



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

**RECICLAJE DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN PARA LA FABRICACIÓN  
DE LADRILLOS SUSTENTABLES**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRA EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

I.C. ESPERANZA AQUINO BOLAÑOS

**TUTOR PRINCIPAL:**

DRA. MARÍA NEFTALÍ ROJAS VALENCIA  
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

**COMITÉ TUTOR**

M.I. CONSTANTINO GUTIÉRREZ PALACIOS  
FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM.

M. ADM. IND. LANDY IRENE RAMÍREZ BURGOS  
FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.

MÉXICO, D.F. SEPTIEMBRE DE 2015.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: **DR. ALFONSO DURÁN MORENO**

Secretario: **M. I. ALBA BEATRIZ VÁZQUEZ GONZÁLEZ**

Vocal: **M. ADM. IND. LANDY IRENE RAMÍREZ BURGOS**

1<sup>er</sup> suplente: **M. I. CONSTANTINO GUTIÉRREZ PALACIOS**

2<sup>o</sup> suplente: **DRA. MARÍA NEFTALÍ ROJAS VALENCIA**

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

**TUTOR DE TESIS:**

**DRA. MARÍA NEFTALÍ ROJAS VALENCIA**

---

**FIRMA**

## **Agradecimientos**

*A Jesucristo mi Señor y mi Salvador, por quien subsisten todas las cosas y por quien hoy puedo llegar hasta aquí. ¡Gracias Dios!*

*Y a todas y cada una de las personas que hicieron posible este trabajo, sin su ayuda hubiera sido muy difícil lograrlo.*

*A mis padres Lucio y Catalina por su ejemplo, cariño y apoyo incondicional,  
a mi hermana Mari por ser mi ejemplo de perseverancia en toda circunstancia,  
a mi hermana Lucy por ser la mejor hermana menor que puede existir,  
a mi hermoso hermanito Jesús Daniel, la fuente de mis muchas alegrías y mi mayor inspiración,  
a mi abuelita Eva por su cariño, sus consejos y su valentía ante la vida,  
a mi amigo Luis Felipe Izquierdo Reséndiz por su amistad incondicional, su apoyo y fortaleza,  
a mi amigo René y a mi amiga Italivi, amigos fieles y verdaderos,  
a mi amiga Perlyta y su familia por el ánimo y el apoyo que siempre me han brindado.*

*Al Ing. Mario Cruz Clemente, profesor del Instituto Tecnológico de Oaxaca, a quien en este año Dios llamó a su presencia, por motivarme en la vida académica, por creer en mí, por su apoyo incondicional y por la gratificante oportunidad de haberlo conocido.*

*A la M.I. Gladis Castellanos Hernández y el Ing. Alberto Martínez, profesores del Instituto Tecnológico de Oaxaca por los conocimientos entregados y por brindarme su apoyo para llegar a la maestría.*

*A mi tutora la Dra. María Nefalí Rojas Valencia por su dirección y apoyo incondicional en este recorrido, por su paciencia y su motivación, por honrar el mundo de la investigación con su ejemplo y dedicación, le agradezco todo lo que me ha enseñado.*

*A Mayra Maldonado Pérez por su ejemplo de esfuerzo, dedicación, por su apoyo y perseverancia en la realización de este trabajo,  
a la M. Landy Irene Ramírez Burgos por su rigor y objetividad para llevar al éxito este trabajo,  
al M. Constantino Gutiérrez Palacios por todos los conocimientos otorgados, por su apoyo, dirección y por su valiosa sabiduría aportada en este trabajo,  
a la M. I. Alba Beatriz Vázquez González y al Dr. Alfonso Durán Moreno por su asesoría y apoyo,  
a la M. Francis, catedrática de Análisis Estadístico por su apoyo y asesoría en la realización de este trabajo,  
al M.I. Héctor Javier Guzman Olguín de la Facultad de Ingeniería, por su apoyo y dirección en la realización de las pruebas de resistencia a la compresión.*

*A Jonathan y Don Richard del taller de carpintería del Instituto de Ingeniería de la UNAM por todo su apoyo, por el trabajo realizado, por su asesoría y por su disposición, muchas gracias, al personal del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, el Ing. Pancho y la Ing. Emma por su apoyo incondicional en la realización de las pruebas, por su asesoría y disposición, a los alumnos de servicio social porque fueron parte fundamental en este trabajo, por la oportunidad de conocerlos y formar una bonita amistad, a Isaac Matías, Ari Vital, Rafa Rivera, a Karlyta, Lucy, Anayancy, Chucho, Brando y Alejandro, a los becarios del cubículo 412, por su amistad, por convivir y compartir gratos momentos, a Carmen, Jessi, Diana, Alfredo, Carmen Luna, Carolina y Jorge, a mis amigos de la maestría, por su apoyo y compañía en esta inolvidable, gratificante y a veces dura experiencia de la maestría, a Víctor, Aurora, Rosalba, Gris, Cristy, Mario, Javier, Lulú, Elía, Jairo, Víctor2, Dani y Luis Adrián, a mis compañeros de la clase de Laboratorio de Mecánica de suelos a Víctor, Mauricio, Juan Carlos y Diego por brindarme de sus conocimientos y por tenerme tanta paciencia; a Lalito y al Ing. Gonzalo por guiarme, por su apoyo, dirección y abundante paciencia en todas las prácticas, por su compañía y sobre todo por ser maravillosos seres humanos.*

*A la empresa CONCRETOS RECICLADOS, en especial al Ing. Enrique Granel Covarrubias y a la Lic. Pamela por el apoyo otorgado en la donación de los agregados reciclados utilizados en esta tesis.*

*Al Ing. Alfredo Martínez Sigüenza coordinador de Áreas Verdes y al biólogo Javier Flavio Montoya Gómez, encargado de la planta de composta de la UNAM, por su apoyo y disponibilidad en la donación de materiales.*

*Al Instituto de Ingeniería de la UNAM.*

*Al Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.*

*Al Laboratorio de Mecánica de suelos del Instituto de Ingeniería de la UNAM.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por recibirme con las puertas abiertas y otorgarme la oportunidad de concluir esta importante etapa académica.*

*A todos, muchas gracias.*

*“Por mi raza hablará el espíritu”*

*“Y se dijeron unos a otros: Vamos, fabriquemos ladrillos y cozámoslos bien. Y usaron ladrillo en lugar de piedra, y asfalto en lugar de mezcla. Y dijeron: vamos, edifiquémonos una ciudad y una torre cuya cúspide llegue hasta los cielos, y hagámonos un nombre famoso, para que no seamos dispersados sobre la faz de toda la tierra”.*

*Génesis 11:3-4*

## Contenido

Índice de Tablas .....	VII
Índice de Figuras .....	X
1. Introducción .....	1
1.1 Justificación.....	2
1.2 Objetivo general.....	4
1.2.1 Objetivos particulares .....	4
1.3 Alcances .....	4
2. Marco teórico .....	5
2.1. El escenario actual.....	5
2.1.1. El concreto y el cemento .....	7
2.1.2. Materiales altamente demandados en la industria de la construcción .....	9
2.1.3. Ladrillos artesanales.....	10
2.2. Los residuos de la construcción.....	13
2.2.1. Composición y cuantificación de los residuos de la construcción .....	15
2.2.2. Generación de los residuos de construcción a nivel internacional .....	24
2.2.3. El reciclaje de los residuos de construcción .....	28
2.2.4. La actividad del reciclaje de los residuos de la construcción en México .....	31
2.2.4.1. La oferta y la demanda de los residuos de construcción reciclados .....	32
2.2.4.2. Residuos de la construcción potencialmente reciclables.....	34
2.2.5. Experiencias operativas de reciclaje de los RC en México .....	36
2.2.5.1. Reciclaje de los Residuos Sólidos Urbanos generados en la industria de la construcción.....	38
2.3. La construcción sustentable.....	40
2.4. La tierra como material de construcción .....	44
2.4.1. Materiales de construcción fabricados con tierra .....	46
2.4.1.1. Ladrillo macizo .....	46
2.4.1.2. Bloque de tierra comprimida (BTC) .....	46
2.4.1.3. Adobe.....	47
2.4.1.4. COB .....	48
2.4.1.5. Tierra aligerada .....	48
2.4.1.6. Tapial .....	49
2.4.1.7. Bahareque o quincha .....	50
2.4.2. Normativa mundial en el uso de la tierra como material de construcción .....	50
2.4.3. Tipos de suelo como material de excavación .....	51
2.4.3.1. Reconocimiento de la tierra .....	56
2.5. Usos del nopal en el sector de la construcción.....	59

2.6.	Secadores solares .....	60
3.	Metodología.....	61
3.1.	Fase I. Estudio gabinete .....	61
3.2.	Fase II. Diseño de materiales y construcción del equipo empleado.....	62
3.2.1.	Materiales utilizados en la fabricación de ladrillos.....	62
3.2.1.1.	Materiales aglomerantes .....	63
3.2.1.2.	Materiales de relleno o agregados.....	65
3.2.1.3.	Residuos de tala o maderables .....	66
3.2.1.4.	Mezcla de agua-mucílago de nopal .....	67
3.2.2.	Dimensiones de fabricación de los ladrillos y dosificaciones.....	70
3.2.3.	Diseño y construcción del equipo empleado en la fabricación de los ladrillos .....	71
3.2.3.1.	Máquina moldeadora de ladrillos.....	71
3.2.3.2.	Secador solar de primera etapa .....	72
3.2.3.3.	Secador solar de segunda etapa.....	73
3.2.4.	Definición del proceso constructivo .....	74
3.3.	Fase III. Fabricación de ladrillos a partir de los residuos de excavación del estado de Puebla.....	75
3.3.1.	Diseño de mezclas .....	76
3.3.2.	Fabricación de ladrillos .....	77
3.3.2.1.	Realización de pruebas de resistencia a la compresión.....	80
3.3.2.2.	Realización de pruebas de absorción de agua .....	83
3.4.	Fase IV. Fabricación de ladrillos a partir de los residuos de excavación del Distrito Federal y el Estado de México.....	86
3.4.1.	Pruebas preliminares.....	86
3.4.1.1.	Prueba granulométrica .....	86
3.4.1.2.	Prueba de plasticidad.....	87
3.4.1.3.	Prueba de dureza .....	88
3.4.1.4.	Prueba de mezclas .....	90
3.4.2.	Diseño de experimentos para la fabricación de ladrillos .....	91
3.4.2.1.	Mezclas diseñadas para el material de excavación proveniente del Distrito Federal.....	91
3.4.2.2.	Mezclas diseñadas para el material de excavación proveniente del Estado de México.....	94
3.4.3.	Fabricación de ladrillos .....	96
3.4.4.	Realización de pruebas técnicas de evaluación de calidad.....	102
3.4.4.1.	Pruebas de resistencia a la compresión.....	103
3.4.4.2.	Pruebas de absorción de agua .....	105
4.	Resultados .....	108

4.1.	Resultados Fase I. Normativa aplicable en materia de residuos de la construcción.....	108
4.1.1.	Normas Mexicanas en materia de manejo de residuos de construcción .....	109
4.1.2.	Normativa aplicable en la evaluación de la calidad de ladrillos .....	109
4.1.2.1.	Especificaciones normativas de evaluación.....	110
4.2.	Resultados Fase II. Diseño .....	112
4.3.	Resultados Fase III. Fabricación de ladrillos empleando residuos de excavación del estado de Puebla.....	113
4.3.1.	Pruebas de resistencia a la compresión .....	114
4.3.2.	Determinación de las condiciones óptimas de fabricación .....	116
4.3.3.	Pruebas de absorción de agua .....	119
4.4.	Resultados Fase IV. Fabricación de ladrillos a partir de residuos de excavación del Distrito Federal y el Estado de México .....	120
4.4.1.	Resultados obtenidos de las pruebas preliminares .....	120
4.4.2.	Resultados obtenidos durante la fabricación de ladrillos .....	121
4.4.2.1.	Resultados de la prueba de resistencia a la compresión .....	123
4.4.2.2.	Resultados de la prueba de absorción de agua máxima inicial.....	128
4.4.3.	Resultados obtenidos en la prueba de absorción total .....	129
4.4.4.	Resultados obtenidos durante el periodo de secado .....	131
4.4.5.	Factibilidad técnica y ambiental .....	133
4.4.6.	Factibilidad económica .....	135
5.	Conclusiones .....	138
6.	Recomendaciones .....	139
	Actividades complementarias .....	141
	Referencias .....	142
	Glosario .....	150

## Índice de Tablas

Tabla 1. Evaluación de la calidad de la infraestructura a nivel internacional .....	6
Tabla 2. Gases de Efecto Invernadero causado por ladrilleras artesanales a nivel nacional.....	12
Tabla 3. Requisitos para el manejo integral de los RC establecidos en la NADF-007-RNAT-2013 .....	15
Tabla 4. Descripción de la Etapa 1. Preparación del terreno .....	16
Tabla 5. Descripción de la Etapa 2. Construcción .....	17
Tabla 6. Identificación de residuos generados en la Etapa 1. Preparación del terreno .....	17
Tabla 7. Identificación de residuos generados en la Etapa 2. Construcción .....	18
Tabla 8. Metodologías de cuantificación de la generación de RC.....	19
Tabla 9. Índices de residuos generados en diferentes edificaciones .....	20
Tabla 10. Índices de generación de RC por m <sup>2</sup> de edificación .....	22
Tabla 11. Generación de residuos de la construcción en el Distrito Federal .....	24
Tabla 12. Generación de residuos de la construcción en Chile .....	24
Tabla 13. Generación de residuos de la construcción en Argentina .....	25
Tabla 14. Generación de residuos de la construcción en Costa Rica.....	25
Tabla 15. Generación de residuos de la construcción en Estados Unidos .....	26
Tabla 16. Generación de residuos de la construcción en países miembros de la Unión Europea.....	26
Tabla 17. Generación de residuos de la construcción (inertes) en España .....	27
Tabla 18. Generación de residuos de la construcción (excavación) en España .....	27
Tabla 19. Generación, reciclaje y vertido de residuos de la construcción anual en países europeos.....	30
Tabla 20. Comparativa entre la generación y el porcentaje de residuos enviados a reciclaje.....	33
Tabla 21. Posibilidades de utilización para los residuos sólidos en la industria de la construcción .....	39
Tabla 22. Diferencias entre limos y arcillas .....	54
Tabla 23. Diferencias entre gravas y arenas. ....	55
Tabla 24. Plasticidad de diversos suelos arcillosos/limosos .....	57
Tabla 25. Clasificación granulométrica .....	65
Tabla 26. Dimensiones de fabricación de ladrillos .....	71
Tabla 27. Diseño de mezclas utilizados en la fabricación de ladrillos durante la tercera fase.....	76
Tabla 28. Combinaciones preliminares .....	90
Tabla 29. Diseño de mezclas utilizando agua como material fluidizante .....	92
Tabla 30. Diseño de mezclas utilizando agua-mucílago de nopal como material fluidizante .....	92
Tabla 31. Porcentajes de material empleado .....	93
Tabla 32. Cantidad de material empleado por unidad fabricada .....	93
Tabla 33. Diseño de mezclas utilizando agua como material fluidizante .....	94
Tabla 34. Diseño de mezclas utilizando agua-mucílago de nopal como material fluidizante .....	95
Tabla 35. Porcentajes de material empleado .....	95
Tabla 36. Cantidad de material empleado por unidad fabricada .....	95
Tabla 37. Normas empleadas para la evaluación de la calidad de los ladrillos fabricados.....	109
Tabla 38. Valores de resistencia a la compresión establecidos en la NMX-C-441-ONNCCE-2013 .....	110
Tabla 39. Valores de absorción de agua máxima inicial establecidos por la NMX-C-441-ONNCCE.....	110
Tabla 40. Clases de resistencia a la compresión normalizada por la Norma Española UNE 41410.....	111
Tabla 41. Valores determinados en normativa internacional para materiales fabricados con tierra .....	111
Tabla 42. Dimensiones de fabricación.....	112
Tabla 43. Proporción de materiales empleada en la Fase III .....	112
Tabla 44. Dosificación de material y porcentaje de agua-mucílago empleado por tipo de mezcla .....	113
Tabla 45. Resultados de resistencia a la compresión.....	114
Tabla 46. Valor promedio de resistencia a la compresión correspondiente a cada mezcla .....	115
Tabla 47. Composición de la mezcla óptima de fabricación .....	117
Tabla 48. Datos de variación diaria del peso durante el periodo de secado.....	117
Tabla 49. Valores de absorción máxima inicial en unidades de gramos/minuto .....	119
Tabla 50. Porcentaje de agua empleado respecto a los porcentajes de material dosificado para el Banco 1..	121

Tabla 51. Porcentaje de agua-mucílago de nopal empleado para el Banco 1 .....	121
Tabla 52. Porcentaje de agua empleado respecto a los porcentajes de material dosificado para el Banco 2..	122
Tabla 53. Porcentaje de agua-mucílago de nopal empleado para el Banco 2 .....	122
Tabla 54. Resistencia a la compresión empleando agua.....	123
Tabla 55. Resistencia a la compresión empleando agua-mucílago de nopal .....	124
Tabla 56. Resistencia a la compresión empleando agua como material fluidizante .....	125
Tabla 57. Resistencia a la compresión con agua-mucílago como material fluidizante.....	126
Tabla 58. Datos de absorción total para la Mezcla 2 .....	130
Tabla 59. Datos de absorción total para la Mezcla 3 .....	130
Tabla 60. Datos de absorción total para la Mezcla 4 .....	131
Tabla 61. Evaluación de la factibilidad técnica .....	133
Tabla 62. Comparativa de las ventajas ambientales de los ladrillos sustentables .....	134
Tabla 63. Integración del precio unitario para la fabricación de ladrillos sustentables .....	135
Tabla 64. Integración del precio unitario para la construcción de 1 m <sup>2</sup> de muro con ladrillos sustentables...	136
Tabla 65. Integración del precio unitario para la construcción de 1 m <sup>2</sup> de muro con ladrillo rojo .....	137

## Índice de Figuras

Figura 1. Consumo de energía por unidad de volumen de materiales de construcción .....	9
Figura 2. Emisiones de CO <sub>2</sub> por unidad de peso para diversos materiales de construcción .....	10
Figura 3. Listado del número de ladrilleras artesanales en operación a nivel nacional .....	11
Figura 4. Emisión de GEI de una ladrillera artesanal en operación.....	12
Figura 5. Clasificación de los residuos de la construcción .....	14
Figura 6. Determinación del índice de generación en Lima, Perú .....	21
Figura 7. Disposición final de los RME .....	23
Figura 8. Separación de residuos desde la fuente de generación.....	29
Figura 9. Residuos de construcción reciclados del año 2005 a julio de 2014.....	32
Figura 10. Producción y venta de RC reciclados, del año 2009 a julio del 2014 .....	34
Figura 11. Construcción de “Línea 12” del metro en el Distrito Federal .....	36
Figura 12. Construcción de la Autopista Urbana Sur .....	37
Figura 13. Construcción del Parque Bicentenario, Distrito Federal .....	37
Figura 14. Construcción de bases hidráulicas empleando material reciclado, Av. Chimalhuacán D.F. ....	38
Figura 15. Fundamento y estructura de la sustentabilidad.....	41
Figura 16. Cronología de la sustentabilidad en el sector de la construcción .....	42
Figura 17. Ladrillos artesanales cocidos.....	46
Figura 18. Fabricación de Bloques de Tierra Comprimida.....	47
Figura 19. Fabricación de adobes .....	47
Figura 20. Construcción de un muro con COB .....	48
Figura 21. Construcción con tierra aligerada.....	49
Figura 22. Construcción de tapial para cimiento de una vivienda .....	49
Figura 23. Construcción de vivienda bahareque.....	50
Figura 24. Contenido principal de la normativa para el uso de la tierra .....	51
Figura 25. Clases edafológicas de suelos identificados en la República Mexicana.....	52
Figura 26. Clasificación de los suelos por composición y granulometría .....	52
Figura 27. Comparativa del tamaño granulométrico para la identificación de suelos .....	54
Figura 28. Grado de plasticidad de un suelo.....	57
Figura 29. Extracción de materiales de excavación en el Distrito Federal .....	63
Figura 30. Secado de los residuos de excavación.....	64
Figura 31. Apisonado de los residuos de excavación .....	64
Figura 32. Proceso de cernido de la tierra. ....	64
Figura 33. Trituración y separación granulométrica.....	65
Figura 34. Trituración mecánica de residuos maderables.....	66
Figura 35. Cribado de residuos de tala .....	66
Figura 36. Centro de acopio del nopal en la delegación de "Milpa Alta" .....	67
Figura 37. Nopales adquiridos de tamaño mediano.....	67
Figura 38. Corte limpio en el tallo de los nopales .....	68
Figura 39. Curado con ácido cítrico .....	68
Figura 40. Curado con papel higiénico.....	68
Figura 41. Curado natural.....	68
Figura 42. Extracción de mucílago mediante el hervido de los nopales .....	69
Figura 43. Corte de nopales en trozos .....	69
Figura 44. Reposo de la mezcla agua-nopal .....	70
Figura 45. Extracción de la mezcla agua-mucílago .....	70
Figura 46. Caracterización de lados .....	71
Figura 47. Máquina moldeadora de ladrillos .....	71
Figura 48. Secador solar de primera etapa.....	72
Figura 49. Secador solar mejorado .....	73
Figura 50. Proceso constructivo seguido durante la Fase III.....	74

Figura 51. Proceso constructivo seguido durante la Fase IV .....	75
Figura 52. Integración de materiales previo a la homogeneización.....	77
Figura 53. Incorporación del mucílago de nopal .....	78
Figura 54. Homogeneización de la mezcla.....	78
Figura 55. Acomodo de la mezcla en la máquina moldeadora .....	79
Figura 56. Compactación de la mezcla.....	79
Figura 57. Pesaje de ladrillos inmediato a su fabricación.....	79
Figura 58. Determinación de las dimensiones .....	79
Figura 59. Secado de ladrillos al aire libre .....	80
Figura 60. Secado de ladrillos dentro del secador solar .....	80
Figura 61. Nivelado de las piezas de confinamiento .....	81
Figura 62. Adición de la mezcla sobre la superficie de los ladrillos .....	81
Figura 63. Inicio de la aplicación de carga .....	82
Figura 64. Momento de falla en el espécimen .....	82
Figura 65. Ubicación de barras metálicas en el recipiente de prueba .....	84
Figura 66. Ajuste de niveles de referencia con una ladrillo en estado saturado .....	84
Figura 67. Depósito del ladrillo de prueba sobre las barras metálicas.....	85
Figura 68. Determinación del peso posterior al periodo de sumersión.....	85
Figura 69. Prueba granulométrica .....	87
Figura 70. Elaboración de rollito con el material de excavación.....	87
Figura 71. Proceso de deslice del rollito.....	88
Figura 72. Evaluación de plasticidad.....	88
Figura 73. Moldeo de la porción de material de excavación .....	89
Figura 74. Pastillas moldeados con residuos de excavación.....	89
Figura 75. Bolitas y pastillas fabricados para un tipo de residuos de excavación .....	89
Figura 76. Prueba de dureza .....	90
Figura 77. Aplastamiento de pastillas.....	90
Figura 78. Diseño de mezclas preliminares .....	91
Figura 79. Preparación del material de fabricación .....	96
Figura 80. Equipo empleado durante la fabricación de ladrillos .....	97
Figura 81. Adición del mucílago de nopal previamente medido .....	97
Figura 82. Preparación de la mezcla previa a la homogeneización .....	97
Figura 83. Mezclado de los materiales .....	98
Figura 84. Acomodo y compactación manual de la mezcla .....	98
Figura 85. Acomodo final de la mezcla.....	98
Figura 86. Compactación de los ladrillos en la máquina moldeadora de ladrillos .....	99
Figura 87. Aplicación de fuerza en la palanca para la extracción de ladrillos.....	99
Figura 88. Extracción individual de ladrillos .....	99
Figura 89. Acondicionamiento de ladrillos en un sitio con condiciones similares .....	100
Figura 90. Secado y cambio de posición .....	100
Figura 91. Monitoreo de dimensiones .....	101
Figura 92. Introducción de ladrillos al secador .....	101
Figura 93. Determinación de la temperatura en el interior del secador solar .....	101
Figura 94. Nivelado de maderas de confinamiento .....	102
Figura 95. Humedecimiento de la superficie .....	103
Figura 96. Aplicación de la mezcla yeso-cemento .....	103
Figura 97. Equipo de compresión axial .....	104
Figura 98. Aplicación de carga.....	104
Figura 99. Verificación de primera fractura .....	104
Figura 100. Toma de lectura del esfuerzo soportado por la pieza en prueba.....	104
Figura 101. Estructura de los especímenes probados .....	105
Figura 102. Sumersión de ladrillos.....	106

Figura 103. Determinación del peso.....	106
Figura 104. Indicación del término de la prueba .....	107
Figura 105. Prueba de absorción inicial .....	107
Figura 106. Normativa aplicable en el tema de residuos .....	108
Figura 107. Dimensiones de fabricación respecto a sus lados.....	112
Figura 108. Evaluación de la resistencia a la compresión .....	115
Figura 109. Variación diaria del peso de los ladrillos .....	118
Figura 110. Porcentaje de variación de peso diario .....	118
Figura 111. Comparación de resultados obtenidos en la prueba de absorción máxima inicial.....	119
Figura 112. Representación gráfica de los valores promedio de resistencia a la compresión empleando agua como material fluidizante .....	124
Figura 113. Representación gráfica de la resistencia a la compresión empleando agua –mucílago como material fluidizante .....	125
Figura 114. Representación gráfica de la resistencia a la compresión empleando agua como material fluidizante .....	126
Figura 115. Representación gráfica de la resistencia a la compresión empleando agua-mucílago como material fluidizante .....	127
Figura 116. Representación gráfica de los valores promedio de absorción de agua máxima inicial para el Banco 1 .....	128
Figura 117. Representación gráfica de los valores promedio de absorción de agua máxima inicial para el Banco 2.....	129
Figura 118. Variación de peso promedio diario por mezcla analizada.....	132
Figura 119. Variación del peso diario en términos de porcentaje.....	132

## 1. Introducción

Con el auge de la revolución industrial, los materiales empleados en la construcción a comienzos del siglo XX propiciaron el empleo de nuevas técnicas constructivas así como nuevos y mejorados materiales, que gracias a su versatilidad en resistencias, costos y procesos constructivos son materiales que rigen aún en las construcciones modernas (Luna, 2012). Así mismo a partir de este periodo, las fábricas fueron fuente de desarrollo económico y de ellas se formaron grandes poblaciones, todo esto traducido en más demanda de servicios, un caso específico alude al sector de la construcción.

Actualmente la industria de la construcción se ha consolidado como un pilar fundamental en la economía y desarrollo nacional; sin embargo, la urbanización que se experimenta día a día ha obligado a las grandes ciudades a la dispersión en la ocupación del territorio con altas inversiones en infraestructura y equipamiento, con el propósito de cubrir la necesidad de servicios básicos. Estos fenómenos han impactado de manera irreversible afectando los bienes y servicios ambientales que brindan los ecosistemas; resaltan entre dichos fenómenos, el aumento en la generación de los residuos de construcción y demolición y en consecuencia el manejo inadecuado de sus generadores así como de los actores responsables de la gestión de estos residuos.

Hoy por hoy los residuos de la construcción requieren una gestión integral y una dinámica inclusión en el ciclo de vida de la construcción (Rivera, 2007). A diferencia de lo que sucede en países desarrollados, los antecedentes sobre el reúso y reciclaje de los residuos de la construcción en México son mínimos, la generación de estos residuos, según estimaciones proporcionadas por las delegaciones políticas del Distrito Federal alcanza valores en el orden de 7,000 toneladas/día (NADF-007-RNAT-2013), menos de 1,000 toneladas/día son recibidos para reciclaje por la única empresa en el país dedicada al reciclaje de dichos residuos.

En este contexto se impone la búsqueda de soluciones eficientes para la gestión adecuada de los residuos de la construcción que logren minimizar los impactos ocasionados y que promuevan su elevado potencial de reciclaje y reúso como materia prima adecuada para ser reincorporada al ciclo productivo de este sector.

## 1.1 Justificación

El sector de la construcción representa un gran aporte al desarrollo económico y laboral del país; sin embargo es una actividad que demanda altos niveles de consumo de recursos y energía, siendo también fuente constante de generación de residuos, los cuales proceden en su mayor parte de excavaciones previas a la construcción, ejecución material de los trabajos de construcción y demoliciones así como de rehabilitación, reparación o demolición de edificaciones (Burgos, 2010).

Los residuos generados, por lo general son de difícil manejo y disposición, siendo estos clasificados por la Ley General de Prevención y Gestión Integral de los Residuos, (LGPGIR) como residuos de manejo especial, motivo que impide involucrarlos adecuadamente en la gestión de residuos sólidos municipales (LGPGIR, 2003).

Dada la problemática mencionada, no es válido considerar como una solución a esta problemática el freno a las actividades derivadas del sector constructivo, ya que es imprescindible el avance en materia de infraestructura en el desarrollo nacional.

El problema ambiental que conlleva la producción de residuos de la construcción se deriva no solo del creciente volumen de su generación, sino que también de su manejo, tratamiento y reincorporación al ciclo de la construcción, que todavía hoy es insatisfactorio en la mayoría de los casos (SMA, 2007).

Actualmente se avanza a pasos lentos en el desarrollo de legislación y normativa para abordar el tema de los residuos de la construcción, resumiendo que a la fecha a nivel nacional, existe únicamente la Norma Ambiental del Distrito Federal NADF-007-RNAT-2013, la cual tiene por objeto establecer la clasificación y especificaciones de manejo de los residuos de la construcción en el territorio del Distrito Federal; así mismo, aún se muestran limitadas las posibilidades de una expansión del mercado del reciclaje y valorización de los residuos, lo que hace que los costos de gestión para los residuos de construcción sean muchas veces poco viables económicamente.

Lo anterior hace necesaria la investigación y desarrollo de alternativas de reúso y reciclaje de los residuos de construcción, de bajo costo en su elaboración y de procesamiento sencillo. La presente investigación surge con la iniciativa del Parque Ecológico Tuzandepetl Veracruz, en la búsqueda por consolidarse como una Edificación Sustentable adoptando los requerimientos establecidos en la norma mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013 sobre las edificaciones sustentables en materia de residuos

sólidos, incentivando la reducción, reutilización y reciclaje de los residuos que se generen en todas las etapas del ciclo de vida de las diferentes edificaciones.

Con el fundamento anterior, en esta tesis se expone como alternativa para el aprovechamiento de los residuos de la construcción, la fabricación de ladrillos sustentables a partir del reciclaje de estos residuos generados en los procesos de excavación, edificación, mantenimiento y demolición. Así también se expone la factibilidad que la construcción de ladrillos sustentables implica y se pretende promover la nobleza de la tierra cruda como material de construcción al ser el material primordial en la fabricación de los ladrillos sustentables, ello con la finalidad de disminuir el impacto ambiental adverso, al contribuir en la reducción del gasto de energía y materias primas que requieren los ladrillos cocidos empleados convencionalmente.

## **1.2 Objetivo general**

Investigar alternativas sustentables de reciclaje de los residuos de construcción con énfasis en el estudio de la fabricación de ladrillos que empleen como materia prima: residuos de excavación, agregados reciclados, residuos de tala y agua-mucílago de nopal.

### **1.2.1 Objetivos particulares**

1. Analizar la normativa vigente en el tema de residuos de construcción, particularmente en México la norma ambiental NADF-007-RNAT-2013.
2. Investigar las condiciones de generación y aprovechamiento de los residuos de construcción a nivel nacional e internacional.
3. Fabricar ladrillos que utilicen como materia prima los residuos de excavación, residuos de tala, agregados reciclados y agua-mucílago de nopal evaluados técnicamente a través de pruebas mecánicas de resistencia a la compresión y absorción de agua.
4. Consolidar las características para la fabricación de ladrillos sustentables enfocadas al proceso constructivo y dosificación de materiales.
5. Integrar recomendaciones para los escenarios de aplicación de ladrillos sustentables fabricados a partir del reciclaje de los residuos de construcción.

## **1.3 Alcances**

1. El proyecto se basó en la normativa NMX-AA-164-SCFI-2013 y el proyecto de norma NADF-007-RNAT-2013.
2. La evaluación de calidad de los ladrillos se realizó bajo la normativa NMX-ONNCCE-Industria de la construcción.
3. La fabricación de ladrillos se realizó a partir de 3 tipos de suelos provenientes de ciudades que integran la megalópolis.
4. La metodología del estudio está dirigida para cualquier edificación que genere residuos de construcción, con las características de suelo planteadas.

## **2. Marco teórico**

El llamado “encuentro de dos mundos” en el siglo XVI fue también el encuentro de diferentes tecnologías, así los pueblos indígenas prehispánicos y su rica tecnología en construcción en tierra se encontraron con el pueblo español, a su vez heredero de la tradición tecnológica en construcción en tierra mediterránea tanto greco romana como árabe; lo cual generó un provechoso intercambio y en los siglos siguientes un gran desarrollo que dio origen a la nueva arquitectura hispanoamericana.

Durante el período colonial la construcción en tierra fue el sistema dominante en las ciudades hispanoamericanas, durante el siglo XIX continuó siéndolo aun cuando ya desde el siglo XVIII muchas de las principales construcciones se hicieron en piedra. El primer tercio del siglo XX vivió en Iberoamérica el último esplendor de la arquitectura de tierra, en el medio rural era el material dominante y en el medio urbano era aún mayoritario (González<sup>a</sup>, 2002).

A comienzos del siglo XX con el legado de la revolución industrial, los materiales empleados en la construcción propiciaron el uso de nuevos materiales y por consecuencia de nuevas técnicas constructivas que se emplean aún en las actuales construcciones (Luna, 2012).

A partir de las primeras décadas del siglo XX el ladrillo cocido y el uso del cemento portland tomaron un gran auge extendiéndose cada vez más y relegando el uso del adobe y la tierra cruda a la construcción urbana y rural de bajos recursos, fue a partir de ese momento que se inició la pauperización de la tecnología de construcción en tierra cruda.

La demanda fehaciente de infraestructura ha ocasionado paralelamente el aumento en la generación de residuos de construcción que dadas sus actuales condiciones de manejo, requieren una gestión integral y una dinámica inclusión en el ciclo de vida de las construcciones.

### **2.1. El escenario actual**

Actualmente la industria de la construcción es una de las industrias más importantes y sobresalientes en México; es la sexta actividad económica que mayor valor agregado genera a la producción nacional. Durante el periodo 2004-2009 aportó el 6.9% del Producto Interno Bruto total de la economía nacional

en el mismo periodo este importante sector, generó empleo a aproximadamente 5.6 millones de hombres y mujeres, lo que equivale al 8% de los empleados a nivel nacional, siendo la cuarta actividad económica con mayor capacidad de generación de empleo. Asimismo la industria de la construcción genera 1.8 millones de empleos de forma indirecta (CMIC, 2014).

De acuerdo a la edición del Índice Global de Competitividad en Infraestructura del periodo 2012-2013 basado en la evaluación de la calidad general de la infraestructura de un país mediante 7 pilares básicos de infraestructura, México se encuentra ubicado en la posición número 68 de un total de 144 países en la calidad de la infraestructura, 50 por la calidad de sus carreteras, 60 por la calidad de su infraestructura ferroviaria, 64 por las particularidades de sus puertos, 64 por sus aeropuertos, 79 por la eficiencia del suministro eléctrico y 73 por la calidad de sus telecomunicaciones (CMIC, 2012) de acuerdo a la evaluación mundial mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1. Evaluación de la calidad de la infraestructura a nivel internacional

PAÍS POSICIÓN	POSICIÓN EN INFRAESTRUC- TURA	CALIDAD CARRETERA	CALIDAD FERROVIARIA	CALIDAD PORTUARIA	CALIDAD AÉREA	CALIDAD SUMINISTRO ELÉCTRICO	CALIDAD DE LAS TELECOMUNI- CACIONES
<b>Hong Kong</b>	1	8	3	3	2	3	3
<b>Singapur</b>	2	3	5	2	1	6	30
<b>Alemania</b>	3	10	7	9	7	19	2
<b>Francia</b>	4	1	4	26	10	9	7
<b>Reino Unido</b>	5	24	16	12	22	8	10
<b>Corea</b>	6	17	10	20	26	32	4
<b>España</b>	7	13	8	14	17	30	26
<b>Japón</b>	8	14	2	31	46	36	12
<b>Canadá</b>	9	16	15	16	23	14	16
<b>E.E.U.U.</b>	10	20	18	19	30	33	15
<b>Taiwan</b>	11	21	11	29	44	28	1
<b>Italia</b>	12	57	40	89	67	38	35
<b>Malasia</b>	13	27	17	21	24	35	85
<b>Panamá</b>	14	49	32	4	6	43	81
<b>Chile</b>	15	23	64	34	39	53	68
<b>Tailandia</b>	16	39	65	56	33	44	95
<b>China</b>	17	54	22	59	70	59	58
<b>Uruguay</b>	18	81	115	46	63	37	44
<b>México</b>	19	50	60	64	64	79	73

Fuente: CMIC,2012.

A partir del 2013 el reto fue que cada uno de los pilares evaluados, avance para que en los próximos años alcance los mejores niveles en infraestructura y México pueda lograr una mejor posición en el ranking mundial.

Pese a la importante presencia y el significativo aporte del sector de la construcción en el presente y futuro desarrollo nacional, actualmente presenta un compromiso desafiante en el marco del desarrollo sostenible. Es de relevancia señalar que este sector forma parte de los inventarios de Gases de Efecto Invernadero (GEI), como parte del sector de energía.

Estudios realizados indican que sus actividades involucradas son causa participante del deterioro de la tierra, el agotamiento de los recursos, la contaminación del aire, la contaminación acústica, la contaminación del agua y la generación de residuos (Aldana y Serpell, 2012).

Según los últimos datos que manejan los expertos, el principal impacto producido por el sector de la construcción está relacionado con la explotación del suelo y sus efectos sobre el ciclo del agua (AEB, 2007), así también es responsable de un 10-30% de los residuos generados en todo el mundo (Srouf et al., 2013) y es uno de los mayores usuarios de energía, materiales y agua (Horvath, 2004).

Este sector propicia durante la extracción y la transformación, el 40% de las emisiones de CO<sub>2</sub> y el 60% del consumo de las materias primas. Un 80% de los impactos negativos sobre el medio están relacionados con el uso y el abuso de la energía y del agua (AEB, 2007).

De acuerdo a Rivela (2012), el sector de la construcción moviliza el 10% de la economía mundial y absorbe el 50% de todos los recursos mundiales, lo que la convierte en la actividad menos sostenible del planeta.

### **2.1.1. El concreto y el cemento**

Dado el panorama de desarrollo y crecimiento nacional, las proyecciones indican que la producción de materiales involucrados en el sector constructivo de los diferentes pilares aumentará considerablemente, entre ellos destaca la demanda fehaciente del material más utilizado por la humanidad, sólo el segundo después del agua, el concreto (Suppen, 2013).

El concreto es la unión de cemento, agua, grava, arena y aditivos a través de mezclado. El cemento representa un 15% del concreto, sin embargo su presencia es esencial (HOLCIM, 2013). Se estima

que la industria del concreto está consumiendo agregados naturales a una tasa aproximada de 8 billones de toneladas cada año (IMCyC, 2001).

Asimismo la producción del cemento Portland (CP) tiene serias implicaciones ambientales, la química del CP es distinta a la de los comercializados en el siglo XIX en el cual surge la patente que data de 1824 en Inglaterra, y la química y los procesos de fabricación han evolucionado poco desde los años 60 hasta hoy (Suppen, 2013).

La producción mundial anual de CP ha alcanzado 2,800 millones de toneladas y podría llegar a 4,000 millones de toneladas aproximadamente (Schneider et al., 2011). Además de otras materias primas, cada tonelada de Cemento Portland requiere aproximadamente 1.5 tonelada de piedra caliza y cantidades considerables de energía eléctrica derivada de combustibles fósiles (IMCyC, 2001).

La Cámara Nacional del Cemento indicó que en el año 2012 México produjo 36.2 millones de toneladas de cemento y consumió 34.6 millones de toneladas, lo que equivale a 295 kg/persona equivalente a más de 1 m<sup>3</sup> de cemento per cápita (CANACEM, 2012).

En este sentido, se calcula que la producción del Cemento Portland requiere 4900 MJ/tonelada, equivalente a aproximadamente 180 kg de carbón para alcanzar 1450 °C en el horno y otras operaciones de procesamiento (Suppen, 2013) y se emiten a la atmosfera 0.87 kg de CO<sub>2</sub> por cada kg de cemento producido. Las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se encuentran entre las causantes más importantes de los GEI que representan el 82% del total.

Cuando todas las emisiones de Gases de Efecto Invernadero generadas por las actividades humanas se consideran, la industria de fabricación de cemento es responsable del 5% del total de emisiones de GEI antropogénicas (Damtoft et al., 2007).

La problemática es de suma importancia ya que el límite superior de seguridad de CO<sub>2</sub> atmosférico es de 350 ppm, el cual se rebasó desde 1988 y actualmente se tienen 398.28 ppm de CO<sub>2</sub> (Earth System Research Laboratory, 2014) acelerando el problema del efecto invernadero causado por la emisión de diversos GEI.

### 2.1.2. Materiales altamente demandados en la industria de la construcción

La demanda de infraestructura además del concreto, exige la producción y explotación de diversos materiales para la construcción tanto pública como privada, entre ellos los más significativos son: el concreto reforzado, el acero, los ladrillos, la madera y el vidrio.

Aunque la producción del cemento arroja cifras realmente preocupantes en términos de consumo de energía y emisiones atmosféricas, así como el consumo de materias primas y recursos minerales, en el uso del concreto fabricado a base de Cemento Portland (CP), una ventaja crucial es que la energía requerida para producir el concreto es menor que la energía requerida para fabricar otros materiales de construcción (Escalante, 2013) que figuran como significativos en este sector.

Al respecto en la Figura 1 se presenta la cantidad de energía empleada para producir algunos de los materiales más demandados en la industria de la construcción, en la cual se distingue que el vidrio y el acero requieren 9 y 35 veces respectivamente más de energía para su fabricación que el concreto, e incluso la producción de ladrillo demanda mayor cantidad de energía que el concreto.

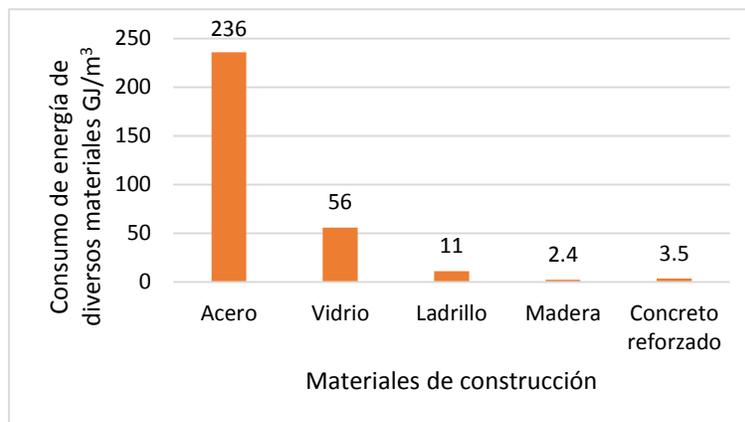


Figura 1. Consumo de energía por unidad de volumen de materiales de construcción

Fuente: Escalante, 2013.

La Figura 2 representa datos comparativos sobre las emisiones generadas de CO<sub>2</sub> por unidad de peso de estos materiales de construcción, observando que las emisiones generadas por la producción de vidrio son 16 veces mayor a las del concreto y las emisiones generadas por la producción de plásticos corresponden a 45 veces más que las emisiones por concreto.

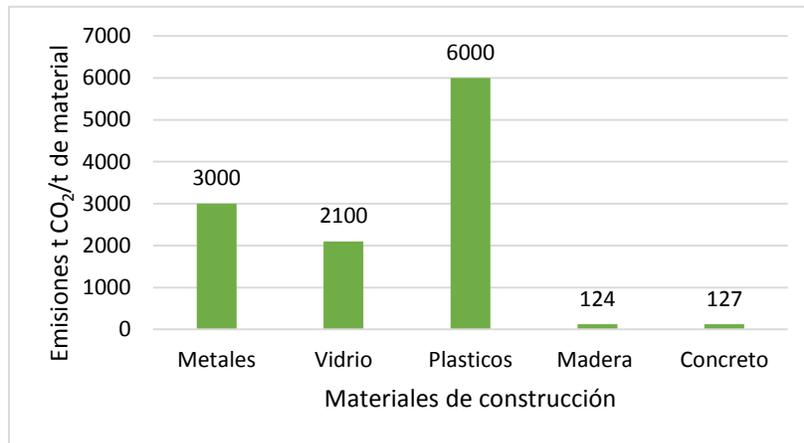


Figura 2. Emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de peso para diversos materiales de construcción

Fuente: Escalante, 2013.

El análisis de los datos obtenido de Escalante, 2013, exponen que el concreto, es un material que posee características de versatilidad, genera menores impactos al ambiente y posee características de reciclaje de hasta un 100% de su composición.

### 2.1.3. Ladrillos artesanales

Actualmente las ladrilleras artesanales son mayormente de organización informal, no reconocidas por los estados y por consiguiente excluidas de las políticas públicas, sociales, económicas y ambientales pese a constituirse como una actividad que contribuye al fortalecimiento de la industria de la construcción y a la generación de más de 500,000 empleos. Se estima que las ladrilleras artesanales producen entre el 30% y 50% de la producción nacional de ladrillo (Bikel, 2010).

En el territorio nacional existen ladrilleras de tipo mecanizado y artesanal. Se estima que a nivel nacional existen 16 mil 953 productores artesanales que usan diversos combustibles en su proceso de cocción: desde leña, madera, llantas, nopal seco, telas, hasta los derivados del petróleo. Según el listado nacional, Puebla es el estado que ocupa el primer lugar con 4,316 ladrilleras, seguido por Jalisco con 2,500 y por Guanajuato con 2,362 ladrilleras que en promedio producen 279 millones 660 mil 800 unidades al año (Red de ladrilleras, 2014). En la Figura 3 se detalla el número ladrilleras artesanales que operan en el país .

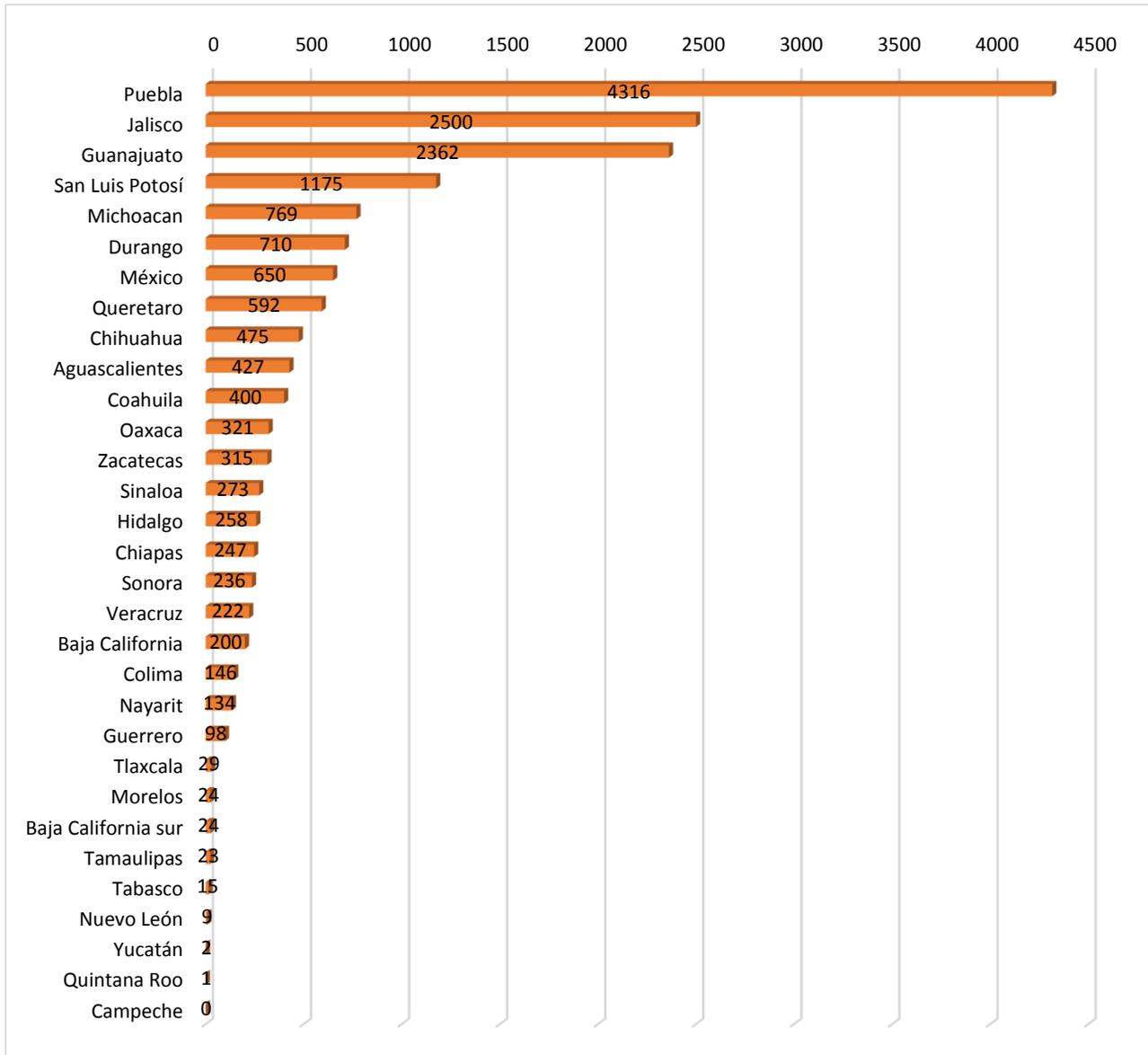


Figura 3. Listado del número de ladrilleras artesanales en operación a nivel nacional

Fuente: Red de ladrilleras, 2014.

Si bien la producción de estos materiales provee de insumos de calidad y de bajo costo al sector de la construcción de viviendas, ya que a nivel nacional el 86.3% de las viviendas son fabricadas de materiales como tabique, ladrillo, block, piedra, cantera o cemento (INEGI<sup>a</sup>, 2010), estos procesos productivos generan impactos al ambiente. De la producción de ladrillos destaca la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, ocasionada durante el proceso de cocción debido a la quema de combustibles como se observa en el ejemplo de la Figura 4 (Ministerio de la Producción, 2010).

Las ladrilleras artesanales utilizan combustibles con un impacto ambiental adverso en hornos de baja eficiencia, por lo cual son fuentes emisoras de Gases de Efecto Invernadero. Se estima que una ladrillera artesanal con una producción aproximada anual de 49,011,000 unidades, genera aproximadamente 57,336 t de CO<sub>2</sub>, 180.744 t de CH<sub>4</sub> y 5.860 t de N<sub>2</sub>O (Cárdenas, 2011).



Figura 4. Emisión de GEI de una ladrillera artesanal en operación

Fuente: Aréchiga et al., 2012.

Al comparar las emisiones generadas por las ladrilleras artesanales de 6,617 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> eq (presentadas en la Tabla 2) con los resultados de CO<sub>2</sub> del Inventario Nacional de Emisiones de GEI (2006), las cuales ascienden a 709 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> eq, éstas, equivalen a 1.09 % de las emisiones generadas a nivel nacional (Aréchiga et al., 2012).

Tabla 2. Gases de Efecto Invernadero causado por ladrilleras artesanales a nivel nacional

Gases de Efecto Invernadero	Equivalencia de CO <sub>2</sub> de una medida de gas (CO <sub>2</sub> eq)	Emisiones de GEI a nivel nacional (t)	CO <sub>2</sub> eq
Bióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	1	6,305,436	6,305,436
Metano (CH <sub>4</sub> )	21	9,912	208,152
Óxido Nitroso (N <sub>2</sub> O)	310	335	103,850
		Total CO <sub>2</sub> eq	6,617,438

Fuente: Aréchiga et al., 2012.

## 2.2. Los residuos de la construcción

**Residuo:** *Material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en esta Ley y demás ordenamientos que de ella deriven (LGPGIR,, 2003).*

Los residuos de la construcción (RC) son clasificados por la LGPGIR como Residuos de Manejo Especial (RME). Los cuales son aquéllos residuos generados en los procesos productivos que reúnen las características para ser considerados como residuos sólidos urbanos o peligrosos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.

Específicamente los residuos de la construcción *son los materiales, productos o subproductos generados durante las actividades de excavación, demolición, ampliación, remodelación, modificación o construcción tanto pública como privada; así como el producto proveniente de la excavación cuando éste se haya alterado en sus condiciones físicas, químicas y biológicas originales (NADF-007-RNAT-2013).*

En el Distrito Federal durante el año 2003 se reportó una generación diaria de 3,000 toneladas de residuos de la construcción (Rivera, 2007), en el año 2008 la generación se elevó reportando valores de 5,000 toneladas/día (Hernández et al., 2008) y según estimaciones proporcionadas por las delegaciones políticas del Distrito Federal actualmente la generación de estos residuos alcanza valores en el orden de 7,000 toneladas/día (NADF-007-RNAT-2013) y paralelamente en el país se generan diariamente alrededor de 33, 600 toneladas de residuos de construcción (Granell, 2014).

En este contexto cabe resaltar que en el último semestre del año 2008, las 10 principales obras públicas del gobierno capitalino generaron 14 millones de m<sup>3</sup> de residuos de la construcción, equivalentes a aproximadamente 21 millones de toneladas que fueron depositados como los últimos residuos de la construcción en el relleno sanitario de Bordo Poniente, por lo que en consecuencia se llegó a un acuerdo entre los gobiernos federal y local para el cierre gradual de este relleno sanitario, según lo informado por la Secretaría de Obras del Distrito Federal (González et al., 2010).

En materia normativa la Dirección de Regulación Ambiental de la SEDEMA presentó en el año 2014, el Proyecto de Norma PROY-NADF-007-RNAT-2013 y a partir del mes de mayo del año 2015 entró

en vigor para el Distrito Federal como norma ambiental NADF-007-RNAT-2013, cuya finalidad es establecer la clasificación y especificaciones de manejo de los RC para optimizar y fomentar su aprovechamiento y reducir significativamente su disposición final inadecuada.

La principal aportación de la norma NADF-007-RNAT-2013 es que obliga a los generadores de estos residuos al manejo integral de los mismos, especificando una clasificación oficial en 6 rubros principales como se observa en la Figura 5, los cuales son utilizados para separar, enviar a tratamiento y disposición final a estos residuos. Así también establece las obligaciones normativas vigentes de los actores involucrados en el manejo integral de los RC para el Distrito Federal de acuerdo a la Tabla 3.

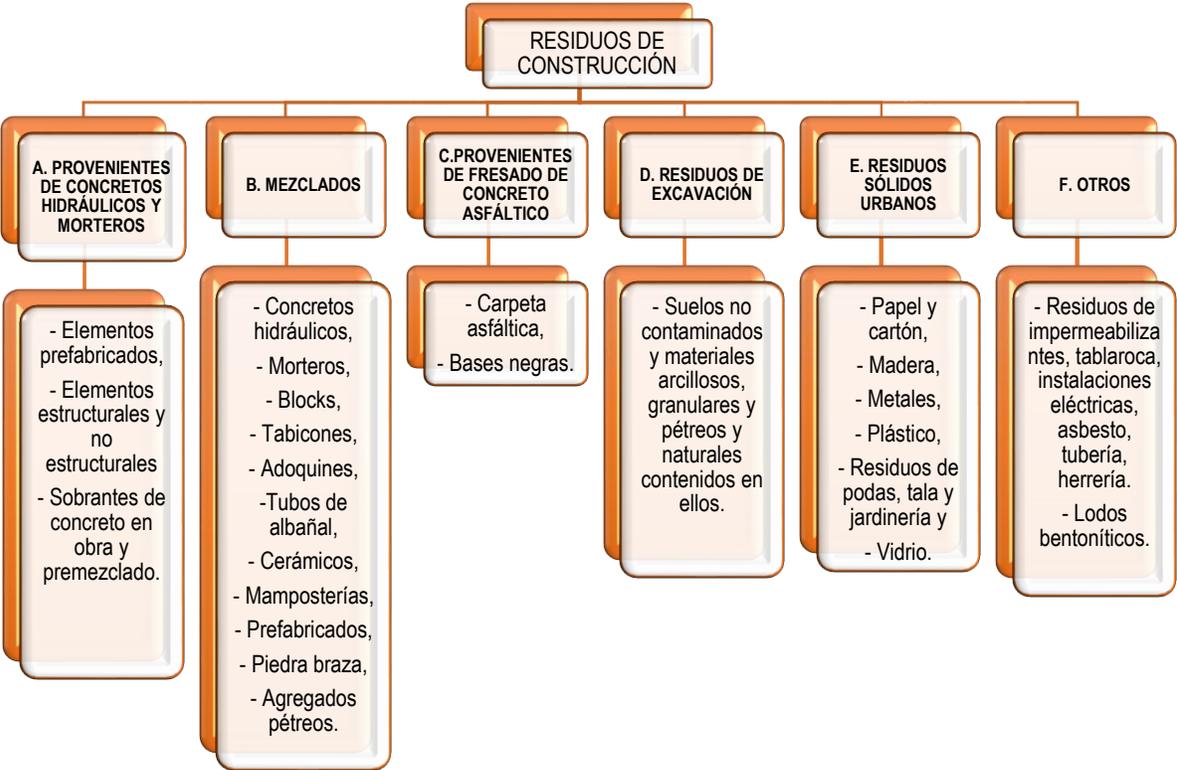


Figura 5. Clasificación de los residuos de la construcción

Fuente: NADF-007-RNAT-2013.

Tabla 3. Requisitos para el manejo integral de los RC establecidos en la NADF-007-RNAT-2013

VOLUMEN DE GENERACIÓN	GENERADOR	PRESTADOR DE SERVICIOS DE TRANSPORTE	CENTRO DE ACOPIO	CENTROS DE RECICLAJE Y SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL AUTORIZADOS
Hasta 3 m <sup>3</sup>	1.- Aviso a la delegación del inicio de obra. 2.- Responsiva de entrega a centros de acopio, reciclaje o sitios de disposición final autorizados. 3.- Si contrata un prestador de servicios de transporte autorizado deberá solicitar manifiesto de entrega-recepción.	Manifiesto entrega-recepción	Responsiva de recepción de los residuos	Manifiesto de entrega-recepción
Más de 3 y hasta 7 m <sup>3</sup>	1.- Dar aviso a la delegación del inicio de obra y adherirse a un plan de manejo. 2.- Responsiva de entrega a centros de acopio, reciclaje o sitios de disposición final autorizados. 3.- Si contrata un prestador de servicios de entrega autorizado deberá solicitar manifiesto de entrega recepción.			
Más de 7m <sup>3</sup>	1.- Contar con un plan de manejo propio autorizado y en su caso con la autorización en materia de impacto ambiental. 2.- Contratar a un prestador de servicios de transporte autorizado. 3.- Manifiesto entrega-recepción.	Manifiesto entrega-recepción	Manifiesto entrega-recepción	

### 2.2.1. Composición y cuantificación de los residuos de la construcción

Por la complejidad de la industria de la construcción, ya que cuenta con diferentes partes interesadas, diferentes actores y diferentes intereses, la gestión de residuos es mucho más compleja que en otros sectores. Esto debido a que la generación de residuos en los proyectos de construcción se da desde etapas muy tempranas y cuando la vida útil de una obra llega a su fin se convierte en residuos a menos que se recupere y esta recuperación no llega al 100 % (Aldana y Serpell, 2012).

Se ha reconocido que la cuantificación adecuada de los residuos es de gran importancia para el establecimiento de un sistema de gestión eficaz y amplía la posibilidad de soluciones económicas y ambientales de manejo (Bergsdal et al., 2007).

Un acercamiento de la composición de los residuos de construcción se da al identificar las etapas comunes y procesos constructivos de las edificaciones, implicando obras tanto públicas como privadas siendo de mayor o menor escala, así como en la identificación de residuos en cada una de estas etapas; la identificación y clasificación de estos residuos, muestra que el mayor porcentaje de ellos se genera principalmente en dos etapas contundentes del ciclo constructivo, las cuales son identificadas como: Etapa 1 “Preparación del terreno” descrita a continuación en la Tabla 4 y la Etapa 2 nombrada como etapa de “Construcción” descrita en la Tabla 5.

Sin embargo no se descarta la generación de residuos en etapas posteriores. La etapa final de cierre de obra es aquella en la que en ocasiones se presenta el mayor volumen de generación de RC debido principalmente a la liberación de espacios provisionales ocupados durante la construcción.

Tabla 4. Descripción de la Etapa 1. Preparación del terreno

1. TALA	2. DESMONTE	3. DESPALME
<p>Es el corte de árboles y arbustos dentro del área de construcción y en accesos al sitio de construcción; generalmente es de gran magnitud a diferencia del desmonte, por lo cual se generan grandes volúmenes de residuos.</p>	<p>Consiste en el retiro de la vegetación menor para el derecho de vía para la construcción de caminos y tuberías de conducción; comprende las actividades de desenraice y limpieza.</p>	<p>Es la extracción y el retiro de la capa superficial del terreno natural, que por sus características es inadecuada para la construcción de terracerías y determinada por la cantidad de cortes y terraplenes.</p>
		

Tabla 5. Descripción de la Etapa 2. Construcción

1. TRAZO Y NIVELACIÓN	2. EXCAVACIÓN	3. EDIFICACIÓN
<p>Consiste en la adecuación de los niveles de terreno requeridos por el proyecto de obra; el trazo delimita las áreas correspondientes de los ejes de la edificación previas al proceso de excavación. Se realiza con cal hidráulica e hilo de nylon.</p>	<p>Es la extracción del suelo de manera manual, mecánica o mixta en la cual se adecuan las dimensiones de cimentación y alojamiento de instalaciones.</p>	<p>Es el proceso posterior a los trabajos de excavación, inicia con el desplante de la cimentación e integra los procesos de obra negra, instalaciones, acabados de obra exterior, pavimentos, banquetas y guarniciones.</p>
		

Una identificación muy aproximada de los residuos generados por etapa constructiva, se describe a continuación en la tablas 6 y 7 respectivamente.

Tabla 6. Identificación de residuos generados en la Etapa 1. Preparación del terreno

1. TALA	2. DESMONTE	3. DESPALME
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Material maderable, producto de árboles y arbustos,</li> <li>-Troncos,</li> <li>-Aserrín,</li> <li>-Residuos orgánicos,</li> <li>-Residuos de herramienta y maquinaria (filtros, recipientes de anticongelantes, lubricantes, bandas de seguridad),</li> <li>-Residuos de comida y</li> <li>-Residuos del personal (latas, plásticos, papel, etc.).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Malezas,</li> <li>-Hierbas,</li> <li>-Fibras o residuos de siembras,</li> <li>-Troncos,</li> <li>-Ramaje,</li> <li>-Materia orgánica calcinada,</li> <li>-Residuos de herramienta y maquinaria (filtros, recipientes de anticongelantes, bandas de seguridad),</li> <li>-Letreros (madera, plástico, metal),</li> <li>-Residuos de comida y</li> <li>-Residuos del personal (latas, plásticos, papel, etc.).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Material granular de corte y terraplén (gravas, arenas, arcillas, limos, etc.),</li> <li>-Rocas,</li> <li>-Residuos de herramienta y maquinaria (filtros, recipientes de anticongelantes, bandas de seguridad),</li> <li>-Letreros (madera, plástico, metal),</li> <li>-Residuos de comida,</li> <li>-Residuos del personal (latas, plásticos, papel, etc.).</li> </ul>

Tabla 7. Identificación de residuos generados en la Etapa 2. Construcción

1. TRAZO Y NIVELACIÓN	2. EXCAVACIÓN	3. EDIFICACIÓN
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Suelos,</li> <li>-Empaques de bultos cal hidráulica (papel),</li> <li>-Residuos de hilo y carretes,</li> <li>-Metal (Clavos y alambres),</li> <li>-Residuos de herramienta y maquinaria (filtros, recipientes de anticongelantes, lubricantes, bandas de seguridad),</li> <li>-Residuos de comida y</li> <li>-Residuos del personal (latas, plásticos, papel, etc.).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Suelos (generalmente limos y arcillas),</li> <li>-Residuos de herramienta y maquinaria (filtros, recipientes de anticongelantes, lubricantes, bandas de seguridad),</li> <li>-Letreros,</li> <li>-Residuos de comida,</li> <li>-Residuos del personal (latas, plásticos, papel, etc.).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bloques, ladrillos, adoquines, cerámicos,</li> <li>-Material granular,</li> <li>-Concreto simple y armado,</li> <li>-Prefabricados,</li> <li>-Materiales asfálticos,</li> <li>-Maderas, triplay, aserrín, etc.,</li> <li>-Material de instalaciones eléctrica, hidráulica y sanitaria,</li> <li>-Material de acabados: cal, yeso, morteros, resinas, etc.,</li> <li>-Varillas, alambres, cancelería, láminas.,</li> <li>-Residuos de herramienta y maquinaria: latas, filtros, estopas, aceites.</li> </ul>

La identificación y clasificación mostrada en las tablas 4, 5, 6 y 7 representan un acercamiento a la clasificación de los residuos generados en la construcción de obras de diversa índole, de lo cual con base en la clasificación de residuos dada por la LGPGIR (2003), se distingue que los residuos generados en el sector de la construcción se conciben integrados por residuos sólidos urbanos, residuos de manejo especial y en menores casos se pueden encontrar residuos peligrosos.

Actualmente, la cuantificación del volumen de generación de los RC se enfrenta con el problema de la falta de datos fiables, lo que ha obligado a manejar estimaciones efectuadas a través de cálculos indirectos o basados en muestras de limitada representatividad. En la literatura se han propuesto numerosas metodologías para cuantificar la generación de los RC, una revisión analítica realizada por Zezhou et al., (2014) a partir de 57 trabajos compilados por procedimientos rigurosos en el tema RC, describe los métodos existentes de cuantificación de estos residuos, las cuales son clasificados en 5 rubros principales, como se detalla en la Tabla 8.

Tabla 8. Metodologías de cuantificación de la generación de RC

<b>Método</b>	<b>Variables</b>
1. Método de visita al sitio	Medición directa.
	Medición indirecta.
2. Método de cálculo de la tasa de generación	Per cápita multiplicada.
	Extrapolación del valor financiero.
	Cálculo basado en área de construcción.
3. Método de análisis de por vida	Análisis de vida del edificio.
	Análisis de vida del material.
4. Método de acumulación - sistema de clasificación.	
5. Método de modelado de variables.	

Fuente: Zezhou et al., 2014.

De la clasificación descrita, resaltan los siguientes estudios y métodos planteados, a través de los cuales se pretende cuantificar la generación de residuos en diversas obras.

Poon et al., (2001) plantea que los residuos de construcción generados en una obra son del orden del 10 al 20% del peso total de los materiales entregados en obra.

Solís-Guzmán et al., (2009) desarrolló un modelo de cuantificación de residuos nombrado como Alcores a partir del análisis de 100 viviendas empleando tres coeficientes a estimar: el volumen demolido (CT), el volumen de escombros (CR) y el volumen de envases (CE), y en el cual incluye dos estudios de caso para ilustrar la utilidad del modelo.

Otros autores han tomado la iniciativa de realizar investigaciones en tiempo real de la obra. En un estudio realizado en Brasil se determinó que para 3 edificios la cantidad promedio de residuos producido equivalía a  $0.10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ , estos residuos incluían restos de mortero, ladrillos, cerámicos, PVC, acero, alambre, madera, plásticos, principalmente. En la Universidad Politécnica de Hong Kong, se comprobó este índice al realizar un estudio en 32 obras de distinto tipo (Galarza , 2011), mediante las cuales se obtuvieron los datos para el cálculo de índices de generación por tipo de edificación, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Índices de residuos generados en diferentes edificaciones

Tipo de Edificación	Área construida (m <sup>2</sup> )	Residuos generados (m <sup>3</sup> )	Índice de residuos de construcción (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )
Vivienda	55,817	5,267	0.09
Vivienda	4,300	297	0.07
Vivienda	3,162	346	0.11
Vivienda	12,574	1,867	0.15
Oficina	3,302	279	0.08
Oficina	2,814	232	0.08
Oficina	109,415	7,554	0.07
Edificio	87,360	6,861	0.08
Edificio	86,497	7,244	0.08
Edificio	5,250	583	0.11
Edificio	102,780	15,302	0.15
Colegio	8,390	712	0.08
Otros	2,870	365	0.13
<b>PROMEDIO</b>	<b>484,531</b>	<b>46,909</b>	<b>0.1</b>

Fuente: Galarza, 2011.

De igual manera se realizó un estudio similar en Lima, Perú por Galarza (2010) mediante el cual pudo comprobar que el índice de RC expresado en m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> es un buen indicador para medir la eficiencia de la gestión de residuos al final de la obra, pero puede resultar impreciso al utilizarse durante todo el proyecto de obra, ya que como se observa en la Figura 6, en el gráfico correspondiente a la Obra 1, existe un punto de quiebre en el momento en que se termina la etapa de montaje o armado de la edificación y después de ello se eleva la generación al finalizar la obra incrementado el índice de generación de los RC.

Paralelamente en el mismo gráfico, la Obra 2 representa la medición de la generación de residuos en condiciones similares empleando medidas de control de la generación, produciendo mejores resultados y una valor típico en el índice de generación.

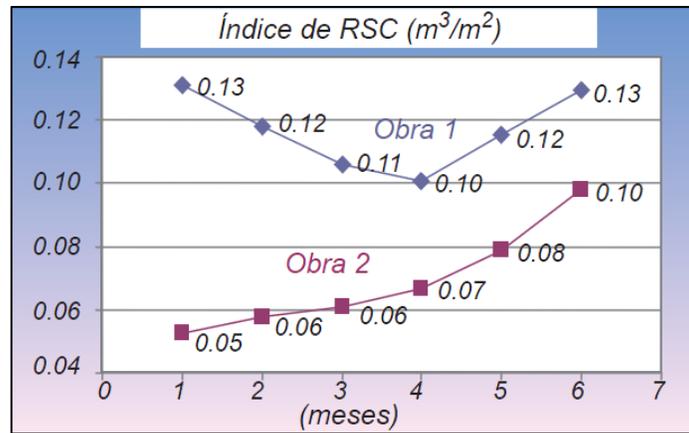


Figura 6. Determinación del índice de generación en Lima, Perú

Fuente: Galarza, 2010.

De igual manera en México Martel (2008) establece una metodología para el manejo de los RC, realizando un estudio similar en campo en el que determina el porcentaje de generación a partir de cuatro obras de edificaciones: dos obras de construcción, una de demolición y una de remodelación.

En el contexto de la cuantificación de los RC, Kourpanis et al., (2008) sugieren un modelo matemático para el cálculo de la generación de estos residuos durante la construcción desarrollado por la NTUA (National Technical University of Athens) empleando la ecuación 1.

$$CW = [NC + OC] * V * D \dots\dots\dots Ec. 1$$

Donde CW es la cantidad de residuos generados, NC es la superficie de construcción nueva, OC es la superficie de construcción adicional, V es el volumen de residuos de construcción generado por 100 m² de superficie (m³ por 100 m²) y D es la densidad de los residuos de construcción.

Paralelamente en un estudio realizado en Grecia por Fatta et al., (2003) para aproximar la generación de residuos propone tres supuestos básicos: que por cada 1,000 m² de actividad de la construcción implican la generación de 50 m³ de residuos, que cada demolición corresponde a la construcción de 60 m² y que el valor medio de la densidad de los RC es de 1.5 t/m³.

No existe una estandarización para el cálculo de la generación de residuos de construcción generados, por lo cual se han adoptado valores típicos para estimar los volúmenes de generación.

Entre los parámetros de generación mayormente utilizados, se estima que en una obra de demolición se generan 900 kg de residuos por m<sup>2</sup> y que en una obra nueva se generan 200 kg de residuos por m<sup>2</sup> construido; por otro lado se estima que por 1 m<sup>3</sup> de obra construida se generan 0.068 m<sup>3</sup> de residuos de construcción estimando un peso volumétrico de 1.5 toneladas por cada m<sup>3</sup> de residuos, a partir de la estimación del peso volumétrico se calcula que por cada m<sup>3</sup> de obra construida se generan 102 kg de residuos de construcción estableciendo un parámetro de 100-200 kg de residuos por m<sup>3</sup> de construcción (Castells, 2012).

Se han adoptado parámetros en los índices de generación típicamente empleados, mediante los cuales se estima el volumen de residuos por tipo de obra, como ejemplo del establecimiento de dichos índices en la Tabla 10 se presenta el caso de la Unión Europea.

Tabla 10. Índices de generación de RC por m<sup>2</sup> de edificación

<b>Tipo de construcción</b>	<b>RC por m<sup>2</sup> de edificación</b>	
Obras de edificios nuevos	120	kg/m <sup>2</sup> construido
Obras de rehabilitación	338.7	kg/m <sup>2</sup> rehabilitado
Obras de demolición total	1,129	kg/m <sup>2</sup> demolido
Obras de demolición parcial	903.2	kg/m <sup>2</sup> demolido

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, 2006.

En México, considerando el peso volumétrico de 1.5 t/ m<sup>3</sup> se estima que por cada m<sup>2</sup> de obra nueva construida se generan 200 kg de estos residuos (Hernández et al., 2008), dichos datos, pueden ser utilizados para calcular un índice similar al establecido en otros países, al convertir la cantidad generada de residuos por m<sup>2</sup> de construcción a unidades de volumen, es decir 200 kg a unidades de volumen, partiendo del peso volumétrico de 1.5 t/m<sup>3</sup> se obtiene un índice de 0.13 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, dicho valor es semejante a los índices empleados internacionalmente.

Al igual que en el caso de la generación y cuantificación de los RC, de manera general la información sobre el destino final de los RME (Residuos de Manejo Especial) es aún escasa. En la Figura 7 se describe gráficamente en porcentaje la disposición final en México para los RME por tipo de localidad.

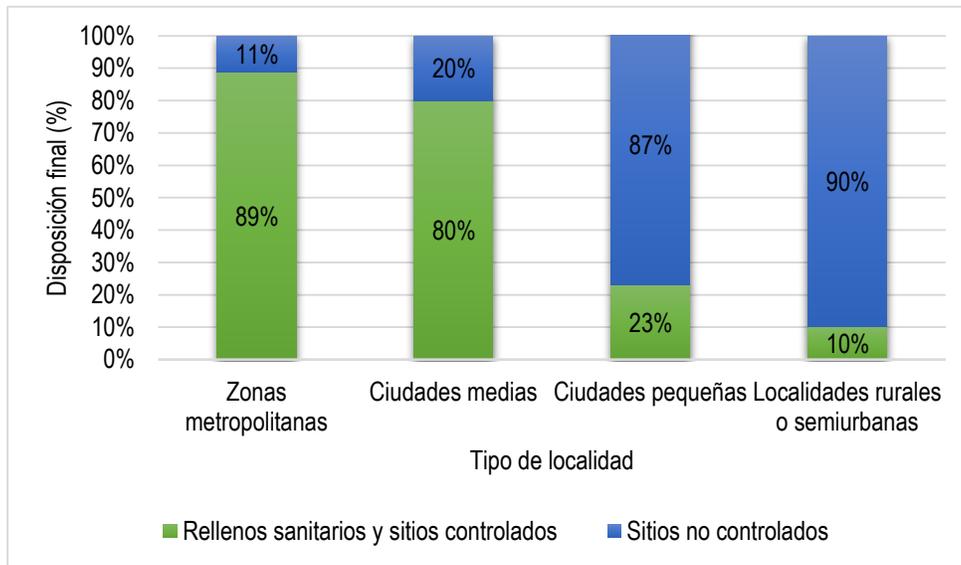


Figura 7. Disposición final de los RME

Fuente: SEMARNAT, 2012.

No obstante el diagnóstico básico citado anteriormente reporta que para algunos de los RME, puede ser aprovechado un porcentaje de su volumen; en el periodo citado se aprovechó anualmente el 68% de los residuos producidos en las tiendas de autoservicio, 49% del papel y cartón, 32.2% de los residuos aeroportuarios, 4% de los residuos de actividades pesqueras, 3.1% de las pilas y 1.5% de los residuos de hoteles (SEMARNAT, 2012), pese a estos estudios no se encuentran datos reportados de aprovechamiento de los residuos de la construcción.

En el sector formal por cuestiones de tiempo y también de costumbre, los residuos no se separan en la fuente, la lejanía a los sitios de reciclaje y/o de disposición final autorizados y el costo de transporte incluso el mal estado de estos equipos, obligan a que los residuos pasen por depósitos temporales (Tron, 2010) e incluso terminen siendo depositados clandestinamente en terrenos baldíos y en el mejor de los casos en predios “acondicionados” para su recepción; en el sector informal se solapa lo anterior, con supuestos recicladores o transportistas de estos residuos que a cambio de una remuneración depositan los residuos en sitios no autorizados sin la menor conciencia social y ambiental que ello representa.

## 2.2.2. Generación de los residuos de construcción a nivel internacional

Los porcentajes predominantes en la generación de residuos, corresponden a los residuos procedentes de los procesos de excavación debido principalmente a la magnitud de la actividad.

A continuación se presenta información rescatada, en la que se describe la generación porcentual de residuos de la construcción a nivel internacional integrando países de América como Argentina, Chile, Costa Rica, Estados Unidos y países de la Unión Europea. De la generación típica reportada para el Distrito Federal en la Tabla 11, se observa que el mayor volumen de generación corresponde a los residuos provenientes de las excavaciones, seguidos por los residuos mezclados como prefabricados y de mamposterías y enseguida por los residuos de concreto.

Tabla 11. Generación de residuos de la construcción en el Distrito Federal

<b>Residuo</b>	<b>Porcentaje</b>
Material de excavación	39
Elementos mezclados, prefabricados y pétreos	24
Concreto	24
Asfalto	0.3
Yeso, madera, cerámica, plástico, metales, RSU.	12
Otros	0.7

Fuente: CMIC, 2013.

En la Tabla 12 se detallan los datos de la composición de los RC reportados en Chile, en los cuales el mayor porcentaje de generación se compone por material granular (áridos) seguido por materiales derivados del cemento, pudiendo ser concreto simple o concreto armado y enseguida se encuentran los residuos de mampostería, en este caso específicamente reportados como ladrillos.

Tabla 12. Generación de residuos de la construcción en Chile

<b>Residuo</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Áridos	78.7
Cementos	11.2
Ladrillos	5.4
Revestimientos plásticos	2.4
Materiales maderas, yesos, tuberías	2.4

Fuente: Burgos, 2010.

En el caso de Argentina en primer lugar se encuentran los residuos derivados de actividades de mampostería conformados principalmente por ladrillos y bloques, en seguida se encuentran los residuos derivados del hormigón y en tercer lugar los residuos provenientes de las excavaciones conformado principalmente por limos y arcillas, es significativo resaltar la diferencia en cifras en países latinoamericanos, tal y como se observa en la Tabla 13.

Tabla 13. Generación de residuos de la construcción en Argentina

<b>Residuo</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Hormigón	31
Madera	2
Metales	1
Asfaltos	3
Tierra de excavaciones	15
Escombros (mampostería)	48

Fuente: Natalini y Klees, 2012.

Para el caso de Costa Rica, se encuentra que muy por encima de otros residuos, el mayor porcentaje de generación corresponde a los residuos provenientes de las excavaciones y se reporta como tierra mezclada con otros materiales, seguidos en igual porcentaje por los residuos de ladrillos y provenientes de concretos como se observa en la Tabla 14.

Tabla 14. Generación de residuos de la construcción en Costa Rica

<b>Residuo</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Concreto	25
Tierra mezclada con otros materiales	40
Ladrillos	25
Pedazos de bloques	5
Papel	1.25
Cartón	0.5
Acero	0.025
Alambre	0.025
Madera	1
Plásticos	0.5
Tubos	0.1
Láminas	0.15

Fuente: CYMA, 2007.

A diferencia de los países latinoamericanos, Estados Unidos genera en mayor porcentaje residuos compuestos por ladrillos, azulejos y otros cerámicos, dejando en segundo lugar a los residuos provenientes del concreto con una generación en cifras significativamente menores, debido a que en este país el reciclaje de los residuos del concreto es primordial, tal y como se aprecia en la Tabla 15.

Tabla 15. Generación de residuos de la construcción en Estados Unidos

Residuo	Porcentaje (%)
Ladrillos , bloques y cerámicos	50
Hormigón	22
Piedra	5
Asfalto	5
Arena, grava	4
Madera	4
Metales	2.5
Plástico	1.5
Vidrio	0.5
Papel	0.3
Yeso	0.2
Otros	4

En países de la Unión Europea (ver Tabla 16), la generación de residuos provenientes del concreto alude a un porcentaje menor pero aún significativo pese a la innovación en el tema del reciclaje, dejando en primer lugar de generación a los residuos procedentes de las excavaciones.

Tabla 16. Generación de residuos de la construcción en países miembros de la Unión Europea

Residuo	Porcentaje %
Material de excavación	43.16
Concreto	24.38
Block Tabique	23.3
Tabla roca Yeso	4.05
Madera	1.52
Cerámica	0.85
Plástico	0.72
Piedra	0.62
Papel	0.49
Varilla	0.48
Asfalto	0.25
Lámina	0.09

Fuente: Burgueño et al., 2014.

Para el caso de España, es uno de los países que ha tomado seriamente la situación de los RC, al respecto se resalta que en este país se maneja una especial clasificación entre los residuos inertes presentados en la Tabla 17 y los residuos de excavación presentados en la Tabla 18.

Tabla 17. Generación de residuos de la construcción (inertes) en España

<b>Residuo</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Hormigón	22
Cerámicos	35
Mezclados	1
Yeso	8
Metal	2
Madera	12
Plástico	9
Cartón	10
Especial	2

Fuente: PROGROC, 2008.

Tabla 18. Generación de residuos de la construcción (excavación) en España

<b>Residuo</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Terrenos naturales	
Grava y arena compactada	18
Grava y arena suelta	15
Arcillas	19
Rellenos	
Tierra vegetal	15
Terraplén	15
Pedraplenes	16

Fuente: PROGROC, 2008.

Como se puede observar en la Tabla 18 los residuos conformados por concretos u hormigón son aprovechados por la industria del reciclaje, por lo cual se encuentran en menor porcentaje de generación que los residuos compuestos por materiales cerámicos. Al respecto de los residuos producto de las excavaciones, se presentan en similar porcentaje de generación a los residuos tanto naturales, como a los agregados naturales (arenas y gravas).

### 2.2.3. El reciclaje de los residuos de construcción

Sin duda alguna, los inicios en el tema del reciclaje de los RC se han dado principalmente en los países europeos. En Europa se comenzó a legislar la producción y gestión de estos residuos en la década de los 60, reaccionando frente a una situación insostenible (CIMAS, 2011). Los inicios del desarrollo de la industria del reciclaje de los residuos de construcción comienza en Alemania a principios de los años 80. En 1996 la Comisión Europea (2011) en su política ambiental declaró a los residuos de la construcción como “Flujo de residuos prioritario”.

El 17 de junio de 2008 el Parlamento Europeo aprobó un dictamen de la Directiva del Marco de Residuos, en el cual se exigió que los estados miembros adopten las medidas necesarias para garantizar que antes del año 2020 el 70% en peso de los residuos no peligrosos de los RC sean destinados a operaciones de reutilización, reciclado y otras operaciones de relleno que utilicen residuos para sustituir otros materiales (Barroso, 2013).

En México la situación del reciclaje de los RC es relativamente reciente, día a día aumenta gradualmente la necesidad de cambio con respecto al manejo inadecuado de los RC, lo cual a partir del año 2004 se acentuó con el establecimiento de la primera planta mexicana de reciclaje de residuos denominada: Concretos Reciclados, la cual se encuentra ubicada en los linderos de la delegación de Iztapalapa, en el Distrito Federal (González et al., 2010).

Las prácticas de reciclaje y reutilización a partir de la recuperación de materiales y componentes constructivos son eficientes desde el punto de vista ecológico, pero también desde el punto de vista económico, ya que la recuperación de materiales puede ser el punto de partida para generar un mercado alternativo de productos, que por haber sido utilizados anteriormente resulten más económicos.

Los materiales empleados en la construcción pueden diferenciarse según su condición de reutilizables y/o reciclables. En este contexto se definen los conceptos planteados:

**Reutilizar** es el empleo de un material o residuo previamente usado, sin que medie un proceso de transformación (LGPGR, 2003). La reutilización de los residuos de la construcción puede clasificarse como:

Reutilización directa. El empleo de los materiales en la misma obra donde son generados, por lo cual el ahorro económico es máximo, principalmente mitigando el ocasionado por el transporte.

Reutilización indirecta: aparece la necesidad de transportar residuos de la obra de origen a otra obra, generando un costo ecológico y económico según la necesidad a satisfacer.

Por otra parte **reciclar** es la transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos (LGPGIR, 2003).

Actualmente, existen alternativas de valorización en el reciclaje de los RC de acuerdo a las características con las que son obtenidos, haciendo resaltar que la mayor eficiencia en el rescate de dichos residuos radica en la importancia de tener una correcta gestión, principalmente un adecuado proceso de separación de residuos desde la fuente de generación (ver Figura 8), así como el contar con un apropiado tratamiento; con el cumplimiento de estos pasos se puede afirmar que los residuos pueden ser incorporados eficientemente al ciclo de la construcción (Barburdo, 2012).

Se estima que el porcentaje de residuos de construcción que puede ser recuperado es alrededor de 86% siempre y cuando se mantengan cada uno de los componentes adecuadamente caracterizados y almacenados desde su generación hasta su destino final (Martel, 2008).



Figura 8. Separación de residuos desde la fuente de generación

Fuente: CIMAS, 2011.

Gradualmente, las naciones y sectores nacionales se suman a la tarea del reciclaje y aprovechamiento de los residuos de la construcción, lo que conduce al avance progresivo en materia de reciclaje.

Al igual que en el contexto de la generación y cuantificación, en México aún es escasa la información en cuanto al nivel de reciclaje y reutilización para estos residuos. De manera informativa en la Tabla 19 se muestran los valores correspondientes de generación, porcentaje de reciclaje y/o reutilización y porcentaje de vertido en países de la Unión Europea que impulsan el reciclaje de los RC. En este caso, Alemania pese a ser el país que desarrolló y actualmente impulsa el tema del reciclaje, actualmente no se encuentra entre los países que mayor porcentaje de RC destina al reciclado.

Entre los países con más altos porcentajes de reciclado se encuentran Holanda, Dinamarca y Bélgica, este elevado porcentaje se debe principalmente a la escasez de materias primas para la obtención de agregados vírgenes y a la dificultad de encontrar sitios para vertederos.

Así mismo, en países como Finlandia, Reino Unido y Austria, algunos de los factores que han impulsado el reciclaje, residen en una política de gestión de residuos que han utilizado como instrumento de tipo económico que incluyen impuestos, legales como las normativas obligatorias y acuerdos de planificación y control.

Tabla 19. Generación, reciclaje y vertido de residuos de la construcción anual en países europeos

ESTADO MIEMBRO	ORIGINADOS (MILLONES DE TONELADAS)	% RECICLAJE	% VERTIDO INCINERADO
Alemania	59	17	83
Reino Unido	30	45	55
Francia	24	15	85
Italia	20	9	91
España	13	<5	>95
Países bajos	11	90	10
Bélgica	7	87	13
Austria	5	41	59
Portugal	3	<5	>95
Dinamarca	3	81	19
Grecia	2	<5	>95
Suecia	2	21	79
Finlandia	1	45	55
Irlanda	1	<5	>95
Luxemburgo	0	N/A	N/A
Total	180	28	72

Fuente: Burgos, 2010.

#### 2.2.4. La actividad del reciclaje de los residuos de la construcción en México

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, denominada Concretos Reciclados, ubicada en el cerro "Yehualique" de la sierra Sta. Catarina, en la delegación Iztapalapa, del Distrito Federal. La mencionada planta cuenta con una superficie de 16 Hectáreas y tiene una capacidad de operación de 1,000 toneladas al día por equipo, por otro lado cuenta con una capacidad total de almacenaje de 3,000,000 toneladas de residuos reciclados.

El procedimiento de manejo de estos residuos en la planta de reciclaje y algunas de sus características de operatividad, se describen brevemente a continuación:

##### 1.- Recepción.

El material recibido debe estar libre de materiales peligrosos y también de los no peligrosos que no son pétreos como: madera, plásticos, papel, textiles, vidrio, envases y demás materiales indeseables (basura) que pueden restar calidad a los productos reciclados.

##### 2.- Almacenamiento.

Los residuos se depositan en 4 diferentes almacenes, dependiendo de sus características:

- Almacén de concreto simple y armado.
- Almacén de materiales mezclados, como pueden ser morteros, prefabricados de mortero o concreto, mamposterías (tabiques, blocks, ladrillos), etc.
- Arcilla, producto de excavaciones.
- Fresado de carpeta asfáltica.

##### 3.- Trituración y Clasificación.

De acuerdo a la granulometría requerida, se realiza la trituración y en seguida la clasificación de los diferentes tipos de residuos. Las granulometrías suministradas se encuentran clasificadas como:

- |                              |   |
|------------------------------|---|
| a) Material de 3"            | e) Material 3/8"                            |
| b) Material de 3" a finos    | f) Material de ¼" a finos o arena reciclada |
| c) Material de 1 ½ " a finos | a. Sólo cementantes                         |
| d) Material 1"               | b. Todo en uno                              |

### 2.2.4.1. La oferta y la demanda de los residuos de construcción reciclados

A partir de la puesta en marcha de las actividades de operación de la planta de reciclaje en el Distrito Federal, se ha aumentado paulatinamente la recepción de materiales para reciclaje; sin embargo no en la misma medida ha aumentado la demanda de estos materiales. En la Figura 9 se muestra la tendencia del tonelaje de residuos recibidos y reciclados anualmente por la planta recicladora Concretos Reciclados a partir del año 2005 al mes de julio del año 2014.

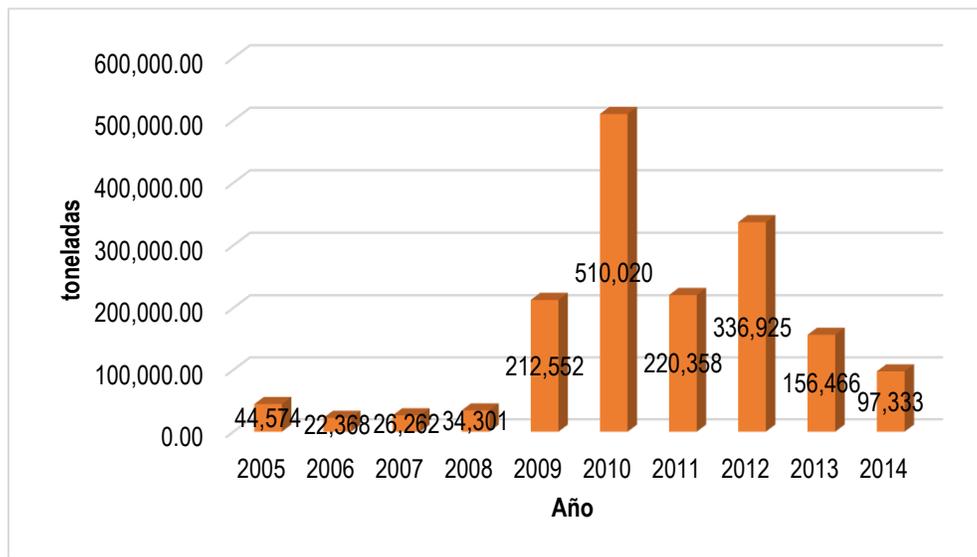


Figura 9. Residuos de construcción reciclados del año 2005 a julio de 2014

Fuente: Granell, 2014.

Al comparar los datos de generación de 3,000 t/día reportados en el año 2003 y de las 7,000 toneladas diarias de residuos de construcción generados en el año 2014, sabiendo que aproximadamente el 50% de estos residuos corresponden a los residuos potencialmente reciclables integrados principalmente por los residuos de tipo A, tipo B y tipo D de acuerdo a la clasificación dada por la norma ambiental NADF-007-RNAT-2013, se puede estimar que el porcentaje de estos residuos enviados a reciclaje anualmente es significativamente menor comparado con la generación anual estimada.

En la Tabla 20, se observa que pese a que la cantidad de residuos enviados a reciclaje anualmente es apreciable, se reduce su significancia al ser comparada con la generación total anual reportada, ya

que del total de RC generados actualmente en el Distrito Federal, se estima que aproximadamente solo el 15 % es enviado a reciclaje, por lo cual surge la interrogativa de saber ¿en dónde se encuentra el 85% de los RC restantes generados anualmente? Estos datos confirman una necesidad urgente a la actividad del reciclaje y consecuentemente a la búsqueda de alternativas de uso e incorporación de estos materiales al ciclo de la construcción.

Tabla 20. Comparativa entre la generación y el porcentaje de residuos enviados a reciclaje

<b>Año</b>	<b>Generación de residuos de construcción</b>	<b>Generación de residuos potencialmente reciclables</b>	<b>Generación anual de RC potencialmente reciclables</b>	<b>RC enviados a reciclaje</b>	<b>Porcentaje de RC enviados a reciclaje</b>
	t/día	t/día	t/año	t/año	%/año
2005	3,000	1,500	547,500	44,574	8%
2006	3,000	1,500	547,500	22,368	4%
2007	3,000	1,500	547,500	26,262	5%
2008	5,000	2,500	912,500	34,301	4%
2009	5,000	2,500	912,500	212,552	23%
2010 <sup>1</sup>	5,000	2,500	912,500	226,552	25%
2011	5,000	2,500	912,500	220,358	24%
2012	5,000	2,500	912,500	336,925	37%
2013	7,000	3,500	1,277,500	156,466	12%
2014	7,000	3,500	1,277,500	97,333	8%
<b>Promedio estimado de RC enviados a reciclaje</b>					<b>15%</b>

Fuente: Elaboración personal con datos de Granell, 2014.

En este contexto, se une al tema del reciclaje de los RC la escasez de estrategias de aprovechamiento para estos materiales, en la Figura 10 se muestra el contraste entre la cantidad de residuos generados anualmente y la demanda de los residuos de construcción reciclados durante el periodo comprendido entre el año 2009 y el mes de julio del año 2014.

<sup>1</sup> Caso extraordinario de reciclaje de residuos de construcción, para el cálculo del promedio estimado de reciclaje de la Tabla 20. A la cantidad anual reportada se restaron 283 468 t de residuos empleados en la construcción de la Línea 12 del metro del Distrito Federal.



Figura 10. Producción y venta de RC reciclados, del año 2009 a julio del 2014

Fuente: Elaboración personal con datos de Granell, 2014.

No obstante, pese a la insuficiencia en la demanda de estos materiales, los RC reciclados cumplen perfectamente con los requerimientos de calidad para ser incorporados al ciclo de la construcción; sin embargo, la poca difusión y escasa investigación en el uso de estos materiales como suplementos y/o complementos de los materiales naturales, conlleva principalmente a la desconfianza de los constructores en el uso y la promoción de los mismos.

#### 2.2.4.2. Residuos de la construcción potencialmente reciclables

En cuanto a los residuos de construcción potencialmente reciclables clasificados por la norma NADF-007-RNAT-2013 como tipo A, tipo B y tipo D, la industria de la construcción genera importantes volúmenes de ellos, representando una puerta de oportunidad para introducir tecnologías más limpias con el propósito de minimizar la producción de residuos y reducir el impacto ambiental.

Los residuos potencialmente reciclables ocupan el mayor porcentaje de la generación de los residuos en la construcción, así mismo estos residuos se componen de manera general en un 30 % por materiales derivados del concreto, un 50 % de material de albañilerías (tabiques, bloques, tabicones, ladrillos), 10 % de asfalto y 10% de otros materiales (yeso, cal, morteros, etc.) (Granell, 2014).

Los residuos clasificados como Tipo C provenientes de fresado de concreto asfáltico, son residuos reciclados en menor medida, sin embargo su uso comienza a ser introducido con amplias posibilidades de expansión. A continuación se enlistan los posibles usos por tipo de residuos:

#### **Tipo A. Provenientes de concretos y morteros**

- Bases hidráulicas en caminos y estacionamientos,
- Concretos hidráulicos para la construcción de firmes, ciclo pistas, banquetas y guarniciones,
- Elaboración de productos prefabricados (Blocks, tabiques, adocretos, adopastos, losetas, guarniciones, bordillos, postes de cemento-arena),
- Bases para ciclo pistas, firmes, guarniciones y banquetas,
- Construcción de andadores y trota pistas,
- Sub-bases en caminos y estacionamientos,
- Construcción de terraplenes,
- Construcción de pedraplenes,
- Material para relleno o para la elaboración de suelo cemento,
- Material para lecho, acostillamiento de tuberías y relleno total de cepas,
- Material para la conformación de terrenos,
- Rellenos en cimentaciones,
- Relleno en azoteas o en jardineras y
- Construcción de muros de carga o divisorios.

#### **Tipo B. Mezclados**

- Sub-bases en caminos y estacionamientos,
- Construcción de terraplenes,
- Cobertura final en los rellenos sanitarios,
- Construcción de andadores y trota pistas,
- Bases para ciclo pistas, firmes, guarniciones y banquetas,
- Material para lecho, acostillamiento de tuberías y relleno de cepas,
- Construcción de pedraplenes,
- Material para la conformación de terrenos,

- Rellenos en cimentaciones y
- Rellenos en azoteas y jardineras.

#### **Tipo D. Residuos de excavación**

En el caso los residuos de excavación, pese a ser materiales potencialmente reciclables, su uso aún es mínimo y poco estudiado, siendo empleados principalmente para rellenos y emplazamientos.

#### **2.2.5. Experiencias operativas de reciclaje de los RC en México**

Actualmente el Distrito Federal es cuna y líder a nivel nacional en el aprovechamiento de estos materiales. A continuación se describen casos operacionales proporcionados por Granell (2014), en los cuales se han empleado RC reciclados en volúmenes importantes, que han favorecido potencialmente el aprovechamiento de los materiales reciclados y el ahorro de materiales vírgenes:

1.- En la obra del Pozo de absorción “Laguna la Quebradora” se enviaron a reciclaje más de 30,000 m<sup>3</sup> del volumen generado de residuos de construcción, con el uso de estos materiales se realizó el acondicionamiento de 3 km de trotapista en la delegación Iztapalapa.

2.- En la construcción de la “Línea 12” del metro (Figura 11) se recibieron 518,279 toneladas de residuos de construcción y se consumieron 114,431 toneladas de materiales reciclados equivalente al 22% del total generado, principalmente empleados en bases hidráulicas y materiales para rellenos.



Figura 11. Construcción de “Línea 12” del metro en el Distrito Federal

Fuente: López, 2010.

3.- La Autopista Urbana Sur generó y envió a reciclaje 175,022 toneladas de residuos de construcción y durante la construcción (Figura 12) se consumieron 11,918 toneladas de materiales reciclados principalmente para bases hidráulicas y materiales para rellenos.



Figura 12. Construcción de la Autopista Urbana Sur  
Fuente: Granell, 2014.

4.- En el Parque Bicentenario se recicló in situ el 100% de los residuos generados durante su construcción (Figura 13a), obra conocida como la Ex-Refinería 18 de marzo en la delegación Azcapotzalco (Figura 13b).



a)



b)

Figura 13. Construcción del Parque Bicentenario, Distrito Federal

Fuente: Granell, 2014.

5.- En la construcción del distribuidor vial calle 7 y Av. Chimalhuacán de la delegación Iztacalco (Figura 14) se utilizó el 60% de material reciclado para la construcción principalmente de bases hidráulicas y sub- bases.



Figura 14. Construcción de bases hidráulicas empleando material reciclado, Av. Chimalhuacán D.F.

Fuente: Granell, 2014.

#### **2.2.5.1. Reciclaje de los Residuos Sólidos Urbanos generados en la industria de la construcción.**

Este tipo de residuos clasificados por la norma ambiental NAD-007-RNAT-2013 del Distrito Federal como residuos de la construcción tipo E, se caracteriza por un menor porcentaje de generación, por la escasez en infraestructura para intensificar su inclusión en los mercados de valorización existentes y en mayor medida por la insuficiencia de un marco jurídico.

En México no existen figuras normativas de reciclaje de residuos industriales, los materiales que son reciclados y reutilizados más frecuentemente incluyen madera, ladrillos, papel, cerámica, vidrio. El objetivo con estos residuos es maximizar su reutilización y sus posibilidades de reciclaje. Como ya se ha planteado anteriormente, la gestión de los residuos en un proyecto de obra, debe comenzar con una óptima separación desde la fuente de generación lo cual agilizará la cuantificación y caracterización de los residuos y por ende de su encauce a la reutilización y/o reciclaje.

En la búsqueda de alternativas para el empleo eficiente de los residuos de construcción tipo E: Residuos sólidos urbanos, en la Tabla 21 se describen algunas de las alternativas actuales respecto a los residuos reciclados tales como: madera, metales, acero, aluminio, papel y plásticos.

Tabla 21. Posibilidades de utilización para los residuos sólidos en la industria de la construcción

Tipo de residuo	Aplicación
Madera	<p>Fácilmente reciclable o bien reutilizable es su forma original, en función del uso al que ha sido sometido y a su condición.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricación de aglomerados,</li> <li>• Reúso en cimbras,</li> <li>• Guarniciones,</li> <li>• Barreras de seguridad,</li> <li>• Vigas y armaduras,</li> <li>• Paneles de madera,</li> <li>• Laminación,</li> <li>• Material de decoración y</li> <li>• Elaboración de artesanías.</li> </ul>
Metales	Fundición para su incorporación en el ciclo productivo como materia virgen.
Plástico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reciclado mecánico para objetos fácilmente extraíbles,</li> <li>• Utilización en sistemas de incineración,</li> <li>• Fabricación de muebles, ductos.</li> </ul>
Vidrio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Material 100 % recuperable, su empleo es útil como materia prima en la fabricación de nuevos productos,</li> <li>• Fabricación de fibras,</li> <li>• Material abrasivo,</li> <li>• Fabricación de losetas,</li> <li>• Material de decoración.</li> </ul>
Papel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empleo en impresión y escritura,</li> <li>• Papel para envases y embalajes,</li> <li>• Material de decoración.</li> </ul>

Fuente: Burgueño et al., 2014.

### 2.3. La construcción sustentable

El concepto de “desarrollo sostenible” se popularizó tras la aparición del Informe sobre Nuestro Futuro Común (1987-1988), coordinado por Gro Harlem Brundtland en el marco de las Naciones Unidas, entendiendo por tal desarrollo aquel que permite “satisfacer nuestras necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas” (Rivela, 2012).

La edificación como elemento estructural de la urbanización ha jugado un rol central que han experimentado las principales ciudades mexicanas, las cuales agudizan la presión sobre la disponibilidad y calidad de los recursos naturales y reducen en gran medida la capacidad del ambiente de asimilar los impactos adversos derivados de la urbanización. Las tendencias de diseño, uso de materiales y métodos constructivos, están incrementando el costo, la escasez de materiales y los recursos naturales, representando un factor de presión sobre la calidad ambiental local y global.

Al respecto, la construcción sustentable es aquella que satisface las necesidades de sus ocupantes, en cualquier momento y lugar, sin por ello poner en peligro el bienestar y el desarrollo de las generaciones futuras, por lo tanto, la edificación sustentable implica un compromiso honesto con el desarrollo humano y la estabilidad social. Una definición concreta de Construcción Sustentable la presenta el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible: *“Es la práctica de planear, diseñar, construir, operar y habitar proyectos integrales de construcción que generen un impacto positivo para el ambiente, los usuarios y la comunidad”* (Osorio, 2011).

La Cumbre Mundial del 2005 definió que el enfoque de sustentabilidad debe reconciliar tres pilares: el ambiental, social y económico. La edificación sustentable va más allá de la no contaminación o del reciclado. La sostenibilidad se sustenta sobre tres pilares: Economía, Sociedad y Ecología y no es legítimo sacrificar uno por el otro (Méndez et al., 2013). En la Figura 15 se muestra la interrelación entre estos conceptos que a continuación se describen:

*Económico:* Una edificación sustentable debe ser una construcción económica, sin dispositivos que la encarezcan o mecanismos que corrijan errores que están presentes desde su concepción.

*Social:* Los actores sociales involucrados en la edificación sustentable deben integrar la planificación, gestión, diseño, fomento y aplicación de normativas, actividades y procesos que contribuyan en la mitigación de impactos ambientales y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales; paralelamente las edificaciones y sus alrededores deben ser espacios que potencien la colectivización de servicios e incentiven las relaciones y el desarrollo social.

*Ecológico:* Un edificio sustentable debe estar diseñado para lograr la comodidad a los habitantes dentro y fuera del edificio con el mínimo gasto energético, aprovechando las condiciones climáticas del entorno y transformando sus elementos en confort gracias a un diseño inteligente.

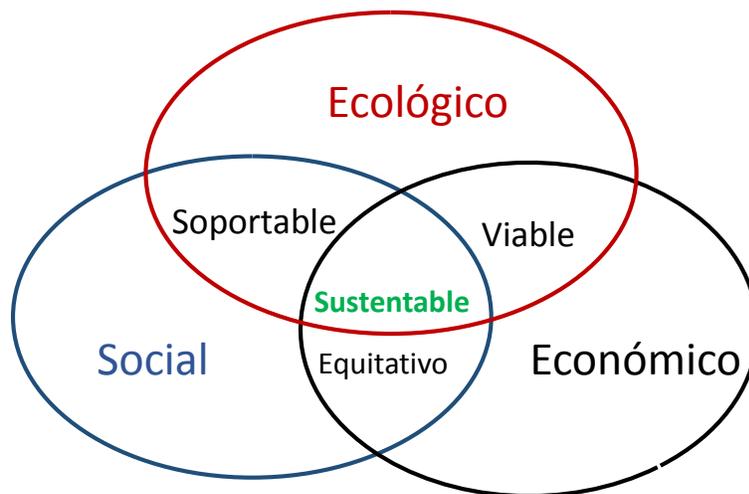


Figura 15. Fundamento y estructura de la sustentabilidad

Fuente: Méndez et al., 2013.

En los últimos años, tanto la Organización Internacional de Normalización (ISO) a nivel mundial, como el Comité Europeo de Normalización (CEN) a nivel europeo continúan desarrollando actualmente, normativa para materializar el concepto de sustentabilidad en el sector de la edificación (Rivela, 2012).

En este contexto, del desarrollo de la sustentabilidad en la industria de la construcción se presenta la Figura 16 en la cual se observa la evolución cronológica en el camino hacia la edificación sustentable.

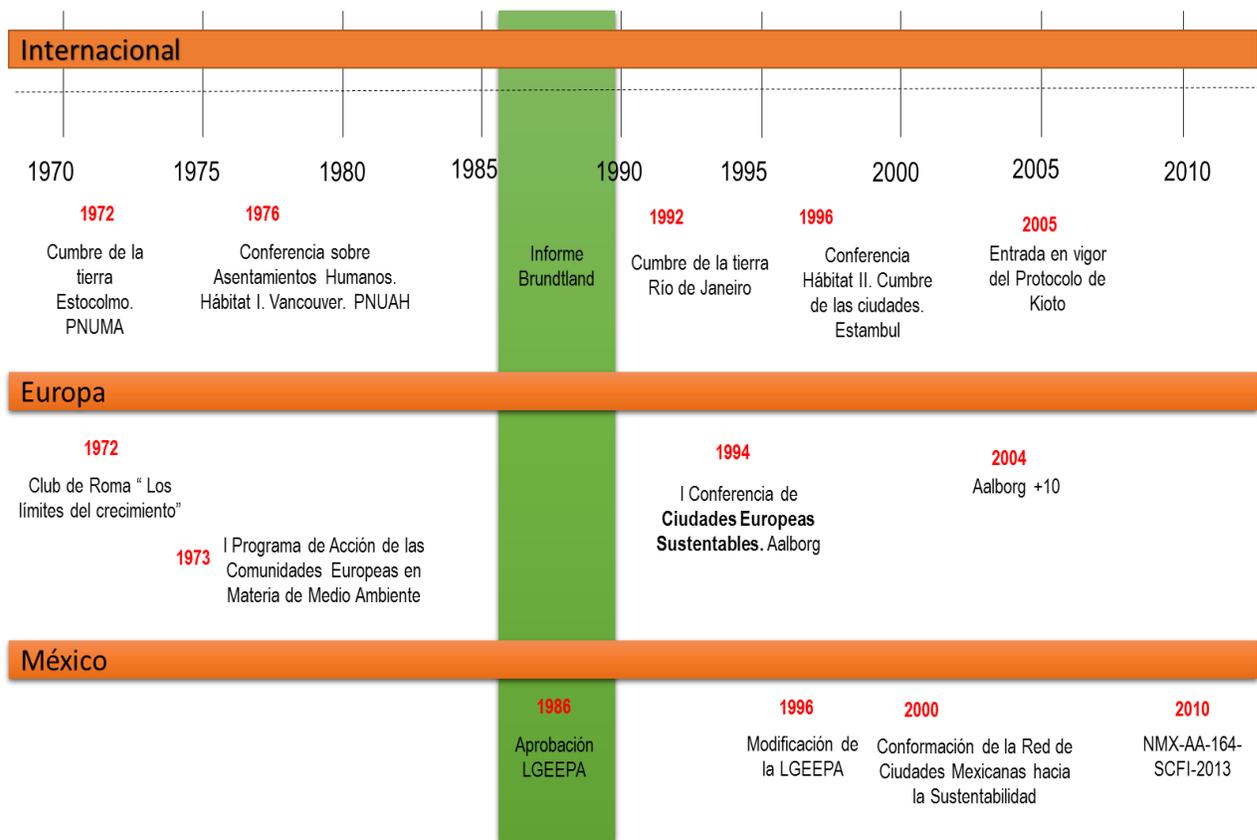


Figura 16. Cronología de la sustentabilidad en el sector de la construcción

Fuente: Casar, 2014.

A nivel nacional en materia de edificación sustentable, se encuentra en vigor la norma NMX-AA-164-SCFI-2013, un instrumento de política ambiental, que establece los criterios y requerimientos ambientales mínimos para la edificación sustentable de aplicación voluntaria para todas las edificaciones que se ubiquen en territorio nacional, públicas o privadas destinadas en su totalidad o en uso mixto a diferentes actividades de índole habitacional, comercial, de servicios o industrial a fin de contribuir a la mitigación de impactos ambientales y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, sin descuidar los aspectos socioeconómicos que aseguren su viabilidad, habitabilidad e integración al entorno urbano natural, tomando como pilares básicos los siguientes objetivos:

- Suelo. Buscar el objetivo de optimizar el aprovechamiento de áreas urbanas y su vinculación con el entorno natural dando prioridad al uso de zonas consolidadas y fomentando la mezcla de usos.

- Energía. Garantizar el uso eficiente a través de la adopción de prácticas que contribuyan a reducir su consumo y la introducción de fuentes renovables de energía.
- Agua. Garantizar su uso eficiente y aprovechamiento, así como la preservación de su calidad y cantidad, buscando fuentes alternativas de suministro y disminuyendo la descarga de aguas residuales.
- Materiales y residuos. Hacer uso de medios de recolección, transporte, tratamiento, o disposición de material de desecho destinado a mejorar su minimización, reutilización o reciclaje, siendo que la elección se base en la evaluación de su impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida.
- Calidad ambiental y responsabilidad social. Se refiere a los modos en que los usuarios pueden operar las construcciones de forma eficiente, dándoles el mejor uso a las instalaciones y administraciones de manera considerada con el ambiente y la sociedad.
- Paisaje. Impacto visual y congruencia con el entorno.
- Calidad del ambiente interior. Parámetros que determinan el confort, involucrando el diseño, el sonido y calidad del aire.
- Responsabilidad social. Garantizar la pertenencia de factores que garanticen el desarrollo social y garanticen reglas de convivencia óptimas, mediante proyectos viables y que generen ahorros económicos por el uso racional de los recursos naturales.

La norma NMX-AA-164-SCFI-2013 abarca a las edificaciones y sus obras exteriores, ya sea individuales o en conjuntos de edificios, nuevas existentes y es aplicable a una o varias de sus fases: diseño, construcción, operación, mantenimiento y demolición incluyendo proyectos de remodelación, renovación o reacondicionamiento de la edificación, otorgando el cumplimiento de la misma de manera voluntaria a los representantes de las edificaciones.

La edificación es un componente fundamental de las ciudades y por tanto de la sustentabilidad de los ambientes construidos. A nivel internacional se reconoce que las tendencias de diseño, materiales y métodos constructivos, así como las prácticas culturales y modalidades de ocupación del suelo están incrementado el costo y la escasez de recursos naturales, energéticos, representando uno de los principales factores de presión sobre los recursos naturales y la calidad ambiental global, regional y local, ya sea directa o indirectamente (Casar, 2014).

## 2.4. La tierra como material de construcción

Desde sus inicios la humanidad ha tenido una estrecha relación de dependencia con el suelo para su supervivencia, ya sea para la producción de alimentos o para refugio de la intemperie y de los predadores. La tierra fue uno de los primeros materiales utilizados por el hombre para cobijo junto a la madera y la piedra en sus formas originales.

Hay vestigios de construcciones con tierra que datan de hace 8,000 años, cuando surgieron civilizaciones en todos los continentes con nuevas maneras de emplear la tierra como material de construcción. Ejemplos representativos se encuentran en África, en especial en Egipto, donde civilizaciones asiáticas como la caldea, sumeria, asiria y babilónica emplearon mampuestos de barro crudo secados al aire. Esta técnica de fabricar mampuestos con barro y secarlos al aire dio origen a lo que hoy se conoce como adobe.

Entre los ejemplos en los que se hace presente un claro dominio de construir con tierra, se presenta la civilización Persa; sin embargo, el más representativo ejemplo de construcción con tierra es la Muralla China que data del siglo III a. C. En Suramérica el ejemplo más importante es la ciudadela de Chan Chan en Perú, que data de los años 1200 a 1400 d.C., está formada por ocho ciudadelas, varias pirámides ceremoniales, edificios públicos, templos y viviendas, todos construidos en tierra (González<sup>b</sup>, 2012).

Al respecto de la construcción, el desplante de las edificaciones se encuentra imposibilitado de espacios ideales para su edificación, recurriendo al acondicionamiento del suelo para desplantar los cimientos y llevar a cabo los trabajos de obra, que conformarán la construcción proyectada, es aquí donde la alteración del suelo y la innovación del hombre, conducen a la excavación y extracción del suelo en mayores y menores volúmenes de material virgen, inalterados en su composición y propiedades naturales. Estos materiales al no encontrar una incorporación y/o uso total o parcial en alguno de los diferentes procedimientos constructivos de la edificación, llegan a convertirse en residuos comúnmente conocidos como residuos de excavación los cuales han sido limitadamente explorados como materiales que puedan incorporarse al ciclo de la construcción, sin llegar a convertirse en materiales de desecho ya que poseen características que los convierten en residuos potencialmente reciclables y aprovechables.

Actualmente resulta relevante el interés del uso de tierra en el desarrollo de la construcción sustentable al conservar prácticas de construcción tradicional, solucionar el problema de la vivienda social y por emplear materiales de bajo impacto en la salud y el ambiente, elaborados con reducida demanda de energía y transporte y menores emisiones de gases efecto invernadero (Schiller y Evans, 2005).

Aunado a lo anterior, el proceso de preparación y construcción con tierra necesita de muy poca agua (60 veces menos que el cemento), no genera contaminantes y no presenta peligros de manipulación (como el asbesto o los tintes) (Viñuales, 2003).

### **Ventajas técnicas y económicas**

La primera ventaja es su fácil y amplia disponibilidad, para construir y mantener las obras de tierra, ya que es un material que siempre está a la mano. No toda la tierra es utilizable para un mismo sistema constructivo, sin embargo es un material plenamente aprovechable encaminándolo correctamente a diversos sistemas que dependerán de las características del suelo en cada sitio.

Es un buen aislante térmico y acústico. Su comportamiento frente a fríos y calores extremos es excelente sobre todo en sitios donde la amplitud térmica es importante. Ese aislamiento térmico ayuda además a frenar los daños frente a incendios, ya que el fuego no se propaga con rapidez, dando lugar a tareas de apagado. Presenta un excelente equilibrio de intercambio de humedad interior-exterior, proporcionando un interior saludable y beneficioso para el ser humano.

Técnicamente tienen un buen comportamiento a la compresión, lo que permite su uso en muros portantes y paredes no estructurales. Así mismo la construcción con tierra conlleva un sistema constructivo único, propio de sus características, que al tomarse en cuenta garantizan la construcción de edificaciones totalmente seguras y perdurables.

En relación a la presente investigación la utilización de materiales locales poco manufacturados facilita la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, reduce la dependencia material y energética del exterior, recupera los sistemas constructivos tradicionales basados en la gestión de recursos existentes en el medio y permite la reducción de costes de obra. Aunque actualmente su uso se ha reducido fue un sistema de construcción difundido en zonas donde escaseaba el material pétreo.

## **2.4.1. Materiales de construcción fabricados con tierra**

El uso de la tierra como material de construcción ha evolucionado gradualmente, que incluso hoy en día los métodos y sistemas se continúan perfeccionando, entre los principales y mayormente utilizados materiales constructivos fabricados a partir de la tierra destacan los presentados a continuación.

### **2.4.1.1. Ladrillo macizo**

Son piezas fabricadas de material arcilloso sometidos a un proceso de cocción a altas temperaturas. Resisten la humedad y el calor, pueden durar en algunos casos más que la piedra (Zea, 2005). Su color y calidad varían según la clase de arcilla empleada en su elaboración (ver Figura17). Su proceso de fabricación puede ser artesanal e industrial (Huertos, 1990).



Figura 17. Ladrillos artesanales cocidos

Fuente: Clasipar, 2014.

### **2.4.1.2. Bloque de tierra comprimida (BTC)**

Pieza para fábrica de albañilería generalmente con forma de paralelepípedo rectangular, obtenida por compresión estática o dinámica de tierra húmeda (Figura 18), seguida de un desmolde inmediato y que puede contener estabilizantes o aditivos para alcanzar o desarrollar las características particulares de los productos (Apablazas, 2012).



Figura 18. Fabricación de Bloques de Tierra Comprimida  
Fuente: Propia.

### 2.4.1.3. Adobe

Es un material de construcción conformado por arcilla y arenas limosas que mezcladas con agua adquieren una forma más fluida que permite volcarlo sobre un molde, luego es secado al sol (Figura 19). Los bloques de adobe pueden hacerse de dos maneras: vertiendo la mezcla en moldes y dejarlos secar al sol, o pueden ser moldeados para darles la forma de bloque por medio de prensas. (Maldonado, 2014).



Figura 19. Fabricación de adobes  
Fuente: Propia.

#### 2.4.1.4. COB

Es una mezcla de arcilla, agua y paja, al igual que el adobe es un material de construcción natural, tiene alta resistencia y durabilidad, la diferencia con el adobe es que el COB se integra fresco al muro tal y como se observa en la Figura 20, tiene ventajas de aislamiento térmico y auditivo, lo que también favorece un gran ahorro energético (Belanko, 2014).



Figura 20. Construcción de un muro con COB

Fuente: Belanko, 2014.

#### 2.4.1.5. Tierra aligerada

También conocida como terre-paille (tierra-paja), consiste en la adicción de una gran cantidad de fibras, u otro material aligerante a la tierra para reducir el peso y al mismo tiempo mejora su capacidad aislante térmica y acústica. Su fabricación consiste en realizar un encofrado de madera como se observa en la Figura 21, en el cual se vierte la mezcla realizada, esta mezcla generalmente está compuesta en mayor proporción de paja y en una cantidad mínima de tierra (Pawlowsky, 2015).



Figura 21. Construcción con tierra aligerada

Fuente: Pawlowsky, 2015

#### 2.4.1.6. Tapial

Esta técnica consiste en construir muros con tierra arcillosa y con poca cantidad de agua, compactándola a golpes y empleando un encofrado deslizante para contenerla .

El encofrado suele ser de madera y en el proceso se van colocando dos maderas paralelas, entre las que se vierte tierra en hileras de 10 o 15 cm, y es compactada mediante apisonado como se observa en la Figura 22a y 22b (RES, 2012).



a)



b)

Figura 22. Construcción de tapial para cimiento de una vivienda

Fuente: Etchebarne, 2014.

### 2.4.1.7. Bahareque o Quincha

El bahareque también conocido como “bajareque” es una técnica de construcción con tierra mezclada con paja, que consiste en una gruesa capa de barro sobre un entramado de caña o madera (Figura 23a). Otra forma muy similar de hacer el bajareque es mediante un trenzado de paja remojada en lodo; este trenzado se efectúa libre con una estructura de listón de caña o madera concertado generalmente en forma horizontal tal y como se observa en la Figura 23b.



a)



b)

Figura 23. Construcción de vivienda bahareque

Fuente: Etchebarne, 2014.

### 2.4.2. Normativa mundial en el uso de la tierra como material de construcción

Durante mucho tiempo la construcción en tierra ha sido un sistema constructivo abandonado; sin embargo, en toda Europa (especialmente organismos e instituciones de Francia, Alemania, Italia, entre otros países europeos), Canadá, Estados Unidos y Latinoamérica se está planteando como una innovación el estudio y mejora de las características de la construcción con tierra en el desarrollo de la arquitectura bioclimática que nunca debió perderse.

Muchos países en los últimos años trabajan para reglamentar este tipo de material. Destacan Colombia y España, con la publicación de nuevas normas; Chile, Ecuador y Nicaragua, se encuentra en la etapa de investigación para el desarrollo de futuras normas y Perú mejorando documentos ya existentes (Falceto et al., 2002). En la Figura 24 se muestra el porcentaje de enfoque desarrollado en las mencionadas normas, de la cual se encuentra que no existe una estandarización normativa, sin

embargo en la mayoría de los países se le ha dado relevante importancia a la construcción de bloques de tierra comprimida, seguidos por el adobe, tapial y en menor medida la técnica de tierra vertida.

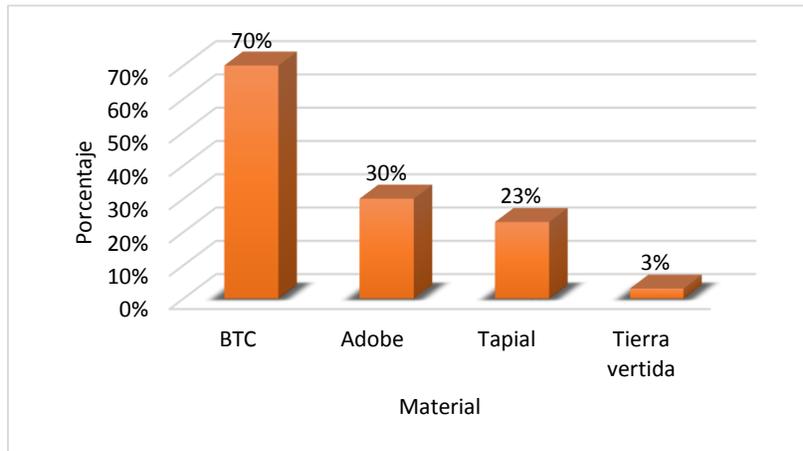


Figura 24. Contenido principal de la normativa para el uso de la tierra

Fuente: (Falceto et al., 2002).

En el 70% de los casos estudiados se normaliza el bloque de tierra comprimida (BTC). Algunos de los aspectos destacables en la normativa son la selección de suelos, estabilización, requisitos de los productos y ensayos.

### 2.4.3. Tipos de suelo como material de excavación

Se define al suelo en general como la superficie suelta de tierra que se distingue de la roca sólida. Es una mezcla de material mineral, materia orgánica, agua y aire. Es además la parte exterior de la corteza terrestre y está constituido por una capa de material fragmentario no consolidado.

La variabilidad espacial de los suelos en la superficie de la tierra está gobernada por procesos de formación, los cuales a su vez, están interactivamente condicionados por la litología, el clima, la biología y el relieve a través del tiempo (Zapata, 2006).

En la República Mexicana existen identificados por sus características edafológicas 25 tipos de suelos, los cuales se detallan en la Figura 25 de acuerdo a su nomenclatura asignada:

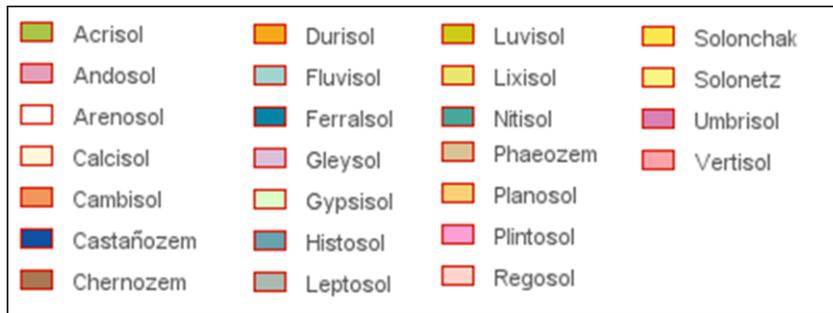


Figura 25. Clases edafológicas de suelos identificados en la República Mexicana

Fuente: INEGI<sup>b</sup>, 2014.

En el sentido del uso de la tierra como material de construcción una adecuada clasificación a partir de propiedades de granulometría y plasticidad permite tener una primera aproximación de su comportamiento mecánico. En la Figura 26 se presenta una clasificación del suelo en función de la naturaleza de la roca madre y del tamaño de las partículas que lo componen.

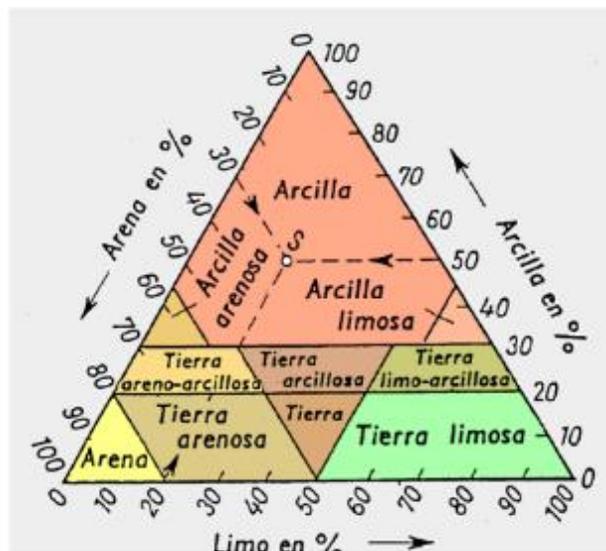


Figura 26. Clasificación de los suelos por composición y granulometría

Fuente: Bañón y Bevia, 2000.

**1) Suelos granulares.-** Están formados por partículas agregadas y sin cohesión entre ellas, dado el gran tamaño de las mismas. Las principales características de este tipo de suelos son su buena capacidad portante y su elevada permeabilidad, lo cual permite una rápida evacuación del agua en presencia de cargas externas, los materiales considerados granulares son:

**Grava.-** Partículas de roca que pasan un tamiz de 75 mm (3") y quedan retenidas sobre un tamiz de 4.75 mm (No.4).

**Arena.-** Partículas de roca que pasan un tamiz de 4.75 mm (No.4) y quedan retenidas sobre un tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No.200).

**2) Suelos cohesivos.** Este tipo de suelos se caracteriza por un tamaño fino de partícula. Se caracterizan por presentar alto grado de cohesión entre partículas, esto se debe a las propiedades importantes de relación entre la superficie y el volumen de las partículas (superficie específica). La cohesión que presentan es su principal propiedad desde el punto de vista mecánico, la cual se define como la fuerza interparticular producida por el agua de constitución del suelo, siempre y cuando este no esté saturado. Dentro del grupo de los suelos cohesivos se encuentran:

**Limo.** Suelo de tamaños entre 0.002 y 0.06 mm, ligeramente plástico o no plástico y que exhibe poca o ninguna resistencia cuando se seca al aire. Para clasificación es un suelo de grano fino.

**Arcilla.** Suelo que pasa tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No.200); puede utilizarse al mostrar plasticidad (consistencia como de masilla) dentro de un cierto intervalo de humedad, pero muestra considerable resistencia cuando se seca al aire.

Lo que diferencia a los limos de las arcillas son sus propiedades plásticas: mientras que los primeros son arcillas finísimas de comportamiento inerte frente al agua, las arcillas (debido a la forma lajosa de sus granos y a su reducido tamaño) acentúan los fenómenos de superficie, causa principal de su comportamiento plástico. Este tipo de suelos se caracteriza por su baja permeabilidad, al dificultar el paso del agua por el reducido tamaño de sus poros y su alta compresibilidad.

**3) Suelos orgánicos.** Son suelos formados por la descomposición de restos de materia orgánica de origen animal o vegetal y que generalmente cubren los primeros metros de la superficie. Se caracterizan por su baja capacidad portante, alta compresibilidad y mala tolerancia del agua. No son para nada aptos para ser usados como material de construcción, entre ellos se encuentra la **turba**. Un suelo primordialmente de textura vegetal en estados variables de descomposición, usualmente con

olor orgánico, color entre carmelita oscuro y negro. En la Figura 27 se ejemplifica gráficamente la clasificación de los suelos descritos:

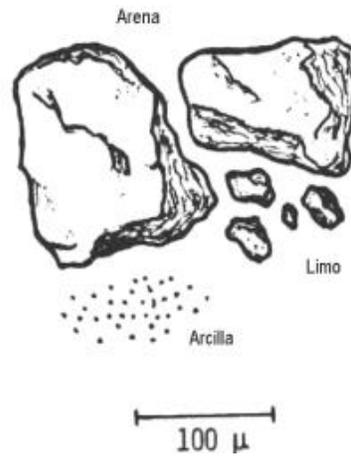


Figura 27. Comparativa del tamaño granulométrico para la identificación de suelos

Fuente: Rucks, 2004.

Durante la clasificación general es muy probable encontrarse con similitudes entre los materiales, en las tablas 22 y 23 se especifican algunos de los parámetros de referencia anteriormente descritos que permiten diferenciar principalmente los limos de las arcillas y las gravas de las arenas.

Tabla 22. Diferencias entre limos y arcillas<sup>2</sup>

<b>Limos (entre 0,002 y 0,06 mm)</b>	<b>Arcillas (&lt; 0,002 mm)</b>
No suelen tener propiedades coloidales	Suelen tener propiedades coloidales
Al aumentar el tamaño de las partículas, aumenta la proporción de minerales no arcillosos.	Consisten en su mayor parte en minerales arcillosos.
Tacto áspero.	Tacto suave.
Se secan rápidamente, no se pegan a los dedos.	Se secan lentamente y se pegan a los dedos.
Los terrones secos tienen una cohesión apreciable, pero se pueden reducir a polvo con los dedos.	Los terrones secos se pueden partir, pero no reducir a polvo con los dedos.

<sup>2</sup> [http://icc.ucv.cl/geotecnia/03\\_docencia/03\\_clases\\_catedra/clases\\_catedra\\_ms1/05\\_terzaghi\\_3.pdf](http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases_catedra/clases_catedra_ms1/05_terzaghi_3.pdf)

Tabla 23. Diferencias entre gravas y arenas<sup>3</sup>.

Gravas	Arenas
Los granos no se apelmazan aunque estén húmedos, debido a la pequeñez de las tensiones capilares.	Los granos se apelmazan si están húmedos, debido a la importancia de las tensiones capilares.

### Naturaleza física de las fracciones del suelo

Las fracciones gruesas, arena y grava, cuando no están cubiertas de arcilla y limo carecen prácticamente de plasticidad y de tenacidad. Su capacidad de retener agua es escasa y debido a los grandes espacios entre sus partículas separadas, el paso del agua gravitacional es rápido. Facilita así el drenaje y el eficaz movimiento del aire. Los suelos en los que predominan la arena o la grava, por esto, son de carácter abierto poseen un buen drenaje y aireación y no ofrecen resistencia al laboreo.

Las partículas de arcilla normalmente son laminares como la mica y si se humedecen son muy plásticas, cuando se moja con una cantidad adecuada de agua se expande y se vuelve pegajosa.

Las partículas de limo tienden a ser irregulares, distintas en forma y raras veces lisas o pulidas. Son en su mayoría partículas microscópicas, siendo el cuarzo el mineral dominante. La fracción limo posee alguna plasticidad, cohesión y adsorción debido a una película de arcilla que recubre las partículas de la fracción, pero desde luego, en mucho menor grado que la propia fracción de arcilla.

La dominancia de fracciones finas en un suelo le determina una textura que tiende a retardar el movimiento del agua y aire. Un suelo así será altamente plástico y fuertemente adhesivo cuando esté demasiado mojado, y será pesado y convertido en terrones al secarse, a menos que se trabaje adecuadamente (Rucks et al., 2004).

<sup>3</sup> [http://icc.ucv.cl/geotecnia/03\\_docencia/03\\_clases\\_catedra/clases\\_catedra\\_ms1/05\\_terzaghi\\_3.pdf](http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases_catedra/clases_catedra_ms1/05_terzaghi_3.pdf)

### 2.4.3.1. Reconocimiento de la tierra

Debido a la gran variedad de tierras existentes, existen algunas características fundamentales que determinarán su uso como material de construcción, algunas de ellas son:

- **Granulometría**

La proporción de los componentes de la tierra es fundamental, actualmente existen métodos estandarizados mediante los cuales se hace pasar el material analizado por un conjunto de tamices o mallas con aberturas graduales que van desde la N° 3" (75 mm) hasta la malla N° 200 (75 µm), mediante los cuales se determina la proporción de suelo a través del peso retenido en cada una de las mallas. Así mismo existen técnicas más comunes, como la sedimentación manual al dejar reposar una porción mezclada entre el material de tierra por analizar y agua, los componentes de la muestra se separan según su densidad: los elementos más pesados como la grava y las arenas se van al fondo y el limo y la arcilla de color más claro quedan encima (Lewis, 2011).

- **Plasticidad**

La plasticidad es la capacidad de un material que, mediante una compresión más o menos prolongada, puede cambiar de forma y conservar esta de modo permanente, a diferencia de los cuerpos elásticos.

Para saber la plasticidad de una muestra de tierra, existe la prueba normalizada del límite plástico, la cual se realiza a partir de la formación de un rollito con características normadas y la determinación del peso de agua agregada para la formación del mismo. Existen también pruebas manuales para conocer el grado de plasticidad del suelo, consistente en humedecer la tierra hasta que permita formar un cordón y enrollarlo, interpretándolo respecto a la siguiente descripción y la Figura 28:

Muestra 1. Tierra margosa. No tiene cohesión suficiente para formar un cordón. No es arcilla.

Muestra 2. El cordón se rompe al enrollarlo. Muy bajo contenido en arcilla.

Muestra 3. Arcilla basta de poca plasticidad. Se producen grietas profundas en el cordón al enrollarlo. Arcilla gruesa, arenisca, de baja plasticidad.

Muestra 4. Arcilla plástica de buena calidad. Grietas pequeñas y poco profundas. Arcilla útil.

Muestra 5. Arcilla de gran plasticidad de partículas muy finas. El cordón se enrolla con facilidad y presenta una superficie lisa y brillante. Arcilla de grano fino, muy plástica.

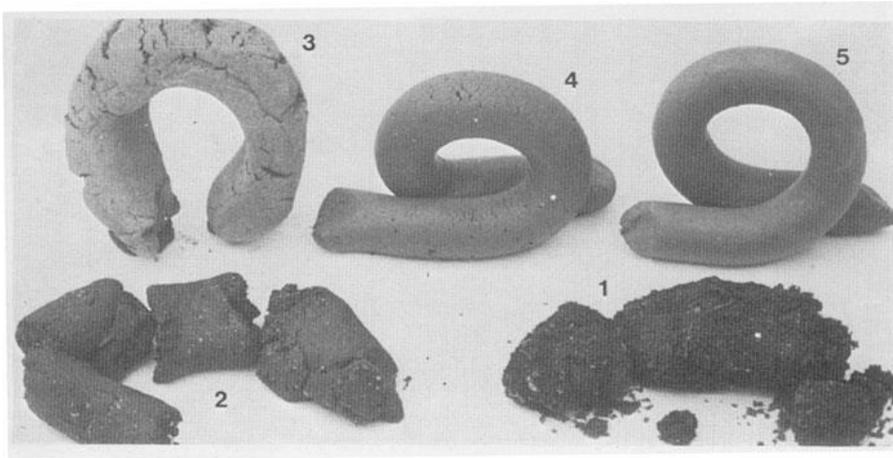


Figura 28. Grado de plasticidad de un suelo

Fuente: <http://www.matildeceramica.com/plasticidad-de-la-arcilla/>

En este contexto en la Tabla 24 se muestra el grado de plasticidad de suelos de acuerdo a su origen arcillosos/limosos :

Tabla 24. Plasticidad de diversos suelos arcillosos/limosos

Categoría	Suelo	Grado de plasticidad
I	Arena o limo	No plástico
	• trazas de arcilla	Ligera plasticidad
	• poca arcilla	Baja plasticidad
II	Franco arcilloso	Mediana plasticidad
III	Arcilloso limoso	Alta plasticidad
	Arcilla	Muy alta plasticidad

Fuente: FAO, 2009

- **Pruebas de resistencia**

El ensayo se realiza a partir de la fabricación de pastillas de aproximadamente 2.5 cm de diámetro, las cuales en estado seco se presionan entre el dedo pulgar y el índice o apretándola con la palma de la mano, la dureza del suelo se estima a partir de la dificultad que presenta la pastilla a romperse o desmoronarse, de acuerdo a ello se reporta la resistencia en estado seco como: nula, media o alta. Una alta resistencia en estado seco es característica de una arcilla de alta plasticidad. Una resistencia nula en estado seco es típica de un limo (UMSNH , 2008).

- **Adhesividad**

La adhesividad es la cualidad que tienen los materiales del suelo para adherirse a otros objetos. La adhesividad se determina al presionar una pequeña cantidad de suelo saturado entre el dedo pulgar y el índice, después se separan los dedos lentamente, calificando la adhesividad con los siguientes parámetros:

*No adherente.* Si el suelo no se adhiere o prácticamente no queda material adherido a los dedos.

*Ligeramente adherente.* Si el suelo comienza a adherirse a ambos dedos, pero al separarlos uno de ellos queda limpio y no se aprecia estiramiento cuando los dedos comienzan a separarse.

*Adherente.* Si el suelo se adhiere a ambos dedos y tiende a estirarse un poco y a partirse y a no separarse de los dedos.

*Muy adherente.* Si el suelo se adhiere fuertemente a ambos dedos y cuando ambos se separan se observa un estiramiento del material (FAO, 2009).

Generalmente estos parámetros ayudan a relacionar el tipo de suelo, una muestra no adherente indica que la tierra es arenosa, una muestra ligeramente adherente generalmente indica la presencia de tierra limosa, y una muestra de suelo adherente o muy adherente es sinónimo de un tierra arcillosa.

- **Color**

El color del suelo puede ser utilizado como una clave del contenido de ciertos minerales en el suelo, basado en que los minerales férricos proveen la mayoría y la mayor variedad de pigmentos al suelo.

*Color negro.* Se asocia con niveles altos de materia orgánica que se descompone en humus.

*Color rojo.* Es indicativo de condiciones de alta meteorización, conlleva pH ácidos y ambientes donde predominan los procesos de oxidación.

*Color amarillo.* Suele ser indicativo de meteorización bajo ambientes aerobios (oxidación), a combinaciones de óxidos de Fe más materiales orgánicos y/o materia orgánica descompuesta.

*Color gris.* Puede ser indicativo del ambiente anaeróbico, cuando el suelo se satura con agua, siendo desplazado o agotado el oxígeno del espacio poroso del suelo.

*Color blanco ausencia de color.* Se debe principalmente a la acumulación de ciertos minerales que tienen calcita, dolomita, yeso así como algunos silicatos y sales (Ovalles, 2003).

## 2.5. Usos del nopal en el sector de la construcción

En general los denominados nopales son tallos de plantas pertenecientes al género *Opuntia* de la familia de las Cactáceas, los cuales están formados por varias especies, encontrándose ampliamente en el continente americano, ya sea en regiones áridas como tropicales (Sáenz et al., 2006).

En el sector de la construcción el mucilago de nopal ha sido empleado como aditivo en pastas de cemento (León-Martínez et al., 2014), así como en la restauración de edificaciones históricas en las que fueron utilizadas rocas naturales (Ventola et al., 2011), un ejemplo es el del estudio realizado por Martínez-Camacho et al., (2008) en cual se determinó que la utilización de ladrillos de adobe tratados con mucilago de nopal incrementa su resistencia a la erosión debido a que el mucilago recubre las pequeñas partículas de adobe o para preservar los pigmentos originales de piezas de importancia arqueológica (Barajas et al., 2010).

Las investigaciones sugieren que el mucilago mejora las características físicas de las pastas de cemento y morteros. Se ha encontrado que adiciones de nopal y sábila deshidratada en concentraciones pequeñas pueden funcionar como acelerantes de fraguado de pastas de cemento (Torres y Cano, 2012). Incluso en el área de los nanomateriales, el uso de microfibrillas de celulosa derivadas de los cladodios de *Opuntia ficus-indica* han demostrado tener propiedades mecánicas de alto rendimiento (Malainine et al., 2005).

En el Distrito Federal existe una alta producción de este vegetal, principalmente en la delegación de Milpa Alta, en la cual se encuentra establecido el Centro de acopio del Nopal, en el que se congrega el mayor número de productores de este vegetal. Se estima que en el mencionado establecimiento se generan diariamente 4 toneladas de residuos de nopal, de las cuales tan solo 2 toneladas al día se aprovecha en la elaboración de composta y posteriormente se emplea como abono para los cultivos posteriores, desechándose el resto de los residuos sin oportunidad de aprovechamiento.

## 2.6. Secadores solares

El secado es el proceso mediante el cual se extrae la humedad o se hace que se evapore de un cuerpo mojado, mediante el aire o el calor que se le aplica (RAE, 2014).

*La operación de secado es una operación de transferencia calor y masa de contacto gas-sólido, en la que la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, en base a la diferencia entre la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa. Cuando estas dos presiones se igualan, el sólido y el gas están en equilibrio y el proceso de secado cesa (Andión et al., 2014).*

La energía del sol se puede utilizar correctamente como herramienta de secado. Un secador solar es un equipo o instalación que utiliza la radiación solar como fuente de energía para disminuir la humedad del producto o material a secar. Los secadores, al igual que los calentadores solares, utilizan el efecto invernadero como trampa de calor (Bérriz, 2006). Existen tres tipos de secadores solares:

**Directo.** En este tipo de secador, el colector y la cámara de secado están juntos en cuyo caso la cámara que contiene el producto también cumple la función de colector recibiendo la radiación solar. En los secadores solares directos la radiación solar es absorbida por el propio producto, resultando más efectivo el aprovechamiento de la energía para producir la evaporación del agua. Esto se debe a que la presión de vapor en la superficie del producto crece por la absorción de radiación solar.

**Indirecto.** El colector y la cámara de secado están separados. El aire es calentado en el colector y la radiación no incide sobre el producto colocado en la cámara de secado. La cámara de secado no permite la entrada de la radiación solar.

**Mixto.** Son aquellos donde la colección de radiación se realiza tanto en el colector solar previo a la cámara de secado como en la misma cámara de secado. El Secador solar mixto presenta varias ventajas; en primer lugar el control del proceso es más simple.

### 3. Metodología

La metodología que se siguió en esta investigación se dividió en 4 fases: durante la Fase I se realizó el estudio de gabinete, en la Fase II se realizó el diseño y la construcción de una máquina moldeadora de ladrillos y un secador solar empleado para agilizar el secado de los ladrillos, así mismo durante esta fase se definieron los materiales empleados como materia prima, se realizó la obtención y el traslado de estos materiales y se diseñaron las dosificaciones correspondientes para las fabricaciones posteriores. En la Fase III se inició con la primera etapa de fabricación de ladrillos construidos con material de excavación proveniente del estado de Puebla y se evaluaron técnicamente mediante pruebas de resistencia a la compresión y absorción de agua con base en la normativa mexicana. Finalmente se concluyó con la Fase IV, en la cual se realizó a partir de los resultados obtenidos en la Fase anterior, la segunda etapa de fabricación de ladrillos, empleando residuos de excavación provenientes del Estado de México y del Distrito Federal y así mismo se evaluaron técnicamente con base a los requerimientos de la normativa mexicana.

A continuación se describen detalladamente las fases correspondientes:

#### 3.1. Fase I. Estudio gabinete

Esta fase comprendió la recopilación y análisis de la información de leyes federales en materia de residuos sólidos y de manejo especial, enfocado el estudio básicamente en los lineamientos de la recientemente entrada en vigor de la norma ambiental NADF-007-RNAT-2013, incluyendo también a las Normas Oficiales y Normas Técnicas complementarias aplicadas en el tema de residuos de construcción; así también se investigó acerca de las normas aplicables en la evaluación de la calidad de los materiales empleados en la mampostería<sup>4</sup>. Paralelamente se realizó la investigación presentada en el capítulo 2 de esta tesis acerca de la generación, el reúso y reciclaje de los residuos de construcción en diferentes países: Argentina, Chile, Costa Rica, Estados Unidos, España y países de la Unión Europea.

---

<sup>4</sup> Sistema tradicional de construcción que consiste en erigir muros y paramentos mediante la colocación manual de los elementos o los materiales que los componen (denominados *mampuestos*) que pueden ser, por ejemplo: ladrillos, bloques de cemento prefabricados o piedras talladas en formas regulares o no.

Así también se realizó la identificación de las principales etapas de generación de RC en un proyecto de obra civil con base en las actividades, áreas y niveles de edificación que las integran, así como las metodologías utilizadas a nivel internacional para la cuantificación de los RC; paralelamente se realizó la investigación de la situación actual en materia de reúso y reciclaje de estos residuos, así como el panorama en materia de generación y cuantificación.

En esta misma fase se realizó la investigación sobre la construcción sustentable, el uso de la tierra como material de construcción así como la normativa mundialmente conocida en dicho ámbito.

### **3.2. Fase II. Diseño de materiales y construcción del equipo empleado**

En la segunda fase se diseñaron detalladamente, cuatro puntos principales:

- Tipo de materiales utilizados en la fabricación de los ladrillos sustentables, clasificación y tratamiento asignado.
- Dimensiones de fabricación de los ladrillos ecológicos y el diseño de las proporciones para las mezclas empleadas.
- Diseño y construcción del equipo empleado en la fabricación de los ladrillos sustentables.
- Definición del proceso constructivo.

A continuación se detalla el desarrollo de cada uno de los puntos mencionados:

#### **3.2.1. Materiales utilizados en la fabricación de ladrillos**

El uso de los materiales se justificó primeramente en el aprovechamiento de los residuos mayormente generados en la industria de la construcción, destacando así, en primer lugar los residuos provenientes de las excavaciones (tipo D), en segundo término los residuos de construcción provenientes del concreto (tipo A) así como los residuos de la construcción clasificados como residuos mezclados (tipo B); en conjunto a las exigencias actuales de la norma NADF-007-RNAT-2013 en la cual se prevé la inclusión obligatoria de estos materiales al ciclo de la construcción. Así también se integró el uso de los residuos maderables que de aquí en adelante serán nombrados como residuos de tala. De igual manera se incorporó el uso del mucílago del nopal gracias a los aportes previamente mencionados en

el sector de la construcción, aunado a la carencia de estrategias de aprovechamiento para los residuos orgánicos generados en la producción y venta de este vegetal.

Con el aprovechamiento de estos materiales se pretende encauzar la participación activa y sustentable del sector de la construcción en las exigencias de construcciones sustentables establecidas en la norma para edificaciones sustentables NMX-AA-164-SCFI-2013.

Respecto a los materiales empleados se distinguen básicamente dos tipos de materiales, los que trabajan como agregados y los aglomerantes. Los cuales se diferenciaron de la siguiente manera:

### **3.2.1.1. Materiales aglomerantes**

Residuos de excavación (tierra): Son materiales que cumplen la función de material ligante, se ha fundamentado el empleo de este material debido a las características de disponibilidad, trabajabilidad y antecedentes constructivos que representa. Cabe mencionar que el uso de estos materiales en la fabricación de ladrillos depende de las características propias de su composición, por lo cual necesariamente se identificaron estas características básicas.

En la presente investigación, para la fabricación de ladrillos, se emplearon residuos de excavación proveniente del estado de Puebla, un suelo principalmente arcilloso, y posteriormente en la siguiente Fase de fabricación se emplearon dos tipos distintos de residuos de excavación, los cuales fueron: suelo areno-arcilloso provenientes del Distrito Federal y un suelo arcilloso-limoso con presencia de arenas proveniente del Estado de México. Estos residuos fueron extraídos directamente durante de los procesos de excavación de las obras correspondientes se puede apreciar en la Figura 29.



Figura 29. Extracción de materiales de excavación en el Distrito Federal

Para poder utilizar los residuos de excavación, se realizó un proceso de secado del material exponiéndolo al sol durante aproximadamente 2 días (Figura 30), en seguida, con la ayuda de un pisón de mano de aproximadamente 8 kg de peso, se disgregó el material a fin de reducir los tamaños de los grumos (Figura 31), posteriormente este material fue cernido ((Figura 32) haciéndolo pasar por un tamiz del número 10 (aberturas de 2 mm). En seguida el material secado y cernido fue almacenado en costales que permanecieron resguardados en el interior del Edificio 8 del Instituto de Ingeniería para ser utilizados gradualmente en las posteriores fabricaciones.



Figura 30. Secado de los residuos de excavación



Figura 31. Apisonado de los residuos de excavación



Figura 32. Proceso de cernido de la tierra

### 3.2.1.2. Materiales de relleno o agregados

Son los materiales obtenidos a través de la trituración de los residuos de la construcción clasificados como materiales potencialmente reciclables. Estos residuos fueron obtenidos a través del donativo realizado por de la empresa recicladora de residuos de la construcción denominada Concretos Reciclados, empresa en la cual los materiales son sometidos a un proceso de separación, trituración y clasificación, como se observa en la Figura 33.

Los residuos de construcción utilizados en la presente investigación son clasificados primeramente en 2 grupos principales: **residuos de construcción sólo cementantes** (clasificados por la NADF-007-RNAT-2013 como tipo A) siendo estos agregados, producto de la trituración de los materiales compuestos por residuos exclusivos de concretos y sub clasificados por 3 diferentes granulometrías, 1", 3/8" y 1/4" a finos; el segundo grupo denominado **residuos de construcción todo en uno** (clasificados por la NADF-007-RNAT-2013 tipo B) son agregados que corresponden a la trituración de residuos compuestos por ladrillos, bloques, cerámicos, morteros, adoquines, mamposterías y prefabricados producidos con granulometría de 1/4" a finos ejemplificados en la Tabla 25.



Figura 33. Trituración y separación granulométrica

Fuente: Granell, 2014.

Tabla 25. Clasificación granulométrica

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

### 3.2.1.3. Residuos de tala o maderables

Se decidió la incorporación de residuos de tala o residuos maderables debido a sus propiedades fibrosas, los cuales cumplieron la función de material estabilizador durante la solidificación de la mezcla, así también es un material que ayudó a mejorar la composición de las mezclas fabricadas; estos residuos, fueron proporcionados por la planta de composta de Ciudad Universitaria; en este lugar son recibidos los residuos de tala provenientes de la poda y corte de árboles en la UNAM, los cuales son sometidos a un proceso de trituración generando materiales empleados para la formación de composta como se observa en las Figuras 34a y 34b.



Figura 34. Trituración mecánica de residuos maderables

Se utilizaron residuos de tala con tamaños menores a 2.5 cm, con la finalidad de que los residuos pudieran ser perfectamente incorporados a la mezcla y así evitar la formación de vacíos que reducirán la consistencia uniforme de los ladrillos. Para asegurar este requerimiento, los residuos de tala se cribaron con la ayuda de un bastidor de malla de alambre como se observa en la Figura 35, permitiendo así obtener el tamaño adecuado.



Figura 35. Cribado de residuos de tala

### 3.2.1.4. Mezcla de agua-mucílago de nopal

El material líquido que facilitó el mezclado y la integración homogénea de los componentes, se integró por sus características de mejoramiento físico en las pastas de cemento, morteros y mezclas empleadas en la construcción, así como por el aumento de la trabajabilidad y la fluidez de las mezclas.

El nopal empleado fue adquirido en el establecimiento denominado "Centro de acopio del nopal", ubicado en la delegación de Milpa Alta (Figura 36). En esta investigación se utilizaron unidades de nopal entero (Figura 37) debido a la duración del proyecto y la factibilidad de uso de los mismos, sin embargo su uso está encaminado al aprovechamiento de los residuos de nopal que se generan en este sitio.



Figura 36. Centro de acopio del nopal en la delegación de "Milpa Alta"



Figura 37. Nopales adquiridos de tamaño mediano

Con el fin de preservar la frescura de estos materiales para ser utilizados gradualmente durante el periodo de experimentación, se realizaron métodos de conservación para los mismos, los cuales aseguraron su conservación y buen estado durante un periodo de 3.2 meses; por lo anterior, la forma de preservar y evitar el deterioro de los nopales consistió en la realización de cortes limpios en el tallo (Figura 38) de cada nopal y el curado de la zona de corte mediante 3 técnicas: la aplicación de ácido cítrico (Figura 39) producto de las naranjas desechadas en el Anexo de Ingeniería de la UNAM; la incorporación de papel higiénico en la zona de corte (Figura 40) y la tercera técnica se basó en dejar secar al aire libre el corte realizado permitiendo que se desarrollara de manera natural (Figura 41).

De las técnicas realizadas, la técnica que presentó mayor eficiencia de conservación fue la del uso de ácido cítrico.



Figura 38. Corte limpio en el tallo de los nopales



Figura 39. Curado con ácido cítrico



Figura 40. Curado con papel higiénico

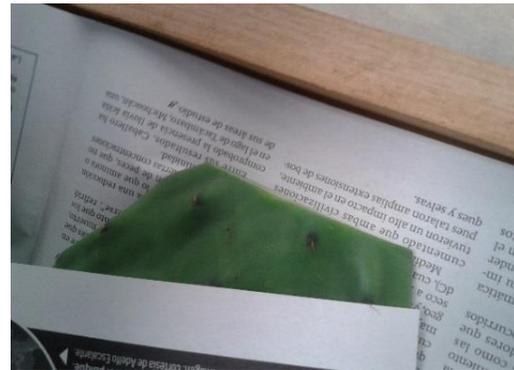


Figura 41. Curado natural

Para la preparación de la mezcla entre agua y mucílago de nopal, se probaron tres métodos distintos de obtención del mucílago; el primero consistió en cortar y hervir trozos de nopales durante aproximadamente 20 minutos, periodo durante el cual se realizaba la separación entre el mucílago y la piel de los nopales como se observa en la Figura 42.



Figura 42. Extracción de mucílago mediante el hervido de los nopales

El segundo método consistió en cortar y licuar en frío los nopales con una cantidad mínima de agua, posteriormente con la ayuda de un colador se separó la parte líquida de la parte sólida y finalmente el tercer método adoptado por eficiencia de proceso se realizó cortando los nopales en cuadros de aproximadamente 1.5 cm<sup>2</sup> como se muestra en la Figura 43, en seguida se pesaron y depositaron en un recipiente (Figura 44) y enseguida se le agregó agua en una proporción 1:3 (kg nopales: litros de agua), esta mezcla se dejó reposar durante un periodo de tres días como se observa en la Figura 45.



Figura 43. Corte de nopales en trozos



Figura 44. Reposo de la mezcla agua-nopal

Posteriormente pasado el periodo de reposo, se realizó la extracción del material fluidizante, con la ayuda de un colador separando los trozos de nopal de la parte líquida.



Figura 45. Extracción de la mezcla agua-mucílago

### 3.2.2. Dimensiones de fabricación de los ladrillos y dosificaciones

Las dimensiones de fabricación se eligieron con base en el análisis de la norma NMX-C-404-ONNCCE-2005. Cada pieza se realizó con las dimensiones descritas en la Tabla 26 basadas en la caracterización de lados ilustrada en la Figura 46.

Tabla 26. Dimensiones de fabricación de ladrillos

DIMENSIONES DE FABRICACIÓN			
Grueso	5.5	cm	
Tizón	12	cm	
Soga	26	cm	

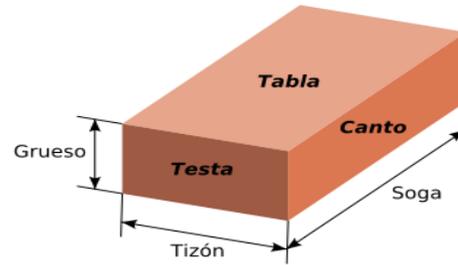


Figura 46. Caracterización de lados

### 3.2.3. Diseño y construcción del equipo empleado en la fabricación de los ladrillos

El equipo utilizado en la fabricación de los ladrillos, fue realizado en el taller de carpintería del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el cual se integra por una máquina moldeadora de ladrillos, un secador solar de primera etapa y un segundo secador, nombrado como secador solar mejorado.

#### 3.2.3.1. Máquina moldeadora de ladrillos

La máquina moldeadora de ladrillos presentada en la Figura 47 fue fabricada principalmente de residuos de madera generados en el taller de carpintería de la UNAM.



Figura 47. Máquina moldeadora de ladrillos

El mecanismo de moldeo se compone por una base metálica de 80 cm de altura, sobre la cual descansa un marco de madera de 50 cm x 25 cm y 7 cm de profundidad, que cuenta con una tapa fabricada del mismo material cuya función es ejercer presión uniforme en la superficie de las piezas paralelamente que con la tapa y la base del molde, mediante una palanca que al ser presionada comprimen uniformemente a los ladrillos, logrando así la eliminación de vacíos y la textura uniforme en las piezas; esta misma palanca facilita la extracción de la pieza al ejercer presión en sentido contrario, ya que impulsa la base, empujando el ladrillo fuera del molde.

### 3.2.3.2. Secador solar de primera etapa

El mecanismo empleado para el secado de los ladrillos durante la tercera fase en la cual se dio inicio a la fabricación de ladrillos, se basó en el principio de un secador solar (Figura 48), el cual se fabricó con una superficie de madera de 90 cm x 60 cm forrada con material tetra pack, cerrado con caras y cubierta de acrílico. La cubierta del secador fue diseñada de manera tal que no reposara horizontalmente, sino que mantuviera una inclinación de 6° y así aumentara la recepción de los rayos solares; en la parte inferior del secador se le ubicaron cuatro tornillos metálicos que ayudaron a elevar el nivel de piso del mismo, con el fin de evitar que se encuentre expuesto a inundaciones u otra problemática extraordinaria que se pueda presentar.



Figura 48. Secador solar de primera etapa

### 3.2.3.3. Secador solar de segunda etapa

En la segunda etapa, se realizaron mejoras al secador solar empleado, utilizando el principio de funcionamiento de los hornos solares y reemplazando algunas de sus características iniciales, este secador solar se fabricó de residuos de madera, vidrio, aluminio y cartón, tal y como se observa en la Figura 49.



Figura 49. Secador solar mejorado

El esqueleto principal fue hecho de residuos de madera, con las siguientes dimensiones: la superficie fue de 116 cm x 74 cm cerrado con caras laterales de sección trapezoidal de 34 a 30 cm respectivamente.

La superficie interior del secador se forró con una placa de lámina de aluminio de calibre 16 y las caras laterales se forraron con dos capas adicionales a la madera, en la cara de madera se preparó una ranura especial para recibir una hoja de cartón grueso, enseguida se forró el interior con láminas formadas por latas de aluminio cortadas, las cuales se recolectaron de los depósitos de residuos inorgánicos de Ciudad Universitaria.

La cubierta principal del secador fue el producto del reúso de una pieza de vidrio grueso, anteriormente utilizado como cubierta de una mesa académica del Instituto de Ingeniería. En el lado longitudinal derecho del secador, se unió con bisagras metálicas una cubierta móvil fabricada de triplay, apoyada de una barra de soporte, que permitiera el desplazamiento de la cubierta con el fin de captar los rayos solares y reflejarlos en la tapa de vidrio para aumentar la captación de energía solar, esta

cubierta móvil fue forrada con papel aluminio obtenido del reuso de envolturas desechadas de comida rápida del anexo de ingeniería de Ciudad Universitaria.

El secador solar se fabricó con capacidad para almacenar en su interior de 30 a 32 ladrillos, el cual equivale a un peso aproximadamente de 110 kg entre las piezas de ladrillos y el cuerpo del secador.

Para agilizar su desplazamiento, se le incorporó en cada esquina una llanta móvil, lo cual favoreció el desplazamiento ágil de acuerdo a la posición del sol durante el transcurso del día y de igual manera lograr ser desplazado a resguardo durante la noche y/o durante condiciones adversas. En la Figura 49 se aprecia la estructura final del secador descrito.

### 3.2.4. Definición del proceso constructivo

Teniendo claramente definidos los materiales, las dimensiones y el equipo de fabricación se concretó el proceso a seguir para la fabricación de ladrillos, dicho proceso dio inicio en la Fase III de la metodología planteada. A continuación se describe el proceso que se siguió durante las fases de fabricación de los ladrillos, siendo la Figura 50 correspondiente a la Fase III y la Figura 51 a la Fase IV, durante las cuales el enfoque principal fue la fabricación y prueba de los ladrillos.

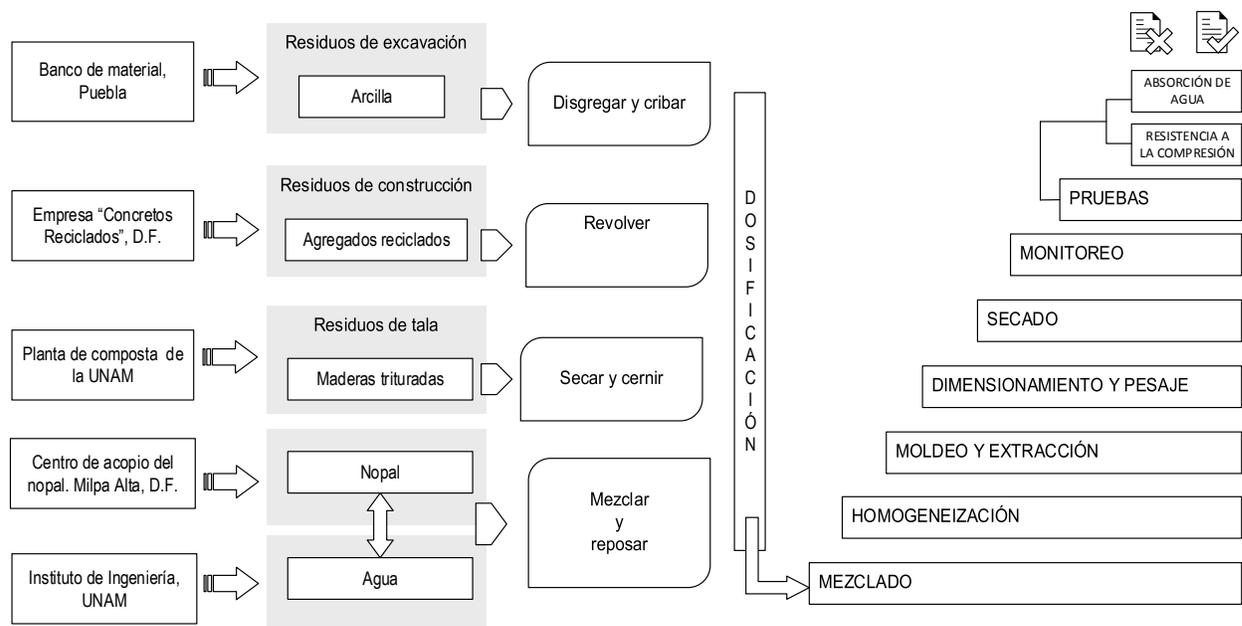


Figura 50. Proceso constructivo seguido durante la Fase III

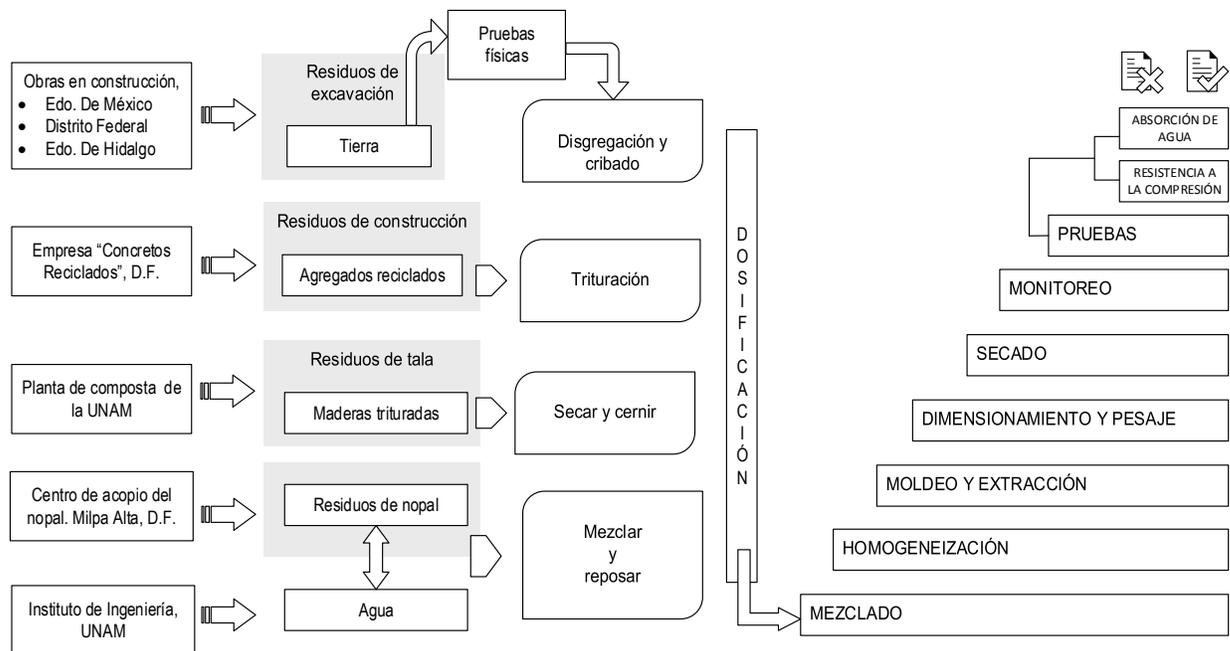


Figura 51. Proceso constructivo seguido durante la Fase IV

Básicamente el proceso constructivo empleado en las 2 fases de fabricación, fue significativamente similar; sin embargo la diferencia más notoria fue que durante la Fase IV, para la fabricación de ladrillos se involucraron como materia prima residuos de excavación diferentes al tipo de suelo empleados en la fabricación de la Fase III, así mismo en la Fase IV se incluyó la realización de pruebas preliminares para cada tipo de suelo con el fin de encausar la definición de mezclas y proporciones óptimas en la fabricación de ladrillos a partir del conocimiento adquirido durante la Fase III. Estos procesos secuenciales para cada fase se explican detalladamente a continuación.

### 3.3. Fase III. Fabricación de ladrillos a partir de los residuos de excavación del estado de Puebla

A partir de la definición de los materiales, las dimensiones y el equipo de fabricación, se inició con el diseño de las dosificaciones empleadas en la fabricación de la Fase III, en la cual se empleó como variable principal el uso de los residuos de la construcción reciclados, siendo estos residuos provenientes del concreto (tipo A) de granulometrías de 1", 3/8" y 1/4" a finos y residuos de la

construcción de tipo mezclados (tipo B) de 1/4" a finos de granulometría, enfocando esta fase de fabricación al uso exclusivo de los residuos de excavación provenientes del estado de Puebla.

### 3.3.1. Diseño de mezclas

Las proporciones de los materiales empleados se definieron principalmente con base en las características granulométricas y de plasticidad de la tierra empleada (residuos de excavación) así como en los principios de la fabricación artesanal de adobes y ladrillos, estableciendo así un parámetro en la dosificación que permitió aproximar detalladamente los pesos de los materiales utilizados.

Se diseñaron 9 mezclas con variación en las proporciones y en el tipo de material empleado; las 6 primeras mezclas se definieron basadas en la granulometría de los materiales empleados como agregados con los que se contaba (RC solo cementantes y mezclados), en consecuencia, las 3 mezclas siguientes se diseñaron conforme al comportamiento observado en las 6 mezclas base. Por cada mezcla planteada, se fabricaron 5 piezas con dimensiones de 26 x 12 x 5.5 cm, particularmente por ser la cantidad de piezas necesaria para las observaciones y pruebas posteriores que se realizaron. Enseguida, en la Tabla 27 se observan las mezclas utilizadas y el porcentaje de material empleado para cada uno de ellas.

Tabla 27. Diseño de mezclas utilizados en la fabricación de ladrillos durante la tercera fase

MEZCLA	ARCILLA (kg)	R. TALA (kg)	RC 1/4" SC (kg)	RC 1/4" TU (kg)	RC 3/8" (kg)	RC 1" (kg)
1	62%	5%	34%	-	-	-
2	62%	5%	-	34%	-	-
3	62%	5%	-	-	34%	-
4	62%	5%	-	-	-	34%
5	62%	5%	34%	-	-	-
6	62%	5%	17%	-	17%	-
7	62%	5%	-	17%	17%	-
8	63%	5%	11%	-	11%	11%
9	63%	5%	-	11%	11%	11%

RC= Residuos de construcción, SC= Solo cementantes, TU= Todo en uno.

### 3.3.2. Fabricación de ladrillos

El desarrollo de la fabricación se realizó de acuerdo al proceso constructivo definido anteriormente, para la Fase III se describen a continuación los procedimientos seguidos:

- a) Primeramente se adecuó el espacio de trabajo ubicando en el suelo una lona de vinil de aproximadamente 2 m x 1.5 m sobre la cual se realizó la mezcla correspondiente, paralelamente se realizaba el pesaje de las cantidades de material requerido para la mezcla correspondiente y la preparación del mucílago de nopal, esta mezcla se preparó mezclando nopal licuado con agua en una proporción 1:3; posteriormente se vertieron los residuos de excavación, extendiéndolos de forma circular sobre la lona de vinil (Figura 52), con la ayuda de una pala se formó un espacio en el centro de los residuos de excavación depositados previamente, en el que se depositaron los agregados reciclados y los residuos de tala.



Figura 52. Integración de materiales previo a la homogeneización

- b) Teniendo los materiales dispuestos en un mismo espacio, se incorporó el material que le daría forma a la mezcla, formado por el mucílago de nopal mezclado con agua, el cual se fue añadiendo a la mezcla formada en seco en cantidades parciales que fueron medidas con una probeta (Figura 53); la cantidad agregada fue determinada por las características físicas y visuales de la mezcla.



Figura 53. Incorporación del mucílago de nopal

- c) Enseguida, con el uso de la pala, se realizó la homogeneización de los materiales (Figura 54), en la cual el objetivo era lograr una consistencia pastosa que no presentara características líquidas o chiclosas y de igual forma que no estuviera grumosa o dura por la carencia de agua, con el fin de facilitar el moldeo de los ladrillos.



Figura 54. Homogeneización de la mezcla

- d) Una vez obtenida la consistencia adecuada, la mezcla fue acomodada dentro del marco de la máquina moldeadora a una altura de aproximadamente 5.5 cm. Al tener la altura aproximada, se utilizó una espátula o cuchara de albañil para acomodar y texturizar la superficie (Figura 55). Terminada la operación se cerraba el molde y se ejercía presión

con la aplicación de fuerza en la palanca, delimitada ésta por la resistencia propia de la palanca, aproximadamente el peso de una persona de peso promedio (Figura 56).



Figura 55. Acomodo de la mezcla en la máquina moldeadora



Figura 56. Compactación de la mezcla

- e) Posteriormente se destapaba el mecanismo de prensado y se extraía la pieza formada, con ayuda de la función de la palanca que facilitó la extracción. Una vez extraída la pieza, se llevó a una báscula para obtener el peso en estado fresco (Figura 57) y de igual manera se determinaron las dimensiones de cada pieza con el empleo de escuadras con escala de aproximación en mm (Figura 58).



Figura 57. Pesaje de ladrillos inmediato a su fabricación



Figura 58. Determinación de las dimensiones

- f) Las piezas fabricadas se expusieron al aire libre durante un periodo de 2 a 3 días, esto con la finalidad de que los ladrillos perdieran el agua contenida (Figura 59), y la evaporación de la misma no se quedará atrapada dentro del secador. Pasado este periodo y observada la pérdida máxima de humedad, los ladrillos se trasladaron al secador, ubicándolos con una posición de apoyo sobre su canto; se buscó que el secador se encontrará en todo momento expuesto directamente a los rayos solares. Durante la noche se trasladaba a un lugar bajo techo para evitar que el descenso de la temperatura empapara la superficie del mismo y agregará humedad a los ladrillos. Se realizaron revisiones periódicas durante su secado, por lo cual se cambiaron de posición al menos durante 4 veces, con la finalidad de obtener el secado uniforme (Figura 60). Los ladrillos permanecieron dentro del secador durante un periodo de 28 días.



Figura 59. Secado de ladrillos al aire libre



Figura 60. Secado de ladrillos dentro del secador solar

### 3.3.2.1. Realización de pruebas de resistencia a la compresión

Finalmente, cumplido el período de 28 días de secado, se realizaron las pruebas de resistencia a la compresión, estas pruebas fueron realizadas en el Laboratorio de Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM; se sometieron a prueba 2 de las de 5 piezas fabricadas por cada mezcla, con base en los parámetros establecidos en la norma NMX-C-441-ONNCCE-2013.

Previamente a la realización de la prueba, se realizó el procedimiento de “cabeceo de ladrillos”, cuya finalidad fue realizar la preparación de los ladrillos para ser llevados a pruebas de resistencia a la compresión, este procedimiento se realizó de la siguiente manera:

- a) El cabeceo de los ladrillos se realizó a partir de la fabricación de una mezcla entre yeso y cemento en una proporción 4:1, para este procedimiento se confinaron los ladrillos por sus cuatro lados con piezas de madera verificando que quedara entre 2 y 3 mm por encima de la superficie del ladrillo, esto se logró empleando una nivel de mano y se aseguró nivelando las piezas de madera en forma diagonal, contraponiendo los lados contiguos; en seguida se humedeció la superficie sobre la cual se realizaría el procedimiento de cabeceo, posteriormente se procedió a agregar la mezcla fabricada, cuidando el nivel establecido previamente con las piezas de madera (Figura 61); la capa integrada se añadió respectivamente a las caras inferior y superior de la pieza como se observa en la Figura 62 con el fin de mejorar el nivel de las superficies expuestas en la prueba, ya que al ser sometidas a la prueba de resistencia debían contar con las superficies lisas.



Figura 61. Nivelado de las piezas de confinamiento



Figura 62. Adición de la mezcla sobre la superficie de los ladrillos

- a) Enseguida del secado de ambas caras, se realizó el trazo de líneas perpendiculares intersectadas en el centro de la pieza, trazadas tanto en la superficie inferior como en la superior, esto fue necesario para ubicar centradamente cada pieza en el equipo de prueba. Al tener preparados los procedimientos, se realizó el proceso de prueba, ubicando el ladrillo al centro de la superficie del equipo de compresión axial, sobre el ladrillo se ubicó una placa metálica de 3 cm de espesor y posteriormente se inició con la aplicación gradual de la carga (Figura 63), la prueba se daba por terminada para cada pieza, en el momento en que ésta presentara las primeras fisuras en su composición como se puede observar el momento de falla en la Figura 64.



Figura 63. Inicio de la aplicación de carga



Figura 64. Momento de falla en el espécimen

Los resultados proporcionados por el equipo de prueba, correspondieron a la carga en kg soportada por la pieza antes de fallar o presentar fisuras en su composición, es decir su máxima resistencia de carga antes de la fractura, el resultado obtenido se dividió entre el área de la superficie en cm<sup>2</sup> sobre la cual se aplicó la carga, obteniendo así el dato de resistencia a la compresión en unidades de carga entre área, es decir kg/cm<sup>2</sup>, de acuerdo a la ecuación 2.

$$P = \frac{F}{A} \dots\dots Ec.2$$

Donde:

P = Resistencia a la compresión en kg/cm<sup>2</sup>

F= Carga máxima soportada por la pieza en kg

A = Área sobre la cual fue aplicada la carga en cm<sup>2</sup>

Posterior a la obtención de resultados en cuanto a resistencia, se concretó el método y la fabricación para esta Fase a partir de la mejor mezcla obtenida de las 9 fabricaciones realizadas, y posteriormente repitiendo la fabricación con las características de diseño que presentaron los mejores resultados y a partir de ello se concretó la dosificación, el método constructivo y el tiempo de secado estableciendo las condiciones y características óptimas de fabricación para la obtención de un ladrillo resistente, con textura uniforme y de estructura monolítica.

### **3.3.2.2. Realización de pruebas de absorción de agua**

Una vez fabricados los ladrillos a partir de las condiciones óptimas anteriormente establecidas, se evaluaron técnicamente mediante pruebas de absorción de agua máxima inicial, con base en la norma NMX-C-037-ONNCCE-2005. En esta etapa se realizó la prueba de absorción de agua máxima inicial para los ladrillos que presentaron valores mayores de resistencia a la compresión, el procedimiento realizado se describe a continuación:

- a) Primeramente se determinó el peso seco de cada ladrillo que sería probado, enseguida en un recipiente de forma rectangular con ancho y largo tales que su área no resultara menor de  $1936 \text{ cm}^2$  y con una profundidad interior mínima de 1.3 cm, se colocaron como soportes del espécimen dos barras de metal inoxidable de longitud de 13 cm y de altura de 6 mm en el fondo del recipiente tal y como se observa en la Figura 65.



Figura 65. Ubicación de barras metálicas en el recipiente de prueba

- b) Se llenó el recipiente con agua potable de manera que el nivel del agua se encontrará entre 3 y 3.5 mm arriba del nivel superior de los apoyos de metal inoxidable, se ajustó la posición y el nivel del agua con un ladrillo de referencia en estado saturado (Figura 66).



Figura 66. Ajuste de niveles de referencia con una ladrillo en estado saturado

- c) Enseguida se puso en contacto con el agua el ladrillo en etapa de prueba, sumergiendo una cara de acabado liso de manera tal que quedará 5 mm por debajo del nivel del agua por un periodo de 10 minutos, contando el tiempo de contacto a partir del momento que el espécimen tocara la superficie del agua tal y como se observa en la Figura 67. Durante el periodo de contacto, se debió cuidar que el nivel del agua se mantuviera dentro del límite anteriormente establecido.



Figura 67. Depósito del ladrillo de prueba sobre las barras metálicas

- d) Pasado el tiempo de contacto, se retiró el espécimen de prueba, removiendo el exceso de agua de las superficie expuesta con un trapo húmedo, no utilizando más de 10 segundos para hacerlo y enseguida se pesó nuevamente el espécimen en la báscula utilizada anteriormente con la misma precisión (Figura 68) con el fin de determinar la cantidad de agua absorbida durante el periodo de prueba.



Figura 68. Determinación del peso posterior al periodo de sumersión

### **3.4. Fase IV. Fabricación de ladrillos a partir de los residuos de excavación del Distrito Federal y el Estado de México**

Durante la cuarta fase se desarrolló primeramente la mejora del secador solar empleado anteriormente. Enseguida durante esta Fase, se desarrolló el diseño y la fabricación de ladrillos a partir de dos tipos de suelos obtenidos del proceso de excavación de una obra en el Distrito Federal y otra del Estado de México, de aquí en adelante identificados como Banco 1 y Banco 2 respectivamente. Previo a la fabricación de ladrillos se realizaron pruebas preliminares al material de excavación y a partir de ellas se estableció la dosificación para cada tipo de suelo.

En la Fase IV a partir del comportamiento de las dosificaciones planteadas y de los resultados obtenidos de las fabricaciones y pruebas realizadas durante la Fase III, se concretó el uso exclusivo de los agregados reciclados a los clasificados por granulometría de 1/4" a finos sólo cementantes, 1/4" a finos combinados todo en uno y a los residuos de 3/8".

#### **3.4.1. Pruebas preliminares**

El proceso constructivo consistió primeramente en caracterizar e identificar a los residuos de excavación mediante pruebas físicas. El resultado de estas pruebas proporcionó información sobre la calidad de la tierra analizada y su eficiencia para ser empleada en la fabricación de ladrillos. En seguida se describen las pruebas realizadas.

##### **3.4.1.1. Prueba granulométrica**

Fue utilizada para determinar la proporción de los componentes principales (arena, limos y arcilla) de la tierra, basados en el hecho de que la velocidad de caída de las partículas del suelo a través del agua aumenta con el diámetro de las mismas. El procedimiento seguido, fue el siguiente:

1.- Se agregó en un recipiente etiquetado de 1 litro de capacidad, tierra tamizada hasta la mitad de su altura y enseguida se adicionó la cantidad de agua suficiente que proporcionara su agitación.

2.- Se agitó vigorosamente la botella hasta que todas las partículas de la tierra estuvieran en suspensión y se dejó en reposo sobre una mesa como se observa en la Figura 69 por un período de 24 horas.



Figura 69. Prueba granulométrica

#### 3.4.1.2. Prueba de plasticidad

Sirvió para determinar la calidad de la tierra y permitió determinar el nivel de plasticidad del material en prueba. Para la evaluación se llevó a cabo el proceso descrito a continuación:

1.- Se humedeció la tierra necesaria para realizar un rollito de 20 cm de longitud y 1 cm de diámetro (ver Figura 70), cuidando que la cantidad de agua fuera la necesaria para formar una mezcla moldeable y manejable (no aguada).



Figura 70. Elaboración de rollito con el material de excavación

2.- Se deslizó centímetro a centímetro el rollito sobre el borde de una mesa tal y como se observa en las Figura 71 y la Figura 72, y enseguida se determinó la longitud a la cual se rompía el borde suspendido durante el procedimiento de deslice.



Figura 71. Proceso de deslice del rollito



Figura 72. Evaluación de plasticidad

3.- Se realizó el mismo procedimiento para tres rollitos por cada tipo de suelo. La calidad del material de excavación, fue evaluada a partir de los siguientes parámetros:

- Si el rollito se rompía entre 5 y 10 cm la tierra sería adecuada ya que tiene la adecuada proporción de arcilla y arena (tierra arcillo-arenosa).
- Si el rollito se rompía antes de los 5 cm indicaría que la tierra no tiene la suficiente cantidad de arcilla (tierra arenosa).
- Si se rompía después de los 15 cm, indicaría que la tierra contenía exceso de arcilla por lo cual se debería modificar (suelo arcilloso).

#### 3.4.1.3. Prueba de dureza

Enseguida se tomó la cantidad de material de excavación (tierra) suficiente y se humedeció llevando la mezcla a una consistencia adecuada (Figura 73) para moldear manualmente tres bolitas de 2 cm de diámetro y 2 pastillas de 3 cm de diámetro y 1.5 cm de espesor tal y como se aprecia en la Figura 74. Las piezas finalmente formadas se observan en la Figura 75.



Figura 73. Moldeo de la porción de material de excavación



Figura 74. Pastillas moldeados con residuos de excavación



Figura 75. Bolitas y pastillas fabricados para un tipo de residuos de excavación

Se identificaron las bolitas y las pastillas formadas, etiquetándolos con nombre y número, y se depositaron en un lugar seco y seguro por un período de 48 horas. Cabe mencionar que se realizó el proceso descrito para los dos bancos de material empleados.

Posterior al tiempo de secado se realizaron el aplastamiento manual de las piezas secas como se puede observar en la Figura 76 para el caso de las bolitas y en la Figura 77 para el caso de las pastillas, considerando los siguientes criterios de evaluación: cuando se rompían fácilmente se clasificaban como una tierra de baja resistencia, si se rompían con dificultad serían una tierra con resistencia media o alta según la magnitud de la fuerza aplicada.



Figura 76. Prueba de dureza



Figura 77. Aplastamiento de pastillas

#### 3.4.1.4. Prueba de mezclas

En seguida a la caracterización de los suelos, con base al conocimiento adquirido y al análisis de los resultados previos, se realizaron las combinaciones preliminares necesarias presentadas en la Tabla 28 y observables en la Figura 78a y 78b, con el fin de obtener las características óptimas para la fabricación masiva de ladrillos con cada uno de los materiales de excavación anteriormente planteados, principalmente en adecuar la cantidad de arenas (residuos de construcción de 1/4 " a finos) requerida por cada tipo de material.

Tabla 28. Combinaciones preliminares

Residuos de excavación	Residuos de construcción solo cementantes	Residuos de construcción todo en uno	Total
<b>RE</b>	<b>RC s/c</b>	<b>RC t/u</b>	
<b>50%</b>	50%	-	100%
<b>75%</b>	25%	-	100%
<b>60%</b>	40%	-	100%
<b>40%</b>	60%	-	100%
<b>50%</b>	-	50%	100%
<b>75%</b>	-	25%	100%
<b>60%</b>	-	40%	100%
<b>40%</b>	-	60%	100%



a)



b)

Figura 78. Diseño de mezclas preliminares

### 3.4.2. Diseño de experimentos para la fabricación de ladrillos

Al tener concretadas las características físicas y el comportamiento de las mezclas, se realizó el planteamiento de las mezclas utilizadas en la fabricación de ladrillos.

A partir de ellos se estructuró el diseño de mezclas primeramente para los residuos provenientes del Distrito Federal (Banco 1), en seguida para los residuos de excavación provenientes del Estado de México (Banco 2).

#### 3.4.2.1. Mezclas diseñadas para el material de excavación proveniente del Distrito Federal

A partir del diseño de las 4 mezclas planteadas, se diseñaron las dosificaciones de fabricación; cabe resaltar que en esta fase se desarrolló la comparativa entre la respuesta de los ladrillos, para los cuatro casos planteados, en los cuales se incorporaron los materiales conforme el número de mezcla fabricado, iniciando con la Mezcla 1, en la cual se integró exclusivamente por el empleo de residuos de excavación y residuos de tala, incorporando en las mezclas posteriores los diferentes tipos de residuos, siguiendo las dosificaciones tal y como se detalla a continuación:

Mezcla 1.- Residuos de excavación (RE) del Banco 1 + Residuos de tala + Agua o agua-mucílago de nopal.

Mezcla 2.- Residuos de excavación (RE) del Banco 1 + RC de 1/4" a finos TU + Residuos de tala (RT)+ Agua o agua mucílago de nopal.

Mezcla 3.- Residuos de excavación (RE) del Banco 1 + RC de 1/4" a finos SC + Residuos de tala (RT) + Agua o agua mucílago de nopal.

Mezcla 4.- Residuos de excavación (RE) del Banco 1 + RC de 1/4" a finos SC + RC de 3/8" + Residuos de tala (RT) + Agua o agua mucílago de nopal.

Lo anteriormente descrito se ejemplifica detalladamente en la Tabla 29 en la cual se describe la integración de materiales respectivos a cada una de las 4 mezclas diseñadas y en seguida en la Tabla 30 se detallan las mezclas utilizadas, variando el uso de agua como material fluidizante por la mezcla agua-mucílago.

Tabla 29. Diseño de mezclas utilizando agua como material fluidizante

Mezcla	Residuos de excavación		Residuos de tala	Agregados reciclados			Material fluidizante		
Mezcla 1	RE	+	RT				+	Agua	
Mezcla 2	RE	+	RT	+	RC t/u		+	Agua	
Mezcla 3	RE	+	RT	+	RC s/c		+	Agua	
Mezcla 4	RE	+	RT	+	RC s/c	+	RC 3/8"	+	Agua

Tabla 30. Diseño de mezclas utilizando agua-mucílago de nopal como material fluidizante

Mezcla	Residuos de excavación		Residuos de tala	Agregados reciclados			Material fluidizante		
Mezcla 1	RE	+	RT				+	Agua-Mucílago	
Mezcla 2	RE	+	RT	+	RC t/u		+	Agua-Mucílago	
Mezcla 3	RE	+	RT	+	RC s/c		+	Agua-Mucílago	
Mezcla 4	RE	+	RT	+	RC s/c	+	RC 3/8"	+	Agua-Mucílago

En las Tablas 31 y 32 se especifica el porcentaje y la cantidad de materiales en estado seco, utilizados por pieza de ladrillo fabricado, limitándose los datos correspondientes a la cantidad de material fluidizante a ser mostrados en el capítulo de resultados, ya que estos valores fueron determinados durante la etapa de la fabricación de ladrillos.

Tabla 31. Porcentajes de material empleado

Mezcla	Residuos de excavación		Residuos de tala		Agregados reciclados		
Mezcla 1	96%	+	4%				
Mezcla 2	74%	+	4%	+	22%		
Mezcla 3	74%	+	4%	+	22%		
Mezcla 4	74%	+	4%	+	11%	+	11%

Tabla 32. Cantidad de material empleado por unidad fabricada

Mezcla	Residuos de excavación		Residuos de tala		Agregados reciclados		
	kg		kg		Kg		
Mezcla 1	2.42	+	0.11				
Mezcla 2	1.93	+	0.11	+	0.57		
Mezcla 3	1.93	+	0.11	+	0.57		
Mezcla 4	1.93	+	0.11	+	0.29	+	0.29

Cabe resaltar que las cantidades de material anteriormente descritas, fueron empleados en igual magnitud al realizar las fabricaciones con agua y las fabricaciones con la mezcla agua-mucílago, es decir que se fabricaron ladrillos para cada una de las cuatro mezclas, utilizando agua como material fluidizante y enseguida se fabricaron las mismas cuatro mezclas diseñadas, empleando agua-mucílago como material fluidizante.

### 3.4.2.2. Mezclas diseñadas para el material de excavación proveniente del Estado de México

Enseguida la segunda fabricación de ladrillos de la Fase IV, se enfocó al uso exclusivo de los residuos de excavación provenientes del Estado de México (Banco de material 2), generados en la construcción de una vivienda familiar combinados con RC de 1/4" y 3/8", material de tala obtenido de la planta de composta de la UNAM y la mezcla obtenida a partir de la combinación de agua y mucílago de nopal, la cual es extraída del material en reposo anteriormente descrito.

De igual manera que en el planteamiento anterior, posterior a la realización de las pruebas preliminares, se diseñaron 4 tipos de mezclas integrando los materiales gradualmente respecto a cada mezcla; en el mismo contexto, se fabricó cada diseño con el uso de agua como material fluidizante y enseguida con el uso de la mezcla entre agua-mucílago de nopal; a continuación se enlistan las combinaciones planteadas:

Mezcla 1.- Residuos de excavación (RE) del Banco 2 + Residuos de tala + Agua o agua-mucílago de nopal.

Mezcla 2.- Residuos de excavación (RE) del Banco 2 + RC de 1/4" a finos TU + Residuos de tala (RT)+ Agua o agua mucílago de nopal.

Mezcla 3.- Residuos de excavación (RE) del Banco 2 + RC de 1/4" a finos SC + Residuos de tala (RT) + Agua o agua mucílago de nopal.

Mezcla.- Residuos de excavación (RE) del Banco 2 + RC de 1/4" a finos SC + RC de 3/8" + Residuos de tala (RT) + Agua o agua mucílago de nopal.

A continuación en la Tabla 33 y 34 se detallan los datos correspondientes a los porcentajes y la cantidad de material en seco, empleados por unidad de ladrillo.

Tabla 33. Diseño de mezclas utilizando agua como material fluidizante

Mezcla	Residuos de excavación		Residuos de tala	Agregados reciclados			Material fluidizante		
Mezcla 1	RE	+	RT				+	Agua	
Mezcla 2	RE	+	RT	+	RC t/u		+	Agua	
Mezcla 3	RE	+	RT	+	RC s/c		+	Agua	
Mezcla 4	RE	+	RT	+	RC s/c	+	RC 3/8"	+	Agua

Tabla 34. Diseño de mezclas utilizando agua-mucílago de nopal como material fluidizante

Mezcla	Residuos de excavación		Residuos de tala		Agregados reciclados			Material fluidizante	
Mezcla 1	RE	+	RT					+	Agua-Mucílago
Mezcla 2	RE	+	RT	+	RC t/u			+	Agua-Mucílago
Mezcla 3	RE	+	RT	+	RC s/c			+	Agua-Mucílago
Mezcla 4	RE	+	RT	+	RC s/c	+	RC 3/8"	+	Agua-Mucílago

En las Tablas 35 y 36 se muestra el porcentaje de material en estado seco, utilizados por unidad de ladrillo fabricado, y de igual manera que en el caso anterior, se limitan los datos correspondientes a la cantidad de material fluidizante a ser mostrados en el capítulo de resultados, ya que estos valores fueron determinados durante la etapa de la fabricación de ladrillos.

Tabla 35. Porcentajes de material empleado

Mezcla	Residuos de excavación		Residuos de tala		Agregados reciclados			
Mezcla 1	96 %	+	4 %					
Mezcla 2	54 %	+	4 %	+	42 %			
Mezcla 3	54 %	+	4 %	+	42 %			
Mezcla 4	54 %	+	4 %	+	21 %	+	21 %	

Tabla 36. Cantidad de material empleado por unidad fabricada

Mezcla	Residuos de excavación		Residuos de tala		Agregados reciclados			
	Kg		kg		kg			
Mezcla 1	2.52	+	0.11					
Mezcla 2	1.41	+	0.11	+	1.1			
Mezcla 3	1.41	+	0.11	+	1.1			
Mezcla 4	1.41	+	0.11	+	0.55	+	0.55	

### 3.4.3. Fabricación de ladrillos

- a) La fabricación de los ladrillos se realizó en el interior del Edificio 8 del Instituto de Ingeniería de la UNAM, las condiciones del día fueron favorables, ausentes de lluvia y con condiciones de temperatura de 24 a 25° C, dos días antes a esta fecha, se realizó la preparación del material líquido encargado de facilitar la integración homogénea de los materiales presentes en la mezcla, siendo este material la mezcla líquida de agua-mucílago de nopal, dicha preparación se realizó cortando 10 kg de nopales en trozos pequeños de aproximadamente 2.3 cm<sup>2</sup> y depositándolos en un recipiente de 50 m<sup>3</sup> de volumen, enseguida se les adicionaron 30 litros de agua potable y se dejó en reposo hasta el día de la fabricación, este procedimiento propició que los trozos de nopales expulsaran el mucílago contenido en su interior al estar sumergidos en agua potable, dicho proceso se ha detallado anteriormente en el apartado de los materiales empleados.
- b) Posteriormente se realizó el pesaje de las cantidades y proporciones de los materiales a utilizar (Figura 79) los cuales corresponden a los residuos de excavación, lo agregados reciclados con granulometría clasificada como RC de 1/4" a finos todo en uno, RC de 1/4" a finos sólo cementantes y RC de 3/8" y de igual manera se pesaron los residuos de tala de tamaños menores a 2 cm, los cuales fueron previamente secados y cernidos. Cabe resaltar que la cantidad de materiales fueron pesados para cada unidad de ladrillos, con el fin de garantizar que todas las piezas fabricadas se realizarán en las mismas condiciones de peso y fabricación, de igual manera se preparó el equipo y las herramientas utilizadas para dar inicio a la fabricación de ladrillos (Figura 80a y 80b).



Figura 79. Preparación del material de fabricación



a)



b)

Figura 80. Equipo empleado durante la fabricación de ladrillos

- c) En seguida a la preparación de los materiales se comenzó con la fabricación de los ladrillos, vertiendo en un recipiente de aproximadamente 5 litros de volumen el material pesado anteriormente, posteriormente se realizó el mezclado manual de los materiales en estado seco y enseguida se incorporó la mezcla agua-mucílago de nopal midiendo rigurosamente la cantidad del líquido agregando a cada mezcla con la ayuda de un cono aforado como se puede observar en las Figuras 81 y 82.



Figura 81. Adición del mucílago de nopal previamente medido



Figura 82. Preparación de la mezcla previa a la homogeneización

- d) El siguiente paso consistió en la homogeneización total entre los materiales con la ayuda de una espátula (Figura 83) hasta lograr una mezcla homogénea con características óptimas determinadas por su consistencia física, el objetivo fue realizar una mezcla

perfectamente mezclada, con características pastosas, muy ligeramente fluida y con condiciones adecuadas para ser moldeada con las manos.

En seguida se procedió a acomodar la mezcla realizada, en el interior de la máquina moldeadora (Figura 84), de manera tal que fuera compactada con las manos desde la colocación de las primeras capas depositadas y finalizando el acomodo con la ayuda de una espátula (Figura 85a y 85b).

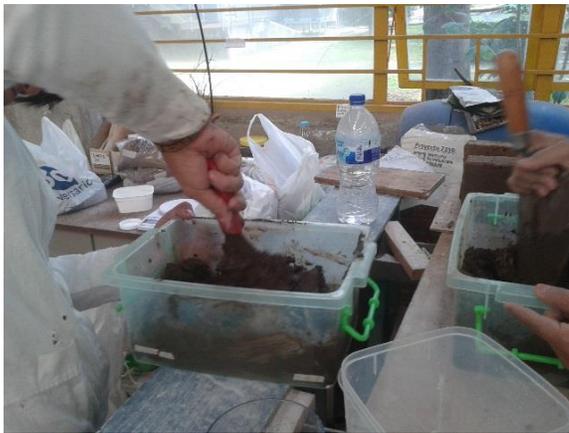
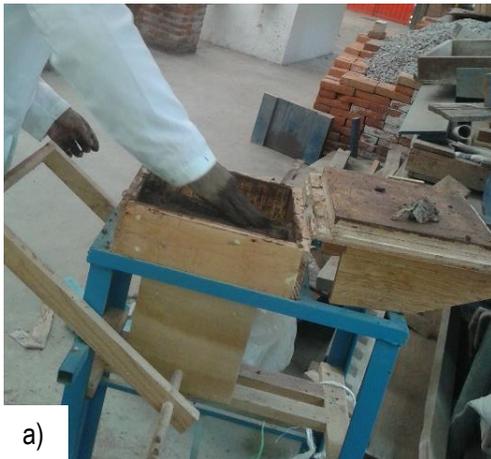


Figura 83. Mezclado de los materiales



Figura 84. Acomodo y compactación manual de la mezcla



a)



b)

Figura 85. Acomodo final de la mezcla

- e) El proceso final se realizó ejerciendo presión con la tapa de la máquina moldeadora de ladrillos (Figura 86) y posteriormente extrayendo los ladrillos con la aplicación de fuerza inversamente mediante la palanca (Figura 87 y 88).



Figura 86. Compactación de los ladrillos en la máquina moldeadora de ladrillos



Figura 87. Aplicación de fuerza en la palanca para la extracción de ladrillos



Figura 88. Extracción individual de ladrillos

- f) De igual manera se determinó el peso en estado fresco así como las dimensiones de fabricación de cada ladrillo y enseguida se acomodaron en un espacio acondicionado, de manera tal, que garantizará su permanencia en condiciones similares de secado como se observa en la Figura 89a y 89b.



a)

b)

Figura 89. Acondicionamiento de ladrillos en un sitio con condiciones similares

- g) Los ladrillos permanecieron al aire libre durante un periodo de 15 días, a los tres días de secado se realizó el cambio en la posición de los ladrillos a fin de ser ubicados sobre su canto (Figura 90). Así mismo, durante este periodo se realizó el monitoreo diario correspondiente a la variación del peso y las dimensiones de cada una de las piezas de estudio (Figura 91).



Figura 90. Secado y cambio de posición



Figura 91. Monitoreo de dimensiones

- h) El lapso de tiempo de secado de los ladrillos, se dio por terminado a partir de los resultados presentados durante los tres últimos días de monitoreo, en los cuales la variación del peso y las dimensiones deberían ser significativamente similar al no presentarse mayor pérdida de peso que la atribuida a la pérdida de masa debido al traslado o manipulación de las piezas (1 o 2 gramos). Una vez determinado este periodo los ladrillos fueron trasladados al secador solar (Figura 92) en el cual se monitorearon los valores de temperatura generadas en su interior a lo largo del día (Figura 93).



Figura 92. Introducción de ladrillos al secador



Figura 93. Determinación de la temperatura en el interior del secador solar

### 3.4.4. Realización de pruebas técnicas de evaluación de calidad

En la Fase IV se realizó la evaluación de la calidad de los ladrillos fabricados mediante pruebas de resistencia a la compresión y pruebas de absorción de agua. En esta Fase las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron con el equipo de compresión axial del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Cabe resaltar que durante esta Fase, las pruebas de evaluación para las piezas fabricadas se realizaron en tres etapas principales: la primera se realizó a los 15 días del periodo de secado posteriores a su fabricación, periodo durante el cual se determinó la pérdida máxima de agua en condiciones naturales. La segunda etapa de pruebas se realizó 3 días después de la introducción de los ladrillos al secador solar, y la tercera etapa se realizó a los 6 días después de su introducción al secador solar.

Previo a cada etapa de prueba se realizó el procedimiento del cabeceo, de la siguiente manera:

- a) Se realizó la fabricación de la mezcla yeso-cemento en una proporción 4:1, para este procedimiento se confinaron los ladrillos por sus cuatro lados con piezas de madera verificando que quedaran al mismo nivel superficial (Figura 94a y 94b), esto se logró empleando una nivel de mano y se aseguró nivelando las piezas de madera en forma diagonal, contraponiendo los lados contiguos.

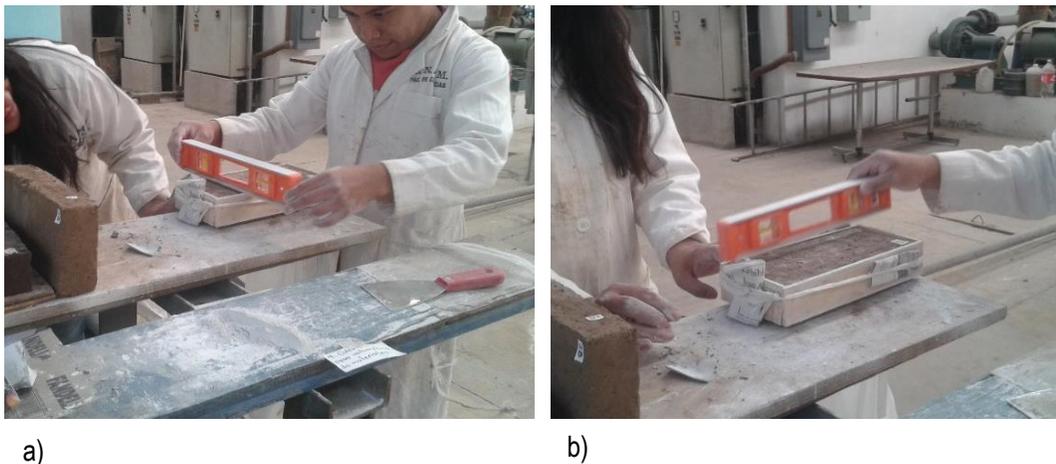


Figura 94. Nivelado de maderas de confinamiento

- b) En seguida se humedeció la superficie sobre la cual se agregaría la mezcla (Figura 95), posteriormente se procedió a agregar la mezcla fabricada (Figura 96), cuidando el nivel establecido previamente con las piezas de madera.



Figura 95. Humedecimiento de la superficie



Figura 96. Aplicación de la mezcla yeso-cemento

#### 3.4.4.1. Pruebas de resistencia a la compresión

Posterior al cabeceo de los ladrillos y el secado de los mismos, se determinaron las dimensiones finales de cada pieza y se trasladaron los especímenes al Laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería, a continuación se describe el procedimiento seguido para esta prueba.

- a) Se ubicaron en la base del equipo, dos placas de metal gruesas necesarias para que los ladrillos estuvieran lo más cercano al punto de aplicación de la carga (Figura 97), enseguida se ubicó una placa metálica rectangular que serviría de soporte para la ubicación del ladrillo, posteriormente se ubicó el ladrillo a ser probado y se centró alineándolo por ambos sentidos con el punto de aplicación de la fuerza, enseguida se colocó encima del ladrillo una segunda placa metálica similar a la ubicada en la parte

inferior y se comenzó con la aplicación gradual de carga sobre la superficie del ladrillo (Figura 98).



Figura 97. Equipo de compresión axial



Figura 98. Aplicación de carga

Se puso especial cuidado en el momento en el cual se presentaran las primera fracturas en la pieza (Figura 99) y enseguida se tomó la lectura del valor de la carga soportada durante el momento de la falla (Figura 100).



Figura 99. Verificación de primera fractura



Figura 100. Toma de lectura del esfuerzo soportado por la pieza en prueba

La prueba se daba por terminada en el instante en el que el equipo automáticamente dejaba de aumentar la carga durante al proceso de aplicación y la

aguja de indicación de la carga comenzaba a descender, lo cual indicaba que la pieza había fallado manifestando su resistencia máxima.

Posteriormente se retiró del equipo de prueba el ladrillo sometido a resistencia y se continuaba con la siguiente pieza preparada, en la Figura 101 se observa la estructura de los ladrillos al final de las pruebas, al término del procedimiento. Cabe destacar que durante esta prueba, posterior a la primera fractura los ladrillos se mantuvieron íntegros, presentando una alta capacidad de aplastamiento, sin disgregarse al soportar la carga máxima de resistencia.



Figura 101. Estructura de los especímenes probados

#### **3.4.4.2. Pruebas de absorción de agua**

Dado que en la construcción de materiales con tierra no se exige la prueba de absorción de agua máxima total para dichas piezas debido a su conocido comportamiento genuino ante la exposición total al agua, con el fin de obtener un parámetro de referencia se determinó el periodo y porcentaje de absorción total de los ladrillos fabricados, mediante los fundamentos y la correlación del método establecido en la norma NMX-C-037-ONNCCE-2005 para determinar el porcentaje de absorción total de agua. En este proceso los especímenes probados fueron sumergidos en agua a una temperatura de entre 17 y 24°C durante un periodo determinado por el tiempo en el cual los ladrillos se mantuvieron en estado íntegro al permanecer sumergidos en agua, tomando el peso antes de sumergirlos y después de cumplirse el periodo de sumersión.

- a) Se llevó a cabo el procedimiento como se observa en la Figura 102, se pesó el ladrillo en estado seco correspondiente a cada tratamiento, posteriormente se sumergió en un recipiente de volumen suficiente cronometrando el tiempo de inicio de la prueba así como el periodo de duración de la misma.



Figura 102. Sumersión de ladrillos

- b) Posterior al inicio de la sumersión se tomó el peso del ladrillo saturado durante cada hora (Figura 103), extrayéndolo y retirando el exceso de agua con la ayuda de una franela húmeda cuidando que el proceso se realizará lo más rápido posible, sin dañar a la pieza en prueba, y enseguida se depositaba nuevamente en el recipiente.



Figura 103. Determinación del peso

Extraer el ladrillo en estado íntegro garantizó la respuesta positiva del ladrillo a dicha prueba. Durante el transcurso del tiempo se probó a cada 10 minutos que el ladrillo pudiera ser extraído completamente sin fisuras o rompimiento. El proceso se dio por terminado en el instante en el que el ladrillo presentó fracturas o disgregación al intentar levantarlo de la superficie del recipiente como se observa en la Figura 104, terminando el cronometraje del tiempo. La realización de esta prueba facilitó la aproximación de las piezas ante un ambiente similar a las condiciones planteadas.



Figura 104. Indicación del término de la prueba

De igual manera se realizaron las pruebas de absorción de agua máxima inicial, poniendo en contacto con agua una cara de acabado liso a una altura del nivel del agua de aproximadamente 5 mm, apoyando el espécimen sobre dos barras metálicas y manteniendo el nivel de agua constante durante un periodo de 10 minutos, determinando el peso antes y después de la prueba (Figura 105), este proceso se realizó con los mismos requerimiento establecidos y detallados anteriormente en la Fase III de esta investigación.



Figura 105. Prueba de absorción inicial

## 4. Resultados

Del trabajo anteriormente descrito, a continuación se presentan los resultados obtenidos correspondientes a cada fase de la metodología planteada.

### 4.1. Resultados Fase I. Normativa aplicable en materia de residuos de la construcción

En materia de normativa nacional en el tema de residuos, en la Figura 106 se presenta el esquema jerárquico de la normativa aplicable, del cual se resume que, México se encuentra regido por la LGPGIR y su reglamento; paralelamente de manera parcial, los estados se amoldan a las bases fincadas en la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal.



Figura 106. Normativa aplicable en el tema de residuos

Así mismo, enseguida se informa sobre la normativa en el tema de residuos de la construcción así como de la parte técnica de evaluación de la calidad para ladrillos y bloques presentes en el sector de la construcción.

#### 4.1.1. Normas Mexicanas en materia de manejo de residuos de construcción

La Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011, establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial (dentro de los cuales se encuentran los residuos de construcción) y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo.

La norma ambiental aplicable en el Distrito Federal NADF-007-RNAT-2013 establece la clasificación y especificaciones de manejo de los residuos de la construcción para optimizar su control, fomentar su aprovechamiento y minimizar su disposición final inadecuada.

#### 4.1.2. Normativa aplicable en la evaluación de la calidad de ladrillos

El sector de la construcción, se encuentra regulado por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), de acuerdo a la investigación realizada, en México se cuenta con especificaciones enfocadas en la evaluación de la calidad de los materiales y que engloban particularmente los requerimientos para bloques y ladrillos, entre ellas las normas de calidad mediante las cuales se evaluaron los ladrillos de la presente investigación, son las descritas en la Tabla 37.

Tabla 37. Normas empleadas para la evaluación de la calidad de los ladrillos fabricados

Norma	Año	Contenido
NMX-C-036-ONNCCE	2012	Industria de la construcción – Bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines- Resistencia a la compresión – Método de prueba.
NMX-C-037-ONNCCE	2013	Industria de la construcción-Mampostería – Determinación de la absorción total y la absorción inicial de agua en bloques, tabiques o ladrillos y tabicones – Método de ensayo.
NMX-C-038-ONNCCE	2013	Industria de la construcción - Mampostería – Determinación de las dimensiones de ladrillos, tabiques, bloques y tabicones para la construcción.
NMX-C-441-ONNCCE	2013	Industria de la construcción – Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural –Especificaciones.
NMX-C-404-ONNCCE	2012	Industria de la construcción para bloques, tabiques o ladrillos para uso estructural- Especificaciones.

#### 4.1.2.1. Especificaciones normativas de evaluación

Respecto a los requerimientos de la NMX-C-441-ONNCCE-2013 para piezas de construcción de uso no estructural, se indica que el cumplimiento de los valores de resistencia a la compresión y absorción de agua máxima inicial para ladrillos deben encontrarse dentro de los parámetros especificados en la Tabla 38 y la Tabla 39 respectivamente.

Tabla 38. Valores de resistencia a la compresión establecidos en la NMX-C-441-ONNCCE-2013

<b>Tipo de pieza</b>	<b>Configuración</b>	<b>Resistencia media MPa (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Resistencia mínima individual MPa (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
Bloque	Macizo o hueco	3,5 (35)	2,8 (28)
Tabique extruido	Macizo o hueco	4,0 (40)	3,2 (32)
Tabique artesanal	Macizo	3,0 (30)	2,4 (24)
Pieza para celosía	Cara rectangular	2,5 (25)	2,0 (20)
	Cara no rectangular	2,5 (25)	2,0 (20)

Tabla 39. Valores de absorción de agua máxima inicial establecidos por la NMX-C-441-ONNCCE

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

Por otro lado, dada la presencia y uso de la tierra cruda (residuos de excavación) como material primordial empleado en la fabricación de los ladrillos, en materia de normativa aplicable, no se encontró establecida como tal una norma mexicana en la que se delimiten los parámetros para la fabricación y la evaluación de la calidad de este tipo de materiales.

Sin embargo, al respecto a nivel Internacional se encontró la Norma Técnica de Edificación NTE E.080, establecida en Lima Perú a partir de marzo del año 2000, que comprende lo referente al adobe simple o estabilizado como unidad para la construcción de albañilería con este material, así como las características, comportamiento y diseño. Estableciendo un valor mínimo de 12 kg/cm<sup>2</sup> de resistencia a la compresión por unidad fabricada.

Así también se identificó vigente y aplicable 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 y los cuales son presentados en la Tabla 40 y definidos numéricamente por la norma como 1, 2 y 3 respecto a su capacidad de resistencia.

Tabla 40. Clases de resistencia a la compresión normalizada por la Norma Española UNE 41410

Bloques	BTC 1		BTC 2		BTC 3	
	N/mm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia normalizada	1,3	13	3,0	30	5,0	50

En este contexto se encontró también que en Nuevo México, Estados Unidos el Organismo emisor de División de Regulación y Licencias para la Industria de la Construcción ha emitido el Código de Construcción General en el cual en su capítulo 7 hace alusión al uso de la tierra como material de construcción, en dicho escrito se encuentra establecido el parámetro de resistencia a la compresión para la evaluación de la calidad de estos materiales de 300 libras por pulgada cuadrada por unidad probada, valor que es equivalente a 21 kg/cm<sup>2</sup>. Enseguida en la Tabla 41 se resumen los parámetros establecidos por las normas analizadas.

Tabla 41. Valores determinados en normativa internacional para materiales fabricados con tierra

País	Norma	Resistencia	
		N/mm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
Lima-Perú	NTE E.080	1,3	12
España	UNE 41410	1,3	13
Estados Unidos	Código de construcción	2,1	21

## 4.2. Resultados Fase II. Diseño

A partir de los planteamientos y los conceptos investigados se concretaron las dimensiones de fabricación por unidad de ladrillo, las cuales se muestran gráficamente en la Figura 107 y se detallan en la Tabla 42.

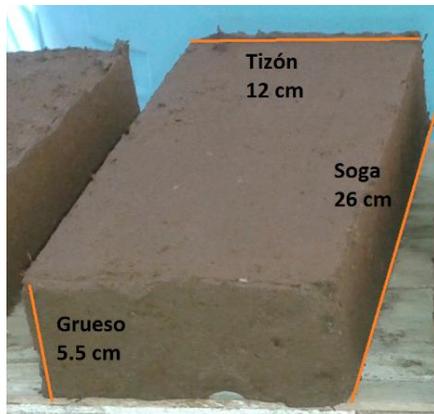


Figura 107. Dimensiones de fabricación respecto a sus lados

Tabla 42. Dimensiones de fabricación

Dimensiones de fabricación		
<b>Grueso</b>	5.5 cm	55 mm
<b>Tizón</b>	12 cm	120 mm
<b>Soga</b>	26 cm	260 mm

Con las dimensiones de fabricación planteadas se corrobora que las dimensiones de fabricación cumplen con los lineamientos establecidos en la norma de calidad NMX-C-441-ONNCCE-2013 en la que se establecen las dimensiones mínimas de: 5 cm de alto, 7 cm de ancho y 19 cm de largo.

Así mismo a partir de los parámetros analizados, se definió la proporción de materiales base para las fabricaciones de los ladrillos empleando como material de excavación a los residuos provenientes del estado de Puebla, como se muestra en los datos presentados en la Tabla 43.

Tabla 43. Proporción de materiales empleada en la Fase III

<b>Materiales</b>	<b>Porcentaje</b>
Arcilla	62%
Residuos de construcción	34%
Residuos de tala	5%
Mucilago-Agua	22%

#### 4.3. Resultados Fase III. Fabricación de ladrillos empleando residuos de excavación del estado de Puebla

Durante la tercera fase en primera instancia se determinó el porcentaje de la mezcla fluidizante entre agua-mucilago para cada una de las mezclas fabricadas, dicho porcentaje fue determinado básicamente por las condiciones y las características de la mezcla en el momento de su fabricación estos porcentajes se encuentran detallados en la columna 8 de la Tabla 44, los cuales corresponden al valor porcentual del peso seco de los materiales.

Tabla 44. Dosificación de material y porcentaje de agua-mucilago empleado por tipo de mezcla

MEZCLA	ARCILLA	R. TALA	RC 1/4" TU	RC 1/4" SC	RC 3/8"	RC 1"	AGUA-NOPAL
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(Litros)
Mezcla 1	62%	5%	34%	-	-	-	25%
Mezcla 2	62%	5%	-	34%	-	-	22%
Mezcla 3	62%	5%	-	-	34%	-	33%
Mezcla 4	62%	5%	-	-	-	34%	20%
Mezcla 5	62%	5%	34%	-	-	-	20%
Mezcla 6	62%	5%	17%	-	17%	-	20%
Mezcla 7	62%	5%	-	17%	17%	-	20%
Mezcla 8	63%	5%	11%	-	11%	11%	21%
Mezcla 9	63%	5%	-	11%	11%	11%	21%

RC= Residuos de construcción, SC= Sólo cementantes, TU= Todo en uno

Los resultados mostraron, que los valores de la cantidad de agua-mucilago para cada mezcla, presentan ligeras variaciones entre ellos, a partir de lo cual se delimitó un parámetro de adición de 23 % a 26 % como la cantidad adecuada para la realización óptima de la mezcla.

### 4.3.1. Pruebas de resistencia a la compresión

Posterior al periodo de secado, al realizar las pruebas de resistencia a la compresión, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 45. El resultado de la aplicación de la Ecuación 1 planteada anteriormente, emite los resultados correspondientes a la columna 5 (Resistencia a la compresión).

Tabla 45. Resultados de resistencia a la compresión

Mezcla	N° de pieza	Carga soportada (kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
Mezcla 1	1A	21622	312.4	69.3
	1B	20998	312.2	67.3
Mezcla 2	2A	19375	312.1	62.1
	2B	23556	312.7	75.5
Mezcla 3	3A	16661	312.3	53.4
	3B	15257	312.3	48.9
Mezcla 4	4A	18190	312.5	58.3
	4B	20280	312.4	65
Mezcla 5	5A	21497	312.6	68.9
	5B	23431	312.1	75.1
Mezcla 6	6A	17971	312.1	57.6
	6B	18970	312.2	60.8
Mezcla 7	7A	22994	312.5	73.7
	7B	27643	312.6	88.6
Mezcla 8	8A	21934	312.2	70.3
	8B	21403	312.3	68.6
Mezcla 9	9A	19438	312.8	62.3
	9B	18564	312.1	59.5

En la Tabla 46 se resumen los valores promedio de resistencia a la compresión por tipo de mezcla, asignados con base a los datos anteriores, con la finalidad de definir un valor que represente el comportamiento de resistencia por tipo de mezcla y no específicamente por unidad fabricada.

Tabla 46. Valor promedio de resistencia a la compresión correspondiente a cada mezcla

Tipo de mezcla	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
Mezcla 1	68
Mezcla 2	69
Mezcla 3	51
Mezcla 4	62
Mezcla 5	72
Mezcla 6	59
Mezcla 7	81
Mezcla 8	69
Mezcla 9	61

A partir los resultados obtenidos se realizó la evaluación entre los valores de resistencia obtenidos y los parámetros establecidos en la NMX-C-441-2013, esta comparativa se describe gráficamente en la Figura 108, en la cual se observa que las 9 mezclas fabricadas cumplieron con el valor normativo mínimo de 30 kg/cm<sup>2</sup> asignado por la norma a los ladrillos de fabricación artesanal. Y así mismo las 9 mezclas fabricados cumplen con el valor mínimo de 40 kg/cm<sup>2</sup> establecido para tabique extruido.

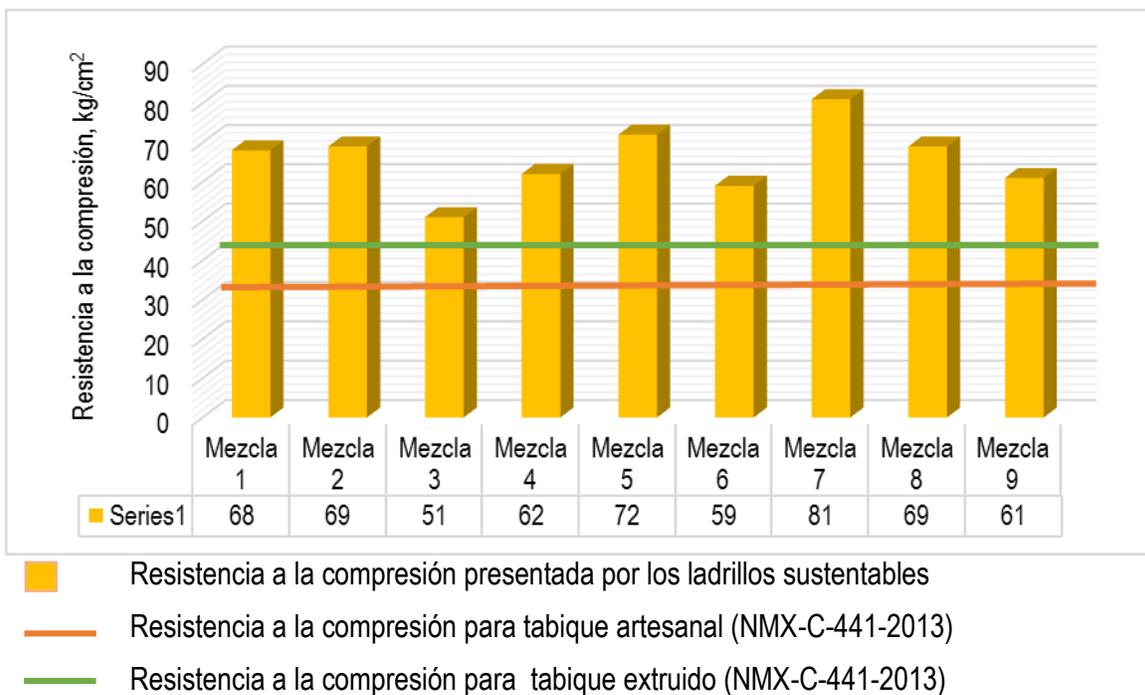


Figura 108. Evaluación de la resistencia a la compresión

De los resultados presentados, resalta que las piezas fabricadas que presentaron mejor comportamiento en cuanto a resistencia fueron los ladrillos correspondientes a la mezclas 1, 2, 5, y 7, en las cuales predominó la presencia de residuos de la construcción (agregados) de 1/4" todo en uno, 1/4" sólo cementantes y de 3/8".

Así también, los parámetros obtenidos mostraron el desempeño mecánico de los materiales empleados. Los ladrillos correspondientes a la mezcla número 7, fabricados con residuos de construcción de granulometría de 1/4" sólo cementantes, fueron los ladrillos que presentaron mejor comportamiento en cuanto a resistencia, interpretando como la mezcla óptima, la dosificación formada entre los residuos de 1/4" y 3/8" de pulgada. Esto se interpreta debido a que los espacios formados entre las partículas de tamaños mayores (3/8") fueron adecuados para ser ocupados por las partículas de material de menor tamaño correspondientes a los residuos de construcción de 1/4" sólo cementantes, y proporcionando mayor resistencia al ser residuos compuestos por concretos, los cuales pudieron mejorar la resistencia y aumentar el amarre entre las partículas, ya que al comparar los resultados obtenidos con la resistencia presentada por la mezcla 8 en la cual se emplearon las mismas granulometrías difiriendo a los residuos de 1/4" sólo cementantes por residuos de 1/4" mezclados (todo en un uno), hubo una considerable variación en el resultado obtenido.

Singularmente los resultados obtenidos para la mezcla 7, se relacionan con la obtención de una mezcla uniforme y fácilmente moldeable durante su fabricación, con características eficientes de trabajabilidad comparada a la de las 6 mezclas restantes, así mismo al término del tiempo de secado, las piezas presentaron una buena consistencia física, no existiendo fisuras mayores y presentándose como piezas monolíticas.

#### **4.3.2. Determinación de las condiciones óptimas de fabricación**

A partir de los resultados y el análisis desarrollado en los párrafos anteriores, se concretó la obtención de las proporciones de la mezcla óptima para esta Fase de fabricación, la cual correspondió a la mezcla número 7, que presentó valores de resistencia a la compresión de 80 a 85 kg/cm<sup>2</sup>, una eficiente trabajabilidad de la mezcla durante la fabricación y una textura sólida y monolítica posterior al tiempo de secado, la dosificación empleada para este mezcla se detalla en la Tabla 47.

Tabla 47. Composición de la mezcla óptima de fabricación

Mezcla	Arcilla	R. Tala	RC 1/4" SC	RC 3/8"	Agua- Mucilago
	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(Litros)
7	62%	5%	17%	17%	20%

RC= Residuos de construcción, SC= Sólo cementantes.

Así mismo, el monitoreo de la variación diaria del peso y dimensiones realizado a cada uno de los ladrillos fabricados, proporcionó la obtención del tiempo de secado óptimo, el cual corresponde a un período de 20 días en condiciones de tiempo nublado, pudiendo variar por las condiciones del tiempo en el que los ladrillos se expongan a secado en futuras fabricaciones, esta variación diaria durante el periodo de secado se encuentra especificada en la Tabla 48.

Tabla 48. Datos de variación diaria del peso durante el periodo de secado.

Día	Peso inicial	Δ Peso	
	gramos	gramos	%
1	3052	0	0%
2	2964	89	3%
3	2875	177	6%
4	2813	239	8%
5	2773	279	9%
6	2717	335	11%
7	2675	377	12%
8	2646	406	13%
9	2617	435	14%
10	2559	493	16%
11	2533	519	17%
12	2497	555	18%
13	2484	568	19%
14	2471	581	19%
15	2464	588	19%
16	2457	595	19%
17	2460	598	19%
18	2440	600	20%
19	2463	605	20%
20	2454	606	20%

La Figura 109 representa gráficamente los datos presentados en la Tabla 48, en las cuales se detalla respectivamente la pérdida de peso diario y en enseguida la Figura 110 corresponde a los valores presentados en términos de porcentaje que dicha pérdida representó.

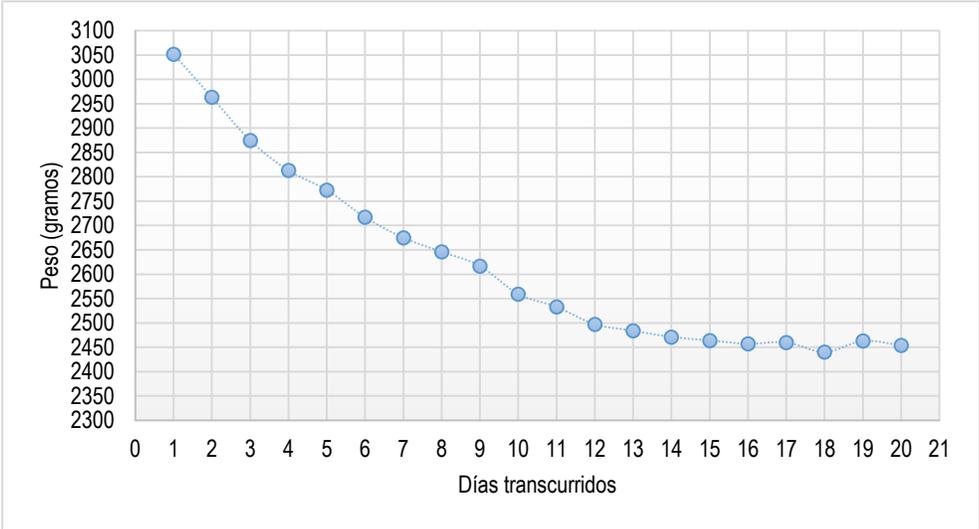


Figura 109. Variación diaria del peso de los ladrillos

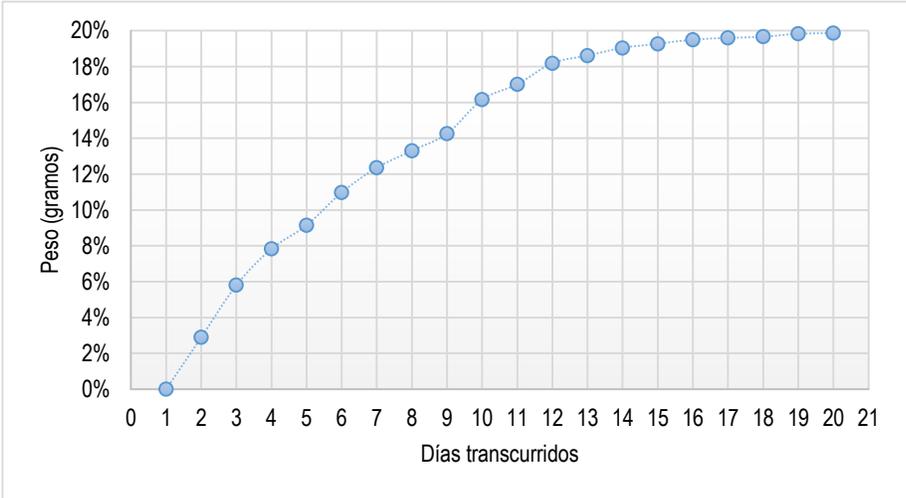


Figura 110. Porcentaje de variación de peso diario

### 4.3.3. Pruebas de absorción de agua

Las pruebas de absorción de agua máxima inicial para los ladrillos fabricados con las condiciones anteriores, fueron evaluadas como ya se mencionó mediante el método de la norma NMX-C-037-ONNCCE-2013. En la Tabla 49 se muestran los resultados obtenidos mediante la evaluación realizada a los ladrillos fabricados con la dosificación óptima anteriormente descrita, y así mismo se muestra la comparativa de estos resultados obtenidos con los valores de absorción de agua obtenidos al realizar la misma prueba a ladrillos comerciales, conocidos como ladrillos rojos.

Tabla 49. Valores de absorción máxima inicial en unidades de gramos/minuto

N° de ladrillo	Ladrillo sustentable	Ladrillo Rojo	Límite máximo para muros expuestos al exterior	Límite máximo para muros interiores o con recubrimiento
	g/min	g/min	g/min	g/min
1	1.08	4.52	5	7.5
2	0.64	3.82	5	7.5
3	1.14	2.87	5	7.5

En la Figura 111 se muestra gráficamente los valores obtenidos incorporando la evaluación correspondiente al límite máximo establecido en la norma de evaluación de la calidad para estos materiales.

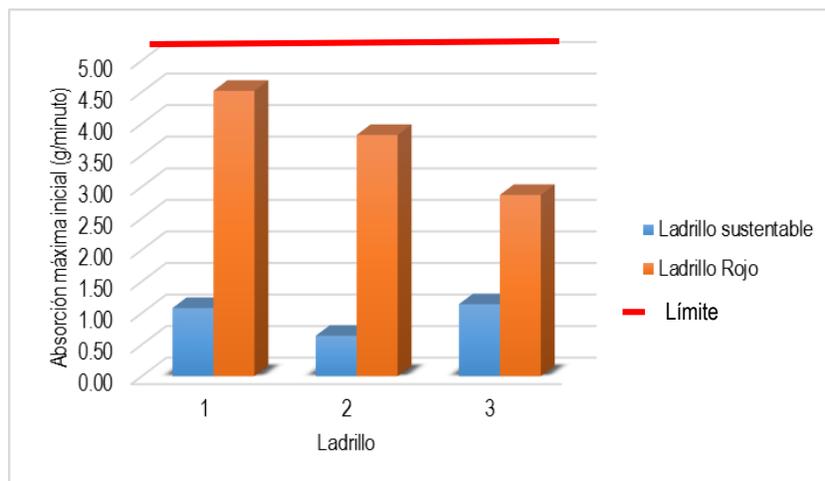


Figura 111. Comparación de resultados obtenidos en la prueba de absorción máxima inicial

#### **4.4. Resultados Fase IV. Fabricación de ladrillos a partir de residuos de excavación del Distrito Federal y el Estado de México**

A partir de la determinación de las características preliminares de los 2 bancos de residuos de excavación empleados para la fabricación de ladrillos durante la Fase IV, se obtuvieron los siguientes resultados.

##### **4.4.1. Resultados obtenidos de las pruebas preliminares**

###### **Banco 1. Residuos de excavación provenientes de una obra del Distrito Federal**

Los residuos de excavación provenientes del Distrito Federal correspondieron a un tipo de suelo areno-arcilloso, es decir un suelo en el que predominó la cantidad de arenas y contando con una cantidad considerable de arcilla, dado a un nivel medio de plasticidad que presentó, fue un residuo adecuado para ser empleado como material para la fabricación de ladrillos, con esta premisa se realizó el diseño de mezclas valorando la cantidad natural de arenas presente en el tipo de suelo, conllevando a integrar la mezcla por una mayor cantidad de material de excavación y un porcentaje menor en la cantidad de residuos de construcción triturados (agregados), los cuales complementaron la cantidad de arena presente en el suelo, proveyendo así la composición más aproximada a las dosificaciones óptimas de fabricación para este material.

###### **Banco 2. Residuos de excavación provenientes de una obra del Estado de México**

El material de excavación del Banco 2, se integró en mayor medida por arcilla y limos y presencia de arenas, su nivel de plasticidad fue bajo y su nivel de dureza medio, clasificándose como un material arcilloso-limoso con escasa presencia de arenas. En este caso, las mezclas con menor cantidad de material de excavación y mayor cantidad de RC no fueron aceptables, debido a que no existió suficiente cohesión entre las partículas, formando una mezcla muy suelta. Se determinó que la proporción adecuada tenía que ser integrada por una mayor cantidad de residuos de excavación en proporciones cercanas con la cantidad de RC triturados los cuales cumplirían la función de arenas y garantizaron el balance de la mezcla, y en este caso se formó una mezcla consistente y lo suficientemente sólida.

#### 4.4.2. Resultados obtenidos durante la fabricación de ladrillos

La obtención de resultados respecto a los argumentos planteados en la metodología para la fabricación de los ladrillos utilizando material fluidizante a base de agua y enseguida el uso de agua-mucílago, se concretó al llevar a cabo las fabricaciones planteadas en las cuales se determinó el porcentaje del material fluidizante empleado para cada tipo de mezcla.

A continuación se presentan los porcentajes de material incluyendo al material fluidizante para los ladrillos fabricados a partir de los residuos de excavación provenientes del Distrito Federal denominado como Banco 1, en la Tabla 50 se aprecian los resultados empleando agua como material fluidizante y en la Tabla 51 a partir del empleo de la mezcla agua-mucílago.

Tabla 50. Porcentaje de agua empleado respecto a los porcentajes de material dosificado para el Banco 1

Mezcla	Residuos de excavación		Residuos de tala		Agregados reciclados			Agua	
Mezcla 1	96%	+	4%					+	27%
Mezcla 2	74%	+	4%	+	22%			+	26%
Mezcla 3	74%	+	4%	+	22%			+	26%
Mezcla 4	74%	+	4%	+	11%	+	11%	+	26%

Tabla 51. Porcentaje de agua-mucílago de nopal empleado para el Banco 1

Mezcla	Residuos de excavación		Residuos de tala		Agregados reciclados			Agua-mucílago de nopal	
Mezcla 1	96%	+	4%					+	26%
Mezcla 2	74%	+	4%	+	22%			+	26%
Mezcla 3	74%	+	4%	+	22%			+	26%
Mezcla 4	74%	+	4%	+	11%	+	11%	+	25%

Enseguida en la Tabla 52 y la Tabla 53 se presentan los porcentajes de agua y agua-mucílago respectivamente, determinados para los ladrillos fabricados a partir del material de excavación proveniente del Estado de México denominado como Banco 2.

Tabla 52. Porcentaje de agua empleado respecto a los porcentajes de material dosificado para el Banco 2

Mezcla	Residuos de excavación		Residuos de tala		Agregados reciclados			Agua	
Mezcla 1	96%	+	4%					+	26%
Mezcla 2	54%	+	4%	+	42%			+	26%
Mezcla 3	54%	+	4%	+	42%			+	26%
Mezcla 4	54%	+	4%	+	21%	+	21%	+	26%

Tabla 53. Porcentaje de agua-mucílago de nopal empleado para el Banco 2

Mezcla	Residuos de excavación		Residuos de tala		Agregados reciclados			Agua-mucílago de nopal	
Mezcla 1	96%	+	4%					+	26%
Mezcla 2	54%	+	4%	+	42%			+	24%
Mezcla 3	54%	+	4%	+	42%			+	26%
Mezcla 4	54%	+	4%	+	21%	+	21%	+	23%

De la información detallada en las Tablas 52 y 53 se determina que no existe variación significativa en el porcentaje de material fluidizante utilizado durante las respectivas fabricaciones; sin embargo, la diferencia entre el uso de agua y agua-mucílago fue marcada claramente en el momento de la realización de la mezcla, ya que el uso de la mezcla agua-mucílago, facilitó considerablemente la homogeneización de la mezcla y añadió significativa fluidez a la mezcla, lo cual optimizó el manejo y moldeado de la misma, así como el mejoramiento de las características físicas en la obtención de la pieza final.

#### 4.4.2.1. Resultados de la prueba de resistencia a la compresión

Los resultados obtenidos durante esta prueba, se detallan según el origen de los residuos de excavación respectivamente, así como al tipo de material fluidizante empleado.

- **Ladrillos fabricados con material de excavación del Banco 1 empleando agua como material fluidizante**

En la Tabla 54 se muestran los valores correspondientes a los ladrillos compuestos por material de excavación proveniente del Banco 1 o Distrito Federal.

Tabla 54. Resistencia a la compresión empleando agua

	Tiempo	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4
Resistencia a la compresión kg/cm <sup>2</sup>	15 días	32	32	32	33
		32	32	33	33
	18 días	33	35	33	33
		32	34	34	32
	21 días	32	35	35	34
		33	35	34	33

A partir de los valores promedio de cada tratamiento, se realizó la gráfica mostrada en la Figura 116, en la cual se observa la relación existente entre la resistencia presentada durante los tres periodos de evaluación para cada uno de los cuatro tratamientos planteados.

En los resultados de la Figura 112 se observa en primer lugar, que de las cuatro mezclas planteadas, la resistencia a la compresión aumentó en promedio un 5 % después de ser introducidos al secador solar, es decir del periodo de 15 días al de 18 días de secado. Y en cambio, la resistencia comparada entre los periodos posteriores al secado dentro del secador solar es decir a los 18 y 21 días variaron mínimamente, en promedio menos del 3%.

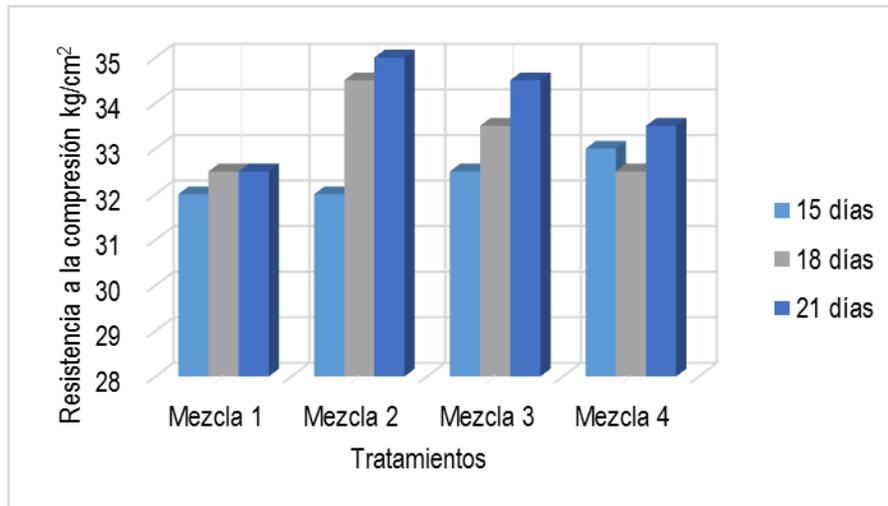


Figura 112. Representación gráfica de los valores promedio de resistencia a la compresión empleando agua como material fluidizante

- **Ladrillos fabricados con material de excavación del Banco 1 empleando agua-mucilago de nopal como material fluidizante**

En en la Tabla 55 se muestran los valores de resistencia a la compresión obtenidos, y enseguida el promedio de estos datos.

Tabla 55. Resistencia a la compresión empleando agua-mucilago de nopal

	Tiempo	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4
Resistencia a la compresión kg/cm <sup>2</sup>	15 días	30	30	30	30
		30	30	30	30
	18 días	32	32	35	36
		33	33	36	34
	21 días	33	34	37	36
		33	35	36	35

En la Figura 113 se observa que la resistencia a la compresión de los ladrillos correspondientes a los cuatro tratamientos planteados aumentó en promedio un 10% después de ser introducidos al secador solar, es decir del período de 15 días al periodo de 18 días; paralelamente la resistencia comparada entre los periodos de 18 y 21 días fue de aproximadamente el 3% en el aumento de la resistencia.

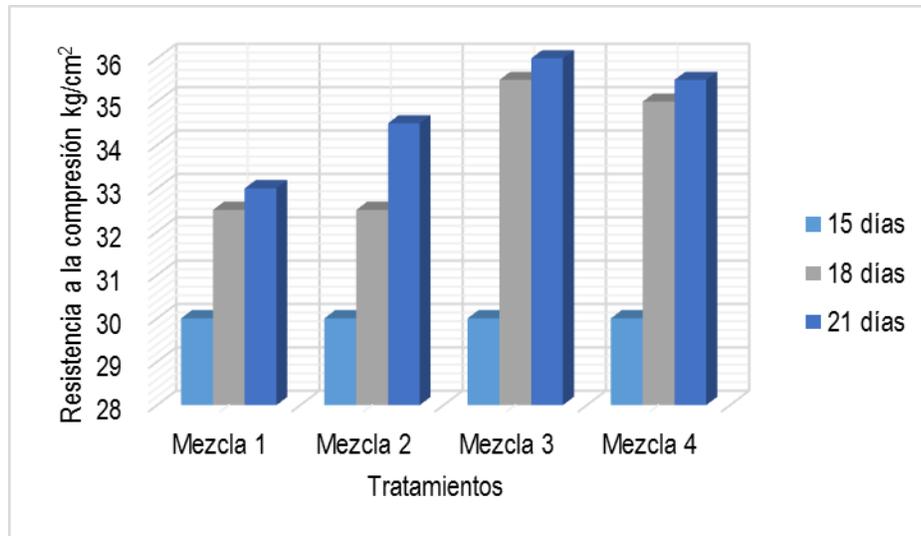


Figura 113. Representación gráfica de la resistencia a la compresión empleando agua –mucílago como material fluidizante

- **Ladrillos fabricados con material de excavación del Banco 2 empleando agua como material fluidizante**

La Tabla 56 se presenta los valores de resistencia correspondiente a los tres periodos de evaluación para los cuatro tratamientos diseñados para los ladrillos fabricados con residuos de excavación provenientes del Estado de México.

Tabla 56. Resistencia a la compresión empleando agua como material fluidizante

Tiempo	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4
15 días	30	35	32	31
	30	36	32	30
18 días	33	39	33	34
	32	39	35	34
21 días	32	38	34	35
	33	39	33	34

De igual manera se realizó la evaluación de los valores promedios de resistencia para cada periodo y tratamiento evaluado, presentando el resumen de estos datos en la Figura 114, en la cual se observa que los ladrillos correspondientes al Banco 2 fabricados con agua como material fluidizante presentan un incremento significativo de la resistencia a la compresión entre el periodo de evaluación de 15 días y periodo de 18 días los cuales se diferencian por la introducción al secador solar, la Mezcla 1 aumenta

en un 8%, la Mezcla 2 un 6%, la Mezcla 3 un 9% y la Mezcla 4 un 8%, representando en promedio un 8% en el aumento de la resistencia entre un periodo y otro. Consecuentemente entre los periodos de evaluación del 18 y 21 días no existe un aumento significativamente diferenciable entre estos periodos.

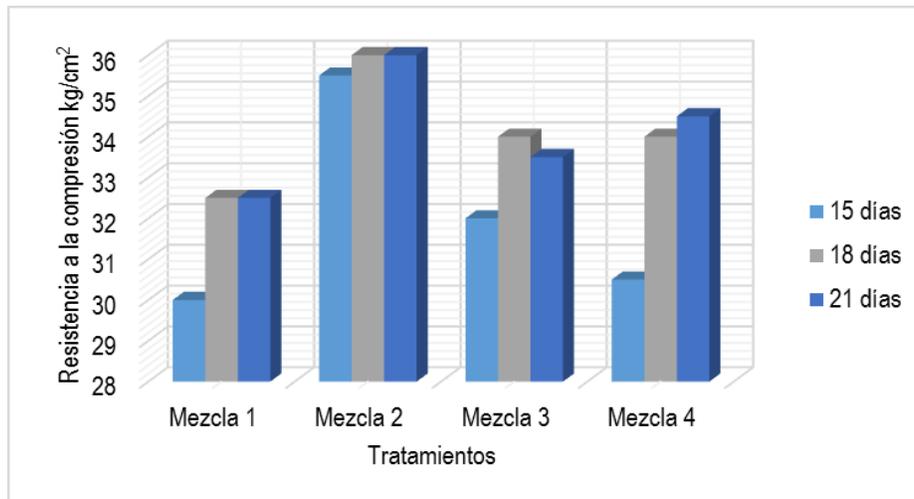


Figura 114. Representación gráfica de la resistencia a la compresión empleando agua como material fluidizante

- **Ladrillos fabricados con material de excavación del Banco 2 empleando agua-mucílago de nopal como material fluidizante**

De igual manera se realizó la evaluación para los ladrillos correspondientes al Banco 2 fabricados a partir del uso de agua-mucílago de nopal, en la Tabla 57 se presentan los valores obtenidos para las cuatro mezclas planteadas y evaluadas en los tres periodos respectivos de tiempo.

Tabla 57. Resistencia a la compresión con agua-mucílago como material fluidizante

Resistencia a la compresión kg/cm²	Tiempo	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4
15 días		31	40	33	32
		30	39	32	30
18 días		32	40	33	34
		33	40	34	34
21 días		33	40	34	34
		33	41	35	35

En este caso de evaluación, el análisis realizado a los resultados obtenidos indicaron que existieron variaciones similares en el aumento de resistencia a la compresión entre un periodo y otro de evaluación como se puede observar en la Figura 115, en las Mezclas 1, 2 y 3 existe una diferencia constante del 3% entre el periodo de 15 días y 18 días y de igual manera entre los periodos de 18 y 21 días. Al contrario que la Mezcla 2 no representó variación significativa en los resultados evaluados durante los 3 periodos de tiempo evaluados.

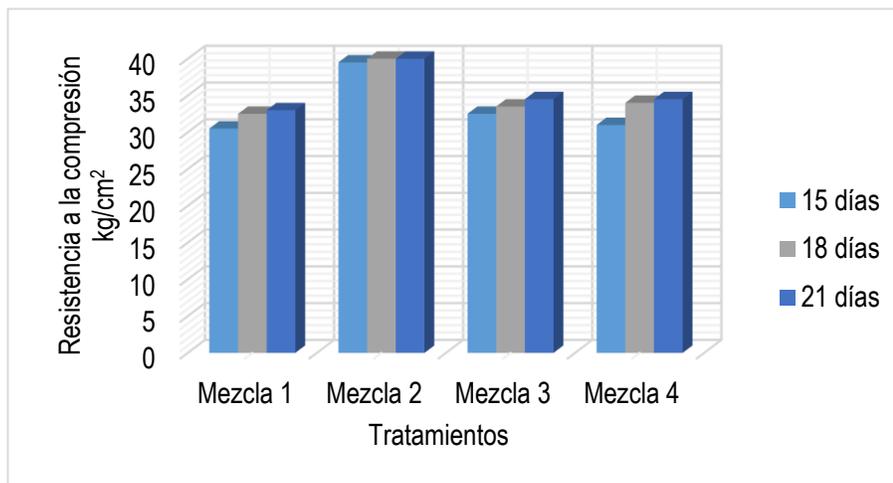


Figura 115. Representación gráfica de la resistencia a la compresión empleando agua-mucílago como material fluidizante

Finalmente con la realización de esta prueba, se garantiza que los ladrillos fabricados en esta tesis cumplen con el límite mínimo establecido por la norma de 30 kg/cm<sup>2</sup> como tipo de ladrillo artesanal pero no alcanzan la resistencia mínima establecida para ladrillo extruido de 40 kg/cm<sup>2</sup>, así mismo al ser evaluados como materiales de construcción fabricados con tierra, cumplen con la resistencia mínima establecida en la norma NTE E.080 de Lima-Perú la cual corresponde a 12 kg/cm<sup>2</sup>, con la norma Española UNE 41410 de 13 kg/cm<sup>2</sup> y con la resistencia mínima de 21 kg/cm<sup>2</sup> establecida en el código de construcción de EE. UU.

#### 4.4.2.2. Resultados de la prueba de absorción de agua máxima inicial

A partir de los valores obtenidos durante las pruebas de resistencia y la determinación de la calidad y eficiencia dada por los ladrillos fabricados con la inclusión de agua y de agua-mucílago de nopal se analizaron los resultados de absorción de agua máxima inicial detallando la información por origen de los residuos de excavación.

Los resultados obtenidos, en primer lugar demuestran que las cuatro mezclas fabricadas cumplen cabalmente con el límite establecido en la normativa de calidad NMX-C-441-2013, al presentar valores de absorción de agua máxima inicial inferiores a 5 g/ minuto, valor establecido como límite máximo.

Así mismo, se observa que los ladrillos fabricados con agua y con agua-mucílago presentan resultados similares de absorción de agua, aumentando su capacidad de absorción según el tipo de Mezcla, siendo que los ladrillos fabricados con la Mezcla 4 son los ladrillos que presentan mayor capacidad de absorción de agua como se observa en las gráficas de la Figura 116 para el Banco 1 y la Figura 117 para el Banco 2; así también se observa que en general, en las cuatro mezclas planteadas se presenta una ligera tendencia a aumentar su capacidad de absorción respecto al periodo de secado.

- **Ladrillos fabricados con material de excavación del Banco 1**

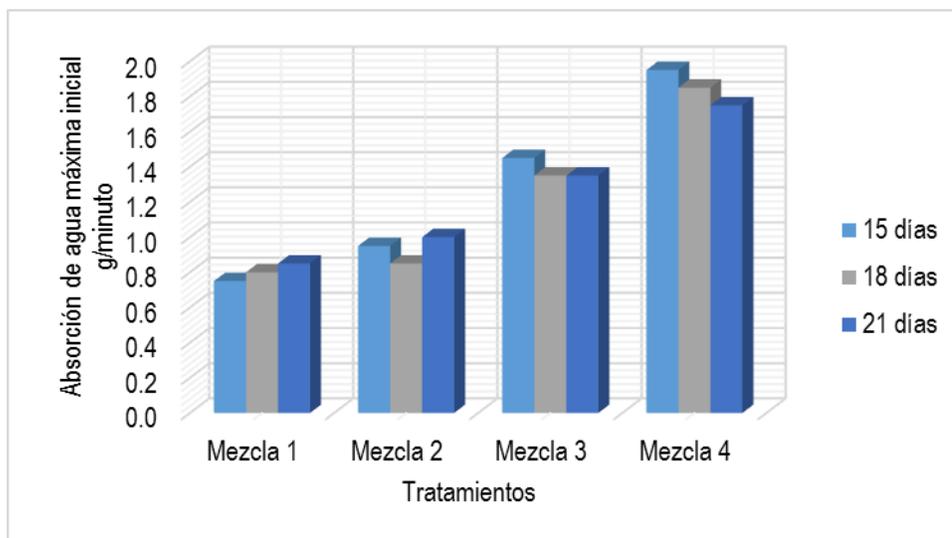


Figura 116. Representación gráfica de los valores promedio de absorción de agua máxima inicial para el Banco 1

- **Ladrillos fabricados con material de excavación del Banco 2**

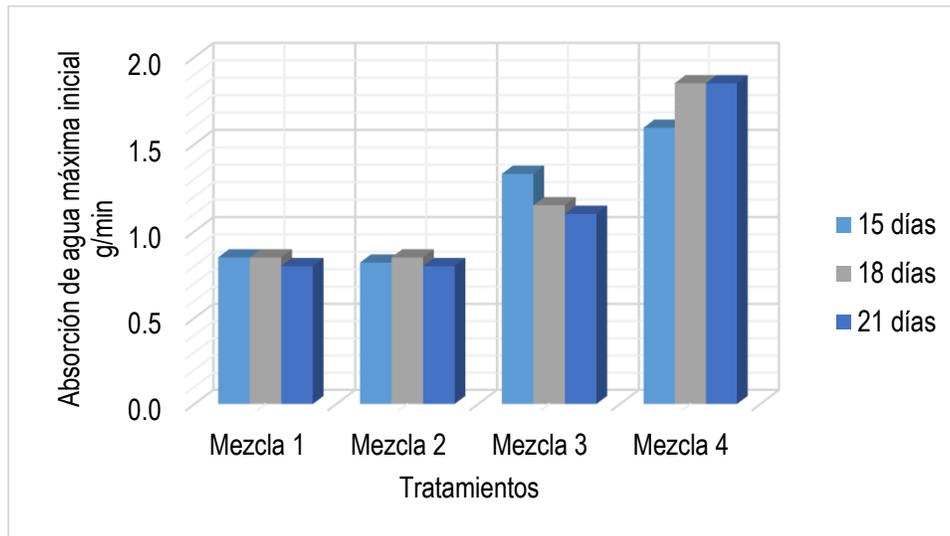


Figura 117. Representación gráfica de los valores promedio de absorción de agua máxima inicial para el Banco 2

Los resultados obtenidos garantizan que los ladrillos desempeñarán un comportamiento eficiente al ser empleados como material de construcción en mampostería ya que permitirán el fraguado del mortero o material ligante empleado para las juntas entre ladrillos, debido a que su capacidad de absorción permite no absorber o deshidratar el agua contenida en dicho material ligante.

#### 4.4.3. Resultados obtenidos en la prueba de absorción total

En las Tablas 58, 59 y 60 se presentan resumidamente los resultados máximos obtenidos durante la sumersión total de los ladrillos fabricados a partir de las Mezclas óptimas desarrolladas en esta tesis, en los cuales se ejemplifica la obtención del porcentaje de absorción de las cuales se establece un parámetro del 15 a 20 % de agua por unidad.

- **Ladrillos fabricados con:**  
Residuos de excavación + RC de ¼” a finos TU + Residuos de tala + Agua o Mezcla de agua mucílago de nopal.

Tabla 58. Datos de absorción total para la Mezcla 2

<b>Hora</b>	<b>Peso</b>
Peso inicial	2291 gramos
Peso final	2630 gramos
Hora inicial	11:37 am
Hora final	13:28 pm
Tiempo total	1 horas 51 minutos
Cantidad de agua absorbida	339 gramos
% absorción	15 %

- **Ladrillos fabricados con:**  
Residuos de excavación + RC de ¼” a finos SC + Residuos de tala + Agua o Mezcla de agua mucílago de nopal.

Tabla 59. Datos de absorción total para la Mezcla 3

<b>Hora</b>	<b>Peso</b>
Peso inicial	2494 gramos
Peso final	2820 gramos
Hora inicial	11:32 am
Hora final	13:52 pm
Tiempo Total	2 horas 20 minutos
Cantidad de agua absorbida	426 gramos
% absorción	17 %

- **Ladrillos fabricados con:**  
Residuos de excavación + RC de ¼” a finos SC + RCyD de 3/8” + Residuos de tala + Agua o Mezcla de agua mucílago de nopal.

Tabla 60. Datos de absorción total para la Mezcla 4

<b>Hora</b>	<b>Peso</b>
Peso inicial	2441 gramos
Peso final	2946 gramos
Hora inicial	11:36 am
Hora final	13:55 pm
Tiempo Total	2 horas 19 minutos
Cantidad de agua absorbida    gramos	505 gramos
% absorción	21 %

De los resultados obtenidos, se determina que el periodo durante el cual los ladrillos fabricados se mantienen íntegros a partir de los residuos de construcción al encontrarse sumergidos totalmente en agua corresponde a un tiempo de 2 horas  $\pm$  10 minutos.

Este es uno de los motivos por el cual no se recomienda el uso de los ladrillos en muros exteriores sin recubrimiento principalmente en donde exista presencia latente de humedad; sin embargo, los ladrillos garantizan su uso ante la exposición de lluvias leves u ocasionales siempre y cuando cumplan con condiciones de protección oportuna.

#### **4.4.4. Resultados obtenidos durante el periodo de secado**

A partir del monitoreo realizado, durante el periodo de secado de los ladrillos fabricados se observa la variación de peso diario (ver Figura 118), la variación de peso es atribuido a la pérdida de agua de cada pieza, la cual resume el periodo de secado correspondiente a la Mezcla 2, 3 y 4 especificadas anteriormente. Cabe mencionar que al contar con un extenso número de datos, se realizó cuidadosamente la integración de los mismos, con la finalidad de proporcionar gráficos representativos que describan las condiciones de secado para los tratamientos de estudio.

De las gráficas presentadas en la Figura 118 y 119, se observa que el periodo de secado final fue significativamente similar para las 3 mezclas evaluadas, el cual correspondió a 17 días, sin embargo los ladrillos correspondientes a la Mezcla 2, presentaron un porcentaje de 24 % de pérdida de agua, ligeramente mayor a la Mezcla 3 y la Mezcla 4 con 22% y 23 % respectivamente.

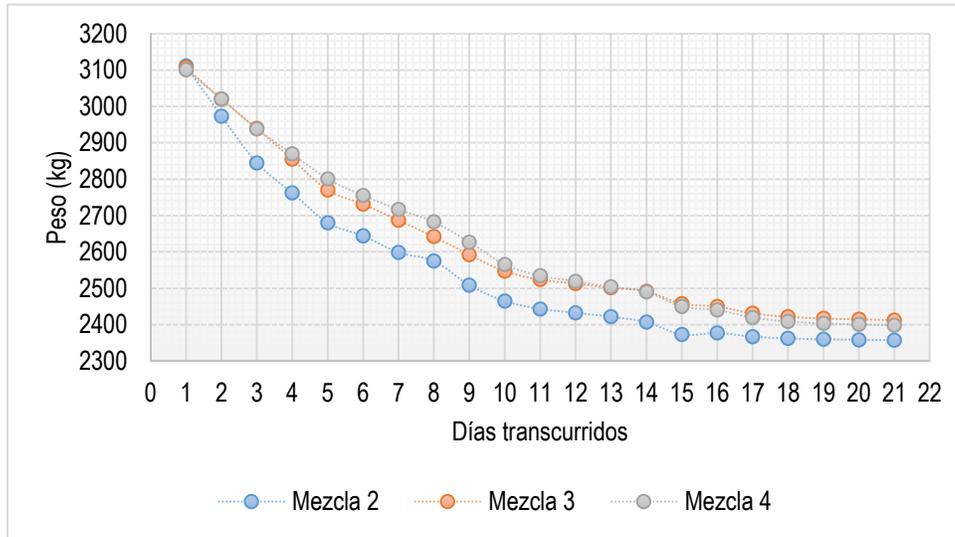


Figura 118. Variación de peso promedio diario por mezcla analizada

Así mismo se realizó el detalle gráfico en términos de variación del peso en términos de porcentaje, determinado mediante el periodo óptimo de secado, la pérdida total de agua correspondió a un valor máximo de 24 % lo cual se indica en la Figura 119.

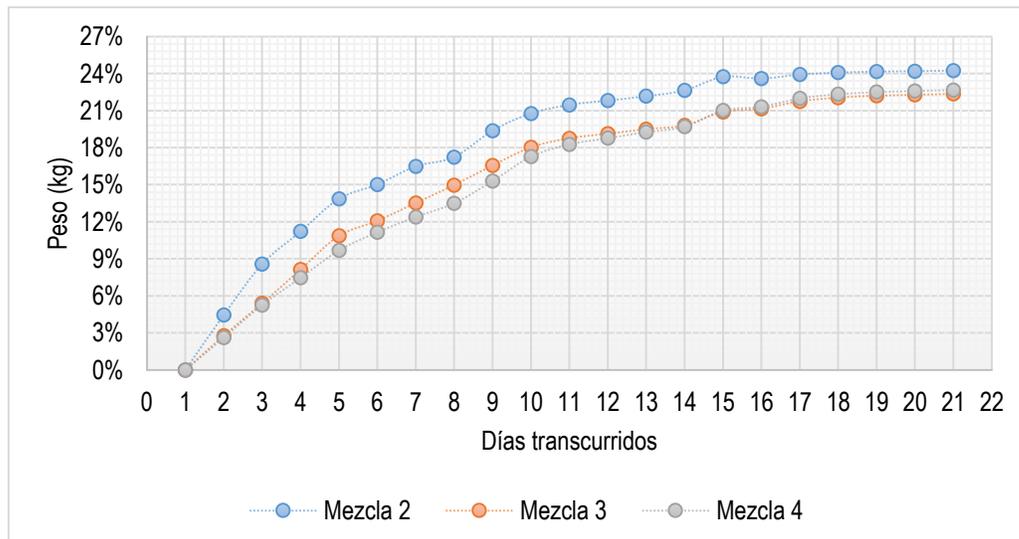


Figura 119. Variación del peso diario en términos de porcentaje

#### 4.4.5. Factibilidad técnica y ambiental

La evaluación de la calidad de los ladrillos sustentables fabricados a partir de los residuos generados en la industria de la construcción, generan resultados satisfactorios cumpliendo con los parámetros técnicos establecidos en la normativa mexicana.

Resalta de manera importante el uso de residuos de excavación compuestos por un alto porcentaje de arcilla como lo fue el caso de los residuos de excavación provenientes del estado de Puebla, ya que a partir de ellos, se obtuvieron ladrillos con alto grado de resistencia a la compresión alcanzado valores superiores a los 80 kg/cm<sup>2</sup>. En la Tabla 61 se detallan los parámetros técnicos obtenidos de las fabricaciones realizadas.

Tabla 61. Evaluación de la factibilidad técnica

Normativa aplicable	Contenido	Especificación	Resultado
NMX-C-036-ONNCCE-2012	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 <sup>2</sup> .	a) 80 kg/cm <sup>2</sup> para residuos de Puebla b) 31 a 40 kg/cm <sup>2</sup> para residuos del D.F. y Edo. de México.
	Límite superior de absorción inicial.	5 g/minuto.	a) 1.5 g/min para residuos de Puebla b) 1 a 2 g/min para residuos del D.F. y Edo. de México.
NMX-C-404-ONNCCE-2012 (Uso estructural)	Límite mínimo de resistencia a la compresión.	60 kg/cm <sup>2</sup> .	a) 80 kg/cm <sup>2</sup> para residuos de Puebla.
	Límite superior de absorción inicial	5 g/minuto.	1.5 g/minuto para residuos de Puebla.

Los ladrillos sustentables pueden ser utilizados como sustituto de ladrillos y bloques convencionales presentes en el mercado actual, en la construcción de muros interiores y en muros exteriores usando como recubrimiento un acabado convencional, en muros no estructurales o que no requieren soportar las cargas de la estructura, por ejemplo en muros divisorios, bardas, pretilas, parapetos, antepechos de ventanas, e incluso con fines estéticos. A continuación en la Tabla 62 se enlistan algunas de las ventajas de oportunidad para los ladrillos sustentables comparados con los ladrillos convencionales o ladrillos rojos.

Tabla 62. Comparativa de las ventajas ambientales de los ladrillos sustentables

Ladrillo fabricado con RC	Ladrillo convencional
	
Eliminación de emisiones al ser ladrillos que no requieren cocción.	Emisión de GEI al ser cocidos en hornos mediante la quema de combustibles.
Al ser fabricados con materiales reciclados, disminuyen la explotación de bancos de material virgen.	Explotación de bancos de material virgen para la extracción de materiales empleados en su fabricación.
Minimiza el coste de adquisición y transporte de materiales.	Costo principal dado a la compra y transporte de materiales.
Permite variar la forma y tamaño de acuerdo a la necesidad.	Medidas estandarizadas.
Excelente aislante térmico motivo por el cual se reducen las demandas de energía.	Las edificaciones demandan uso de energía para regular el ambiente.

Es fundamental recalcar que se debe analizar estructuralmente el comportamiento de los muros y determinar la necesidad de incluir elementos de refuerzo como castillos en los muros, así como cadenas de refuerzo interior y/o elementos de restricción de los bordes laterales y superior para evitar el volteo del muro fuera de su plano, así como atender con principal interés el proceso constructivo para el empleo eficiente de estos materiales.

#### 4.4.6. Factibilidad económica

La demanda de ladrillos representa más del 50% del mercado, por lo cual sugiere una importante oportunidad de inserción en el mercado para los ladrillos sustentables. La fabricación por unidad de ladrillo es de bajo costo, aproximadamente \$1.63 ya que se fabrican principalmente a partir de los residuos generados en la construcción. En la Tabla 63 se presenta el desglose del precio por unidad de ladrillo sustentable (calculado con precios de marzo de 2015) integrando el costo dado por los materiales, la mano de obra y el 3% de ambos atribuido a la sección de herramientas y equipo, ya que su fabricación se realiza únicamente a partir del uso de herramienta menor:

Tabla 63. Integración del precio unitario para la fabricación de ladrillos sustentables

<b>1.- Materiales</b>					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo \$ M.N.	Costo total \$ M.N.	
Agua de toma	m <sup>3</sup>	0.0007	21.33	0.01	
Agregados reciclados	m <sup>3</sup>	0.00073	60	0.04	
Residuos de tala	kg	0.11000	0	0.00	
Nopal	kg	0.23	2	0.46	
Tierra (Residuos de excavación)	kg	1.9	0	0.00	
<b>Total materiales</b>				<b>0.52</b>	
<b>2.- Mano de obra</b>					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total	
Trabajador	jornada	0.004	134.58	0.54	
Trabajador	jornada	0.004	134.58	0.54	
<b>Total mano de obra</b>				<b>1.08</b>	
<b>3.- Herramienta menor</b>					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total	
Herramienta menor			0.03	0.03	
<b>Total herramientas y equipo</b>				<b>0.03</b>	
<b>Total:</b>				<b>\$1.63</b>	

La fabricación de ladrillos sustentables puede ser llevada a cabo por 2 personas, fabricando en promedio 10 ladrillos en un período de 1 hora, contando con actividades previas requeridas como el cernir el material de excavación y la extracción del mucilago necesario, sin embargo estos tiempos y

producción se pueden mejorar al desarrollar experiencia o en el caso de una producción en serie, igualando el caso de los productores artesanales, que a partir de su experiencia generan una producción de 200 a 500 unidades por jornada laboral.

Así mismo construir 1 m<sup>2</sup> de muro con ladrillos sustentables resulta un 33% más barato que construir 1 m<sup>2</sup> de muro con ladrillo convencional (ladrillo rojo), a continuación, se presenta la integración de los conceptos mediante los cuales se determinó el precio unitario para la construcción de 1 m<sup>2</sup> de muro construido con ladrillos sustentables detallado en Tabla 64 como construido con ladrillos convencionales detallado en la Tabla 65:

Tabla 64. Integración del precio unitario para la construcción de 1 m<sup>2</sup> de muro con ladrillos sustentables

<b>1.- Materiales</b>				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo \$ M.N.	Costo total \$ M.N.
Agua de toma municipal	m <sup>3</sup>	0.012	21.33	0.26
Arena	m <sup>3</sup>	0.0428	201	8.60
Tierra	t	0.0173	0	0.00
Ladrillo sustentable	pieza	61	1.63	99.43
<b>Total materiales</b>				<b>108.29</b>
<b>2.- Mano de obra</b>				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Ayudante	jornada	0.1	250.2	25.02
Oficial albañil	jornada	0.1	398.24	39.82
<b>Total mano de obra</b>				<b>64.84</b>
<b>3.- Herramientas y equipo</b>				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramienta menor			0.03	1.95
<b>Total herramientas y equipo</b>				<b>1.95</b>
<b>Total (1 m<sup>2</sup> de muro de ladrillo sustentable)</b>				<b>\$175.08</b>

En el caso de los ladrillos convencionales se estima que el precio por unidad de ladrillo rojo es de entre \$2.30 y \$3.00, a partir de ello se determinó cuánto cuesta construir con este tipo de material lo cual se detalla en la Tabla 65.

Tabla 65. Integración del precio unitario para la construcción de 1 m<sup>2</sup> de muro con ladrillo rojo

<b>1.- Materiales</b>				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo \$ M.N.	Costo total \$ M.N.
Agua de toma municipal	m <sup>3</sup>	0.012	21.33	0.26
Arena	m <sup>3</sup>	0.0428	201	8.60
Cemento normal gris tipo I en saco	t	0.0173	2200	38.06
Ladrillo rojo cocido	pieza	64	2.32	148.48
			<b>Total materiales</b>	<b>195.40</b>
<b>2.- Mano de obra</b>				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Ayudante	jornada	0.1	249.35	24.94
Oficial albañil	jornada	0.1	398.24	39.82
			<b>Total mano de obra</b>	<b>64.76</b>
<b>3.- Herramientas y equipo</b>				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio productivo	Costo total
Herramienta menor			0.03	1.94
			<b>Total herramientas y equipo</b>	<b>1.94</b>
			<b>Total (1 m<sup>2</sup> de muro de ladrillo rojo)</b>	<b>\$262.10</b>

Aunado a las amplias ventajas ambientales presentadas en la fabricación de ladrillos sustentables mediante el uso de los residuos generados en la construcción, resalta la factibilidad económica que el uso de estos materiales pueden aportar al sector de la construcción en México.

Así mismo promueven el desarrollo de la arquitectura bioclimática resolviendo principalmente la conservación de prácticas de construcción tradicional y carácter patrimonial, la búsqueda de soluciones al problema de la vivienda social, integrando en forma amigable y participativa al usuario, y las preocupaciones ambientales por encontrar materiales de bajo impacto en la salud y el ambiente, elaborados con reducida demanda de energía y transporte de materiales, y menores emisiones de gases efecto invernadero.

## 5. Conclusiones

1. En primer lugar respecto al análisis realizado de la normativa, se concluye que en materia de manejo de residuos, a nivel nacional la LGPGIR regula la gestión de los residuos de manejo especial y de manera particular solo en el Distrito Federal, estos son regulados por la norma ambiental NADF-007-RNAT-2013 en la cual se promueve ampliamente el reúso y reciclaje de estos residuos.
2. En el tema de generación y aprovechamiento de los residuos de la construcción, se determinó que a nivel nacional e internacional en más del 80% de los países analizados, el mayor porcentaje de generación de estos residuos corresponde a los residuos provenientes de las excavaciones, en segundo lugar a los residuos provenientes del concreto, seguidos de los residuos de tipo mezclados y con una menor generación los residuos clasificados como residuos sólidos.
  - 2.1. En materia de cuantificación de los RC, no existe una metodología que garantice el cálculo certero de la generación para estos residuos en un proyecto de obra, por lo cual la aproximación está dada principalmente por la experiencia, el método empleado, el control y manejo en la obra durante la construcción, el personal empleado entre otros factores internos que pueden ser determinantes.
3. Los ladrillos fabricados con la integración de residuos de excavación, residuos de tala, agregados reciclados y agua-mucílago de nopal, son una alternativa sustentable para el aprovechamiento de los residuos de la construcción y cumplen con los parámetros de calidad establecidos en la normativa mexicana presentando resistencias de 30 a 80 kg/cm<sup>2</sup>.
  - 3.1. La fabricación y uso de ladrillos sustentables manifiesta ventajas principalmente ambientales y por lo cual representa una importante factibilidad económica al ser 33% más barato construir 1 m<sup>2</sup> de muro con ladrillo sustentable que con ladrillo rojo.
4. El proceso constructivo planteado resultó eficiente para la fabricación de ladrillos, el cual puede ser empleado a mayor o menor escala de fabricación. La dosificación de materiales para las

mezclas diseñadas depende en gran medida de las características físicas de los residuos de excavación principalmente de granulometría y plasticidad.

5. Las características finales de fabricación de los ladrillos a base de residuos de la construcción demuestran que pueden ser empleados en muros divisorios, bardas, pretilas, parapetos y antepechos y principalmente en uso arquitectónico con fines estéticos.

## 6. Recomendaciones

- Se deben tomar en cuenta para posteriores fabricaciones los siguientes criterios obtenidos de las fabricaciones realizadas:
  - Los suelos o residuos de excavación que presentaron mejores resultados para la fabricación de ladrillos sustentables, se determinaron principalmente por su nivel de plasticidad siendo principalmente suelos areno-arcillosos.
  - El uso de materiales térreos plásticos es un factor determinante en el aumento de la resistencia a la compresión de los ladrillos. Se recomienda no usar la capa superficial del suelo ya que posee restos orgánicos, es preferible la capa que está por debajo a 30 cm según el terreno.
  - La dosificación de residuos de construcción para la fabricación de ladrillos quedó determinada por el nivel de plasticidad de los residuos de excavación, en ningún caso podrá usarse menos del 50 % de material térreo en las combinaciones diseñadas.
  - En los diseños de mezclas, a menor plasticidad del material térreo, la proporción de arenas (residuos de construcción) tendrá que ser gradualmente menor.
  - La mezcla de agua-mucílago de nopal adicionada no aumenta significativamente la resistencia a la compresión de los ladrillos, sin embargo favorece apreciablemente el mezclado de los materiales, la trabajabilidad de la mezcla y la composición monolítica final de las piezas fabricadas.
  - La cantidad de agua-mucílago de nopal quedará determinada por las características cualitativas durante la realización de la mezcla, estableciendo un parámetro de 23 a 26 % del total de la mezcla fabricada.

- El tiempo óptimo de secado para los ladrillos fabricados, es de 15 a 20 días en condiciones de tiempo nublado.
- La capacidad de absorción de agua de cada ladrillo se encuentra influenciada por el proceso de moldeo, acomodo y compactación de las piezas durante su periodo de fabricación, al proveer condiciones de obtención de piezas homogéneas y monolíticas.
  
- Aunque actualmente existe gran cantidad de construcciones edificadas con ladrillos fabricados de tierra cruda, en México no existe normativa que regule el uso estructural de la tierra como material de construcción, lo cual hace necesario el estudio del comportamiento estructural de este tipo de materiales y la generación de normativa específica al respecto.
  
- En el contexto del reúso y reciclaje, actualmente el interés y participación en este ámbito avanza progresivamente, por lo cual es necesario impulsar medidas legislativas, ventajas fiscales e intervención en el mercado que promuevan el reúso, el reciclaje y otras acciones que eviten el consumo desproporcionado de materiales vírgenes, consumo de recursos naturales y energía.

## Actividades complementarias

- Realización de una solicitud de patente con número MX/a/2014/014416 para los ladrillos fabricados durante la Fase III de la presente tesis.
- Realización de una estancia académica como alumna del posgrado de “Construcción de hábitats de tierra” en la EAT de la Universidad de Barcelona, España.
- Asistencia al curso de **“Innovación Tecnológica”** impartido en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Asistencia al diplomado “LEAN Construcción - Construcción sin desperdicios” impartido por la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC).

## Referencias

- AEB. Asociación Española de Bioconstrucción. (2007). Decálogo de bioconstrucción. *EcoHabitar*, 13, 34-35.
- Aldana, J., & Serpell, A. (8 de Noviembre de 2012). Temas y tendencia sobre residuos de construcción y demolición: un meta-análisis. *Revista de la Construcción*, 12(22), 7-16.
- Andión, R., Suárez, J., & Bergues, C. (2014). Diseño y construcción de un secador solar tipo gabinete para el secado de hollejos de naranja. Santiago de Cuba: Universidad de Oriente, 1-2.
- Aréchiga, U., Cárdenas, B., Munguía, J., & Márquez, C. (2012). Evaluación preliminar del impacto ambiental por la producción artesanal de ladrillo: eficiencia energética y calidad del aire (segunda etapa). México, Distrito Federal. Instituto Nacional de Ecología, 32-40.
- Barajas, M., Bosch, P., Malvaéz, C., Barragán, C. y Lima, E. (2010) Stabilization of the Tlaltecuiltli monolith pigments. *Journal of archaeological sciences*, 37(11), 1881-1886.
- Bergsdal, H., Bohne, R., & Bratteba, H. (2007). Projection of Construction and Demolition Waste in Norway. *Industrial Ecology*, 11(3), 27-39.
- Bickel, J. (2010). Programa de Eficiencia Energética en Ladrilleras Artesanales de América Latina para mitigar el cambio climático. Guanajuato, México: Congreso de ladrillo artesanal, 6.
- Cárdenas, B., & Márquez, C. (2011). Determinación de emisiones de Gases de Efecto Invernadero en base a factores de emisión y monitoreo de eficiencia energética en la comunidad ladrillera El Refugio, León Guanajuato. León, Guanajuato México: Eficiencia Energética en Ladrilleras Artesanales (EELA), 12-15.
- CMIC. (2013). Plan de Manejo de Residuos de la Construcción y la Demolición. Distrito Federal: Cámara Mexicana de la Industria de la construcción, 5.
- Comisión Europea. (2011). Guía Española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD). España: Proyecto GEAR, 5.
- CYMA. (2007). Plan de Residuos Sólidos de Costa Rica. San José, Costa Rica: Instituto de Fomento y Asesoría Municipal, 3.
- Damtoft, J., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., & Gartner, E. (13 de Julio de 2007). Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and concrete research*, 38, 115-127.
- Escalante, J. I. (2013). Impacto medioambiental de los materiales de construcción. Análisis del ciclo de vida y eco diseño para la construcción en México, 19-27.

- Falceto, J., Mazarrón, F., & Cañas, I. (2002). Marco normativo de las construcciones con tierra. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid, 161-165.
- Fatta, D., Papadopoulos, A., Avramikos, E., Sgorou, E., Moustakas, K., Kormoussis, A., & Mentzis, A. (2003). Generation and management of construction and demolition waste in Grece-an existing challenge. *Conservation and Resources*, 81-91.
- Galarza, M. P. (2010). Reducción de residuos de la construcción. *Construcción Integral*, 8-10.
- González<sup>a</sup>, J. (2002). Visión histórica de la tecnología de la construcción con tierra. Seminario: La tierra cruda en la construcción del hábitat. San miguel de Tucumán: Universidad Nacional de Tucumán, 24-29.
- González<sup>b</sup>, A. (2012). Técnica constructiva con tierra compactada, tecnología sostenible sin explorar. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 101-106.
- Granell, E. (2014). Experiencia empresarial de los RCD en México. Distrito Federal: Concretos Reciclados, 1-20.
- Horvath, A. (2004). Construction materials and the environment. *Environmet and Resources*, 29, 181-204.
- Kourpanis, B., Papadopoulos, A., Moustakas, K., Stylianou, M., Haralambous, k., & Loizidou, M. (2008). Preliminary study for the management of construction and demolition waste. *Waste Management & Research*, 267-275.
- León-Martinez, F., Cano-Barrita, P., Lagunez-Rivera, L. y Medina-Torres, L. (2014). Study of nopal mucilage and marine brown algae extract as viscosity-enhancing admixtures for cement based materials. *Construction and building materials*, 53, 190-202.
- Martínez-Camacho, F., Vazquez-Negrete, J., Lima, E., Lara, V. y Bosch, P.(2007). Texture of nopal treated adobe: restoring Nuestra Señora del Pilar mission. *Journal of archaeological science*, vol., 35 (5):1125-1133.
- Malainine, M., Mahrouz, M. y Dufresne, A. (2005). Thermoplastic nanocomposites based on cellulose microfibrils from *Opuntia ficus-indica* parenchyma cell. *Composites science and technology*, 65(10), 1520-15226.
- Méndez, F., Velasco, P., Gabilondo, A., Galindo, R., & López, M. (2013). Estrategia nacional para la vivienda sustentable. México: Fundación para la Implementación, Diseño, Evaluación y Análisis de Políticas, IDEA, A.C., 16.
- Ministerio de la Producción. (2010). Guía de buenas prácticas para ladrilleras artesanales. Lima, Perú: Despacho Viciministerial de MYPE e Industria, 7.
- Natalini, M., & Klees, D. (2012). Reciclaje y reutilización de materiales residuales de construcción y demolición, 2a parte. Argentina: Facultad de ingeniería UNNE, 2.

Néves, C., & Borges, O. (2011). Técnicas de construcción con tierra. Brasil: Red Iberoamericana Proterra, 12.

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

NMX-C-036-ONNCCE-2012. Norma Mexicana - Industria de la construcción – Bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines- Resistencia a la compresión – Método de prueba

NMX-C-037-ONNCCE-2013. Norma Mexicana - Industria de la construcción-Mampostería – Determinación de la absorción total y la absorción inicial de agua en bloques, tabiques o ladrillos y tabicones – Método de ensayo.

NMX-C-038-ONNCCE-2013. Norma Mexicana - Industria de la construcción - Mampostería – Determinación de las dimensiones de ladrillos, tabiques, bloques y tabicones para la construcción.

NMX-C-441-ONNCCE-2013. Norma Mexicana - Industria de la construcción – Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural –Especificaciones.

NMX-C-404-ONNCCE-2012. Norma Mexicana - Industria de la construcción para bloques, tabiques o ladrillos para uso estructural- Especificaciones.

Norma Española UNE 41410 – 2008. Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Asociación Española de Normalización y Certificación, p. 13.

Osorio, J. (2011). El consumo sostenible de los materiales usados en la construcción de vivienda. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 1.

Pawlowsky, A. (Abril de 2015). Cátedra de Posgrado en construcción de hábitats de tierra. España: Escuela de Arquitectura de la Tierra.

Poon, C., Ann, T., Ng, L. (2001). On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong. Resources, Conservation and Recycling. 32(2), 157-172.

Poon, C., T.W., A., & Jaillon, L. (2004). Reducing building waste at construction sites in Hong Kong. Construction Management and Economics, 461-470.

PROGROC. (2008). Guía para la redacción del plan de gestión de residuos de construcción y demolición. Cataluña, España: Agencia Catalana de Residuos.

PROY- NADF-007-RNAT-2004. Proyecto de Norma ambiental que establece la clasificación y especificaciones de manejo para residuos de la construcción en el distrito federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal.

- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce, J., & Hill, M. (2004). Propiedades físicas del suelo. Montevideo Uruguay: Facultad de Agronomía, Universidad de la República, 3-4.
- Sáenz, C., Berger, H., Cuevas, R., Arias, E. Y Rosll, C. (2006). Boletín de servicios agrícolas de la FAO: Utilización agroindustrial del nopal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia
- Schiller, S., & Evans, J. (2005). Construcción con tierra. Buenos Aires, Argentina: Centro de investigación. Hábitat y Energía, 4.
- Schneider, M., Romer, M., Tschufin, M., & Bolio, H. (Julio de 2011). Sustainable cement production-present and future. Cement and Concrete Research, 41, 642-650.
- SMA. (2007). Diagnóstico básico de residuos de la construcción del Estado de México. Estado de México: Gobierno del Estado México, 22.
- Solís-Guzmán, Marrero, Madelyn, Montes-Delgado, M. V., & Ramírez-de-Arellano, A. (Septiembre de 2009). A Spanish model for quantification and management of construction waste. Waste Management, 29, 2542-2548.
- Suppen, N. (2013). Análisis de Ciclo de Vida y Ecodiseño para la construcción en México. San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 20-23.
- Torres, A., & Cano, P. (2012). *Las bondades del nopal*. CIIDIR, Oaxaca: IMCYC, 1.
- UMSNH . (2008). Manual de mecánica de suelos. Michoacán, Hidalgo. Facultad de Ingeniería Civil, 11-18.
- Ventola, L., Vendrell, M., Giraldez, P. y Merino, L. (2011). Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics. Construction and building materials, 25 (8),3313-3318.
- Viñuales, G. (2003). La arquitectura de barro y la conservación del ambiente. Buenos Aires, Argentina: Centro de Documentación de Arquitectura Latinoamericana, 4-6.
- Zapata, R. (2006). Química de los procesos edafológicos. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 6.
- Ze Zhou, W., T.W., A., Liyin, S., & Guiwen, L. (2014). Quantifying construction and demolition waste: An analytical. Waste Management, 1683-1692

## Electrónicas

- Bañón, L., & Bevia, J. (2000). Manual de carreteras. Construcción mantenimiento (Vol. I). Alicante: Ortiz e hijos, contratista de obras S.A. Obtenido de <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/1788>

- Belanko, J. (Diciembre de 2014). Biocasasostenible. Obtenido de <https://biocasasostenible.wordpress.com/>
- Casar, G. (28 de Enero de 2014). CICM. Obtenido de Edificación Sustentable en México: [http://cicm.org.mx/wp-content/files\\_mf/enero2014nmx164es.pdf](http://cicm.org.mx/wp-content/files_mf/enero2014nmx164es.pdf)
- Castells, X. (2012). Reciclaje y tratamiento de residuos diversos. Madrid, España: Díaz de Santos. Recuperado el 24 de Octubre de 2014, de <https://books.google.com.mx/books?id=OQtqHwbxk4EC&pg=PA1101&lpg=PA1101&dq=cuantos+residuos+de+excavaci%C3%B3n+se+generan+en+una+obra&source=bl&ots=Dcm9RVIXZU&sig=HVNI2i7f01PrJQxSpbnEBqkwvME&hl=es&sa=X&ei=rdzLVJyXIpKTyATqg4LoAQ&ved=0CEYQ6AEwBg#v=onepage&q=>
- CANACEM. Cámara Nacional del Cemento: Producción. Recuperado el 13 de diciembre de 2014, de [http://www.canacem.org.mx/la\\_industria\\_del\\_cemento.htm](http://www.canacem.org.mx/la_industria_del_cemento.htm)
- CMIC. (2012). Los retos de la infraestructura en México 2013-2018. Recuperado el 5 de enero de 2015 de [http://www.academia.edu/6848360/RETOS\\_DE\\_LA\\_INFRAESTRUCTURA](http://www.academia.edu/6848360/RETOS_DE_LA_INFRAESTRUCTURA)
- CMIC. (2014) . Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. La industria de la construcción en México. Recuperado el 5 de enero de 2015, de [http://www.cmic.org/cmic/economiaestadistica/pef2004/comunicados\\_G\\_E\\_F/overview%20construcci%C3%B3n\\_12feb10.pdf](http://www.cmic.org/cmic/economiaestadistica/pef2004/comunicados_G_E_F/overview%20construcci%C3%B3n_12feb10.pdf)
- CIMAS. (2011). Guía de gestión de residuos de excavación. Cantabria, España: Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de Cantabria.
- Clasipar (Septiembre de 2014). clasipar. Recuperado el 1 de Septiembre de 2014, de [http://clasipar.paraguay.com/vendo\\_materiales\\_para\\_construccion\\_\\_1565951.html](http://clasipar.paraguay.com/vendo_materiales_para_construccion__1565951.html)
- Earth System Research Laboratory. Esrl. Recuperado el 13 de noviembre de 2014 de noaa, Global monitoring División: [http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html#global\\_growth](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html#global_growth)
- Etchebarne, R. (2014). tierraalsur. Recuperado el 4 de Octubre de 2014, de nosotros: <http://www.tierraalsur.com/s-constructivos/btc/>
- FAO. (19 de Agosto de 2009). Colección FAO Capacitación. Obtenido de Métodos sencillos para la agricultura: [ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO\\_training/FAO\\_training/general/x6706s/x6706s08.htm](ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s08.htm)
- Hernández, J., Rodríguez, M., Macht, A., & Ramos, E. (2008). El manejo de los Residuos de la construcción en el Estado de México en el marco de la cooperación técnica Alemana en México. DELOS, 1(3). Obtenido de <http://www.eumed.net/rev/delos/03/mmsg.htm>

- HOLCIM. (2013). HOLCIM México. Recuperado el 15 de enero de 2015, de Productos y servicios:<http://www.holcim.com.mx/productos-y-servicios/concreto.html>
- Huertos, G. (1990). Academia. Recuperado el 25 de septiembre de 2014, de <http://www.academia.edu/7401865/ARCILLAS>
- INEGI<sup>a</sup>. (2010). Banco de Información INEGI. Recuperado el 23 de agosto de 2015, de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biinegi/?ind=3114003001>
- INEGI<sup>b</sup>. (2014). Mapa digital de México. Recuperado el 5 de enero de 2015, de Banco de Información INEGI. Recuperado el 5 de enero de 2015, de <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>
- Lewis, M. (2011). ARQUITECTURA + SUSTENTABLE. Recuperado el 7 de Noviembre de 2014, de <http://arquitecturasustentable.com.mx/enfoque/>
- LPGGIR. (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos [Versión electrónica]
- López, J. (25 de Febrero de 2010). El metro debe divulgar datos sobre costos y cuestiones técnicas de la línea 12 [en línea]. La Jornada. Recuperado el 5 de enero de 2015 de <http://www.jornada.unam.mx:8810/2010/02/25/capital/035n1cap>
- IMCyC. (17 de Noviembre de 2001). Revista. Obtenido de Tecnología del concreto para un desarrollo sustentable: <http://www.imcyc.com/revista/2001/mayo2001/tecnologia.htm>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2006). Plan Nacional Integrado de residuos de España. Recuperado de <http://www.icog.es/files/pnir3.pdf>
- Moreno, G. (s.f.). Manual de construcción y operación de un secador solar. Distrito Federal, México. Recuperado el 2014 de agosto de 15, de [http://ieham.org/html/docs/Manual\\_Secadora\\_Solar.pdf](http://ieham.org/html/docs/Manual_Secadora_Solar.pdf)
- NMX-AA-164-SCFI-2013. Norma Mexicana de Edificación Sustentable-Criterios y requerimientos mínimos. [versión electrónica].
- Norma Técnica de Edificación E.080 Adobe. Recuperado el 19 de Noviembre de [http://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fes.slideshare.net%2Fjovoc%2Fnormas-tecnicas-del-adobe&ei=byPuVN2HDojeoASQnYGAAG&usg=AFQjCNFPQoYm45W-LYfQvk\\_OJQPcwtnavw&bvm=bv.86956481,d.cGU&cad=rja](http://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fes.slideshare.net%2Fjovoc%2Fnormas-tecnicas-del-adobe&ei=byPuVN2HDojeoASQnYGAAG&usg=AFQjCNFPQoYm45W-LYfQvk_OJQPcwtnavw&bvm=bv.86956481,d.cGU&cad=rja)
- Ovalles, F. (2003). El color del suelo: definiciones e interpretación. [versión electrónica]. CENIAP HOY,3 (1). Recuperado el 03 de Febrero de 2015, de [http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas\\_tec/ceniaphoy/articulos/n3/texto/fovalles.htm](http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_tec/ceniaphoy/articulos/n3/texto/fovalles.htm)

- PRECIOSDEMATERIALESDECONSTRUCCION.COM.MX, S.A. DE C.V. (15 de marzo de 2007). Categorías: Precios de materiales de construcción. Recuperado el 8 de diciembre de 2014 de <http://www.preciosdematerialesdeconstruccion.com.mx/>
- RAE. Diccionario de la Real Academia Española. (Octubre de 2014). RAE. Recuperado el 2014 de Noviembre de 13, de Diccionario de la lengua española: <http://lema.rae.es/drae/?val=>
- Red de ladrilleras. (2013). Eficiencia energética en ladrilleras artesanales. Recuperado el 1 de octubre de 2014, de <http://www.redladrilleras.net/website/web/stats.php>
- RES. (2012 de Agosto de 2012). Ecointeligencia: Tapial y la construcción sostenible. Recuperado el 2 de febrero de 2015, de <http://www.ecointeligencia.com/2012/08/tapial-y-la-construccion-sostenible/#lightbox/2/>
- SEMARNAT. (2012). Residuos. Distrito Federal. Recuperado el 15 de abril de 2014, de [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_12/pdf/Cap7\\_residuos.pdf](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap7_residuos.pdf)
- Tron, F. (2010). Waste collection in Mega-cities. Within the framework of sustainability. [versión electrónica]. INVI, 25(70), 181-222. Recuperado el 27 de octubre de 2014, de [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-83582010000300006](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-83582010000300006)

### **Tesis consultadas**

- Apablazas, C. (2012). Estudio de bloques de tierra comprimida, BTC. Chile. Tesis: Universidad de la frontera, 56-86.
- Barburdo, M. (2012). Aplicaciones de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición en la construcción de infraestructuras viarias. Córdoba. Tesis: Universidad de Córdoba, 28-51.
- Barroso, V. (2013). Análisis de la gestión de residuos de construcción y demolición en la comunidad Autónoma de Andalucía. Sevilla España. Tesis: Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Recuperado el 17 de Enero de 2015, de proyectos: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/30186/fichero/Cap%EDtulo+11.pdf>
- Burgueño, A., Lara, C., & Alfaya, V. (21 de Enero de 2014). Congreso Nacional del Medio Ambiente. Obtenido de <http://www2.conama.org/documentos/gt14.pdf>
- Burgos, D. (2010). Tesis: Guía para gestión y tratamiento de residuos y desperdicios de proyectos de construcción y demolición. Valdivia Chile: Universidad Austral de Chile, 20-61.
- Galarza, M. P. (2011). Desperdicio de materiales en obras de construcción civil: métodos de medición y control. Lima. Tesis: Pontificia Universidad Católica del Perú, 16-34.

- González, R., Jessica, A., Borraz, M., Jorge, A., Alejandro, R., Pedro, V., & García, C. (2010). Tesis: Empleo de blocks elaborados con residuos de construcción en Chiapas. Tuxtla Gutiérrez. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, 45-79.
- Luna, D. (2012). Reúso de residuos de construcción y demolición. Enfoque ambiental y sustentable. México, Distrito Federal: Tesis: Universidad Nacional Autónoma de México, 11-27.
- Martel, G. (2008). Caracterización de residuos de la construcción y demolición de edificaciones para su aprovechamiento. México Distrito Federal. Tesis: Universidad Nacional Autónoma de México, 95-107.
- Maldonado, M. (2014). Aprovechamiento de residuos de construcción y materia orgánica para la fabricación de ecoladrillos en el Parque Ecológico Tuzandepitl, Veracruz. México, D. F. Tesis: Universidad Nacional Autónoma de México, 23-24.
- Pozos, I. (2010). Diseño térmico para un horno solar de secado de madera. Xalapa, Veracruz. Tesis: Universidad Veracruzana, 5-18.
- Rivela, B. (2012). Propuesta metodológica de aplicación sectorial Análisis de Ciclo de Vida para la evaluación ambiental de la edificación en España. Madrid, España. Tesis: Universidad Politécnica de Madrid, 29-34.
- Rivera, C. (2007). Análisis del impacto ambiental por la inadecuada disposición de residuos de la construcción y demolición en el valle de México y propuestas de solución. México Distrito Federal. Tesis: Universidad Nacional Autónoma de México, 2-108.
- Zea, N. (2005). Caracterización de las arcillas para la fabricación de ladrillos artesanales. Guatemala. Tesis: Universidad de San Carlos de Guatemala, 1-45.

## **Glosario**

### **Absorción de agua máxima inicial**

Capacidad de imbibición de agua por capilaridad mediante inmersión parcial del ladrillo en un periodo corto de tiempo.

### **Aglomerantes**

Materiales capaces de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por métodos exclusivamente físicos.

### **Antepecho**

Parte maciza inferior que define una ventana el cual se levanta desde el piso y exteriormente muestra la parte frontal inferior de una ventana.

### **Cabeceo**

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

### **Cadena**

Elemento estructural que sirve para dar solidez al muro; cuando está a nivel del suelo se llama dala o desplante y cuando se encuentra en la parte superior del muro se le llama cadena de cerramiento.

### **Castillo**

Refuerzos que distribuyen la fuerza del techo, las cadenas y el piso a la cimentación de la estructura.

### **Concreto hidráulico**

Mezcla formada entre cemento, agregados como grava, arena y agua. La cual después de un periodo de deshidratación o fraguado se solidifica formando un material altamente resistente.

### **Conglomerantes**

Materiales capaces de unir fragmentos de uno o varios materiales y dar cohesión al conjunto mediante transformaciones químicas en su masa que originan nuevos compuestos.

### **Emisiones**

Liberación a la atmósfera de gases de efecto invernadero y/o sus precursores y aerosoles en la atmósfera, incluyendo en su caso compuestos de efecto invernadero, en una zona y un periodo de tiempo específicos.

**Fuentes emisoras**

Todo proceso, actividad, servicio o mecanismo que libere un gas o compuesto de efecto invernadero a la atmósfera.

**Granulometría**

Es la distribución de los tamaños de las partículas de un suelo.

**Mampostería**

Sistema tradicional de construcción que consiste en erigir muros y paramentos mediante la colocación manual de los elementos o los materiales que los componen (denominados mampuestos) que pueden ser, por ejemplo: ladrillos, bloques de cemento prefabricados o piedras talladas.

**Mucílago**

Sustancia viscosa que se halla en ciertas partes de algunas plantas.

**Muros divisorios**

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

**Parapeto**

Elemento arquitectónico que sirve para evitar la caída de personas, animales u objetos de un balcón o terraza o lugar que presente desniveles entre diferentes planos.

**Peso volumétrico**

Es la relación del peso de la masa de suelos entre su volumen de masa.

**Plasticidad**

Es la propiedad que tienen algunos suelos para deformarse sin agrietarse. La plasticidad es la propiedad que expresa la magnitud de las fuerzas de las películas de agua dentro del suelo ya que éstas permiten que el suelo sea moldeado sin romperse hasta un determinado punto. Es el efecto resultante de una presión y una deformación.

**Pretil**

Elemento arquitectónico de seguridad, que se construye en puentes y otras estructuras para evitar caídas o delimitar una zona de tránsito.

**Resistencia a la compresión:** Esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento. La resistencia a la compresión de un material que falla debido al fracturamiento se puede definir en límites bastante ajustados, como una propiedad independiente. Sin embargo, la resistencia a la compresión de los materiales que no se rompen en la compresión se define como la cantidad de esfuerzo necesario para deformar el material una cantidad arbitraria.