



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL – RESIDUOS SÓLIDOS

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MINERALÓGICAS
DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA ELABORACIÓN DE
RECOBLOQUES

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JOSÉ ALBERTO LÓPEZ LÓPEZ

TUTOR PRINCIPAL
DRA. MARÍA NEFTALÍ ROJAS VALENCIA,
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR
DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE 2018

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Mendoza Escobedo Carlos Javier

Secretario: Dra. Fernández Villagómez Georgina

Vocal: Dr. César Valdez Enrique

1^{er.} Suplente: M.I. Vázquez González Alba Beatriz

2^{d o.} Suplente: Dra. Rojas Valencia María Neftalí

Lugar donde se realizó la tesis:

- Instituto de Ingeniería, UNAM. Edificios 5 y 8.

TUTOR DE TESIS:

Dra. María Neftalí Rojas Valencia

FIRMA

El trabajo experimental fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM que cuenta con certificado de conformidad otorgado por el organismo acreditado Certificación Mexicana, S.C., por haber implementado y mantener un Sistema de Gestión de la Calidad de conformidad con los requisitos de la norma internacional ISO 9001:2015

No. de Certificado CMX C SGC 155 2017, válido en el período del 09 de noviembre de 2017 al 09 de noviembre de 2020

Otros laboratorios que apoyaron para el análisis de diferentes parámetros fueron:

- Laboratorio de Corrosión de la Unidad de Investigación y de Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM) de la Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Laboratorio de Difracción de Rayos X del Instituto de Geología de la UNAM.
- Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Laboratorio de Mecánica de Suelos del Posgrado de Ingeniería Civil de la UNAM.
- Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía del Instituto de Geología de la UNAM.

Para Oliver y Marcia...

AGRADECIMIENTOS

A Marcia, por el apoyo incondicional, las palabras de aliento y el cariño que aportaste a mi vida.

A la Dra. Neftalí Rojas por su guía, entusiasmo y enseñanza para la realización del presente trabajo.

A la Dra. Georgina Fernández y al Dr. Enrique César por sus valiosas contribuciones y apoyo en la revisión de este trabajo.

Al Ing. Gonzalo Roque por su valioso apoyo en la realización de las pruebas de caracterización de suelos en el laboratorio de Mecánica de Suelos del Posgrado de Ingeniería Civil de la UNAM.

Al Quím. Rufino Lozano y al Laboratorio de FRX del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía del Instituto de Geología de la UNAM por su apoyo en la realización del estudio de FRX.

A la Dra. Teresa Pi por su apoyo en la realización del estudio de DRX en el Laboratorio de DRX del Instituto de Geología de la UNAM.

Al M.C. Francisco Sánchez y al Laboratorio de Corrosión de la Unidad de Investigación y de Asistencia Técnica en Materiales de la Facultad de Ingeniería, por el apoyo brindado para la realización de la prueba de intemperismo.

Al M. I. Miguel Ángel Zuñiga y al Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM por el apoyo brindado para la realización de las pruebas de resistencia a la compresión.

A la M.I. Alba Vázquez y al M.I. Carlos Javier Mendoza por su apoyo en la revisión de este trabajo.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada.

A mi familia y amigos por su cariño y motivación en la realización del presente proyecto, especialmente a mis padres, mis hermanas, mis abuelos y a Rebeca.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación.....	2
1.2 Objetivo.....	3
1.3 Objetivos específicos.....	3
1.4 Alcances y limitaciones.....	3

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Clasificación de residuos.....	4
2.1.1 Residuos de manejo especial.....	5
2.2 Residuos de la construcción.....	6
2.2.1 Problemas asociados a la disposición de los RCD.....	7
2.2.2 Panorama internacional.....	8
2.2.3 Panorama nacional.....	9
2.2.4 Reciclaje de los RCD.....	10
2.3 Construcción sustentable.....	11
2.4 Materiales de construcción a partir de tierra.....	12
2.4.1 Ladrillos de adobe.....	14
2.5 Marco legal.....	15
2.5.1 Normatividad aplicable para la fabricación de ladrillos.....	15
2.5.2 Normatividad aplicable para la fabricación de Recobloques.....	17
2.6 Antecedentes.....	18
2.6.1 Equipo empleado en la elaboración de ladrillos ecológicos.....	18
2.6.1.1 Moldeadora de ladrillos.....	19
2.6.1.2 Secador solar de ladrillos.....	19
2.6.2 Recobloques a partir de residuos.....	20

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Recopilación y análisis de información.....	22
3.2 Pruebas de campo en material de excavación.....	22
3.3 Caracterización del material de excavación	23

3.3.1 Prueba granulométrica.....	25
3.3.2 Límites de plasticidad o de Atterberg.....	27
3.3.3 Densidad.....	31
3.3.4 Contenido de materia orgánica.....	32
3.3.5 Contenido de sales solubles.....	32
3.4 Caracterización de residuos de construcción ¼" a finos todo en uno.....	33
3.4.1 Contenido de cloruros solubles en agua por el método de Volhard.....	34
3.4.2 Contenido de sulfatos solubles en agua.....	34
3.4.3 Contenido de azufre total.....	35
3.5 FRX del material de excavación y residuos de construcción.....	35
3.6 DRX del material de excavación y residuos de construcción.....	36
3.7 Determinación de la mezcla para elaboración de los Recobloques.....	37
3.8 Descripción del diseño estadístico del experimento.....	37
3.9 Procedimiento de elaboración de bloques.....	38
3.9.1 Equipos empleados en la elaboración de Recobloques.....	39
3.10 Evaluación de Recobloques.....	40
3.10.1 Determinación de dimensiones	41
3.10.2 Densidad aparente seca.....	41
3.10.3 Resistencia a la compresión.....	41
3.10.4 Prueba de absorción máxima inicial de agua.....	42
3.10.5 Prueba de intemperismo acelerado.....	43
3.10.6 Resistencia a la erosión.....	43
3.11 Beneficios del proyecto.....	45

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 ETAPA 1. Estudio de gabinete.....	46
4.1.1 Material de excavación.....	46
4.1.2 Residuos de construcción reciclados.....	47
4.1.3 Residuos de madera.....	48
4.1.4 Mucílago de nopal.....	49
4.2 ETAPA 2. Pruebas de campo en material de excavación.....	50
4.3 ETAPA 3. Caracterización del material de excavación.....	51
4.3.1 Granulometría del material de excavación.....	52
4.3.2 Límites de Atterberg.....	54

4.3.3 Densidad.....	58
4.3.4 Contenido de materia orgánica.....	58
4.3.5 Contenido de sales solubles.....	59
4.4 Caracterización de residuos de construcción ¼” a finos todo en uno.....	59
4.4.1 Granulometría de residuos de construcción.....	59
4.4.2 Densidad de residuos de construcción.....	61
4.4.3 Contenido de cloruros solubles en agua.....	61
4.4.4 Contenido de sulfatos solubles en agua.....	61
4.4.5 Contenido de azufre total.....	62
4.5 FRX del material de excavación y residuos de construcción.....	62
4.6 DRX del material de excavación y residuos de construcción.....	63
4.7 ETAPA 4. Determinación de mezcla para elaboración de Recobloques con suelo de Toluca.....	65
4.8 Evaluación de ladrillos y Recobloques con suelo de Toluca.....	67
4.8.1 Resistencia a la compresión y absorción de agua en ladrillos.....	67
4.8.2 Resistencia a la compresión y absorción de agua en Recobloques..	70
4.9 Elaboración de Recobloques.....	72
4.9.1 Determinación de mezcla de suelos.....	73
4.9.2 Granulometría y límites de Atterberg de la mezcla de suelos.....	73
4.10 ETAPA 5. Evaluación de los Recobloques.....	77
4.10.1 Dimensiones.....	79
4.10.2 Densidad aparente.....	79
4.10.3 Resistencia a la compresión.....	79
4.10.4 Absorción máxima inicial de agua.....	81
4.10.5 Prueba de intemperismo acelerado.....	83
4.10.6 Resistencia a la erosión.....	86
4.11 ETAPA 6. Beneficios del proyecto.....	88
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	93
RECOMENDACIONES.....	95
REFERENCIAS.....	96
GLOSARIO.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Generación promedio de RCD por subproducto.....	7
Tabla 2.2. Valores de resistencia a la compresión en México.....	16
Tabla 2.3. Valores de absorción de agua máxima inicial en México.....	16
Tabla 2.4. Especificaciones internacionales para BTC.....	17
Tabla 3.1. Caracterización del material de excavación.....	24
Tabla 3.2. Caracterización de los residuos de construcción ¼" a finos todo en uno.....	33
Tabla 3.3. Pruebas de evaluación de los Recobloques.....	40
Tabla 3.4. Índice de resistencia a la erosión.....	44
Tabla 4.1. Granulometría del material de excavación de Toluca.....	52
Tabla 4.2. Hidrómetro del material de excavación de Toluca.....	52
Tabla 4.3. Limite líquido del material de excavación de Toluca.....	55
Tabla 4.4. Limite plástico del material de excavación de Toluca.....	56
Tabla 4.5. Densidad del material de excavación de Toluca.....	58
Tabla 4.6. Contenido de materia orgánica en material de excavación de Toluca.....	58
Tabla 4.7. Contenido de sales solubles en material de excavación de Toluca.....	59
Tabla 4.8. Granulometría de residuos de construcción.....	59
Tabla 4.9. Densidad de residuos de construcción.....	61
Tabla 4.10. Contenido de cloruros en residuos de construcción.....	61
Tabla 4.11. Contenido de sulfatos en residuos de construcción.....	61
Tabla 4.12. Contenido de azufre total en residuos de construcción.....	62
Tabla 4.13. FRX de material de excavación y residuos de construcción.....	62

Tabla 4.14. DRX de material de excavación y residuos de construcción.....	63
Tabla 4.15. Mezclas preliminares para Recobloques.....	66
Tabla 4.16. Mezclas para ensayo en ladrillos y Recobloques.....	66
Tabla 4.17. Resistencia a la compresión en ladrillos.....	68
Tabla 4.18. Absorción máxima inicial de agua en ladrillos.....	69
Tabla 4.19. Resistencia a la compresión en Recobloques con suelo de Toluca.....	70
Tabla 4.20. Absorción máxima inicial de agua en Recobloques con suelo Toluca.....	71
Tabla 4.21. Resistencia a la compresión en Recobloques con mezcla de suelos.....	73
Tabla 4.22. Granulometría de la mezcla de suelos.....	74
Tabla 4.23. Hidrómetro de la mezcla de suelos.....	74
Tabla 4.24. Densidad de mezcla de suelos.....	75
Tabla 4.25. Límite plástico de mezcla de suelos.....	76
Tabla 4.26. Mezcla óptima para elaboración de Recobloques.....	78
Tabla 4.27. Dimensiones de los Recobloques	79
Tabla 4.28. Densidad aparente de los Recobloques.....	79
Tabla 4.29. Resistencia a la compresión de los Recobloques	80
Tabla 4.30. Resistencia a la compresión de bloques sin mucílago.....	80
Tabla 4.31. Análisis T de resistencia a la compresión.....	80
Tabla 4.32. Absorción máxima inicial de los Recobloques.....	82
Tabla 4.33. Absorción máxima inicial de los bloques sin mucílago.....	82
Tabla 4.34. Análisis T de absorción máxima inicial de agua.....	82
Tabla 4.35. Resistencia a la compresión de los Recobloques después de prueba de intemperismo.....	84

Tabla 4.36. Resistencia a la compresión de los bloques sin mucílago después de pruebas de intemperismo.....	84
Tabla 4.37. Análisis T de resistencia a la compresión después de intemperismo.....	85
Tabla 4.38. Erosión por spray.....	86
Tabla 4.39. Análisis T de resistencia a la erosión.....	87
Tabla 4.40. Inversión Inicial para elaboración de Recobloques.....	90
Tabla 4.41. Costo unitario del Recobloque.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Ladrillo macizo.....	13
Figura 2.2. Bloque de tierra comprimido.....	13
Figura 2.3. Adobe tradicional.....	14
Figura 2.4. Moldeadora de ladrillos	19
Figura 2.5. Secador solar para ladrillos.....	19
Figura 3.1. Metodología del proyecto.....	21
Figura 3.2. Método de cuarteo en el material de excavación.....	24
Figura 3.3. Análisis granulométrico por tamizado.....	25
Figura 3.4. Análisis granulométrico por hidrómetro.....	26
Figura 3.4.1. Identificación de D10, D30 y D60 en la curva granulométrica.....	27
Figura 3.5. Límite líquido por cono inglés.....	28
Figura 3.6. Determinación de límite plástico.....	29
Figura 3.7. Prueba de contracción lineal.....	30
Figura 3.8. Determinación de densidad.....	31
Figura 3.9. Procedimiento de elaboración de bloques.....	38
Figura 3.10. Moldeadora para bloques.....	39
Figura 3.11. Secador solar de bloques.....	40
Figura 3.12. Cámara de intemperismo acelerado.....	43
Figura 3.13. Prueba de resistencia a la erosión.....	44
Figura 4.1. Material de excavación.....	46
Figura 4.2. Residuos de construcción de ¼” a finos todo en uno.....	46

Figura 4.3. Residuos de madera.....	48
Figura 4.4. Mezcla de agua-mucílago.....	49
Figura 4.5. Prueba granulométrica en campo.....	50
Figura 4.6. Prueba de plasticidad en campo.....	51
Figura 4.7. Prueba de dureza en campo.....	51
Figura 4.8. Curva granulométrica del material de excavación de Toluca.....	53
Figura 4.9. Cono inglés.....	54
Figura 4.10. Límite líquido del material de excavación de Toluca.....	55
Figura 4.11. Límite plástico del material de excavación de Toluca.....	56
Figura 4.12. Índice de plasticidad del material de excavación de Toluca.....	57
Figura 4.13. Límite de contracción lineal.....	57
Figura 4.14. Curva granulométrica de residuos de construcción ¼” a finos.....	60
Figura 4.15. Difractograma del material de excavación de Toluca.....	64
Figura 4.16. Difractograma del residuo de construcción ¼” a finos todo en uno.....	65
Figura 4.17 a y b. Prueba preliminar de mezclas.....	66
Figura 4.18. Cabeceo de bloque.....	67
Figura 4.19. Prueba de resistencia a la compresión.....	68
Figura 4.20. Resistencia a la compresión en ladrillos.....	68
Figura 4.21. Prueba de absorción máxima inicial en ladrillos y bloques.....	69
Figura 4.22. Absorción máxima inicial de agua en ladrillos.....	70
Figura 4.23. Resistencia a la compresión de Recobloques.....	71
Figura 4.24. Absorción máxima inicial de agua en Recobloques.....	72

Figura 4.25. Curva granulométrica de la mezcla de suelos.....	75
Figura 4.26. Límite líquido de la mezcla de suelos.....	76
Figura 4.27. Índice de plasticidad de la mezcla de suelos.....	77
Figura 4.28. Recobloques.....	78
Figura 4.29. Análisis T de resistencia a la compresión.....	81
Figura 4.30. Análisis T de absorción máxima inicial de agua.....	83
Figura 4.31. Recobloques durante la prueba de intemperismo.....	83
Figura 4.32. Análisis T de resistencia a la compresión después de intemperismo.....	85
Figura 4.33. Prueba de erosión en Recobloques.....	86
Figura 4.34. Análisis T de resistencia a la erosión.....	87

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Por siglos, la industria de la construcción ha consumido una cantidad importante de recursos naturales, además de ser uno de los grandes responsables de la producción de residuos. De acuerdo con datos del año 2012, dicha industria ha producido 6, 111, 000 toneladas de residuos de construcción y demolición (RCD) por año en el período de 2006 a 2012 (INECC, 2012).

Material de excavación, concreto y tabique son los principales componentes de este tipo de residuos (43, 24 y 23 %, respectivamente). Como se ha demostrado en diferentes partes del mundo, estos residuos tienen un gran potencial para reusarse en el mismo sitio donde son generados con el propósito de disminuir el consumo de recursos provenientes de bancos de materiales naturales o vírgenes (INECC, 2012).

En los últimos años se ha demostrado que los materiales reciclados tienen potencial para ser aceptados por los consumidores, lo anterior respaldado por un importante aumento en la aceptación de productos reciclados alrededor del mundo (Vázquez, 2013).

Los RCD procesados adecuadamente están dando lugar a productos de buena calidad a partir de los cuales se ha iniciado un mercado con gran potencial. Precios locales, la disponibilidad y demanda de agregados naturales, así como la situación económica del país y el desarrollo de la industria de la construcción son factores importantes en la competitividad y aceptación de los agregados reciclados (SEMARNAT, 2009).

En Brasil este tipo de reciclado comenzó hace muchos años, sin embargo, su desarrollo ha sido lento en contraste con la Unión Europea, donde han propuesto que para el año 2020 deberán estar reciclando cerca del 70% de los residuos de la construcción (Vázquez, 2013). En países como Holanda, Bélgica, Suiza y Austria ya se ha alcanzado dicha meta.

1.1 Justificación

En la actualidad, una parte de los residuos de la construcción y demolición generalmente es dispuesta en sitios inadecuados, como barrancas, predios abandonados, la vía pública, etc. Mientras que otra parte es dispuesta en rellenos sanitarios, donde por sus características y volumen acortan la vida útil de éstos (CMIC, 2013).

El reúso y reciclaje de materiales son fundamentales para reducir la presión sobre los ecosistemas y otras fuentes de recursos, con este tipo de acciones se disminuyen el uso de energía y de agua necesaria para la extracción y procesamiento, así como la necesidad de espacio para disponer los residuos.

En los países desarrollados el incremento de los problemas asociados con los RCD ha motivado a implantar políticas que permitan manejar la situación. La tendencia en los países industrializados es considerar a los residuos como recursos que pueden ser utilizados en nuevos productos o para diversos propósitos.

El reciclaje de materiales de la construcción no es una novedad, sin embargo, el creciente interés en el desarrollo sustentable, específicamente en la construcción sustentable, como reacción de la sociedad hacia problemas ambientales y sociales, es un factor decisivo para incrementar el reciclado de estos materiales.

La presente tesis consistió en exponer y analizar la fabricación de Recobloques como posible alternativa para el aprovechamiento de los residuos de la construcción, los cuales son generados en todo tipo de obras. Se busca promover la utilización de tierra de excavación y agregados reciclados como base para la fabricación de los Recobloques. Lo anterior con la finalidad de disminuir el impacto ambiental de la fabricación de tabiques y bloques horneados, al contribuir en la reducción del consumo de energía y materias primas que requieren los materiales convencionales.

1.2 Objetivo

Realizar el análisis de las propiedades fisicoquímicas y mineralógicas de los materiales empleados en la elaboración de bloques, aplicando normas mexicanas y europeas.

1.3 Objetivos específicos

- Llevar a cabo una revisión del estado del arte sobre los componentes de la mezcla empleada en la elaboración de bloques ecológicos consultando medios impresos y electrónicos.
- Caracterizar los residuos de construcción y el material de excavación empleados para la elaboración de los Recobloques.
- Elaborar los bloques ecológicos utilizando una mezcla de material de excavación, residuos de construcción, residuos de madera y una mezcla de agua– mucílago, basada en resultados previos.
- Someter los Recobloques elaborados a pruebas mecánicas y de intemperismo con base en normas mexicanas.
- Comparar la resistencia mecánica entre Recobloques y bloques elaborados sin mucílago.
- Justificar la elaboración de Recobloques mediante un análisis de beneficios ambientales y económicos.

1.4 Alcances y limitaciones

- La fabricación de Recobloques se realizó con suelo (material de excavación) proveniente de Toluca, Estado de México y de Tlayacapan, Morelos, los agregados reciclados provenientes de Concretos Reciclados, los residuos de madera se obtuvieron de la planta de composta de CU, mientras que el nopal (nopal desechado) fue adquirido en el centro de acopio del nopal ubicado en la delegación Milpa Alta.
- La evaluación de calidad de los Recobloques se hizo bajo los estándares de la normatividad NMX-ONNCCE respecto a la industria de la construcción, así como normativa internacional.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Clasificación de residuos

En 1988 se publicó la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) donde por primera vez se definió el concepto de residuo y se estableció la necesidad de regular y controlar los residuos generados con la finalidad de brindar protección a la salud humana y al ambiente.

De acuerdo con la LGEEPA se entiende por residuo: “Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya finalidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó”.

En la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) promulgada en el año 2003 se define residuo como: “Material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido, semisólido, líquido o gas contenido en recipientes, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición conforme a lo dispuesto en la ley”. En el título primero sobre las disposiciones generales de la LGPGIR se establecen las siguientes definiciones:

- **Residuos Sólidos Urbanos (RSU).** “Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de los establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no se consideren residuos de otra índole”.
- **Residuos de Manejo Especial.** “Aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos”.

- **Residuos peligrosos.** “Aquellos que poseen algunas de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio”.

2.1.1 Residuos de manejo especial

En el Artículo 19 de la LGPGIR se establecen ocho categorías de residuos de manejo especial, los cuales se enlistan a continuación:

- I. Residuos de las rocas o los productos de su descomposición.*
- II. Residuos de servicios de salud con excepción de los biológicos infecciosos.*
- III. Residuos generados por las actividades pesqueras, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas, ganaderas, incluyendo los residuos de insumos.*
- IV. Residuos de los servicios de transporte, así como residuos de actividades que se realizan en puertos, aeropuertos, terminales ferroviarias y portuarias y en aduanas.*
- V. Lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales.*
- VI. Residuos de tiendas departamentales o centros comerciales generados en gran volumen.*
- VII. Residuos de la construcción, mantenimiento y demolición en general (RCD).**
- VIII. Residuos tecnológicos provenientes de industria.*
- IX. Pilas con litio, níquel, mercurio, cadmio, manganeso, plomo, zinc o cualquier otro elemento que permita generar energía, en niveles que no se consideren residuos peligrosos.*
- X. Otros que determine SEMARNAT en acuerdo con las entidades para facilitar su gestión integral.*

2.2 Residuos de la construcción

Los residuos de la construcción, normalmente se consideran como materiales remanentes, tanto en actividades de demolición, como en la construcción de nuevas edificaciones y generalmente están comprendidos por fragmentos y restos de tabique, piedra, concreto, mortero, madera, alambre, varilla, cerámica, etc., mezclados con tierra, materiales granulares y otros componentes.

De acuerdo con la NADF-007-RNAT-2013, que establece la clasificación y especificaciones de manejo para Residuos de la Construcción y Demolición (RCD) en el Distrito Federal, se define RCD como: "Materiales, productos o subproductos generados durante las actividades de demolición, ampliación, remodelación, modificación o construcción tanto pública como privada, así como el producto proveniente de la excavación cuando éste se haya alterado en sus condiciones físicas, químicas y biológicas originales". En dicha norma aparte de establecer la clasificación y especificaciones de manejo de los RCD se tiene como objetivo optimizar y fomentar el aprovechamiento de dichos residuos, así como minimizar su disposición final inadecuada.

En un informe del año 2009 presentado por SEMARNAT, respecto a la corriente de residuos generados por actividades de la construcción, se expresa que la generación de los RCD representa el 17.5% de los RSU en promedio a nivel nacional. De acuerdo con este informe el material de excavación representa aproximadamente el 43% de los RCD que se generan, lo anterior puede observarse en la Tabla 2.1.

Actualmente, en muchas partes del país es común arrojar los RCD en barrancas, banquetas, depresiones, cauces, etc., como resultado de la falta de regulación para este tipo de residuos. En el caso de la Ciudad de México y el Estado de México existe normatividad sobre el manejo de los RCD, la NADF-007-RNAT-2013 y NTEA-011-SMA-RS-2008 para la Ciudad y Estado de México, respectivamente.

2.2.1 Problemas asociados a la disposición de los RCD

Desde la década de 1980, expertos en países industrializados empezaron a considerar los problemas asociados con la disposición de RCD. Los problemas principales, que se encuentran tanto en países industrializados como en países en vías de desarrollo son (HOLCIM, 2007):

- Tabla 2.1. Generación promedio de RCD por subproducto

Subproducto	Generación nacional promedio (ton/año)x10 ³	%
Material de excavación	2637.55	43.16
Concreto	1489.88	24.38
Tabique	1425.72	23.33
Tablaroca/Yeso	247.50	4.05
Madera	92.89	1.52
Cerámica	51.94	0.85
Plástico	44	0.72
Piedra	37.89	0.62
Papel	29.94	0.49
Varilla	29.33	0.48
Asfalto	15.28	0.25
Lámina	5.5	0.09
Otros	3.67	0.06
TOTAL	6111	100

Fuente: Diagnóstico Básico Extenso 2012, INECC

- En varios países del mundo, los RCD constituyen aproximadamente el 50% de los RSU generados. Dicha cantidad tiene que ser manejada de una forma u otra.

- En países y regiones donde no es común la práctica de reúso y reciclaje de los RCD es común que estos residuos sean depositados en tiraderos o rellenos sanitarios.
- Los problemas ambientales asociados con tiraderos y rellenos son grandes. Además de los problemas visuales del área ocupada y la destrucción de la topografía y vegetación natural del lugar, los tiraderos o rellenos pueden contener sustancias tóxicas y peligrosas que pueden contaminar el suelo, el agua y los alrededores. Especialmente cuando se mezclan los RCD con los RSU, los sitios de disposición pueden atraer animales indeseables e insectos que pueden causar problemas a la salud.
- Otro problema asociado, es la disposición en cualquier sitio, como carreteras, barrancas, ríos, etc., causando severos daños ambientales e implicando altos costos para remover los RCD del sitio.
- La disposición de RCD y al mismo tiempo producir nuevos materiales y componentes para la construcción a partir de materiales vírgenes, contribuyen al agotamiento de los recursos naturales e incrementa el daño ambiental por la generación de ruido, polvo, contaminación del aire, altos consumos de energía, emisiones de CO₂, entre otros impactos negativos.

En los países en vías de desarrollo los problemas asociados con la disposición de los RCD son de mayor seriedad (HOLCIM, 2007), porque:

- Hay menos conciencia acerca de los problemas asociados a los RCD y sus efectos.
- Falta de legislación y mecanismos de aplicación de la misma fomentan la mala disposición de los RCD.
- Falta de fondos y equipo técnico son razones por las cuales los vertederos ilegales aún persisten en la actualidad.

2.2.2 Panorama internacional

En el contexto del contrato marco sobre el manejo sustentable de los recursos, la comisión europea continuamente lleva a cabo estudios para identificar cuál es el uso actual de sus recursos, así como, el conocimiento necesario para mejorar el manejo de éstos. Lo anterior, permite a los miembros de la comunidad europea

establecer las bases para el desarrollo de políticas en materia del manejo sustentable de recursos.

Con base en lo anterior, la comisión europea ha identificado a los RCD como una prioridad debido a la gran cantidad de residuos que se generan, además, del gran potencial que tienen estos residuos para ser reciclados. El marco legal en materia de residuos para los miembros de la Unión Europea establece que los estados miembros deben llevar a cabo las acciones necesarias para lograr el objetivo de que el 70% (peso) de los residuos de la construcción y demolición para el año 2020 se reutilice, recicle o se implemente otro tipo de recuperación de materiales.

En el caso de Estados Unidos los agregados reciclados de concreto son empleados principalmente en aplicaciones no estructurales, como material base para rellenar sistemas de drenaje, base para pavimento, base de concreto, barreras de sonido en las autopistas, etc. La industria del concreto objeta el uso de agregados reciclados en concreto de grado estructural, argumentado que los datos que se tienen no son suficientes, las especificaciones del material son insuficientes respecto al control de calidad y que tiene la percepción, en general, de que el concreto a base de agregados reciclados es de una calidad inferior (Vázquez, 2013).

Sin embargo, el manejo apropiado de estos residuos se puede ver reflejado en el uso eficiente de los recursos naturales y la mitigación de los impactos al ambiente.

2.2.3 Panorama nacional

La información sobre la generación y manejo de los residuos de manejo especial en México es limitada. Los datos más actualizados sobre la generación y manejo de algunos RME en el país fueron publicados en el 2012 como parte del diagnóstico básico para la gestión de residuos (INECC, 2012).

Durante el período de 2006 – 2012, los mayores volúmenes de RME generados correspondieron a las excretas de ganado porcino y bovino lechero (66.71 millones de toneladas), seguido por papel y cartón (6.82 millones de toneladas)

y en tercer lugar los residuos de la construcción y demolición (6.11 millones de toneladas).

De acuerdo con la SEMARNAT (2009), en el año 2007 se reciclaron 13.5% de los RCD generados y se reutilizó apenas el 6%. La empresa Concretos Reciclados indica que uno de los factores que impiden la utilización de los residuos de construcción reciclados es la falta de confianza en la calidad de los materiales por parte de los consumidores, razón por la que se prefiere la utilización de materiales vírgenes, lo que no permite el crecimiento de esta práctica y el mercado de los RCD reciclados (INECC, 2012).

2.2.4 Reciclaje de los RCD

En la LGPGIR, *Reciclado* se define como “la transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o los elementos.”

El reciclado y reutilización de materiales viejos de construcción no es nuevo. Alrededor del mundo, casas de tierra han sido demolidas en repetidas ocasiones y reconstruidas usando la misma tierra y las mismas vigas de madera.

El objetivo común, de los conceptos de reciclado y reutilización, es ver a los residuos como recursos valorizables y en consecuencia trabajar para introducir mecanismos para maximizar el reuso de materiales que previamente fueron desechados (HOLCIM, 2007).

En México, el reciclaje de los residuos de la construcción es reciente y avanza lentamente. Desde hace tiempo es importante la necesidad que se tiene respecto al manejo de los residuos de la construcción. Es entonces que en el año 2004 se estableció la empresa Concretos Reciclados en la Delegación Iztapalapa.

De acuerdo con estimaciones del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, en México, el volumen de materiales reciclados es de apenas 9.6% de los residuos generados (INECC, 2012), cifra que es baja comparada con países miembros de la OCDE que en promedio reciclaron en el mismo año alrededor

del 24% de sus residuos, con algunos países con porcentajes del 58 y 47% en Corea del Sur y Alemania, respectivamente (SEMARNAT, 2015).

2.3 Construcción sustentable

En México, así como en el ámbito internacional, el crecimiento en el sector de la construcción tiene un rol importante en la economía, sin embargo, un aspecto a considerar son los posibles efectos negativos de índole ambiental.

En las principales ciudades de México, la urbanización ha motivado la expansión en la ocupación territorial lo que impacta adversamente sobre el entorno natural y agrícola de las ciudades, afectando a los ecosistemas, así como la disponibilidad y calidad de los recursos naturales.

La edificación, como actividad básica de la urbanización tiene un papel central. El diseño, uso de materiales y los métodos constructivos implican el incremento de costos, la escasez de materiales y de los recursos naturales.

De acuerdo con lo anterior, la norma mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013 tiene como objetivo introducir prácticas de edificación sustentable que contribuyan a mitigar los impactos ambientales y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, considerando aspectos socioeconómicos que aseguren la viabilidad, habitabilidad e integración al entorno urbano y natural. Es pertinente mencionar que esta norma es de aplicación voluntaria dentro del territorio nacional y se puede utilizar en una o varias fases: diseño, construcción, operación, mantenimiento y demolición de edificaciones.

En la misma norma, NMX-AA-164-SCFI-2013, sobre criterios y requerimientos ambientales mínimos para la edificación sustentable, se define edificación sustentable como: “la que a lo largo de su ciclo de vida cumple con las especificaciones de la norma mexicana, en materia de suelo, energía, agua, materiales, residuos, calidad ambiental y responsabilidad social”.

Para el cumplimiento de dicha norma, anualmente se debe hacer la evaluación de la conformidad a través de una unidad de verificación autorizada. La

evaluación de la conformidad se realiza mediante revisión documental, entrevistas y constatación física, de conformidad con lo siguiente:

- Requisitos Generales
 - I. *Suelo*
 - II. *Energía*
 - III. *Agua*
 - IV. ***Materiales y residuos***
 - V. *Calidad ambiental y responsabilidad social*

Dentro de la sección de materiales y residuos, se recomienda lo siguiente:

1. Al menos el 50% del material utilizado en el proceso de construcción de obra nueva y remodelación puede ser reciclable.
2. Se puede demostrar a través de la información de producto, que se tiene un contenido de al menos 10% de reutilizados y/o reciclados del total de materiales a ser utilizados en la obra. Para el cálculo del 10% existe una ponderación entre los materiales reciclados incluidos en una ecuación establecida dentro de la norma.

Sin embargo, es importante resaltar que la sustentabilidad se basa en el equilibrio de tres factores: el ambiental, el social y el económico, es decir, se debe buscar el punto medio entre los tres conceptos y no sacrificar uno por otro.

El mercado de la construcción sustentable en México necesita madurar, pese a que ha avanzado junto con Brasil, Colombia, Chile y Argentina. Se debe buscar que en toda obra se implementen medidas en materia de eficiencia energética, cuidado del agua y recursos naturales con el objetivo de prestar las condiciones necesarias para una vida digna de la comunidad (CMIC, 2013).

2.4 Materiales de construcción a partir de tierra

Enseguida se presentan los principales materiales de construcción fabricados a partir de tierra:

- Ladrillo macizo

Este tipo de piezas se fabrica a partir de material arcilloso que se somete a un proceso de cocción. Son resistentes ante la humedad y el calor, mientras que su color y calidad dependen de la clase de arcilla empleada (Aquino, 2015). Ver figura 2.1.



Figura 2.1. Ladrillo macizo

- Bloque de Tierra Comprimido (BTC)

Estas piezas se obtienen a partir de la compresión estática o dinámica de tierra húmeda que en ocasiones contienen estabilizantes o aditivos, después de la compresión sigue un desmolde inmediato y son secados en invernaderos, un ejemplo se muestra en la figura 2.2 (Apablazas, 2012).



Figura 2.2. Bloque de tierra comprimido

- Adobe

Es un material hecho a base de arcilla, arenas limosas y fibras mezcladas con agua que se moldean y secan al sol o pueden ser moldeados y prensados tal y como se muestra en la figura 2.3 (Maldonado, 2014).



Figura 2.3. Adobe tradicional

2.4.1 Ladrillos de adobe

El adobe como material de construcción ha sido utilizado por miles de años. Para el año 2012, se consideraba que el 50% de las casas del mundo en ese momento estaban construidas con adobe (Gama, 2012). En el mismo trabajo se establece la utilización del adobe como una alternativa para la autoconstrucción de viviendas de bajo costo. Sin embargo, se identificó como situación limitante que la mayoría de las técnicas constructivas tradicionales que emplean el adobe son empíricas, es decir, son técnicas asistemáticas porque varían en cada cultura y región.

El adobe tiene las siguientes características:

- Bajo costo de fabricación y alta disponibilidad
- Alto ahorro de energía, empleando principalmente energías renovables
- Fácil trabajabilidad y propiedades mecánicas aceptables en la construcción
- Fácil integración al ecosistema local, empleando materiales locales

Lo anterior, refleja que el adobe tiene un enfoque ecológico y una propuesta de vivienda de bajo costo, sin embargo, es importante señalar el escaso conocimiento que se posee acerca de la composición, características y

propiedades de los materiales que se emplean en la producción del adobe (Gama, 2012).

El adobe es un material empleado para la construcción de muros, cuyo proceso de fabricación es considerado amigable con el ambiente, sin embargo, su uso ha disminuido en gran medida debido a su mal comportamiento en situaciones de sismos e inundaciones.

2.5 Marco legal

Para el caso de los residuos de manejo especial y concretamente para los RCD, aplica lo siguiente:

- **Marco federal**

A nivel Federal, la regulación principal respecto a la gestión integral de residuos sólidos urbanos y los residuos de manejo especial se basa en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente de 1988 y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos de 2003, así como sus respectivas reformas.

- **Marco estatal**

La formulación de leyes y reglamentos estatales generalmente se basa en las Leyes Generales. Para la Ciudad de México la ley reguladora es la Ley de Residuos Sólidos y su Reglamento de 2003.

Debido a las necesidades establecidas en la LGEEPA y la LGPGIR se desarrolló en la Ciudad de México la NADF-007-RNAT-2013 respecto a la clasificación y especificaciones de manejo para los residuos de la construcción.

2.5.1 Normatividad aplicable para la fabricación de ladrillos

En México el sector de la construcción se encuentra regulado por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). Sin embargo, es importante mencionar que para el uso de material de excavación y residuos de construcción como materiales primarios en la elaboración de ladrillos y bloques no se encontraron normas aplicables para la

fabricación y evaluación de la calidad. En virtud de la anterior, se considera que para el presente proyecto la normativa aplicable es la siguiente:

I. NMX-C-441-ONNCCE-2013 para piezas de construcción de uso no estructural

En la NMX-C-441-ONNCCE-2013 se establecen los límites de resistencia a la compresión y absorción de agua máxima inicial. En la Tabla 2.2 se observan los valores de resistencia a la compresión y en la Tabla 2.3 se establecen los valores de absorción de agua máxima inicial.

-Tabla 2.2. Valores de resistencia a la compresión en México

Tipo de pieza	Configuración	Resistencia media (kg/cm ²)	Resistencia mínima individual (kg/cm ²)
Bloque	Macizo o hueco	35	28
Tabique extruido	Macizo o hueco	40	32
Tabique artesanal	Macizo	30	24
Pieza por celosía	Cara rectangular	25	20
	Cara no rectangular	25	20

Fuente: NMX-C-441-ONNCCE-2013

La resistencia media para piezas de construcción se basa en el promedio de 5 probetas.

-Tabla 2.3. Valores de absorción de agua máxima inicial en México

Tipo de material	Absorción inicial para muros expuestos al exterior (g/min)	Absorción inicial para muros interiores o con recubrimiento (g/min)
Concreto	5	7.5
Arcilla extruida o prensada	5	7.5

Fuente: NMX-C-441-ONNCCE-2013

2.5.2 Normatividad aplicable para la fabricación de Recobloques

A nivel internacional existe normativa sobre bloques de tierra comprimida estabilizados con cal o cemento. Es importante mencionar que solo en la norma española UNE-41410-2008 – Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques – Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo, se considera la estabilización del material mediante elementos naturales.

En la Tabla 2.4 se resumen las especificaciones para absorción de agua y resistencia a la compresión establecidas en diferentes normas internacionales.

- Tabla 2.4. Especificaciones internacionales para BTC

Norma	País	Absorción inicial	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
UNE-41410	España	No se indican límites de absorción de agua	13.3 – 50.9
ARSO-683	Kenia	No se indican límites de absorción de agua	> 20.4
NTC-5324	Colombia	Cb < 20 g/min, bloque débilmente capilar Cb < 40 g/min, bloque poco capilar	10.2 – 50.9
XP-P13-901	Francia	Cb < 20 g/min, bloque débilmente capilar Cb < 40 g/min, bloque poco capilar	10.2 – 50.9
NBR-8491	Brasil	No se indican límites de absorción de agua	> 20.4

Fuente: Esteve, 2016

A nivel internacional, existe la Norma Española UNE-41410:2008 respecto a definiciones, especificaciones y métodos de ensayo para bloques y tabiques de tierra comprimida para muros, donde se establecen las características que deben cumplir los bloques y las pruebas para determinar las mismas (UNE-41410:2008).

En esta norma se define un bloque de tierra comprimido (BTC) como “pieza para fábrica de albañilería generalmente con forma de paralelepípedo rectangular, obtenido por compresión estática o dinámica de tierra húmeda, seguida de un

desmolde inmediato, y que puede contener estabilizantes o aditivos para alcanzar a desarrollar características particulares del producto”.

2.6 Antecedentes

Como antecedentes del presente proyecto se han desarrollado dos investigaciones. En el trabajo de Maldonado (2014), se estudió el potencial aprovechamiento de residuos de construcción, residuos de tala y material de excavación para la elaboración de ladrillos ecológicos, utilizando una moldeadora de ladrillos de fabricación casera y un secador solar, ambos instrumentos elaborados a partir de materiales reciclados.

En el trabajo desarrollado por Aquino (2015), se establecieron los componentes actuales de los ladrillos ecológicos: material de excavación, residuos de tala, agregados reciclados y mucílago de nopal. A partir de un diseño de mezclas se estableció la composición óptima para la elaboración de ladrillos, los cuales se evaluaron y algunos presentaron resistencias de 30 a 80 kg/cm². Además, se estableció que la composición de las mezclas depende de las características físicas del material de excavación, como son la granulometría y la plasticidad.

Posteriormente, en el trabajo de Aguilar (2017) se fabricaron bloques ecológicos en forma artesanal con resultados satisfactorios en las pruebas de resistencia a la compresión y absorción de agua.

Es importante mencionar que para ambos trabajos se utilizaron materiales de excavación de diferentes zonas del país. En el trabajo de Maldonado se trabajó con un suelo proveniente del estado de Puebla, Aquino empleó material de excavación proveniente del Estado de México, Hidalgo y la Ciudad de México, mientras que Aguilar empleó una mezcla de suelos proveniente de Puebla.

2.6.1 Equipo empleado en la elaboración de ladrillos ecológicos

El equipo empleado por Maldonado, Aquino y Aguilar para la elaboración de ladrillos ecológicos consistió en una moldeadora de ladrillos y un secador solar, ambos construidos a partir de materiales reciclados. A continuación, se describen dichos equipos.

2.6.1.1 Moldeadora de ladrillos

La máquina moldeadora de ladrillos se fabricó a partir de residuos de madera generados en el taller de carpintería del Instituto de Ingeniería de la UNAM. El funcionamiento es a partir de un marco de madera con una tapa que sirve para ejercer presión sobre los ladrillos empleando una palanca que comprime los ladrillos, logrando una textura uniforme (Aquino, 2015). La máquina moldeadora se observa en la figura 2.4.



Figura 2.4. Moldeadora de ladrillos.

2.6.1.2 Secador solar de ladrillos

El secador solar es un equipo que aprovecha la radiación solar como fuente de energía para disminuir el contenido de agua en los ladrillos. Aquino (2015) realizó un diseño de secador solar empleando como principio el funcionamiento de un horno solar; este diseño se fabricó a partir de residuos de madera, vidrio, aluminio y cartón, como se observa en la figura 2.5.



Figura 2.5. Secador solar para ladrillos

2.6.2 Recobloques a partir de residuos

En el trabajo de Maldonado (2014) y Aquino (2015) se estableció la factibilidad de desarrollar ladrillos ecológicos a partir de la reutilización y el reciclaje de material de excavación, residuos de construcción y residuos de tala generados en el desarrollo de una edificación, mientras que en el trabajo de Aguilar (2017) se desarrollaron bloques ecológicos de forma artesanal utilizando los materiales antes mencionados.

En la presente investigación se fabricaron bloques a partir de los mismos materiales, los cuales se denominaron Recobloques. El nombre Recobloque surgió a partir de las palabras: residuo de construcción y bloque.

Debido al interés de un productor en los bloques ecológicos desarrollados en estudios previos se determinó utilizar material de excavación proveniente de la Colonia junta local ubicada en Toluca, Estado de México, donde se encuentra el sitio de trabajo del interesado.

A partir de normatividad española se analizaron los componentes de los Recobloques desde el punto de vista fisicoquímico ya que a pesar de que se ha demostrado que cumplen con la normativa mexicana, la normativa internacional pide analizar la composición física y química de los componentes para asegurar contar con materiales de construcción que cumplan con los estándares internacionales.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA ELABORACIÓN DE RECOBLOQUES

El desarrollo del presente trabajo se dividió en seis etapas. En la *etapa I* se llevó a cabo la búsqueda de información para fundamentar la elaboración de Recobloques con residuos de la construcción y otros materiales.

En la *segunda etapa* se realizaron pruebas preliminares al material de excavación ya que de acuerdo a recomendaciones en estudios previos el conocimiento de algunas características físicas del suelo es fundamental para el diseño de mezclas.

Para la *etapa III* se llevaron a cabo pruebas físicas y químicas para los residuos de construcción, así como del material de excavación.

La *etapa IV* del proyecto consistió en la determinación de la mezcla óptima para la elaboración de los Recobloques. En la *etapa V* se evaluaron los Recobloques y se compararon resultados respecto a bloques elaborados con solo agua, es decir, sin mucílago.

Por último, en la *etapa VI* se desarrolló un estudio de factibilidad para el proyecto. En la figura 3.1 se resume la metodología empleada, posteriormente se describirá a detalle cada una de las etapas del proyecto.

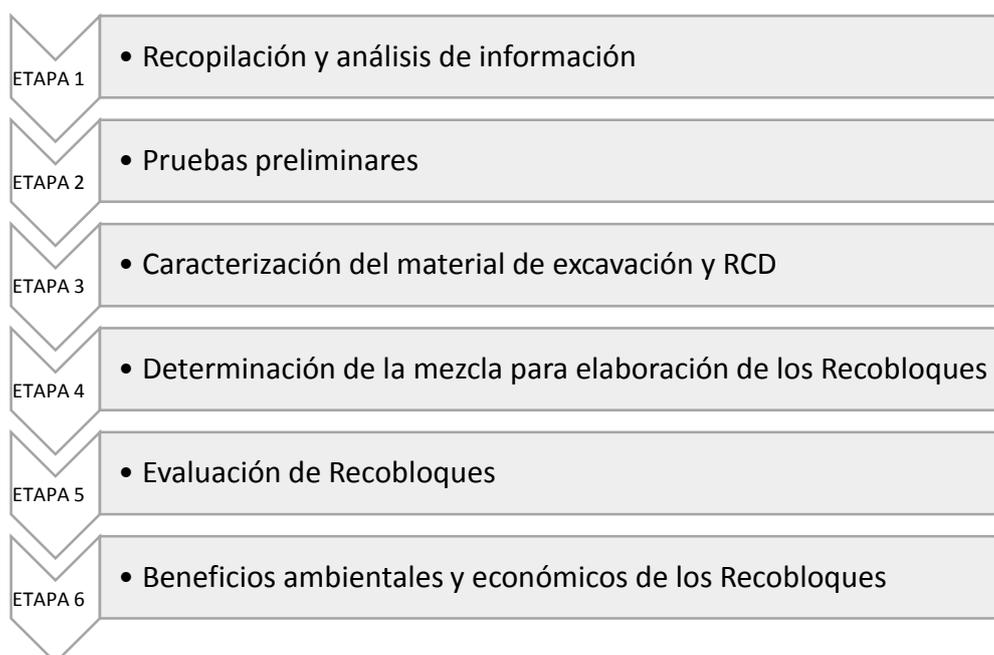


Figura 3.1. Metodología del proyecto

3.1 Recopilación y análisis de información

Se revisó la legislación y normatividad nacional aplicable a nivel federal y estatal en materia de los residuos de la construcción. Así como, a nivel internacional.

Posteriormente se determinó el estado actual nacional e internacional sobre los residuos de construcción y el reciclaje de éstos. Además, se consultaron estándares nacionales e internacionales para establecer los procedimientos de pruebas físicas y químicas en laboratorio para los agregados reciclados.

A partir de la consulta de estudios previos, resultados de investigaciones, manuales de procedimientos, instituciones, así como la consulta de publicaciones periódicas a nivel nacional e internacional se recabó información general sobre los materiales a emplear en la elaboración de Recobloques, es decir, el material de excavación, residuos de la construcción, residuos de tala y mucílago de nopal.

3.2 Pruebas de campo en material de excavación

En la guía para la fabricación de ladrillos ecológicos (Rojas y Aquino, 2016), se establece que es necesario identificar las características del suelo en campo mediante la realización de tres sencillas pruebas: granulometría, plasticidad y dureza del material de excavación ya que al ser el material predominante en la mezcla influye de forma importante en la misma y el conocer dichas características es relevante para aceptar o rechazar la utilización del material de excavación. En dicha guía se menciona que no es recomendable utilizar la capa superficial del suelo por la presencia de restos orgánicos, es preferible emplear la capa que se encuentra 30 cm por abajo del terreno.

- *Prueba Granulométrica en campo*

Mediante esta prueba es posible conocer la proporción de arena, limo y arcilla presentes en la tierra. De forma general el procedimiento consiste en mezclar tierra cribada y agua, en proporción de 1 de tierra por 2 de agua, dentro de un recipiente transparente; se agita y se deja reposar por 24 horas para que sedimenten los componentes. Los elementos se separan de acuerdo con su

peso lo que permite establecer el espesor de cada capa y con esto se conoce la proporción de cada componente presente en la tierra (Rojas y Aquino, 2016).

- *Prueba de Plasticidad en campo*

La prueba de plasticidad permite conocer la calidad de la misma. El procedimiento consiste en humedecer los residuos de excavación y formar un rollo de 20 cm de longitud por 1 cm de diámetro, enseguida se desliza por el borde de una mesa y se determina la longitud a la cual se rompe el borde suspendido (Rojas y Aquino, 2016). La calidad del residuo de excavación se determina a partir de lo siguiente:

- Si la ruptura se da entre 5 y 10 cm existe una adecuada proporción entre arcilla y arena.
- Si la ruptura es antes de 5 cm o después de 15 cm la tierra no es adecuada, sin embargo, se puede mejorar.

- *Prueba de dureza en campo*

Esta prueba permite conocer la resistencia de la tierra. Consiste en formar bolitas de 2 cm de diámetro y pastillas de 3 cm de diámetro con 1.5 cm de espesor, ambos casos de forma manual. Las piezas se dejan reposar por 48 horas y posteriormente se realiza un aplastamiento manual con lo que se evalúa el grado de dureza (Rojas y Aquino, 2016).

3.3 Caracterización del material de excavación

Para llevar a cabo las siguientes pruebas es necesario una etapa de homogeneización de muestras que juntas sean de al menos 50 kg para obtener una muestra de 5 kg aplicando el método de cuarteo establecido en la NMX-AA-015-1985, lo anterior se puede observar en la figura 3.2.



Figura 3.2. Método de cuarteo en el material de excavación

La caracterización física del material de excavación y los residuos de construcción se realizó en el laboratorio de mecánica de suelos ubicado en el edificio V del Posgrado de Ingeniería Civil de la UNAM.

- Tabla 3.1 Caracterización del material de excavación

Característica Física	Procedimiento
Granulometría.	ASTM D422-63 – Método de prueba para análisis de tamaño de partícula en suelos.
Caracterización de finos (pasan malla No. 200).	ASTM D422-63 – Método de prueba para análisis de tamaño de partícula en suelos.
Límites de Atterberg.	ASTM D4318-00 – Método de prueba para límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.
Densidad.	ASTM D854-02 – Método de prueba para gravedad específica de suelos.
Característica Química	Procedimiento
Contenido de materia orgánica.	UNE-103204 – Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo.
Contenido de sales solubles de un suelo.	UNE-103205 – Determinación del contenido de sales solubles de un suelo.

Fuente: Elaboración propia.

La caracterización del material de excavación se realizó de acuerdo con lo planteado en la Tabla 3.1. En primera instancia se realizaron las pruebas de granulometría en laboratorio, límites de Atterberg y determinación de densidad.

3.3.1 Prueba granulométrica

La caracterización de una muestra de suelo consiste en separar y clasificar por tamaños las partículas que lo componen, esto se hace mediante el proceso de análisis granulométrico que determina la porción en que participan los granos del suelo en función a su tamaño. Para realizar esta prueba se consultó la norma ASTM-D422-63 que establece un método de prueba para análisis de tamaño de partícula en suelos. En la prueba de granulometría se emplean generalmente dos métodos:

➤ Análisis por tamizado

Este método consiste en hacer pasar la muestra de suelo a través de un conjunto de mallas o tamices que tienen aberturas que se van reduciendo hasta llegar a la malla No. 200. Lo retenido en cada malla se pesa y el porcentaje que representa respecto al peso de la muestra total se suma a los porcentajes retenidos en todas las mallas de mayor tamaño, el complemento a 100% de esa cantidad da el porcentaje de suelo que es menor que el tamaño representado por dicha malla (Juárez-Badillo, 2005).

El método se dificulta cuando las aberturas son pequeñas porque suele requerirse agua para ayudar el paso de la muestra (procedimiento de lavado o vía húmeda). En la figura 3.3 se ejemplifica el tamizado por mallas.



Figura 3.3. Análisis granulométrico por tamizado

La granulometría vía húmeda consiste en saturar el material con agua para posteriormente lavar el suelo y con esto separar el material empleando mallas de diferentes tamaños.

➤ **Análisis por hidrómetro para suelos finos**

El análisis hidrométrico se basa en el principio de la sedimentación de granos de suelo en agua. Cuando un espécimen de suelo se dispersa en agua, las partículas se asientan a diferentes velocidades, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos. Comúnmente se supone que todas las partículas de suelo son esferas y que la velocidad de las partículas se puede expresar por la ley de Stokes. En la figura 3.4 se ejemplifica la prueba de análisis por hidrómetro.



Figura 3.4. Análisis granulométrico por hidrómetro

Los resultados del análisis por tamizado e hidrómetro se presentan en gráficas semilogarítmicas conocidas como curvas granulométricas. Los diámetros de las partículas se grafican en escala logarítmica como abscisas y el porcentaje en escala aritmética como ordenadas.

La forma de la curva de granulometría da una idea de la distribución granulométrica del suelo, un suelo constituido por un solo tamaño de partículas (suelo mal graduado) está representado por una línea vertical, mientras que un material bien graduado debe cumplir con la condición de que el coeficiente de uniformidad sea $C_u \geq 4$ para gravas y $C_u \geq 6$ para arenas, y que el coeficiente de curvatura C_c esté comprendido entre 1 y 3 para ambos casos.

Para calcular los coeficientes de uniformidad y de curvatura, C_u y C_c respectivamente, es necesario determinar el diámetro de partícula al 10%, 30% y 60% del material acumulado en la curva de distribución. Dichos puntos se determinan a partir de la intersección de la curva granulométrica con líneas horizontales al 10%, 30% y 60%, lo anterior se ejemplifica en la figura 3.4.1. Entonces C_u y C_c se calculan con las ecuaciones 3.1 y 3.2.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} \dots(\text{Ec. 3.1}); C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \dots(\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

D_{10} = Tamaño de partícula del 10% de la curva de distribución.

D_{30} = Tamaño de partícula del 30% de la curva de distribución.

D_{60} = Tamaño de partícula del 60% de la curva de distribución.

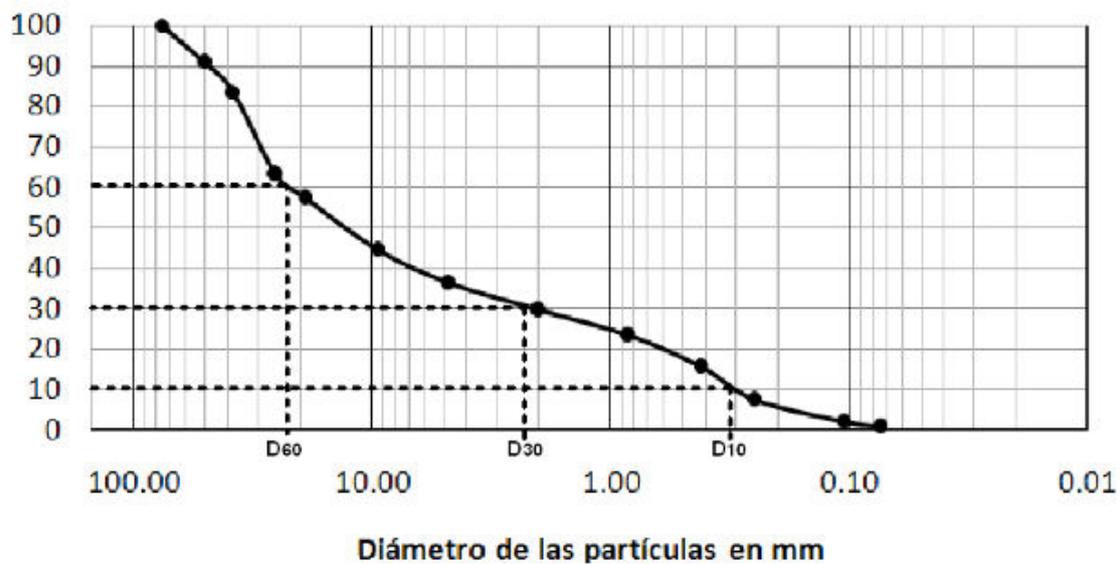


Figura 3.4.1. Identificación de D_{10} , D_{30} y D_{60} en la curva granulométrica

3.3.2 Límites de plasticidad o de Atterberg

La plasticidad es la característica de los suelos para soportar deformaciones rápidas, sin variación volumétrica apreciable y sin romperse. Existe una relación entre la plasticidad y las propiedades fisicoquímicas determinantes del comportamiento mecánico de las arcillas, la plasticidad se debe al contenido de partículas finas en un suelo (Juárez-Badillo, 2005).

Uno de los criterios para medir la plasticidad es el desarrollado por Atterberg quién determinó parámetros de comportamiento en función del contenido de agua de los materiales. Con base en esto se determinan los estados de consistencia que permiten establecer los límites para suelos susceptibles a ser plásticos, dichos límites son: límite líquido, límite plástico e índice plástico. Para la realización de esta prueba se consultó la norma ASTM-D4318-00.

I. **Determinación del límite líquido (LL)**

El límite líquido establece la frontera entre los estados de consistencia líquido y plástico. Se determina como el contenido de humedad de la muestra expresado en porcentaje respecto al peso seco de la misma. Para determinar el límite líquido generalmente se emplea el método de percusión de la copa Casagrande, sin embargo, existen métodos alternativos que emplean conos penetrantes. (Juárez-Badillo, 2005). Para el presente trabajo el límite líquido se determinó empleando el cono inglés (figura 3.5).



Figura 3.5. Límite líquido por cono inglés

II. **Determinación del límite plástico (LP)**

El límite plástico establece la frontera entre los estados de consistencia plástico y semisólido. El límite plástico se ha definido como el contenido de humedad del

suelo al cuál un cilindro de este se rompe o agrieta al amasado presentando un diámetro de 3 mm (Juárez-Badillo, 2005), figura 3.6.



Figura 3.6. Determinación de límite plástico

III. Determinación del índice plástico (IP)

El cálculo del índice plástico indica la diferencia aritmética entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), es el segundo parámetro para definir la plasticidad y guarda estrecha relación con la cantidad de arena (Juárez-Badillo, 2005). El índice plástico se calcula empleando la ecuación 3.3.

$$I_p = LL - LP \dots (\text{Ec. 3.3})$$

Donde:

IP = Es el Índice Plástico del suelo (%)

LL = Es el Límite Líquido del suelo (%)

LP = Es el Límite Plástico del suelo (%)

IV. Determinación de contracción lineal (CL)

La contracción lineal en los suelos (figura 3.7) se puede considerar como la variación en volumen respecto al contenido de humedad, divide a los estados de consistencia sólidos y semisólidos del suelo. Si la contracción lineal de un suelo es mayor al 9% se espera una actividad de contracción – expansión (Juárez-Badillo, 2005).



Figura 3.7. Prueba de contracción lineal

La contracción lineal se calcula mediante la ecuación 3.4.

$$CL = \frac{Li-Lf}{Li} * 100....(Ec. 3.4)$$

Donde:

CL = Contracción lineal (%)

Li = Es la longitud inicial de la barra de suelo húmedo, en cm

Lf = Es la longitud media de la barra de suelo seco, en cm

V. Clasificación SUCS

En la norma ASTM-D-2487-00 se describe el sistema para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería SUCS, por sus siglas en inglés. El sistema se basa en la determinación en laboratorio del tamaño de partícula, límite líquido e índice de plasticidad para precisar la clasificación. Es importante mencionar que esta clasificación se limita solo a suelos naturales y no se aplica cuando se tiene un contenido de finos menor de 12%.

De acuerdo con esta clasificación los suelos finos se dividen en arcillas, limos y limos o arcillas orgánicas tomando en cuenta sus características de plasticidad. Al igual que los suelos gruesos los suelos finos se designan por símbolos de grupo, cada símbolo consta de un prefijo y un sufijo (Juárez-Badillo, 2005). Los prefijos son las iniciales en idioma inglés de los principales tipos de suelos, y el sufijo indica la subdivisión del grupo:

- I. Arcillas: Los materiales que entran en esta clasificación llevan el símbolo de C (Clay).
- II. Limos: Los materiales que entran en esta clasificación llevan el símbolo M (del sueco mjala; limo).

- III. Limos y arcillas orgánicas: Los materiales que entran en esta clasificación llevan el símbolo O (Organic).
- IV. Cada suelo se subdivide según su Límite Líquido, en dos grupos:
- V. Suelos de compresibilidad baja a media: Si su Límite Líquido $< 50\%$ se añade el símbolo L (Lowcompressibility), dando como resultado los grupos ML, CL y OL.
- VI. Suelos de alta compresibilidad: Si su Límite Líquido $> 50\%$ se añade el símbolo H (High compressibility), obteniendo los grupos MH, CH y OH.

Mientras que los suelos altamente orgánicos forman un grupo independiente de símbolo Pt (Pet).

3.3.3 Densidad

La densidad de sólidos se define como la relación que existe entre el peso de los sólidos y el peso del volumen de agua desalojada por los mismos. El valor de la densidad queda expresado en un número que se puede emplear para clasificación de suelos (Juárez-Badillo, 2005).

Para determinar la densidad del material de excavación y de los residuos de construcción se consultó la norma ASTM-D854-02. La densidad se determina en el laboratorio (figura 3.8) mediante el empleo de matraces aforados que se calibran a distintas temperaturas.

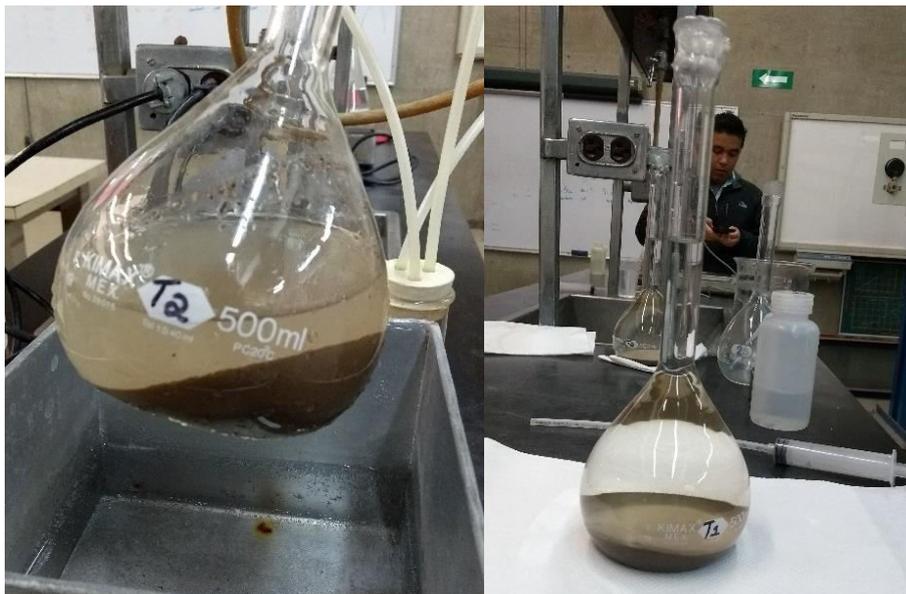


Figura 3.8. Determinación de densidad

La densidad del material se calcula con la ecuación 3.5.

$$G_s = \frac{W_s}{W_s - W_{vws} + W_{vw}} \dots (\text{Ec. 3.5})$$

Donde:

G_s = Densidad del suelo (g/cm^3)

W_s = Peso seco de suelo (g)

W_{vws} = Peso del matraz + agua + suelo (g)

W_{vw} = Peso del matraz + agua (g)

3.3.4 Contenido de materia orgánica

De acuerdo con la norma española UNE-41410:2008, “Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques, especificaciones y métodos de ensayo” la tierra destinada a la fabricación de bloques debe cumplir con dos condiciones:

- La presencia de materia orgánica debe ser menor de 2%
- La presencia de sales solubles debe ser menor de 2%

Para la determinación del contenido de materia orgánica se empleó la norma española UNE-103204-93, donde se especifica un método para determinar el contenido de materia orgánica oxidable de un suelo mediante permanganato de potasio. Mediante este método se determina el porcentaje de materia orgánica presente en la muestra como el cociente entre los centímetros cúbicos de solución de permanganato 0.1 N gastados en la titulación de la muestra (color rosa tenue) multiplicados por el factor de normalidad y los gramos de muestra empleados.

3.3.5 Contenido de sales solubles

La determinación del contenido de sales solubles en el material de excavación se determinó de acuerdo con la norma española UNE-103205-2006 donde se

establece un procedimiento que permite determinar el contenido de sales solubles mediante el tratamiento con agua destilada y una disolución de ácido clorhídrico.

3.4 Caracterización de residuos de construcción ¼” a finos todo en uno

La caracterización de los residuos de construcción se realizó de acuerdo con lo planteado en la Tabla 3.2. Para la determinación de granulometría y densidad de dichos residuos se emplearon los mismos procedimientos descritos en los apartados 3.3.1 y 3.3.3, mientras que la determinación de cloruros, sulfatos y azufre total se llevó a cabo de acuerdo con lo establecido en la norma española UNE-EN-1744-1-1998.

- Tabla 3.2 Caracterización de los residuos de construcción ¼” a finos todo en uno

Característica Física	Procedimiento
Granulometría.	ASTM D422-63 – Método de prueba para análisis de tamaño de partícula en suelos.
Densidad.	ASTM D854-02 – Método de prueba para gravedad específica de suelos.
Característica Química	Procedimiento
Contenido de cloruros solubles en agua por el método de Volhard.	UNE-1744-1 – Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos (parte 7).
Contenido de sulfatos solubles en agua.	UNE-1744-1 – Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos (parte 10).
Contenido de azufre total.	UNE-1744-1 – Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos (parte 11).

Fuente: Elaboración propia

3.4.1 Contenido de cloruros solubles en agua por el método de Volhard

El uso de los residuos de construcción contaminados con sulfatos o cloruros necesita de un tratamiento para garantizar que las concentraciones de dichos iones sean bajas. Los cloruros presentes en los residuos de construcción pueden lixiviar si tienen contacto con agua (Silva, 2014).

De acuerdo con la UNE-1744-1 la determinación de cloruros se fundamenta en el método de Volhard donde una muestra de los residuos de construcción se trata con agua para extraer los iones cloruro. Posteriormente se añade un exceso de una disolución de nitrato de plata a la que contiene los iones cloruro, la cantidad de la disolución de nitrato de plata que no reacciona se valora con una disolución patrón de tiocianato de potasio utilizando como indicador otra disolución de sulfato de amonio y hierro (III).

Los cloruros se expresan como iones cloruro en % masa, con relación al contenido en iones cloruro de los residuos de construcción. El contenido de cloruros se calcula por medio de la ecuación 3.6.

$$C (\%) = 0.003546W * [V_5 - (10 * C_t * V_6)] \dots (\text{Ec. 3.6})$$

Donde:

V_5 = Volumen añadido de la disolución de nitrato de plata (mm)

V_6 = Volumen consumido de la disolución de tiocianato de potasio (mm)

C_t = Concentración de la disolución de tiocianato de potasio (mol/L)

W = Relación agua/residuo de construcción (g/g)

3.4.2 Contenido de sulfatos solubles en agua

Los sulfatos solubles en agua presentes en los residuos de construcción provienen principalmente del yeso los cuales son potencialmente reactivos. El yeso tiene un efecto negativo en la calidad de los materiales por las características de solubilidad, poca dureza y baja densidad (Silva, 2014).

De una muestra a partir de los residuos de construcción con agua se extraen los iones sulfatos solubles en la misma. El contenido de sulfatos se determina por precipitación a pH comprendido entre 1 y 1.5, con una disolución de Cloruro de Bario a ebullición. Finalmente se recupera el precipitado por filtración y el contenido de sulfatos se expresa en % masa con relación a la masa del residuo de construcción. Para calcular el contenido de sulfatos como SO_3 se emplea la ecuación 3.7.

$$SO_3(\%) = 2 * W * 0.343 * m_p \dots (\text{Ec. 3.7})$$

Donde:

m_p = Masa del precipitado de sulfato de bario (g)

W = Relación agua/residuo de construcción (g/g)

3.4.3 Contenido de azufre total

La muestra de ensayo se trata con bromo y ácido nítrico para transformar todos los compuestos de azufre en sulfatos. Los sulfatos se precipitan y se recuperan en forma de sulfato de bario. El contenido de azufre total (S) en los residuos de construcción se expresa en % masa de acuerdo con la ecuación 3.8.

$$S(\%) = \frac{m_p}{m_m} * 13.74 \dots (\text{Ec. 3.8})$$

Donde:

m_p = Masa del precipitado de sulfato de bario (g)

m_m = Masa de la muestra de residuos de construcción (g)

3.5 FRX del material de excavación y residuos de construcción

La espectroscopía de fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica que permite la identificación química elemental de una muestra a partir de la emisión de rayos

X secundarios o fluorescentes que son emitidos por la muestra una vez que ha sido expuesta a la irradiación de rayos X primarios (Meléndez, 2009).

Lo anterior resulta en diferentes estados energéticos que son únicos para cada átomo permitiendo medir la composición elemental de una muestra con una gráfica de intensidad donde cada elemento se identifica por una distribución de picos de energía característico (Trujillo, 2014).

Para el presente trabajo se realizó un análisis de elementos mayoritarios en muestra fundida mediante un espectrómetro secuencial de rayos X (Siemens SRS 3000), usando una concentración de 10% de muestra en base seca, mientras que la pérdida por calcinación se determinó calentando 1g de muestra a 950°C durante dos horas y calculando la diferencia de masa.

La prueba se realizó en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía del Instituto de Geología en la UNAM.

3.6 DRX del material de excavación y residuos de construcción

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica que permite identificar los minerales presentes en una muestra a partir de los rayos X difractados por los cristales. Cada estructura cristalina es única para cada mineral, esto implica que los rayos X difractados también son específicos para cada mineral, lo que permite ubicar en un espectro determinados minerales y su abundancia. (Trujillo, 2014).

Se realizó un análisis de DRX para determinar la composición mineralógica de las muestras empleando un portamuestras de aluminio de doble carga, así como un Difractómetro EMPYREAN equipado con filtro de Ni, tubo de cobre de foco fino, monocromador de grafito y detector PIXcel3D. La medición se realizó en el intervalo angular 2θ de 5° a 80° con un “stepscan” de 0.003° y un tiempo de integración de 40s por paso.

Previamente las muestras se trituraron y homogeneizaron mediante un mortero para tamizarlas utilizando malla 200 (<75 micras). La prueba se realizó en el Laboratorio de Difracción de Rayos X del Instituto de Geología en la UNAM.

3.7 Determinación de la mezcla para elaboración de los Recobloques

Una vez realizadas las pruebas de campo para una caracterización preliminar del material de excavación y con base en estudios previos se plantean mezclas preliminares de los materiales con el objetivo de observar el comportamiento de cada mezcla y determinar las condiciones óptimas para la fabricación de los Recobloques.

Para llevar a cabo la prueba se realiza el pesaje de las proporciones, se mezclan en seco, se agrega agua y se moldean pequeños Recobloques, los cuales se dejan secar por un período de 48 horas. Después del secado se realiza la compresión de cada bloque hasta que se rompan.

3.8 Descripción del diseño estadístico del experimento

El diseño experimental para la presente investigación fue de un factor con dos niveles aleatorios, debido a que se buscó evaluar la influencia del mucílago en los Recobloques respecto a bloques elaborados sin mucílago.

Para determinar el número de unidades experimentales se consideraron los dos niveles propuestos (Recobloque y bloque sin mucílago) y con base en la normatividad aplicable se estableció realizar cinco repeticiones por cada variable de respuesta: resistencia a la compresión, absorción máxima inicial de agua, resistencia a la compresión después de la cámara de intemperismo y resistencia a la erosión. Entonces, multiplicando cinco repeticiones por cuatro variables de respuesta por los dos niveles propuestos se obtiene un total de 40 unidades experimentales.

Los resultados de la experimentación para cada una de las variables de respuesta se analizaron con el software GraphPad Prism 6, programa donde se realizó el análisis T no pareada a dos colas de los niveles propuestos para cada una de las variables de respuesta. Se plantean las siguientes hipótesis:

H_0 = No hay diferencia entre tratamientos.

H_1 = Los tratamientos son diferentes entre sí.

3.9 Procedimiento de elaboración de bloques

La fabricación de los bloques se realizó en el Instituto de Ingeniería, edificio 8. A continuación, se describe el procedimiento de fabricación de forma general.

Como primer paso se obtuvo la mezcla H₂O-mucílago, cortando trozos de nopal de 1 cm x 1 cm aproximadamente para mezclarlos con agua en proporción de 1:3. Al tercer día de reposo se separan los trozos de nopal y se obtiene la mezcla H₂O-mucílago.

Se pesan los componentes en seco y se mezclan, se agrega la cantidad de H₂O-mucílago necesaria y se mezcla de nuevo hasta obtener una mezcla homogénea.

En la figura 3.9 se muestra el procedimiento general para la elaboración de bloques. En resumen, la mezcla humedecida se coloca en la tolva de la moldeadora (figura 3.10), se rellena el molde y se comprime con la palanca integrada. Posteriormente se procede al desmolde empleando la misma palanca.

El bloque fresco se pesa y se deja secar 3 días a la sombra para evitar agrietamientos. Después, se coloca dentro del secador (figura 3.11) y se monitorea el peso.

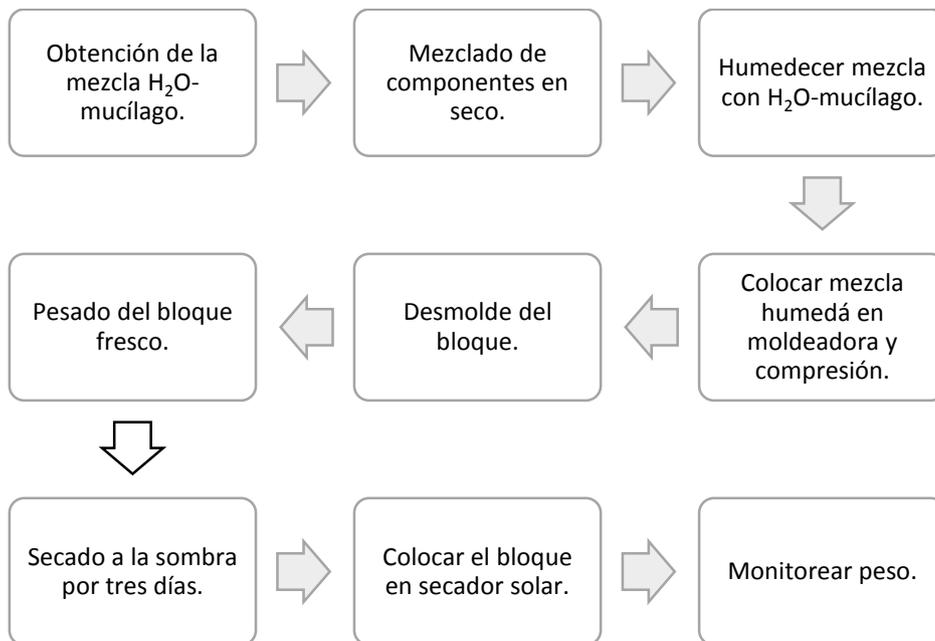


Figura 3.9. Procedimiento de elaboración de bloques

3.9.1 Equipos empleados en la elaboración de Recobloques

Como se mencionó anteriormente para la fabricación de los Recobloques son necesarios dos equipos, la moldeadora y el secador solar. Los equipos utilizados se describen a continuación:

➤ *Moldeadora de bloques*

La moldeadora TA-100, es una máquina manual para fabricar bloques de tierra compactada. De acuerdo con la ficha técnica, el peso bruto del equipo es de 180 kg y se necesitan 3.50m X 1.50m de piso para operar, así como una altura libre de 2.50 m. Está fabricado en acero de alta calidad y recubierto con pintura electrostática horneada a dos tonos.

El tamaño del bloque, de acuerdo con el molde, es de 30 cm de largo X 15 cm de ancho X 10 cm de alto. Con esta máquina se puede lograr una productividad promedio de 550 bloques por jornada de acuerdo con el fabricante. En la figura 3.10 se puede observar la moldeadora.



Figura 3.10. Moldeadora para bloques

➤ *Secador solar*

Respecto al secador solar, se trabajó con un nuevo diseño el cual se construyó a partir de elementos reciclados como: un estante metálico, madera, vidrio, papel aluminio y para lograr una mejor captación de luz solar se emplearon láminas de acero inoxidable tipo espejo, lo anterior se observa en la figura 3.11.



Figura 3.11. Secador solar de bloques

3.10 Evaluación de Recobloques

Las pruebas de evaluación de los Recobloques se realizaron después de 28 días de acuerdo con lo planteado en la Tabla 3.3.

- Tabla 3.3. Pruebas de evaluación de los Recobloques

Pruebas a realizar	Procedimiento
Determinación de dimensiones	NMX-C-038-ONNCCE-2004
Densidad aparente seca	UNE-772-13-2001
Resistencia a compresión	NMX-C-036-ONNCCE-2004
Absorción máxima inicial de agua	NMX-C-037-ONNCCE-2005
Prueba de intemperismo acelerado	Cámara de intemperismo acelerado (UDIATEM, UNAM)
Resistencia a la erosión	NZS-4298-1998

Fuente: Elaboración propia

3.10.1 Determinación de dimensiones

En la norma mexicana NMX-C-038-ONNCCE-2004 se establece el método de prueba para la determinación de las dimensiones de ladrillos y bloques para construcción.

Para dicha prueba se puede emplear una regla graduada en mm y para cada una de las dimensiones se deben hacer al menos dos determinaciones.

3.10.2 Densidad aparente seca

La densidad es una propiedad característica de los materiales mediante una relación entre la masa y el volumen. En la norma española UNE-772-13-2001 se establece un método de ensayo para determinar la densidad aparente seca de piezas para albañilería.

Después del secado de las piezas y a masa constante se calcula el volumen ocupado por una unidad y se establece la relación de densidad de acuerdo con la siguiente ecuación 3.9.

$$Densidad\ aparente = \frac{masa\ seca\ (g)}{volumen\ bruto\ (cm^3)} \dots (Ec. 3.9)$$

3.10.3 Resistencia a la compresión

La norma NMX-C-036-ONNCCE-2004 establece el método de prueba para la determinación de la resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos fabricados de concreto, cerámica, arcilla y otros materiales para la construcción.

En primera instancia la superficie de las probetas que van a quedar en contacto con las placas de la máquina de prueba se tienen que cabecear con una mezcla de yeso – cemento en una proporción de 4:1, es decir, las probetas se cubren con una capa de yeso – cemento para que la superficie de contacto sea lisa y uniforme.

Posteriormente se lleva a cabo la prueba colocando la probeta en el centro del bloque de carga de acero de la máquina de prueba. Un aspecto importante es controlar la velocidad de prueba para que la carga aplicada sea uniforme, la

prueba concluye cuando las dos agujas indicadoras de la fuerza aplicada se separan lo que indica que el espécimen presenta una falla.

La resistencia a la compresión de una probeta se toma como la carga máxima entre el área transversal de la probeta de acuerdo con la ecuación 3.10.

$$R = \frac{F}{A} \dots (\text{Ec. 3.10})$$

Donde:

R = Es la resistencia a la compresión (kg/cm²)

F = Es la carga máxima en (kg)

A = Es el área transversal del espécimen (cm²)

3.10.4 Prueba de absorción máxima inicial de agua

La norma mexicana NMX-C-037-ONNCCE-2005 establece el método de prueba para la determinación de la cantidad de agua máxima inicial que absorben los bloques y tabiques de cerámica o arcilla.

En primera instancia se miden las dimensiones del espécimen a analizar y enseguida se pesan los bloques en estado seco. Posteriormente se coloca una cara de acabado liso sobre dos soportes metálicos en un recipiente con agua de tal forma que el bloque quede 5mm por abajo del nivel de agua por un período de 10 minutos.

Pasado el tiempo de contacto se retira el bloque y se remueve el exceso de agua, se pesa nuevamente el bloque siendo este el peso final. Finalmente se calcula la absorción máxima inicial de acuerdo a la ecuación 3.11.

$$Cb = \frac{100 * (P1 - P0)}{S * \sqrt{t}} \dots (\text{Ec. 3.11})$$

Donde:

Cb = absorción máxima inicial (g/min)

P1 - P0 = El peso de agua absorbido durante el tiempo de prueba (g)

S = Superficie de la cara sumergida (cm²)

t = Tiempo de inmersión (min)

3.10.5 Prueba de intemperismo acelerado

Con el propósito de simular condiciones de intemperismo los Recobloques se introdujeron en una cámara de intemperismo acelerado (figura 3.12) que fue diseñada y construida por el Laboratorio de Corrosión en la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM) del departamento de mecánica de la Facultad de Ingeniería.

En dicha cámara un ciclo de 12 minutos simula un día con las condiciones de intemperismo que se asignen. Después de 840 ciclos y transcurridas 168 horas las condiciones simulan un año con condiciones normales de intemperismo de la Ciudad de México.



Figura 3.12. Cámara de intemperismo acelerado

3.10.6 Resistencia a la erosión

Es bien conocido que uno de los principales problemas de los materiales de construcción a base de tierra es su vulnerabilidad al agua debido a que cuando están en contacto con ella por períodos prolongados de tiempo, éstos materiales tienden a perder resistencia y estabilidad (Galán-Marín et. al., 2010). Por lo anterior, en diversos estudios se recurre a la prueba de erosión por spray para evaluar la durabilidad de bloques de tierra (Murmu y Patel, 2018).

En la norma neozelandesa NZS-4298-1998 se establece la determinación de resistencia a la erosión como una prueba adicional para los materiales de construcción a base de tierra. La prueba consiste en rociar con agua una de las caras del bloque por una hora o hasta que el espécimen sea penetrado por el agua, lo anterior se puede observar en la figura 3.13. Cada 15 minutos se interrumpe la prueba para checar la profundidad de la erosión causada por el agua en el bloque.



Figura 3.13. Prueba de resistencia a la erosión

La profundidad máxima de erosión se mide después de una hora de iniciada la prueba. Si el agua causa perforaciones antes de una hora se obtiene la máxima profundidad de erosión relacionando la profundidad de la perforación y el tiempo de la misma hasta llegar a una hora. Se determina un índice de erosión de acuerdo con la Tabla 3.4:

- Tabla 3.4. Índice de resistencia a la erosión

	Criterio	Índice de erosión
Profundidad de erosión D (mm/h)	$0 \leq D \leq 20$	1
	$20 \leq D \leq 50$	2
	$50 \leq D \leq 90$	3
	$90 \leq D \leq 120$	4
	$D \leq 120$	5 (Prueba fallada)

3.11 Beneficios del proyecto

Realizar un análisis ambiental y económico de los Recobloques con el objetivo de determinar los beneficios que se generan al sustituir materiales reciclados por materiales vírgenes, así como evitar la emisión de CO₂ al no emplear hornos artesanales de cocción en el proceso de elaboración de los Recobloques.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del material de excavación, los residuos de construcción y de la elaboración de Recobloques, así como la evaluación de los mismos.

4.1 ETAPA 1. Estudio de gabinete

Los resultados de la primera etapa se basan en la revisión de información respecto a la función e importancia de cada uno de los componentes de la mezcla. Dichos resultados se describen a continuación.

4.1.1 Material de excavación

El material de excavación es producto de la extracción de materiales, suelo o rocas, a cielo abierto, con la finalidad de tener espacio suficiente para establecer cimentaciones, conductos, instalaciones hidráulicas y sanitarias, alcantarillas, entre otros.

En la actualidad, ha aumentado el interés por emplear el material de excavación (figura 4.1) en la construcción sustentable mediante prácticas tradicionales, con la ventaja de que se tiene bajo impacto a la salud y el ambiente, baja demanda de energía y transporte, así como, menores emisiones de gases de efecto invernadero.



Figura 4.1. Material de excavación

La función del material de excavación es servir como material aglomerante, es decir, funcionan como material ligante. La utilización de este material se fundamenta en la disponibilidad, trabajabilidad y los antecedentes que se tienen del empleo de tierra en la construcción. Sin embargo, es importante mencionar que el uso de este material en la elaboración de ladrillos depende de características como su composición, granulometría, plasticidad, dureza, entre otras, por lo que es necesario identificar dichas características.

4.1.2 Residuos de construcción reciclados

El empleo de residuos de construcción (figura 4.2) para la elaboración de los Recobloques es con el objetivo de que funcionen como agregados o material de relleno. Estos materiales se obtienen a partir de un proceso de separación, trituración y clasificación de los residuos de la construcción. Los residuos a emplear se clasifican en dos grupos, de acuerdo con la norma NADF-007-RNAT-2013:



Figura 4.2. Residuos de construcción 1/4" a finos todo en uno

- i) Tipo A. Se denominan residuos de construcción solo cementantes y son los provenientes de la trituración de materiales compuestos por residuos exclusivos de concreto y se clasifican de acuerdo con su granulometría en 1", 3/8" y 1/4" a finos.
- ii) Tipo B. Estos se denominan como residuos de construcción todo en uno y son los provenientes de la trituración de materiales compuestos por

residuos de ladrillo, bloque, cerámicos, morteros, adoquines, mamposterías y prefabricados. Para este grupo solo se considera la granulometría de 1/4" a finos.

4.1.3 Residuos de madera

Se han probado diferentes materiales disponibles en la naturaleza para mejorar las propiedades de un suelo empleado en la elaboración de bloques como bambú, agave, hojas de palma, residuos de coco, algodón, pasto, etc. Las investigaciones que se han desarrollado son relativas a la adición de fibras de coco y de agave, las cuales han mostrado resultados prometedores. De acuerdo con estos estudios la *adición de 4% de fibras* reduce significativamente la aparición de grietas y dan alta ductilidad a los bloques fabricados a partir de suelo, es decir, permiten que el bloque pueda deformarse sin romperse (Galán-Marín, 2010).

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO sus siglas en inglés), los residuos de madera como los que se muestran en la figura 4.3 son los que quedan después de producir productos forestales y que han sido reducidos a trozos pequeños. Con la adición de residuos de madera se busca que estos cumplan con la función de estabilizar la mezcla durante la solidificación debido a las propiedades fibrosas que presentan.



Figura 4.3. Residuos de madera

4.1.4 Mucílago de nopal

En México, es bien conocida la utilización del mucílago de nopal con cal en la restauración y conservación de edificios históricos, debido a las propiedades adhesivas e impermeables que brinda dicha mezcla. Se ha empleado de forma similar al yeso en paredes de adobe y ladrillo (García, 2013). En la figura 4.4 se muestra un ejemplo de la mezcla de agua con mucílago de *Opuntia ficus-indica*.



Figura 4.4. Mezcla de agua-mucílago

El nopal (*Opuntia ficus-indica*) pertenece a la familia Cactaceae, especie que es endémica del continente americano y que se desarrolla principalmente en regiones áridas y semiáridas. El nopal está distribuido en el continente americano, siendo México el país con mayor abundancia de especies, por lo que se puede considerar como centro de origen de esta especie (García, 2013).

El mucílago de nopal está constituido por carbohidratos de alto peso molecular y contiene principalmente dos polímeros naturales orgánicos: amilasa y amilopectina. La amilasa se encuentra formando una cadena helicoidal que en solución tiene la capacidad de formar películas que al secar presentan alta rigidez, mientras que la amilopectina, como todo compuesto de alto peso molecular, presenta viscosidad elevada pero es altamente soluble en agua. Entonces, ambos carbohidratos combinados y encontrándose en solución acuosa pueden formar capas con diferentes propiedades mecánicas que ofrecen características de cohesión y pueden ser aprovechadas para unir materiales (Roux, 2010).

4.2 ETAPA 2. Pruebas de campo en material de excavación

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización preliminar para el material de excavación proveniente de la colonia junta local de caminos ubicada en Toluca, Estado de México.

a) Prueba Granulométrica de campo

Esta prueba permitió conocer de una manera muy simple y rápida la proporción de los componentes en la tierra a utilizar (arena, limo y arcilla) ver figura 4.5.



Figura 4.5 Prueba granulométrica en campo

Se determinó que el contenido de **arena** fue de **76%**, **limo** **23%** y **arcilla** **1%**.

b) Prueba de plasticidad en campo

Esta prueba permitió determinar el nivel de plasticidad y la calidad del suelo a emplear. Para esta prueba se hicieron tres repeticiones. Los resultados fueron los siguientes:

- El promedio de ruptura es de **7.8 cm** y de acuerdo con lo indicado en la sección 3.1, el suelo tiene la proporción adecuada de arcilla y arena para la fabricación de los Recobloques, tal como se muestra en la figura 4.6.



Figura 4.6. Prueba de plasticidad en campo

c) Prueba de dureza en campo

Esta prueba permitió conocer la resistencia de la tierra. Después de un período de 48 horas, se realizó el aplastamiento manual de las piezas. La realización de la prueba se muestra en la figura 4.7, finalmente la resistencia del material de excavación fue alta.



Figura 4.7. Prueba de dureza en campo

4.3 ETAPA 3. Caracterización del material de excavación

Como se mencionó en el capítulo anterior el sistema SUCS se basa en la determinación en laboratorio de tamaño de partícula, límite líquido e índice de plasticidad para clasificar un suelo.

4.3.1 Granulometría del material de excavación

Los valores presentados en la Tabla 4.1 se obtuvieron del proceso de tamizado por vía húmeda para una muestra inicial de 500.04 g de material de excavación. Después del cribado se perdieron 6.07g de material en el tamizado que es igual a 1.21% de material original, porcentaje que no se considera representativo. Se considera la repetición de la prueba cuando se pierde 5% de material en el tamizado respecto a la masa inicial.

- Tabla 4.1. Granulometría del material de excavación de Toluca

Malla (No.)	Abertura de la malla (mm)	Peso malla (g)	Malla con suelo (g)	Peso de suelo retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% que pasa
10	2.000	480.31	488.49	8.18	1.66	1.66	98.34
20	0.841	454.37	476.64	22.27	4.51	6.16	93.84
40	0.420	382.90	435.48	52.58	10.64	16.81	83.19
60	0.250	428.17	458.56	30.39	6.15	22.96	77.04
100	0.149	331.11	401.60	70.49	14.27	37.23	62.77
200	0.074	324.41	387.76	63.35	12.82	50.06	49.94
Charola	-	342.77	345.48	246.71	49.94	100.00	0.00
Total				493.97	100		

Para la parte fina del material, se empleó el método del hidrómetro. Los resultados se muestran en la Tabla 4.2.

- Tabla 4.2. Hidrómetro del material de excavación de Toluca

D(mm)	p (% en suspensión)	% que pasa
0.0517	98.272	49.081
0.0432	93.991	46.943
0.0388	87.569	43.736
0.0292	74.724	37.321
0.0188	53.317	26.629
0.0123	21.206	10.591
0.0108	16.925	8.453
0.0090	12.643	6.314
0.0078	10.502	5.245
0.0069	8.828	4.409
0.0064	7.525	3.758
0.0054	4.684	2.339
0.0045	5.247	2.621

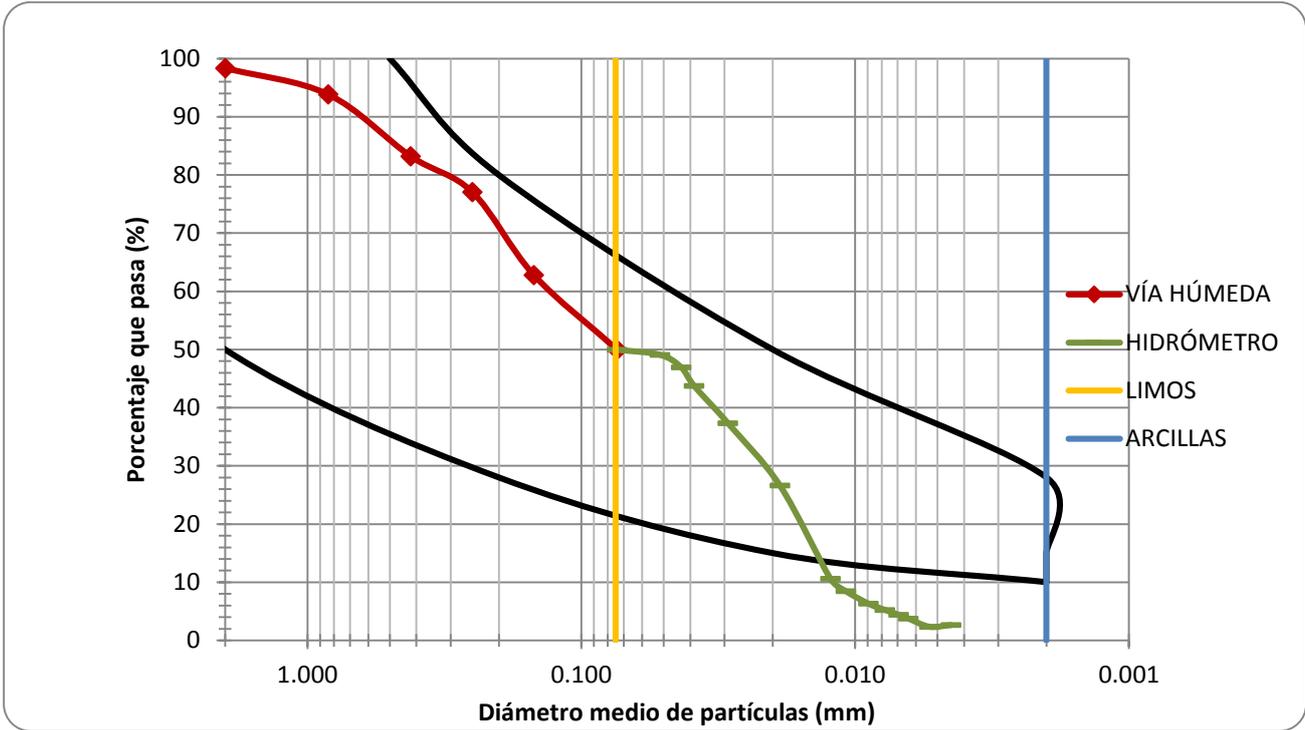


Figura 4.8. Curva granulométrica del material de excavación de Toluca

La curva granulométrica (figura 4.8) se construye graficando los resultados de vía húmeda, así como los resultados del método del hidrómetro para las partículas finas contra el diámetro de apertura de las mallas para el caso del tamizado y el diámetro de partícula para el contenido de finos.

De acuerdo con los resultados de la Tabla 4.1 el material que pasa la malla No. 200 es de 50% y con base en la clasificación SUCS el material de excavación se puede considerar un suelo fino.

Por otro lado, en la figura 4.8 la curva de color negro representa los límites de granulometría que se establecen en la norma española UNE-41410:2008, donde se recomienda que el suelo a emplear contenga al menos 10% de material arcilloso.

Considerando el tamaño de partícula obtenida empleando el método del hidrómetro, los finos de la granulometría del material de excavación proveniente de Toluca se pueden considerar en su mayoría como limos. Sin embargo, para una mejor clasificación es necesario realizar límites de Atterberg los cuales se presentan a continuación.

4.3.2 Límites de Atterberg

Como ya se ha mencionado la plasticidad es una propiedad que ha servido desde la antigüedad para clasificar de manera descriptiva los suelos, para conocer la plasticidad de un suelo se hace uso de los límites de Atterberg según el contenido de agua.

I. Límite líquido

A la frontera entre el estado plástico y semilíquido se le conoce como límite líquido (LL) y normalmente se determina empleando la Copa Casagrande, sin embargo, para el presente trabajo se empleó el cono inglés (figura 4.9), el cuál es de mejor trabajabilidad y de mayor precisión cuando se analizan suelos con baja plasticidad.



Figura 4.9. Cono Inglés

Para obtener el límite líquido (figura 4.10) se grafica la penetración del cono en mm contra el contenido de agua de los puntos determinados en el intervalo de 10 a 30 mm. Posteriormente se genera una línea con los datos obtenidos, la intersección de la línea generada con el eje de los 20 mm de penetración es el límite líquido del material. La información de penetración y contenido de humedad se presenta en la Tabla 4.3.

- Tabla 4.3. Límite líquido del material de excavación de Toluca

Cápsula	Peso cápsula (g)	Penetración (mm)	Cápsula + suelo húm (g)	Cápsula + suelo seco (g)	Peso de agua (g)	Peso suelo seco (g)	% humedad
1T	7.09	15.7	19.46	17.32	2.14	10.23	20.92
2T	7.42	19.8	21.65	19.03	2.62	11.61	22.57
3T	7.6	25.9	21.88	18.85	3.03	11.25	26.93
4T	7.31	28.4	27.29	22.83	4.46	15.52	28.74

En la figura 4.10 se observa que para el material de excavación proveniente de Toluca el **LL=23.2**.

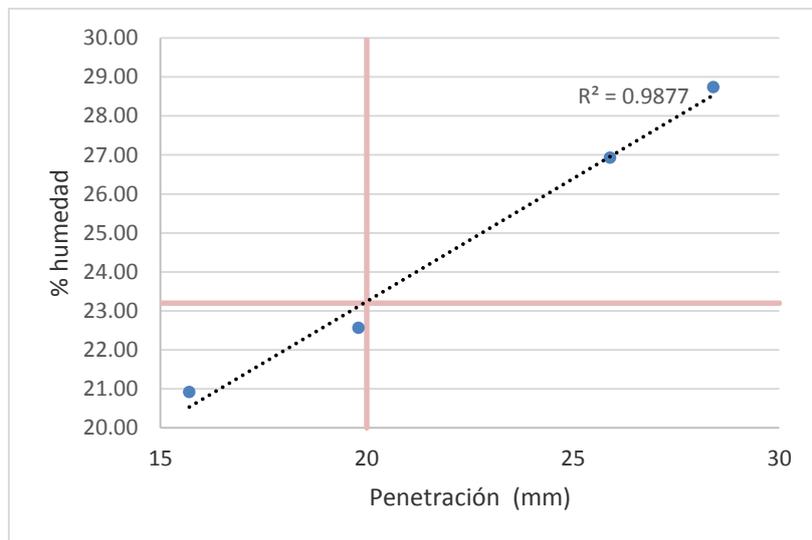


Figura 4.10. Límite líquido del material de excavación de Toluca

II. Límite plástico

El límite plástico (LP) se define como el contenido de humedad, expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra secada al horno, en el que los suelos cohesivos pasan de un estado semisólido a un estado plástico, representando el punto en el cuál el suelo empieza a perder su cohesión por falta de humedad. En la Tabla 4.4 se muestran los resultados del límite plástico del material de excavación. En la misma tabla se puede observar que el **LP=17.19**.

- Tabla 4.4. Límite plástico del material de excavación de Toluca

Cápsula	Peso cápsula (g)	Cápsula + suelo húm (g)	Cápsula + suelo seco (g)	Peso de agua (g)	Peso suelo seco (g)	% humedad
2	11.41	12.78	12.57	0.21	1.16	18.10
R4	11.22	11.87	11.78	0.09	0.56	16.07
R10	11.59	12.37	12.26	0.11	0.67	16.42
R12	12.00	12.65	12.55	0.10	0.55	18.18
					LP	17.19

En la figura 4.11 se observa la obtención del límite plástico amasando un rollo de suelo húmedo hasta obtener un diámetro de 3mm aproximadamente y la presencia de grietas.



Figura 4.11. Límite plástico del material de excavación

III. Índice plástico

La diferencia entre el límite líquido y el límite plástico se denomina índice plástico (IP), el cual representa una medida satisfactoria del grado de plasticidad de un suelo. Para el material de excavación proveniente de Toluca el índice plástico es el siguiente:

$$I_p = LL - LP = 23.2\% - 17.19\% = 6.01\%$$

De acuerdo con la clasificación SUCS para suelos finos, el material de excavación proveniente de Toluca es una **arcilla limosa arenosa (CL-ML)**.

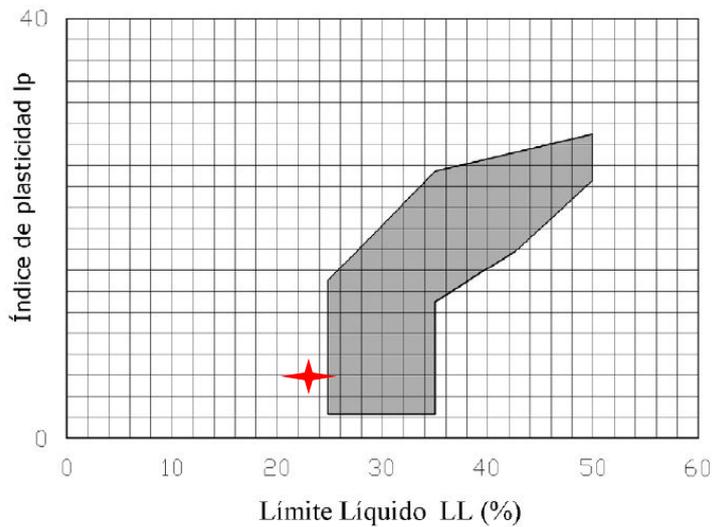


Figura 4.12. Índice de plasticidad del material de excavación

La zona sombreada de la figura 4.12 indica la zona recomendada de plasticidad para un suelo con el cuál se pueden fabricar Bloques de Tierra de acuerdo con la norma española UNE-41410:2008. En la misma figura se ubica el resultado obtenido con una cruz roja y se puede observar que la plasticidad del suelo proveniente de Toluca, Estado de México del sitio ubicado en la colonia junta local de caminos está fuera de la zona recomendada por la norma.

IV. Contracción lineal

Si en el suelo existe una contracción lineal (CL) mayor de 9%, se puede esperar una actividad significativa de contracción – expansión del material como se puede observar en la figura 4.13.



Figura 4.13. Límite de contracción lineal

$$CL = \frac{Li - Lf}{Li} * 100 = \frac{10.30cm - 9.41cm}{10.30cm} * 100 = 8.64\%$$

En el caso del material de excavación se observa que la contracción lineal es de 8.64% por lo que se puede emplear el suelo para elaborar Recobloques, sin esperar un agrietamiento significativo en el secado.

4.3.3 Densidad

Determinar la densidad del material de excavación es importante debido a que se necesita el dato para calcular el tamaño de partículas empleando el método del hidrómetro. El resultado de densidad para el material de excavación se puede observar en la Tabla 4.5.

- Tabla 4.5. Densidad del material de excavación de Toluca

Matraz	Matraz + suelo + H ₂ O (g)	T (°C)	Matraz + H ₂ Oa T(g)	Peso cápsula (g)	Suelo seco + Cápsula (g)	Suelo seco (g)	Densidad (g/cm ³)
T1	718.24	19.33	689.1291	807.63	854.78	47.15	2.61
T2	714.05	19.07	685.7354	640.74	687.86	47.12	2.51
							2.56

4.3.4 Contenido de materia orgánica

El contenido de materia orgánica se determinó de acuerdo con lo establecido en la norma UNE-103204 mediante el análisis de dos muestras, los resultados se muestran en la Tabla 4.6.

- Tabla 4.6. Contenido de materia orgánica en material de excavación de Toluca

Prueba	Mi (g)	Ci	f	M.O. (%)
A1	0.258	2.4	1.153	1.109
A2	0.251	2.2	1.153	1.042
				1.076

El contenido de materia orgánica en el material de excavación proveniente de Toluca es de 1.076 %, resultado que es menor al 2% indicado como el límite en la UNE-41410, es decir, el material de excavación es apto para la realización de bloques.

4.3.5 Contenido de sales solubles

El contenido de sales solubles se determinó de acuerdo con lo establecido en la norma UNE-103205 con el ensayo de dos muestras, los resultados se muestran en la Tabla 4.7.

- Tabla 4.7. Contenido de sales solubles en material de excavación de Toluca

Prueba	V Total (mL)	M Total (g)	V muestra (mL)	mi (g)	SS (%)
SS1	500	50	100.0	0.048	0.480
SS2			100.0	0.064	0.638
					0.559

El contenido de sales solubles presentes en el material de excavación es de 0.559%, porcentaje que es menor de 2% indicado como el límite en la UNE-41410, es decir, el material de excavación es apto para la realización de bloques.

4.4 Caracterización de los residuos de construcción ¼" a finos todo en uno

4.4.1 Granulometría de residuos de construcción

Los resultados de granulometría para los residuos de construcción ¼" a finos todo en uno se muestran en la Tabla 4.8.

- Tabla 4.8. Granulometría de residuos de construcción

	Malla (No.)	Abertura de la malla (mm)	Peso malla (g)	Malla con suelo (g)	Peso de suelo retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% que pasa
GRAVAS	1/2"	12.5	533.05	0	0	0.00	0.00	100.00
	3/8"	9.5	536.96	541.48	4.52	0.41	0.41	99.59
	1/4"	6.3	513.47	555.4	41.93	3.79	4.20	95.80
	4	4.75	499.27	574.6	75.33	6.81	11.01	88.99
ARENAS	10	2.00	479.33	762.58	283.25	25.60	36.61	63.39
	20	0.84	453.13	666.9	213.77	19.32	55.93	44.07
	40	0.42	381.81	543.51	161.7	14.62	70.55	29.45
	60	0.25	426.93	497.48	70.55	6.38	76.93	23.07
	100	0.15	330.6	437.87	107.27	9.70	86.62	13.38
	200	0.07	323.56	396.59	73.03	6.60	93.23	6.77
	Fondo	-	341.74	416.69	74.95	6.77	100.00	0.00
Total					1106.3	100.00		

Como se puede observar en la tabla anterior, el 89.99% del material analizado pasa la malla No. 4, mientras que solo el 6.77% pasa la malla No. 200. La clasificación SUCS indica que si más del 50% del material pasa la malla No. 4 y el porcentaje de finos se encuentra entre el 5% y 12%, el residuo de construcción de ¼” a finos todo en uno analizado se considera **arena con presencia de finos**. En la figura 4.14 se observa la curva granulométrica obtenida.

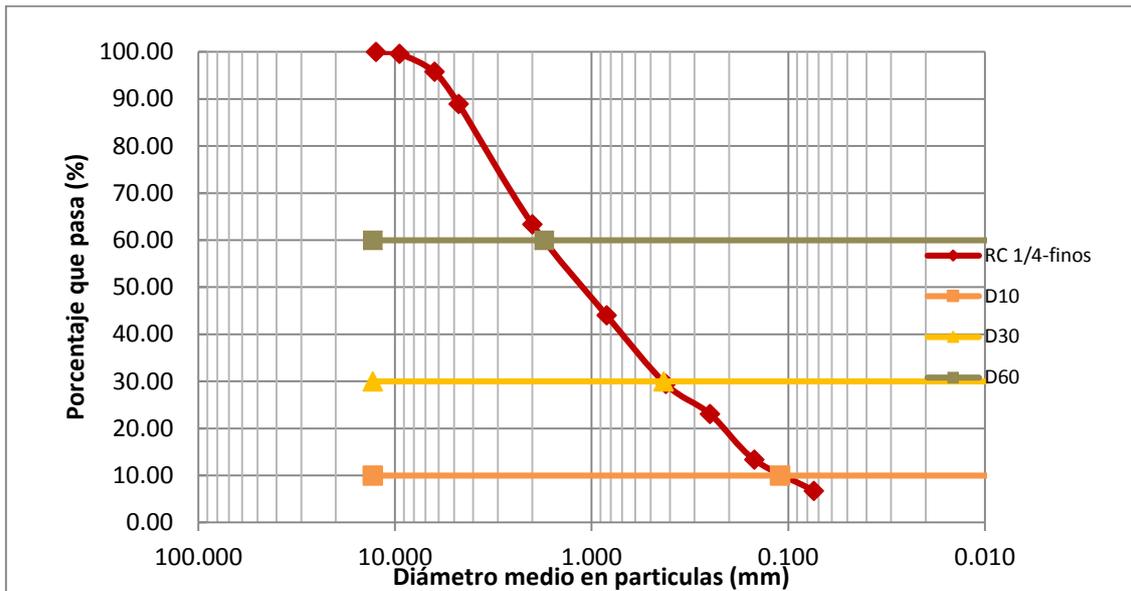


Figura 4.14. Curva granulométrica de residuos de construcción ¼” a finos

A partir de la figura 4.14 se obtuvieron los tamaños de partícula D_{10} , D_{30} y D_{60} para calcular los coeficientes de uniformidad y curvatura para arena, C_u y C_c respectivamente:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} = \frac{0.43^2}{0.11 * 1.74} = 0.97$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{1.74}{0.11} = 15.82$$

Considerando lo establecido en el punto 3.5.1 del presente trabajo como $C_u > 6$ y $C_c = 1$ el residuo de construcción se puede clasificar como arena con finos bien graduada. Los residuos de construcción tienen una graduación uniforme, es decir, los diferentes tamaños de partícula contenidos ocupan los espacios huecos al momento de compactar los Recobloques por lo que quedan menos espacios vacíos.

4.4.2 Densidad de residuos de construcción

En la Tabla 4.9, se muestra el resultado de densidad para los residuos de construcción ¼" a finos todo en uno.

- Tabla 4.9. Densidad de residuos de construcción

Matraz	Matraz + suelo + H ₂ O (g)	T (°C)	Matraz + H ₂ O a T (g)	Peso cápsula (g)	Suelo seco + Cápsula (g)	Suelo seco (g)	Densidad (g/cm ³)
T1	719.15	19.23	689.1404	721.66	769.13	47.47	2.72
T2	714.95	19.27	685.7233	732.44	779.88	47.44	2.60
							2.66

4.4.3 Contenido de cloruros solubles en agua

El contenido de cloruros solubles en los residuos de construcción ¼" a finos todo en uno se determinó de acuerdo a lo establecido en la norma UNE-1744-1 con base en el método de Volhard mediante el análisis de dos muestras, los resultados se muestran en la Tabla 4.10.

- Tabla 4.10. Contenido de cloruros en residuos de construcción

Prueba	W (g/g)	Ct (mol/L)	V AgNO ₃ (ml)	V KCSN (ml)	Cl(%)
Cl1	0.735	0.084	6	6.6	0.0013
Cl2			6	6.8	0.0008
					0.0010

El contenido de cloruros solubles en agua presentes en los residuos de construcción provenientes de la empresa Concretos Reciclados es de 0.0010 %, resultado que es menor al 0.01% indicado como el límite en la UNE-1744-1.

4.4.4 Contenido de sulfatos solubles en agua

De igual forma que el punto anterior el contenido de sulfatos solubles en los residuos de construcción se determinó de acuerdo con lo establecido en la norma UNE-1744-1 mediante el análisis de dos muestras, los resultados se muestran en la Tabla 4.11.

- Tabla 4.11. Contenido de sulfatos en residuos de construcción

Prueba	W (g/g)	mi (g)	SO ₄ (%)
SO1	0.735	0.0162	0.0082
SO2		0.1232	0.0621
			0.0351

El contenido de sulfatos solubles en agua presentes en los residuos de construcción ¼" a finos todo en uno es de 0.0351 %, resultado que es menor al 1% indicado como el límite en la UNE-1744-1.

4.4.5 Contenido de azufre total

El contenido de azufre total en los residuos de construcción se determinó de acuerdo a lo establecido en la norma UNE-1744-1 mediante el análisis de dos muestras, los resultados se pueden observar en la Tabla 4.12.

- Tabla 4.12. Contenido de azufre total en residuos de construcción

Prueba	m precipitado (g)	m muestra(g)	S (%)
S1	0.011	1.0124	0.3795
S2	0.008	1.0010	0.2776
			0.3285

El contenido de azufre total en los residuos de construcción $\frac{1}{4}$ " a finos todo en uno provenientes de la empresa Concretos Reciclados es de 0.3285 %, resultado que es menor al 1% indicado como el límite en la UNE-1744-1.

Como los resultados de contenido de sulfatos, cloruros y azufre total presentes en los residuos de construcción son menores que los límites establecidos en la UNE-1744-1, los residuos de construcción de $\frac{1}{4}$ " a finos todo en uno son aptos para la realización de bloques y otras aplicaciones como concreto o mortero.

4.5 FRX del material de excavación y residuos de construcción

En la Tabla 4.13 se muestran los resultados del análisis FRX realizado en el Instituto de Geología de la UNAM.

- Tabla 4.13 FRX de material de excavación y residuos de construcción

COMPONENTE	UNIDAD	SUELO TOLUCA	RC $\frac{1}{4}$ " A FINOS
SiO ₂	% masa	64.463	50.568
TiO ₂		0.808	0.733
Al ₂ O ₃		16.290	13.950
Fe ₂ O ₃		4.880	4.635
MnO		0.051	0.077
MgO		1.106	2.580
CaO		3.968	12.503
Na ₂ O		3.384	2.307
K ₂ O		1.458	1.311
P ₂ O ₅		0.126	0.225
PXC		3.460	11.110
Suma		99.994	99.999

Desde el punto de vista cualitativo ambas muestras poseen la misma composición química, siendo el componente mayoritario el SiO₂ con contenidos de 64% y 50% para el material de excavación y el residuo de construcción ¼” a finos todo en uno, respectivamente. El contenido de SiO₂ permite clasificar a ambos materiales como rocas intermedias que se encuentran constituidas principalmente por plagioclasas, cuarzo, feldespatos y piroxeno.

Respecto al contenido de Al₂O₃, la presencia de éste se puede atribuir a los cerámicos presentes en ambas muestras. Mientras que la mayor presencia de CaO en los residuos de construcción se puede atribuir al mortero y pasta de cemento adherida a los cerámicos como ladrillos (Moreno – Pérez, 2018).

4.6 DRX del material de excavación y residuos de construcción

En la Tabla 4.14 se muestran los resultados del análisis DRX realizado en el Instituto de Geología de la UNAM.

- Tabla 4.14. DRX de material de excavación y residuos de construcción

FASES	SUELO TOLUCA	RC ¼” A FINOS
Plagioclasa (Na, Ca) (Si, Al) ₃ O ₈	80	68
Actinolita	11	16
Tridimita: SiO ₂	9	10
Filosilicatos	trazas	---
Yeso: CaSO ₄ 2H ₂ O	---	6
Suma	100	100

Los minerales más abundantes corresponden a plagioclasas que se consideran agregados primarios dentro de los feldespatos triclinicos de Na y Ca. En menor cantidad se identificó la presencia de actinolita y tridimita que se consideran constituyentes de rocas ígneas intermedias y básicas. Después de los feldespatos el cuarzo es el mineral más abundante de la corteza terrestre y la tridimita se considera un polimorfo del cuarzo SiO₂.

Las plagioclasas se caracterizan por mejorar la resistencia a la flexión y al impacto, así como incrementar la resistencia a los esfuerzos, añadir dureza, durabilidad y brillo a un material. Este tipo de feldespatos se emplean en la industria de cerámica y alfarería (SE, 2014).

En el caso del material de excavación proveniente de Toluca es importante mencionar que la presencia de filosilicatos es menor a 1%, mineral que se asocia a las arcillas y que es importante en el comportamiento mecánico de los Recobloques, es decir, la presencia de arcilla pura en el material de excavación proveniente de Toluca es menor a 1%. Lo anterior corresponde al resultado obtenido en la curva granulométrica del material de excavación (figura 4.8) la cual indica que los finos son limos sin presencia de arcillas.

Respecto a los residuos de construcción todo en uno con granulometría de ¼” a finos se puede observar la presencia de yeso en menor proporción que se puede relacionar al contenido de CaO reportado en la FRX (Moreno – Pérez, 2018). En las figuras 4.15 y 4.16 se observan los difractogramas del material de excavación y del residuo de construcción respectivamente.

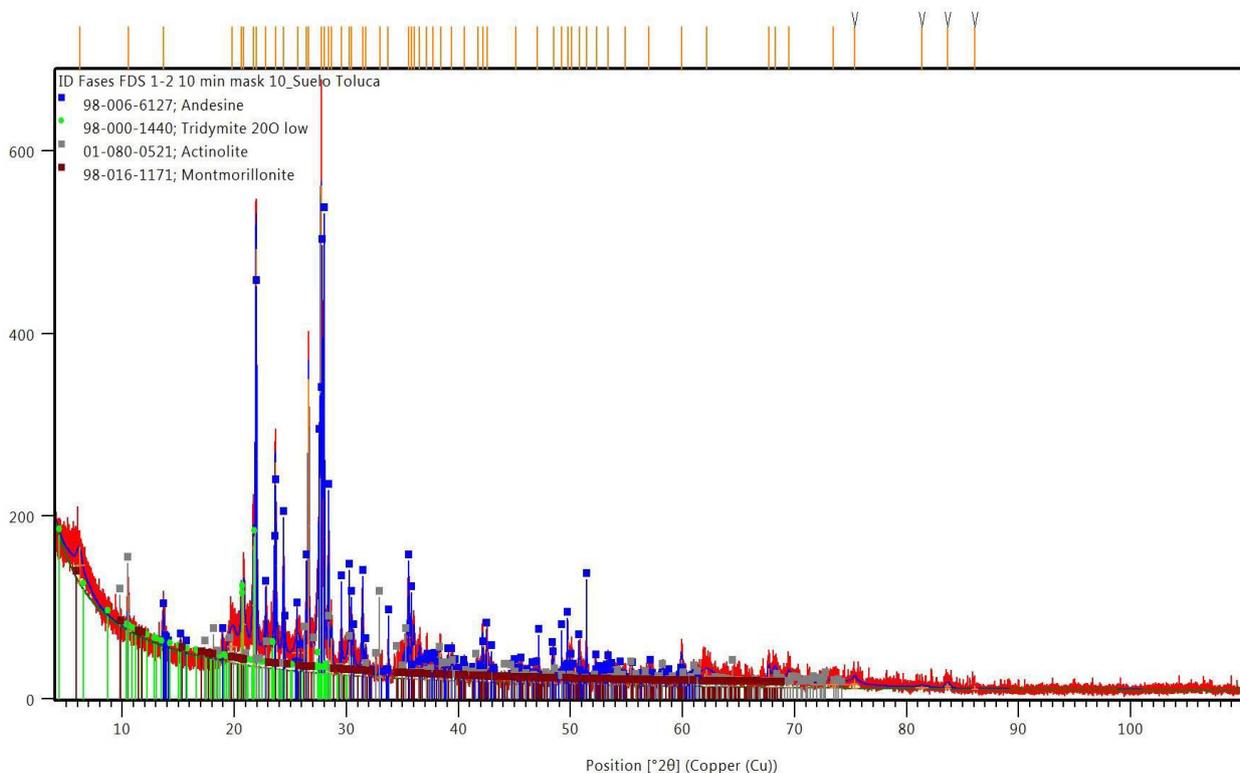


Figura 4.15. Difractograma del material de excavación de Toluca

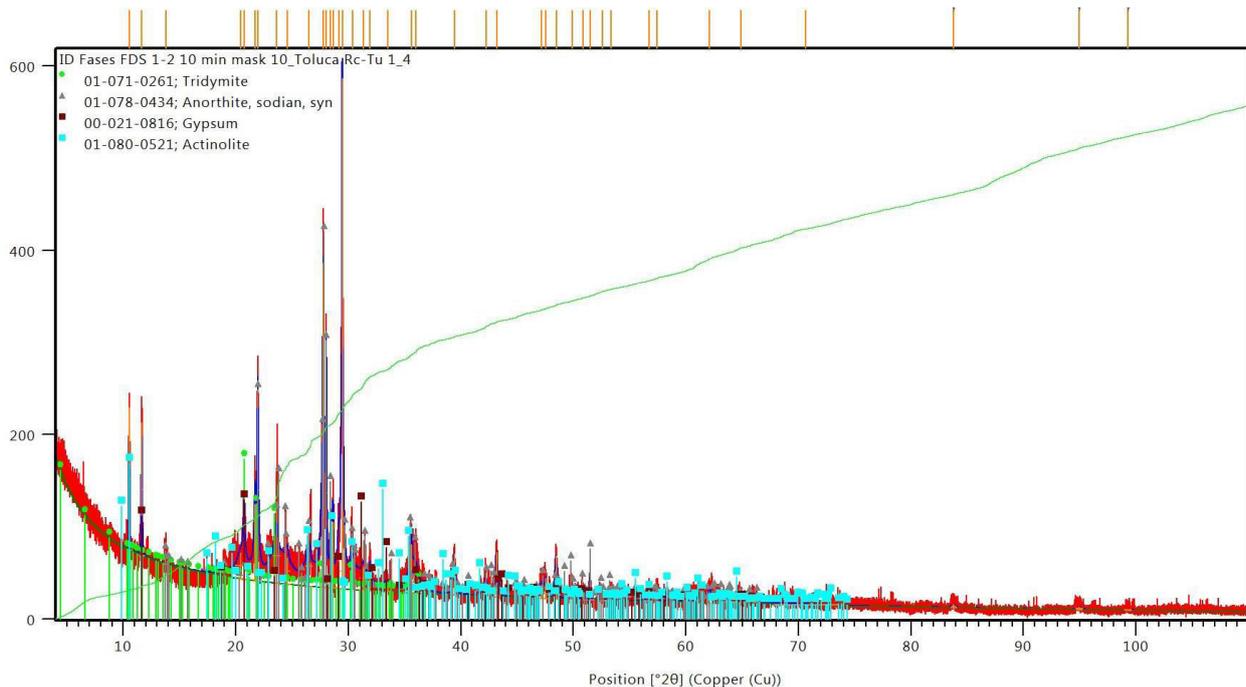


Figura 4.16. Difractograma del residuo de construcción ¼” a finos todo en uno

De acuerdo con los difractogramas las fases encontradas no presentan comportamiento cristalino debido a que los picos de difracción son anchos con bajas intensidades, característica que es típica de fases poco cristalinas o amorfas debido a componentes formados en la hidratación de concreto y de cerámicos que han sido triturados (Ulsen, 2013).

4.7 ETAPA 4. Determinación de mezcla para elaboración de Recobloques con suelo de Toluca

Con base en las pruebas preliminares se realizaron 6 distintas mezclas de material de excavación y residuos de construcción con la finalidad de observar el comportamiento de cada una y determinar la mezcla óptima para la fabricación de Recobloques.

Se moldearon pequeños bloques como se observa en la figura 4.17a y se dejaron secar por un periodo de 48 horas. Después del secado se realizó la prueba de compresión de cada unidad hasta llegar a la ruptura (figura 4.17b), con esto se observó el comportamiento de cada una de las combinaciones.



a)

b)

Figura 4.17 a y b. Prueba preliminar de mezclas

De acuerdo con las mezclas preliminares (Tabla 4.15) , se determinó utilizar las dos mejores mezclas en la fabricación de ladrillos y Recobloques, es importante mencionar que este diseño se basó en los principios de fabricación artesanal de los ladrillos ecológicos.

- Tabla 4.15. Mezclas preliminares para Recobloques

Mezcla	% material de excavación	% RC ¼"	Golpes para ruptura
1	55	45	16
2	60	40	19
3	65	35	27
4	70	30	25
5	75	25	18
6	80	20	6

Como se puede observar en la Tabla 4.15 la mezclas 3 y 4 son las que presentaron mayor resistencia a la ruptura. Con base en los resultados de las pruebas preliminares y en trabajos previos, las mezclas que se ensayaron de forma preliminar en ladrillos y Recobloques son las que se presentan en la Tabla 4.16.

- Tabla 4.16. Mezclas para ensayo en ladrillos y Recobloques

Materiales	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4
Material de excavación	66	71	66	71
Residuo de tala	4	4	4	4
RCD ¼"	15	12.5	30	25
RCD 3/8"	15	12.5	--	---
H2O - Mucílago	20	20	20	20

4.8 Evaluación de ladrillos y Recobloques con suelo de Toluca

En primera instancia, empleando suelo de Toluca, se fabricaron ladrillos con cada una de las cuatro mezclas propuestas en la Tabla 4.16, posteriormente se fabricaron bloques con las tres mejores mezclas a partir de los resultados de resistencia a la compresión.

4.8.1 Resistencia a la compresión y absorción de agua en ladrillos

Como se estableció en el capítulo 3, antes de realizar la prueba de compresión es necesario cabecear los especímenes a ensayar con una mezcla de yeso y cemento (4:1) con el fin de tener la mayor área de contacto posible y que la presión ejercida no se concentre en un solo punto. En la figura 4.18 se puede observar el cabeceo de un bloque.



Figura 4.18. Cabeceo de bloque

Una vez que se cabecearon las piezas se realizó la prueba de resistencia utilizando una prensa manual de ELACONS.A. para control de calidad de concreto (figura 4.19) con capacidad de 120 toneladas de presión ubicada en el Laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería. Los resultados de esta prueba para ladrillos se pueden observar en la Tabla 4.17 y la figura 4.20.



Figura 4.19. Prueba de resistencia a la compresión

La norma NMX-C-ONNCCE-441-2013 establece como resistencia mínima 30 kg/cm² para tabiques artesanales de uso no estructural. Como se puede observar en la Tabla 4.17, la mezcla con mayor resistencia a la compresión en ladrillos fue de 52 kg/cm² que corresponde a la mezcla 3.

- Tabla 4.17. Resistencia a la compresión en ladrillos

Mezcla	Ladrillo	F (kg)	A (cm ²)	P (kg/cm ²)	P (kg/cm ²)
M1	C11	13800	312	44	47
	C12	15400	312	49	
M2	C22	13800	312	44	46
	C23	14600	312	47	
M3	C31	18200	312	58	52
	C34	14200	312	46	
M4	C43	9400	312	30	34
	C42	11800	312	38	

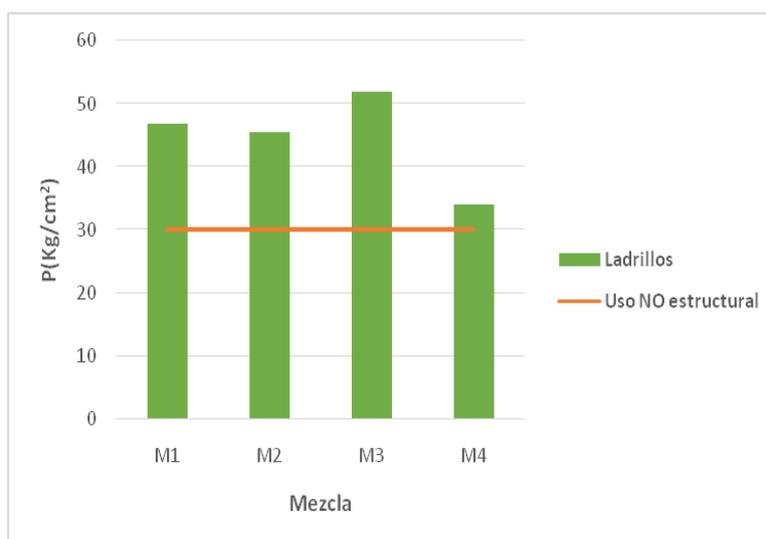


Figura 4.20. Resistencia a la compresión en ladrillos

Por otro lado la prueba de absorción máxima inicial se realizó con base en la norma NMX-C-037-ONNCCE-2005, dicha prueba se puede apreciar en la figura 4.21.



Figura 4.21. Prueba de absorción máxima inicial en ladrillos y bloques

Los resultados de esta prueba en ladrillos se observan en la Tabla 4.18. El mejor resultado para esta prueba fue de 11.3 g/min. En la norma NMX-C-ONNCCE-441-2013 no se establece límite de absorción máxima inicial de agua para materiales artesanales, sin embargo, el límite para materiales de arcilla prensada es de 7.5 g/min para unidades de uso no estructural en muros interiores.

- Tabla 4.18. Absorción máxima inicial de agua en ladrillos

	Ladrillo	P seco (P0)	P hum (P1)	P1-P0	Área (cm ²)	100*(P1-P0)	Área*√10	% ABS. (g/min)	% ABS (g/min)
M1	C13	2169	2281	112	312	11200	986.6	11	11.4
	C14	2089	2202	113	312	11300	986.6	11	
M2	C21	2409	2506	97	312	9700	986.6	10	11.4
	C24	2286	2413	127	312	12700	986.6	13	
M3	C32	2275	2385	110	312	11000	986.6	11	11.3
	C33	2277	2390	113	312	11300	986.6	11	
M4	C41	2419	2520	101	312	10100	986.6	10	13
	C44	2249	2409	160	312	16000	986.6	16	

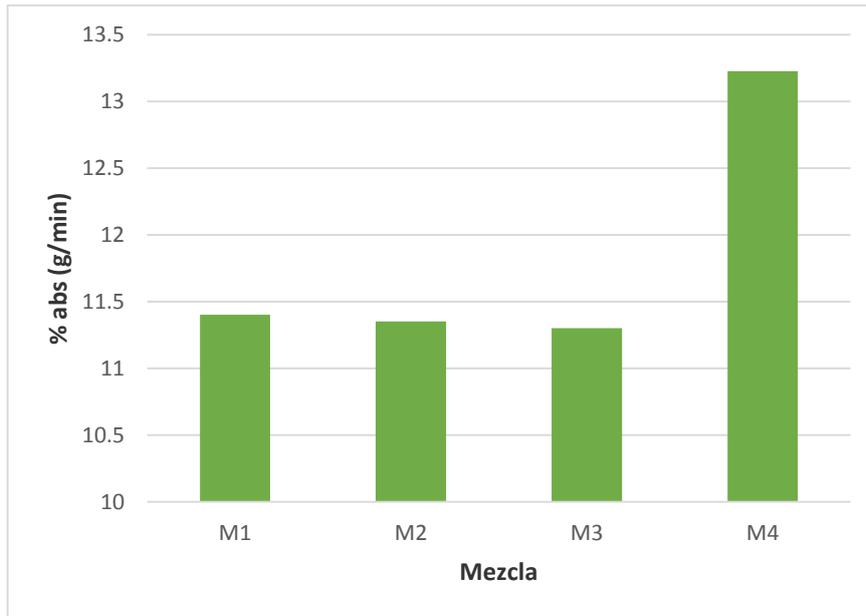


Figura 4.22. Absorción máxima inicial de agua en ladrillos

4.8.2 Resistencia a la compresión y absorción de agua inicial en Recobloques

Como se comentó previamente se seleccionaron las tres mezclas con mejores resultados en ladrillos para fabricar Recobloques empleando suelo de Toluca. Los resultados de resistencia a la compresión de los Recobloques se pueden observar en la Tabla 4.19 y la figura 4.23.

- Tabla 4.19. Resistencia a la compresión en Recobloques con suelo de Toluca

	Bloque	F (kg)	A (cm ²)	P (kg/cm ²)	P (kg/cm ²)
M1	M13	9200	450	20	19
	M14	9000	450	20	
	M16	7200	450	16	
M2	M23	5600	450	12	10
	M25	4200	450	9	
	M26	4200	450	9	
M3	M31	9600	450	21	21
	M34	10000	450	22	
	M35	8800	450	20	

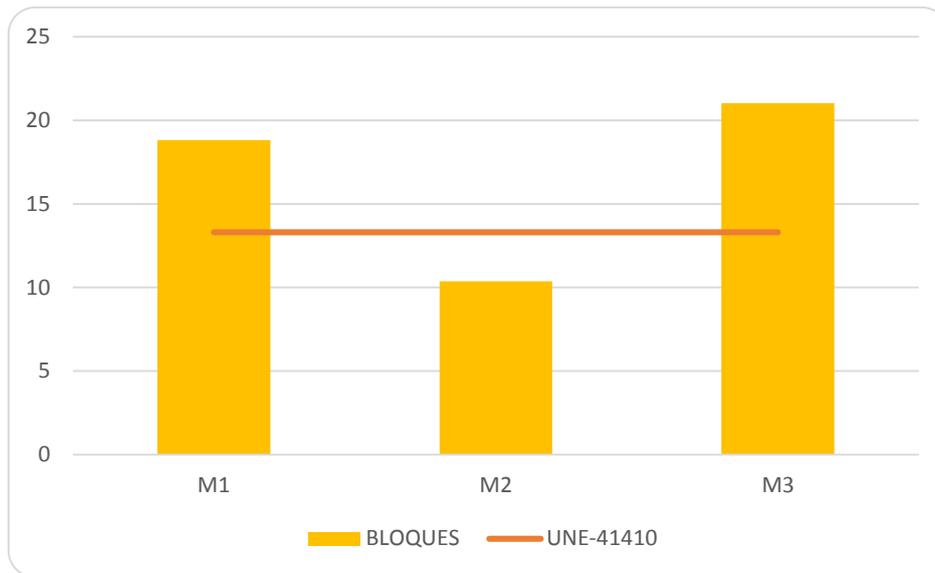


Figura 4.23. Resistencia a la compresión de Recobloques

Los resultados de absorción máxima inicial de agua para Recobloques elaborados con suelo de Toluca se muestran en la Tabla 4.20 y en la figura 4.24.

- Tabla 4.20. Absorción máxima inicial de agua en Recobloques con suelo de Toluca

	Bloque	P seco (P0)	P hum (P1)	P1-P0	Área (cm ²)	100*(P1-P0)	Área*√10	% ABS. (g/min)	% ABS (g/min)
M1	M11	7844	8279	435	450	43500	1423	31	32
	M12	7856	8245	389	450	38900	1423	27	
	M15	7697	8197	500	450	50000	1423	35	
M2	M21	7452	7666	214	450	21400	1423	15	30
	M22	7115	7613	498	450	49800	1423	35	
	M24	7029	7601	572	450	57200	1423	40	
M3	M32	7638	7772	134	450	13400	1423	9	8
	M33	7771	7886	115	450	11500	1423	8	
	M36	8075	8185	110	450	11000	1423	8	

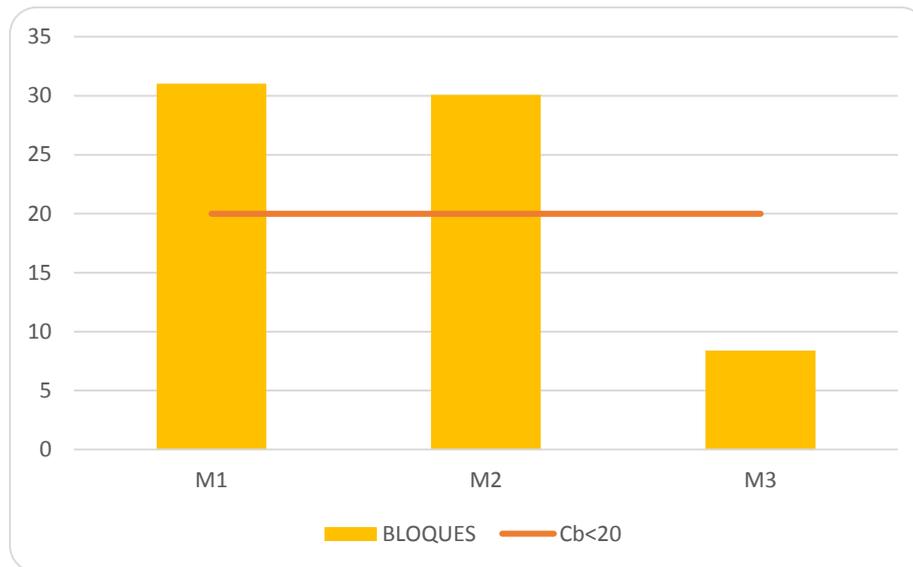


Figura 4.24. Absorción máxima inicial de agua en Recobloques

De acuerdo con los resultados de resistencia a la compresión y absorción máxima inicial de agua en Recobloques con suelo de Toluca se puede concluir que la mezcla óptima para fabricarlos es la *mezcla 3 conformada por 66% de material de excavación, 30% residuo de construcción 1/4" a finos todo en uno y 4% residuos de madera.*

4.9 Elaboración de Recobloques

En las secciones 4.5.1 y 4.5.2, correspondientes a los resultados de granulometría y plasticidad del suelo proveniente de Toluca, se observa que ambos resultados no cumplen con las recomendaciones establecidas en la norma española UNE-41410. Sin embargo, el resultado de resistencia a la compresión para Recobloques con suelo de Toluca está dentro del límite establecido en dicha norma, y se comprueba como se menciona en la misma, que hay materiales que a pesar de estar fuera de los límites recomendados presentan buen comportamiento a las pruebas de evaluación.

Posteriormente, se determinó buscar un suelo con mejor comportamiento de plasticidad para mejorar las características del material de excavación proveniente de Toluca con el objetivo de aumentar la resistencia a la compresión de los Recobloques.

4.9.1 Determinación de mezcla de suelos

De acuerdo con los resultados de las pruebas de campo indicadas en la sección 4.2 se determinó emplear un suelo proveniente de Tlayacapan, Morelos.

Una vez establecido lo anterior se realizaron tres mezclas de suelos y se elaboraron dos bloques por mezcla a los cuales se les realizó la prueba de resistencia a la compresión. Los resultados se muestran en la Tabla 4.21:

- Tabla 4.21. Resistencia a la compresión en Recobloques con mezcla de suelos

ÓPTIMA	MEZCLA DE SUELO	BLOQUE	F (kg)	A (cm ²)	P (kg/cm ²)	P (kg/cm ²)	
66%SUELO + 30%RC-1/4 + 4%TALA	80%TOL + 20%MOR	D11	10400	450.00	23.1	22.4	
		D12	9800	450.00	21.8		
	70%TOL + 30%MOR	D21	10200	450.00	22.7	22.4	
		D22	10000	450.00	22.2		
	60%TOL + 40%MOR		D31	11200	450.00	24.9	24.7
			D32	11000	450.00	24.4	

Con base en los resultados de resistencia a la compresión se eligió trabajar con la mezcla de suelos 60% material de excavación de Toluca y 40% suelo de Morelos. Es importante resaltar que solo se hizo una mezcla de suelos manteniendo la mezcla óptima original que es de 66% de material de excavación, 30% residuo de construcción ¼" a finos todo en uno y 4% residuos de madera. Para la mezcla de suelos se realizaron pruebas de granulometría y límites de plasticidad con los siguientes resultados.

4.9.2 Granulometría y límites de Atterberg de la mezcla de suelos

Los resultados de granulometría se muestran en la Tabla 4.22, mientras que los resultados del método del hidrómetro se encuentran en la Tabla 4.23. Ambos resultados se pueden observar en la figura 4.25.

En la Tabla 4.22 se puede observar que el 59% del material analizado de la mezcla de suelos pasa la malla No. 200, por lo tanto se considera como **suelo fino**.

- Tabla 4.22. Granulometría de la mezcla de suelos

Malla (No.)	Abertura de la malla (mm)	Peso malla (g)	Malla con suelo (g)	Peso de suelo retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% que pasa
10	2.000	415.32	419.62	4.3	0.9	0.9	99.11
20	0.840	421.96	435.35	13.39	2.8	3.7	96.34
40	0.420	399.92	440.50	40.58	8.4	12.1	87.94
60	0.250	374.48	409.60	35.12	7.3	19.3	80.67
100	0.149	370.57	422.29	51.72	10.7	30.0	69.96
200	0.074	380.43	433.25	52.82	10.9	41.0	59.02
Fondo	-	311.43	325.77	285.1	59.0	100.0	0.00
Total				483.03	100.0		

Por otro lado, en los resultados de la prueba del hidrómetro se puede observar que el contenido de finos tiene mayor presencia de limos y solo el 5% se puede considerar como material arcilloso.

- Tabla 4.23. Hidrómetro de la mezcla de suelos

D(mm)	p (% en suspensión)	% que pasa
0.0724	95.057	56.105
0.0524	91.088	45.493
0.0437	87.120	43.511
0.0386	83.151	41.529
0.0281	77.198	38.556
0.0179	60.333	30.133
0.0111	45.451	22.700
0.0081	35.530	17.745
0.0059	27.593	13.781
0.0043	21.640	10.808
0.0031	14.136	7.060
0.0022	9.951	4.970
0.0013	4.341	2.168

Como se puede observar en la figura 4.25 se mejora el contenido de finos respecto a la curva original, sin embargo, solo se tiene presencia de 5% de partículas que se pueden considerar arcillas sin llegar al 10% que se recomienda en la normativa.

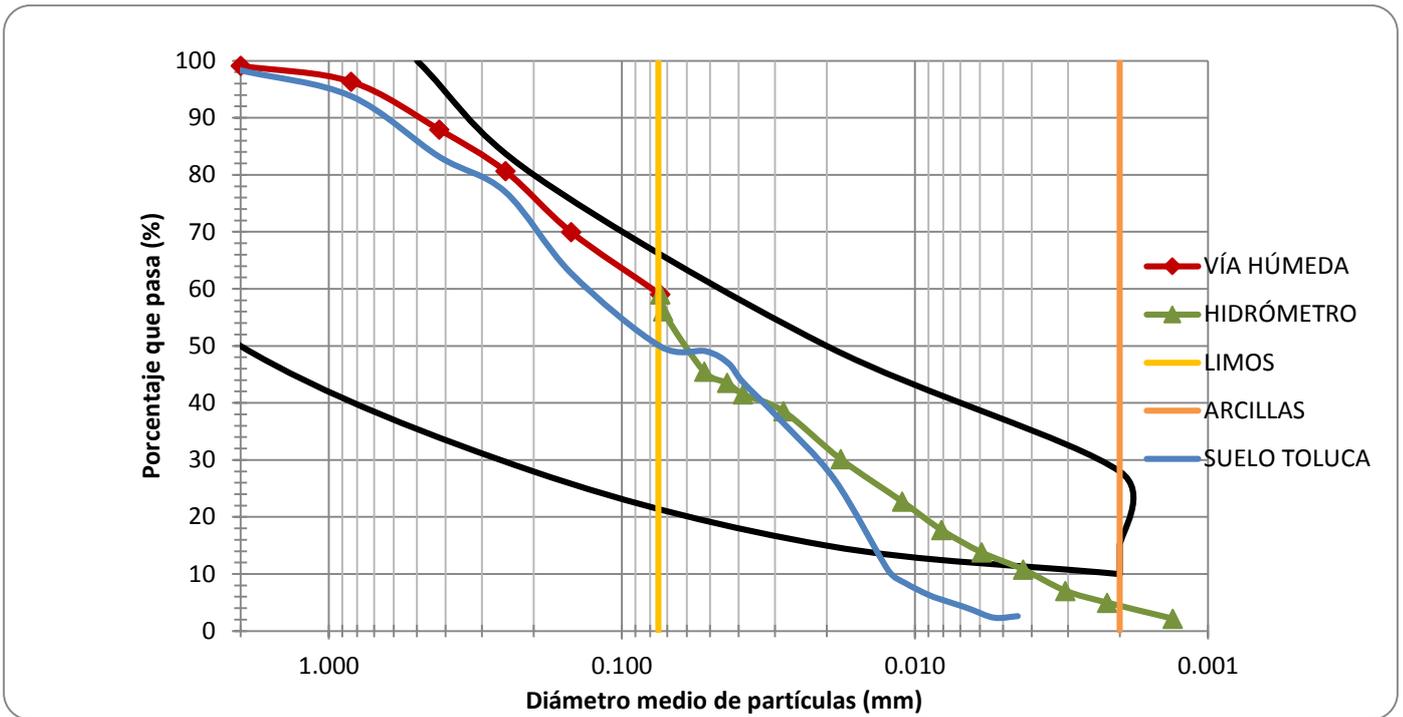


Figura 4.25. Curva granulométrica de la mezcla de suelos

Como se mencionó anteriormente para obtener el diámetro de partículas a partir del método del hidrómetro es necesario contar con la densidad del material. Por lo anterior se determinó la densidad de la mezcla de suelos con el siguiente resultado que se muestra en la Tabla 4.24.

- Tabla 4.24. Densidad de mezcla de suelos

Matraz	Matraz + suelo + H ₂ O	T (°C)	Matraz + H ₂ O a T °C	Peso cápsula (g)	Suelo seco + cápsula (g)	Suelo seco (g)	Densidad (g/cm ³)
T1	727.38	15.07	689.5481	1045.18	1104.48	59.30	2.76
T2	728.87	15.00	685.9410	641.13	708.92	67.79	2.73
							2.74

Para la clasificación del contenido de finos de la mezcla de suelos nuevamente se obtuvieron los límites de plasticidad. Los resultados son los siguientes:

I. Límite líquido

Para obtener el límite líquido se empleó el cono inglés. En la figura 4.26 se muestran los puntos obtenidos y la intersección del contenido de agua a una penetración de 20mm es de 34.85, es decir **LL=34.85**.

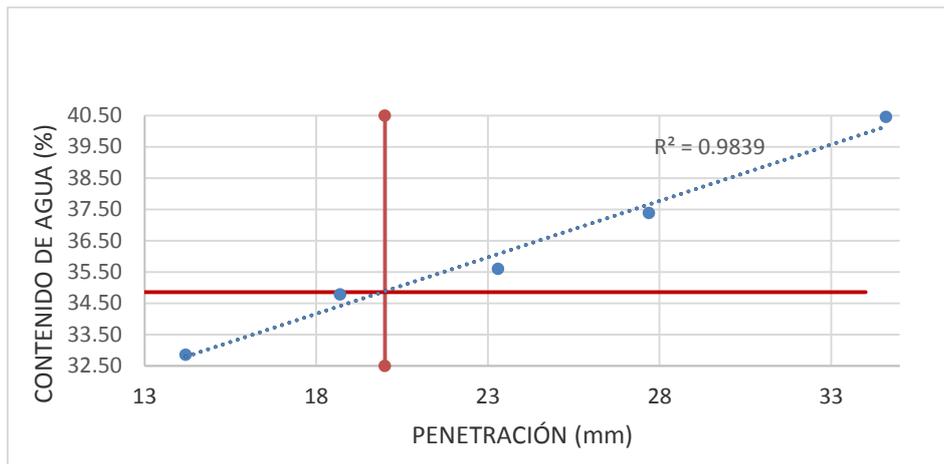


Figura 4.26. Límite líquido de la mezcla de suelos

II. Límite plástico

Nuevamente se amazan rollitos con 3 mm de espesor aproximadamente y que presenten grietas para obtener el límite plástico. En la Tabla 4.25 se observa que **LP=23.47** para la mezcla de suelos.

- Tabla 4.25. Límite plástico de mezcla de suelos

Cápsula	Peso cápsula (g)	Cápsula + suelo húm (g)	Cápsula + suelo seco (g)	Peso de agua (g)	Peso suelo seco (g)	% humedad
E4-D	6.27	7.6	7.35	0.25	1.08	23.15
3	8.25	9.85	9.54	0.31	1.29	24.03
L13	8.29	10.35	9.96	0.39	1.67	23.35
LL4	8.01	9.42	9.16	0.26	1.15	22.61
LL1	7.78	9.78	9.39	0.39	1.61	24.22
					LP	23.47

Por último, se obtiene el índice de plasticidad de acuerdo con:

$$I_p = LL - LP = 34.85\% - 23.47\% = 11.38\%$$

De acuerdo con la clasificación SUCS para suelos finos, la mezcla de suelos para la elaboración de Recobloques es una **arcilla arenosa de baja plasticidad (CL)**.

En la figura 4.27 se representa el resultado del material de excavación con una extrella, mientras que la mezcla de suelos se representa con un punto. Como se comentó anteriormente el índice de plasticidad del material de excavación de

Toluca se encuentra afuera de la zona recomendada por la norma española y se considera un suelo limoso.

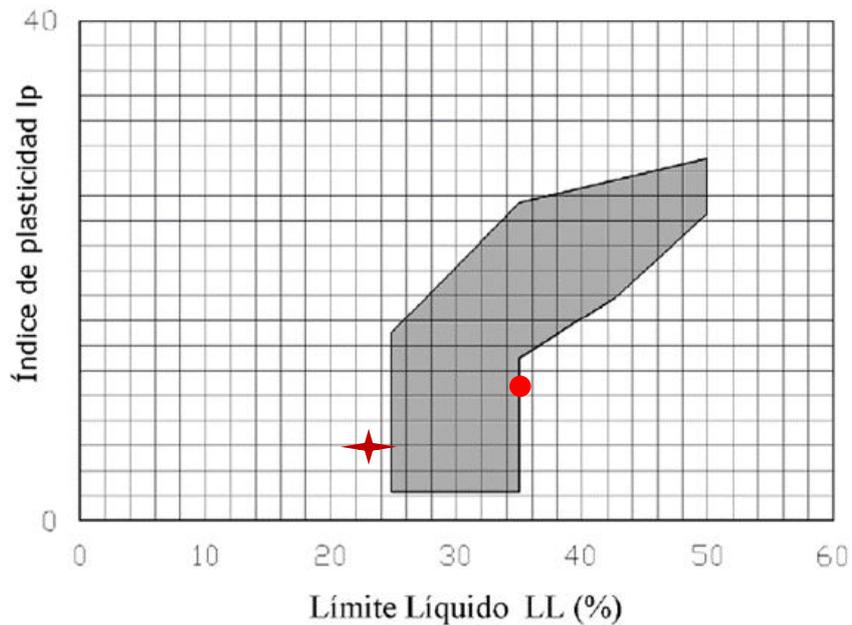


Figura 4.27. Índice de plasticidad mezcla de suelos.

Para la mezcla de suelos el índice indica que es una arcilla de baja plasticidad y se encuentra en el límite de la zona recomendada.

III. Contracción lineal

Por último se determinó la contracción lineal de la mezcla de suelos, el resultado es el siguiente.

$$CL = \frac{Li - Lf}{Li} * 100 = \frac{10.30cm - 9.556cm}{10.30cm} * 100 = 7.22\%$$

Para el caso de la mezcla de suelos se observa que la contracción lineal es de 7.22% por lo que se espera un buen comportamiento de secado en la elaboración de Recobloques.

4.10 ETAPA 5. Evaluación de los Recobloques

Una vez establecida la mezcla de suelos se determinó elaborar un lote de 20 Recobloques (figura 4.28) para llevar a cabo las pruebas de evaluación

establecidas en la sección 3.9, dichas pruebas se realizaron después de 28 días. La mezcla utilizada para fabricar Recobloques se muestra en la Tabla 4.26.

- Tabla 4.26. Mezcla óptima para elaboración de Recobloques

Material	Recobloques	Bloques sin mucílago
Mezcla de suelos (60%Toluca + 40%Morelos)	66	66
Residuo de tala	4	4
RCD ¼"	30	30
H ₂ O - Mucílago	20	--
Solo H ₂ O	--	20

Con el objetivo de comparar los resultados de los Recobloques respecto a bloques elaborados sin mucílago se realizó un lote de 20 bloques empleando solo agua (Tabla 4.26), con éste lote se llevaron a cabo pruebas de resistencia a la compresión, absorción inicial de agua, erosión e intemperismo acelerado.



Figura 4.28. Recobloques

Después de 3 días de secado a la sombra los Recobloques se introdujeron al secador solar y se monitoreo el peso de 5 piezas durante 28 días con el objetivo de identificar en cuántos días se pueden considerar secos.

De acuerdo con el monitoreo del peso de los Recobloques después del día 21 se pueden considerar secos ya que la diferencia de masa entre el día 21 y el día 28 es de apenas 0.4% en promedio.

4.10.1 Dimensiones

Se determinaron las dimensiones de 5 Recobloques de acuerdo con lo planteado en la norma NMX-C-038-ONNCCE-2004. Los resultados se presentan en la Tabla 4.27.

- Tabla 4.27. Dimensiones de los Recobloques

Bloque	Largo (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)
R1	299	149	120
R14	300	150	121
R2	299	149	121
R12	299	150	121
R3	299	149	120
	299.2	149.4	120.6

Como se puede observar Tabla 4.27 en las tres dimensiones no se presentan diferencias mayores a 1 mm. En la norma mexicana no se establecen tolerancias, mientras que en la norma española UNE-41410 se establece que la variación de las dimensiones reales del bloque respecto a las dimensiones nominales no debe ser mayor a 2 mm.

4.10.2 Densidad aparente

La norma UNE-41410 establece que el fabricante debe declarar la densidad aparente seca de los bloques y que la variación en un lote no debe exceder los 100 kg/m³. Para el caso de los Recobloques la mayor diferencia presentada es de 53 kg/m³, como se puede observar en la Tabla 4.28.

- Tabla 4.28. Densidad aparente de los Recobloques

Bloque	Masa bloque seco (kg)	Volumen bruto (m ³)	Densidad (kg/m ³)
R1	7.050	0.0053	1319
R14	7.300	0.0054	1341
R2	7.000	0.0054	1299
R12	7.021	0.0054	1294
R3	7.200	0.0053	1347
			1320

4.10.3 Resistencia a la compresión

Para la realización de esta prueba se determinó el área de contacto de cada bloque, se cabecearon y se probaron en el Laboratorio de Materiales de la

Facultad de Ingeniería de la UNAM de acuerdo con lo establecido en la normativa mexicana. Los resultados obtenidos se observan en la Tabla 4.29.

- Tabla 4.29. Resistencia a la compresión de los Recobloques

BLOQUE	F (kg)	A (cm ²)	P (kg/cm ²)
R1	9900	446	22.2
R14	11000	450	24.8
R2	10800	446	24.3
R12	11400	449	25.7
R3	12400	446	27.9
			25.0

De acuerdo con los resultados de las Tablas 4.19 y 4.29, se puede observar que los Recobloques elaborados con la mezcla de suelos presentaron 19% más resistencia que los Recobloques elaborados con el material de excavación proveniente de Toluca.

- Tabla 4.30. Resistencia a la compresión de bloques sin mucílago

BLOQUE	F (kg)	A (cm ²)	P (kg/cm ²)
F6	6900.0	449	15.4
B3	7800	450	17.3
F4	6700.0	450	14.9
C15	6400.0	450	14.2
F3	7500	446	16.8
			15.7

Respecto al empleo de mucílago en los Recobloques, en la Tabla 4.29 se observa que la resistencia promedio es de 25.0 kg/cm², mientras que los bloques elaborados sin mucílago tienen una resistencia promedio de 15.7 kg/cm² (Tabla 4.30). Debido a la diferencia observada entre la resistencia de los Recobloques y los bloques elaborados sin mucílago se realizó un análisis estadístico para validar dicha diferencia.

- Tabla 4.31. Análisis T de resistencia a la compresión

Table Analyzed	RESISTENCIA
Column B	SIN MUCÍLAGO
vs.	vs.
Column A	RECOBLOQUE
Unpaired t test	
P value	< 0.0001
P value summary	****
Significantly different? (P < 0.05)	Yes
One- or two-tailed P value?	Two-tailed
t, df	t=8.450 df=8

Se realizó el análisis T no pareada a dos colas y se estableció significancia con una $p < 0.05$ como se puede observar en la Tabla 4.31 y la figura 4.29. Por lo anterior, se rechaza la H_0 y se acepta la H_1 la cual indica que los tratamientos son diferentes entre sí. Es decir, la utilización de mucílago de nopal mejora la resistencia de los bloques en 59%.

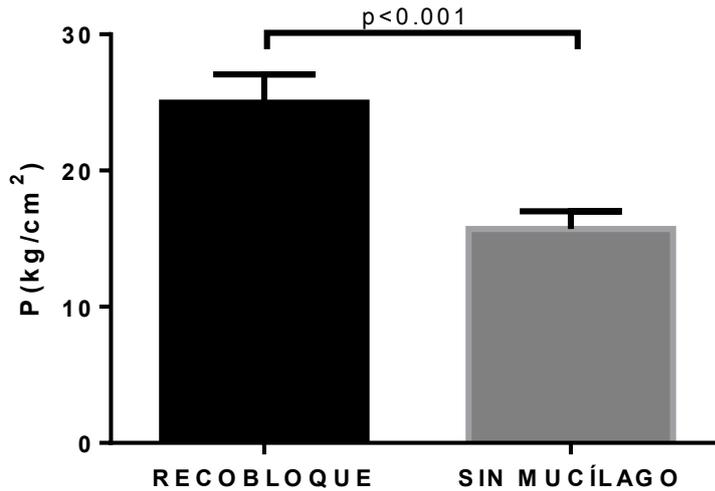


Figura 4.29. Análisis T de resistencia a la compresión

En Brasil y Kenia la resistencia mínima a la compresión para un bloque de tierra es de 20.4 kg/cm², en España la resistencia mínima es de 13.3 kg/cm², mientras que en Colombia y Francia es de 10.2 kg/cm². De acuerdo con los resultados obtenidos los Recobloques cumplen con la resistencia mínima en los países mencionados anteriormente.

4.10.4 Absorción máxima inicial de agua

En la norma UNE-41410 se establece la prueba de absorción de agua por capilaridad, prueba que es equivalente a lo establecido en la norma mexicana NMX-C-037-ONNCCE-2005 denominada absorción inicial de agua. La norma española no señala un límite de absorción de agua y en la normativa internacional consultada (Tabla 2.4) solo en Colombia y Francia se empleando parámetros para clasificación, sin embargo, tampoco se indican límites de absorción de agua. Los resultados se presentan a continuación:

- Tabla 4.32. Absorción máxima inicial de agua de los Recobloques

BLOQUE	Peso seco (P0)	Peso hum (P1)	P1-P0	Área (cm ²)	100*(P1-P0)	Área*√10	% ABS. (g/min)
R9	7432	7690	258	446	25800	1409	18
R6	7171	7473	302	449	30200	1418	21
R11	7434	7787	353	447	35300	1414	25
R18	7665	7970	305	449	30500	1418	22
R15	7240	7538	298	449	29800	1418	21
							21

- Tabla 4.33. Absorción máxima inicial de agua de los bloques sin mucílago

BLOQUE	Peso seco (P0)	Peso hum (P1)	P1-P0	Área (cm ²)	100*(P1-P0)	Área*√10	% ABS. (g/min)
B9	7021	7563	542	449	54200	1418	38
F7	7133	7513	380	446	38000	1409	27
G11	7438	7883	445	449	44500	1418	31
G2	7511	7984	473	449	47300	1418	33
C21	7264	7764	500	449	50000	1418	35
							33

En las Tablas 4.32 y 4.33 se observa una diferencia en la absorción de agua entre los Recobloques y los bloques sin mucílago. Por lo anterior se realizó un análisis estadístico para validar dicha diferencia.

- Tabla 4.34. Análisis T de absorción máxima inicial de agua

Table Analyzed	ABS AGUA
Column B	SIN MUCÍLAGO
vs.	vs.
Column A	RECOBLOQUE
Unpaired t test	
P value	0.0008
P value summary	***
Significantly different? (P < 0.05)	Yes
One- or two-tailed P value?	Two-tailed
t, df	t=5.258 df=8

De acuerdo con el análisis T no pareada a dos colas se estableció significancia con una $p < 0.05$ como se puede observar en la Tabla 4.34 y la figura 4.30. Por lo anterior, se rechaza la H_0 y se acepta la H_1 la cual indica que los tratamientos son diferentes entre sí. Es decir, la utilización de mucílago de nopal disminuye la absorción de agua de los Recobloques en 36% respecto a los bloques elaborados sin mucílago.

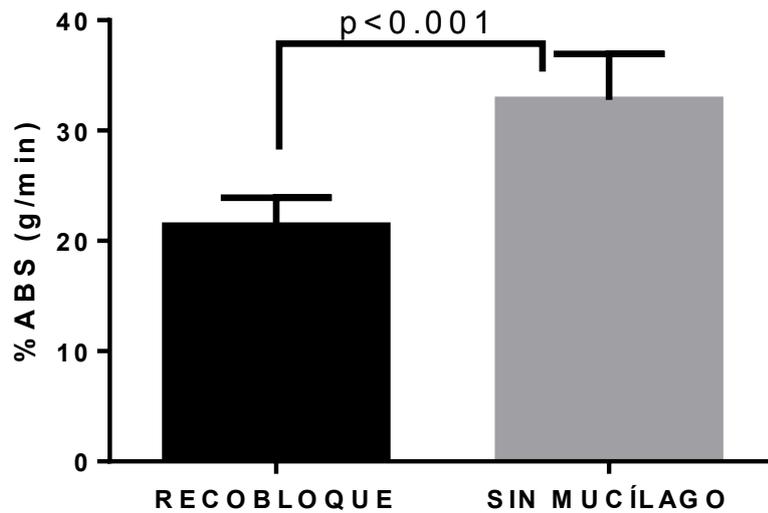


Figura 4.30. Análisis T de absorción máxima inicial de agua

De acuerdo con la normativa establecida en Colombia y Francia la absorción inicial de agua de los Recobloques está apenas 1 g/min arriba de la clasificación como bloque débilmente capilar.

Entonces, de acuerdo con la clasificación de ambos países tanto los Recobloques como los bloques elaborados sin mucílago se pueden considerar como bloques poco capilares.

4.10.5 Prueba de intemperismo acelerado

Como se comentó en el capítulo anterior los Recobloques, así como los bloques elaborados sin mucílago se introdujeron en una cámara de intemperismo acelerado en el Laboratorio de Corrosión de la UDIATEM de la Facultad de ingeniería (figura 4.31).



Figura 4.31. Recobloques durante la prueba de intemperismo

Después de la prueba de intemperismo acelerado los Recobloques se dejaron secar por 48 horas a la sombra. Posteriormente se cabecearon y se sometieron a la prueba de resistencia a la compresión con el objetivo de observar el comportamiento de los bloques que se han sometido a condiciones de humedad y temperatura. Los resultados de resistencia para los Recobloques después de condiciones de intemperismo se indican en la Tabla 4.35.

- Tabla 4.35. Resistencia a la compresión de los Recobloques después de prueba de intemperismo

BLOQUE	F (kg)	A (cm ²)	P (kg/cm ²)
R10	8800	444.02	19.8
R8	6600	444.02	14.9
R4	10000	444.02	22.5
R5	9000	444.02	20.3
R20	9600	444.02	21.6
			19.8

El promedio de la resistencia a la compresión de los Recobloques sometidos a pruebas de intemperismo fue de 19.8 kg/cm², es decir, disminuyeron en 21% la resistencia después de someterlos a 840 ciclos con temperatura mínima promedio de 10°C, temperatura máxima promedio de 30°C y humedad relativa promedio de 53%, respecto a los Recobloques sin exposición a condiciones de intemperismo.

En la misma cámara y al mismo tiempo se introdujeron bloques elaborados sin mucílago los cuales estuvieron expuestos a las condiciones de intemperismo antes mencionadas. Después del período de exposición se probó la resistencia a la compresión de dichos bloques, los resultados se pueden observar en la Tabla 4.36.

- Tabla 4.36. Resistencia a la compresión de los bloques sin mucílago después de prueba de intemperismo

BLOQUE	F (kg)	A (cm ²)	P (kg/cm ²)
A3	4600	444.02	10.4
C16	5800	444.02	13.1
B6	6200	444.02	14.0
C19	5100	450	11.3
B4	6200.0	444.02	14.0
			12.5

Los bloques elaborados sin mucílago disminuyeron en 20% la resistencia después de estar expuestos a las mismas condiciones de intemperismo. De acuerdo a lo anterior la disminución de la resistencia después de la prueba de intemperismo acelerado en bloques elaborados con la mezcla H₂O-mucílago es prácticamente igual a los bloques elaborados sin mucílago.

- Tabla 4.37. Análisis T de resistencia a la compresión después de intemperismo

Table Analyzed	Intemperismo
Column B	Sin mucílago
vs.	vs.
Column A	Recobloques
Unpaired t test	
P value	0.0013
P value summary	**
Significantly different? (P < 0.05)	Yes
One- or two-tailed P value?	Two-tailed
t, df	t=4.814 df=8

Respecto a los resultados de resistencia a la compresión de los Recobloques respecto a bloques sin mucílago, en las Tablas 4.35 y 4.36 se observa una diferencia entre las medias por lo que se realizó el análisis T no pareada a dos colas con la cuál se estableció significancia con una $p < 0.05$ como se puede observar en la Tabla 4.37 y la figura 4.32. Entonces, se rechaza la H_0 y se acepta la H_1 que indica que los tratamientos son diferentes entre sí. Es decir, la utilización de mucílago de nopal mejora la resistencia de los bloques en 58% después de ser introducidos a la cámara de intemperismo.

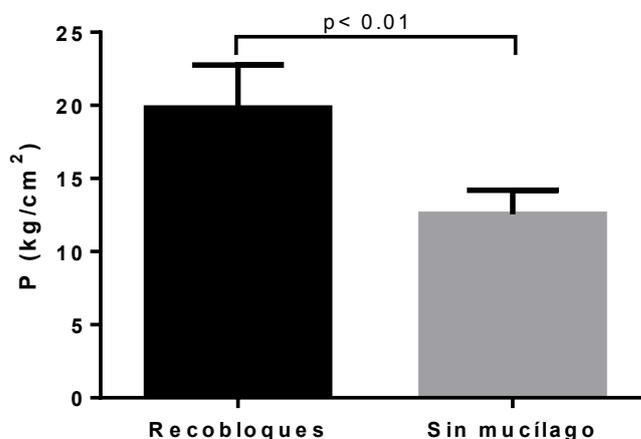


Figura 4.32. Análisis T de resistencia a la compresión después de intemperismo

Los Recobloques después de ser sometidos a condiciones de intemperismo siguen cumpliendo con la resistencia mínima establecida en España, norma que se empleó como base para el presente trabajo, mientras que los bloques elaborados sin mucílago no cumplen con la resistencia mínima de 13.3 kg/cm².

4.10.6 Resistencia a la erosión

En la figura 4.33 se puede observar el arreglo dispuesto para la prueba de erosión de acuerdo con lo planteado en la norma neozelandeza NZS-4298-1998.



Figura 4.33. Prueba de resistencia a la erosión en Recobloques

Los resultados de erosión para los bloques ensayados se muestran en la Tabla 4.38.

- Tabla 4.38. Erosión por spray

	Bloque	Tiempo de exposición (h)	Profundidad oquedad (cm)	Profundidad máx (cm)	Erosión (mm/h)	
RECOBLOQUES	R7	0.5	0.4	0.8	8.00	7.0
	R13	1.0	0.5	0.5	5.00	
	R16	0.5	0.4	0.8	8.00	
SOLO H₂O	C17	1.0	1.4	1.4	14.00	14.7
	U1	0.25	0.4	1.6	16.00	
	D18	0.5	0.7	1.4	14.00	

De acuerdo con la Tabla 3.4 el índice de erosión de los Recobloques, así como de los bloques elaborados sin mucílago es de 1, lo que indica que el agua penetra lentamente en el material.

En la Tabla 4.39 y la figura 4.34 se presenta el análisis T no pareada a dos colas que establece significancia con una $p < 0.05$ por lo que se rechaza la H_0 y se acepta la H_1 que indica que los tratamientos son diferentes entre sí. Es decir, los Recobloques presentan mayor resistencia a la penetración de agua respecto a los bloques sin mucílago de nopal los cuales presentaron el doble de penetración de agua en el material. Una menor penetración de H_2O implica mejor estabilidad del material.

- Tabla 4.39. Análisis T de resistencia a la erosión

Table Analyzed	EROSION
Column B	SIN MUCÍLAGO
vs.	vs.
Column A	RECOBLOQUE
Unpaired t test	
P value	0.0031
P value summary	**
Significantly different? ($P < 0.05$)	Yes
One- or two-tailed P value?	Two-tailed
t, df	t=6.379 df=4

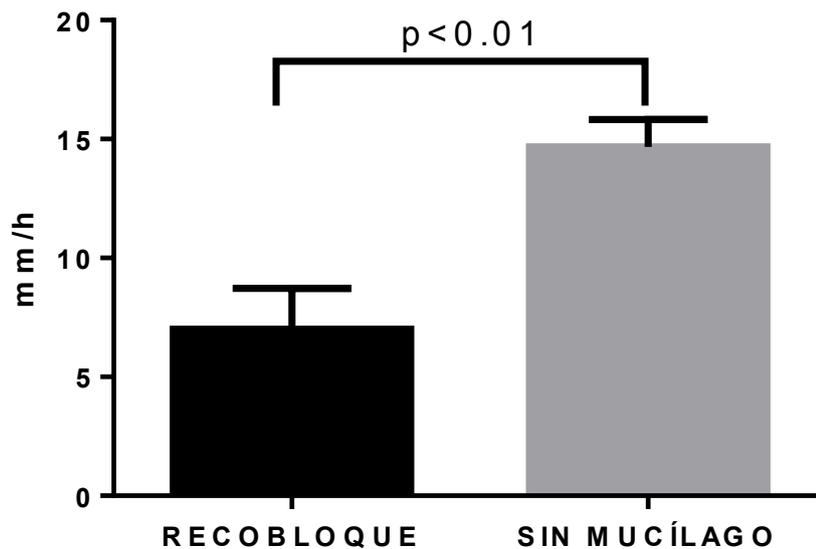


Figura 4.34. Análisis T de resistencia a la erosión

De acuerdo con Aranda-Jímenez (2013), el mucílago de nopal mejora las características de ladrillos y bloques debido a la reducción de porosidad del material lo que implica un cambio en la permeabilidad.

En el presente trabajo de acuerdo con los resultados de las pruebas comparativas de resistencia a la compresión, absorción inicial de agua y de erosión entre Recobloques y bloques elaborados sin mucílago de nopal se obtuvieron mejores resultados para los Recobloques lo que se puede atribuir a la mejora en las propiedades de permeabilidad debido al mucílago el cual provoca una inhibición de la interacción entre el agua y el material lo que retrasa el ascenso del líquido por capilaridad.

4.11 ETAPA 6. Beneficios del proyecto

I. Beneficios ambientales

En la actualidad, bloques y ladrillos son dos de los materiales mayormente empleados en la construcción. Generalmente estos materiales son hechos a partir de una mezcla de arena y arcilla a la cuál en ocasiones se agrega un estabilizante como cal o cemento, para posteriormente secarlos al sol o mediante un horno de cocción. Los procesos de producción de dichos materiales consumen grandes cantidades de materiales vírgenes, combustibles y no son amigables con el ambiente (Murmu y Patel, 2018).

Considerando lo anterior, en el presente trabajo se plantea la fabricación de Recobloques empleando material de excavación como sustituto de arcilla y los residuos de la construcción de ¼" a finos todo en uno como sustituto de arena, mientras que el mucílago de nopal, extraído a partir de pencas maduras que son consideradas como residuos por los productores de Milpa Alta, hace la función de un estabilizante natural. Por otro lado, para evitar el agrietamiento de los bloques durante el secado se adicionan residuos de madera provenientes de una planta de composta. Es decir, se propone la reutilización de distintos residuos para elaborar un material de construcción que cumple con especificaciones internacionales para bloques de tierra comprimida (BTC) como se observó en los resultados obtenidos.

De acuerdo con algunas investigaciones, la producción de bloques se encuentra en un estancamiento que tiene consecuencias ambientales en factores como la calidad del aire y la erosión del suelo (Gómez, 2011).

En estudios que ha desarrollado el INECC respecto al ambiente atmosférico se han hallado importantes cantidades de CO, SO_x, NO_x, PM₁₀, CH₄, compuestos orgánicos volátiles, N₂O, dioxinas, entre otros que son consecuencia de la falta de tecnología para controlar las combustiones y emisiones de los hornos utilizados por la mayor parte de los productores artesanales. Además, es importante mencionar que el combustible consumido por la mayoría de los hornos en México se compone de leña, residuos agrícolas, residuos de podas e incluso residuos industriales (INECC, 2016).

La situación se ha convertido en un reto que concierne a la sociedad radicada en entidades como Estado de México, Guanajuato, Hidalgo, Morelos, Querétaro o Tlaxcala que tienen regiones específicas donde la producción de ladrillos es preponderante como en la localidad de El Refugio en el estado de Guanajuato, donde las mediciones de emisiones de CO₂ para el año 2010 eran equivalentes a 62,948 toneladas (EELA, 2011).

Con base en lo anterior, es importante resaltar la utilización de un desecador solar cuyo funcionamiento se basa en la radiación solar. El desecador solar representa una ventaja ambiental ya que reduciría a 0 las emisiones que arroja un horno típico del sector ladrillero como el estimado para un horno del municipio de Chalco, Estado de México con emisiones totales equivalentes a 17,199 kilogramos de contaminantes por año (Sánchez, 2009).

II. Beneficios económicos

Se estimó la inversión inicial y el costo unitario para la fabricación de Recobolquescon el objetivo de demostrar la viabilidad económica del presente trabajo tomando como base la dinámica actual de productores de ladrillos artesanales en México. Las compras y cálculos realizados se hicieron en pesos mexicanos y con precios del año 2018.

Para los cálculos desarrollados se supone que el productor cuenta con terreno propio para las operaciones en Toluca, Estado de México y que tiene una capacidad de oferta de 20,000 bloques por mes.

a) Inversión Inicial

De acuerdo con la Tabla 4.40 el capital requerido como inversión inicial para la producción de Recobloques es de \$195,694.00 pesos.

- Tabla 4.40 Inversión Inicial para elaboración de Recobloques

Maquinaria y equipo			
Ladrillera industrial	1	\$ 46,000.00	23.506%
Trituradora de madera	1	\$ 31,885.00	16.293%
Horno	1	\$ 40,000.00	20.440%
Palas	2	\$ 334.00	0.171%
Cucharas	2	\$ 350.00	0.179%
Carretillas	2	\$ 1,125.00	0.575%
Bascula	1	\$ 35,000.00	17.885%
TOTALMaq. y Eq.		\$ 154,694.00	79.049%
Activos Intangibles			
Patente		\$ 41,000.00	20.951%
TOTALAct. Int.		\$ 41,000.00	20.951%
TOTAL		\$ 195,694.00	100.000%

En la Tabla anterior se puede observar que el rubro de mayor costo es el de maquinaria y equipo ya que suponen el 79% de la inversión total.

b) Costo unitario

Para el costo unitario de los Recobloques se consideran dos casos, en el primero se toman en cuenta costos para una producción industrial de 20,000 bloques por mes.

En la Tabla 4.41 se puede observar el costo de fabricación de un Recobloque en producción industrial. Los precios del material de excavación y los residuos de construcción son los precios de lista de la empresa Concretos Reciclados para el año 2018, el precio del nopal es el precio establecido para nopales maduros

en la delegación Milpa Alta, mientras que para el precio de los residuos de madera se consideró el precio de aserrín de una maderería convencional.

En el caso del transporte de los residuos de construcción se consideró el recorrido de un camión de 8 m³ de capacidad desde la empresa Concretos Reciclados ubicada en la delegación Iztapalapa hasta la colonia Junta Local, Toluca, Estado de México donde se ubica el lugar de trabajo, donde se tiene un banco de suelo, mientras que el nopal y los residuos de madera se pueden conseguir en las proximidades de la zona de trabajo.

Se considera el precio de los equipos, el costo de patente y mantenimiento requerido de acuerdo con la producción de 1,200,000 bloques en un período de 5 años. Por último, se consideró el costo de mano de obra con una remuneración anual \$54,750.00 pesos, pago a destajo.

- Tabla 4.41. Costo unitario del Recobloque

Materia Prima	Costo unitario (pesos)		Cantidad por pieza	Costo por pieza (pesos)
Material de excavación	0.04	kg	4.7	0.19
Nopal	2.50	Kg	0.4	0.98
Residuos	93.50	m3	2.13	0.08
	0.04	kg		
Tala	2.50	Kg	0.3	0.71
Agua	0.07	Kg	1.6	0.11
Transporte	11000	8 m ³	2.13	1.10
	0.52	kg		
Mano de obra	0.22	pieza	1	0.22
Maquinaria	0.03	pieza	1	0.03
Equipo	0.03	pieza	1	0.03
Investigación + Desarrollo	0.03	pieza	1	0.03
Mantenimiento	0.04	pieza	1	0.04
Electricidad	0.0035	pieza	1	0.0035
			Total	3.52

De acuerdo con el INECC (2016) el precio unitario para un ladrillo artesanal es de \$8.00 pesos en promedio. Con esto se puede establecer un precio de mercado a partir de los \$5.00 pesos por pieza obteniendo importantes utilidades.

La factibilidad económica de esta propuesta se basa en los bajos costos por volumen de los residuos aprovechados.

En el segundo caso se consideran los costos para el presente trabajo de investigación donde la producción máxima es de 20 bloques por mes, siendo el material de excavación el material con mayor fluctuación de precio pasando de \$0.19 pesos por pieza para la producción industrial a \$9.37 pesos por pieza para el presente proyecto, es decir, el costo de un Recobloque para el presente proyecto de investigación fue de \$11.24 pesos.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

La normativa mexicana no cuenta con lineamientos respecto a la fabricación y evaluación de bloques a partir de tierra. A nivel internacional existe normativa que regula este tipo de materiales, sin embargo, solo en la norma española UNE-41410 se considera el empleo de estabilizantes naturales.

Se caracterizaron los residuos de construcción a partir de pruebas físicas, químicas y mineralógicas las cuales se establecieron con base en estudios previos enfocados en la caracterización de agregados reciclados para su uso en mortero y concreto. El contenido de sulfatos, azufre total y cloruros presentes en los residuos de construcción $\frac{1}{4}$ " a finos todo en uno es inferior a lo establecido en la norma española UNE-17441.

A partir de la prueba de granulometría se estableció que el material de excavación proveniente de Toluca es un suelo fino, sin embargo, de acuerdo con el estudio de DRX la presencia de arcilla pura en el suelo es menor a 1% lo que influye en el comportamiento mecánico de los bloques como se puede observar en los Recobloques elaborados con suelo de Toluca donde la máxima resistencia a la compresión fue de 21 kg/cm².

El mismo estudio de DRX indicó la presencia de plagioclasas, minerales que se caracterizan por mejorar la resistencia a la flexión, dureza, durabilidad, así como incrementar la resistencia a los esfuerzos en un material.

Posteriormente, se estableció emplear una mezcla de suelos con el objetivo de mejorar el comportamiento mecánico de los bloques utilizando 60% del suelo de Toluca y 40% de suelo proveniente de Tlayacapan, Morelos. Con dicha mezcla de suelos la resistencia a la compresión de los Recobloques fue de 25 kg/cm², es decir, mejoró en 19% respecto a los Recobloques elaborados con suelo de Toluca.

Por otro lado, el empleo de mucílago de nopal en los Recobloques aumentó la resistencia a la compresión del material en 59% respecto a bloques que se fabricaron sin mucílago. La presencia del mucílago también mejoró la resistencia a la erosión de los Recobloques en los cuales la penetración de agua es apenas

la mitad de la que presentan los bloques sin mucílago. Lo anterior se puede atribuir a la impermeabilidad que aporta la presencia del mucílago de nopal.

A nivel internacional, la resistencia de los Recobloques elaborados con la mezcla de suelos y mucílago de nopal cumple con la resistencia mínima establecida en Brasil, Colombia, España, Francia y Kenia.

Después de someter a los Recobloques a un año en condiciones intemperismo, éstos disminuyeron en 21% su resistencia.

Por último, los Recobloques son una opción amigable con el ambiente porque son a base de materiales reciclados, secados al sol lo que elimina la utilización de hornos ladrilleros y cumplen con normatividad internacional respecto a BTC. Mientras que el costo unitario de fabricación es de apenas \$3.52 pesos lo que convierte a los Recobloques en una opción viable como material de construcción para muros interiores.

RECOMENDACIONES

- La caracterización física del material de excavación (suelo) es de suma importancia para la obtención de buenos resultados en la evaluación de los bloques. Se recomienda determinar el contenido de finos por el método del hidrómetro ya que es una buena aproximación para identificar la presencia de arcilla en el suelo empleado.
- Al emplear mucílago de nopal como estabilizante natural se observan mejoras significativas en la evaluación de los Recobloques, sin embargo, es recomendable emplearlos solo para muros interiores y evitar el contacto prolongado con agua.
- Otra recomendación es emplear estabilizantes como cal y cemento para observar el comportamiento de los Recobloques al contacto con agua, así como la resistencia mecánica de los mismos.
- Es necesario realizar una evaluación sobre la adherencia entre piezas y mortero, así como ensayos sobre muros con los Recobloques.
- En el presente trabajo se evaluaron las características físicas, químicas y mineralógicas de los residuos de construcción de $\frac{1}{4}$ " a finos todo en uno, sin embargo, es recomendable realizar la evaluación de los diferentes tipos de agregados reciclados existentes en el mercado.
- En México se necesita desarrollar normativa respecto a bloques de tierra comprimida, edificaciones a partir de tierra, así como la evaluación de agregados como pueden ser los residuos de construcción.

REFERENCIAS

Aguilar, A. (2017). Tesis de Maestría: Fabricación de bloques ecológicos a base de material producto de la construcción. Instituto de Ingeniería, UNAM.

Apablazas, C. (2012). Tesis de Licenciatura: Estudio de bloques de tierra comprimida, BTC. Universidad de la Frontera. Chile.

Aquino, E. (2015). Tesis de Maestría: Reciclaje de residuos de construcción para la fabricación de ladrillos sustentables. Instituto de Ingeniería, UNAM.

Aranda-Jimenez, Y., Suárez-Domínguez, E. (2013). Cactus stalk waterproof effect in compressed earth blocks. *Nova Scientia* 11. 311-323.

ASTM-D-422-63-Standard test method for particle-size analysis of soils.

ASTM-D-854-02-Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer.

ASTM-D-4318-00-Standard test methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of soils.

Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC), 2013. Plan de manejo de residuos de la construcción y la demolición. Ciudad de México, México.

EELA (2011). Determinación de emisiones de gases de efecto invernadero en base a factores de emisión y monitoreo de eficiencia energética en la comunidad ladrillera El Refugio, León Guanajuato. Eficiencia Energética en Ladrilleras Artesanales (EELA), México.

Esteve, M. (2016). Tesis de grado: Estudio de las características del bloque de tierra comprimida industrializado. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid.

Galán-Marín C., Rivera-Gómez C., Petric J. (2010). Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. *Construction and building materials* 24. 1462-1468.

Gama-Castro, J, et al, (2012). Arquitectura de tierra: el adobe como material de construcción en la época prehispánica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*.

García, B. (2013). Tesis de Doctorado: Mucílago de Nopal (*Opuntia spp.*) sobre propiedades micromorfológicas y estructurales del suelo en trigo. Colegio de Postgraduados.

Gómez, C, et al, (2011). Estudio exploratorio del impacto ambiental generado por la industria ladrillera del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas, México. *Lacandonia* 5. 90-95.

Holcim-GTZ. (2007). Reuse and recycling of Construction and Demolition Waste.

INECC (2012). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. Versión extensa. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), México.

INECC (2016). Análisis de mercado del sector de la construcción y proyecto piloto a nivel región con el objetivo de reducir los Contaminantes Climáticos de Vida Corta (CCVC) de ladrilleras artesanales en México. Informe final. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), México.

Juárez Badillo, E., Rico A. (2005). *Mecánica de suelos I: Fundamentos de la mecánica de suelos*, México. Limusa. Grupo Noriega editores.

Maldonado, M. (2014). Tesis de Licenciatura: Aprovechamiento de residuos de construcción y materia orgánica en la fabricación de ecoladrillos para el parque ecológico Tuzandepetl, Veracruz. Facultad de Ciencias, UNAM.

Meléndez, C., Camacho, A. (2009). Espectrometría de fluorescencia de rayos x. Aventuras del pensamiento. Universidad Autónoma de Chihuahua.

Moreno-Pérez, E., et al, (2018). Chemical and mineralogical characterization of recycled aggregates from construction and demolition waste from Mexico City. *Minerals*, 8, 237.

Murmu A.L., Patel A. (2018). Towards sustainable bricks production: An overview. *Construction and building materials* 165. 112-125.

NADF-007-RNAT-2013. Proyecto de Norma Ambiental. Clasificación y especificaciones de manejo para residuos de la construcción y demolición en el Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente.

NMX-C-036-ONNCCE-2004. Norma Mexicana – Industria de la construcción – Resistencia a la compresión – Método de prueba.

NMX-C-037-ONNCCE-2005. Norma Mexicana – Industria de la construcción – Determinación de la absorción de agua y absorción inicial de agua – Método de prueba.

NMX-AA-164-SCFI-2013. Norma Mexicana de Edificación Sustentable-Criterios y requerimientos mínimos.

NMX-C-404-ONNCCE-2005. Norma Mexicana – Industria de la construcción – Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – Especificaciones y métodos de prueba.

NMX-C-441-ONNCCE-2005. Norma Mexicana – Industria de la construcción – Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural – Especificaciones.

Ojeda, C. (2015). Tesis de Licenciatura: Evaluación de residuos mineros provenientes de la extracción de hierro, para su posible uso en elaboración de concretos. Universidad Nacional Autónoma de México.

Rojas, M., Aquino, E. (2016). Guía para la fabricación de ladrillos ecológicos. Instituto de Ingeniería, UNAM.

Roux, R. (2010). Los bloques de tierra comprimida (BTC) en zonas húmedas. Plaza y Valdés. Universidad Autónoma de Tamaulipas.

Sánchez, O. (2009). Tesis de Maestría: Emisiones derivadas de la producción de ladrillos en el Estado de México. Instituto Politécnico Nacional.

Silva R. V., de Brito J., Dühr R.K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and building materials* 65. 201-217.

SEMARNAT (2009), Estudio de análisis, evaluación y definición de estrategias de solución de la corriente de residuos generados por las actividades de construcción en México. México.

SEMARNAT (2015), Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Ciudad de México, México.

Trujillo A., Mejía M., Bravo J. (2014). Análisis composicional de la cerámica de Huacamarca, cuenca sur del Yanamayo, Ancash. *Investigaciones sociales* 18. 57-72.

Ulsen, C., et al, (2013). Production of recycled sand from construction and demolition waste. *Construction and building materials* 40. 1168-1173.

UNE-1744-1. (1999). Norma Española. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico.

UNE-103204. (1993). Norma Española. Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico.

UNE-103205. (2006). Norma Española. Determinación del contenido de sales solubles de un suelo.

UNE-41410. (2008). Norma Española. Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

Vázquez, E. (2013). Progress of Recycling in the built environment (Final report of the RILEM technical committee 217-PRE). Springer. Volume 8.

Zúñiga, A. (2013). Tesis de Licenciatura: Caracterización de los agregados finos para la fabricación de un concreto de alto desempeño. Instituto Politécnico Nacional.

GLOSARIO

Absorción máxima inicial de agua. Cantidad de agua que absorbe un espécimen por una de sus caras bajo determinadas condiciones durante 10 minutos de inmersión en agua donde esta lo cubra 5 mm, manteniendo el nivel de agua constante en el recipiente.

Agregados. Son materiales granulares (arena, grava, piedra triturada) que se utilizan en la construcción para la fabricación de productos resistentes mediante su mezcla con elementos aglomerantes como cemento o cal. Se denominan agregados reciclados aquellos que resultan del procesamiento de residuos de construcción y demolición. En España se denominan áridos.

Análisis granulométrico. Consiste en separar y clasificar por tamaños las partículas de un suelo, retenidas en una sucesión de mallas expresando las masas retenidas como porcentajes de la muestra total.

Bloque. Es un componente de forma prismática que se obtiene por moldeo de concreto y otros materiales, puede ser macizo o hueco.

Bloque de Tierra Comprimida (BTC). Pieza con forma prismática obtenida por compresión estática o dinámica de tierra húmeda, seguida de un desmolde inmediato y que puede contener estabilizantes o aditivos para alcanzar o desarrollar las características particulares de los productos.

Cabeceo. Técnica constructiva mediante la cual se realiza el aislamiento de las caras de especímenes sometidos a prueba, mediante la aplicación de una capa menor a 3 mm de espesor de mezcla yeso-cemento.

Disposición final. Acción de depositar o confinar permanentemente residuos sólidos en sitios o instalaciones cuyas características prevengan afectaciones a la salud de la población y a los ecosistemas y sus elementos.

Estabilización de la tierra. Una tierra estable es aquella que presenta buena resistencia a la deformación y es poco sensible a la presencia de agua. La utilización de estabilizantes es recomendable para la obtención de un material de calidad que resuelve las carencias del suelo disponible.

Ladrillo o tabique. Es un componente de forma prismática fabricado con arcillas comprimidas o extruidas, mediante un proceso de cocción.

Mortero. Conglomerado o masa constituida por arena, conglomerante y agua, que puede contener también algún aditivo.

Mucílago de nopal. Es uno de los componentes de la sustancia transparente de naturaleza viscosa excretada por los nopales que tiene la capacidad de formar redes moleculares y retener agua, así como modificar propiedades de viscosidad y elasticidad.

Muro interior. Son elementos no estructurales que tienen la función de dividir un área o espacio en referencia a otro.

Plasticidad. Propiedad que tienen algunos suelos para deformarse sin agrietarse, expresa la magnitud de las fuerzas de las películas de agua dentro del suelo que permiten que el suelo sea moldeado sin romperse.

Reciclado. Transformación de residuos a través de algún proceso que permite restituir su valor evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos.

Resistencia a la compresión. Esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga

Reúso. Empleo de un material o residuo previamente usado sin que medie un proceso de transformación.

Tabicón. Es un componente de forma prismática que se obtiene por moldeo de concreto y otros materiales siendo siempre macizo.

Tamizado. Método físico para separar sólidos formados por partículas de diferentes tamaños. Consiste en pasar una mezcla de partículas de diferentes tamaños por una serie de tamices.