

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN PARA LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS Y BLOQUES DE AGREGADOS RECICLADOS



ISBN: 978-607-30-8554-0

DOI: 10.22201/iingen.9786073085540e.2023

María Neftalí Rojas Valencia
Carlos Javier Mendoza Escobedo
Denise Yeazul Fernández Rojas
Eduardo Álvarez Cazares
Esperanza Aquino Bolaños
Alberto Rodas Joo



Series
**Instituto
de Ingeniería UNAM**

Publicación arbitrada

SM 17
NOVIEMBRE, 2023

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

Publicación arbitrada

ISBN: 978-607-30-8554-0

doi: <https://doi.org/10.22201/iingen.9786073085540e.2023>

Caracterización de suelos y residuos de construcción para la fabricación de ladrillos y bloques de agregados reciclados

María Nefthalí Rojas Valencia¹

IIUNAM

mrojasv@iingen.unam.mx

Carlos Javier Mendoza Escobedo²

IIUNAM

CMendozaE@iingen.unam.mx

Denise Yeazul Fernández Rojas³

IIUNAM

DFernandezR@iingen.unam.mx

Eduardo Álvarez Cazares⁴

FIUNAM

eduardo.alvarez@ingenieria.unam.edu

Esperanza Aquino Bolaños⁵

IIUNAM

espe.aquino2023@gmail.com

Alberto Rodas Joo⁶

IIUNAM

ardsjoo@gmail.com

Serie Manuales

SM17

Noviembre 2023

¹ Técnico Académico Titular C, Investigadora Nacional. Instituto de Ingeniería

² Investigador Titular B, Instituto de Ingeniería

^{3, 5 y 6} Becarios, Instituto de Ingeniería

⁴ Profesor Mecánica de suelos, Facultad de Ingeniería, UNAM

Caracterización de suelos y residuos de construcción para la fabricación de ladrillos y bloques de agregados reciclados

Primera edición, 24 de noviembre de 2023

SM 17

D.R.© 2023 **Universidad Nacional Autónoma de México**

Instituto de Ingeniería, UNAM

Ciudad Universitaria, CP 04510, Ciudad de México

ISBN: 978-607-30-8554-0

doi: <https://doi.org/10.22201/iingen.9786073085540e.2023>

La obra fue editada por el Instituto de Ingeniería, de la Universidad Autónoma de México (IIUNAM). El cuidado de la edición estuvo a cargo de la Unidad de Promoción y Comunicación del IIUNAM. Esta obra está gratuitamente disponible para consulta e impresión, en archivo PDF de 10.8 MB, en la sección de Publicaciones del portal electrónico del IIUNAM, <http://www.iingen.unam.mx>, desde que se terminó de editar.

Términos de licenciamiento Creative Commons para protección de la difusión por terceras personas y derechos de autor de la presente obra: Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional



Dedicatorias

A todos los alumnos que han tenido interés en valorizar los residuos de construcción y demolición.

A todos los ladrilleros y ladrilleras de la República Mexicana.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

Prefacio

Este documento muestra la experiencia adquirida en trabajos de investigación, por más de 10 años, en la valorización de residuos de construcción y demolición para su uso en la fabricación de materiales constructivos. En particular, se describen los procedimientos para la fabricación de ladrillos y bloques de agregados reciclados (AR), los cuales son un material alternativo que permite una construcción mucho más económica y respetuosa con el medioambiente que otros sistemas constructivos tradicionales.

Si bien en la industria de ladrillos y bloques destinados al sector de la construcción se han empleado numerosos materiales de reúso y reciclaje, este libro pretende dar a conocer los ladrillos y bloques AR, los cuales utilizan como materia prima: arcilla, residuos de tala o aserrín y agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición. Estos ladrillos y bloques son evaluados bajo las pruebas de la normatividad mexicana (NMX) del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE); dichas evaluaciones se realizan en cuatro partes fundamentales: a) caracterización de suelos: granulometría plasticidad; b) caracterización de agregados reciclados: intemperismo acelerado, resistencia a la erosión; c) pruebas para ladrillos y bloques AR, propiedades mecánicas, físicas y de durabilidad: absorción de agua inicial y total, resistencia a la compresión, erosión; y d) proceso constructivo: resistencia a compresión diagonal, módulo cortante del muro y elasticidad de pila.

Los ladrillos y bloques AR fabricados con los procedimientos detallados en este documento pueden ser empleados para la construcción de bardas interiores y exteriores, de ser conveniente se recomienda protegerlos de la intemperie con un recubrimiento convencional, aplanarlos y/o pintarlos. Los ladrillos y bloques AR pueden ser usados para construir muros divisorios dentro de las edificaciones habitacionales, de igual manera para la construcción de elementos arquitectónicos como jardineras, celosías, parapetos, incluso para la construcción de guarniciones o cualquier otro mobiliario que se requiera. El proceso constructivo de los elementos mencionados es el mismo que se emplea al utilizar un ladrillo o bloque convencional; por ejemplo, para reforzar se deben utilizar castillos, al igual que

se hace para cualquier barda de adobes, bloques o ladrillos habituales que a la fecha se encuentran en el mercado.

En primera instancia se pretende impulsar el uso de los ladrillos y bloques AR en la construcción de elementos no estructurales, aunque han mostrado excelentes resultados como elementos de construcción para uso estructural, aún es necesario profundizar en métodos y pruebas de investigación que respalde el uso de dichos materiales ante efectos sísmicos.

Agradecimientos

Este documento no hubiera sido posible sin el interés y compromiso que han brindado los estudiantes de maestría desde el 2015 hasta la actualidad. Un agradecimiento especial para Armando Aguilar P. A., José Alberto López L., Blanca Ivett Rivas T., Hugo Alberto Quintero N., Juan Carlos Maldonado M. y Fabiola Mendoza S., tesistas que aplicaron las técnicas presentadas en este documento.

También un agradecimiento al personal del Laboratorio de Estructuras y Materiales de la Coordinación de Ingeniería Estructural del Instituto de Ingeniería, UNAM, por apoyarnos en la determinación de algunas pruebas que aquí se presentan.

Se agradece el apoyo del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por facilitar la infraestructura necesaria; sin ella no hubiera sido posible adquirir los conocimientos aquí plasmados y concluir este documento.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

Resumen

En todas las ciudades del mundo se generan todos los días toneladas de residuos de construcción y demolición (RCD); por dar algunas cifras, en la Unión Europea se producen 500 millones de toneladas por año (t/año), mientras que en Estados Unidos son 170 millones de t/año y 12 millones de t/año en México. De acuerdo con los datos reportados en la normativa ambiental [NACDMX-007-RNAT-2019](#), tan solo en la Ciudad de México (CDMX) se registran 14000 t/día por edificación de nuevas infraestructuras o renovación.

A pesar de que hay varias recicladoras en la Ciudad de México, gran parte de los RCD, terminan en banquetas, calles, puentes o baldíos. Paralelo a la generación de RCD, se ve la necesidad de fabricar en México alrededor de 323 millones de ladrillos/año, los cuales se fabrican con material virgen, el cual se está agotando y se tienen 17,000 ladrilleras artesanales que trabajan en condiciones precarias.

El objetivo de este libro es dar a conocer con detalle la metodología para su aprovechamiento en la fabricación de ladrillos y bloques con agregados reciclados (AR), por lo que se dan las pautas para que un residuo sea valorizado, reutilizado y reciclado en beneficio del ambiente y de la economía de la construcción ya que se puede ayudar a disminuir la gran cantidad de RSD que se genera, además de cumplir con la Norma Ambiental de la Ciudad de México [NACDMX-007-RNAT-2019](#), que crea la categorización y explicación de manejo exhaustivo de los residuos RCD y la obligación de reciclar o enviar a reciclaje los residuos generados en la obra. El ladrillo y bloque AR además de ser de calidad, ya que cumple con la normativa, se ubica muy bien en los requisitos ecológicos y sustentables, ya que no emplea energía para su producción, por tanto, no hay mayor generación de CO₂ al ser ladrillos y bloques que no necesitan cocción.

Palabras clave: ladrillos; residuos de la construcción; agregados reciclados, propiedades físicas; análisis termogravimétricos.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

Abstract

In all the cities of the world, tons of construction and demolition waste (RCD) are generated daily. To give some figures, 500 million tons per year (tons/year) are produced in the European Union, while 170 million tons/year are produced in the United States and 12 million tons/year in Mexico, according to the data reported in the environmental regulation NACDMX-007-RNAT-2019. Only in Mexico City (CDMX) 14,000 tons/day are registered, due to the construction of new infrastructures or renovations.

Even though there are several recyclers in Mexico City, a large part of the RCD ends up on sidewalks, streets, under bridges or vacant lots. Parallel to the generation of RCD, there is a need to manufacture approximately 323 million bricks/year in Mexico, which are made with virgin material and are running out. Besides there are 17,000 artisan brickmakers working in precarious conditions. The objective of this book is to present in detail the methodology for its use in the manufacture of bricks and blocks with recycled aggregates (RA), for which the guidelines are given so that a residue is valued, reused and recycled for the benefit of the environment and construction economy, since it can help reduce the large amount of RSD that is generated, in addition to complying with the Environmental Standard of Mexico City NACDMX-007-RNAT-2019, which creates the categorization and explanations of exhaustive management of RCD waste and the obligation to recycle or send for recycling the waste generated on site. The brick and block-AR, in addition to being of quality, it complies with the maintainable and ecological regulations, since it does not use energy for production, therefore there is no greater generation of CO₂, due that bricks and blocks does not need cooking.

Keywords: bricks; construction waste; recycled aggregates, physical properties; thermogravimetric analysis.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

Índice general

Dedicatorias	iii
Prefacio.....	v
Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice general.....	xiii
Índice de figuras	xv
Índice de tablas	xviii
Índice de ecuaciones	xix
1. Introducción.....	1
1.1 Prescripciones normativas para la fabricación de ladrillos ecológicos	6
1.2 Marco Legal	9
1.3 Normatividad que se adoptó para la fabricación de ladrillos AR y bloques AR.....	9
2. Materiales aglomerantes	11
2.1 Identificación de suelos	11
2.2 Prueba de Tenacidad.....	13
2.3 Prueba de resistencia en estado seco	15
2.4 Prueba de humedad	18
2.5 Prueba ensayo de compresión.....	19
2.6 Prueba de degustación.....	21
2.7 Caracterización por color.....	21
2.8 Caracterización por brillo.....	22
2.9 Límites de Atterberg o Límites de Consistencia	22
2.10 Propiedad de la cohesión.....	23
2.11 Manipulación del olor	24
3. Residuos reciclables RCD	27
3.1 Residuos de construcción y demolición (RCD)	27
3.2 Materiales de relleno o agregados	28
3.3 Residuos de tala o maderables.....	29

3.4 Mezcla de agua – mucílago de nopal (a-mn).....	29
4. México y el reciclaje de los residuos de la construcción y demolición	33
5. Pruebas de laboratorio de mecánica de suelos (geotecnia) de agregados reciclados.....	37
5.1 Pruebas de granulometría de agregados reciclados	37
5.2 Pruebas de hidrómetro.....	40
5.3 Pruebas de plasticidad para agregados reciclados	42
5.4 Pruebas de absorción superficial	45
5.5 Pruebas de resistencia a la compresión para ladrillos AR.....	46
5.6 Prueba de intemperismo acelerado.....	47
5.7 Resistencia a la erosión	48
5.8 Pruebas para caracterizar tierra arcillosa y agregados reciclados.....	49
6. Fabricación de ladrillos AR y bloques AR.....	61
6.1 Preparación del suelo para fabricar ladrillos AR y bloques AR.....	61
6.2 Método constructivo.....	66
6.3 Resistencia a la compresión diagonal y módulo de cortante	75
6.4 Proceso de elaboración de muretes para ensayo de tensión diagonal.....	76
6.5 Resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante de murete	78
6.6 Resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pila.....	82
6.7 Ventajas técnicas y ambientales de los ladrillos y bloques AR.....	88
6.8 Usos de los ladrillos y bloques AR	90
7. Conclusiones y recomendaciones	93
8. Referencias	95

Índice de figuras

Figura 1.1 Ladrillera artesanal en el estado de Puebla	2
Figura 1.2 Bloques ecológicos fabricados por Tecno Adobe	2
Figura 1.3 Adobe tradicional de Guadalajara, Jalisco	4
Figura 1.4 Bloque de tierra comprimido de la ladrillera Tecnoadobe	5
Figura 1.5 Ladrillo rojo macizo fabricado en el estado de Puebla	5
Figura 2.1 Ejemplo de un suelo sedimentado del municipio de Jiutepec, Cuernavaca, Morelos	12
Figura 2.2 Elaboración de cilindro con el material de excavación	13
Figura 2.3 Inicio de deslizamiento del cilindro	14
Figura 2.4 Medición de la longitud de rotura	14
Figura 2.5 Moldeo de la porción de material de excavación para realizar la prueba de dureza	15
Figura 2.6 Pastillas moldeadas con residuos de excavación	16
Figura 2.7 Esferas y pastillas moldeados	16
Figura 2.8 Prueba de dureza de la esfera	17
Figura 2.9 Prueba de dureza en pastillas	17
Figura 2.10 Prueba de la bola	18
Figura 2.11 Resultados de la prueba de la bola	19
Figura 2.12 Humedecimiento de la muestra de suelo	20
Figura 2.13 Opresión de muestra de suelo	20
Figura 2.14 Suelo con presencia de arcilla	20
Figura 2.15 Suelo con exceso de arena	21
Figura 2.16 Estados de consistencia	22
Figura 2.17 Cohesión	24
Figura 2.18 Manipulación de muestra de suelo	25
Figura 3.1 Toma y cernido de los residuos o desechos de tala	29
Figura 3.2 Preparación de nopales para la extracción de mucílago	30
Figura 3.3 Reposo de nopales en agua	30
Figura 3.4 Obtención del mucílago de nopal en la mezcla líquida	31
Figura 3.5 Extracción recomendable de mucílago	31
Figura 4.1 Aprovechamiento de RCD en diferentes proyectos (elaboración propia)	35
Figura 5.1 Ejemplo de arena y secado en horno	39
Figura 5.2 Material tamizado y pesado	40

Figura 5.3 Pruebas de hidrómetro	41
Figura 5.4 Esquema del funcionamiento del penetrómetro	43
Figura 5.5 Moldeo de cilindros de material	44
Figura 5.6 Cilindros de material recién hechos	44
Figura 5.7 Cilindros de material clasificados y pesados	45
Figura 5.8 Prueba de absorción inicial	46
Figura 5.9 Prensa para ensayos de compresión	47
Figura 5.10 Cámara de intemperismo acelerado	48
Figura 5.11 Prueba de resistencia a la erosión	49
Figura 5.12 Cápsulas a baño maría	52
Figura 5.13 Solución filtrada.....	54
Figura 5.14 Valoración con permanganato de potasio para determinar su factor de normalidad	55
Figura 5.15 Calentando hasta la ebullición	57
Figura 6.1 Secado de la tierra.....	61
Figura 6.2 Apisonado de los residuos de excavación.....	62
Figura 6.3 Cernido del material.....	62
Figura 6.4 Bloques, combinaciones preliminares probadas	64
Figura 6.5 Dimensiones de fabricación.....	65
Figura 6.6 Preparación de materiales ya pesados	66
Figura 6.7 Disposición de la tierra colada.....	66
Figura 6.8 Integración de los materiales.....	67
Figura 6.9 Incorporación de la mezcla agua-mucílago	67
Figura 6.10 Homogenización de la mezcla	68
Figura 6.11 Mezcladora eléctrica de mortero.....	68
Figura 6.12 Acomodo de la mezcla.....	69
Figura 6.13 Acomodo de la superficie	69
Figura 6.14 Proceso de compactación.....	70
Figura 6.15 Aplicación de fuerza en sentido contrario a la compactación.....	70
Figura 6.16 Extracción de la pieza	71
Figura 6.17 Bordos laterales para sujetar y desplazar el ladrillo	71
Figura 6.18 Desplazamiento del ladrillo	72
Figura 6.19 Recepción en una superficie rígida	72
Figura 6.20 Ladrillos frescos.....	73
Figura 6.21 Cambio de posición.....	73
Figura 6.22 Bloquera industrial.....	74
Figura 6.23 Secador solar	75
Figura 6.24 Preparación del murete	76
Figura 6.25 Preparación de la pila.....	76
Figura 6.26 Máquina Universal.....	77
Figura 6.27 Certus HD	77
Figura 6.28 Transductores de desplazamiento	78
Figura 6.29 Murete listo para las pruebas	78
Figura 6.30 Se observa la falla a 1207.1 (kg) (Lado A).....	80
Figura 6.31 Se observa la falla a 1207.1 (kg) (Lado B).....	80
Figura 6.32 Gráfica esfuerzo vs deformación angular promedio	82
Figura 6.33 Pila cabeceada para pruebas.....	82

Figura 6.34 Longitud instrumentada lado A.....	83
Figura 6.35 Diagrama de la longitud instrumentada, lado A.....	84
Figura 6.36 Diagrama de la longitud instrumentada, lado B.....	84
Figura 6.37 Pila observa falla (Lado A).....	85
Figura 6.38 Pila observa falla (Lado B).....	85
Figura 6.39 Preparación de una pila para análisis de módulo de elasticidad	86
Figura 6.40 Datos para el cálculo de módulo de elasticidad en la pila.....	87
Figura 6.41 Construcción con ladrillos de tierra en Cuernavaca, Morelos	90
Figura 6.42 Construcción de una casa con ladrillos de tierra cruda en Chalmita, Morelos	91
Figura 6.43 Construcción de una banca y guarnición con bloques-AR, IIUNAM.....	91
Figura 6.44 Construcción de una jardinera con bloques AR, IIUNAM.	92

Índice de tablas

Tabla 1.1 Clases de resistencia a la compresión normalizada por la Norma Española UNE 41410	6
Tabla 1.2 Normativa de evaluación aplicada para los ladrillos AR y bloques AR.....	7
Tabla 1.3 Valores de resistencia a la compresión establecidos en la NMX-C-441-ONNCCE-2013	7
Tabla 1.4 Valores de resistencia a la compresión en México.....	8
Tabla 1.5 Valores de absorción de agua máxima inicial en México	8
Tabla 1.6 Valores determinados en normativa internacional para materiales fabricados con tierra	9
Tabla 1.7 Especificaciones internacionales para ladrillos Bloque de Tierra Comprimida	10
Tabla 3.1 Clasificación granulométrica de los agregados reciclados	29
Tabla 4.1 Granulometrías proporcionadas por "Concretos Reciclados"	34
Tabla 5.1 Para la porción de muestra retenida en el tamiz de 2 mm (No.10).....	38
Tabla 5.2 Índice de resistencia a la erosión	49
Tabla 6.1 Posibles combinaciones preliminares.....	63
Tabla 6.2 Porcentajes de diseño para la mezcla óptima	65
Tabla 6.3 Dimensiones de fabricación de los ladrillos ecológicos	65
Tabla 6.4 Ejemplo de datos de un murete	79
Tabla 6.5 Distancia lado A	79
Tabla 6.6 Distancia lado B	79
Tabla 6.7 Cálculos promedios ϵ_c (Lado A y Lado B)	81
Tabla 6.8 Ejemplo de datos de una pila.....	83
Tabla 6.9 Factores correctivos por esbeltez de las pilas.....	85
Tabla 6.10 Comparativa de las ventajas ambientales de los ladrillos AR vs. convencional	89

Índice de ecuaciones

5.1 Ecuación de Stokes.....	40
5.2 Media aritmética.....	52
5.3 Determinación de sales solubles.....	53
5.4 Factor de normalidad.....	55
5.5 Factor de normalidad de la solución.....	55
5.6 Contenido de materia orgánica.....	57
5.7 Porcentaje de carbono.....	59
5.8 Porcentaje de materia orgánica.....	60
6.1 Resistencia a la compresión diagonal.....	80
6.2 Módulo cortante del murete.....	81
6.3 Deformación angular producida por el esfuerzo γ_2	81
6.4 Resistencia a la compresión para pila.....	¡Error! Marcador no definido.
6.5 Módulo de cortante para pila.....	87
6.6 Deformación unitaria.....	87
6.7 Cálculo del módulo de elasticidad.....	87

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

1 Introducción

Las paredes de las viviendas particulares en la República mexicana se edifican de la siguiente manera: el 92% se construyen de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto; 4% de adobe; 3% madera; y 1% de lámina, carrizo, bambú, palma embarre o bajareque (INEGI, 2020), los cuales en su mayoría son materiales de calidad que fortalecen al sector de la construcción de viviendas.

En el caso de los ladrillos y bloques, estos pueden ser fabricados de forma artesanal o industrial. A nivel nacional existen más de 17,000 ladrilleras artesanales, Puebla es el estado que ocupa el primer lugar con 4,316 ladrilleras, seguido por Jalisco con 2,500 y Guanajuato con 2,362 ladrilleras; en promedio producen 279, 660,800 unidades al año (INECC, 2016 y 2018).

La Figura 1.1 muestra un ejemplo de una ladrillera artesanal, localizada en el estado de Puebla, en la cual se observa a un trabajador transportando sus ladrillos en una carretilla; en dicho lugar se fabrican en promedio 500 ladrillos a la semana.

A la fecha se involucra el uso de ladrillos ecológicos en el sector de la construcción de viviendas, presentando cualidades similares a los ladrillos convencionales, posicionándose como una alternativa de gran calidad y con amplias ventajas económicas. Por tanto, su uso no deriva en pérdida de calidad puesto que, como la mayoría de los productos ecológicos, deben cumplir con altos requerimientos técnicos y estructurales.

A comparación de los bloques convencionales cuya fabricación y materiales provienen de extracciones de bancos naturales, la manufactura de los ladrillos ecológicos. En este contexto destacan los Bloques ecológicos de Tierra Comprimida (BTC), en los ejemplos de la Figura 1.2 se pueden ver diversos bloques ecológicos de tierra comprimida, cuya fabricación mensual es de 20,000 bloques de diferentes formas y tamaños (INECC, 2016).

Así mismo, se han fabricado ladrillos ecológicos empleando diversos materiales, por ejemplo, la fábrica Genbruger se dedica a la venta y fabricación de adoquines hechos de cauchos de neumáticos pulverizados; estos materiales presentan alta capacidad térmica (citado por Aquino y Rojas, 2015). Por otra parte, Ceballos-Medina *et al* (2021) reportan la fabricación de adoquines empleando residuos de construcción y demolición (RCD).



Figura 1.1 Ladrillera artesanal en el estado de Puebla



Figura 1.2 Bloques ecológicos fabricados por Tecno Adobe

En Ecuador usaron agregados reciclados mezclados con cemento para fabricar bloques, los cuales mostraron ventajas de absorción de agua y resistencia a la compresión, así como ventajas económicas y reducción de gastos de energía y materias primas para la producción de bloques, lo cual les ayuda a cumplir con las normas técnicas ecuatorianas (Aguilar, 2017; Mendoza, 2022). En Tuxtla Gutiérrez, Chiapas se obtuvo una oferta equivalente, mejorando la resistencia de los bloques para ser usados en áreas sísmicas (Aquino y Rojas, 2015).

En Reino Unido se fabrican bloques compuestos de partículas de vidrio, escoria metalúrgica, lodo del alcantarillado, ceniza producida por los incineradores industriales y ceniza de combustible pulverizado de las centrales termoeléctricas llamados *Bitublock*. Dicho bloque fue más resistente que uno de cemento y no requiere energía para su elaboración en comparación con uno de arcilla (Econstruyendo, 2011, citado por Aquino y Rojas, 2015).

En la Universidad de Navarra (España) diseñaron ladrillos puzolánicos sin cocción, utilizando como materiales cal hidráulica natural, cemento Portland y como aditivo cascarillas de arroz (residuos de la cosecha del arroz y cenizas de la cáscara de arroz), lo llamaron Ecoladrillos con cascarillas de arroz. La base de dicho ladrillo fue un tipo de arcilla, marga gris (Cabo, 2011). Otros trabajos en donde emplean arroz como parte de sus mezclas para la fabricación de ladrillos ecológicos es el de Muñoz (2012) e Ige *et al* (2022).

Se han probado diferentes materiales disponibles en la naturaleza como bambú, agave, hojas de palma, paja, residuos de coco, algodón, pasto, etc. para mejorar las propiedades de un suelo empleado en la elaboración de bloques. Las investigaciones con agave sometido a cocción han mostrado resultados de conductividad térmica de 0.48W/mK, resistencia mecánica de 8.1MPa, la fibra disminuyó en un 15.2% la capacidad de absorción de agua, logrando un mejor desempeño en el tiempo (Rosas, 2021).

La organización Pura Vida de Guatemala en el año 2004, fabricaron Ecoladrillos a base de botellas PET rellenos de residuos plásticos compactados y sellando al final la botella (Heisse *et al.*, 2011). Otros estudios similares son descritos por Perera (2019), Pérez (2022), Kumar *et al* (2020), Munir *et al* (2021) y Shimol y Robin (2020). Rondón (2007) emplea diversos plásticos como son: residuos de Policloruro de Vinilo (Pvc), Polietileno de Alta Densidad (Pead) y Poliestireno (Ps) para Ecoladrillos y mezclas asfálticas.

En Argentina, en el Centro Experimental de la Vivienda Económica se emplearon plásticos reciclados para elaborar materiales constructivos. El proceso se llevó a cabo triturando plásticos PET provenientes de residuos de envases de bebidas, en una amasadora común se hacía una mezcla con cemento Portland y un aditivo que mejoraba la adherencia de las partículas plásticas al cemento, por último, se colocaban en una bloquera manual para moldear las piezas (CONICET, 2015, citado por Aquino y Rojas, 2015). Otro trabajo similar fue desarrollado por Suasnavas en 2017.

ECOTEC BIAPVS® con el “Sistema de amarre biomimético de cuatro puntos” utilizó las botellas de PET no retornables como ladrillos que al llenarlos de tierra y otros materiales *in situ*, se unieron para formar una estructura, con la finalidad de reducir los residuos que se generan (Grenbirger, 2006, citado por Aquino y Rojas, 2015).

El término biomimético proviene del griego “bio” vida y “mímesis” imitación, es una imitación de los modelos, y técnicas, que existen en el medioambiente para solucionar dificultades humanas de manera eficiente (Huerta de Fernando, 2017).

En México se fabrican ladrillos de diversas mezclas, en particular el Ecoladrillo Ecotec se fabrica a base de desperdicios de fibra de celulosa del papel, arena, cemento y aserrín, el 20% de los componentes de estos ladrillos es material 100% reciclado. Se menciona que dicho Ecoladrillo además de ser duradero, es un aislante térmico y acústico (Ecotec, 2016).

Con respecto a los adobes, la palabra adobe deriva del árabe: At-tub que significa “ladrillo de tierra”. La tierra o el suelo ha sido material de construcción usado en el ámbito mundial y en todos los tiempos. Los hombres conocieron sus características y las mejoraron añadiendo fibras vegetales como la paja o algunas ramas como refuerzos para consolidar su resistencia. La ventaja que caracteriza al adobe son sus propiedades térmicas ya que regulan la temperatura interna de los recintos constituidos en ellos por contener fibras que le confieren dicha propiedad. Además, favorecen el uso de materiales *in situ*, usa herramientas sencillas. La desventaja es que son sensibles a la humedad y presentan una alta vulnerabilidad sísmica, por lo que no son recomendados para paredes expuestas a la intemperie (Karmelić, 2015).

Los adobes pueden ser moldeados y prensados de la forma más artesanal con las manos y con el uso de un molde de madera como se muestra en la Figura 1.3 (Rojas y Macías, 2013; López, 2018). El adobe tradicional se fabrica en Morelos, Guanajuato, Tlaxcala, Puebla, Estado de México y Jalisco por poner algunos ejemplos.



Figura 1.3 Adobe tradicional de Guadalajara, Jalisco

A partir del adobe surge el Bloque de Tierra Comprimido (BTC), dichos bloques se obtienen de la compresión estática o dinámica de la tierra húmeda que en ocasiones contienen estabilizantes o aditivos, después de la compresión sigue un desmolde inmediato y son secados en invernaderos (Apablazas, 2012; López, 2018). Otros ejemplos se muestran en la Figura 1.4, como son los desarrollados por Tecnoadobe (MTSP/FOCCAL, 213).



Figura 1.4 Bloque de tierra comprimido de la ladrillera Tecnoadobe

Por otra parte, los ladrillos macizos se fabrican de material arcilloso que se somete a un proceso de cocción y se obtiene un ladrillo rojo, como el que se muestra en la Figura 1.5. Son resistentes a la humedad y calor, su color y calidad dependen de la clase de arcilla empleada (Aquino, 2015).

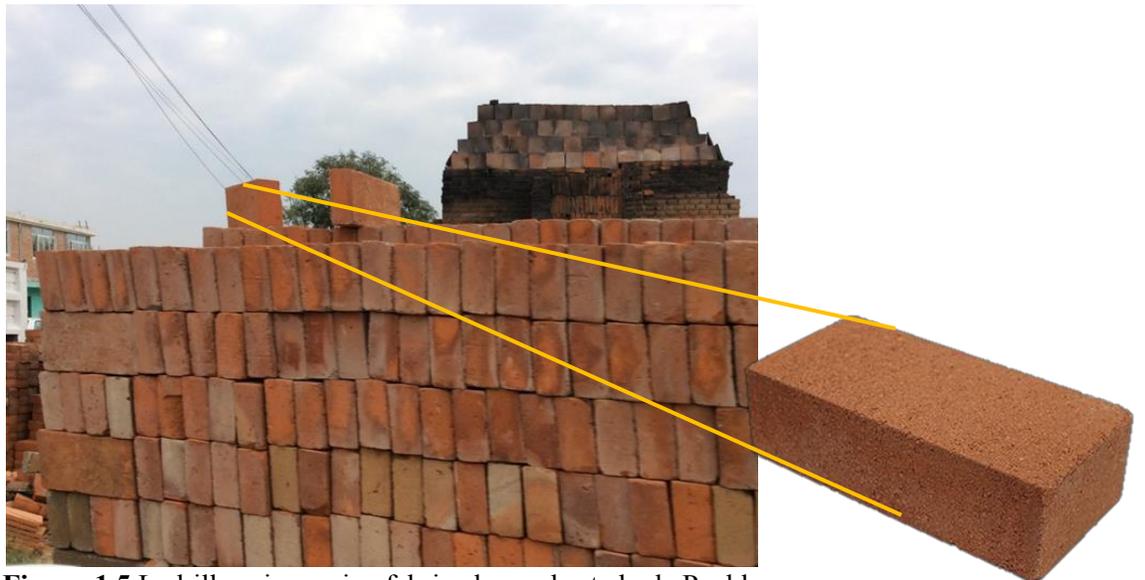


Figura 1.5 Ladrillo rojo macizo fabricado en el estado de Puebla

1.1 Prescripciones normativas para la fabricación de ladrillos ecológicos

A pesar de que el sector constructivo con tierra y otros materiales ecológicos es muy antiguo, la normativa al respecto es muy escasa.

Sobre bloques de suelo cemento y sus aplicaciones en la construcción, la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT) emitió trece normas, mientras que la norma colombiana se emitió en el 2005 y se basó en la norma francesa XP P13-901, 2001 de AFNOR sobre BTC. El reglamento de Nuevo México lo emitió en el 2004 el *Construction Industries Division* (CID) y se basó en dos códigos ya derogados, en el 2013 la organización internacional *American Society for Testing and Materials* desarrolló la norma ASTM E2392 M-10 (MTSP/FOCCAL, 2013).

La Norma Técnica de Edificación NTE E.080 establecida en Lima, Perú (marzo del 2000) comprende lo referente al adobe simple o estabilizado como unidad para la construcción de albañilería, así como las características, comportamiento y diseño; estableciendo un valor mínimo de 12 kg/cm² de resistencia a la compresión por unidad fabricada.

También se cuenta con la Norma Española UNE 41410, la cual alude a las especificaciones de construcción y uso de Bloques de Tierra Comprimida para muros, vigente a partir de diciembre del año 2008; en dicha norma se establecen los parámetros de resistencia a la compresión requeridos, los cuales son presentados en la Tabla 1.1 identificados con los números 1, 2 y 3 por la norma, respecto a su capacidad de resistencia NMX-C-036-ONNCE-2013.

Tabla 1.1 Clases de resistencia a la compresión normalizada por la Norma Española UNE 41410

Bloques	BTC1	BTC2	BTC3
	(Kg/cm ²)		
Resistencia normalizada	13	30	50

Como la mayoría de los materiales de construcción, los ladrillos y bloques AR deberán cumplir con los requerimientos establecidos en la normativa mexicana vigente. Puesto que en México aún no se tienen normativas que avalen el uso de la tierra cruda como material de construcción, los ladrillos ecológicos han sido evaluados con base en la normativa del Organismo Nacional de Normalización y Certificación para la Construcción y la Edificación (ONNCE) que engloban los requerimientos para bloques y ladrillos; entre ellas, las normas de calidad mediante las cuales se evaluaron los ladrillos AR son las indicadas en la Tabla 1.2.

Las características técnicas brindadas por los ladrillos AR fabricados con RCD, dan resultados satisfactorios para los parámetros que se especifican en la normativa mexicana (Rojas-Valencia *et al*, 2020). En la Tabla 1.3 se resumen dichos parámetros y un ejemplo de los resultados de ladrillos AR.

Tabla 1.2 Normativa de evaluación aplicada para los ladrillos AR y bloques AR

Método y especificación	Referencia
Bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines, resistencia a la compresión y método de prueba.	NMX-C-036-ONNCCE-2013
Mampostería, método de ensayo: determinación de la absorción total y la absorción inicial de agua en bloques, tabiques o ladrillos y tabicones.	NMX-C-037-ONNCCE-2013
Mampostería: determinación de las dimensiones de ladrillos, tabiques, bloques y tabicones para la construcción.	NMX-C-038-ONNCCE-2013
Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural.	NMX-C-441-ONNCCE-2013

Fuente: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, citadas por Aquino, 2015.

Tabla 1.3 Valores de resistencia a la compresión establecidos en la NMX-C-441-ONNCCE-2013

Normativa aplicable	Contenido	Especificación	Resultado
NMX-C-036-ONNCCE-2013	Determinación de la resistencia a la compresión.	Método de prueba.	Satisfactorio
NMX-C-037-ONNCCE-2013	Determinación de la absorción inicial	Método de prueba.	Satisfactorio
NMX-C-038-ONNCCE-2013	Determinación de las dimensiones de ladrillos.	Método de prueba.	Satisfactorio
NMX-C-441-ONNCCE-2013 (Uso no estructural)	Límite mínimo de resistencia a la compresión.	30 kg/cm ² .	> 40 kg/cm ²
	Límite superior de absorción inicial.	5 g/minuto.	< 1.5 g/min

Hoy en día, no se tiene una norma mexicana que regule los parámetros para la fabricación y la evaluación de la calidad de un ladrillo cuando se emplea tierra cruda (residuos de excavación) y RCD como material principal en la fabricación de los ladrillos AR. Y la normativa que puede aplicarse es la NMX-C-441-ONNCCE-2013 donde se especifican los límites de resistencia a la compresión y absorción de agua máxima inicial y final. En la Tabla 1.4 se establece la resistencia media y la resistencia mínima individual, con los valores expresados en (kg/ cm²) de ladrillos y bloques macizo o hueco, pieza por celosía, cara rectangular y no rectangular, dicha normativa se recomienda para los ladrillos AR y bloques AR.

Tabla 1.4 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. En la Tabla 1.5 se establecen los valores de absorción de agua máxima inicial que se obtienen basados en la NMX-C-441-ONNCCE-2013.

Tabla 1.5 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

En Nuevo México, Estados Unidos, el organismo emisor de División de Regulación y Licencias para el sector de la construcción emitió el Código de Construcción General, en su capítulo 7 se especifica el uso de la tierra como material de construcción. En dicho manuscrito se establece el parámetro de resistencia a la compresión para la evaluación de la calidad de estos materiales de 21(kg/cm²), tal como lo establece la norma de Estados Unidos. En la Tabla 1.6 se muestran los parámetros establecidos por las normas de Perú, España y Estados Unidos.

En el ámbito internacional, se evalúa la calidad de los ladrillos ecológicos (en general y ladrillos AR en particular) considerando a la normativa *American Society for Testing and Materials* (ASTM), la norma ASTM aplicable para materiales de mampostería estructural C216 requiriéndoles un mínimo de 152 kg/cm².

Tabla 1.6 Valores determinados en normativa internacional para materiales fabricados con tierra

País	Norma	Resistencia (kg/cm ²)
Perú	NTE E.080	13
España	UNE 41410	13
Estados Unidos	Código de construcción	21

Fuente: adaptado de Aquino, 2015; López, 2018

1.2 Marco Legal

Para el caso de los residuos de manejo especial, en particular para los RCD, aplica lo siguiente:

1.2.1 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 (DOF, 2015) y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos de 2003 (DOF, 2021), así como sus respectivas reformas.

1.2.2 Marco Estatal

La formulación de leyes y reglamentos estatales 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 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) se desarrolló en la Ciudad de México la NACDMX-007-RNAT-2019 respecto a la clasificación y especificaciones de manejo para los residuos de la construcción.

1.3 Normatividad que se adoptó para la fabricación de ladrillos AR y bloques AR

A nivel internacional existe una 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 (López, 2018).

En la Tabla 1.7 se resumen las especificaciones para absorción de agua y resistencia a la compresión establecidas en diferentes normas internacionales como la de España, Kenia, Colombia, Francia y Brasil, donde se encuentran ladrillos BTC, ya que son las normativas que más se parecen a los que ahora son ladrillos y bloques de agregados reciclados y se fabrican en este documento.

Tabla 1.7 Especificaciones internacionales para ladrillos Bloque de Tierra Comprimida

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

2 Materiales aglomerantes

El suelo cumple la función de material cementante; la cantidad que se requiere para la fabricación de ladrillos depende de su composición, es necesario identificar estas características mediante pruebas físicas (se recomienda no usar la capa superficial del suelo ya que tiene restos orgánicos, se recomienda usar la capa que está por debajo de los 30 cm).

Existen diferentes pruebas de campo que se pueden realizar para determinar si un suelo es factible de uso para la fabricación de ladrillos. El resultado de estas pruebas proporcionará información sobre la calidad del suelo analizado y su eficiencia para ser empleado en la fabricación de ladrillos.

2.1 Identificación de suelos

- Suelo: sistema de partículas sólidas y vacíos, en donde las partículas sólidas se pueden clasificar en dos grupos (gruesos y finos), y los vacíos pueden estar ocupados por gases o líquidos.
- El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) clasifica los suelos por el tamaño de sus partículas, plasticidad, compresibilidad, resistencia, permeabilidad.
- Los suelos gruesos Gravas (G) y Arenas (S); Bien graduados (W) o Mal graduados (P)
- Los suelos finos Arcillas (C) y Limos (M); de Alta plasticidad (H) o Baja plasticidad (L)
- A continuación, se describen algunas pruebas empleadas *in situ*, denominadas pruebas rápidas, debido a que proporcionan resultados cualitativos que nos ayudan a identificar propiedades físicas del suelo (Dolores, 2019)
- Para fines de clasificación se recomienda la realización de pruebas de laboratorio de mecánica de suelos.

2.1.1 Prueba de sedimentación

Esta prueba se fundamenta en la sedimentación diferenciada de los constituyentes de la tierra, también conocida como prueba granulométrica. Es una forma muy simple para conocer la distribución granulométrica del suelo y estimar el porcentaje de gruesos o finos (arena, limos y arcilla) basada en el hecho de que la velocidad de caída de las partículas a través del agua aumenta con la densidad de las mismas (Ley de Stokes), los elementos más pesados como las arenas se van al fondo mientras que las partículas finas (arcilla) y materia orgánica quedan suspendidas.

El procedimiento es el siguiente:

- 1.- Se debe agregar en un recipiente de 1 litro de capacidad (de preferencia un frasco o probeta graduada), suelo-cernido o cribado (con un tamiz de aberturas de 1mm) hasta la mitad de su altura y enseguida se adiciona agua que permita su agitación.
- 2.- Se agita el recipiente hasta que todas las partículas de suelo se encuentren en suspensión y se deja en reposo sobre una mesa, como se observa en la Figura 2.1, por un período de 24 horas. En seguida se estima el porcentaje de cada componente sedimentado, mediante la observación del espesor de cada capa respecto al total de material vertido. Un suelo adecuado para fabricar ladrillos o bloques no debe contener más de 30% de arenas y debe contener una cantidad de suelos finos mayor a 50%.



Figura 2.1 Ejemplo de un suelo sedimentado del municipio de Jiutepec, Cuernavaca, Morelos

Ejemplos de resultados de esta prueba se pueden consultar en los trabajos de López (2018), Román *et al* (2019), Rivas (2020) y Dai *et al* (2019).

2.2 Prueba de Tenacidad

La prueba de tenacidad, también conocida como prueba de plasticidad o como prueba del cigarro, sirve para determinar la plasticidad del suelo a emplear. Para la evaluación se realiza el siguiente procedimiento:

- 1.- Se debe humedecer el suelo necesario para formar un cilindro de 20cm de longitud y 1 cm de diámetro (ver Figura 2.2), cuidando que la cantidad de agua sea la necesaria para formar una mezcla moldeable y manejable (no líquida). Se recomienda pesar para esta prueba 100 gramos de suelo y agregar de 20 a 25mL de agua.



Figura 2.2 Elaboración de cilindro con el material de excavación

- 2.- Enseguida se debe pasar cm a cm el cilindro sobre el filo de una mesa, tal como se puede ver en la figura 2.3, se determina la longitud a la cual se rompe el borde suspendido durante la prueba (ver figuras 2.3 y 2.4).



Figura 2.3 Inicio de deslizamiento del cilindro



Figura 2.4 Medición de la longitud de rotura

3.- Se realizará el mismo procedimiento para tres cilindros por cada tipo de suelo. La calidad del material de excavación será evaluada a partir de los siguientes parámetros:

- Si el cilindro se rompe entre 5 y 10 cm, el suelo es adecuado ya que tiene la proporción apropiada de arcilla y arena (suelo arcillo-arenoso).
- Si el cilindro se rompe antes de los 5 cm, indica que el suelo no tiene la suficiente cantidad de arcilla (suelo arenoso) y no se deberá usar por sí sola, ya que tendrá que ser mejorada.

- Si se rompe después de los 15 cm indica que el suelo contiene exceso de arcilla (suelo arcilloso) por lo cual se deberá mejorar añadiendo arena para disminuir su plasticidad y que este se encuentre en los parámetros adecuados.
- Si no se forma el cilindro, significa que tiene mucho limo y arena y poca arcilla; sin plasticidad.

Ejemplos de resultados de esta prueba se pueden consultar en los trabajos de Aguilar (2017), López (2018) y Rivas (2020).

Criterios de selección para hacer ladrillos

La tierra que sirve para hacer ladrillos debe de cumplir con los siguientes requerimientos: ser arenosa; con contenido aproximado de 40-45% arena, 20-35% de limos y 15-25% de arcilla; no debe de contener material orgánico; la longitud del cilindro debe lograr una longitud aproximada de 10 cm (MTSP/FOCCAL, 2013).

2.3 Prueba de resistencia en estado seco

Esta prueba también es conocida como prueba de dureza; el procedimiento es el siguiente:

1.- Se toma entre 15 y 30 gramos de suelo, se humedece y se amasa como se observa en la Figura 2.5.



Figura 2.5 Moldeo de la porción de material de excavación para realizar la prueba de dureza

2.- Se amasa la porción, realizando una mezcla de consistencia tal que permita moldear los tres especímenes de forma o prisma regular (cilindro, esfera o cubo) de 2 cm o 3 cm de diámetro y 1.5 cm de espesor tal y como se aprecia en las Figuras 2.6 y 2.7



Figura 2.6 Pastillas moldeadas con residuos de excavación

3.- Se identifican los especímenes, etiquetándolos con nombre y número, para después ser depositados en un lugar seco y seguro por un período de 48 horas.



Figura 2.7 Esferas y pastillas moldeados

4.- Ya seco el suelo se realiza el aplanado manual de las piezas secas, tal como se muestra en la Figura 2.8, para el caso de las esferas, y en la Figura 2.9 se pueden ver las pastillas. Considerando los puntos anteriores se tomarán los siguientes criterios para la evaluación: cuando se rompan muy fácil se clasificará como un suelo de baja firmeza; si se rompen con dificultad será un suelo con resistencia media o alta según la intensidad de la fuerza aplicada.



Figura 2.8 Prueba de dureza de la esfera



Figura 2.9 Prueba de dureza en pastillas

Ejemplos de resultados de esta prueba se pueden consultar en los trabajos de Oyola (2016), Aguilar (2017), López (2018) y Rivas (2020).

2.4 Prueba de humedad

La prueba de humedad sirve para conocer la humedad necesaria para producir una buena compactación de las tierras del suelo cuando estas son comprimidas, convenientes para moldear adobes y ladrillos. La humedad óptima se considera buena cuando una tierra, un suelo cumplen la prueba de la bola. Para realizar dicha prueba se sigue el siguiente procedimiento:

1. Se toma la cantidad de tierra o suelo suficiente, se humedece y se amasa al igual que en la prueba de dureza resistencia en estado seco.
2. Se amasa la porción, realizando una mezcla de consistencia tal que permita moldear con la mano una bola de 5 cm de diámetro.
3. Se debe dejar caer al suelo desde una altura aproximada de 1.20 m como se observa en la Figura 2.10
4. Dependiendo del comportamiento de la bola ante la caída se determina la humedad que tiene la muestra de suelo, si es escasa, excesiva u óptima como se observa en la Figura 2.11

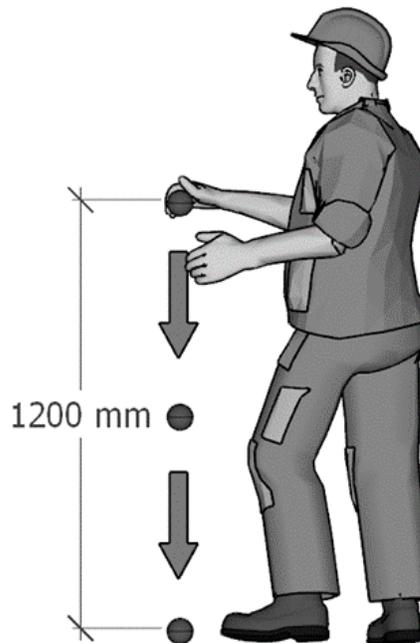


Figura 2.10 Prueba de la bola

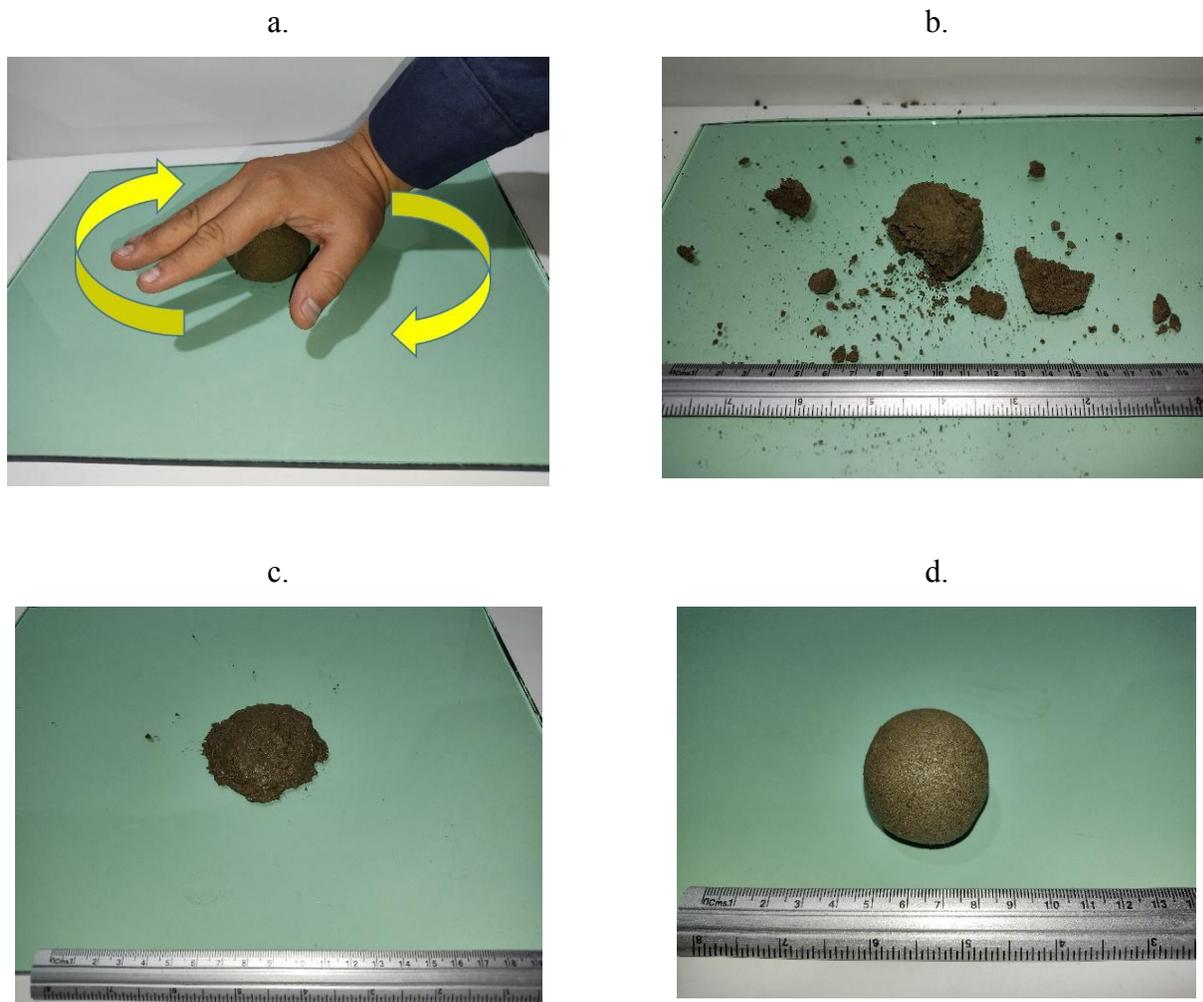


Figura 2.11 Resultados de la prueba de la bola. a) Moldeo de muestra, b) humedad escasa, c) excesiva, y d) óptima

Si se quiere consultar resultados de su aplicación, se recomienda revisar a Aguirre *et al* (2016).

2.5 Prueba ensayo de compresión

La prueba de compresión se emplea para determinar el contenido de arcilla de un suelo y ver si es útil para realizar el moldeo de ladrillos AR y bloques AR. Dicha prueba se realiza mediante el ensayo de presión de la bola, la cual consiste en pasos simples detallados de la Figura 2.12 a la 2.15:

1. Tomar una muestra de suelo y humedecerla (Figura 2.12), hasta que comience a hacerse compacta sin que se pegue en la mano, no es recomendable usar guantes.



Figura 2.12 Humedecimiento de la muestra de suelo

2. Apretar la mano y abrirla (Figura 2.13).



Figura 2.13 Opresión de muestra de suelo

3. Si el suelo mantiene la forma de la mano (Figura 2.14), significa que contiene la arcilla suficiente para moldear ladrillos y bloques.



Figura 2.14 Suelo con presencia de arcilla

4. Si el suelo no mantiene la forma de la mano (Figura 2.15), es porque contiene demasiada arena.



Figura 2.15 Suelo con exceso de arena

2.6 Prueba de degustación

Con el fin de determinar el tipo de suelo que se tiene, es importante aprender a distinguirla de manera práctica y empírica, ya que esto puede facilitar el trabajo y ahorrar mucho tiempo en la fabricación (aunque siempre es más confiable hacer pruebas de laboratorio).

La prueba de degustación es menos usual por naturaleza de la misma, pero ayuda para tener idea de la composición del material que se tiene y sirve para decir si es un suelo apto para el moldeo de adobes, bloques, ladrillos, etc. (MTSP/FOCCAL, 2013).

La prueba consiste en tomar una pizca de suelo y ponerla en la boca, saborearla y masticarla, sin ingerirla, considerar los siguientes criterios:

- Si sabe feo o podrido, significa que el suelo tiene contenido orgánico, lo cual impide su uso.
- Si al masticarla se sienten los granos, indica contenido de arena.
- Si se forma una especie de “chicle” y se queda pegada en las muelas o dientes, indica un alto contenido de arcilla.

Es importante escupir la tierra y enjuagarse la boca al terminar la prueba, en ningún momento se deberá ingerir. Esta prueba no es muy recomendable por posibles daños a la salud, sin embargo, es empleada en algunas ladrilleras por tradición.

2.7 Caracterización por color

Otra propiedad del suelo puede ser evidente en función de su color:

- ✓ Color claro es característico de un suelo inorgánico.
- ✓ Color café oscuro, verde oliva o negro es característico de suelo orgánico.

Como ejemplo de su aplicación y resultados se puede consultar el trabajo de Valdez (2015), Domínguez *et al* (2011).

2.8 Caracterización por brillo

Si el suelo tiene arcilla puede ser revelada por el brillo, para esta prueba se recomienda, tomar un poco de suelo fino y mezclar con agua hasta formar una bola compacta del tamaño del puño de la mano, cortar por la mitad y observar las superficies.

- ✓ Si la superficie brilla, el suelo es arcilloso.
- ✓ Si la superficie muestra poco brillo, el suelo es limoso.
- ✓ Si la superficie es opaca, el suelo es arenoso.

Como ejemplo de su aplicación y resultados se puede consultar el trabajo de Fahlman (2018).

2.9 Límites de Atterberg o Límites de Consistencia

Conforme el suelo absorbe agua (de 20 a 30% según los tipos de suelos) se observa el cambio de consistencia (Carazas y Rivero, 2002). Existen cuatro cambios principales: seco, húmedo, plástico y líquido, tal como se muestra en la Figura 2.16.

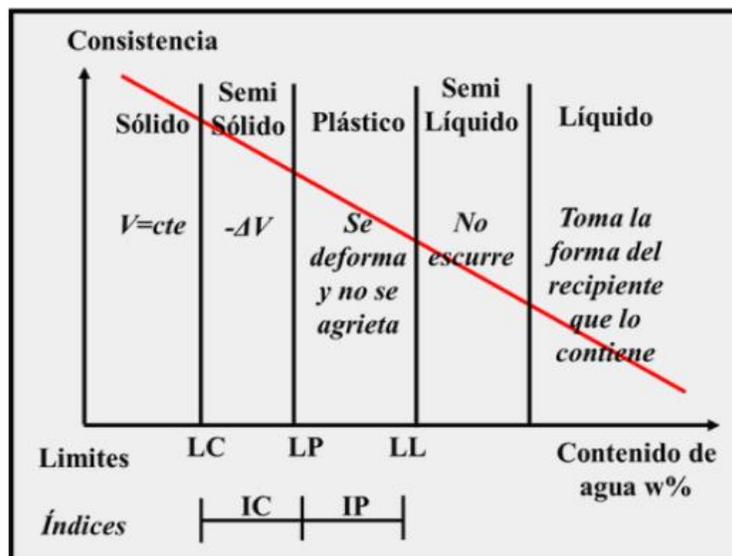


Figura 2.16 Estados de consistencia

Donde:

- Consistencia. Representa la mayor o menor resistencia que el suelo ofrece para cambiar de forma, depende del contenido de agua, del tipo y porción del mineral de arcilla que tenga en el suelo fino.
- Contenido de agua (w%). Es la relación entre el peso de agua contenida y el peso de sus sólidos, expresado como un porcentaje.
- Límite líquido (LL). Es el contenido de agua expresado como porcentaje que delimita el estado semilíquido del plástico de un suelo remoldeado fino, cuya resistencia al esfuerzo cortante es de 25 g/cm².
- Límite plástico (LP). - Es el contenido de agua de un suelo remoldeado que separa al estado plástico del estado semisólido de ese suelo fino.
- Índice de plasticidad (IP). - Es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, y mide el intervalo de contenidos de agua en el cual el suelo tiene comportamiento plástico.
- Plasticidad- Se define como la propiedad para cambiar de forma bajo la acción de esfuerzos aplicados, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse y mantener la nueva forma deformada al cesar los esfuerzos (ASTM D4318; 2000).

Ejemplos de resultados de esta prueba se pueden consultar en la investigación que reporta Carazas y Rivero (2002) y Aishwarya y Priya (2023).

2.10 Propiedad de la cohesión

La cohesión funciona en dos fases como puede apreciarse en la figura 2.17



Material con poca humedad



Material moldeado con humedad óptima, al mojarse las partículas de suelo se acomodan permitiendo que existan partículas de agua en los espacios que dejan las partículas de suelo.



Material con fisuras y con menor volumen, al secarse la mezcla pierde volumen y el material seco empieza a agrietarse el producto de la contracción.

Figura 2.17 Cohesión

Fase 1: El suelo absorbe o recarga agua, es un proceso pausado que necesita tiempo.

Fase 2: El suelo se deseca, las arcillas reducen de volumen ligando hacia ellas, los otros componentes que se hallan en estado seco. (Carazas y Rivero, 2002)

2.11 Manipulación del olor

Con el agua, los sentidos permiten identificar el suelo orgánico por la liberación de un olor desagradable, la Figura 2.18 muestra una manera de moldear la muestra.

- Si hay *suelo orgánico*, hay un desprendimiento de mal olor (putrefacto).
- Si es *suelo arenoso*, quedaría áspera, frágil, poco viscoso.
- *El suelo limoso*, es fino, se hace polvo y se aprecia una sensación harinosa al tacto en estado seco.
- *Suelo arcilloso*, es difícil de romper, se desbarata en el agua, muy viscoso y fino, da una sensación jabonosa al tacto en estado húmedo.

Lo ideal es utilizar arcillo arenoso (CS) y poner atención con los suelos limosos (M) porque una vez secas no resisten el agua y teniendo un suelo con el equilibrio adecuado, los ladrillos y bloques serán más fáciles de fabricar.

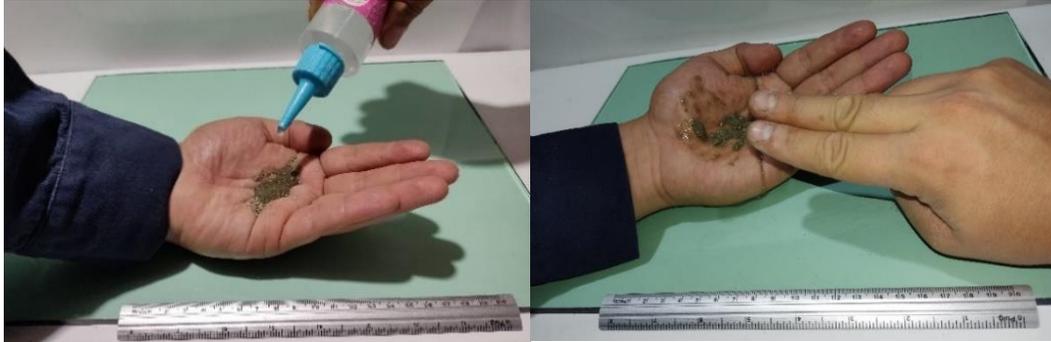


Figura 2.18 Manipulación de muestra de suelo

Detalles de su aplicación se pueden ver en Carazas y Rivero (2002) y Liu *et al* (2018).

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

3 Residuos reciclables RCD

3.1 Residuos de construcción y demolición (RCD)

Los residuos de construcción y demolición (RCD) están constituidos por diversos materiales que se generan en primer lugar de la construcción y demolición, también de actividades como destrucción y excavación; su composición varía por el tipo de obra y fase de construcción (Rojas y Ossa, 2022) tales materiales son reciclables. En la Tabla 1.5 se muestra la tipificación de dichos materiales, subproducto de la construcción y el uso que podrían tener, esta información se encuentra con mayor detalle en la norma ambiental de la CDMX actualizada en el 2019 (NACDMX-007-RNAT-2019) que establece la clasificación y especificaciones de manejo integral para los residuos de la construcción y demolición en la Ciudad de México (citado por Aguilar, 2017).

La normativa recomienda que los agregados reciclados provenientes de RCD sean aprovechados, de diferentes formas en elementos no estructurales, clasificándolos por clases: A) residuos de concreto y B) residuos de concreto armado, podrán usarse en bases hidráulicas en caminos y estacionamientos; C) metales generados del proceso de construcción se recomienda enviar a reciclaje; D) residuos de mampostería o pétreos con recubrimiento, pueden ser empleados para bases y subbases, subbases en caminos y estacionamientos, construcción de terraplenes, cobertura y caminos interiores en los rellenos sanitarios, construcción de andadores y trotapistas, bases para ciclo-pistas, firmes, guarniciones y banquetas, material para lecho, acostillamiento de tuberías y relleno as, construcción de pedraplenes, material para la conformación de terrenos, relleno en jardineras, rellenos en cimentaciones, caminos de jardines, construcción de banquetas, guarniciones y bordillos (Noguez, 2018; NACDMX-007-RNAT-2019).

Ventura (2017) recomienda que los residuos de la categoría E) Residuos pétreos, sean usados en concretos hidráulicos para la construcción de firmes, ciclo pistas, banquetas y guarniciones, construcción de andadores y trota-pistas, terraplenes, pedraplenes, pueden ser usados como material para relleno o para la elaboración de suelo – cemento, material para lecho y relleno total de cepas, material para la conformación de terrenos, rellenos en cimentaciones, plantillas para cimentación

concreto ciclópeo, rellenos en jardines, mobiliario urbano, lechos, acostillamientos y relleno de tuberías, conformación de parques y parterres, zanjas; F) Asfálticos sirven para bases asfálticas o negras, concretos asfálticos elaborados en caliente, concretos asfálticos templados o tibios, concretos asfálticos elaborados en frío, bases asfálticas espumadas, micro carpetas en frío. Wagih *et al* (2013) reporta el uso de RCD para hormigón estructural, mientras que Wang *et al* (2019) trabaja con residuos reciclados de hormigón de construcción y demolición como árido para hormigón estructural.

Tratándose de productos prefabricados hechos con agregados reciclados, podrán aprovecharse en las obras de construcción, tales como: construcción, modificación, remodelación, ampliación, adecuación, rehabilitación, restauración, reparación, sustitución de infraestructura, conservación, mantenimiento, instalación, demolición u otras, de acuerdo con sus especificaciones técnicas y cuando sus características estructurales lo permitan. Se deberá constatar que cumplen con las características, disposiciones y normatividad que para su efecto se emita (NACDMX-007-RNAT-2019, Liu *et al*, 2019).

También se pueden encontrar otros materiales como madera y metales férreos que no los incluyen en la Norma Ambiental NACDMX-007-RNAT-2019, pero que son reciclables. En la última década, con el objetivo de reducir los impactos negativos, estos materiales son muy utilizados, no nada más en México sino también en el ámbito mundial (Rojas, 2008; PAOT, 2010).

Cuando la madera tiene pintura se puede triturar para hacer conglomerados o pueden usarse como combustible, en caso de no estar pintada puede ser materia prima para la industria papelera, composta, hábitats para mascotas, entre otros usos (Rojas y Macías, 2013; Aguilar, 2017).

Las varillas o perfiles de hierro se pueden separar con un imán o de forma manual y se pueden fundir para fabricar nuevos materiales de hierro.

Los suelos contaminados han sido utilizados en una mezcla con bentonita y otros aditivos, como el silicato de sodio o cemento, según contaminantes, para obtener recubrimientos de baja permeabilidad y disminuir la solubilidad de estos, lo cual no es una práctica recomendable (Rojas y Macías, 2013).

3.2 Materiales de relleno o agregados

Los agregados reciclados se emplean para aumentar la dureza a la mezcla, son componentes derivados de la desintegración de los RCD.

Los RCD son clasificados en dos grupos: 1ro. RCD solo cementantes (clasificados por la [NACDMX-007-RNAT-2019](#) como tipo A), generado de la desintegración de los materiales de residuos derivados del concreto y sub clasificados en tres diferentes granulometrías, 1", 3/8" y 1/4" a finos; el 2do. denominado RCD todo en uno (clasificados por la [NACDMX-007-RNAT-2019](#) tipo B) son agregados reciclados que pertenecen a la desintegración de residuos compuestos por ladrillos, bloques, cerámicos, morteros, adoquines, mamposterías y prefabricados, generados con granulometría de 1/4" a finos mostrados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Clasificación granulométrica de los agregados reciclados

Agregados reciclados			
Solo cementantes Tipo A			Todo en uno Tipo B
1/4" a finos (0.63 cm)	3/8" (0.95 cm)	1" (2.54 cm)	1/4" a finos (0.63 cm)

Aplicación y resultados de bloques de mampostería se pueden ver en el trabajo de Maldonado (2023).

3.3 Residuos de tala o maderables

Los residuos de tala por sus compuestos fibrosos desempeñan la función de material estabilizador durante la cohesión de las mezclas. Estos residuos se generan durante la poda de árboles y arbustos, que además han sido triturados.

Se utilizan restos de poda con tamaños de máximo 2.5 cm, con el propósito de que puedan ser agregados a la mescolanza y así evitar vacíos que modifiquen la mezcla de los ladrillos o bloques que reduzcan su resistencia. Los desechos de tala deben pasar por una criba o malla de alambre con separación de 0.4 cm² como se observa en la Figura 3.1 para obtener el tamaño apropiado.



Figura 3.1 Toma y cernido de los residuos o desechos de tala

3.4 Mezcla de agua – mucílago de nopal (a-mn)

El mucílago de nopal es una mezcla líquida que se usa como un estabilizador, permite mejorar las características físicas del suelo, ya sea aumentando la resistencia a la compresión, a la tracción o bien reduciendo fisuras provocadas por la retracción de la arcilla que contiene el suelo; el mucílago se agrega debido a los resultados que han demostrado en el mejoramiento físico en las pastas de cemento,

morteros y mezclas empleadas en la construcción; mejora las propiedades mecánicas del ladrillo, mejora la trabajabilidad y la fluidez de las mezclas (López, 2018).

El mucílago es una sustancia parecida al engrudo, los componentes son en mayor parte agua, glucosa y arabinosa, en concentraciones pequeñas tienen azúcares como galactosa; en contacto con el agua forman una sustancia viscosa. La concentración del mucílago en plantas suculentas como el nopal, varía desde 1.1 a 4.5% (Martínez, 2017; Rojas *et al*, 2019). También se le ha empleado para lubricar los moldes que se emplean para fabricar los ladrillos.

La forma para preparar la mezcla líquida agua -mucílago es la siguiente:

Se cortan los nopales en cuadros de más o menos 1.5 cm² como se muestra en la Figura 3.2, se pesan y colocan en una cazuela adecuada para la muestra necesaria.



Figura 3.2 Preparación de nopales para la extracción de mucílago

A continuación, se le adicionará la cantidad de nopal vs. agua 1:3 (kg nopales: litros de agua), correspondiente a la cantidad de nopales requerida como se observa en la Figura 3.3.



Figura 3.3 Reposo de nopales en agua

La cantidad de agua-mucílago de nopal requerida por cada ladrillo es de 600 a 700 mL, este parámetro suministrará la cantidad de nopales necesarios para la elaboración. La mezcla se deja durante un periodo de tres días con la finalidad de que el mucílago sea soltado de los trozos de nopal. En la Figura 3.3 se muestra el mucílago sumergido en agua por 24 horas. Para mayores detalles de su aplicación se recomienda consultar a Aquino (2015), López (2018) y Rojas *et al* (2019).

Después, del periodo de reposo, se extrae el material fluidizante y con un colador se retiran los trozos de nopal de la parte líquida (ver Figura 3.4). De esa forma, ya está listo para usarse en la fabricación de ladrillos AR.



Figura 3.4 Obtención del mucílago de nopal en la mezcla líquida

Para obtener la máxima cantidad del líquido, se comprime la parte sólida con la ayuda de una tela tipo malla de abertura 0.354, como se puede observar en la Figura 3.5.



Figura 3.5 Extracción recomendable de mucílago

A mayor escala se puede pasar por una malla de las dimensiones que se usan para tamizar la tierra o arena del tamaño que mejor convenga.

Al agregar el mucílago de nopal a la mezcla, ya no es necesario usar agua, se puede usar para la fabricación de ladrillos y bloques o como protección del producto terminado (Roux, 2018; Aquino, 2015; López, 2018).

Otros estabilizantes no convencionales, con los cuales se han hecho pruebas, son la caseína, suero de leche, orina, estiércol, aceite de linaza, gluten de trigo, además de la cal y el cemento, estos últimos tienen un uso convencional (Roux, 2018).

4 México y el reciclaje de los residuos de la construcción y demolición

Las entidades federativas han identificado prestadores de servicios para la recolección y el transporte de los RCD, para llevarlos a los centros de acopio, transferencia y disposición final.

Sin embargo, el manejo de los RCD aún presenta fallas, ya que son pocas las entidades que tienen servicios básicos para facilitar un manejo adecuado de los RCD que se generan en cada jurisdicción (Aguilar, 2017).

Desde agosto de 2013, los arquitectos del país deben cumplir con un plan de manejo de RCD, como lo marca la normativa [NOM-161-SEMARNAT-2011](#), donde se dice que los RCD se clasifican como residuos de manejo especial, por lo que se requiere realizar acciones para su reutilización, reciclaje o disposición final (Ossa y García, 2015).

En el año 2004 inicia sus actividades la primera planta en América Latina dedicada a la recepción, reciclaje y venta de los residuos de la construcción, llamada Concretos Reciclados, ubicada en el cerro “Yehualique” de la sierra Santa Catarina en la Alcaldía Iztapalapa de la Ciudad de México. Dicha planta cuenta con una superficie de trabajo de 16 hectáreas y tiene una capacidad de operación de 2,000 t/día por equipo; por otro lado, cuenta con una capacidad total de almacenaje de 3,000,000 toneladas de residuos reciclados (Aquino, 2015).

La superficie del predio consta de 16 hectáreas, de las cuales 8 se dedican al reciclado y los 8 restantes al amortiguamiento del impacto ambiental que esta actividad genera. Concretos Reciclados cuenta con varias maquinarias de punta como son: a) **máquina trituradora** (trituradora de impacto I44R MC CLOSKEY) es computarizado y se maneja a control remoto. Este equipo combina la trituración con los sistemas de cribado y recirculación, permitiendo la producción de un producto final triturado y cribado con una sola máquina, con electroimán para la separación de los materiales ferrosos y con sistemas de aspersión para la estabilización de polvos; b) un **equipo de cribado** montado sobre orugas, computarizado y manejado a control remoto. Este equipo gracias a su doble cama vibratoria nos permite clasificar materiales con 4 curvas granulométricas diferentes; c) **cono de trituración** Equipo de trituración secundaria montado sobre chasis quinta rueda, para la producción de agregados

de gran calidad con la proporción deseada de finos; d) Impactadores computarizados y montados sobre orugas y manejados a control remoto, combinan la trituración con los sistemas de cribado y recirculación, permitiendo la producción de un producto final triturado y cribado con un solo equipo. Con estos equipos se tiene una gran versatilidad en la operación, ya que pueden ser desplazados de un almacén a otro, lo que economiza la operación sin requerir de instalaciones especiales (Información recopilada de una entrevista personalizada, 2023).

El procedimiento de acopio e ingreso de estos residuos en la planta de reciclaje se describen a continuación:

1. Recepción: el material que se requiere entregar no debe contener residuos peligrosos, ni madera, plásticos, textiles, vidrio, envases u otros materiales que pueden restar calidad a los productos reciclados o puedan dañar las maquinas trituradoras.
2. Depósitos: los RCD se depositan en 4 depósitos diferentes: 1) depósito de concreto simple y armado; 2) depósito de materiales mezclados, como pueden ser morteros, prefabricados de mortero o concreto, mamposterías (tabiques, blocks, ladrillos); 3) arcilla y producto de excavaciones; y 4) el último fresado de carpeta asfáltica.
3. Molimiento y clasificación: de acuerdo con la granulometría requerida, se realiza la trituración y a continuación la clasificación de los tipos de materiales. Las granulometrías proporcionadas se encuentran clasificadas como se muestra en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Granulometrías proporcionadas por "Concretos Reciclados"

Material de 3"
Material de 3" a finos
Material de 1 ½" a finos
Material 1"
Material 3/8"
Material de ¼" a finos o arena reciclada: a. Solo cementantes b. Todo en uno

Debido a la demanda de reducción de costos y a ciertas calidades de materiales, aún no es una práctica común el reciclaje de los RCD (Alonzo *et al*, 2006). En la legislación actual se exige como medida obligatoria que se recicle por lo menos el 30% de los residuos catalogados como reciclables, con incremento anual de 15% a 100%. Se sugiere que se valoren los residuos sólidos y se sustituya al menos 25% de la materia prima virgen por materiales reciclados de las diferentes formas que se describieron en el capítulo 3 (Rojas y Macías, 2013).

En la Figura 4.1 se muestran algunos ejemplos de sitios en donde se aprovechan los RCD: a) la antigua refinería 18 de marzo se demolió y los RCD se usaron *in situ* para la reconstrucción; b) en el distribuidor vial calle 7 y Av. Chimalhuacán se hicieron bases hidráulicas y subbases. En la

figura c y d se muestran dos ejemplos del uso de residuos de pavimentos de asfalto y agregados pétreos para hacer mezclas asfálticas, tanto en caliente como en frío, utilizadas en la construcción de carpetas asfálticas de vialidades urbanas.



a) Antigua refinería 18 de marzo



b) Distribuidor vial calle 7 y Av. Chimalhuacán



c) Se pueden elaborar mezclas asfálticas en caliente empleando hasta un 15% de pavimentos de asfaltos



d) Complemento de los agregados pétreos en la elaboración de mezclas asfálticas

Figura 4.1 Aprovechamiento de RCD en diferentes proyectos (elaboración propia)

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

5 Pruebas de laboratorio de mecánica de suelos (geotecnia) de agregados reciclados

5.1 Pruebas de granulometría de agregados reciclados

La prueba de granulometría de un agregado es un procedimiento manual o mecánico mediante el cual se distanciarán las partículas que conforman el agregado según sus dimensiones, de tal forma que se puedan conocer las cantidades en peso de cada partícula por tamaño que es parte del peso total. Para este experimento se utilizan las mallas de diferentes aberturas, que proporcionan el tamaño máximo de agregado en cada una de ellas. Los pesos de cada tamaño se indican como proporciones retenidas en cada malla con respecto al total de la muestra. Estos porcentajes retenidos se calculan tanto individuales como acumulados, en cada malla, con estos últimos se procede a trazar la curva granulométrica (Mamani, 2015).

El análisis granulométrico tiene por meta la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo.

La norma ASTM D422-63 (2007) *Standard test method for particle-size analysis of soils* detalla el procedimiento para establecer los porcentajes de material, primero por tamaño y luego en peso, que pasan por los distintos tamices de la serie en el ensayo hasta el de 75 μm (No.200).

Para hacer la prueba se requiere una báscula con una sensibilidad de 0.01 g para pesar material que pase el tamiz de 2 mm. Otra con sensibilidad 0.1% del peso de la muestra, para pesar los materiales retenidos en el tamiz No.10. También se va a necesitar una serie de mallas con diferentes aberturas: 75 mm (3"), 50 mm (2"), 37.5 mm (1-1/2"), 25 mm (1"), 19.0 mm (3/4"), 9.5 mm (3/8"), 4.75 mm (No.4), 2.00 mm (No.10), 850 μm (No.20), 425 μm (No.40), 250 μm (No.60), 106 μm (No.140) y 75 μm (No.200). Se va a requerir un horno, capaz de mantener temperaturas uniformes y constantes hasta de 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F), un desecador para el manejo y secado de las muestras, al terminar se requiere de una brocha para limpiar las mallas de diferentes tamices (Calderón y Murillo 2020; INV-E-123-07-OK-DOC, 2023).

Para procesar la muestra, en primer lugar, se requiere separar y clasificar por tamaños los granos que lo integran, puede ser por el procedimiento seco o por el lavado de fino. El segundo paso consiste en pasar las muestras a través de una cadena de mallas que definen el tamaño del grano. El tamaño de las partículas se alcanza aplicando la ley de Stokes, que se basa en la caída libre de una esfera en agua. La técnica del densímetro o hidrómetro permite aplicar con exactitud este principio. El análisis combinado utiliza mallas y el método del hidrómetro, a las porciones gruesas y finas de un mismo material (Calderón y Murillo, 2020 INV-E-123-07-OK-DOC, 2023). Si el material contiene más del 25% en peso de granos retenidos en la malla N° 200 se puede hacer un examen compuesto.

La muestra se prepara tomando como base la norma INV E-106, la cual esta compuesta por dos partes: una retenida sobre el tamiz #10 y otra que pasa. El peso del material secado al aire y para el ensayo basados en la misma normativa es suficiente para el análisis mecánico, como se especifica en la Tabla 5.1, el peso depende del tamaño máximo de las partículas (Carrero y Ventanas, 2008).

Tabla 5.1 Para la porción de muestra retenida en el tamiz de 2 mm (No.10)

Peso mínimo aproximado de la porción (g).	Diámetro de las partículas grandes mm (pulga)
500	9.5 (3/8")
1000	19.0 (3/4")
2000	25.0 (1")
3000	37.5 (1 1/2")
4000	50.0 (2")
5000	75.0 (3")

Fuente: adaptado de López, 2018.

El tamaño de la fracción que pasa criba (No.10) de 2 mm es de 115 g, para tierra arenosa, y de 65 g para tierra arcillosa y limosa. En la normativa INV E-106 se dan instrucciones para pesar la tierra, para el secado al sol y para la elección de la prueba, así como para la disgregación de la tierra sobre la criba de 2 mm mediante el tamizado en seco, y para el pesado de las partes lavadas y secadas que fueron retenidas (Carrero y Ventanas, 2008).

Se pueden probar los pesos y la pulverización de las partículas pesando la muestra por la criba de 2 mm y sumando el valor al peso de la muestra lavada y secada en el horno.

5.1.2 Prueba estandarizada por lavado para material fino que pasa la malla # 200 en agregado mineral

La metodología es la siguiente: a) secar una muestra de arena a $110 \pm 5^\circ\text{C}$; b) pesar la arena ya seca (con precisión del 0.1%); c) colocar la muestra en un recipiente y agregar agua hasta cubrirla, agitarla para separar partículas más finas de las gruesas y llevar el material fino en suspensión; d) colocar el tamiz # 16 sobre la malla # 200 y vaciar el agua de lavado conteniendo los sólidos suspendidos y disueltos sobre los

tamices montados, se deberá tener cuidado de decantar las partículas gruesas; e) poner otra vez agua a la muestra, agitar y decantar; f) es recomendable poner agua varias veces hasta que el agua de lavado se vea limpia; y g) por último, secar el agregado lavado a masa constante a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ (Simeón, 2014).

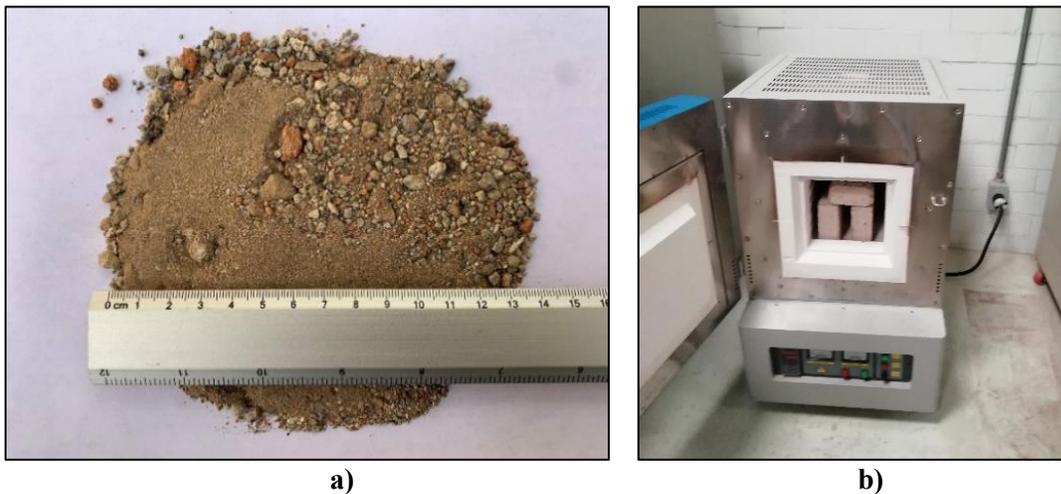
5.1.3 Procedimiento de ensayo estándar para análisis por malla de agregado reciclado grueso y fino

El procedimiento o metodología se detalla a continuación:

- a) colocar 250 gramos de arena a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ en el horno (ver Figura 5.1);
- b) pasar por varios tamices (ver ejemplo Figura 5.2);
- c) la muestra se pone en una criba #4, se tapa y se agita de 3 a 5 minutos;
- d) se sobreponen las cribas que quedan de $< a >$ diámetro de abertura;
- e) se debe vaciar la muestra que pasó la malla N°4 en la criba superior;
- f) todo el juego de cribas o mallas se colocan en el vibrador mecánico por 15 minutos;
- g) las muestras que quedan en la criba se ponen en un frasco (Simeón, 2014; Villamar, 2022).

Al finalizar se anotan los resultados en la bitácora y se calcula en porcentaje de error de la prueba y no debe ser mayor a 2%. En la Figura 5.2 se puede ver el proceso de tamizado y pesado.

Ejemplos de la aplicación y resultados de esta prueba se pueden consultar en López (2018), Román y Dorador (2019), Rivas (2020) y Rojas–Valencia *et al* (2020).



a)
b)
Figura 5.1 Ejemplo de arena a) y secado en horno b)



a)



b)

Figura 5.2 Material tamizado a) y pesado b)

5.2 Pruebas de hidrómetro

La prueba de hidrómetro se basa en la ecuación de Stokes (1850), él desarrolló una ecuación que relaciona la velocidad de descenso de una partícula esférica en un fluido con respecto al tamaño de esta (Campos, 2005) ver la ecuación de Stokes (5.1)

$$V = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18 \cdot \eta} \cdot D^2 \quad (5.1)$$

Donde:

v = Velocidad de descenso de la partícula.

γ_s = Peso unitario de los sólidos del suelo.

γ_w = Peso unitario del agua.

η = Viscosidad dinámica del fluido.

D = Diámetro de la partícula con forma esférica.

La prueba se fundamenta en la precipitación de granos de tierra en agua, cuando la tierra se precipita en agua, las partículas se depositan en diferentes tiempos, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos. Se admite que todas las partículas de la tierra son esferas, la velocidad de precipitación de las partículas se expresa por la ley de Stokes, se recomienda tener en cuenta que: a) los suelos finos no son esferas; b) el suelo no tiene una composición homogénea; c) la temperatura no permanece constante; y d) las partículas finas del suelo forman terrones debido a la iteración eléctrica que ocurre entre ellas (Medina, 2007; Campos, 2014).

Se requiere el siguiente material y equipo:

- Densímetro
- Cronómetro
- Piseta
- Probeta graduada

En la Figura 5.3 se ilustran algunos elementos de la prueba.

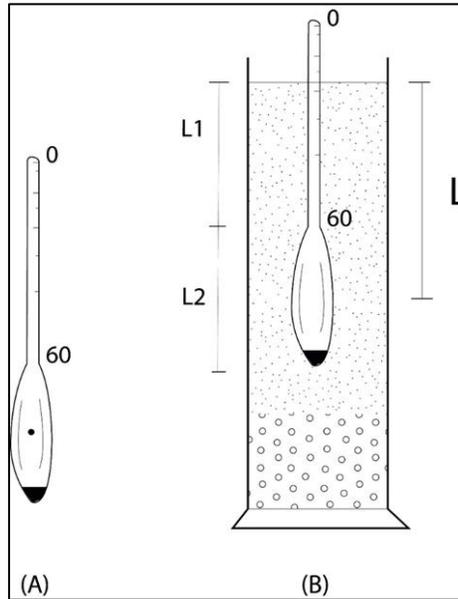


Figura 5.3 Pruebas de hidrómetro

El procedimiento se detalla a continuación:

- 1) El suelo debe hidratarse con agua destilada, y dejarse saturar por al menos 48 horas.
- 2) Una vez que el suelo se ha saturado, se coloca en la probeta y se le agrega más agua destilada, hasta el aforo (1000mL), y se toma la temperatura.
- 3) La abertura de la probeta se cubre con una tapa original o si no la tuviera y como última instancia con la mano y se agita con fuerza por 60 segundos hasta que no quede nada de tierra sedimentada en el fondo (Núñez, 2023).
- 4) Se sumerge el densímetro con cuidado, procurando no generar turbulencia y se toma la medida a los 15, 30 y 60 segundos; al terminar se saca también con cuidado el densímetro.
- 5) Se repite la toma medida del densímetro a los 5, 10, 20, 30 minutos, 1, 2, 4, 8, 12 y 24 horas, hasta que quede en 1, en cada tiempo meter el densímetro para medir.

Ejemplos de la aplicación y resultados de esta prueba se pueden consultar en Beverwijk (1967), López (2018) Quintero (2019) y Rojas–Valencia *et al* (2020).

5.3 Pruebas de plasticidad para agregados reciclados

5.3.1 Límites de Atterberg

Las pruebas de límites de Atterberg establecen los contenidos de humedad en que los suelos de arcilla y limo de grano fino hacen la transición entre los estados sólido, semisólido, plástico y líquido. Las pruebas realizadas incluyen el límite líquido, límite plástico y contenido de humedad. Límite de líquido se define como el contenido mínimo de agua en las que el suelo cambia su estado de líquido a estado plástico. El límite del plástico se define como el contenido mínimo del agua en las cuales un suelo entra en estado semisólido al estado plástico.

Los límites de Atterberg son pruebas de laboratorio normalizados que ayudan a obtener los límites del nivel de humedad, dentro del cual la tierra se mantiene en estado plástico. Con ellos, es posible diferenciar la tierra en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Para tener estos límites se requiere manipular la muestra de suelo destruyendo su estructura original y por ello es necesaria una descripción de la tierra en sus condiciones naturales. Para realizar los límites de Atterberg se trabaja con el material > que la malla #40 (0.42 mm). Se trabaja con la parte más fina de la tierra (< malla #200) y se incluye la fracción de arena fina (Paima y Sangama, 2019).

Ejemplos de la aplicación y resultados de esta prueba se pueden consultar a Aishwarya y Priya (2023).

El equipo que se requiere es:

- Copa de Casagrande (ASTM D 4318-95).
- Acanalador (ASTM D 4318-95).
- Báscula de sensibilidad 0.1g.
- Espátula de acero, cápsulas de porcelana, placa de vidrio, horno regulable a 110°C y agua destilada.

Se emplea la parte del suelo o tierra que pasa por la malla # 40 (0.42mm). Se pone o quita agua según sea necesario y se remodela la muestra hasta lograr una pasta semilíquida homogénea y húmeda.

Para los limos y tierra arenosa con poco contenido de arcilla la prueba se efectúa rápido en seguida de agregar agua. Para los limos arcillosos será necesario conservar la pasta por 4 horas en un contenedor con tapa. Para las arcillas el tiempo es de 15 o más horas para asegurar una humedad uniforme.

Determinación del límite líquido. Método alternativo del cono penetrante o cono inglés

Para la obtención del límite líquido por la técnica del penetrómetro cónico estipulado en la Norma BS 1377:1990, se lleva a cabo “La técnica multipunto” con la elaboración para cada muestra de cuatro parejas de valores penetración-humedad (Cervera *et al* 2018).

El procedimiento es el siguiente:

- Colar una muestra de tierra para obtener la cantidad de 300g de material que pase por la criba #40. Para ello se separa la muestra en un triturador empleando una maza con extremo de goma. Se repiten el procedimiento de separado y tamizado las veces requeridas hasta estar seguro de que se separó todo el material más fino (Rabat, 2016).
- Amasar y mezclar la muestra que pasa por el tamiz # 40 utilizando agua destilada por 10 minutos sobre una superficie plana y limpia para obtener una humedad cercana al valor conveniente con una penetración de 15 mm. La mezcla se dejará en reposo durante 24 h en cámara húmeda.
- Juntar la muestra de suelo y disponer una porción de esta, dentro del envase metálico, teniendo cuidado de que no quede aire atrapado en el envase. En seguida se coloca el envase con la muestra abajo de la base del penetrómetro y se calibra con la placa metálica.
- Soltar el cono durante 5 s y se registra el resultado de penetración, repitiéndose la operación (véase Figura 5.4). Cuando la diferencia de resultados entre el primer y segundo ensayo sea menor de 0.5 mm se toma la media como la penetración del cono para el espécimen; en caso contrario se ensaya una tercera vez. Si el rango de variación de la penetración entre los tres resultados no sale de 1 mm se promedian, de forma que el valor resultante de la operación se adopte como la penetración del cono para la muestra. En caso contrario se inicia de nuevo la prueba.
- Se requiere un ajuste lineal a las cuatro parejas de valores penetración-humedad, siendo el límite líquido la humedad asociada a una penetración de 20mm (Blázquez, 2016).

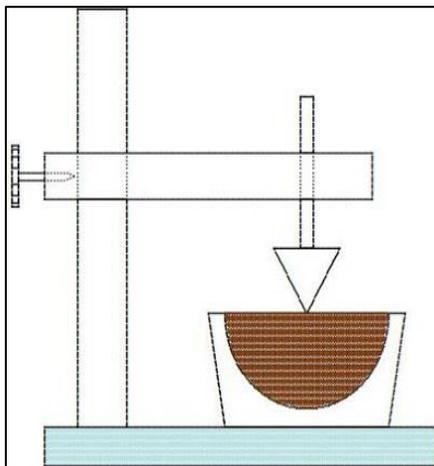


Figura 5.4 Esquema del funcionamiento del penetrómetro

Resultados de esta prueba se pueden consultar en el trabajo de López (2017) y Rivas (2020).

5.3.2 Límite plástico

Esta prueba se realiza en laboratorio basado en la normativa que consiste en determinar el porcentaje de humedad, el cual es posible moldeando un cilindro de muestra, con un diámetro de 3mm. Para ello, se realiza una mezcla semihúmeda de suelo y agua, la cual se rola entre la extremidad del dedo índice y una superficie inerte (vidrio), hasta lograr formar un cilindro de 3mm de diámetro. Al llegar a este diámetro, se desarma el cilindro y vuelve a amasarse hasta formar otra vez un cilindro de 3mm. Este procedimiento se realiza varias veces hasta que no es posible obtener el cilindro de la dimensión deseada. Con ese porcentaje de humedad, la tierra se vuelve quebradiza (por pérdida de humedad) o se vuelve pulverulento. Se mide la humedad, el cual corresponde al límite plástico (ver ejemplos en las Figuras 5.5 a la 5.7).



Figura 5.5 Moldeo de cilindros de material



Figura 5.6 Cilindros de material recién hechos



Figura 5.7 Cilindros de material clasificados y pesados

El procedimiento se repite por tres veces para reducir los errores de interpretación o medición (Flores *et al* 2015).

El objetivo de esta prueba es estudiar las características de plasticidad de los suelos, como son afectados por las variaciones en el contenido de humedad del suelo.

Se requiere de una balanza de laboratorio y muestra obtenida en la práctica de granulometría. Se necesita un plato, espátula, horno, recipientes, ranuradora y una probeta graduada.

Ejemplos de la aplicación y resultados de esta prueba se pueden consultar a Dezso *et al* (2022) y Shuangge y Chunguo (2021).

5.4 Pruebas de absorción superficial

Para esta prueba se requiere de una balanza, regla, cronómetro, papel absorbente, recipiente con capacidad suficiente y barras de acero inoxidable.

Preparación de la muestra: Secar los especímenes en el horno a una temperatura entre $343\text{ K} \pm 5\text{ K}$ ($70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) durante un periodo de $24\text{ h} \pm 2\text{ h}$ a menos que se asegure la condición de masa constante en un tiempo menor, para lo cual se determina la masa pesando los especímenes hasta que, en dos pesadas sucesivas, la diferencia en masa no sea mayor de 0,2 % de masa de las piezas.

Para la prueba:

- Pesar cada pieza y registrar como M_s cada una de las masas.
- En los recipientes se colocan como soportes dos barras de metal inoxidable.
- Llenar el recipiente con agua del grifo entre 3 mm y 4 mm, revisar que este arriba del nivel superior de los apoyos de metal inoxidable. Inspeccionar que quede ajustando la colocación de los soportes y de la altura de agua requerido con una pieza de referencia en estado saturado (Castro *et al* 2009).

- Poner el espécimen en contacto con el agua, sumergiendo un perfil de acabado liso por un tiempo de $10 \text{ min} \pm 20 \text{ s}$, tomar el tiempo de contacto desde el momento que el espécimen se pone en contacto con la superficie del agua (IMCYC, 2014).
- Pasado el tiempo de contacto, se debe retirar el ladrillo AR quitando o eliminando el exceso de agua de las superficies que estuvo en contacto con un trapo húmedo, no utilizando más de 15 segundos en este punto. Pesarlo de nuevo el ladrillo registrándolo como masa húmeda M1 en gramos. La operación de secado y pesado no debe dilatar más de 2 min (Castro *et al* 2009).
- La prueba se ilustra en la Figura 5.8.

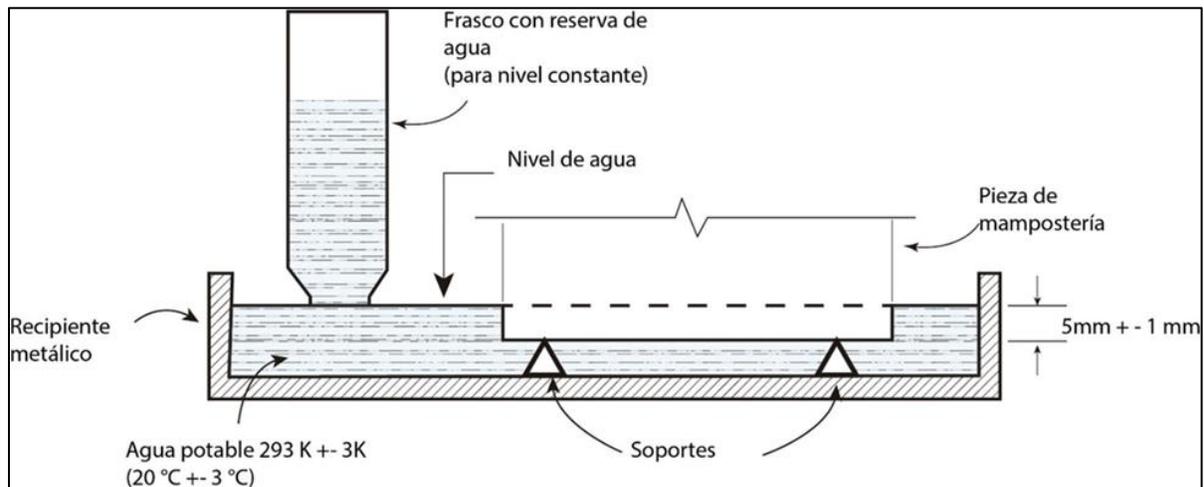


Figura 5.8 Prueba de absorción inicial.

Ejemplos de la aplicación y resultados de esta prueba se pueden consultar en Etsuo *et al* (2012), Quintero (2019), Rivas (2020) y Rodas (2022).

5.5 Pruebas de resistencia a la compresión para ladrillos AR

El objetivo es determinar la fuerza que soportan los bloques hasta la aparición de la primera grieta.

Antes de realizar la prueba de resistencia se debe asegurar que ambas caras (superior e inferior) se encuentren lisas, para que así todo el bloque, reciba la misma cantidad de carga, y que esta no se concentre en un solo punto, para esto se realiza el cabeceo de ambas caras, colocando 5mm de mezcla 4:4:1 cal: yeso: cemento, y alisándola lo mejor que se pueda, con ayuda del nivel y al finalizar se lija.

Una vez realizado el cabeceo se procede a realizar las pruebas de resistencia, en una prensa para ensayos de compresión (Figura 5.9) para dicho fin, colocando el ladrillo dentro y ejerciendo una presión constante y registrando la presión a la que se presentó la primera grieta en cualquiera de sus caras.



Figura 5.9 Prensa para ensayos de compresión

Ejemplos de la aplicación y resultados de esta prueba se pueden consultar en Aquino (2015), Aguilar (2017), Quintero (2019), Rivas (2020), Rodas (2019), Ponce *et al* (2022) y El-Mir *et al* (2023).

5.6 Prueba de intemperismo acelerado

Con el propósito de simular el comportamiento de los ladrillos AR ante las condiciones de intemperismo, los ladrillos AR se colocaron en una cámara de intemperismo o envejecimiento acelerado (Figura 5.10) basados en la norma ASTM D 4318-95. Cámara de envejecimiento acelerado. Marca: The Q Panel Co. Modelo QUV (Cleveland, EE. UU.). (López, 2018; Rojas-Valencia *et al*, 2020).

Donde un ciclo de 12 minutos simula un día de lluvia ácida y luz ultravioleta. Posterior a 840 ciclos y transcurridas 7 días, esas condiciones simulan un año a las condiciones comunes de la Ciudad de México.

Ejemplos de la aplicación y resultados de la prueba de intemperismo se pueden consultar en Quintero (2019), López (2018) y Rojas-Valencia *et al* (2022).



Figura 5.10 Cámara de intemperismo acelerado Marca: The Q-LAB Panel Co. Modelo QUV (Cleveland, EE. UU.)

Ejemplos de la aplicación y resultados de esta prueba se pueden consultar en Quintero (2019), López (2018) y Rojas-Valencia *et al* (2022).

5.7 Resistencia a la erosión

Se sabe que uno de los principales inconvenientes de los materiales de construcción a base de suelo es su fragilidad al agua debido a que cuando están en contacto con ella por períodos largos, estos materiales tienden a perder firmeza y duración (Galán-Marín *et. al.*, 2010; López, 2018). Por lo anterior, en varios estudios se acude a la prueba de erosión por chorro de agua para evaluar la estabilidad de bloques de suelo comprimido (Murmu y Patel, 2018; López, 2018).

En la norma neozelandesa NZS-4298-1998 se instituye la evaluación de resistencia a la erosión como una prueba anexa para los materiales de construcción a base de suelo. La prueba consiste en rociar a presión con agua una de las caras del bloque por una hora o hasta que el ladrillo muestra sea penetrado por el agua, lo anterior se puede observar en la Figura 5.11. Cada 15 minutos se interrumpe el ensayo para checar la profundidad de la erosión causada por el agua en el ladrillo o en el bloque (López, 2018).



Figura 5.11 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 con la profundidad de la perforación y el tiempo de esta hasta llegar a una hora. Se determina un índice de erosión de acuerdo con la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Índice de resistencia a la erosión

Parámetro	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
	$D > 120$	5 (Especimen fallado)

Ejemplos de la aplicación y resultados de esta prueba se pueden consultar en Quintero (2019), López (2018) y Rojas-Valencia *et al.* (2020).

5.8 Pruebas para caracterizar tierra arcillosa y agregados reciclados

Un componente muy importante para la fabricación de adobes es la tierra arcillosa, esta materia prima compone un alto porcentaje del adobe y no se le da ningún proceso. Se sabe que la tierra arcillosa se

endurece cuando se le moja y se le deja secar, este era el material principal de las casas de adobe, las cuales sirvieron de hogar para muchas generaciones tiempo atrás.

Este material también es idóneo como parte de las mezclas para los bloques AR ya que al término de su vida útil no se genera desperdicio debido a que es tierra. Pero para saber que la tierra empleada es la requerida, se le realizan pruebas de mecánica de suelos y químicas con el fin de conocer sus propiedades y tener datos cuantitativos de las características de esta.

El suelo no debe de tener materia orgánica ni sales solubles, la primera es para evitar que esta materia se descomponga propiciando el crecimiento de bacterias u hongos para que reduzca el esfuerzo mecánico requerido y además para que no genere olor desagradable. Con respecto a las sales solubles, al servir como elementos principales de paredes o bardas, en algún momento tendrían que estar expuestos a la lluvia y se busca que no tenga sales que se puedan diluir pudiendo formar sustancias nocivas o corrosivas para sus alrededores; a su vez, para que no afecte a su comportamiento estructural.

Con el fin de encontrar alguna norma que permita determinar la presencia de los elementos ya mencionados, se realizó una búsqueda exhaustiva en literatura nacional e internacional, dando como resultando dos normas españolas, Unión Europea (UNE) las cuales son:

- Norma UNE 103204-1993. Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico. Esta norma tiene por objeto especificar el método para determinar el contenido de materia orgánica oxidable de un suelo mediante una valoración química por retroceso con permanganato de potasio.
- Norma UNE 103205-2019. Determinación del contenido de sales solubles de un suelo. El objeto de esta norma es describir un procedimiento de ensayo que permita determinar el contenido de sales solubles de un suelo mediante el tratamiento con agua destilada y la correspondiente disolución.

Con base en estas normas se realizaron las pruebas descritas a continuación para caracterización del suelo a utilizar. Se puede ver más ejemplos de su aplicación en los trabajos de Aguilar (2017), López (2018) y Gutiérrez (2020).

5.8.1 Determinación del contenido de sales solubles en arcillas y agregados reciclados

El contenido de sales se cuantifica pesando el residuo por destilación de una cantidad proporcionada del extracto húmedo (UNE103 101, citado por Tomas *et al.* 2013).

Los materiales que se requieren son:

- Un frasco de vidrio de boca ancha y tapón hermético de 1L
- Dos capsulas de porcelana de 200mL

- Equipo de filtración con papel de poro fino
- Baño maría para la evaporación de los extractos acuosos contenidos en cápsulas
- Balanza analítica
- Estufa de secado
- Desecador
- Matraz aforado de 500mL
- Matraz aforado de 100mL
- Agitador mecánico por volteo
- Pipeta

Los reactivos que se necesitan son una disolución de ácido clorhídrico 1/20N, la cual se prepara con 4mL de ácido clorhídrico concentrado y se le añade agua destilada hasta que se complete 1000mL.

La muestra de suelo debe pasar por un tamiz de abertura de 2mm. De la muestra se toma 50g del suelo y procede a secarse en una estufa, en seguida esta muestra se introduce en el frasco de 1L junto con 500mL de agua destilada medidos en el matraz aforado correspondiente.

Se agita la muestra con un agitador por volteo durante una hora como mínimo, se deja reposar el frasco hasta que el líquido quede claro.

Se extraen del líquido unos 250mL mediante una pipeta o por sifonamiento y se filtra utilizando papel filtro de poro fino.

Nota: si el extracto acuoso no quedara transparente, ni aun después del filtrado, se trata de precipitar los coloides mediante una gota de ácido clorhídrico 1/20N añadida a la solución turbia. Se intenta filtrar de nuevo después de agitar con una varilla de vidrio y de que transcurran unos minutos. Se repite con una gota más de ácido, si lo filtrado no estuviera transparente, se realiza el mismo procedimiento tantas veces como fuera necesario hasta lograr la transparencia.

Con el matraz aforado se miden 100mL del líquido filtrado y se trasvasan en unas cápsulas de porcelana, se realiza el proceso de llenado para dos cápsulas. Se someten las cápsulas a baño maría y se deja evaporar toda el agua, tal como se muestra en la Figura 5.12. Se completa la desecación total del residuo en estufa a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, hasta masa constante (UNE103 101, citado por Tomas *et al.*, 2013).



Figura 5.12 Cápsulas a baño maría

Se dejan enfriar las cápsulas en el desecador cerrado y se pesan en una balanza analítica. Para evitar que las sales del residuo absorban humedad del aire, se debe proceder de forma que pase el menor tiempo posible desde que se saca la cápsula del desecador hasta obtener su masa. Lavar el interior de cada cápsula para eliminar el residuo soluble, se secan de nuevo en estufa a una temperatura igual a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y después de enfriar en el desecador se vuelve a pesar (Pardo de Santayana, 2023).

Si se encuentra yeso en las sales solubles puede que no se disuelva todo en la fracción o extensión de tierra. Si es yeso puro habría que solubilizarse 1g de tierra en 500mL de agua. Siempre que se obtengan valores por encima de 2g de residuos/L y se considere la existencia de yeso (mediante el reconocimiento con cloruro de bario y ácido clorhídrico, debe repetirse el ensayo con menor cantidad de la muestra) (Pardo de Santayana, 2023). Si se requiere ver ejemplo de resultados consultar a Gutiérrez (2020).

• **Cálculo y expresión de resultados**

Se obtendrán dos resultados provenientes de las dos cápsulas; el resultado será la media aritmética (Tomas *et al.*, 2013).

El cálculo se realiza por medio de la expresión mostrada en la ecuación (5.2)

$$\text{Sales en 100g de suelo} \qquad 100 \frac{V \times r}{v \times p} \qquad (5.2)$$

Donde:

V = es el volumen inicial expresado en mL del agua destilada en el frasco (500 mL).

v = es el volumen expresado en mL del extracto acuoso situado en la cápsula (100mL).

r = es la masa del residuo expresada en gramos.

p = es la masa inicial del suelo seco, en el interior del frasco, referida en gramos, por lo regular 50g.

La porción de sales solubles/L del extracto acuoso (Pardo de Santayana, 2023), se calcula con la ecuación (5.3).

$$\text{Sales solubles en 1000mL de extracto acuoso} = 1000 \frac{r}{v} \quad (5.3)$$

Si se opera en gramos y en mL el resultado vendrá expresado en gramos de residuo de sales solubles por litro de extracto acuoso (g/L).

Ejemplos de la aplicación y resultados de esta prueba se pueden consultar en Gutiérrez (2020).

5.8.2 Determinación del contenido de materia orgánica oxidable del suelo por el método del permanganato de potasio para materiales provenientes de RCD

Fundamento del método: en esta técnica se define la materia orgánica en porcentaje de la muestra como cociente entre los mL de disolución de permanganato 0.1N, multiplicados por el factor de normalidad y los gramos de muestra ensayados (UNE103 101 citado por Tomas, *et al.*, 2013).

El Material que se requiere es: balanza analítica, estufa de desecación, termómetro graduado entre 0 y 100°C, mortero, mazo de goma, tamiz de 2 mm y 160 µm, parrilla de calefacción, pinzas para tomar los matraces, vidrio de reloj, lana de vidrio para filtrar embudo, un desecador, 2 matraces Erlenmeyer de 500mL y uno de 2L, un matraz aforado de 1L, 2 vasos de precipitados de 150mL, dos pipetas graduadas de 10mL, una probeta graduada de 100mL, una probeta graduada de 250mL, dos frascos de vidrio con tapón, uno transparente y el otro opaco, 2L, 2 buretas de 50mL con soporte y elementos de sujeción y un cronómetro.

Los reactivos que se requieren son: ácido sulfúrico concentrado, ácido nítrico concentrado, ácido oxálico, oxalato sódico, permanganato de potasio.

Para preparar la solución de permanganato de potasio 1N, pesar en una balanza analítica $3.25 \pm 0.05\text{g}$ y disolver en 1L de agua hervida en un matraz aforado. Calentar la solución en la parrilla hasta hervir por 10 min. Retirarlo dejándolo enfriar, filtrar el contenido en un embudo, a través de un filtro de lana de vidrio, juntarlo en un matraz aforado de vidrio color topacio que cierre bien (ver ejemplo en la Figura 5.13).

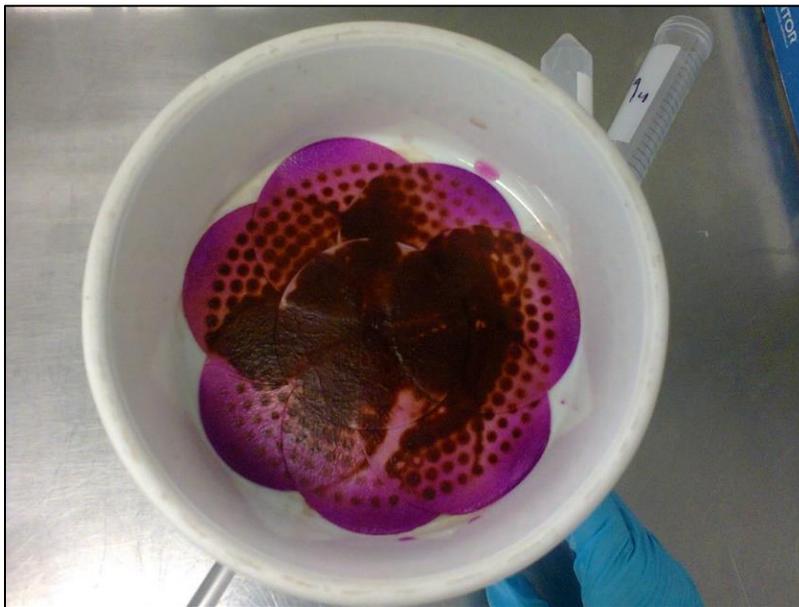


Figura 5.13 Solución filtrada

Para obtener el factor de normalidad de la disolución de permanganato de potasio con oxalato sódico, tomar 10g de oxalato sódico, secar en una mufla a 110°C por dos horas, a continuación, se enfría en un desecador con cloruro sódico. En un matraz se disuelve 0.275 ± 0.025g de oxalato seco en 200mL de solución de ácido sulfúrico en agua destilada, en la proporción de 1 a 4 se calienta a 70°C ± 0.5°C. Valorar con permanganato de potasio, hasta obtener un cambio de color permanente y anotar los mL empleados. Agitar la solución con ayuda de un magneto durante todo el proceso (ver ejemplo en la Figura 5.14). El proceso se efectúa por tres veces desde la disolución en matraz de 0.275 ± 0.025g de oxalato seco en 200mL de agua destilada y calcular la media de las sumas de permanganato de potasio empleadas en tres valoraciones (UNE103 101 citado por Tomas *et al.*, 2013).

Para calcular el factor de normalidad del permanganato de potasio se usa la ecuación (5.4)

$$f = \frac{1000}{6.7} \times \frac{\text{gramos de oxalato utilizados}}{\text{ml de permanganato empleados}} \quad (5.4)$$

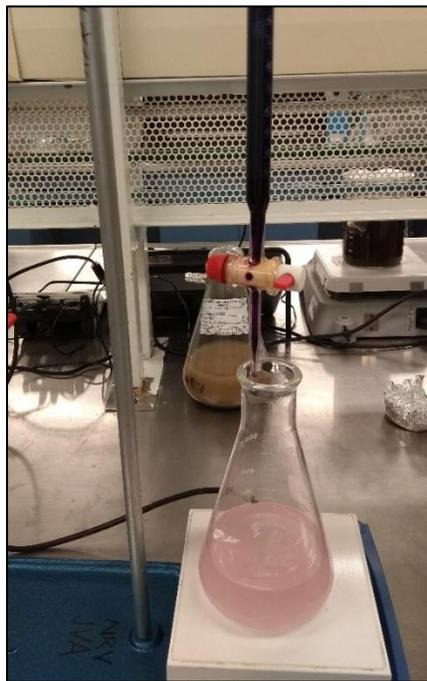


Figura 5.14 Valoración con permanganato de potasio para determinar su factor de normalidad

La solución de ácido oxálico 0.1 N se prepara pesando en una balanza analítica 6.3g de ácido oxálico puro y se disuelve en un matraz aforado de 1L se afora a la mitad de su capacidad. Se agrega 50 mL de ácido sulfúrico puro, agitando despacio para evitar proyecciones, dejar enfriar a temperatura

ambiente. Se llena con agua destilada hasta la afore y se agita. Por último, se almacena la solución en un frasco limpio, etiquetado y bien cerrado (UNE103 101 citado por Tomas *et al.*, 2013).

Para determinar el factor de normalidad de la solución de ácido oxálico 0.1N se dispone de 175mL de agua destilada en un matraz Erlenmeyer con capacidad de 500mL. Se adiciona 25 mL de la solución de ácido oxálico 0.1N con bureta ya preparada y otros 25mL de la solución de ácido sulfúrico al 9%. Se calienta el matraz a $70 \pm 0.5^\circ\text{C}$. El termómetro no debe tocar la pared ni el fondo del matraz (UNE103 101, citado por Tomas *et al.*, 2013; Gutiérrez, 2020).

Valorar con la solución de permanganato 0.1 N cuyo factor de normalidad haya sido determinado en un periodo no mayor a 15 días, hasta coloración permanente rosáceo pálido.

El factor de normalidad de la solución de ácido oxálico 0.1 N se determinará como se muestra en la ecuación (5.5)

$$F = \frac{f \times ml \text{ de permanganato de potasio empleados}}{25} \quad (5.5)$$

Donde f es el factor de normalidad de la solución de permanganato 0.1N.

El original del método se recomienda consultar con detalle en (UNE103 101). Resultados de su aplicación se pueden consultar con de talle en el trabajo de Gutiérrez (2020).

El procedimiento es el siguiente:

- Pulverizar en un mortero $50 \pm 5\text{g}$ de la fracción de tierra que pase por el tamiz de 2mm. Luego pasar por el tamiz de $160\mu\text{m}$ y tomar $5 \pm 0.1\text{g}$ de ese material (UNE103 101 citado por Tomas *et al.*, 2013; Gutiérrez, 2020).
- Secar el material en estufa a 110°C durante un periodo no menor a 24 horas.
- Enfriar en un desecador con cloruro de calcio y obtener dos porciones de $0.25 \pm 0.05\text{ g}$ M_1 y M_2 , mediante determinación en báscula analítica.
- Colocar M_1 en un matraz Erlenmeyer de 500 mL y añadir 25mL de solución de ácido sulfúrico al 9%.
- Calentar en una parrilla de calentamiento hasta que hierva, tal como se muestra en la Figura 5.15.
- Mantener la solución hirviendo a los 4 minutos adicionar con una pipeta 1.5mL de ácido nítrico concentrado. Mantener hirviendo 1 o 2 minutos más.
- Retirar el matraz de la parrilla de calentamiento y adicionar 125mL de agua destilada recién hervida. Adicionar un volumen de solución de permanganato de potasio 0.1N igual al cociente entre 20 y el factor de normalidad de la solución de permanganato empleada. (UNE103 101 citado por Tomas *et al.*, 2013; Gutiérrez, 2020).
- Calentar hasta ebullición y mantener durante 5 minutos, si todo el permanganato quedara decolorado, añadir otra vez la misma cantidad repitiéndolo hasta que ya no se decolore.

- Suspender el calentamiento y adicionar con bureta el número de mL de solución de ácido oxálico 0.1N igual al cociente entre 20 y el factor de normalidad de la solución de ácido oxálico empleado. El líquido perderá el color del permanganato. Se deja enfriar el matraz hasta llegar a 70°C. Se valora el exceso de ácido oxálico con solución de permanganato de potasio 0.1 N hasta que ya no haya cambio de coloración. Los mL de la solución de permanganato de potasio 0.1N empleados en la valoración se reconocen como C_1 (UNE103 101 citado por Tomas *et al.*, 2013; Gutiérrez, 2020).



Figura 5.15 Calentando hasta la ebullición

Se repiten todas las operaciones con la otra porción M_2 , hasta obtener los mL de la solución de permanganato de potasio 0.1N empleados, ese será C_2 .

La materia orgánica, se expresa en % de cada porción ensayada, se consigue con la ecuación (5.6).

$$MO_i = \frac{0.1032 \times C_i \times f}{M_i} \quad (5.6)$$

Donde C_i = son los mililitros de la solución de permanganato de potasio dando los valores a i de 1 y 2.

f = es el factor de normalidad del permanganato de potasio calculado con anticipación.

M_i = son los gramos de las muestras ensayadas, dando a i los valores de 1 y 2.

El contenido de materia orgánica de las muestras totales de suelo ensayada, expresada en % es la media aritmética de las dos determinaciones anteriores (UNE103 101 citado por Tomas *et al.*, 2013; Gutiérrez, 2020).

1 *5.8.3 Determinación de la materia orgánica y mineral de un suelo RCD por*
2 *calcinación UPV*

3 *5.8.3.1 Expresión de la materia orgánica en suelo*

4 La cantidad de materia orgánica se dice como porcentaje con base en el peso de la tierra. Es
5 complejo en el laboratorio separar el material orgánico e inorgánico de una muestra suelo, por lo
6 que una estimación del contenido de materia orgánica se obtiene a través del análisis de un
7 elemento que es constituyente de todas las sustancias orgánicas en el suelo: el carbono (C)
8 (Molina, 2011).

9 Conociendo la cantidad de carbono (C₂) presente en una muestra de suelo, se puede estimar cual es
10 el porcentaje de materia orgánica (Gutiérrez, 2020).

11 *5.8.4 Determinación de la materia orgánica total en una muestra de agregados*
12 *reciclados*

13 La concentración de materia orgánica total del suelo es determinada por tres procedimientos: por
14 calcinación de la muestra de suelo; por oxidación de la muestra con dicromato de potasio; y por
15 oxidación con peróxido de hidrógeno (Molina, 2011; Gutiérrez, 2020).

16

17 **a) Oxidación por peróxido de hidrógeno (agua oxigenada)**

18 La metodología que se sigue es la siguiente:

19

- Se seca al horno una muestra de suelo tamizado a 2mm.
- En un matraz Erlenmeyer se introduce la muestra y se pesa.
- Se le añade poco a poco la solución de peróxido de hidrógeno al 6% hasta que no produzca efervescencia, para acelerar el proceso se recomienda calentar en baño maría a 60° C.
- Se seca la muestra en una mufla por segunda vez y se pesa a temperatura ambiente; la diferencia de peso es la concentración de materia orgánica, se expresa en porcentaje con respecto al peso inicial.

26

27 El peróxido de hidrógeno se debe de añadir poco a poco, ya que la reacción puede ser muy violenta y
28 puede causar quemaduras o pérdida de la muestra anulando la determinación.

29

30 **b) Incineración**

31 Esta técnica sirve para obtener la materia orgánica total que posee la tierra. Con esta técnica se obtienen
32 resultados más precisos de la concentración de materia orgánica (MO), ya que se volatizan todas las
33 formas de carbono orgánico (C₂) presentes (Molina, 2011; Gutiérrez, 2020).

34 El método es el siguiente:

- 35 • Se pesan de 6 a 7 g de tierra seca al aire y tamizada a 2 mm y se coloca en crisoles de porcelana.
- 36 • Se seca la muestra y el crisol en horno a 105°C de 24 a 48 horas, hasta obtener un peso
- 37 constante, se retira del horno y se deja enfriar en desecador, posterior a esto se pesa.
- 38 • Se incinera la muestra en una mufla a 650 o 700°C durante 3 o 4 horas.
- 39 • Se retira del horno y se deja enfriar en el desecador, enseguida se pesa.
- 40 • Por diferencia de peso entre las medidas antes y después de calcinar se calcula la cantidad de
- 41 materia orgánica que se perdió de la muestra por efecto de la incineración.

42

43 Se expresa la diferencia de peso en porcentaje con respecto al peso inicial de la muestra (seca a 105°C) y se
44 define como el porcentaje de materia orgánica en la muestra de suelo (Molina, 2011; Gutiérrez, 2020).

45 5.8.4.1 Técnica de Walkley y Black

46 La técnica estima el contenido de carbono orgánico total (COT) de una muestra de tierra. La técnica actúa
47 sobre las formas más activas del carbono orgánico (CO) que contiene la tierra y no genera una oxidación
48 completa, por lo que es necesario hacer ajustes de los resultados obtenidos en el laboratorio, cuando se
49 quieren expresar en términos de la concentración de materia orgánica. Se requiere el uso de un factor de
50 corrección igual a 1.724, considerando que la materia orgánica tiene 58% de CO (Apaza, 2019).

51 La metodología es la siguiente:

- 52 • Se pesa 2 g de tierra seca y se tamiza a 2 mm, si el color de suelo es muy oscuro se utiliza un
- 53 poco menos que si es más claro.
- 54 • En un Erlenmeyer de 250 mL se coloca la muestra y se adiciona 5mL de dicromato de potasio
- 55 1N y 10 mL de ácido sulfúrico concentrado, se agita y se deja enfriar; la reacción que es
- 56 violenta, se recomienda tener cuidado.
- 57 • Cuando se enfría, se diluye con 50mL de agua destilada y se le agregan 5 mL de ácido fosfórico
- 58 y tres gotas de difenilamina o 5 gotas de ortofenantrolina.
- 59 • Se prepara el blanco usando una mezcla de todos los reactivos, pero sin suelo.
- 60 • Se titulan la mezcla inicial y el blanco con una solución de sulfato ferroso 1N, hasta la
- 61 obtención de un color verde.
- 62 • El porcentaje de CO se calcula con la ecuación (5.7)

63

$$\%C = \frac{V \left(1 - \frac{M}{B}\right) * 0.003}{Pm} \quad (5.7)$$

64 Donde:

65 %C = porcentaje de carbono orgánico.

66 V = Volumen de dicromato de potasio empleado en la muestra y el blanco (5mL).

67 M = Volumen de sulfato ferroso gastado en la titulación de la muestra.

68 B = Volumen de sulfato ferroso gastado en la titulación del blanco.

69 P_m = Peso de la muestra de suelo.

70

- 71 • Se transforma el contenido de carbono orgánico a contenido de materia orgánica, en porcentaje
72 (%), como se muestra en la ecuación (5.8)

73

$$\%C * 1.724 = \%MO \quad (5.8)$$

74

75 Cuando el contenido de carbono orgánico (CO) dé valores superiores a 8% no debe considerarse en
76 estos casos, el contenido de la fracción de la materia orgánica (MO) se evalúa por el método de
77 calcinación a 400°C. Puede quedar remanente del MO del suelo sin oxidar, sobre todo en sus fracciones
78 más frescas y gruesas, lo que daría resultados imprecisos.

79 Se recomienda trabajar en una campana de extracción ya que la reacción de oxidación que se
80 produce es violenta y segrega gran cantidad de gases nocivos para la salud (Morocho, 2017)

6 Fabricación de ladrillos AR y bloques AR

Una vez realizadas las pruebas preliminares a la tierra y a los agregados reciclados para conocer su calidad para la fabricación de ladrillos se lleva a cabo el siguiente proceso:

6.1 Preparación del suelo para fabricar ladrillos AR y bloques AR

En primera instancia, es importante secar el material (tierra) exponiéndolo al sol durante 2 días (Figura 6.1) dependiendo de la cantidad de humedad que contenga. Si la zona donde se trabaja hay mucha humedad o lluvia se recomienda extenderlo en un almacén o nave techada, o si se cuenta con un secador industrial eléctrico se puede emplear, si no se cuenta con cualquiera de las alternativas planteadas, se tendrá que evaluar la cantidad de humedad que tiene el suelo y se tendrá que usar menos agua, para evitar tener una mezcla con exceso de agua y humedad y que no sirva para ser moldeada.



Figura 6.1 Secado de la tierra

En seguida se separará el material a fin de disminuir los tamaños de los grumos con la ayuda de un pisón de mano de por lo menos 8 kg de peso (Figura 6.2).



Figura 6.2 Apisonado de los residuos de excavación

A continuación, la tierra es tamizada (Figura 6.3) haciéndola pasar por un criba o tamiz de aberturas de 2 mm.



Figura 6.3 Cernido del material

Con esto se completa la preparación del primer material (residuo de excavación –tierra-) de la mezcla.

Para el tratamiento de la muestra en primer lugar, se hace un ensayo de mezclas entre la tierra virgen o los residuos de excavación y los AR con el fin de conservar los porcentajes óptimos de la mezcla para fabricar ladrillos AR, tal como se indica a continuación:

- Los materiales térreos maleables son un factor fundamental en el aumento de la resistencia a la compresión de los ladrillos-AR y bloques-AR.
- La dosificación de agregados reciclados para la fabricación de ladrillos-AR será comprendida por el nivel de plasticidad del suelo o de los residuos de excavación.

En el suelo, la cantidad y calidad de la arcilla puede variar mucho en sus características físicas, químicas y mineralógicas, incluso entre las capas de un mismo depósito arcilloso; tomando en cuenta que la arcilla constituye una de las materias primas para la fabricación del ladrillo y es la que más variación puede presentar, se recomienda usar entre 10 a 50% de material térreo en las mezclas, según se requiera y los resultados de la caracterización de los materiales (Santos *et al.*, 2009). La arcilla es muy diferente entre una localidad y otra. Las arcillas con mucha caolinita permiten obtener ladrillos con carácter refractario, color claro y una resistencia mecánica aceptable, sin embargo, altos contenidos de illita y montmorillonita dan alta plasticidad a los especímenes, lo que facilita el modelado de los ladrillos, pero una gran contracción de arcillas durante el secado puede llevar a la formación de grietas; en tales casos se debe agregar arena para disminuir la plasticidad de la pasta (Vieira *et al.*, 2009).

- A menor plasticidad del suelo la proporción de arenas proveniente de los agregados reciclados tendrá que ser menor.
- La porción de agua-mucílago de nopal varía de 23 al 26% del total de la mezcla fabricada, ya que si el suelo tiene cierta humedad va a requerir más o menos mucílago, eso queda determinada por las características de la mezcla y aunado a la cantidad de arcilla que tenga el suelo.

Para el ensayo de la muestra, se realizan las primeras combinaciones a partir de la clasificación de los agregados reciclados presentados en la Tabla 6.1, para cada uno de los materiales de excavación posibles a emplear, para adaptar la cantidad de agregados reciclados (de ¼” a finos, solo cementantes y de 3/8”) requeridos y aceptados por cada tipo de tierra susceptible de ser utilizado.

Tabla 6.1 Posibles combinaciones preliminares

Residuos de excavación (%)	Residuos de construcción solo cementantes (%)	Agregados reciclados todo en uno (%)	Agregados reciclados (%)	Total (%)
RE	RC s/c	RC t/u ¼”	3/8”	
50	50	-		100
60	40	-		100
70	30	-		100
80	20			100
50	25	-	25	100
60	20	-	20	100
70	15	-	15	100
80	10		10	100
50	-	50		100
60	-	40		100
70	-	30		100
80	-	20		100
50	-	25	25	100
60	-	20	20	100
70	-	15	15	100
80	-	10	10	100

Nota: Para mayor detalle de ejemplo de mezclas ver Aquino, 2015.

Las mezclas se diseñarán de forma recomendada con la mezcla líquida agua-mucílago; sin embargo, en caso de no tener mucílago, se podrá usar agua potable. Este procedimiento es un ejemplo, de lo que se puede hacer cuando no se tienen las condiciones óptimas y se requieren obtener de acuerdo con las características del material. El criterio de combinación de mezclas debe contener en mayor porcentaje a los residuos de excavación, ya que son quienes cumplen la función de material ligante dentro de la mezcla y garantizan la correcta adherencia de los agregados, se deberán probar combinaciones con porcentajes de 50% (1.5 Kg) a 80% (2.4 Kg) de este tipo de residuos.

Los porcentajes para la mezcla óptima quedan determinados por las características cualitativas de las mezclas formadas, esto se da cuando:

- La mezcla es homogénea e integra sin dificultad los materiales.
- No aparecen grietas y fisuras al apretar la mezcla con los puños.
- Se pueda moldear una bola en una mano y no se fracture.
- Permita el amasado y no se deshaga.
- Sea moldeable y capaz de ser acomodada en la máquina moldeadora.
- Las pastillas presenten dureza y tenacidad después del tiempo de secado.

Para mayores detalles de procedimiento y de resultados consultar a Aquino (2015), Aguilar (2017), López (2018), Quintero (2019), Rivas (2020) y Rodas (2022).

Se moldean bloques miniatura de 8 cm de largo x 4 cm de ancho x 1 a 2 cm de alto, ver ejemplo en la Figura 6.4, se dejan secar por 48 horas y posterior al secado se hace un ensayo de compresión a mano de cada pieza hasta que se rompe, con esto se observa el comportamiento de cada una de las mezclas, tal como se muestra en la figura 6.4 (López, 2018).



Figura 6.4 Bloques, combinaciones preliminares probadas. Fuente: Adaptado de (López, 2018).

Una vez obtenidos los porcentajes óptimos, se establecen las dosificaciones empleadas para la fabricación, otra propuesta establecida por López (2018) recomienda tomar como base la información de la Tabla 6.2.

Tabla 6.2 Porcentajes de diseño para la mezcla óptima

Materiales	Porcentaje
Residuos de excavación (tierra)	10%
Residuos de construcción 1/4" a finos	45%
Residuos de construcción 3/8"	15%
Residuos de tala	4 %
Mucilago-Agua	26% del peso de materiales secos.

Fuente: adaptado de López (2018).

Esta mezcla puede variar por la calidad del suelo, pero en promedio se ha encontrado esta relación a partir de suelos en Hidalgo (fueron probados tres diferentes suelos), Estado de México (se ensayaron cuatro suelos desemejantes), Puebla (se experimentaron cuatro muestras de tierra) y Ciudad de México (se trabajó con cuatro suelos).

La Tabla 6.2 muestra las proporciones en términos de porcentaje en peso, la cantidad de material seco para fabricar cada ladrillo AR es de 3,100 a 3,200 gramos. De acuerdo con este peso y la cantidad de ladrillos requeridos se calcula la cantidad de material necesario.

Las dimensiones de fabricación de cada ladrillo en estado fresco son las presentadas en la Tabla 6.3 y representadas en una gráfica en la Figura 6.5, esto se basa en la normativa NMX C-038-0NNCCE-2013.

Tabla 6.3 Dimensiones de fabricación de los ladrillos ecológicos.

Dimensiones de fabricación		
Grueso	5.5 cm	55 mm
Tizón	12 cm	120 mm
Soga	26 cm	260 mm

**Figura 6.5** Dimensiones de fabricación

Para mayores detalles de resultados consultar a Aquino (2015), Rojas (2016) y Aquino (2019).

6.2 Método constructivo

1. Para comenzar, se acondiciona el área de labor para hacer la combinación de ingredientes para la mezcla óptima, secados con anticipación, como se observa en la Figura 6.6.



Figura 6.6 Preparación de materiales ya pesados

2. A continuación, se van poniendo los residuos de excavación, ya cernidos (ver Figura 6.7), acomodando en círculo sobre el sitio en el que se realizará la mezcla.



Figura 6.7 Disposición de la tierra colada

3. Con la ayuda de una pala se forma un hueco en el centro de los materiales de excavación, en seguida se depositan los agregados reciclados y los residuos de tala (ver Figura 6.8) y en principio se mezclan en seco estos materiales.



Figura 6.8 Integración de los materiales

4. Teniendo los materiales dispuestos y mezclados en seco en un mismo espacio, se incorpora poco a poco la mezcla agua-mucílago, ya medidas como se observa en la Figura 6.9, el total del líquido que se añade corresponde como ya se indicó, a un volumen de entre 23%(0.69Kg) y 26% (0.78Kg) del peso seco de la mezcla.



Figura 6.9 Incorporación de la mezcla agua-mucílago

Una vez que se pone la mezcla agua–mucílago, se dejará reposar de 5 a 10 minutos antes de realizar el mezclado, con la finalidad de que se hidraten muy bien los materiales; la cantidad agregada esta dada por las características cualitativas de la mezcla obtenida.

5. A continuación, con el uso de la pala, se homogenizan los materiales (Figura 6.10), el fin es lograr una consistencia uniforme que no se pase de líquidos para que no se formen mezclas pastosas y que no quede solidificada o dura por la falta de hidratación con el fin de facilitar el moldeo de los ladrillos.



Figura 6.10 Homogenización de la mezcla

Para mayores detalles de resultados consultar a Aquino (2015), Rojas (2016), Aquino (2019) y Aguilar-Penagos *et al.* (2017).

Otra forma recomendable de fusionar es empleando una mezcladora eléctrica de mortero con capacidad para 100 l (3.5 ft³) y 690W, al emplear un equipo de este tipo se tiene una mezcla más homogénea y de mejor calidad, tal como se muestra en la Figura 6.11.



Figura 6.11 Mezcladora eléctrica de mortero con capacidad para 100 l (3.5 ft³) y 690W (0.92Hp) y 390 rpm

Una vez obtenida la consistencia adecuada, se humedece con la mezcla líquida de agua-mucílago el interior del molde de la máquina ladrillera en la cual será depositada la mezcla, con el fin de evitar la adherencia de la mezcla a las paredes del molde y la posible deformación del ladrillo al momento de la extracción. Así la mezcla será acomodada dentro del marco de la máquina moldeadora a una altura de 5.5 cm, presionando la mezcla de forma manual, de tal manera que se evite la formación de vacíos o espacios huecos al depositar la mezcla dentro del molde, como se observa en la Figura 6.12 (Rojas, 2021, patente aceptada en México).



Figura 6.12 Acomodo de la mezcla

6. Al tener la altura aproximada, se usará una espátula o cuchará de albañil para acomodar y texturizar la superficie (Figura 6.13).



Figura 6.13 Acomodo de la superficie

7. Después de colocar la mezcla se cierra la tapa de la máquina moldeadora, antes de cerrar, es conveniente humedecer la superficie de la tapa, ya sea con agua o mucílago de nopal o como última opción se podría barnizar con aceite quemado, con el fin de evitar la adherencia entre el molde y la superficie del ladrillo; al terminar se apachurra la mezcla ejerciendo presión con la aplicación de fuerza en la palanca delimitada por la resistencia propia de esta, equivalente al peso aproximado de una persona de peso promedio (Figura 6.14).



Figura 6.14 Proceso de compactación

8. Para terminar, se sacan los ladrillos con la aplicación de fuerza inversa mediante la palanca de la máquina moldeadora (Figuras 6.15 y 6.16).



Figura 6.15 Aplicación de fuerza en sentido contrario a la compactación



Figura 6.16 Extracción de la pieza

Con el fin de evitar la distorsión de los ladrillos al momento de su extracción, se recomienda colocar en la base del molde de la máquina ladrillera, como apoyo para deslizar el ladrillo, una tabla para cada ladrillo, que quede al menos 3 cm de borde por cada lado ancho, esta longitud permite sostener sin problemas los bordes, como se observa en las Figuras 6.17 y 6.18, así se podrá desplazar el ladrillo hacia una superficie rígida de tamaño equivalente (ver Figura 6.19) al sacarlo se lleva al lugar de secado.



Figura 6.17 Bordes laterales para sujetar y desplazar el ladrillo



Figura 6.18 Desplazamiento del ladrillo



Figura 6.19 Recepción en una superficie rígida

Una vez extraídos los ladrillos se determina el peso y las dimensiones de fabricación de cada pieza. Se dejan secar durante un periodo de tres días al aire libre. Es importante que no se muevan ni se manipulen los ladrillos en estado fresco, dejar tal y como han sido extraídos (ver Figura 6.20).

Pasadas 48 horas posteriores a la fabricación se pueden cambiar de posición (ver Figura 6.21) con la finalidad de garantizar la pérdida máxima de agua al aire libre.



Figura 6.20 Ladrillos frescos



Figura 6.21 Cambio de posición

Para fabricar ladrillos y bloques a escala industrial se recomienda una máquina moldeadora que no requiere energía eléctrica y sigue manteniendo la característica de un bloque AR o de agregados reciclados como la adobera manual TA-100H, como la que se muestra en la Figura 6.22.

En este caso el bloque mide 30 cm de largo \times 15 cm de ancho \times 10 cm de alto. Con esta máquina se puede lograr una productividad promedio de 550 bloques por día, según el fabricante.



Figura 6.22 Bloquera industrial

9. Después de dos días se puede ver la pérdida máxima de agua de los bloques AR al aire libre, estos pueden ser introducidos a un desecador solar, se recomienda que se mantenga en posiciones adecuadas en el transcurso del día para la eficiente captación de los rayos solares.

El desecador solar, en este caso fue construido con material reciclado, elementos como chapa, espejo y soporte. Para lograr una mejor captación de la luz solar, se puede utilizar espejos móviles, como se puede observar en la Figura 6.23. Ejemplo de su aplicación se puede ver en Aguilar *et al.*, (2019) y Karuppasamy (2019).

El periodo de secado se estima de acuerdo con las condiciones diarias de la presencia de rayos solares, la inspección y evaluación visual de las piezas; a partir del pesaje diario de las piezas cuando la variación sea mínima durante 3 días consecutivos se dará por terminado el proceso de fabricación de los ladrillos y se obtendrán las piezas finales útiles para la construcción (Aguilar *et al.*, 2017; Rodas, 2022).

Las pruebas que se le deben de hacer a los ladrillos AR y bloques AR para comprobar que cumplen con la normativa vigente son las mismas que se describen de las páginas 59 a la 77.



Figura 6.23 Secador solar

6.3 Resistencia a la compresión diagonal y módulo de cortante

El comportamiento de la mampostería, integrada con segmentos prismáticas (en este caso cada pieza o segmento equivale a un ladrillo o bloque AR) unidas con un mortero adhesivo y en un acomodo cambia la calidad de los materiales ensayados de manera independiente. Es por ello se ha estudiado la resistencia a la compresión con el ensayo de pilas de piezas sobrepuestas, así como la prueba de muretes a presión diagonal (SMIE, 2022).

La presión diagonal de la resistencia obtenida da como resultado la firmeza o resistencia a tensión diagonal asociada a la falla de cortante (NMX-C-464-ONNCCE-2010).

Por diversas décadas los estatutos de diseño han usado términos experimentales con pruebas de muros a escala natural y pruebas en muretes y pilas. Siempre se tiene que usar la misma metodología para las pruebas de pilas y muretes para que sea válida la normativa (SMIE, 2022).

La norma NMX-C-464-ONNCCE-2010 instituye los procedimientos para determinar la resistencia a presión diagonal y módulo de cortante de muretes, asimismo la determinación de la resistencia a presión y del módulo de elasticidad de pilas de construcción de arcilla y concreto. Los resultados se utilizan en el método de diseño de estructuras de mampostería.

En el presente documento se muestran los resultados obtenidos de pruebas de compresión diagonal basados en la norma ya mencionada (SMIE, 2022).

En las Figuras 6.24 y 6.25 se muestra la preparación del murete y la pila.



Figura 6.24 Preparación del murete



Figura 6.25 Preparación de la pila

La elaboración de los muretes se realizó de acuerdo con la norma mexicana NMX-C-464-ONNCCE-2010 la cual especifica el ensaye de muretes y pilas declaratorias de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 24 de junio de 2011 (SMIE, 2022).

Se usó una pila conformada por 12 unidades (ladrillos) cuyas dimensiones geométricas fueron: 12 cm de canto x 11.5 cm de testa x 5.7 cm de grueso. La técnica de elaboración se basó en sobreponer las piezas (ladrillos) utilizando el obstáculo generado por las protuberancias y cavidades que poseen, el ajuste entre las piezas o ladrillos se realizó ubicando los modelos de fabricación en la parte de arriba y de abajo del murete y utilizando confinamiento vertical (Chanchí, 2008).

6.4 Proceso de elaboración de muretes para ensayo de tensión diagonal

La elaboración de los muretes se realizó de acuerdo con la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010, en donde se indica que el murete debe ser cuadrado y constituido por tres o más hiladas de piezas cuya junta vertical no sea continua. Se propuso el uso de un sistema de refuerzo vertical debido a que entre las unidades de mampostería no hay un material que certifique la estabilidad del murete en la posición de ensayo, el refuerzo se hizo con dos moldes de aluminio similares a los usados en el proceso de fabricación, uno en la parte superior y otro en la inferior del murete (Chanchí, 2008).

En las Figuras 6.26 a la 6.28 se muestran los equipos utilizados para las pruebas de resistencia de ladrillos, bloques, muretes y pilas. Otros resultados de este tipo de pruebas se pueden consultar en los trabajos desarrollados por Rachit (2017), El-Mir *et al.* (2023), Ali-Benyahia *et al.* (2023) y Khoudja (2023).



Figura 6.26 Máquina Universal. Capacidad de 200 Ton: Máquina Universal SATEC (SATEC, 1990). Modelo 500WHVL. Capacidad de 250 t (500,000 lbs). Peso estimado 11 t (22,000 lbs). Requerimientos de energía: 230 Volts, 3 fases, 60 Hertz



Figura 6.27 Certus HD: Realiza el seguimiento dinámico del movimiento con ayuda de los Led's infrarrojo, para así dar la posición. Frecuencia máxima de muestreo (frecuencia del marcador) 4,600



Figura 6.28 Transductores de desplazamiento: Dispositivos de medición. Capacidad 25mm. Peso 100 g. Respuesta de frecuencia 8Hz. Voltaje excitante recomendado 2V o menos

6.5 Resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante de murete

En la Figura 6.29 se observa el murete, el cabeceo realizado con pasta de yeso y la colocación de ángulos metálicos, para la correcta distribución de la carga de compresión en las esquinas.

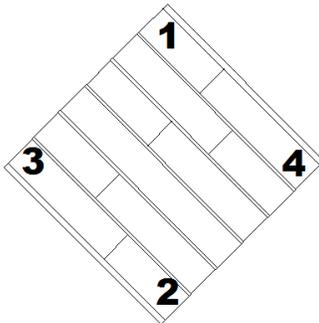


Figura 6.29 Murete listo para las pruebas

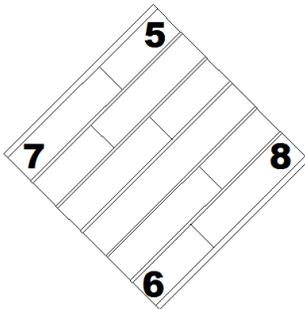
En la Tabla 6.4 se muestran ejemplos de los datos del murete y en la Tabla 6.5 y 6.6 se muestran las distancias iniciales (entre led's) del murete lado A y lado B.

Tabla 6.4 Ejemplo de datos de un murete

Dimensiones	Diagonal 1: 50.5 cm
	Diagonal 2 :51 cm
	Espesor: 11.5 cm
Peso:	21.145 kg
Velocidad aplicada:	500 kg / min

Tabla 6.5 Distancia lado A

Lado A	Distancia inicial entre sensores (mm)
1-2	284.479
3-4	274.086

Tabla 6.6 Distancia lado B

Lado B	Distancia inicial entre sensores (mm)
5-6	285.366
7-8	274.791

En seguida se aplican 3 ciclos, en donde la carga aplicada fue de 0 a 250(kg/minuto), terminando los 3 ciclos se comienza la aplicación de la carga a una velocidad de 500(kg/minuto) hasta llegar a la falla. La carga máxima aplicada fue de 1.2071 toneladas. La falla presentada en las Figuras 6.30 y 6.31, se clasifica como una falla cortante-tensión diagonal en juntas, debido a que no fractura al ladrillo, solo sigue las juntas, se origina por una falla por adherencia bloque-mortero, su trayectoria es en forma escalonada aproximadamente al centro del murete. En este resultado influye el tipo de bloque, el tipo de mortero y la adherencia bloque-mortero. Las variables que afectan la adherencia bloque-mortero son: la cantidad de cemento y agua del mortero, el porcentaje de absorción de agua y la rugosidad de los bloques (Fernández *et al.*, 2009).

En las Figuras 6.30 y 6.31 se puede apreciar la falla del lado A y B.



Figura 6.30 Se observa la falla a 1207.1 (kg) (Lado A).



Figura 6.31 Se observa la falla a 1207.1 (kg) (Lado B).

Otros ejemplos de fallas en muretes sometidos a presión diagonal pueden ser: a) falla por tensión diagonal en bloques, se presenta una grieta diagonal que atraviesa los ladrillos, su recorrido es recto; y b) falla por deslizamiento, la falla se puede observar entre las piezas y el mortero, produciéndose el desprendimiento de una junta horizontal (Fernández *et al.*, 2009).

6.5.1 Resistencia a compresión diagonal del murete

Se determina la resistencia a compresión diagonal mediante la ecuación (6.1)

$$V_m = \frac{P}{tL_c} \quad (6.1)$$

Donde:

V_m = Es la resistencia a compresión diagonal del murete en MPA (Kg/cm²)

P = Es la carga máxima aplicada en N (kg)

t = Es el espesor del murete en mm (cm)

L_c = Es la longitud de la diagonal a compresión en mm (cm)

6.5.2 Módulo cortante del murete

El módulo de cortante en el espécimen se calcula con los datos obtenidos del ensayo. Dichos datos se obtienen de la máquina universal y del equipo Certus HD.

De la máquina universal se recaban los datos de la carga aplicada al espécimen y del equipo Certus HD de los datos de deformación.

Para obtener el módulo de cortante se aplica la ecuación (6.2).

$$G_m = \frac{t_2 - t_1}{\gamma_2 - 0,0005} \quad (6.2)$$

γ_2 (deformación angular producida por el esfuerzo τ_2) se calculó como se muestra en la ecuación (6.3)

$$\gamma = |\varepsilon_c| + |\varepsilon_t| \quad (6.3)$$

$$\varepsilon_c = \frac{\delta_c}{l_{o_c}} \quad y \quad \varepsilon_t = \frac{\delta_t}{l_{o_t}}$$

Donde

ε_c Es la deformación unitaria de la diagonal a compresión.

ε_t Es la deformación unitaria de la diagonal a tensión.

δ_c Es el acortamiento medido sobre longitud instrumentada de la diagonal a compresión en mm.

δ_t Es el alargamiento medido sobre longitud instrumentada marcada de la diagonal a tensión en mm.

l_{o_c} Es la longitud instrumentada en mm, medida antes del ensayo, de la diagonal a compresión medida entre los tornillos de sujeción de los apoyos de transductores.

l_{o_t} Es la longitud instrumentada en mm, medida antes del ensayo, de la diagonal a tensión medida entre los tornillos de sujeción de los apoyos de transductores.

A continuación, se saca el promedio de los módulos de cortante (Lado A y Lado B) para obtener un valor característico (ver ejemplo Tabla 6.7). Ejemplos de su aplicación se puede ver en Flores (2015).

Tabla 6.7 Cálculos promedios ε_c (Lado A y Lado B)

Lado A				
	Esfuerzo			Deformación
τ_1	0.2287		Υ_1	0.00005
τ_2	0.83140766		Υ_2	0.00039
γ_2	deformación angular producida por τ_2			
G_m	1760.41	kg/cm ²		

Lado B				
	Esfuerzo			Deformación
τ_1	0.2495		Υ_1	0.00006
τ_2	0.8314		Υ_2	0.00036
γ_2	deformación angular producida por τ_2			
G_m	1942.86264	kg/cm ²		

Después se obtiene el promedio de los módulos de cortante (Lado A y Lado B).

Un ejemplo de la gráfica esperada (Figura 6.32) se puede ver en la Norma Mexicana NMX-C-464-ONNCCE-2010.

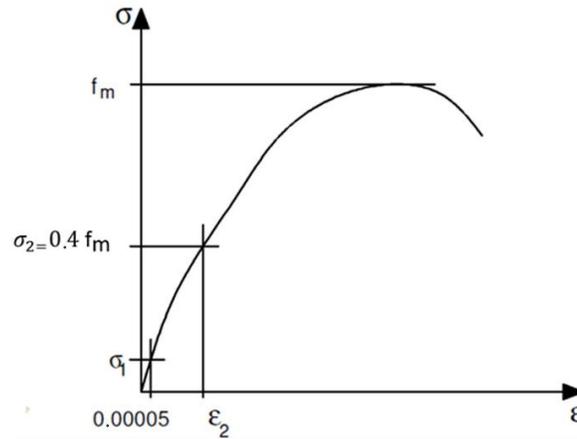


Figura 6.32 Gráfica esfuerzo vs deformación angular promedio

6.6 Resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pila

En la Figura 6.33 se muestra la preparación para las pruebas de resistencia a compresión y módulo de elasticidad de la pila.



Figura 6.33 Pila cabeceada para pruebas

Ejemplo de datos de una pila se puede ver en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8 Ejemplo de datos de una pila

Dimensiones
Longitud: 23cm
Altura: 39.4cm
Espesor: 11.35cm
Peso: 14.850 kg.
Velocidad aplicada: 2 t /min

Se obtuvo la longitud instrumentada de los tornillos de sujeción que se encuentran en cada uno de los lados (ver Figura 6.34, 6.35 y 6.36). Luego se aplicaron tres ciclos de carga (t), terminando los tres ciclos se aplica la carga con una velocidad de 2 t/min. hasta llegar a la falla.

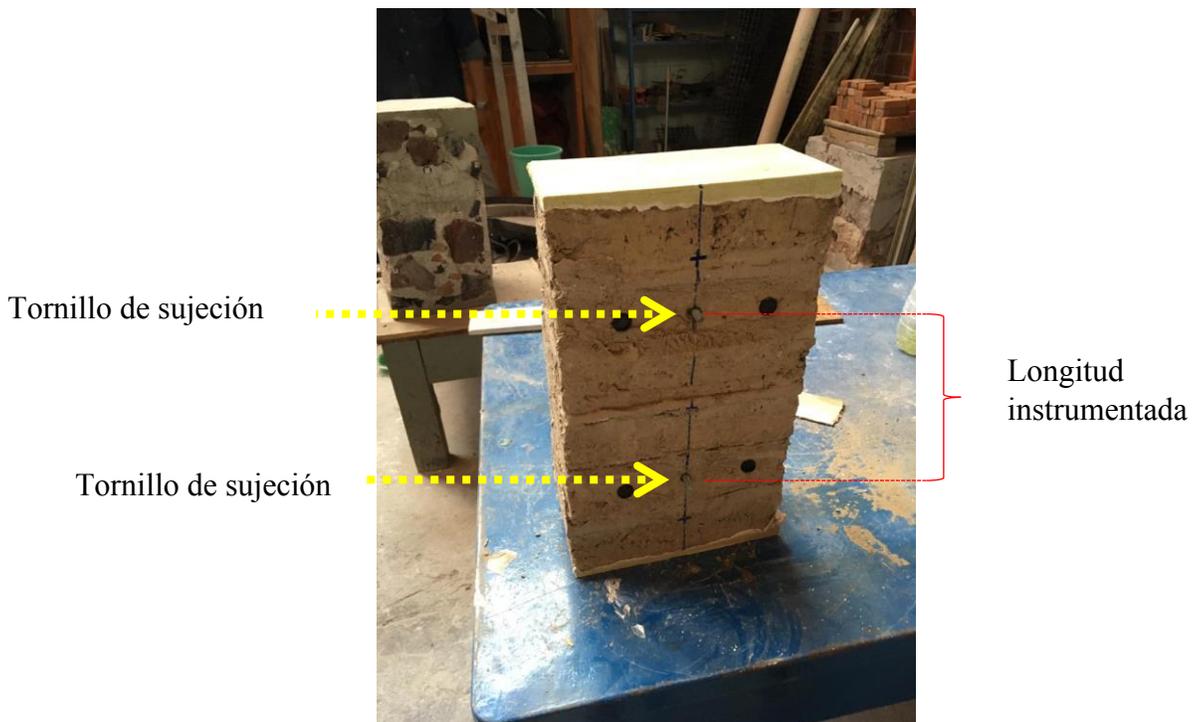
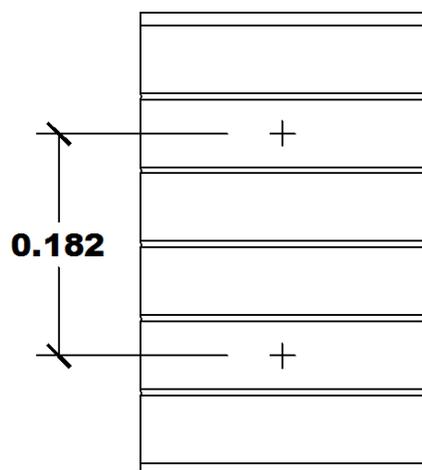
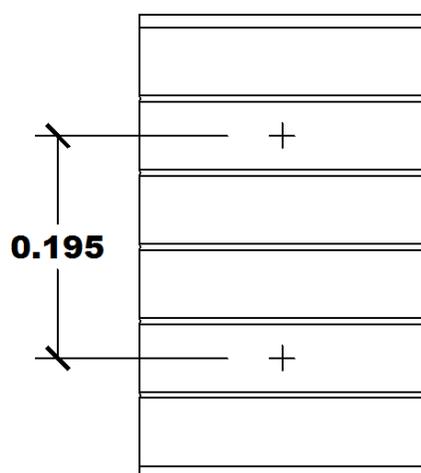


Figura 6.34 Longitud instrumentada lado A



Lado	Longitud instrumentada
A	0.182 mm

Figura 6.35 Diagrama de la longitud instrumentada, lado A



Lado	Longitud instrumentada
B	0.195 mm

Figura 6.36 Diagrama de la longitud instrumentada, lado B

En la prueba realizada a la pila, los transductores detectan los desplazamientos que se dan en el espécimen de acuerdo con la carga aplicada. En las figuras 6.37 y 6.38 se observa la falla que presentó una pila a una carga de 5.5 toneladas.



Figura 6.37 Pila observa falla (Lado A)



Figura 6.38 Pila observa falla (Lado B)

6.6.1 Resistencia a compresión de una pila

Se determina la resistencia a compresión en pilas como se muestra en ecuación (6.4)

$$f_m = \frac{P}{tb} \times \text{factor correctivo por esbeltez} \quad (6.4)$$

Donde:

f_m = Es la resistencia a compresión de la pila en MPa(Kg/cm²).

P = Es la carga máxima aplicada en N (Kg).

T = Es el espesor de la pila en mm(cm).

B = Es el ancho de la pila en mm (cm).

Se pueden incluir factores correctivos por esbeltez tal como se muestra en la Tabla 6.9 (Albarrán, 2019).

Tabla 6.9 Factores correctivos por esbeltez de las pilas

Relación de esbeltez de la pila	Factor correctivo
2	0.75
3	0.90
4	1.00
5	1.05
6	1.06A

Fuente: adaptado de Albarrán, 2019 y Balandro 2019.

Carga aplicada: $P = 5446 \text{ kg}$
 Espesor de la pila: $b = 23 \text{ cm}$
 Ancho de pila: $t = 11.35 \text{ cm}$
 $(FC) = 39.4 \text{ cm} / 11.35 \text{ cm} = 3.471$
 Factor correctivo: Altura/Longitud
 Factor correctivo entre la relación de esbeltez 3 y 4 = 0.947

Por lo tanto
 $f_m = 19.756(\text{kg}/\text{cm}^2)$

6.6.2 Módulo de elasticidad de una pila

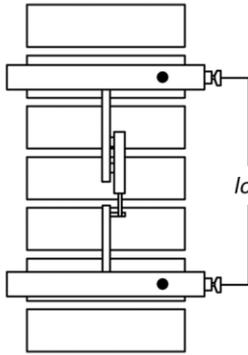
El módulo de elasticidad en el espécimen se calcula con los datos obtenidos en el ensayo. Dichos datos se obtienen de la máquina universal y del equipo Certus H, con ayuda de los transductores de desplazamiento.

De la máquina universal se recaban los datos de la carga aplicada al espécimen y de los transductores de desplazamiento los datos de deformación. A continuación, se explica el cálculo de módulo de elasticidad de una pila. Para comenzar a realizar los cálculos se requiere la información que se muestra en las figuras 6.39 y 6.40.



Longitud	23cm
Espesor	11.35cm
Altura	39.4cm

Figura 6.39 Preparación de una pila para análisis de módulo de elasticidad



Área	261.05(cm ²)
Long instrumentada frontal (lo)	(182mm)
Long instrumentada trasera(lo)	(195mm)

Figura 6.40 Datos para el cálculo de módulo de elasticidad en la pila

Para obtener el módulo de cortante se aplica la ecuación (6.5).

$$E_m = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \quad (6.5)$$

Donde

E_m = Es el módulo de elasticidad de la mampostería en MPa (Kg/ cm²).

σ_1 = Es el esfuerzo axial correspondiente a 0,000050 de deformación en MPa (Kg/ cm²).

σ_2 = Es el esfuerzo axial correspondiente a 40% de la carga máxima en MPa (Kg/ cm²).

ε_2 = Es la deformación unitaria producida por el esfuerzo σ_2 .

Los valores se obtienen de los datos arrojados en la máquina universal y los transductores de desplazamiento.

La deformación unitaria se obtiene con la ecuación (6.6)

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l o_t} \quad (6.6)$$

Donde

ε = Es la deformación unitaria.

δ = Es el acortamiento medido a lo largo de la longitud instrumentada en mm.

$l o$ = Es la longitud instrumentada, en mm, medida entre los tornillos de sujeción de los apoyos de transductores antes de la aplicación de la carga.

Se obtiene un promedio de las deformaciones unitarias, para después realizar el cálculo de módulo de elasticidad como se muestra en la ecuación (6.7).

$$E_m = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \quad (6.7)$$

Esfuerzo	Deformación
$\sigma_2 = 8.34476154(\text{Mpa})$	$\epsilon_2 = 0.0018(\%)$
$\sigma_1 = 0.3294388(\text{Mpa})$	0.00005(%)

Ejemplo de un resultado del cálculo de módulo de elasticidad (E_m) en una pila es:

$$E_m = 3428.68 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Se obtiene la gráfica correspondiente al esfuerzo- deformación que se mantiene el espécimen durante el ensayo un ejemplo se puede ver en la Norma Mexicana NMX-C-464-ONNCCE-2010 (ver Figura 6.32).

6.7 Ventajas técnicas y ambientales de los ladrillos y bloques AR

En este apartado se muestran las ventajas de los ladrillos AR y bloques AR; la primera ventaja es el empleo de arcilla la cual presenta una amplia disponibilidad, para formar parte de las mezclas para manufacturar ladrillos AR y bloques AR, por ser un material que por lo regular está disponible, para las edificaciones que se requieren todos los días. No toda la tierra es utilizable para un mismo sistema constructivo, sin embargo, es un material que se puede aprovechar.

La construcción con tierra cruda actúa como un buen aislante térmico. El resultado frente a fríos y calores extremos es bueno. El aislamiento térmico ayuda, a impedir desastres por incendios, el fuego no se propaga con rapidez. Presenta una moderación de compensación de humedad interior-exterior, proveyendo un interior saludable y favorable para el habitante.

Es un buen aislante acústico. Las viviendas construidas con arcilla, tierra cruda y agregados reciclados quedan más aisladas de los ruidos externos, resultando más tranquilas que otras construidas con materiales convencionales que están en el mercado. Por otro lado, su superficie desvanece el ruido provocado del interior de los domicilios, lo que evita las sacudidas y favorece un interior más quieto y confortable.

Basado en la normativa ya señalada, tienen un buen comportamiento a la resistencia y la compresión. Por otra parte, la construcción con tierra, arcilla y agregados reciclados lleva a una técnica constructiva correcta, que certifican las edificaciones seguras y duraderas.

Al emplear materia prima locales y más aún *in situ*, reduce las emisiones de CO₂ ya que no requiere ir a desmantelar cerros, ni transportar material de los bancos que por lo regular se encuentran en lugares muy lejanos de donde se requieren, disminuye la dependencia de materiales vírgenes que se tienen que transportar y los costos de pago de mano de obra.

Se promueve la construcción bioclimática, y el mantenimiento de prácticas de construcción habitual de carácter patrimonial, en la exploración de recursos para subsanar el déficit de vivienda social.

Promover el cuidado ambiental al usar materia prima que proviene de residuos de excavación y agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición hechos con reducida demanda energética.

En la Tabla 6.10, se muestra un resumen en donde se analizan ventajas y desventajas de los ladrillos fabricados con agregados reciclados provenientes de los RCD en comparación con los ladrillos convencionales que se venden en el mercado.

Tabla 6.10 Comparativa de las ventajas ambientales de los ladrillos AR vs. Convencional

Ladrillo AR	Ladrillo convencional
	
No se emiten gases de efecto invernadero al ser ladrillos que no requieren cocción.	Emisión de gases de efecto de invernadero GEI ya que se cosen en hornos mediante la quema de leña, llantas, aceites gastados u otros combustibles.
Al ser fabricados con agregados reciclados y residuos de excavación y tala, reducen la sobre extracción de bancos de material virgen.	Extracción de bancos de material virgen para la obtención de materiales que se requieren para su fabricación.
Disminuye el costo de compra y traslado de materia prima.	Costo de flete al comprarlo y necesitar llevarlo a donde se va a emplear.
Pueden variar los tamaños y diseños de acuerdo con los requerimientos.	Medidas convencionales que hay en el mercado.
Muy buen aislante térmico, lo cual disminuye las necesidades de energía.	Las construcciones requieren usar energía para condicionar la habitación.

La fabricación por unidad de ladrillo AR y bloque AR es de bajo costo, siempre y cuando se cuente con la cercanía y disponibilidad de los materiales de fabricación, lo más recomendable es aprovechar los residuos que salen en cada obra.

6.8 Usos de los ladrillos y bloques AR

Los ladrillos AR y bloques AR se pueden emplear para uso interior y no estructural, no requieren soportar el peso estructural. Son recomendables en exteriores siempre que se recubran de mortero de cal o con cualquier impermeabilizante comercial. También se pueden usar en bardas divisorias desligados de la estructura, pretilas, parapetos y en algunos casos los antepechos de ventanas (Aquino, 2015; Rojas – Valencia, 2016 y Aquino, 2019).

En cuanto a los muros no estructurales, estos deben ser capaces de resistir las acciones que influyan de forma directa sobre ellos como su propio peso o fuerzas externas como el viento (si están en el exterior, como se puede ver en la Figura 6. 41) u otros empujes perpendiculares a su plano, así como fuerzas de inercia de su propia masa oscilando ante el efecto de un sismo. En este sentido los ladrillos AR cumplen muy bien con las exigencias técnicas normativas para ser empleados para construcciones estructurales, se recomienda profundizar en la investigación y métodos de pruebas, para normalizar su uso en elementos estructurales (Rojas – Valencia, 2016; Aquino, 2019).



Figura 6.41 Construcción con ladrillos de tierra en Cuernavaca, Morelos

En la actualidad hay una variedad de edificaciones construidas con ladrillos de tierra cruda, no hay ninguna para ladrillos AR y bloques AR, aunque la carencia de regulaciones para este tipo de materiales ha limitado su uso, la experiencia y las regulaciones en otros países garantiza y promueve su uso, como se puede observar en las figuras 6.41 y 6.42.



Figura 6.42 Construcción de una casa con ladrillos de tierra cruda en Chalmita, Morelos

En la figura 6.43 se puede ver la construcción de una banca empleando bloques AR y en la figura 6.44 una jardinera que también se hizo con bloques AR, llevan a la intemperie más de 5 años, eso demuestra que se puede usar sin problemas para exteriores.



Figura 6.43 Construcción de una banca y guarnición con bloques-AR, IIUNAM.

Los bloques AR, del mismo tamaño (ver Figura 6.44), pero de diferentes modelos y terminados, se han empleado además de soporte para bancas, como guarniciones y han resistido a la intemperie y soportando humedad y actividades de jardinería sin presentar ningún daño, por más de 6 años.

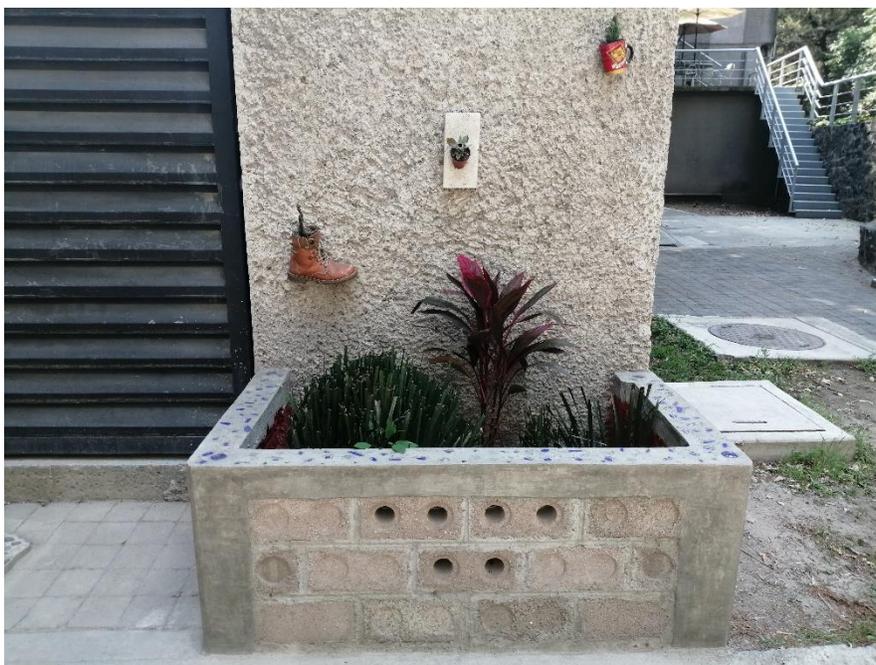


Figura 6.44 Construcción de una jardinera con bloques AR, IIUNAM.

Seco *et al.*, (2017 y 2018) también han fabricado ladrillos a partir de residuos de construcción y demolición y describe los ensayos de laboratorio que ellos probaron en sus investigaciones, las cuales coinciden con algunas que se han presentado en este libro si se consultan sus manuscritos podrán corroborar otros resultados.

1 **7. Conclusiones y recomendaciones**

2 Del estudio de toda la información que se presentó a lo largo de este amuscrito y la experiencia
3 adquirida después de varios años se puede concluir, con respecto a la función de cada uno de los
4 componentes de las mezclas, lo siguiente:

5

6 **Residuos de excavación (tierra)**

7 Cumplen la función de material ligante o aglomerante. El uso de residuos de excavación se
8 fundamenta en la disponibilidad desde que se prepara un terreno y se extrae la tierra y en seguida se
9 comienza a revolver con otros residuos de la construcción convirtiendo el suelo en residuo de
10 excavación, por otro lado, la ventaja de trabajarlo con facilidad y los antecedentes que se tienen del
11 empleo de tierra en la construcción. El uso de este material en la manufactura de ladrillos AR depende
12 de características como su composición, granulometría, plasticidad, dureza y cantidad de arcilla, por
13 lo que es necesario identificar dichas características antes de definir la dosificación adecuada
14 (Adaptado de López, 2018).

15

16 **Residuos de tala o maderables**

17 Debido a sus propiedades fibrosas de la madera, cumplen la función de material estabilizador durante
18 la solidificación de las mezclas. Se utilizan residuos de tala con tamaños menores a 2.5 cm, para
19 aprovechar al máximo sus propiedades, sin embargo, el porcentaje de su uso no debe pasar el 15 %.
20 Como recomendación, se pueden usar otros residuos similares como el aserrín, la celulosa proveniente
21 de la industria papelera o el gabazo de la industria azucarera, de todas estas modalidades los autores
22 ya han demostrado su utilidad.

23

24 **Mezcla de agua – mucílago de nopal**

25 Como ya se dijo, en México es bien conocida la utilización del mucílago de nopal con cal en paredes
26 de adobe y ladrillo AR y más aún en la restauración y conservación de edificios históricos y pirámides,

27 entre otras edificaciones importantes debido a las propiedades adhesivas e impermeables que brinda
28 dicha mezcla como método tradicional. En este documento se puede apreciar la experiencia del empleo
29 del mucílago de nopal como sustituto de agua, además, se vio que ayuda al mejoramiento físico en las
30 pastas de cemento, morteros y mezclas empleadas en la construcción, mejora las propiedades
31 mecánicas del ladrillo y bloque AR y aumenta la trabajabilidad y la fluidez de las mezclas.

32 Se reconoce que no es tan fácil para los fabricantes almacenar tambos de mucílago, ya que no
33 siempre esta al alcance, se recomienda en esos casos usar agua y se tendrán ladrillos de una calidad
34 similar a la contenida con el mucilago de nopal. Cabe señalar que cumple también con la normativa,
35 aunque con el mucilago lo supera.

36

37 **Residuos de construcción reciclados**

38 Los residuos de construcción está más que probado que son útiles para emplearlos en la fabricación de
39 ladrillos AR y bloques AR, esta conclusión se fundamenta en los resultados obtenidos en más de 6
40 tesis de investigación citadas a lo largo de este libro. Se han empleado los residuos de construcción
41 para la elaboración de los ladrillos y bloques AR solos y combinados con otros residuos industriales.
42 Estos materiales se obtienen a partir de un proceso de separación, trituración y clasificación de los
43 residuos de la construcción. Para el uso en la elaboración de bloques AR, se recomienda usar agregados
44 reciclados con granulometrías de $\frac{1}{4}$ o $\frac{3}{8}$, según las necesidades del fabricante.

45

8. Referencias

- Aguilar-Penagos, A., Gómez-Soberón, J. M., & Rojas-Valencia, M. N. (2017). Physicochemical, Mineralogical and Microscopic Evaluation of Sustainable Bricks Manufactured with Construction Wastes. *Applied Sciences*, 7(10), 1012. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/app7101012>.
- Aguilar-Penagos, A. (2017). Fabricación de bloques ecológicos a base de material producto de la construcción. (Tesis Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería Civil). UNAM– Construcción, México. Fecha de examen: 29 de noviembre de 2017.
- Aguilar Silva, S. Y. (2019). *Validación del método de calcinación en la determinación del contenido de la materia orgánica del suelo*. (Tesis para ingeniería). Universidad Nacional Agraria la Molina, Perú. Recuperado de: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/4154/aguilarsilvasumiry-yuleysi.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Aguirre, A., Cajamarca, M., Guamán, J., & Quichimbo, P. (2016). Evaluación del contenido de humedad del suelo por gravimetría y reflectometría. *Revista científica Ecuador es calidad*, 4. Recuperado de: <https://revistaecuadorestcalidad.agrocalidad.gob.ec/revistaecuadorestcalidad>.
- Aishwarya, R., & Priya, R. P. (2023). *Comparative study on Atterberg limits of soil and basalt fiber composite as an eco-friendly construction material*, *Materials Today: Proceedings*. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.212>.
- Akhtar, A., & Sarmah, A. K. (2018). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 186, 262–281. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>.
- Albarrán Franco, A. P. (2019). *Sistema de Bloque de Tierra Compactado frente a la normatividad mexicana*. (Tesis de Maestría). Universidad Jesuita de Guadalajara, México. Recuperado de: <https://rei.iteso.mx/bitstream/handle/11117/6135/Sistema%20de%20Bloque%20de%20Tierra%20Compactado%20frente%20a%20la%20normatividad%20mexicana.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Ali-Benyahia, K., Kenai, S., Ghrici, M., Zoubir-Mehdi, S., & Sidi-Mohammed, E. (2023). Analysis of the accuracy of *in-situ* concrete characteristic compressive strength assessment in real structures using destructive and non-destructive testing methods. *Construction and Building Materials*, 366. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130161>.

- Alonzo, S., Vinajera, R., & Rodríguez, R. (2006). Granulometría de dos tipos predominantes de suelo del estado de Yucatán. *Red de revistas científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.*, 10(3). Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46710307>.
- Apaza Hilasaca, W. Y., (2019). *Determinación de la eficiencia del sistema de riego por aspersión con tuberías móviles de aluminio en el cultivo de quinua en el sector Añazani centro poblado Cari Cari–Mañazo–Puno* (Tesis Para Optar por el título profesional de Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional del Altiplano, Perú. Repositorio Institucional.
- Aquino, B. E. (2015). *Reciclaje de residuos de la construcción para la fabricación de ladrillos sustentables* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Aquino, B. E., & Rojas V. M. N. (2015). Fabricación de ladrillos ecológicos. *Revista IC Ingeniería Civil, Organó Oficial del Colegio de Ingenieros Civiles de México*. Número 559/Año LXVI, 16-19.
- Apablazas, C. (2012). Estudio de bloques de tierra comprimida, BTC. (Tesis de Licenciatura). Universidad de la Frontera, Chile.
- ASTM C216 Standard Specification for Facing Brick (Solid Masonry Units Made from Clay or Shale) BS 1377. (1990). Soils for civil engineering purposes.
- ASTM D422-63. (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.
- ASTM D4318-95. (2000). Standard test methods for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- Balandrano Vázquez, R. (2019). Análisis multifactorial del comportamiento a compresión axial de pilas de mampostería elaboradas con bloques huecos de concreto. Recuperado de: <http://eprints.uanl.mx/17930/1/1080288689.pdf>.
- Beverwijk, A. (1967). Particle size analysis of soils by means of the hydrometer method, *Sedimentary Geology*, 1, 403-405. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003707386790070X>
- Cabo, M. (2011). *Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción* (Tesis Para Optar por el título profesional de Ingeniero Agrícola). Universidad Pública de Navarra, Navarra. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/2454/4504>.
- Campos Rodríguez, J., & Guardia Niño de Guzmán G. M. (2005). – Apoyo didáctico al aprendizaje de la asignatura mecánica de suelo. 442 páginas. Diploma académico de: Licenciatura en ingeniería civil. Bolivia.
- Calderón Paniagua D. G., & Murillo Arce, L. K. (2020). *Mecánica de Suelos Aplicado a la Cimentación y Vías de Transporte*. Recuperado de: vsip.info_mecanica-de-suelos-aplicado-a-la-cimentacion-y-vias-de-transporte-pdf-free.pdf.
- Carazas Aedo, W., & Rivero Olmos, A. (2002). Guía de construcción parasísmica. Recuperado de: <http://docplayer.es/5517991-Guia-de-const-ruccion-parasismica-wilfredo-carazas-aedo-alba-rivero-olmos-craterre-eag.html>.
- Carrero Rojas, D.M. & Ventanas Rueda J. (2008). Comparación del coeficiente de permeabilidad obtenido en el laboratorio con los calculados a partir de las fórmulas de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi, para arenas del Rio llana caliente y el Río Mirlas. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Castro Hernández, P. A., & Gaspar Vázquez, J. L. (2008). Manual de fabricación de tabicón sólido de concreto (Tesis de Licenciatura). Instituto Politécnico Nacional, México <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/5789/1/I2.1149.pdf>.
- Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. (2013). Plan de manejo de residuos de la construcción y la demolición. Recuperado de: <https://www.conicet.gov.ar/botellas-descartables-para-casas-sustentables/>.

- Ceballos-Medina, S., Gonzáles-Rincón, C., & Sánchez, J. D. (2021). Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición Generados en la Universidad del Valle Sede Meléndez para la Fabricación de Adoquines. *Revista Ion*, 34, 27–35.
- Cervera Castro, C. E., & Rosales Advíncula, M. Ch. (2018). Evaluación del Suelo del AA. HH Tierra Prometida–Propuesta de Cimentación Según Parámetros Urbanísticos Nuevo Chimbote–Ancash Universidad César Vallejo, Repositorio Digital Institucional.
- Covarrubias Ornelas, R. (2015). Proyecto técnico normativo para la construcción sustentable de Vivienda en la zona metropolitana de Guadalajara (Tesis de Maestría). Universidad Jesuita de Guadalajara, México. Recuperado de: <https://rei.iteso.mx/bitstream/handle/11117/3063/Proyecto%20t%C3%A9cnico%20normativo%20para%20la%20construcci%C3%B3n%20sustentable%20de%20vivienda%20en%20la%20zona%20metropolitana%20de%20Guadalajara.pdf?sequence=2>.
- Chanchí Golondrino J. C., Bonilla, Campos, D. F., Gaviria, Rojas, J. A., & Giraldo, López, J. J. (2008). Ensayos a compresión y tensión diagonal sobre muretes hechos a base de papel periódico reciclado y engrudo de almidón de yuca. *Revista ingeniería de construcción*. Rev. Ing. Constr., 23(3), 145–154.
- Dai, Z., Wu, Y., Hu, L., Zhang, W., & Mao, L. (2019). Evaluating physical-mechanical properties and long periods environmental risk of fired clay bricks incorporated with electroplating sludge. *Constr. Build. Mater.* 227, 116716. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116716>.
- Dezso Hegyi, M. A., & Balazs Halmos, K. M. (2022). The effect of wind on historical timber towers analyzed by plastic limit analysis in the focus of a collapse. *Engineering Failure Analysis*, 134(105852), 1-2, 4, 12 y 16. Recuperado de: <https://www-sciencedirect-com.pbidi.unam.mx:2443/science/article/pii/S1350630721007135>.
- Diario Oficial de la Federación. (2015). Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988. Última reforma publicada DOF 09-01-2015.
- Diario Oficial de la Federación. (2021). Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003.
- Dolores, J., Figueroa, B., & Martínez, M. (2019). Propiedades físicas del suelo y su relación con la plasticidad en un sistema bajo labranza tradicional y no labranza. *Rev. Mex. Cienc. Agríc* 10.
- Domínguez, J., Román, A., & Prieto, F. (2011). Evaluación de color en suelos del Cerro de Denganthza, municipio de Francisco I. Madero, Hidalgo. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España, y Portugal*, 21(4). Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41620852012>.
- ECOTEC. (2016). “Ficha técnica Ladrillo Ecotec.” http://construyesustentable.com/FichasTecnicas/FT_Ladrillo.pdf.
- El-Mir, A., El-Zahab, S., Sbartaï, Z. M., Homsî, F., Saliba, J., & El-Hassan, H. (2023). Machine learning prediction of concrete compressive strength using rebound hammer test. *Journal of Building Engineering*, 64(105538). Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105538>.
- Etsuo, U., Ichita, S., Yutaka, T., & Kentaro, T. (2012). Moisture content measurement and surface water absorption test in the inner gallery of Bayon for the conservation of the bas-relief, *Journal of Archaeological Science*, 39(5), 1420-1434. Recuperado de: <https://www-sciencedirect-com.pbidi.unam.mx:2443/science/article/pii/S0305440311004560>.
- Fahlman, B.D. (2018). Materials Characterization. *Materials Chemistry*. Springer, Dordrecht, 734. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/978-94-024-1255-0_7.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). *Las Funciones del Suelo*. Recuperado de: <https://www.fao.org/publications/card/en/c/0a7cfcb0-e14e-4b18-a06c-856af6ff046e/>.

- Fernández Baqueiro, L., Marín Gómez, F., Varela Rivera, J., & Vargas Marín, G. (2009). Determinación de la resistencia a compresión diagonal y el módulo de cortante de la mampostería de bloques huecos de concreto. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 13-2, 41-50.
- Flores Capcha, D., Mallma Marchan, K. E. & Poma Meza, Q. A. (2015). *Mecánica de suelos: Límite Plástico*. Recuperado de: Universidad de Huánuco.es.lidshare.net.
- Flores Corona, L. (2015). Norma mexicana NMX-C-464-ONNCCE-2010 Ensaye de muretes y pilas. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación El día 24 de junio de 2011 Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C.SMIE® MR. Recuperado de: toaz.info-ponencia-mexico-norma-mexicana-nmx-c-464-onncce-2010-.pdf.
- 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. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.008>.
- García, B. (2013). *Mucílago de Nopal (Opuntia spp.) sobre propiedades micromorfológicas y estructurales del suelo en trigo* (Tesis de Doctorado). Colegio de Postgraduados, México.
- Gaceta Oficial de la Ciudad de México. (2021). No. 643. *Aviso por el que se da a conocer la norma ambiental para la ciudad de México NACDMX-002-RNAT-2019, que establece los requisitos, lineamientos y especificaciones técnicas para la producción agroecológica en el suelo de conservación de la ciudad de México. 188 páginas*. Recuperado de: f4d88338e79092ed74694389e4877cd3.pdf (cdmx.gob.mx).
- González Muñoz, M. M., Miranda Enrique K., Gutiérrez Ortega L., & Serafín Muñoz, A. H., (2019). Evaluación del potencial de la biomasa residual como fuentes de energía en los hornos ladrilleros en el municipio de León, Guanajuato.
- González Carlos A. (2013). *Formulación y evaluación de proyectos y obras civiles* estudiante: Ch.Cédula: 4.761-1666. Recuperado de: Portafolio 3 de Evaluación de Proyectos PDF | PDF | Regresión lineal | Análisis de regresión (scribd.com).
- Guerrero, V., & Sánchez, W. (2018). Ecology, construction, and innovation: An alert towards change. *Journal Tekhné*, 15(2), 45-58.
- Guillen Aparicio, J., García De León Montero, E., Ortiz Lara, N., Escudero Garcia, R. & Rojas-Valencia, M. N. (2019). Study of the properties of the Echerhirhu-Block made with *Opuntia ficus mucilage* for use in the construction industry. *Case Stud. Constr. Mater.* 10, e00216. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00216>.
- Gutiérrez Hernández D. J. (2020). “Evaluación de la Reducción de los tiempos de estabilización de sitios ya clausurados de disposición final de Residuos Sólidos Urbanos, mediante la recirculación de Lixiviados Inoculados”. (Tesis de Maestría). Posgrado en Ing. Ambiental, UNAM, México.
- Heisse Susanne, Arias V., Limpus L., & Olascoaga K. (2011) *Manual sistema constructivo Pura Vida*. Holcim-GTZ. Reuse and recycling of Construction and Demolition Waste.
- Huerta de Fernando Lucía. (2017). *Técnicas biométricas aplicadas a Arquitectura*. ETSAM Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Trabajo de grado en fundamentos en Arquitectura 50 páginas.
- Ige, O. & Danso, H. (2022). Experimental Characterization of Adobe Bricks Stabilized with Rice Husk and Lime for Sustainable Construction. *ASCE J. Mater. Civ. Eng.* 34. Recuperado de: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004059](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004059)

- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2014). PROBLEMAS, CAUSAS Y SOLUCIONES NMX-C-037-ONNCCE-2005: Industria de la Construcción-Bloques, ladrillos o tabiques y tabicones-Determinación de la absorción de agua y absorción inicial de agua. *Construcción y tecnología en concreto*, 3(12), 63.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2016). Análisis de Mercado del Sector de la Construcción y Proyecto Piloto a Nivel Región Basado en un Portafolio de Políticas Públicas, 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. Recuperado de: http://189.240.101.244:8080/xmlui/bitstream/handle/publicaciones/56/743_2016_Analisis_Mercado_Ladrilleras_Artesanales.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2018). Estudio para desarrollar un modelo de negocios piloto en ladrilleras artesanales, para reducir emisiones de Contaminantes Climáticos de Vida Corta (CCVC) y Gases de Efecto Invernadero (GEI) y mejorar la calidad de vida de los actores clave, 325. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/320460/INECC_Informe_final_modelo_de_negocio_ladrilleras_25_abril_2018.pdf.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). Censo Población y Vivienda. Marco Conceptual. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197520.pdf.
- INV-E-123-07-ok.doc. (2023) Análisis granulométrico de suelos por tamizado. 7 páginas. Recuperado de: pdfcoffee.com_norma-inv-e-123-07-2-pdf-free.pdf.
- Karmelić Visintainer L. (2015). *Terremoto chile 2010. Reconstrucción/restauración patrimonial:Proceso de validación de la tierra como material vigente*. (Tesis doctoral). Departamento de Historia, Teoría y Composición Arquitectónicas, Universidad de Sevilla, España.
- Karuppasamy Vasurajan, S. (2019). “Construction and demolition waste recycling, manufacturing of eco-blocks and bricks, solar burning as a replacement for the traditional Kiln burning, Case study Mexico and India” (Tesis de Maestría). Programa en Gestión Ambiental y de Recursos, Cottbus, Alemania.
- Kumar, A., Biswas, M., & Nath, D. (2020). A Study of Manufacturing Bricks Using Plastic Wastes. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 7(8), 1838-1843. Recuperado de: <https://www.jetir.org/papers/JETIR2008243.pdf>.
- LGEEPA. (2015). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LPGIR). Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (RLGPGIR). Legislación aplicable a residuos de manejo especial. Recuperado de: RESIDUOS DE MANEJO ESPECIAL - PDF Descargar libre (docplayer.es).
- Liu, J., Gong, E., Wang, D., Lai, X. & Zhu, J. (2019). Attitudes and behaviour towards construction waste minimisation: A comparative analysis between China and the USA. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26, 13681–13690. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2247-0>.
- Liu, M., Sen Han., Jun Pan., & Wanyan Ren, (2018). Study on cohesion performance of waterborne epoxy resin emulsified asphalt as interlayer materials. *Construction and Building Materials*, 177, 72-82. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.043>.
- López L. J. A. (2018). Análisis de las propiedades fisicoquímicas y mineralógicas de los materiales empleados en la elaboración de ecobloques. (Tesis maestría). Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería Ambiental, UNAM – RESIDUOS SÓLIDOS, México.

- Mamani Tupacyupanqui B. N. (2015). Análisis granulométrico de agregados y grueso – contenido de humedad – porcentaje que pasa el tamiz N°200. Universidad Peruana Unión. Facultad de Ingeniería- EAP Ingeniería Civil, Perú.
- Maldonado Martínez, J. C. (2023). Bloques de mampostería hechos con residuos de la construcción con fines de uso estructural (Tesis del Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería Civil). UNAM, México.
- Maldonado, M. (2014). Aprovechamiento de los residuos de construcción y materia orgánica para la fabricación de ecoladrillos en el Parque Ecológico Tuzandepetl, Veracruz (Tesis de Licenciatura). Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Medina González, H., García Coronado, J., & Núñez Acosta, D. (2007). El método del hidrómetro: base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(3), 19-24.
- Mendoza López, L. A. (2022). Fabricación de bloques de cemento con agregados de residuos de construcción y demolición (RCD) provenientes de mamposterías de ladrillo. Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Arquitecto– Ecuador.
- Molina Ceballos, J. A. (2011). *La Materia Orgánica del Suelo*. Recuperado de: <https://www.monografias.com/trabajos87/materia-organica-del-suelo/materia-organica-del-suelo>.
- Morocho Lema, V. M. (2017). Evaluación del contenido de carbono en el suelo de un sistema de pastoreo y bosque nativo de la reserva Huayrapalte, Cantón Suscal, Provincia de Cañar (Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba. FRN-CENID-UD;33T0166. Recuperado de: <http://dspace.espech.edu.ec/handle/123456789/6659>.
- Munir, M. J., Kazmi, S. M. S., Gencel, O., Ahmad, M. R., & Chen, B. (2021). Synergistic effect of rice husk, glass and marble sludges on the engineering characteristics of eco-friendly bricks. *J. Build. Eng.* 42, 102484. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102484>.
- Muñoz, D. F. (2012). Estudio del uso del polietileno tereftalato (PET) como material de restitución en suelos de baja capacidad de carga. (Tesis Licenciatura). UNAM, México. Recuperado de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/2514/1/TESIS.pdf> (accessed on 21 September 2022).
- Murmu A. L. & Patel A. (2018). Towards sustainable bricks production: An overview. *Construction and building materials*. 165, 112-125. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.038>.
- MTSP/FOCCAL. (2013). Fabricación de BTC, Gerencia de Innovación y desarrollo. Tecnoadobe.
- NACDMX-007-RNAT-2019. Norma Ambiental para la Ciudad de México. Clasificación y Especificaciones de Manejo Integral Para los Residuos de la Construcción y Demolición en la Ciudad de México. Secretaría Del Medio Ambiente. Recuperado de: http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sitios/conadf/documentos/proyectos-normas/NACDMX_007_RNAT_2019.pdf.
- NMX-AA-164-SCFI-2013. (2013). Edificación sustentable – Criterios y requerimientos ambientales mínimos. Official Journal of The Federation, México City, México.
- NMX-C-036-ONNCE-2013. (2013). Industria de la construcción – bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines – resistencia a la compresión – métodos de prueba. Official Journal of The Federation, Mexico City, México.

- NMX-C-037-ONNCE-2013. (2013). Industria de la construcción – concreto – bloques, ladrillos o tabiques y tabicones de concreto – determinación de la absorción inicial de agua. Official Journal of The Federation, Mexico City, México.
- NMX-C-038-ONNCE-2013. (2013). Industria de la construcción – determinación de las dimensiones de ladrillos, tabiques, bloques y tabicones para la construcción. [Building industry – determination of dimensions for construction bricks, blocks and masonry units] Official Journal of the federation, Mexico City, México.
- NMX-C-404-ONNCCE-2012. (2012). Norma Mexicana—Industria de la Construcción Para Bloques, Tabiques o Ladrillos Para uso Estructural-Especificaciones. Diario Oficial de la Federación: Mexico City, México.
- NMX-C-441-ONNCCE-2013. (2013). Industria de la construcción – bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para el uso no estructural – especificaciones. [Building industry – block, partition or bricks and masonry units for no structural - specifications] Official Journal of the federation, Mexico City, México.
- NMX-C-464-ONNCCE-2010. (2010). Establece los métodos de ensaye de muretes y pilas. ONNCCE. Declaratorias de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación El día 24 de junio de 2011.
- NOM-161-SEMARNAT-2011. (2011). Que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo.
- NTEA-011-SMA-RS-2008. (2008). Que establece los requisitos para el manejo de los residuos de la construcción para el Estado de México.
- NTE E.080. (2020). Norma Técnica de Edificación Adobe. Establecida en Perú.
- NZS 4297:1998. (1998). Engineering Design of Earth Buildings. Standards New Zealand, the Trading Arm of the Standards Council: Wellington, New Zealand. Recuperado de: http://www.eastue.org/project/linea-adobe/norme/NZD4297-1998.-Engineering_Design_of_Earth_Buildings.pdf (accessed on 9 September 2022).
- NZS-4298-1998. (1998). Materials and workmanship for earth buildings. 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.
- Noguez Trejo, J. R. (2018). Propuesta de un Centro Integral de Residuos de la Construcción (CIREC). México (Tesis de Licenciatura). UNAM, México. Recuperado de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/14897/Tesis.pdf?isAllowed=y&sequence=1>.
- Núñez Mamani, L. (2023). *Manual de procedimientos de ensayos de suelos y memoria de cálculo: Granulometría. Referencias: AASHTO T87-70 (Preparación de muestras) AASHTO T88-70 (Procedimiento de prueba) ASTM D422-63*. Recuperado de: [vsip.info_-_granulometria-pdf-free.pdf](https://www.vsip.info/_granulometria-pdf-free.pdf).
- Moated Ali Khalifa. (2013). Application of phase change materials as a solution for building overheating: a case for the UK. Thesis The Faculty of Engineering Department of Architecture and the Built Environment Institute of Sustainable Energy Technology. The University of Nottighan. 293 pp.
- Ossa, A, & García J. (2015). Residuos de construcción y demolición (RCD).» Informe Instituto de Ingeniería UNAM, México, D.F.
- Oyola, G. (2016). Determinación de la resistencia a la penetración de un suelo cohesivo en diferentes condiciones de hidratación y compactación. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 10(3), 1-10. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/journal/1939/193949520004/html>.

- Paima Aguirre, J. L., & Sangama S. L. (2019). Diseño de barreras dinámicas para la protección ante las caídas de rocas en el tramo Shapaja-Chazuta, km 18+820.00, 2019. Para optar por el título Lic. Ingeniero Civil. Tarapoto-San Martín-Perú. 104 páginas.
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial. (2010). Estudio de zonas impactadas por tiraderos clandestinos de residuos de la construcción en el Distrito Federal. Cuauhtémoc, México. Recuperado de: <http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/estudios/EOT-02-2010.pdf>.
- Pardo de Santayana Carrillo F., González-Gallego, J., & Asanza Izquierdo, E. (2023). Mecánica del suelo básica. Módulo 1 master en mecánica del suelo e ingeniería geotécnica. NED, Área Perucho Martínez Laboratorio de Geotecnia del CEDEX. Recuperado de: <https://vsip.info/qdownload/modulo-1-pdf-pdf-free.html>.
- Perera, S., Arulrajah, A., Choy, Y. W., Horpibulsuk, S., & Maghool, F. (2019). Utilizing recycled PET blends with demolition wastes as construction. *Constr. Build. Mater.* 221, 200–209. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.047>.
- Pérez, R. (2016). *Estudio de las Características Mecánicas de un Tabicón Elaborado con una Mezcla de Arena, Cemento y Tereftalato de Polietileno (PET), Como Agregado Grueso* (Tesis de Licenciatura). UNAM, México. Recuperado de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/12159/TESIS.pdf?sequence=1>. (accessed on 10 May 2022).
- Ponce, C., Moreno, A., Pérez, G., & Cárdenas, O. (2022). Construcción de muros de tierra vertical comprimida. *Scientific Journal of Applied Social and clinical Science.* 2(10), 1-11. Recuperado de: <https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/704726/1/CONSTRUCCINDEMUIROSDETIERRAVERTICALCOMPRIMIDA.pdf>.
- Quintero Navarro, H. A. (2019). “Reciclaje de residuos celulósicos para elaborar materiales de construcción” (Tesis maestría). UNAM, México.
- Rabat Blázquez, A. (2016). *Aplicabilidad del penetrómetro cónico en la determinación del límite líquido en suelos de baja y media plasticidad*. Recuperado de: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/58086/1/APLICABILIDAD_DEL_PENETROMETRO_CONICO_EN_LA_DETERMI_Rabat_Blazquez_Alvaro.pdf.
- Rachit S. (2017). Compressive Strength of Concrete Using Construction Demolition Waste, Glass Waste, Superplasticizer and Fiber. *Jordan J. Civ. Eng.* 11, 455–472. Recuperado de: <https://jjce.just.edu.jo/issues/paper.php?p=3974.pdf> (accessed on 11 June 2022).
- Rivas, T. B. I. (2020). Valorización de Residuos del Ingenio Azucarero, Construcción y Poliolefinas, Para ser Incorporados en un Proceso Productivo. (Tesis de Maestría). UNAM, México. Recuperado de: <http://132.248.9.195/ptd2020/octubre/0804233/Index.html>.
- Rodas Joo, A. (2022). “Implementación de una alternativa piloto para dejar de usar combustibles fósiles utilizando energía solar para secar ladrillos de agregados reciclados” (Tesis del programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería Ambiental). UNAM – RESIDUOS SÓLIDOS, México.
- Rojas, M. I. R. (2008). *Sostenibilidad de la explotación de materiales de construcción en el Valle de Aburrá* (Tesis de Maestría) Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Recuperado de: https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/2591/43207166_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y. (accessed on 21 September 2022).

- Rojas, M., & Macías, A. (junio 2013). Manejo de los residuos de construcción. *Revista de Ingeniería Civil*, No. 530, 20-24.
- Rojas, V. M. N. Patented. (2021). Patented accepted in Mexico. MX/a/2015/002993 Gaceta IMPI. Recuperado de: <http://www2.iingen.unam.mx/es-mx/Publicaciones/Patentes/Lists/ListadoDePatentes/DispForm.aspx?ID=67>.
- Rojas-Valencia, M. N., & Aquino Bolaños, E. (2016). Sustainable Adobe Bricks with Construction Wastes. En *Waste and Resource Management*, 169, 158–165. Recuperado de: <https://doi.org/10.1680/jwarm.16.00014>.
- Rojas-Valencia, M. N., & Aquino, E. (2019). Recycling of construction wastes for manufacturing sustainable bricks. *Proc. Inst. Civ. Eng.-Constr. Mater*, 172, 29–36. Recuperado de: <https://doi.org/10.1680/jcoma.16.00046>.
- Rojas-Valencia, M. N., López-López, J., Fernández-Rojas, D., Gómez-Soberón, J. M., & Vaca-Mier, M. (2020). Analysis of the Physicochemical and Mineralogical Properties of the Materials Used in the Preparation of Recoblocks. *Materials*, 13, 3626. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/ma13163626>.
- Rojas-Valencia M. N., Quintero-Navarro H., Gutiérrez-Palacios C., Araiza-Aguilar J., Barrios Pérez J., Nájera-Aguilar H., & Gutiérrez-Hernández R. (2020). “Use of Cellulosic and Construction Waste for Manufacturing Bricks” *Transylvanian Review*, 27(48), 12127-12136.
- Rojas-Valencia M. N., Rivas-Torres B. I., Fernández-Rojas D. Y., & Gómez-Soberón J.M. (2022). Recovery of Mixtures of Construction Waste, PET and Sugarcane Bagasse for the Manufacture of Partition Blocks. *Materials*, 15(19), 6836. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/ma15196836>.
- Rojas Valencia, M. N., & Ossa López, A. (2022). Generación de residuos de la construcción y normativa aplicable en la Ciudad de México. *IC. CICM.*, 634. /AÑO LXXII/SEPTIEMBRE.
- Rosas Díaz, F. E. (2021). Desarrollo de un material compuesto de matriz a base de cemento portland con agregado vegetal lignocelulósico de agave” Maestro en Ciencias con orientación en materiales de construcción. Universidad Autónoma de Nuevo León. México.
- Román, C., Dorador, L. (2019). Uso de granulometrías y densidades escaladas para la caracterización geotécnica de enrocados. *Geotechnical Engineering in the XXI Century; Lessons learned and feature challenges*. Recuperado de: <https://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=1mTIDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA356&dq=articulos+cientificos+prueba+granulom%C3%A9trica+geotecnia&ots=IEwV7DrayW&sig=VmlptXv5iXzJ7OHPY14UI3bZw#v=onepage&q&f=false>.
- Rondón, H., Rodríguez, E., & Moreno, L. (2007). Resistencia Mecánica Evaluada en el Ensayo Marshall de Mezclas Densas en Caliente Elaboradas con Asfaltos Modificados con Desechos de Policloruro de Vinilo (Pvc), Polietileno de Alta Densidad (Pead) y Poliestireno (Ps). *Rev. Ing. Univ. Medellín* 6, 91–104. Recuperado de: https://www.redalyc.org/pdf/750/75_061107.pdf.
- Roux, R. (2018). Los bloques de tierra comprimida (BTC) en zonas húmedas. Plaza y Valdés. Universidad Autónoma de Tamaulipas. México. Recuperado de: <https://libros.uat.edu.mx/index.php/librosuat/catalog/book/69>.
- Rueda R., & Karolina V. (2017). Estudio sedimentológico del material de arrastre del Rio Sororia en el municipio de la Jagua de Ibirico departamento del Cesar.", Valledupar: AREANDINA. Fundación Universitaria del Área Andina. Repositorio Institucional. Recuperado de: <https://digitk.areandina.edu.co/handle/areandina/985>.

- Ruiz Sibaja J. A., Vidal Sánchez F., & Zebadúa Sánchez, A. (2019). Propiedades geométricas y mecánicas del bloque hueco de concreto fabricado en el área de Tuxtla Gutiérrez (Chiapas, Mex.) *Revista Digital de la Universidad Autónoma de Chiapas. Espacio I + D, Innovación más Desarrollo* DOI. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.31644/IMASD.21.2019.a01>.
- Santos Amado J. D., Malagón Villafrades P. V., & Córdoba Tuta E. M. (2009). Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander (Tesis de licenciatura). Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. (2022). Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Recuperado de: <https://www.smie.org.mx/archivos/eventos/2015/agosto/ponencia-mexico-cambio-para-siempre-desde-1985-norma-mexicana-nmx-c-464-onnce-2010-ensaye-muretes-pilas-leonardo-flores.pdf>.
- Sampablo Contreras, A. (2005). Estudio comparativo de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo granular bien y mal graduado (Tesis de licenciatura). Facultad de ingeniería. UNAM, México. Recuperado de: http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/13147/Tesis_Completa.pdf?isAllowed=y&sequence=1.
- Seco, A., Urmeneta, P., Prieto, E., Marcelino, S., García, B., & Miqueleiz, L. (2017). Estimated and real durability of unfired clay bricks: Determining factors and representativeness of the laboratory tests. *Constr. Build. Mater.*, 131, 600–605. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.107>.
- Seco, A., Omer, J., Marcelino, S., Espuelas, S., & Prieto, E. (2018). Sustainable unfired bricks manufacturing from construction and demolition wastes. *Constr. Build. Mater.* 167, 154–165. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.026>.
- Simeón, C. J. (2014). *Análisis de tamaño de partículas por tamizado en agregado fino y grueso y determinación de material más fino que en el tamiz No. 200 (75Um) en agregado mineral por lavado*. Universidad Centro Americana, UCA.
- Shakir, A., Naganathan, S., & Mustapha, K. N. (2013). Development of Bricks from waste material: A review paper. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(8), 812-818.
- Shimol P., & Robin D. (2020). Eco Bricks Made from Waste Plastic Bottles and Recycled Concrete Aggregate. Conference: 5th International Engineering Students Conference (IESC) held at University of Indonesia Campus, Depok, West Java, Indonesia At: Depok, West Java, Indonesia.
- Shuangge Y., & Chunguo Z. (2021). Size effect on quasi-brittle fracture pertinent to microstructure and plastic limit. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 114, 102978. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.102978>.
- Suasnavas Flores, D. F. (2017). Degradación de Materiales Plásticos “PET” (Polyethylene Terephthalate), Como Alternativa para su Gestión. (Monografía Previa a la Obtención del Título de Licenciado en Ciencias Químicas con Mención en Química Analítica). Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Facultad de ciencias exactas y naturales. Escuela de Ciencias Químicas. Quito, Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/13224/Degradaci%C3%B3n%20Qu%C3%ADmica%20del%20PET.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. (accessed on 21 September 2022).
- Tomás, R., Cano, M., García-Barba, J., Santamarta, J. C., Hernández, L. E., Rodríguez, J. A., & Zamora, R. (2013). *Prácticas de Ingeniería del Terreno*. Recuperado de: <http://web.ua.es/es/ginter/> ó <http://ocw.ull.es/> (30 de abril del 2023). License: Creative Commons BY-NC-SA.
- UNE-103-101. Análisis granulométrico de suelos por tamizado, preparación de muestras.

- UNE-103-204-93. (1993). Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato de potásico.
- UNE 103-205-2019. (2019). Determinación del contenido de sales solubles de un suelo.
- UNE-41410-08. (2008). Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.
- Valdez Aparicio, M. M., & Morato González, M. (2015). Estabilización de suelos para BTC. XII Encuentro de la participación de la mujer en la Ciencia. Recuperado de: Formato de extensos X Encuentro (cio.mx).
- Ventura Chávez Santiago. (2017). Diseño y factibilidad de una empresa de base tecnológica (EBT) Para la fabricación de mobiliario urbano en base a residuos de Construcción y demolición (RCD) (Tesis de licenciatura). Obtención del título de ingeniero industrial, Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada Baja California. Recuperado de:
<https://repositorioinstitucional.uabc.mx/bitstream/20.500.12930/550/1/ENS087248.pdf>.
- Villamar Oviedo, C. A. (2022). Análisis comparativo de las características físicas de los agregados gruesos de las 2 canteras principales que abastecen al cantón El Carmen y su principal influencia en la resistencia del hormigón (Tesis de licenciatura). Obtención del título de Ingeniero Civil. Universidad estatal del sur de Manabi, Facultad de Ciencias Técnicas, Jipijapa – Manabí – Ecuador.
- Vieira, C. M. F., Sánchez, R., & Monteiro, S. N. (2009). Characteristics of clays and properties of building ceramics in the state of Rio de Janeiro, Brazil, *Construction and Building Materials*, 22, 781-787.
- Wagih, A. M., El-Karmoty, H. Z., Ebid, M., & Okba, S. H. (2013). Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. *HBRC J.* 9, 193–200. Recuperado de:
<https://doi.org/10.1016/j.hbrcej.2013.08.007>.
- Zhang, L. (2013), Production of bricks from waste materials. *Constr. Build. Mater.* 2013, 47, 643–655. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043>.

Las Series del Instituto de Ingeniería describen los resultados de algunas de las investigaciones más relevantes de esta institución. Con frecuencia son trabajos in extenso de artículos que se publican en revistas especializadas, memorias de congresos, etc.

Cada número de estas Series se edita con la aprobación técnica del Comité Editorial del Instituto, basada en la evaluación de árbitros competentes en el tema, adscritos a instituciones del país y/o el extranjero.

Actualmente hay tres diferentes Series del Instituto de Ingeniería:

SERIE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Incluye trabajos originales sobre investigación y/o desarrollo tecnológico. Es continuación de la Serie Azul u Ordinaria, publicada por el Instituto de Ingeniería desde 1956, la cual actualmente tiene nueva presentación y admite textos en español e inglés.

SERIE DOCENCIA

Está dedicada a temas especializados de cursos universitarios para facilitar a estudiantes y profesores una mejor comprensión de ciertos temas importantes de los programas de estudio.

SERIE MANUALES

Abarca manuales útiles para resolver problemas asociados con la práctica profesional o textos que describen y explican el estado del arte o el estado de la práctica en ciertos temas. Incluye normas, manuales de diseño y de laboratorio, reglamentos, comentarios a normas y bases de datos.

Las Series del Instituto de Ingeniería pueden consultarse gratuitamente desde la dirección electrónica del Instituto <http://www.ii.unam.mx> (<http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/Buscarpublicacion.aspx>) y pueden grabarse o imprimirse en formato PDF desde cualquier computadora.

