hay una relación directamente proporcional entre la carga de compresión de elaboración y la resistencia a la compresión.

Los resultados obtenidos y el comportamiento de los bloques durante el tiempo de curado indican que el suelo recolectado del fraccionamiento de El Marqués, Querétaro no puede ser utilizado para BTC sin la adición de cemento o sin la adición de otros materiales que lo mejoren ya que el suelo resultó ser un limo de alta compresibilidad, con comportamientos altamente expansivos por lo que al perder humedad se contrae y produce agrietamientos.

Los agrietamientos se presentaron en todos los especímenes y para frenar su crecimiento se requirió de humectación durante el curado, que como efecto secundario disminuyó la uniformidad entre los bloques. Para evitar estos problemas se deberá adicionar a la mezcla materiales granulares que no se encuentran en la región.

Uno de los requisitos de los BTC es que el suelo de la región no tenga que ser transportado y por lo tanto conserva su humedad natural, no obstante, el suelo no pudo ser trabajado con dicha humedad debido a que se almacenó por motivos de

logística, pues el predio estaba a punto de recibir material externo para las plataformas de desplante; es posible que con la humedad natural el suelo hubiese tenido un comportamiento distinto.

Aunado a la humedad, la fibra seleccionada ocasionó el crecimiento de organismos en los elementos por lo que en caso de funcionar como piezas de mampostería será necesario agregar un recubrimiento o una sustancia que impida el crecimiento de dichos organismos.

Por otro lado, la mampostería no presentó un comportamiento adecuado, puesto que alcanzó una resistencia menor a los 6kg/cm^2 . Es posible que si se cambia el material que une las piezas por algún tipo de cementante aumente su resistencia.

Se observa una discrepancia de la relación de los datos obtenidos en cuanto a pesos, humedades y cargas para cada tiempo de ensayo de especímenes, uno de los posibles factores es debido al molde utilizado, ya que este comenzó a sufrir pandeo en sus caras laterales tras la aplicación de la presión para compactar el suelo, así los bloques no lograron tener medidas exactamente iguales, afectando la uniformidad en la resistencia entre cada ensayo, sumado esto a la diferencia de humedades que se tuvieron por el curado realizado, debido a que no hubo una medida ni estandarización del agua esparcida sobre los bloques.

5.2. Líneas futuras de investigación.

El presente trabajo da pie a diversas investigaciones futuras y variantes que se descubrieron a lo largo de la experimentación que se realizó.

Un punto que no se tuvo en cuenta al inicio fue la reacción que podría tener el estiércol de vaca con el suelo y la conservación de la humedad, esto ocasionó la creación de organismo vegetal (hongos) sobre la superficie de los bloques, este problema podría resolverse mediante la investigación de un diferente método de

curado o algún recubrimiento especial para prevenir, erradicar o proteger el bloque en su totalidad.

Planteando otra opción respecto al problema de la humedad con la fibra utilizada, está buscar otra fibra que sea adecuada para retener mejor la humedad sin provocar efectos negativos.

Si se desea seguir trabajando con la fibra seleccionada en esta investigación, se recomienda realizar pruebas Proctor combinando el suelo con la fibra para tener una relación de humedad óptima más certera ante la reacción de la fibra junto con la adición de agua.

Se pueden realizar pruebas en donde se ocupe la humedad natural del suelo para poder examinar la viabilidad de trabajar con esta misma para su realización en el sitio.

Para evitar discrepancias en la humedad para las pruebas que se realicen, se podría tratar de realizar la mayor cantidad de bloques en uno o dos días evitando la afectación que pudiera provocar la humedad en el ambiente. Así como realizar pruebas en donde se juegue con los días de curado húmedo y seco hasta encontrar una combinación en donde su efectividad mejore.

Como se pudo leer en la fundamentación teórica, otra variante de la aplicación del método presentado en esta tesis podría ser la adición de un alto porcentaje de arenas o suelos granulares, aclarando que se necesitará la búsqueda de bancos de arena cercanos para evitar la contaminación por transporte, y el incremento económico que pudiera haber si se obtiene arena de zonas lejanas al sitio de aplicación.

En cuanto al ensayo de los especímenes se recomienda un método de compactación donde se controle la velocidad exacta a la que se aplica la carga, para mantener esa uniformidad en todos los especímenes.

Por último pero no menos importante se debe tomar en cuenta la elaboración de un molde capaz de mantenerse rígido ante presiones de empuje del suelo muy altas, debido a que si el bloque no mantiene sus medidas constantes durante todos los ensayos, estos podrán mostrar una diferencia entre los valores obtenidos, también se sugiere obtener una mayor cantidad de moldes para poder realizar suficiente cantidad de piezas en un menor tiempo, esto para poder elaborar más especímenes y que la experimentación pueda obtener resultados más exactos.

Dirección General de Bibliotecas UFG

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Addleson, L., 1983. Materiales para la construcción Volumen 1. España: Reverté.
- Alcocer, S., Flores, L. & Pérez A., 2018. Rehabilitación de estructuras de mampostería simple y de adobe.
- Ali, M., Saidur, R., Hossain, 2011. A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 2252-2261.
- Alvarez, A., Martínez, G., Pérez, A., Vázquez, J., 2002. Caracterización de suelos y control espacial por medio de los Sistemas de Información Geográfica, Caso Valle de Querétaro. México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Arteaga, K.T., Humberto, O., Gutiérrez, O. J., 2011. Bloque de tierra comprimida como material constructivo. *Revista Facultad de Ingeniería UPTC*. 20: 55-68.
- ASTM D2487-00, Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000, www.astm.org
- ASTM D4318-05, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005, www.astm.org
- Bui, B., Morel, J. C., Reddy, V. y Ghayad, W., 2008. Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering. *Building and Environment*, Vol. 44 912-919.
- Burroughs, S., 2008. Soil Property Criteria for Rammed Earth Stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering* Vol. 20.
- CEMBUREAU; the European Cement Association, 2009. La recuperación de residuos como combustibles y materias primas alternativas en la industria cementera; Producción sostenible de cemento. [En línea] Disponible en: http://www.flacema.org/images/stories/Articulos_MA/produccion3n20sostenible20de20cemento.pdf
- Chuya, E.C.M., Ayala M.F., 2018. Adobe tradicional con adobe reforzado con fibra de vidrio. Facultad de Arquitectura y urbanismo, trabajo de titulación, Universidad de Cuenca-Ecuador.
- Ciancio D., Jaquín P. & Walker P., 2013. Advances on the assessment of soil suitability for rammed earth. *Construction and Building Materials*, Vol.42, 1-8.
- Cid, J., Mazarrón, F.R., Cañas I., 2011. Las normativas de construcción con tierra en el mundo. *Informes de la construcción*. 63:159-169
- Ciurileanu, G.T. & Horvath, I. B., 2012. The use of cement stabilized rammed earth for building a vernacular modern house. *Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași Tomul LVIII (LXII)*, Fasc. 1.
- Edenhofer, O., Madrugá, R., Sokona, Y., 2011. Renewable energy sources and climate change mitigation: special report-Choice Reviews.
- FAO, 2008. Base Referencial Mundial del Recurso del Suelo, Informes Sobre Recursos Mundiales de Suelos N° 103. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Fassbender, H., 1975. Química de Suelos: con énfasis en suelos de América Latina. Costa Rica: Instituto de Ciencias Agrícolas de la OEA.

Galíndez F., 2009. Bloques de Tierra Comprimida sin adición de cemento, aportación al ahorro energético. Seguridad y Medio Ambiente. No. 115, 1-12.

Galíndez, F., 2007. Bloques de tierra comprimida (BTC) sin adición de cemento. Fundación MAPFRE, Ayuda a la investigación 2007.

Gallardo, M., Almanza, J., Cortés, D., Escobedo, J., Escalante, G., 2014. Synthesis and mechanical properties of a calcium sulphoaluminate cement made of industrial wastes. Materiales de construcción. 64: 315.

García, I., 2017. Estudio de permeabilidad en el adobe implementando agregados naturales. Tesis de Licenciatura. Universidad Tecnológica de la Mixteca.

Gielen, D., Bennaceur, K., Kerr, T., Tam, C., Tanaka, K., Taylor, M., Taylor, P., 2007. Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions. International Energy Agency (IEA).

Gliessman, S., 2002. Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible. Costa Rica: CATIE.

Guzmán S. & Iñiguez M., 2016. Metodología para elección de estabilizantes químicos para bloques de tierra. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la universidad de Cuenca, Vol. 5, 1-9.

Hall, M. Hall & Djerbib, M. 2003. Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency. Construction and Building Materials, Vol. 18, 281–286.

IEA, 2007. Tracking industrial energy efficiency and CO2 emissions. International Energy Agency.

INEGI, 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Querétaro, Querétaro. [En línea] Disponible en: http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/22/22014.pdf

Janotka, I., Kraji, L., 2011. An experimental study on the upgrade of sulfoaluminate-belite cement systems by blending with Portland cement. Advances in Cement Research. 11(1): 35–41.

Jayasinghe, C. & Kamaladasa, N., 2005. Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls. Construction and Building Materials, Vol. 21, 1971-1976.

Jayasinghe, C. & Kamaladasa, N., 2006. Structural Properties of Cement Stabilized Rammed Earth. Engineer - Journal of the Institution of Engineers, Vol. 38 (03) ,23-30.

Joseph, C., Gardner, D., Jefferson, T., Isaacs, B., Lark, B., 2010. Self-healing cementitious materials: a review of recent work. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials. 164: 29-41.

Juárez B. E. y Rico R. A., Mecánica de Suelos Tomo 1, Fundamentos de La Mecánica de Suelos. Editorial Limusa 2005.

Kaddatz, K., Rasul, M., Rahman, A., 2013. Alternative fuels for use in cement kilns: process impact modelling. Procedia Engineering. 56: 413-420.

Kariyawasam, K. & Jayasinghe, C., 2016. Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, Vol. 105, 519–527.

Klee, H., 2004. Briefing: The cement sustainability Initiative. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 9-11.

M -MMP-1-09/06 MMP. Métodos De Muestro Y Prueba De Materiales, Suelos Y Materiales Para Terracerías, 09. Compactación AASHTO

Madlool, N., Saidur, R., Hossain, M., Rahim, N., 2011. A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15 (4): 2042–2060.

Mag, A., Rauch, M., 2011. Paredes de tapial y su industrialización (encofrados y sistemas de compactación). *Informes de la Construcción*. 63: 35-40.

Maniatidis, V. & Walker, P., 2003. A Review of Rammed Earth Construction. DTi Partners in Innovation Project 'Developing Rammed Earth for UK Housing.

Meyer, C., 2009. The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*. 31(8): 601–605.

NMX-C-036-OONCCE-2004, 2004. Industria de la Construcción - Mampostería - Resistencia a la Compresión de Bloques, Tabiques o ladrillos y Tabicones y Adoquines - Método de Ensayo. Diario Oficial de la Federación, Dirección General de Normas.

NMX-C-404-OONCCE-2005, 2005. Industria De La Construcción - Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones Para Uso Estructural - Especificaciones y Métodos de Prueba. Diario Oficial de la Federación, Dirección General de Normas.

NMX-C-464-OONCCE-2010, 2010. Industria de la Construcción - Mampostería - Determinación de la Resistencia a Compresión Diagonal y Módulo de Cortante de Muretes, Así Como Determinación de la Resistencia a Compresión y Módulo de Elasticidad de Pilas de Mampostería de Arcilla O de Concreto - Métodos de Ensayo. Diario Oficial de la Federación, Dirección General de Normas.

NMX-C-508-ONNCCE-2015, 2015. Industria de la Construcción - Bloques de Tierra Comprimida Estabilizados con Cal - Especificaciones y Métodos de Ensayo. Diario Oficial de la Federación, Dirección General de Normas.

NORMA UNE 41410, 2008. Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques, definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Asociación Española de Normalización y Certificación.

Paredes, F. L., De la Cruz, G.M., 2017. Estudio de estabilizadores en el adobe.

Porta J., López-Acevedo M., Poch R. M., 2014. Edafología: uso y protección de suelos. España: Mundi-Prensa.

Queiroz, W., Fortes, J., Rubens, J., 2013. Waste materials co-processing in cement industry: Ecological efficiency of waste reuse. *Renewable and sustainable Energy Reviews* 19.

Roux, R.S., Olivares, M., 2002. Utilización de adobe estabilizados con cemento portland al 6% y reforzados con fibra de coco para muros de carga en tampico. *Unidad Académica de Arquitectura, Diseño y Urban*. 611-10

Rui, A., Oliveira D., Miranda, T., Cristelo, N., Escobar, M. & Soares, E., 2013. Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal. *Construction and Building Materials*, Vol. 47, 181–191

SCT (2003). M-MMP-1-02/03. Suelos y Materiales para Terracerías, Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos. Secretaría de Comunicaciones Transportes.

UCLA; University of California, Los Angeles, 2016. Cement Manufacturing, New techniques. [En línea] Disponible en: <https://phys.org/news/2015-09-technique-cement-carbon-neutral.html>

UNEP, 2013. Global Mercury Assessment 2013: Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport. UNEP Chemicals Branch, Switzerland. [En línea] Disponible en: <https://digitallibrary.un.org/record/751053>

UNEP; United Nations Environment Programme. (2012). Keeping track of our changing environment. From Rio to Rio.

Vásquez, A., Botero, L.F. & Carvajal, D., 2015. Fabricación de bloques de tierra comprimida con adición de residuos de construcción y demolición como remplazo del agregado pétreo convencional. *Ingeniería y ciencia*. 11: 197-220.

Dirección General de Bibliotecas UJAQ

7. ANEXOS

ANEXO. I Hoja de registro y curva de compactación para prueba dinámica AASHTO.

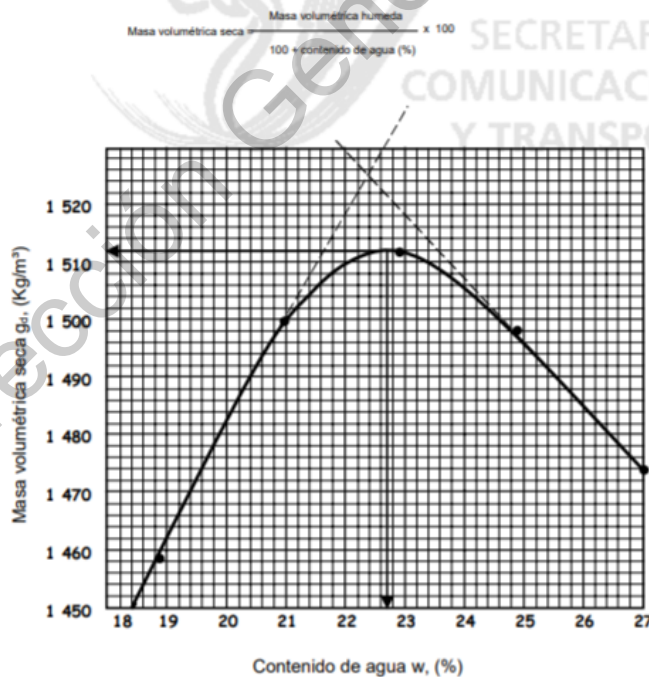
M-MMP-1-09/06

PRUEBA DE COMPACTACION DINAMICA

OBRA: Autopista: Querétaro - Irapuato	FECHA: 17 de Agosto de 2000.
LOCALIZACIÓN: Km 64+183	PRUEBA: 22-125
TRAMO: _____	OPERADOR: Ernesto Hernández
SUBTRAMO: _____	CALCULO: Gabina Marcial
ORIGEN: _____	
SONDEO No.: PCA-7	
MUESTRA No.: 5	
DESCRIPCIÓN: Arena arcillosa con 30% aproximadamente de grava (SC)	

METODO: **AASHTO Estándar** MOLDE: **R** MASA EN g: **2 750**
 VARIANTE: **D** No. DE CAPAS: **3** No. DE GOLPES POR CAPA: **56**

Espécimen número		1	2	3	4	5
Contenido de agua	Cápsula número	2	6	3	9	1
	Masa cápsula + Suelo húmedo, (g)	193,8	204,2	198,1	172,4	187,9
	Masa cápsula + Suelo seco, (g)	169,0	177,0	171,0	143,8	156,8
	Masa del agua, (g)	24,8	27,2	27,1	28,6	31,1
	Masa cápsula, (g)	38,0	47,2	52,3	28,9	41,5
	Masa suelo seco W_s , (g)	131,0	129,8	118,7	114,9	115,3
Masa volumétrica	Contenido de agua w , (%)	18,9	21,0	22,9	24,9	27,0
	Masa del molde + Suelo húmedo $W_{t,h}$ (g)	6 449	6 619	6 711	6 741	6 743
	Masa del molde W_t (g)	2 750	2 750	2 750	2 750	2 750
	Masa suelo húmedo $W_{m,h}$ (g)	3 699	3 869	3 961	3 991	3 993
	Volumen del molde V , (cm ³)	2 133	2 133	2 133	2 133	2 133
	Masa volumétrica húmeda γ_m , (kg/m ³)	1 734	1 814	1 857	1 871	1 872
	Masa volumétrica seca γ_s , (kg/m ³)	1 458	1 499	1 511	1 498	1 474



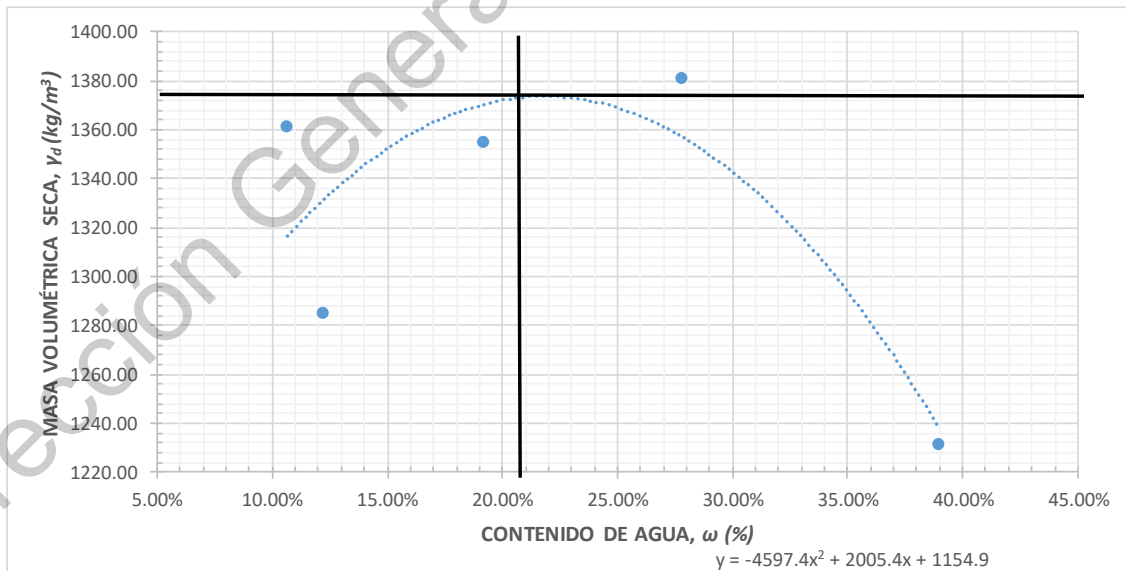
OBSERVACIONES: **Masa Volumétrica**
Seca Máximo $\gamma_{s\text{máx}} = 1 512 \text{ kg/m}^3$
Humedad óptima $w_o = 22,7\%$

ANEXO. II Prueba AASHTO de material muestreado

DETERMINACIÓN DE LA MASA VOLUMÉTRICA SECA MÁXIMA MEDIANTE EL PROCEDIMIENTO DE COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR.

PESO DEL PISÓN:	24.5 N	DIÁMETRO DEL MOLDE:	10.1 cm
ALTURA DE CAÍDA DEL PISÓN:	30.5 cm	ALTURA DEL MOLDE:	11.6 cm
NÚMERO DE CAPAS :	3	VOLUMEN DEL MOLDE:	0.00093 m ³
GOLPES POR CAPA :	25	ENERGÍA DE COMPACTACIÓN:	603.03 Kn-m/m ³

NÚMERO DE ENSAYO		1	2	3	4	5
CONTENIDO DE AGUA	FLANERA NÚMERO:	-	-	-	-	-
	PESO DE FLANERA (g):	-	-	-	-	-
	PESO FLANERA+SUELO HÚMEDO (g):	-	-	-	-	-
	PESO FLANERA+SUELO SECO (g):	-	-	-	-	-
	PESO SUELO HÚMEDO, W_m (g):	85.4	63.6	57	71.85	95.66
	PESO SUELO SECO, W_s (g):	76.11	57.48	47.84	56.23	68.84
CONTENIDO DE AGUA, ω (%):		12.21%	10.65%	19.15%	27.78%	38.96%
MASA VOLUMÉTRICA	PESO DEL MOLDE (g)	3760	3760	3760	3760	3760
	PESO DEL MOLDE+SUELO HÚMEDO (g)	5100	5160	5260	5400	5350
	PESO DEL SUELO HÚMEDO (g):	1340	1400	1500	1640	1590
	MASA VOLUMÉTRICA HÚMEDA, γ_m (g/cm ³)	1441.83	1506.39	1613.99	1764.63	1710.83
	MASA VOLUMÉTRICA SECA, γ_d (g/cm ³)	1284.98	1361.44	1354.62	1381.00	1231.17



CONTENIDO DE AGUA ÓPTIMA, ω (%): 22%
 MASA VOLUMÉTRICA SECA MÁXIMA, $\gamma_{d\max}$ (kg/m³): 1373.59041

ANEXO. III Carta de plasticidad, Juárez Badilla y Rico Rodríguez Tomo I (2005)

