



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA CIVIL – CONSTRUCCIÓN**

**FABRICACIÓN DE BLOQUES ECOLÓGICOS A BASE DE MATERIAL PRODUCTO DE LA**  
**CONSTRUCCIÓN**

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

PRESENTA:  
ARMANDO DE JESÚS AGUILAR PENAGOS

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

CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE 2017

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: M. I. Carlos Javier Mendoza Escobedo.

Secretario: Ing. Ernesto René Mendoza Sánchez.

Vocal: Dra. María Neftalí Rojas Valencia.

1er. Suplente: M. I. Luis Candelas Ramírez.

2do. Suplente: M. I. José Álvaro Pérez Gómez.

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

- Laboratorio del edificio 5 y 8 del Instituto de Ingeniería (UNAM).
- Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería (UNAM).
- Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Barcelona, España.

**TUTOR DE TESIS:**

DRA. MARÍA NEFTALÍ ROJAS VALENCIA

-----  
**FIRMA**

## AGRADECIMIENTOS

*A mi madre, en primer lugar, por darme la vida, por haberme inculcado todos esos valores para ser una persona de bien, por apoyarme en todo momento tanto en lo académico, como en lo personal, en lo sentimental, en lo moral, en fin, en todo. Gracias por todos esos consejos que me han servido para llegar hasta donde he llegado hoy en día, también por todos esos regaños y llamadas de atención, pues me han servido para ir por el camino del bien. Gracias por celebrar conmigo mis triunfos y fracasos. Gracias por creer en mí.*

*A mi padre, por el apoyo brindado en todos estos años, por sus enseñanzas y consejos.*

*A mi hermana, por ser siempre mi ejemplo a seguir, por apoyarme en cada decisión que he tomado, por creer en mí, por encaminarme hacia el camino del éxito, por escucharme cada que lo he necesitado y sobre todo por estar conmigo a pesar de la distancia.*

*A mi hermano, por ser mi compañero de vida y mi confidente, por inspirarme a alcanzar las metas que te propones con la disciplina que te caracteriza, por haber llegado a cambiar para bien mi vida en la CDMX y por todos esos momentos buenos y malos en los que hemos estado juntos.*

*A mi abuela Lupita, que a pesar de la distancia siempre ha estado al pendiente de mis pasos.*

*A Rebeca, por presionarme tanto en estudiar para el examen de ingreso a la maestría, ya que sin ello hoy día no hubiese podido realizar este proyecto, por estar conmigo en todo este camino y alentarme a seguir adelante cada día, gracias por todo.*

*A mis amigos Chanti, Pepe, Gabo, Paco, Kike, Ponti, Gil, Julio, Pinky y Steffy, por estar conmigo todos estos años a pesar de la distancia y hacer de mis periodos de vacaciones en Sancris más amenos y con nuevas experiencias, por pasar buenos momentos y siempre tener nuevas historias por contar.*

*A mi asesora la Dra. María Neftalí Rojas Valencia por aceptar la dirección de la presente investigación, por todo su apoyo, por el conocimiento que me compartió, por la dedicación, paciencia e interés que mostró para llevar a cabo esta tesis, mil gracias.*

*Al Dr. José Manuel Gómez Soberón, por recibirme en la Universidad Politécnica de Cataluña y sumarse a este proyecto para enriquecerlo, por los conocimientos brindados, paciencia y dedicación.*

*A mis sinodales, M.I. Luis Candelas Ramírez, M.I. José Álvaro Pérez Gómez, Ing. Ernesto René Mendoza Sánchez y M.I. Carlos Javier Mendoza Escobedo, por tener la disposición de pertenecer a mi jurado y que con su vasta experiencia realizaron los comentarios y sugerencias que sirvieron para enriquecer la investigación y mis conocimientos sobre el tema.*

*A mis roommates y amigos Julián, Alex y Fer, por alentarme en todo momento, por compartir el día a día y convertirse en mi familia lejos de casa.*

*A la M.I. Esperanza Aquino Bolaños, por ser mi guía al inicio de este proyecto, por su interés, dedicación y apoyo.*

*A los chicos de servicio social, Daniel, Susana, Iván, Piero y Martín por su increíble apoyo en las diferentes actividades y agotadoras jornadas que tuvimos en el edificio 8 del Instituto de Ingeniería.*

*A Jonathan del taller de carpintería del Instituto de Ingeniería por su apoyo, amabilidad y disposición cuando requerí de sus conocimientos y habilidades, además de la amistad que se formó durante este tiempo.*

*A TecnoAdobe, por el material proporcionado y la disposición para la capacitación del manejo de la ladrillera industrial.*

*A Concretos Reciclados por la donación de los agregados reciclados y su disposición para recibirnos en la planta y explicar el proceso de obtención de los mismos.*

*Al Instituto de Ingeniería, por todo el apoyo brindado para la realización de esta tesis.*

*Al M.I. Miguel Ángel Zúñiga Bravo, jefe del laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería, por su apoyo para la utilización de las instalaciones y equipos para realizar las pruebas de compresión.*

*A los laboratoristas del laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería, por su apoyo, amabilidad y disposición al realizar las pruebas de compresión correspondientes.*

*Al Biólogo Javier Flavio Montoya Gómez, encargado de la planta de composta de la UNAM, por su apoyo, amabilidad y disposición para la donación de los residuos de tala.*

*Al programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería por el apoyo económico para llevar a cabo la estancia de investigación en la Universidad Politécnica de Cataluña.*

*A la Universidad Politécnica de Cataluña por el recibimiento en sus instalaciones y permitirme ampliar el conocimiento para complementar esta investigación.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante estos años.*

*A mi Alma Máter, la Universidad Nacional Autónoma de México, la cual me abrió sus puertas para llevar a cabo mi formación profesional desde la licenciatura, por todo lo que me ha dado y con la cuál estaré eternamente agradecido.*

*A todos y cada uno de los que hicieron posible la realización de esta tesis, gracias totales.*

**“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”**

*Sin coraje, las demás virtudes carecen de sentido.*

*-Winston Churchill.*

## CONTENIDO

|                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>                                                                    | <b>1</b>  |
| 1.1. Justificación                                                                        | 2         |
| 1.2. Objetivo General                                                                     | 2         |
| 1.3. Objetivos Particulares                                                               | 2         |
| 1.4. Alcances                                                                             | 3         |
| <b>2. MARCO TEÓRICO</b>                                                                   | <b>4</b>  |
| 2.1. Los residuos de la construcción y demolición (RCD)                                   | 4         |
| 2.1.1. Generación y clasificación                                                         | 5         |
| 2.1.2. Almacenamiento                                                                     | 7         |
| 2.1.3. Recolección y transporte                                                           | 9         |
| 2.1.4. Disposición final                                                                  | 10        |
| 2.1.5. Residuos potencialmente reciclables                                                | 10        |
| 2.2. Reciclaje de los residuos de la construcción y demolición                            | 12        |
| 2.2.1. México y el reciclaje de los residuos de la construcción y demolición              | 12        |
| 2.2.2. Los residuos de la construcción y demolición a nivel internacional                 | 14        |
| 2.3. Marco jurídico                                                                       | 23        |
| 2.4. La construcción sustentable                                                          | 23        |
| 2.4.1. Materiales utilizados en la construcción fabricados a base de productos reciclados | 26        |
| 2.5. Secadores solares                                                                    | 35        |
| 2.6. El nopal en la construcción                                                          | 38        |
| <b>3. ANTECEDENTES</b>                                                                    | <b>39</b> |
| 3.1. Ladrilleras                                                                          | 39        |
| 3.1.1. La construcción con materiales convencionales                                      | 42        |
| 3.1.2. Bloques ecológicos                                                                 | 47        |
| <b>4. METODOLOGÍA</b>                                                                     | <b>54</b> |
| 4.1. Fase I: Estudio de gabinete                                                          | 55        |
| 4.2. Fase II: Diseño de materiales y construcción del equipo empleado                     | 55        |
| 4.2.1. Materiales utilizados en la fabricación de ladrillos                               | 55        |
| 4.2.1.1. Materiales aglomerantes                                                          | 56        |

|          |                                                                                                        |    |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.1.2. | Materiales de relleno o agregados.....                                                                 | 57 |
| 4.2.1.3. | Residuos de tala o maderables .....                                                                    | 59 |
| 4.2.1.4. | Mezcla agua-mucílago de nopal.....                                                                     | 61 |
| 4.2.2.   | Dimensiones de fabricación de los ladrillos Etapa I.....                                               | 63 |
| 4.2.3.   | Dimensiones de fabricación de los ladrillos Etapa II.....                                              | 63 |
| 4.2.4.   | Diseño y construcción del equipo empleado en la fabricación de<br>ladrillos. ....                      | 63 |
| 4.2.4.1. | Máquina moldeadora de ladrillos Etapa I.....                                                           | 64 |
| 4.2.4.2. | Máquina para fabricación de ladrillos Etapa II .....                                                   | 64 |
| 4.2.4.3. | Secador solar .....                                                                                    | 65 |
| 4.2.5.   | Definición del proceso constructivo .....                                                              | 66 |
| 4.3.     | Fase III: Fabricación de ladrillos Etapa I .....                                                       | 67 |
| 4.3.1.   | Pruebas preliminares .....                                                                             | 67 |
| 4.3.1.1. | Prueba granulométrica .....                                                                            | 67 |
| 4.3.1.2. | Prueba plasticidad .....                                                                               | 68 |
| 4.3.1.3. | Prueba de dureza.....                                                                                  | 69 |
| 4.3.1.4. | Prueba de mezclas.....                                                                                 | 70 |
| 4.3.2.   | Diseño de mezclas .....                                                                                | 71 |
| 4.3.3.   | Fabricación de ladrillos Etapa I .....                                                                 | 71 |
| 4.3.4.   | Realización de pruebas de resistencia a la compresión .....                                            | 78 |
| 4.3.5.   | Realización de pruebas de absorción.....                                                               | 86 |
| 4.4.     | Fase IV: Fabricación de ladrillos Etapa II.....                                                        | 90 |
| 4.4.1.   | Diseño de mezclas .....                                                                                | 90 |
| 4.4.2.   | Fabricación de ladrillos Etapa II.....                                                                 | 90 |
| 4.4.3.   | Realización de pruebas de resistencia a compresión.....                                                | 92 |
| 4.4.4.   | Realización de pruebas de absorción de agua máxima inicial .....                                       | 94 |
| 5.       | RESULTADOS .....                                                                                       | 95 |
| 5.1.     | Resultados Fase I. Normativa aplicable en la evaluación de la calidad para<br>ladrillos y bloques..... | 95 |
| 5.1.1.   | Especificaciones de la normativa de evaluación para ladrillos y<br>bloques. ....                       | 95 |
| 5.2.     | Resultados Fase II: Diseño .....                                                                       | 96 |
| 5.3.     | Resultados Fase III: Fabricación de ladrillos Etapa I.....                                             | 97 |

|          |                                                             |     |
|----------|-------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3.1.   | Determinación del periodo de secado .....                   | 97  |
| 5.3.1.1. | Condiciones presentadas por el secador solar .....          | 101 |
| 5.3.2.   | Resistencia a la compresión Etapa I .....                   | 103 |
| 5.3.2.1. | Condiciones óptimas de fabricación .....                    | 105 |
| 5.3.3.   | Absorción de agua máxima inicial Etapa I .....              | 105 |
| 5.3.3.1. | Absorción total.....                                        | 106 |
| 5.4.     | Resultados Fase IV: Fabricación de ladrillos Etapa II ..... | 107 |
| 5.4.1.   | Determinación del periodo de secado .....                   | 107 |
| 5.4.1.1. | Condiciones presentadas por el secador solar .....          | 110 |
| 5.4.2.   | Resistencia a la compresión Etapa II .....                  | 112 |
| 5.4.3.   | Absorción de agua máxima inicial Etapa II .....             | 113 |
| 5.5.     | Comparativa de resultados entre ambas Etapas .....          | 114 |
| 5.6.     | Análisis económico .....                                    | 116 |
| 6.       | CONCLUSIONES.....                                           | 119 |
| 7.       | RECOMENDACIONES .....                                       | 120 |
| 8.       | ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS .....                           | 122 |
|          | REFERENCIAS .....                                           | 123 |
|          | GLOSARIO .....                                              | 126 |
|          | ANEXO 1 .....                                               | 128 |
|          | ANEXO 2 .....                                               | 132 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Tabla 1. Porcentaje de generación de residuos de la construcción</i> .....                                                                                                                                    | 4   |
| <i>Tabla 2. Clasificación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)</i> .....                                                                                                                               | 6   |
| <i>Tabla 3. Compuestos químicos considerados peligrosos en la norma NMX-AA-164-SCFI-2013</i> .....                                                                                                               | 6   |
| <i>Tabla 4. Categoría y requerimientos ambientales de los generadores, prestadores de servicio de transporte, centros de reciclaje y sitios de disposición final autorizados para el manejo de los RCD</i> ..... | 7   |
| <i>Tabla 5. Almacenamiento de los RCD según volumen</i> .....                                                                                                                                                    | 8   |
| <i>Tabla 6. Clasificación de los RCD potencialmente reciclables</i> .....                                                                                                                                        | 10  |
| <i>Tabla 7. Granulometrías suministradas por "Concretos Reciclados"</i> .....                                                                                                                                    | 13  |
| <i>Tabla 8. Generación de RCD en países de la Unión Europea</i> .....                                                                                                                                            | 15  |
| <i>Tabla 9. Composición de residuos y reciclaje en Alemania, 2004</i> .....                                                                                                                                      | 20  |
| <i>Tabla 10. Equilibrio de residuos de 2008 en Alemania</i> .....                                                                                                                                                | 21  |
| <i>Tabla 11. Composición de los residuos de construcción en Costa Rica</i> .....                                                                                                                                 | 21  |
| <i>Tabla 12. Generación anual de los residuos de construcción en Costa Rica</i> .....                                                                                                                            | 21  |
| <i>Tabla 13. Generación de RCD en Estados Unidos</i> .....                                                                                                                                                       | 22  |
| <i>Tabla 14. Legislación Mexicana</i> .....                                                                                                                                                                      | 23  |
| <i>Tabla 15. Producción promedio anual por empresa ladrillera artesanal en los Estados de la República Mexicana</i> .....                                                                                        | 40  |
| <i>Tabla 16. Combinaciones preliminares</i> .....                                                                                                                                                                | 70  |
| <i>Tabla 17. Porcentajes de material por cada tipo de mezcla</i> .....                                                                                                                                           | 71  |
| <i>Tabla 18. Diseño de mezclas Etapa II</i> .....                                                                                                                                                                | 90  |
| <i>Tabla 19. Normas empleadas en la evaluación de la calidad de los ladrillos fabricados</i> ...                                                                                                                 | 95  |
| <i>Tabla 20. Valores de resistencia a la compresión establecidos en la NMX-C-441-ONNCCE-2013</i> .....                                                                                                           | 96  |
| <i>Tabla 21. Valores de absorción de agua máxima inicial establecidos en la NMX-C-441-ONNCCE</i> .....                                                                                                           | 96  |
| <i>Tabla 22. Resultados de las dimensiones de fabricación de ambas etapas</i> .....                                                                                                                              | 96  |
| <i>Tabla 23. Proporción de materiales para la fabricación de ladrillos</i> .....                                                                                                                                 | 97  |
| <i>Tabla 24. Porcentaje de agua-mucílago de nopal para cada mezcla diseñada</i> .....                                                                                                                            | 97  |
| <i>Tabla 25. Resultados de absorción total</i> .....                                                                                                                                                             | 106 |
| <i>Tabla 26. Diseño de mezclas Etapa II</i> .....                                                                                                                                                                | 107 |
| <i>Tabla 27. Cálculo del costo directo por unidad de bloque ecológico</i> .....                                                                                                                                  | 117 |
| <i>Tabla 28. Cálculo del costo directo de 1 m<sup>2</sup> de muro construido con bloque ecológico</i> ...                                                                                                        | 118 |
| <i>Tabla 29. Cálculo del costo directo de 1 m<sup>2</sup> de muro construido con ladrillo convencional</i> .....                                                                                                 | 118 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Figura 1. Incidencia de los RCD en la generación total .....</i>                           | <i>5</i>  |
| <i>Figura 2. Residuos de Construcción almacenados incorrectamente .....</i>                   | <i>8</i>  |
| <i>Figura 3. Residuos de construcción sin tratamiento de separación .....</i>                 | <i>9</i>  |
| <i>Figura 4. Aprovechamiento de RCD en diferentes proyectos .....</i>                         | <i>14</i> |
| <i>Figura 5. Variación de la generación de RCD entre países de la UE (2004-2010) .....</i>    | <i>16</i> |
| <i>Figura 6. Composición de RCD en Países Bajos 2001 .....</i>                                | <i>16</i> |
| <i>Figura 7. Composición de RCD en Dinamarca 2003 .....</i>                                   | <i>17</i> |
| <i>Figura 8. Composición de RCD en España 2005 .....</i>                                      | <i>17</i> |
| <i>Figura 9. Composición de RCD en Estonia 2006 .....</i>                                     | <i>18</i> |
| <i>Figura 10. Composición de RCD en Finlandia 2006 .....</i>                                  | <i>18</i> |
| <i>Figura 11. Composición de RCD en República Checa 2006 .....</i>                            | <i>19</i> |
| <i>Figura 12. Composición de RCD en Alemania 2007 .....</i>                                   | <i>19</i> |
| <i>Figura 13. Desglose de RCD en Estados Unidos .....</i>                                     | <i>22</i> |
| <i>Figura 14. Interrelación de los pilares básicos del desarrollo sustentable .....</i>       | <i>25</i> |
| <i>Figura 15. Tablero de polietileno reciclado prensado (Taplast) .....</i>                   | <i>27</i> |
| <i>Figura 16. Tablero de madera reciclada .....</i>                                           | <i>28</i> |
| <i>Figura 17. Tablero de madera reciclada usado como muro divisorio .....</i>                 | <i>28</i> |
| <i>Figura 18. Lavabo fabricado con DEXTERRA .....</i>                                         | <i>29</i> |
| <i>Figura 19. Paneles NakedBoard utilizados para división de espacios .....</i>               | <i>30</i> |
| <i>Figura 20. Ladrillo vidriado .....</i>                                                     | <i>31</i> |
| <i>Figura 21. Bio-Glass utilizado para recubrimientos y muebles de baño .....</i>             | <i>31</i> |
| <i>Figura 22. Adoquines de pavimento ecológico .....</i>                                      | <i>32</i> |
| <i>Figura 23. Colocación de suelos ecológicos ECORE .....</i>                                 | <i>32</i> |
| <i>Figura 24. Piso con acabado de baldosas EcoCycle .....</i>                                 | <i>33</i> |
| <i>Figura 25. Acabados con azulejos metálicos Mixology .....</i>                              | <i>34</i> |
| <i>Figura 26. Azulejo CRUSH .....</i>                                                         | <i>34</i> |
| <i>Figura 27. Esquema de Secador Solar Indirecto .....</i>                                    | <i>36</i> |
| <i>Figura 28. Esquema de Secador Solar Directo .....</i>                                      | <i>37</i> |
| <i>Figura 29. Esquema de Secador Solar Mixto .....</i>                                        | <i>38</i> |
| <i>Figura 30. Número de ladrilleras artesanales por Estado de la República Mexicana .....</i> | <i>40</i> |
| <i>Figura 31. Emisión de gases efecto invernadero por horno ladrillero en operación .....</i> | <i>41</i> |
| <i>Figura 32. Ladrillo macizo .....</i>                                                       | <i>43</i> |
| <i>Figura 33. Configuración de algunos ladrillos especiales .....</i>                         | <i>43</i> |
| <i>Figura 34. Ladrillo perforado .....</i>                                                    | <i>43</i> |
| <i>Figura 35. Ladrillo hueco .....</i>                                                        | <i>44</i> |
| <i>Figura 36. a) Block hueco; b) Block macizo .....</i>                                       | <i>45</i> |
| <i>Figura 37. Tabicón .....</i>                                                               | <i>45</i> |
| <i>Figura 38. Configuración de adocreto tipo S .....</i>                                      | <i>46</i> |
| <i>Figura 39. Configuración de adopasto doble gato .....</i>                                  | <i>47</i> |
| <i>Figura 40. Diferentes presentaciones del BTC .....</i>                                     | <i>48</i> |
| <i>Figura 41. Bitublock .....</i>                                                             | <i>49</i> |

|                                                                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Figura 42. Ecoladrillo con lana y algas .....</i>                                                          | <i>49</i> |
| <i>Figura 43. Probetas de ecoladrillos con cascarillas de arroz .....</i>                                     | <i>50</i> |
| <i>Figura 44. Ecoladrillos a base de botellas PET rellenas de residuos .....</i>                              | <i>50</i> |
| <i>Figura 45. Ecoladrillos con residuos de PET y cemento Portland.....</i>                                    | <i>51</i> |
| <i>Figura 46. Ecoladrillos Ecotec.....</i>                                                                    | <i>51</i> |
| <i>Figura 47. Extrusión de ecoladrillos de adobe.....</i>                                                     | <i>52</i> |
| <i>Figura 48. Ladrillo fabricado a base de PET.....</i>                                                       | <i>53</i> |
| <i>Figura 49. Ladrillos de papel reciclado .....</i>                                                          | <i>53</i> |
| <i>Figura 50. Bloques ecológicos BLOX.....</i>                                                                | <i>54</i> |
| <i>Figura 51. Material de excavación.....</i>                                                                 | <i>56</i> |
| <i>Figura 52. a) Secado del material de excavación; b) Apisonado de material de excavación .....</i>          | <i>57</i> |
| <i>Figura 53. Cernido de material de excavación .....</i>                                                     | <i>57</i> |
| <i>Figura 54. Obtención de agregados reciclados .....</i>                                                     | <i>58</i> |
| <i>Figura 55. Clasificación de agregados reciclados.....</i>                                                  | <i>58</i> |
| <i>Figura 56. Secado de residuos de construcción .....</i>                                                    | <i>59</i> |
| <i>Figura 57. Obtención de residuos de tala.....</i>                                                          | <i>60</i> |
| <i>Figura 58. Cernido de residuos de tala.....</i>                                                            | <i>60</i> |
| <i>Figura 59. Centro de acopio del Nopal-Verdura.....</i>                                                     | <i>61</i> |
| <i>Figura 60. a) Corte de nopal en cuadros; b) Depósito de nopal en recipiente; c) Reposo de nopal.....</i>   | <i>62</i> |
| <i>Figura 61. a) Extracción de mucílago con colador; b) Extracción manual de mucílago .....</i>               | <i>62</i> |
| <i>Figura 62. Dimensiones de fabricación Etapa I.....</i>                                                     | <i>63</i> |
| <i>Figura 63. Dimensiones de fabricación Etapa II.....</i>                                                    | <i>63</i> |
| <i>Figura 64. Máquina moldeadora de ladrillos .....</i>                                                       | <i>64</i> |
| <i>Figura 65. Máquina para fabricar bloques ecológicos de tierra compactada .....</i>                         | <i>65</i> |
| <i>Figura 66. Secador solar .....</i>                                                                         | <i>65</i> |
| <i>Figura 67. Proceso constructivo.....</i>                                                                   | <i>66</i> |
| <i>Figura 68. Prueba granulométrica .....</i>                                                                 | <i>67</i> |
| <i>Figura 69. Moldeo de rollito .....</i>                                                                     | <i>68</i> |
| <i>Figura 70. a) Deslizamiento de rollito; b) Medición de ruptura.....</i>                                    | <i>68</i> |
| <i>Figura 71. Bolitas y pastillas de suelo.....</i>                                                           | <i>69</i> |
| <i>Figura 72. a) Prueba de dureza a bolita; b) Prueba de dureza a pastilla.....</i>                           | <i>69</i> |
| <i>Figura 73. a) Bloques combinaciones preliminares; b) Bloques combinaciones preliminares probadas .....</i> | <i>70</i> |
| <i>Figura 74. Pesaje de materiales .....</i>                                                                  | <i>72</i> |
| <i>Figura 75. Mezcla de materiales en seco.....</i>                                                           | <i>72</i> |
| <i>Figura 76. Vertido de mucílago a la mezcla.....</i>                                                        | <i>73</i> |
| <i>Figura 77. Consistencia adecuada de la mezcla.....</i>                                                     | <i>73</i> |
| <i>Figura 78. Acomodo de la mezcla en el marco .....</i>                                                      | <i>74</i> |
| <i>Figura 79. Texturizado de la superficie.....</i>                                                           | <i>74</i> |
| <i>Figura 80. Prensado de la mezcla .....</i>                                                                 | <i>75</i> |
| <i>Figura 81. Extrusión de los especímenes .....</i>                                                          | <i>75</i> |

|                                                                                                                                                        |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Figura 82. Pesaje de ladrillos .....</i>                                                                                                            | <i>76</i>  |
| <i>Figura 83. Determinación de las dimensiones.....</i>                                                                                                | <i>76</i>  |
| <i>Figura 84. Exposición de ladrillos al aire libre.....</i>                                                                                           | <i>77</i>  |
| <i>Figura 85. Volteo de ladrillos sobre su canto .....</i>                                                                                             | <i>77</i>  |
| <i>Figura 86. Ladrillos al interior del secador.....</i>                                                                                               | <i>78</i>  |
| <i>Figura 87. Equipos de medición de temperatura y radiación solar .....</i>                                                                           | <i>78</i>  |
| <i>Figura 88. Equipo y herramientas para cabeceo .....</i>                                                                                             | <i>79</i>  |
| <i>Figura 89. Pesaje de materiales para cabeceo .....</i>                                                                                              | <i>79</i>  |
| <i>Figura 90. Encofrado de ladrillos para cabeceo .....</i>                                                                                            | <i>80</i>  |
| <i>Figura 91. Nivelación de encofrado.....</i>                                                                                                         | <i>80</i>  |
| <i>Figura 92. Humedecimiento de la superficie del ladrillo.....</i>                                                                                    | <i>81</i>  |
| <i>Figura 93. Vertido de mezcla yeso-cemento sobre la superficie del ladrillo .....</i>                                                                | <i>81</i>  |
| <i>Figura 94. Acomodo de mezcla yeso-cemento y texturizarían de la superficie .....</i>                                                                | <i>82</i>  |
| <i>Figura 95. Lijado de la pieza para acabado final.....</i>                                                                                           | <i>82</i>  |
| <i>Figura 96. Colocación de placas de metal sobre base de equipo para compresión axial..</i>                                                           | <i>83</i>  |
| <i>Figura 97. Colocación de ladrillo para prueba de compresión .....</i>                                                                               | <i>83</i>  |
| <i>Figura 98. Aplicación de carga.....</i>                                                                                                             | <i>84</i>  |
| <i>Figura 99. Presentación de la falla en el ladrillo.....</i>                                                                                         | <i>84</i>  |
| <i>Figura 100. Toma de lectura de la carga máxima soportada por el ladrillo .....</i>                                                                  | <i>85</i>  |
| <i>Figura 101. Ladrillos probados manteniendo su estructura.....</i>                                                                                   | <i>85</i>  |
| <i>Figura 102. Colocación de barras de metal en recipiente para prueba de absorción .....</i>                                                          | <i>86</i>  |
| <i>Figura 103. Ajuste de niveles con ladrillo de referencia.....</i>                                                                                   | <i>87</i>  |
| <i>Figura 104. Ladrillo en prueba de absorción.....</i>                                                                                                | <i>87</i>  |
| <i>Figura 105. Determinación de peso posterior al periodo de prueba .....</i>                                                                          | <i>88</i>  |
| <i>Figura 106. Preparación de recipiente para prueba de absorción total.....</i>                                                                       | <i>88</i>  |
| <i>Figura 107. Sumersión de ladrillo .....</i>                                                                                                         | <i>89</i>  |
| <i>Figura 108. Indicación de término de prueba de absorción total .....</i>                                                                            | <i>89</i>  |
| <i>Figura 109. Materiales constituyentes de la mezcla .....</i>                                                                                        | <i>90</i>  |
| <i>Figura 110. a) Mezcla de agua-mucílago de nopal para integración de materiales; b) consistencia adecuada para la fabricación de ladrillos .....</i> | <i>91</i>  |
| <i>Figura 111. Material dispuesto en la cámara de prensado.....</i>                                                                                    | <i>91</i>  |
| <i>Figura 112. a) Compactación de la mezcla en la cámara de prensado; b) Extracción de espécimen .....</i>                                             | <i>92</i>  |
| <i>Figura 113. Adecuación de placas de acero para alineación de espécimen.....</i>                                                                     | <i>93</i>  |
| <i>Figura 114. a) Separación de las agujas indicadoras; b) Presentación de la falla en espécimen .....</i>                                             | <i>93</i>  |
| <i>Figura 115. Variación de peso diario mezcla 6 Etapa I.....</i>                                                                                      | <i>98</i>  |
| <i>Figura 116. Variación porcentual de peso diario mezcla 6 Etapa I .....</i>                                                                          | <i>99</i>  |
| <i>Figura 117. Variación de peso diario mezcla 7 Etapa I.....</i>                                                                                      | <i>100</i> |
| <i>Figura 118. Variación porcentual de peso diario mezcla 7 Etapa I .....</i>                                                                          | <i>100</i> |
| <i>Figura 119. Condiciones de temperatura respecto al periodo de secado Etapa I .....</i>                                                              | <i>101</i> |
| <i>Figura 120. Radiación solar captada por el secador solar Etapa I.....</i>                                                                           | <i>102</i> |
| <i>Figura 121. Resultados de resistencia a compresión Etapa I.....</i>                                                                                 | <i>103</i> |

|                                                                                                                         |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Figura 122. Resultados de resistencia a compresión promedio por mezcla diseñada Etapa I.....</i>                     | <i>104</i> |
| <i>Figura 123. a) Condiciones óptimas de fabricación mezcla 6; b) Condiciones óptimas de fabricación mezcla 7 .....</i> | <i>105</i> |
| <i>Figura 124. Resultados de absorción de agua máxima inicial Etapa I .....</i>                                         | <i>106</i> |
| <i>Figura 125. Variación de peso diario mezcla 6 Etapa II.....</i>                                                      | <i>108</i> |
| <i>Figura 126. Variación de peso diario mezcla 7 Etapa II.....</i>                                                      | <i>108</i> |
| <i>Figura 127. Variación porcentual de peso diario mezcla 6 Etapa II.....</i>                                           | <i>109</i> |
| <i>Figura 128. Variación porcentual de peso diario mezcla 7 Etapa II.....</i>                                           | <i>110</i> |
| <i>Figura 129. Condiciones de temperatura respecto al periodo de secado Etapa II .....</i>                              | <i>111</i> |
| <i>Figura 130. Radiación solar captada por el secador solar Etapa II.....</i>                                           | <i>111</i> |
| <i>Figura 131. Resultados de resistencia a compresión Etapa II .....</i>                                                | <i>112</i> |
| <i>Figura 132. . Resultados de resistencia a compresión promedio por mezcla diseñada Etapa II.....</i>                  | <i>113</i> |
| <i>Figura 133. Resultados de absorción de agua máxima inicial Etapa II .....</i>                                        | <i>114</i> |
| <i>Figura 134. Comparativa de resistencia a compresión .....</i>                                                        | <i>115</i> |
| <i>Figura 135 Comparativa de absorción de agua máxima inicial .....</i>                                                 | <i>116</i> |

## 1. INTRODUCCIÓN

Cerca del año 10 000 a.C., aparece en el Mediterráneo la cultura del Neolítico. Estas comunidades dejan de lado las costumbres nómadas, y comienzan a dedicarse a la recolección de semillas y granos para alimentarse. Al convertirse al sedentarismo, buscan solucionar sus necesidades de encontrar un lugar donde refugiarse, un lugar para guardar y proteger a sus animales y en donde almacenar el producto de sus cosechas.

Es en ese momento en el que surgen las primeras construcciones. Los hombres del Neolítico utilizan la madera como elemento principal para construir las estructuras de sus casas, y ramas cubiertas de arcilla para las paredes.

A los sumerios se les adjudica el primer desarrollo de una ciudad, con una distribución ordenada de calles, vialidades y la ubicación adecuada de escuelas y edificios públicos. Sus ciudades se componían principalmente por edificios de bloques de adobe, la arcilla húmeda se colocaba en moldes de madera y se dejaba secar al sol; más tarde, los sumerios empezaron a cocer los ladrillos en hornos, obteniendo así, materiales de construcción más sólidos y duraderos.

Es en ese momento histórico en el que nace como tal la industria de la construcción, y con ella el grave deterioro ambiental a nuestro planeta.

Desde los sumerios hasta nuestros días, la industria de la construcción ha recorrido mucho trecho, creciendo de forma alarmante y consumiendo de manera irresponsable los recursos naturales del planeta. Actualmente, se ha calculado que se necesita más de 2 toneladas de materias primas por cada m<sup>2</sup> de vivienda que se construye (Centro de Iniciativas para la Edificación Sostenible 2016), ello nos lleva a que la industria de la construcción tenga el siguiente impacto ambiental:

- La construcción y uso de edificios generan el 50% de las emisiones de CO<sub>2</sub> del planeta.
- Los edificios utilizan entre el 40% y 60% de los recursos naturales del planeta.
- Los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) alcanzan el 40% de los residuos generados a nivel mundial.

Dados los datos anteriores, se hace inminente la implementación de conocimiento y técnicas para mitigar el impacto ambiental generado por la industria de la construcción.

## **1.1. Justificación**

La industria de la construcción en México es un sector relevante de la economía, las obras que se construyen a lo largo del país son motor de la producción y empleo. La construcción siempre ha estado vinculada con el desarrollo del país y ha sido palanca fundamental para lograrlo a través de la infraestructura carretera, las obras pesadas de irrigación, la transmisión de energía, las obras de equipamiento urbano, que son parte de los activos del país (CMIC 2013).

Mientras más obras se construyen, más riqueza y mayor empleo se generan. Por lo anterior, la construcción es una industria que tiene una importante función social, es el sector de la economía que absorbe la mayor cantidad de mano de obra no calificada del país; sin embargo, es una industria que demanda altos niveles de consumo de recursos y energía, siendo también fuente de una alta 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).

El problema ambiental que conlleva la producción de residuos de la construcción se deriva no sólo del creciente volumen de su generación, sino 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).

Hoy en día la conservación del ambiente es primordial en la realización de cualquier proyecto de construcción, por lo cual se hace necesaria la investigación y desarrollo de alternativas de reúso y reciclaje de los residuos de construcción, de bajo costo en la elaboración y de procesamiento sencillo.

Es por ello que en la presente tesis se plantea y estudia el aprovechamiento de los residuos de la construcción, elaborando bloques ecológicos a partir de materiales producto de la construcción y demolición. Así mismo se presenta la factibilidad que tiene la construcción de estos bloques, con la finalidad de disminuir el impacto ambiental que la fabricación de materiales existentes genera, contribuyendo en la reducción del gasto de energía y materias primas.

## **1.2. Objetivo General**

Implementar el uso de materiales producto de la industria de la construcción para reducir el daño al medio ambiente, así como el desarrollo de nuevos elementos identificando y montando técnicas que se requieran para la caracterización del suelo.

## **1.3. Objetivos Particulares**

- Fabricar bloques ecológicos con material producto de residuos de la construcción.
- Analizar la factibilidad de la fabricación de dichos bloques tomando en cuenta el costo, calidad y seguridad.

- Comparar el costo tanto de fabricación como de construcción de estos bloques ecológicos, con un material existente en el mercado como es el tabique rojo u otro que tenga características similares.

#### **1.4. Alcances**

- Analizar la viabilidad de la fabricación de bloques ecológicos con material producto de residuos de la construcción.
- Conocer el avance que se tiene en México en cuestión de generación de residuos de construcción y demolición.
- Conocer el avance que se tiene a nivel internacional en cuestión de generación de los residuos de construcción y demolición.
- Comparación económica con materiales convencionales.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Los residuos de la construcción y demolición (RCD)

La Real Academia Española (RAE 2016) define a los residuos como *“Parte o porción que queda de un todo”* o *“Material que queda como inservible después de haber realizado un trabajo u operación”*. Si bien es cierto que los residuos son la parte que queda de un todo, se difiere de la segunda definición que da la RAE, pues no precisamente los materiales que quedan después de haber realizado un trabajo son inservibles, y algunos de los materiales a los que se le pueden dar uso después de ser desechados son precisamente los Residuos de la Construcción y Demolición (RCD).

Los residuos de la construcción son los materiales, usados o no, que son desechados por dicha industria y por la demolición; esta última es una de las más contaminantes debido a que los procesos de extracción y fabricación de los materiales producen grandes cantidades de residuos; de esta manera, es una de las industrias con mayor efecto en el ambiente y de mayor demanda (Rojas-Valencia y Macías 2013).

La norma NADF-007-RNAT-2013 específicamente define a los residuos de la construcción como 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.

En general, los RCD tienen una composición y un volumen muy variado, en la Tabla 1 se muestra el porcentaje de los componentes que se generan.

**Tabla 1. Porcentaje de generación de residuos de la construcción**

| RESIDUO                                              | PORCENTAJE (%) |
|------------------------------------------------------|----------------|
| Material de excavación                               | 43             |
| Concreto                                             | 24             |
| Block-tabique                                        | 23             |
| Tabla roca-yeso                                      | 4.05           |
| Madera                                               | 1.52           |
| Cerámica                                             | 0.85           |
| Plástico                                             | 0.78           |
| Piedra                                               | 0.62           |
| Varilla                                              | 0.48           |
| Asfalto                                              | 0.25           |
| Lámina                                               | 0.9            |
| Otros (mortero, alambre, resina, yeso, cal, tejados) | 0.55           |

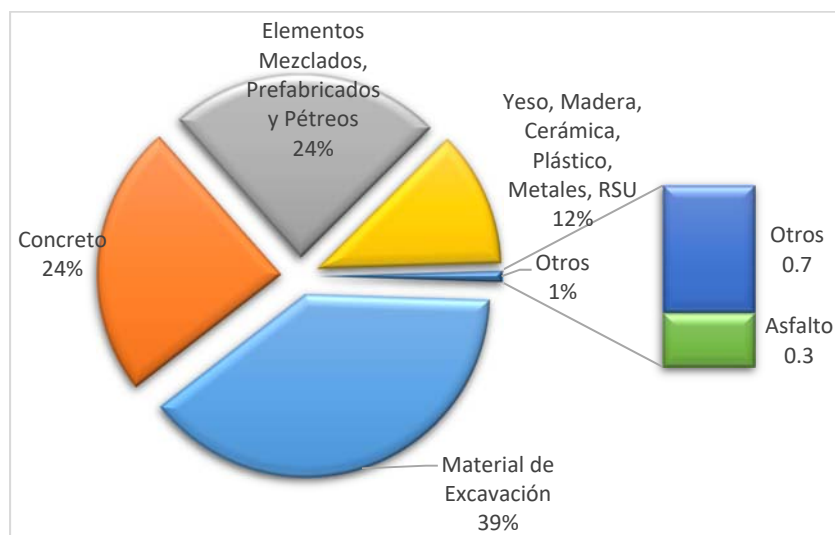
Debido a los grandes volúmenes generados, el efecto negativo que representa para el ambiente y su alto potencial de reutilización y reciclaje, los RCD se consideran residuos de manejo especial (Luna 2012).

### 2.1.1. Generación y clasificación

En la actualidad México no cuenta con cifras exactas sobre la generación de residuos de la construcción, ni una metodología para realizar estudios de campo correspondientes; los datos sobre las tasas de generación y recuperación son difíciles de estimar pues no todos los países consideran las mismas categorías de clasificación (Martínez 2013).

Las cifras de generación de residuos de la construcción en la Ciudad de México han ido en aumento a través de los años debido a la alta demanda de infraestructura, durante el año 2003 se reportó una generación de 3000 t/día, en el año 2008 la generación se incrementó reportando valores de 5000 t/día y de acuerdo con la norma ambiental para el Distrito Federal NADF-007-RNAT-2013 en lo que corresponde a la generación de residuos de la construcción y demolición, según estimaciones proporcionadas por las delegaciones, la generación de estos residuos ascienden al orden de 7000 t/día, según la Secretaria del Medio Ambiente y la Secretaria de Obras y Servicios, de ese total, 78% va a un relleno sanitario y únicamente 1.3% se recicla; paralelamente en el país se generan diariamente alrededor de 33 600 toneladas de RCD (Granell 2014).

Los residuos provenientes del material de excavación, de concreto y de prefabricados son los que representan el porcentaje predominante de la generación con el 87% del total de los RCD. En la Figura 1 se muestra el porcentaje de incidencia de los residuos de construcción en la generación total.



*Figura 1. Incidencia de los RCD en la generación total*

*Fuente: Elaboración propia con datos de la CMIC, 2013.*

La composición de los RCD depende de varias circunstancias, como el tipo de terreno, clase, obra, costumbres de los trabajadores, etcétera, pero en general se pueden dividir en la clasificación que propone la NADF-007-RNAT-2013, como se muestra en la Tabla 2.

En dicha tabla no se habla de los residuos peligrosos que se pueden generar en la construcción, así que es importante mencionar que algunos de los materiales utilizados

podrían contener sustancias dañinas a la salud, además de contaminantes. Deben de evitarse aquellos que no demuestren que no han sido expuestos a ningún tipo de radiación, agentes tóxicos o cancerígenos altamente contaminantes o bioacumulativos.

*Tabla 2. Clasificación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)*

| CLASIFICACIÓN                                  | ORIGEN                                                         | PRODUCTOS                                                                                                                                   | USO O DESTINO FINAL                    |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>A. Residuos potencialmente reciclables.</b> | Construcción o demolición.                                     | Concreto, cerámicos, asfalto, productos de mampostería, prefabricados de arcilla recocida, etcétera.                                        | Como agregado.                         |
| <b>B. Residuos de excavación.</b>              | Preparación del sitio y cimentación.                           | Suelo orgánico, suelos no contaminados, materiales arcillosos, granulares y pétreos naturales y otros materiales minerales no contaminados. | Como material de relleno y nivelación. |
| <b>C. Residuos sólidos.</b>                    | Preparación del sitio, cimentación, construcción y demolición. | Residuos orgánicos, cartón, papel, plástico, empaques, etcétera.                                                                            | Aprovechamiento o relleno sanitario.   |

Se mencionan como residuos peligrosos en la norma NMX-AA-164-SCFI-2013 los compuestos químicos de la Tabla 3.

*Tabla 3. Compuestos químicos considerados peligrosos en la norma NMX-AA-164-SCFI-2013*

| COMPUESTOS QUÍMICOS                      |                                                |
|------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Ácido acrílico                           | Ftalatos                                       |
| Arsénico                                 | Hidrocarburos aromáticos                       |
| Asbestos                                 | Mercurio                                       |
| Benceno                                  | Monómero de estireno                           |
| Cadmio                                   | Monómero metil metacrilato                     |
| Clorofluorocarbonos                      | Pentaclorofenol                                |
| Cloropreno (neopreno)                    | Plomo (añadido)                                |
| Cloruro de vinilo                        | Polietileno tratado con cloro y clorosulfonado |
| Creosota                                 | Retardantes halogenados                        |
| Etilbenceno                              | Thinner                                        |
| Fertilizantes y pesticidas petroquímicos | Tolueno                                        |
| Formaldehído (añadido)                   | Xileno                                         |

Dichos compuestos se pueden encontrar en solventes y aceites usados, filtros de aceite y combustible, líquido anticongelante, suelos contaminados con hidrocarburos, aerosoles que hayan contenido sustancias riesgosas y residuos de derrames de sustancias peligrosas.

Por disposiciones generales de la NADF-007-RNAT-2013 está prohibido descargar, depositar, o disponer los RCD en lugares distintos a los centros de acopio, centros de reciclaje o sitios de disposición final autorizados, es por ello que en la Tabla 4 se presenta la clasificación de los generadores de RCD.

*Tabla 4. Categoría y requerimientos ambientales de los generadores, prestadores de servicio de transporte, centros de reciclaje y sitios de disposición final autorizados para el manejo de los RCD*

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

### **2.1.2. Almacenamiento**

De acuerdo con la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-007-RNAT-2013 el almacenamiento de residuos únicamente debe ser temporal y conforme al volumen de generación el almacenamiento deberá llevarse a cabo conforme a lo indicado en la Tabla 5.

*Tabla 5. Almacenamiento de los RCD según volumen*

| CANTIDAD                | TIPO DE ALMACENAMIENTO                                       |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Hasta 7 m <sup>3</sup>  | Casas de materiales o centros de acopio públicos o privados. |
| Más de 7 m <sup>3</sup> | En el predio o centros de acopio públicos o privados.        |

En general, en las obras no se tiene destinado un lugar específico para almacenar los residuos de la construcción, comúnmente se aíslan en pilas sin ninguna protección, lo más alejado posible de las zonas transitadas o de trabajo, hasta que son transportados y en la mayoría de las ocasiones estos residuos no se separan adecuadamente.

Lo ideal para un correcto almacenamiento de los residuos de construcción, sería acondicionar un sitio dentro de la obra en donde se puedan recolectar de manera temporal, así como aislarlos para evitar contaminar el suelo, el agua y el aire, sobre todo los peligrosos y de manejo especial; en la Figura 2 se observa claramente un incorrecto almacenamiento de los residuos ya que además de estar obstruyendo el paso vehicular y contaminando el suelo se encuentran mezclados residuos de excavación, residuos de construcción y residuos maderables. Los RCD deben almacenarse en pilas, cubrirse e irrigarse hasta ser transportados en las mismas condiciones (Rojas-Valencia y Macías 2013).



*Figura 2. Residuos de Construcción almacenados incorrectamente*

*Fuente: Propia*

En la Figura 3 se observa como los residuos procedentes de los trabajos de remodelación de banquetas se encuentran mezclados, una correcta selección de los RCD generados en la obra sería separándolos en los que pueden ser reutilizados o reciclados.



*Figura 3. Residuos de construcción sin tratamiento de separación*

*Fuente: Propia*

Los residuos de pinturas o disolventes no deben mezclarse con los escombros, sino ser tratados como desechos especiales. Debe contarse también con un sitio para la acumulación y almacenamiento de sustancias hidrocarburadas, como combustibles, aceites y lubricantes, y aislarse con una geomembrana impermeable.

### **2.1.3. Recolección y transporte**

Si bien la mayor parte de los RCD generados en las obras pequeñas son retirados por vehículos de carga privados, poco más del 5%, son trasladados por los vehículos recolectores de residuos sólidos urbanos, y se estima que cerca del 10% de los residuos se disponen en suelo de conservación o la vía pública.

Para el caso de las obras públicas y privadas se estima que el 67% de sus residuos son transportados por vehículos de carga privados, sin embargo, tan solo el 20% se dispone en sitios autorizados y un 3% se recicla, disponiendo el resto para renivelación de terrenos, rellenos sanitarios y de manera inapropiada en suelos de conservación o vía pública (CMIC 2013).

Las medidas apropiadas que se deben de seguir para una correcta recolección y transporte es, que una vez entregados los residuos al transportista se debe asegurar, mediante notificaciones de entrega, a un sitio autorizado, ya sea a una planta de tratamiento o un relleno sanitario. En general, se deben usar camiones de carga acondicionados debido al alto peso de los RCD; éstos son similares a los que se usan para los residuos sólidos urbanos. Algunos se deben cubrir con una lona para evitar pérdidas de material, pero son escasos los que lo hacen. Los camiones recolectores deben llevar su contenido a los centros autorizados, y los constructores deben confirmar la recepción de los RCD en los espacios destinados (Rojas-Valencia y Macías 2013).

#### 2.1.4. Disposición final

El problema creado por los RCD se relaciona con el volumen necesario para acondicionarlos; dichos residuos ocupan mucho espacio. A la fecha existen por lo menos 12 sitios autorizados para la disposición de residuos de excavación y construcción.

Algunos son llevados a una planta de transferencia donde se depositan temporalmente y luego se transportan a instalaciones localizadas a grandes distancias. Entre ellos están los rellenos sanitarios (plantas de valoración), donde son depositadas, seleccionadas, clasificadas y valoradas las diferentes fracciones que contienen dichos residuos, con el objeto de obtener productos para su reciclaje (Rojas-Valencia y Macías 2013).

Posteriormente, son colocados en vertederos controlados por un período superior a un año, mientras que en los rellenos sanitarios se depositan en una infraestructura que reduce los efectos negativos al ambiente. Se verifica que sean sitios donde no exista vegetación, con capacidad suficiente para soportar la acumulación de material, que no sea un área de recarga acuífera ni un sitio vulnerable a accidentes naturales y que los apilamientos dispongan de accesos apropiados para el ingreso de maquinaria.

Sin embargo, en la mayoría de las ciudades de los países latinoamericanos los RCD son dispuestos clandestinamente en áreas rurales y urbanas como calles, avenidas, andadores y terrenos baldíos, lo que produce impactos negativos y pone en riesgo la integridad y seguridad de los habitantes y sus bienes.

#### 2.1.5. Residuos potencialmente reciclables

Los RCD están constituidos por una gran variedad de materiales producto de la construcción, demolición, desmantelamiento y/o excavación, tales como tabiques, materiales pétreos, tierra, concreto, morteros, madera, alambre, resina, plásticos, yeso, cal, cerámica, tejados, pisos y varillas, entre otros, cuya composición puede variar dependiendo de diversos factores como puede ser el tipo de proyecto, la obra y/o etapa de construcción, en la Tabla 6 se observa la clasificación de estos materiales producto de la construcción y el posible reúso que podrían tener (NADF-007-RNAT-2013).

*Tabla 6. Clasificación de los RCD potencialmente reciclables*

| TIPO DE RESIDUO DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN                                                                                                                                      | POSIBLE REÚSO                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>A. PROVENIENTES DE CONCRETOS HIDRÁULICOS Y MORTEROS</b>                                                                                                                           |                                                                                                                                             |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Elementos prefabricados</li><li>• Elementos estructurales y no estructurales</li><li>• Sobrantes de concreto en obra y premezclado</li></ul> | Bases Hidráulicas en caminos y estacionamientos.                                                                                            |
|                                                                                                                                                                                      | Concretos Hidráulicos para la construcción de firmes, ciclopistas, banquetas y guarniciones.                                                |
|                                                                                                                                                                                      | Elaboración de productos prefabricados (Blocks, tabiques, adocretos, adopastos, losetas, guarniciones, bordillos, postes de cemento-arena). |
|                                                                                                                                                                                      | Bases para ciclopistas, firmes, guarniciones y banquetas.                                                                                   |
|                                                                                                                                                                                      | Construcción de andadores y trotapistas.                                                                                                    |

*Tabla 6. Clasificación de los RCD potencialmente reciclables (continuación)*

| TIPO DE RESIDUO DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | POSIBLE REÚSO                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 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 capas. |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Material para conformación de terrenos.                                    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Rellenos en cimentaciones.                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Mobiliario urbano.                                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Construcción de muros divisorios.                                          |
| <b>B. MEZCLADOS</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                            |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Concretos hidráulicos</li> <li>• Morteros</li> <li>• Blocks</li> <li>• Tabicones</li> <li>• Adoquines</li> <li>• Tubos de albañal</li> <li>• Cerámicos</li> <li>• Mamposterías</li> <li>• Prefabricados de arcilla recocida (Tabiques, ladrillos, etc.)</li> <li>• Piedra braza</li> <li>• Agregados pétreos</li> </ul> | Sub-bases en caminos y estacionamientos.                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Construcción de terraplenes.                                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Cobertura y caminos interiores en rellenos sanitarios.                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Construcción de andadores y trotapistas.                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Bases para ciclistas, firmes, guarniciones y banquetas.                    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Material para lecho, acostillamiento de tuberías y relleno de cepas.       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Construcción de pedraplenes.                                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Material para la conformación de terrenos.                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Relleno en jardineras.                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Rellenos en cimentaciones.                                                 |
| <b>C. PROVENIENTES DE FRESADO DE CONCRETO ASFÁLTICO</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                            |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Carpeta asfáltica</li> <li>• Bases negras</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                    | Bases asfálticas o negras.                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Concretos asfálticos elaborados en caliente.                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Concretos asfálticos templados o tibios.                                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Concretos asfálticos elaborados en frío.                                   |
| <b>D. RESIDUOS DE EXCAVACIÓN</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                            |
| Suelos no contaminados y materiales arcillosos, granulares y pétreos naturales en ellos.                                                                                                                                                                                                                                                                         | Deberán privilegiarse su separación para facilitar el reúso y reciclaje.   |
| <b>E. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                            |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Papel y cartón</li> <li>• Madera</li> <li>• Metales</li> <li>• Plástico</li> <li>• Residuos de podas, tala y jardinería</li> <li>• Vidrio</li> </ul>                                                                                                                                                                    | Deberá privilegiarse su separación para facilitar el reúso y reciclaje.    |
| <b>F. OTROS</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                            |
| Residuos de impermeabilizantes, tabla roca, instalaciones eléctricas, asbesto, tubería, herrería, lodos bentoníticos.                                                                                                                                                                                                                                            | Deberá privilegiarse su reciclaje.                                         |

Existen algunos residuos que no se consideran en la NADF-007-RNAT-2013, y que se visualizan con potencial para ser reciclados, como la madera, los metales férreos y los suelos contaminados. Los metales y la madera son los materiales que se consideran con mayor potencial de reciclaje.

En general, los residuos de madera se encuentran contaminados con pintura o material de aislamiento; los que están limpios, se trituran para hacer conglomerados o inclusive pueden usarse como combustible, materia prima para la industria papelera, composta, mejoramiento de suelos, lechos para animales, etcétera (Rojas-Valencia y Macías 2013).

Los metales férreos, como varillas o perfiles de acero, se pueden separar manualmente o magnéticamente y se pueden fundir para crear nuevos elementos que conservarán casi todas sus propiedades.

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

## **2.2. Reciclaje de los residuos de la construcción y demolición**

Un programa de reciclaje requiere la evaluación económica y técnica del potencial de los materiales, y considerar el posible uso de los rellenos sanitarios como apoyo, parcial o total, de la solución a los residuos de la construcción y que incluya los siguientes puntos (Rojas-Valencia y Macías 2013).

- Identificación de materiales aprovechables y su valor.
- Maquinaria, equipo y mano de obra para su selección, recolección y transporte.
- Colocación en el mercado, participación del sector de la industria de la construcción, de la comunidad y de las autoridades competentes.

No todos los materiales producto de la construcción pueden ser reciclables o reutilizables, sin embargo, aquellos que pueden serlo se deben usar en elementos no estructurales.

Algunos materiales producto de demoliciones se pueden reciclar para elaborar nuevas mezclas en obras de pavimentación y mantenimiento de vías, como se indica en la legislación; por ejemplo, las piezas de concreto pueden ser procesadas mediante la remoción de los metales y tamizadas para ser agregadas en mezclas asfálticas y como sustitutos de la grava en nuevos concretos (Rojas-Valencia y Macías 2013).

### **2.2.1. México y el reciclaje de los residuos de la construcción y demolición**

Algunas entidades federativas han implementado para el manejo de los RCD, padrones de prestadores de servicios, que incluyen la recolección y el transporte de dichos residuos y en algunos casos centros de acopio, transferencia e incluso sitios de disposición final.

No obstante, lo anterior, la gestión en materia de RCD presenta serias deficiencias, pues son pocas las entidades que cuentan con infraestructura para proporcionar un manejo adecuado a los RCD que se generan en cada demarcación.

A partir de agosto de 2013, en el país están obligados los constructores a cumplir con la formulación de un plan de manejo de residuos de construcción y demolición (RCD)

conforme a la norma NOM-161-SEMARNAT-2011, la cual establece que los residuos de construcción se clasifican como residuos de manejo especial, lo que obliga a realizar acciones para su reutilización y reciclaje o, en su caso, la correcta disposición (Ossa y García 2015).

En el año 2004 inicia sus actividades la primera planta en América Latina dedicada a la recepción, reciclaje y venta de los Residuos de la Construcción, llamada Concretos Reciclados, ubicada en el cerro "Yehualique" de la sierra Santa Catarina, en la delegación Iztapalapa, de la Ciudad de México. Dicha planta cuenta con una superficie de 16 hectáreas y tiene una capacidad de operación de 1000 toneladas al día por equipo; por otro lado, cuenta con una capacidad total de almacenaje de 3 000 000 toneladas de residuos reciclados (Aquino 2015).

El procedimiento de manejo de estos residuos en la planta de reciclaje y algunas de sus características de operatividad, se describen 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, textiles, vidrio, envases y demás materiales indeseables 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 con 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 se muestra en la Tabla 7.

**Tabla 7. Granulometrías suministradas por "Concretos Reciclados"**

|                                             |
|---------------------------------------------|
| Material de 3"                              |
| Material de 3" a finos                      |
| Material de 1 1/2" a finos                  |
| Material 1"                                 |
| Material 3/8"                               |
| Material de 1/4" a finos o arena reciclada: |
| a. Solo cementantes                         |
| b. Todo en uno                              |

Debido a la demanda de reducción de costos y a ciertas calidades de materiales, aún no es una práctica común el reciclaje de los RCD. Sin embargo, en la legislación actual se exige

como medida obligatoria que se recicle por lo menos 30% de los residuos clasificados como potencialmente reciclables, con incremento anual de 15% hasta llegar a 100%. Además de que se valoren los residuos sólidos y se sustituya al menos 25% de la materia prima virgen por materiales reciclados, como sub-bases en caminos y estacionamientos, carpetas asfálticas para vialidades secundarias, construcción de terraplenes, cubierta en rellenos sanitarios, construcción de andadores o ciclopistas, bases de guarniciones, banquetas, rellenos y pedraplenes (Rojas-Valencia y Macías 2013), en la Figura 4 se observan algunos ejemplos del aprovechamiento de RCD.



*Figura 4. Aprovechamiento de RCD en diferentes proyectos*

*Fuente: <http://www.concretosreciclados.com.mx/>*

### **2.2.2. Los residuos de la construcción y demolición a nivel internacional**

La generación de residuos de la construcción y demolición a nivel internacional ha ido en aumento durante las últimas décadas, por lo que ha ocasionado un problema ambiental a consecuencia de su vertido incontrolado (Ossa y García 2015). Sin embargo, en la mayoría de países de la Unión Europea (UE) como Alemania, Holanda, España, Dinamarca, entre otros, tras años de llevar a cabo actividades recicladoras gracias a la formulación de objetivos políticos, a una legislación y control apropiados, se ha alcanzado altos niveles de reciclado y siempre crecientes, pues han tenido un gran impulso día a día.

El Informe Symonds de 1990 fue el primer informe que estableció una visión general sobre los RCD en la UE. Desde la publicación de dicho informe a la actualidad, se han ido actualizando las estadísticas que proporcionan información generalizada sobre la generación y composición de los RCD en los países miembros de la UE (Villoria 2014).

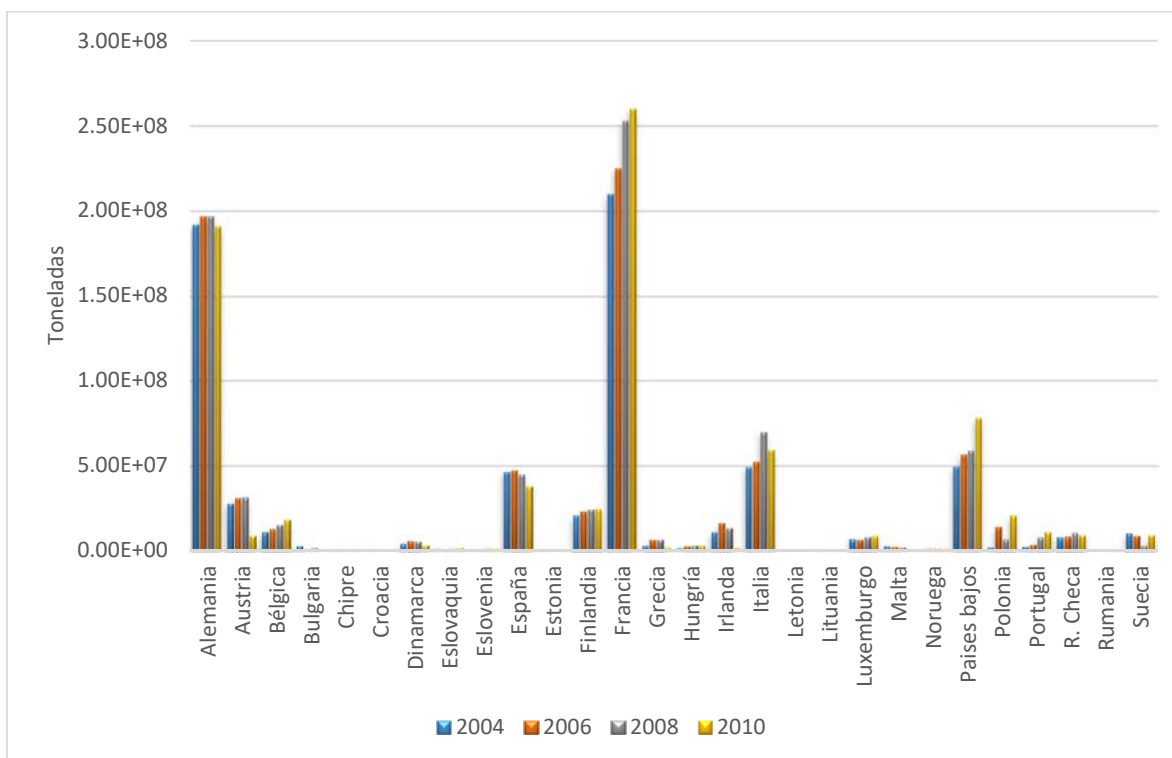
Existen discrepancias entre los distintos países en cuanto a las definiciones, categorías o incluso alternativas de gestión, por lo que se establece una base común para la toma de datos y su posterior análisis. Es por ello que, desde el año 2009 el Comité de Adaptación

Técnica (Technical Adaptation Committee) ha concretado reuniones en diversas ocasiones para sentar bases con el objetivo de obtener datos más precisos y comparables entre los Estados Miembros (Monier et al. 2011).

Sin embargo, el centro de estadística europeo (Eurostat) proporciona información únicamente para ciertos países, sobre la generación y composición de los RCD, en la Tabla 8 se muestra la cantidad en toneladas de los RCD generados por países de la UE durante los años 2004 2006, 2008 y 2010. En la Figura 5 se observa que países como Francia, Alemania, Países Bajos, España e Italia son países que presentan la mayor cantidad de generación de residuos de la construcción y demolición.

*Tabla 8. Generación de RCD en países de la Unión Europea*

| <b>País</b>       | <b>2004</b> | <b>2006</b> | <b>2008</b> | <b>2010</b> | <b>País</b>         | <b>2004</b> | <b>2006</b> | <b>2008</b> | <b>2010</b> |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Alemania</b>   | 1.92E+08    | 1.97E+08    | 1.97E+08    | 1.91E+08    | <b>Hungría</b>      | 1.74E+06    | 3.05E+06    | 3.24E+06    | 3.07E+06    |
| <b>Austria</b>    | 2.79E+07    | 3.13E+07    | 3.14E+07    | 9.01E+06    | <b>Irlanda</b>      | 1.13E+07    | 1.66E+07    | 1.35E+07    | 1.61E+06    |
| <b>Bélgica</b>    | 1.10E+07    | 1.31E+07    | 1.54E+07    | 1.82E+07    | <b>Italia</b>       | 4.92E+07    | 5.23E+07    | 6.97E+07    | 5.93E+07    |
| <b>Bulgaria</b>   | 3.00E+06    | 1.02E+06    | 1.83E+06    | 7.89E+04    | <b>Letonia</b>      | 8.42E+03    | 1.93E+04    | 1.20E+04    | 2.16E+04    |
| <b>Chipre</b>     | 4.88E+05    | 2.98E+05    | 4.31E+05    | 1.07E+06    | <b>Lituania</b>     | 3.57E+05    | 3.49E+05    | 4.12E+05    | 3.57E+05    |
| <b>Croacia</b>    | 6.46E+05    | -           | 1.29E+05    | 7.66E+03    | <b>Luxemburgo</b>   | 6.98E+06    | 6.77E+06    | 8.28E+06    | 8.73E+06    |
| <b>Dinamarca</b>  | 4.27E+06    | 5.80E+06    | 5.67E+06    | 3.18E+06    | <b>Malta</b>        | 2.81E+06    | 2.49E+06    | 2.03E+06    | 9.89E+05    |
| <b>Eslovaquia</b> | 1.40E+06    | 9.16E+05    | 1.30E+06    | 1.79E+06    | <b>Noruega</b>      | 1.10E+06    | 1.25E+06    | 1.50E+06    | 1.54E+06    |
| <b>Eslovenia</b>  | 9.08E+05    | 9.95E+05    | 1.38E+06    | 1.51E+06    | <b>Países bajos</b> | 4.96E+07    | 5.67E+07    | 5.89E+07    | 7.81E+07    |
| <b>España</b>     | 4.63E+07    | 4.73E+07    | 4.49E+07    | 3.79E+07    | <b>Polonia</b>      | 1.99E+06    | 1.41E+07    | 6.93E+06    | 2.08E+07    |
| <b>Estonia</b>    | 4.89E+05    | 7.17E+05    | 1.10E+06    | 4.36E+05    | <b>Portugal</b>     | 2.63E+06    | 3.61E+06    | 8.08E+06    | 1.11E+07    |
| <b>Finlandia</b>  | 2.08E+07    | 2.31E+07    | 2.45E+07    | 2.46E+07    | <b>R. Checa</b>     | 8.13E+06    | 8.38E+06    | 1.07E+07    | 9.35E+06    |
| <b>Francia</b>    | 2.10E+08    | 2.25E+08    | 2.53E+08    | 2.60E+08    | <b>Rumania</b>      | 9.14E+04    | 3.37E+04    | 3.18E+05    | 2.83E+05    |
| <b>Grecia</b>     | 3.32E+06    | 6.83E+06    | 6.83E+06    | 2.09E+06    | <b>Suecia</b>       | 1.03E+07    | 8.94E+06    | 3.31E+06    | 9.38E+06    |

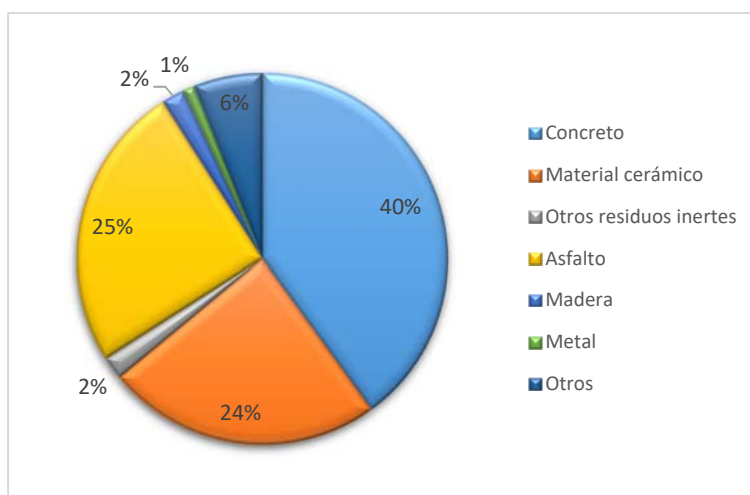


**Figura 5. Variación de la generación de RCD entre países de la UE (2004-2010)**

**Fuente:** Elaboración propia con datos de European Commission, 2013.

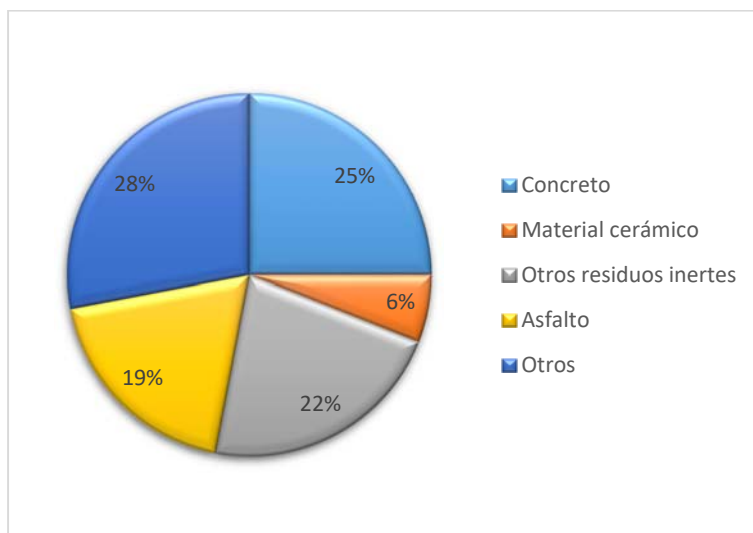
En algunos países de Europa se han realizado informes acerca de la composición del flujo de sus RCD, sin embargo, dicha información no es consecuente y se basa en encuestas limitadas en el tiempo. Pese a ello, a continuación, se muestra la composición de los RCD en algunos países de la UE.

En Países Bajos predominan los residuos de concreto, seguido de los residuos de asfalto y materiales cerámicos, como se muestra en la Figura 6.



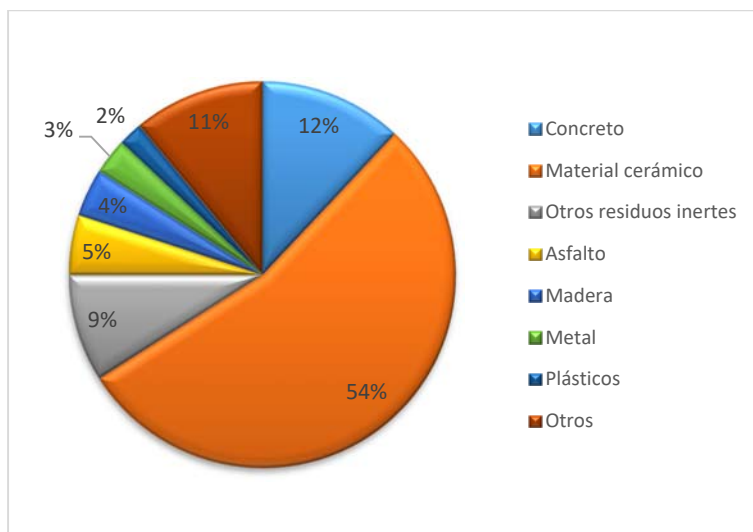
**Figura 6. Composición de RCD en Países Bajos 2001**

En Dinamarca se ha presentado una distribución regular de los RCD en la cual los residuos de concreto, residuos inertes y residuos de asfalto presentan porcentajes muy similares como se muestra en la Figura 7.



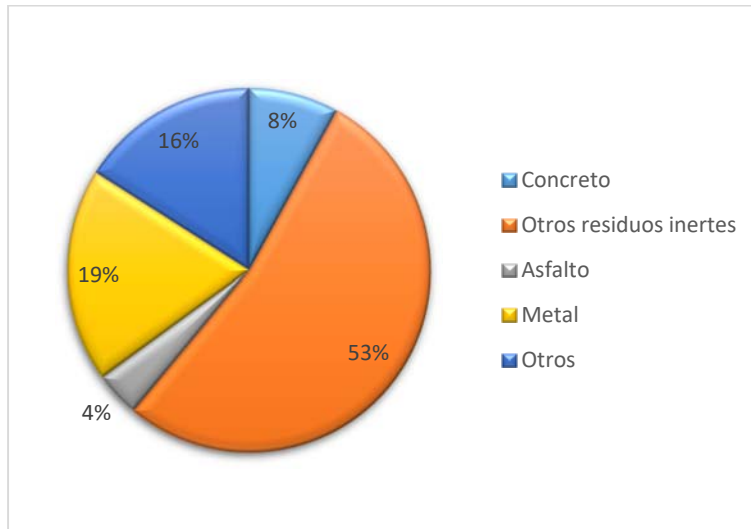
**Figura 7. Composición de RCD en Dinamarca 2003**

La composición de RCD en España ha presentado una extensa variedad en cuanto a la clasificación, se generan residuos de concreto, metales, madera, plásticos, asfalto, residuos inertes y materiales cerámicos, siendo éste último el que predomina en la composición (Figura 8).



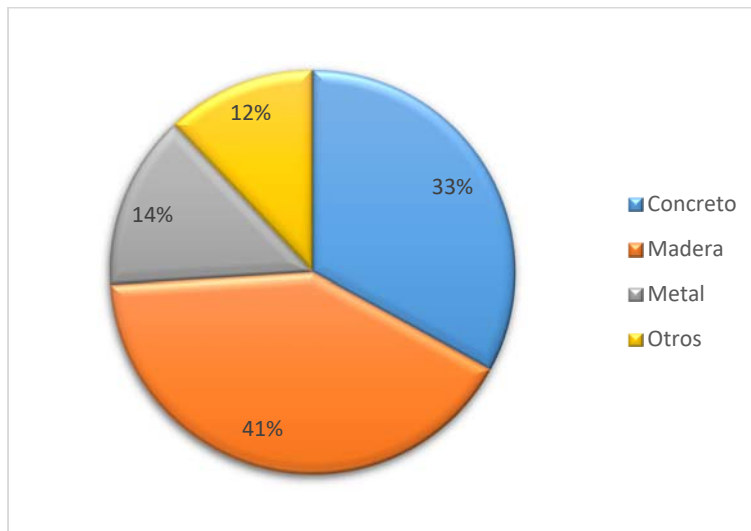
**Figura 8. Composición de RCD en España 2005**

En la composición de RCD en Estonia predominan los residuos inertes, con más de la mitad del total de generación, y residuos como el concreto y asfalto que se han generado en grandes cantidades en otros países cuentan con muy poca participación, con el 8% y 4% respectivamente como se observa en la Figura 9.



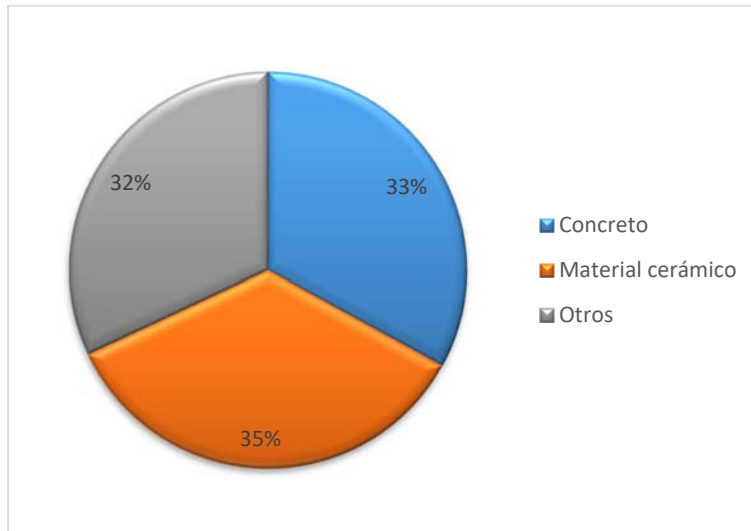
**Figura 9. Composición de RCD en Estonia 2006**

En Finlandia los residuos de madera son los que predominan en la composición de RCD, en conjunto con los residuos de concreto abarcan aproximadamente dos terceras partes del total de generación con un 41% y 33% respectivamente (Figura 10).



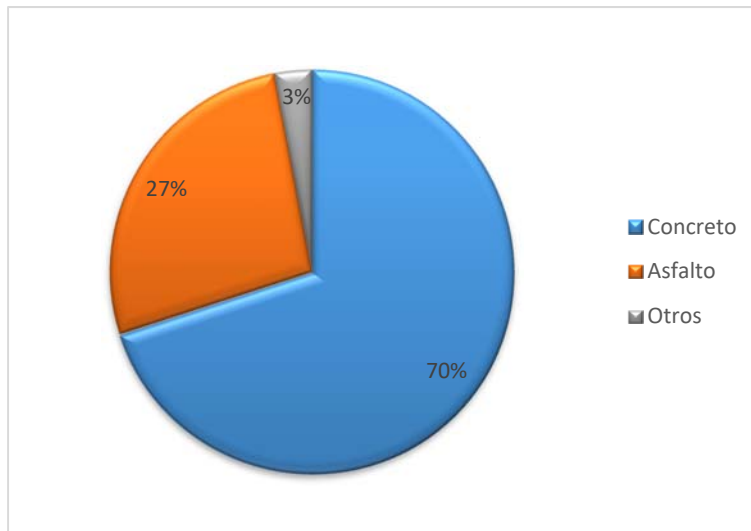
**Figura 10. Composición de RCD en Finlandia 2006**

La diversificación de la composición de RCD en República Checa es escasa, ya que se resume únicamente a residuos de concreto, materiales cerámicos y otros, los cuales tienen una participación casi equitativa en el total de la generación de RCD, lo cual se muestra en la Figura 11.



**Figura 11. Composición de RCD en República Checa 2006**

En Alemania, al igual que en República Checa la diversificación de la composición de RCD se resume únicamente en tres rubros los cuales corresponden a residuos de concreto, asfalto y a otros residuos, sin embargo, en Alemania la participación de cada una de las clasificaciones es distinta pues, en este país los residuos de concreto y asfalto son los que abarcan más del 95% del total de la generación (Figura 12).



**Figura 12. Composición de RCD en Alemania 2007**

Es evidente que la generación y composición de RCD varían significativamente de un país a otro, esa diferencia ha sido discutida en varios estudios, con los cuales han llegado a la conclusión de que esa discrepancia de datos se debe a los siguientes factores (Villoria 2014):

- Las diferencias en la tradición constructiva de cada país.
- La mala calidad de los datos disponibles. Hay grandes variaciones en la calidad de los datos y años de referencia.

- La falta de control y registro de los RCD generados en cada país.
- La falta de criterios específicos que permitan obtener un registro uniforme de RCD generado en cada país.
- La falta de homogenización de las definiciones referentes a RCD.

Alemania es de los países de la UE con mayor control de la gestión de residuos de construcción y demolición gracias a la implementación de las leyes federales, leyes de los gobiernos regionales, estatutos de los servicios de gestión de residuos, políticas ambientales y legislación para la gestión de RCD.

La estimación de generación anual de residuos de construcción y demolición en Alemania (2004) asciende a los 200 millones de toneladas, de los cuales se componen principalmente de material producto de la excavación, los resultantes de procesos constructivos y escombros producto de la demolición (CMIC 2014). En la Tabla 9 se muestra la composición de los principales RCD y su porcentaje de reciclaje en el año 2004, el reciclaje se efectuó principalmente en residuos provenientes de la demolición, siendo estos los que en mayor incidencia se generan, se observa también que la cantidad total de RCD que se reciclan se aproxima al 30%.

*Tabla 9. Composición de residuos y reciclaje en Alemania, 2004*

| TIPO DE RESIDUOS                  | GENERACIÓN TOTAL DE RCD |      | CANTIDAD DE RESIDUOS RECICLADOS |
|-----------------------------------|-------------------------|------|---------------------------------|
|                                   | Millones de toneladas   | %    | Millones de toneladas           |
| <b>Residuos de demolición.</b>    | 50.5                    | 25.2 | 31.1                            |
| <b>Escarificación de caminos.</b> | 19.7                    | 9.8  | 18.4                            |
| <b>Residuos de construcción.</b>  | 1.9                     | 0.9  | 0.1                             |
| <b>Cemento.</b>                   | 0.3                     | 0.2  | -                               |
| <b>Total (sin excavación).</b>    | 72.4                    | 36.1 | 49.6                            |
| <b>Residuos de excavación.</b>    | 128.3                   | 63.9 | 9.1                             |
| <b>Total</b>                      | 200.7                   | 100  | 58.7                            |

En 2008 en Alemania la mayoría de los residuos recuperados fueron dispuestos para reuso, logrando evitar el consumo de gran cantidad de energía en los diferentes procesos de transformación y para su disposición final la mayor parte de los residuos fueron enviados a tiraderos y solo una pequeña parte de éstos se incineraron (Tabla 10).

*Tabla 10. Equilibrio de residuos de 2008 en Alemania*

|                              |                           | <b>RCD<br/>(millones de toneladas)</b> | <b>RESIDUOS PELIGROSOS<br/>(millones de toneladas)</b> | <b>RESIDUOS NO PELIGROSOS<br/>(millones de toneladas)</b> |
|------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>Total</b>                 |                           | 200.52                                 | 8.49                                                   | 192.03                                                    |
| <b>Eliminación.</b>          |                           | 24.02                                  | 3.71                                                   | 20.31                                                     |
| <b>En/como</b>               | Tiradero.                 | 22.58                                  | 2.67                                                   | 19.91                                                     |
|                              | Proceso para eliminación. | 1.29                                   | 0.99                                                   | 0.3                                                       |
|                              | Incineración.             | 0.15                                   | 0.05                                                   | 0.1                                                       |
| <b>Recuperación.</b>         |                           | 176.49                                 | 4.78                                                   | 171.72                                                    |
| <b>De/como</b>               | Proceso para reuso.       | 175.67                                 | 4.58                                                   | 171.09                                                    |
|                              | Recuperación de energía.  | 0.82                                   | 0.2                                                    | 0.62                                                      |
| <b>Tasa de recuperación.</b> |                           | 88%                                    | 56%                                                    | 89%                                                       |

Se estima que en Costa Rica se producen aproximadamente 1800 toneladas diarias de residuos de construcción y demolición. La generación de estos residuos resulta de las actividades de desmonte, excavaciones, demoliciones, levantamiento de estructuras y obra negra, instalaciones, acabados, limpieza en áreas de trabajo y almacenamiento que conforman el proceso constructivo (Morales et al. 2011).

Dichos residuos están constituidos principalmente, por residuos de concreto, asfalto, bloques, arenas, gravas, ladrillo, tierra y barro, representando un 50% o más, el 20-30% suele ser madera y productos afines, como formaletas, marcos y tablas, y el restante 20-30% de residuos son misceláneos, como metales, vidrios, asbestos, materiales de aislamiento, tuberías, aluminio y partes eléctricas, en la Tabla 11 se observan los porcentajes de la composición de estos residuos.

*Tabla 11. Composición de los residuos de construcción en Costa Rica*

| <b>MATERIAL</b>                                            | <b>PORCENTAJE (%)</b> |
|------------------------------------------------------------|-----------------------|
| <b>Tierra contaminada (mezclada con otros materiales).</b> | 40                    |
| <b>Rebasas de concreto.</b>                                | 20                    |
| <b>Sobranes de concreto.</b>                               | 5                     |
| <b>Ladrillos (pedazos pequeños).</b>                       | 25                    |
| <b>Pedazos de bloque.</b>                                  | 5                     |
| <b>Otros.</b>                                              | 5                     |

La estimación de la generación anual de los residuos se presenta a continuación en la Tabla 12:

*Tabla 12. Generación anual de los residuos de construcción en Costa Rica*

| <b>TIPO DE RESIDUO</b>                       | <b>TONELADAS/DÍA</b> |
|----------------------------------------------|----------------------|
| <b>Escombros.</b>                            | 660                  |
| <b>Madera.</b>                               | 660                  |
| <b>Otros residuos de la construcción.</b>    | 474                  |
| <b>Total de residuos de la construcción.</b> | 1794                 |

En Estados Unidos el método de tratamiento más común de los residuos de construcción era verterlos en tiraderos a cielo abierto, esto no cambia sino hasta 1970 con la creación de la “*Environmental Protection Agency*” (EPA, por sus siglas en inglés), y su desarrollo de criterios estrictos para la construcción y mantenimiento de rellenos sanitarios.

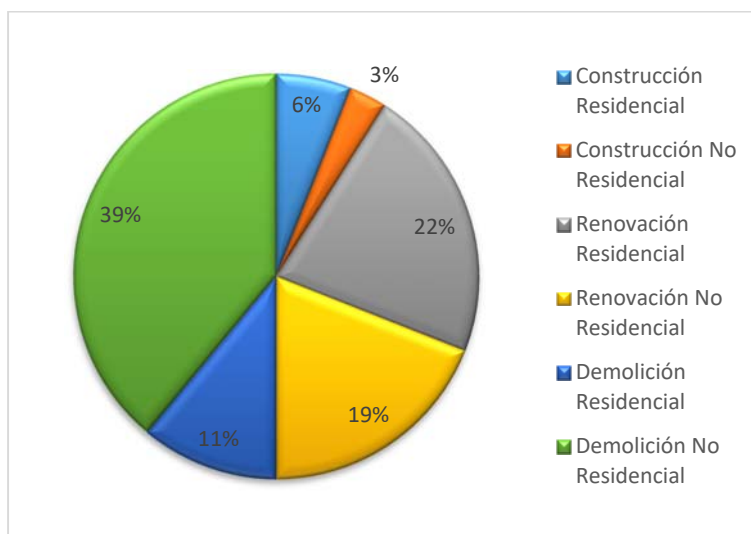
La Ley de Conservación y Recuperación de Recursos de 1976, obligó al cierre de tiraderos a cielo abierto en todo Estados Unidos y desarrolló la regulación que dicta las normas mínimas para la construcción y mantenimiento de rellenos sanitarios. El cierre de estos sitios en todo el país sumado al costo de construcción de rellenos sanitarios diseñados, aumentó significativamente los costos de eliminación de los residuos sólidos urbanos, así como el costo por disposición de los residuos de construcción, es por ello que el reciclaje de éstos se convirtió en una opción económicamente viable.

En 1996 se recuperó aproximadamente el 23% de los RCD para su reutilización o reciclaje, debido a que la mayor parte era tierra para relleno, y de acuerdo a datos de la EPA se estima que en 2003 se recuperó el 48%, haciéndose notorio el crecimiento de este país en cuestión a la reutilización y reciclaje de los RCD.

En 2003 la EPA estimó que los RCD ascendían aproximadamente a 170 millones de toneladas, esta generación corresponde a los sectores indicados en la Tabla 13 y se realiza el desglose correspondiente en la Figura 13.

**Tabla 13. Generación de RCD en Estados Unidos**

|                                 | Millones de toneladas. | Porcentaje (%). |
|---------------------------------|------------------------|-----------------|
| <b>Construcción.</b>            | 15                     | 9               |
| <b>Renovaciones.</b>            | 71                     | 42              |
| <b>Demolición de edificios.</b> | 84                     | 49              |
| <b>Total.</b>                   | 170                    | 100             |



**Figura 13. Desglose de RCD en Estados Unidos**

**Fuente: Elaboración propia con datos de la CMIC, 2014.**

## 2.3. Marco jurídico

Dentro de las estrategias que se tienen para seguir un manejo integral de los residuos de construcción, existen leyes, reglamentos y normas cuyo objetivo es regular el sistema de almacenamiento, recolección, transporte, reutilización, reciclaje y disposición final de los RCD generados en México, los cuales se pueden observar en la Tabla 14.

*Tabla 14. Legislación Mexicana*

| <b>INSTRUMENTO REGULATORIO</b>                                                                      | <b>REGULA CON RESPECTO A LOS RCD</b>                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ley General del Equilibrio Ecológico y de la Protección al Ambiente (LGEEPA)</b>                 | El estado posee la facultad de regular la gestión de los residuos de manejo especial.                                                                                                                                                        |
| <b>Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)</b>                   | Define a los RCD y responsabiliza a las entidades federativas y municipales la gestión de los residuos sólidos urbanos y los residuos de la construcción y demolición, y establece medidas para la regulación de la contaminación del suelo. |
| <b>Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (RLGPGIR)</b> | Regula los planes de manejo al promover la reutilización y el reciclaje de los RCD.                                                                                                                                                          |
| <b>Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal (LRSDF)</b>                                         | Establece que los RCD se deben separar de acuerdo con su clasificación con fines de valoración.                                                                                                                                              |
| <b>Reglamento de Construcción para el Distrito Federal (RCDF)</b>                                   | Enumera el manejo de los RCD dentro de la obra y las licencias de demolición.                                                                                                                                                                |
| <b>Norma Ambiental para el Distrito Federal (NADF-007-RNAT)</b>                                     | Clasifica los RCD y obliga a reciclar una porción de ellos y utilizar materiales reciclados.                                                                                                                                                 |
| <b>Norma Mexicana (PROY-NMX-AA-164-SCFI-2013)</b>                                                   | Establece los materiales peligrosos que podrán estar incluidos en los RCD.                                                                                                                                                                   |

## 2.4. La construcción sustentable

La palabra “*Sustentabilidad*” está formada con raíces latinas y significa “*Cualidad de poder sustentar, que no daña el ambiente*”. Sus componentes léxicos son: *sutentare* (sustentar), *-bili-* (que puede), más el sufijo *-dad* (cualidad). El concepto sustentable suele utilizarse como sinónimo de sostenible en el ámbito de la ecología. Un proceso sustentable o sostenible es aquel que puede mantenerse en el tiempo por sí mismo, sin ayuda exterior y sin que se produzca la escasez de los recursos existentes.

El término sustentable se usa en la normativa y literatura mexicana y el término sostenible es usado en documentos oficiales de la Organización de las Naciones Unidas (ONU). El concepto de Desarrollo Sostenible fue descrito en 1987 en el Informe de la Comisión de Brundtland (resultado de los trabajos de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas, creada en 1983) como un “desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades”.

Existen cuatro dimensiones del Desarrollo Sostenible: la sociedad, el ambiente, la cultura y la economía, es un paradigma de un futuro en donde las consideraciones ambientales, sociales y económicas estén equilibradas en la búsqueda de una mejor calidad de vida.

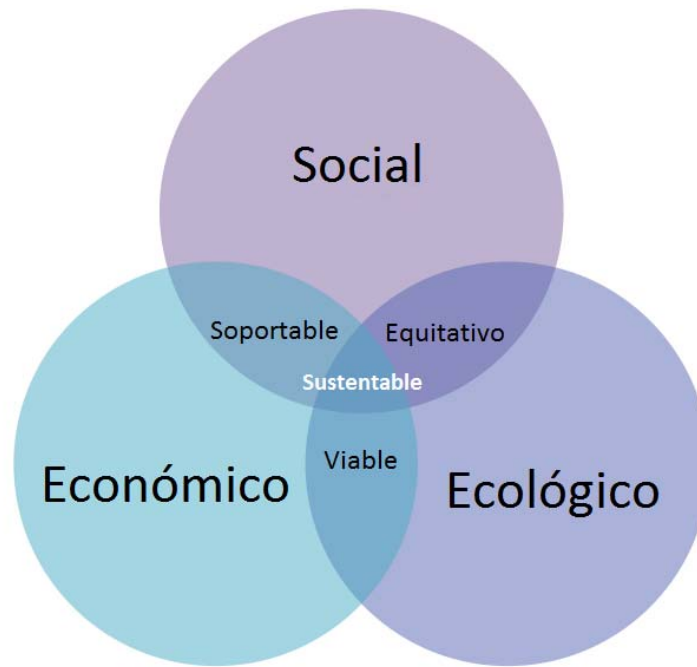
Según la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-007-RNAT-2013 desarrollo sustentable se define como el proceso evaluable mediante criterios e indicadores de carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de conservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras.

Al respecto, la construcción sustentable es aquella que satisface las necesidades de sus ocupantes, en cualquier momento y lugar, sin poner en riesgo 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 (Aquino 2015). Una definición concreta de Construcción Sustentable es “la utilización de prácticas y materiales respetuosos del medio ambiente (con ventaja ambiental o ambientalmente preferibles) en la planeación, diseño, ubicación, construcción, operación y demolición de inmuebles preexistentes como a la construcción de nuevos edificios, sean habitacionales o comerciales, públicos o privados” (Morillón 2011).

Para cumplir con estos requisitos, se lleva a cabo la planeación y diseño integral, así como el uso de nuevas tecnologías y prácticas que beneficien al medio ambiente, disminuyendo los consumos de energía, agua y recursos naturales, así como reduciendo las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI); de igual manera busca reducir los RCD producidos, y ayudar a mejorar la calidad de vida, salud y el bienestar humano.

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 14 se muestra la interrelación entre estos conceptos y 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 14. Interrelación de los pilares básicos del desarrollo sustentable*

*Fuente: Ibarra, 2010.*

En los últimos años, tanto la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) 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).

A nivel nacional, la norma NMX-AA-164-SCFI-2013 se encuentra en vigor en materia de edificación sustentable, es 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 base los siguientes objetivos (Aquino 2015):

- Suelo: 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 el 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 al modo 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, 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 manera voluntaria a los representantes de las edificaciones.

#### **2.4.1. Materiales utilizados en la construcción fabricados a base de productos reciclados**

En la actualidad, la industria de la construcción ha desarrollado tanto materiales que contengan un porcentaje de productos reciclados como materiales elaborados cien por ciento a base de productos reciclados.

El interés de la industria de la construcción por desarrollar e implementar el uso de dichos materiales se basa principalmente en el cuidado del ambiente y en la mitigación del daño que se ha causado al mismo, sin dejar de mencionar que se podría obtener un beneficio económico, pues, en muchos casos los materiales fabricados a base de productos reciclados tienen un costo menor que los materiales fabricados con materias primas.

A continuación, se presentan algunos ejemplos de los materiales que podemos encontrar en el mercado, los cuales son resultado de la manufactura con productos reciclados o a base de residuos.

### Tablero de polietileno reciclado prensado

Es un tablero que tiene alta resistencia mecánica y completamente impermeable al agua. Es ideal para aplicaciones en baños, cajas de bañera, revestimientos de paredes, decoración y mobiliario (Figura 15).



*Figura 15. Tablero de polietileno reciclado prensado (Taplast)*

*Fuente: [www.construible.es/productos/taplast](http://www.construible.es/productos/taplast)*

### Aluminio reciclado

Conformado 100% por aluminio, sus propiedades químicas no se alteran. Fundido y preparado para su implementación en estructuras de ventanas y puertas, y en otras estructuras como cubiertas para grandes superficies.

### Madera

La madera recuperada es triturada y convertida en tableros de aglomerado para que vuelvan a ser consumibles (Figura 16). Los tableros de fibras y los de partículas, son derivados de la madera que surgen como consecuencia de su aprovechamiento integral.

La gran ventaja en el uso de tableros aglomerados tiene relación con su estabilidad y consistencia uniforme en su composición. En la construcción, los tableros aglomerados se utilizan principalmente en tabiquería interior, siendo una óptima solución para espacios interiores en general (Figura 17), ya sea en viviendas, espacios de plantas libres, locales comerciales, etc.

Algunos ejemplos de dichos tableros son los siguientes:

- **Panel:** es un tablero grueso de partículas de madera unidas entre sí mediante un adhesivo ureico. Se caracteriza por una baja densidad, un mayor espesor y su variedad de formatos. Está especialmente diseñado para ser aplicado como tabique

o elemento de división auto soportante para zonas no expuestas a la humedad, aislante acústico y resistente al fuego.

- **Placa maciza:** en construcción, la placa maciza en general es recomendada como revestimiento de tabiques, muros y pisos de zonas no expuestas a la humedad, como también en instalaciones comerciales, utilería y escenografías.



*Figura 16. Tablero de madera reciclada*

*Fuente: <http://www.byggmakker.no/produkter>*



*Figura 17. Tablero de madera reciclada usado como muro divisorio*

*Fuente: <http://www.archiexpo.es/prod/kronofrance>*

## Concreto con vidrio reciclado

En este tipo de concreto se agrega vidrio molido como remplazo de la arena o de grava pequeña. El vidrio molido es más ligero que la arena o la grava, así que el concreto pesa menos por m<sup>2</sup> sin perder su resistencia. Realizar este cambio también reduce la necesidad de dañar los paisajes para tener más bancos de arena y grava.

## Dexterra

Este material se consigue con agregados decorativos mezclados con aglutinante de cemento, para finalmente pulirse con equipos industriales (Figura 18). El material que se añade es principalmente vidrio reciclado; luego todo este material reciclado es lavado, triturado y mezclado con un compuesto patentado de cemento aglutinante, puzolanas, arena y fibra.



*Figura 18. Lavabo fabricado con DEXTERRA*

*Fuente: <http://dexindustries.com/portfolio/residential/master-bath-torpedo-sink-dexterra-finish>*

## NakedBoard

Es un panel realizado 100% con material reciclado, principalmente papel. Este material tiene un aspecto tal, que salta a vista que se trata de un producto reciclado, y es que la materia prima está triturada y comprimida, dando como resultado un panel duradero y resistente a la humedad, siempre y cuando se vea expuesto por periodos cortos de tiempo. No está diseñado para aplicaciones estructurales, en la Figura 19 se observan paneles de NakedBoard utilizados como división de espacios.



*Figura 19. Paneles NakedBoard utilizados para división de espacios*

*Fuente: <http://www.rewallsolutions.com/interiorwallboard/>*

### **NyloSheet**

Material de construcción que está compuesto en un 100% de material reciclado procedente de alfombras, y resinas libres de COV (compuestos orgánicos volátiles). Puede utilizarse con toda confianza para revestimientos ya que es impermeable, resistente al moho y a las termitas.

### **Adoquines de material reciclado**

Fabricados a partir de residuos de neumáticos y de plásticos reciclados y además en un porcentaje muy alto, el 95%. Es bastante resistente, sobre todo para tráfico peatonal y vehículos de bajo volumen, pero a diferencia de los de concreto, no absorben agua ni se agrietan con las heladas, por eso están garantizados de por vida (para uso residencial). Otra de las ventajas que tienen es que es un 30% más ligero que los de concreto.

### **Ladrillo vidriado**

Es un tipo de azulejo que tiene las proporciones de un aplacado de ladrillo (Figura 20), con acabado vidriado, con el aliciente de que está fabricado con un 30-100% de contenido reciclado, barniz de plomo, y libre de compuestos orgánicos volátiles (COV).

Es utilizado para el revestimiento de paramentos de interior y exterior, siendo muy adecuado tanto para edificios comerciales como residenciales.



*Figura 20. Ladrillo vidriado*

*Fuente: <http://blog.is-arquitectura.es/2012/04/27/ladrillo-vidriado-y-ecologico-de-fireclaytile/#prettyPhoto>*

### **Bio-Glass**

Es un material moderno hecho en su totalidad con vidrio reciclado, calentado y aglomerado bajo presión, sin aglutinantes, colorantes, cargas u otras mezclas. Es un material sin poros, inerte y se presenta tanto con superficie lisa como antideslizante, y es adecuado tanto para tableros de trabajo o mostradores, como para para revestimiento de paredes y pisos (Figura 21).



*Figura 21. Bio-Glass utilizado para recubrimientos y muebles de baño*

*Fuente: <http://blog.is-arquitectura.es/2010/02/19/bio-glass-material-reciclado-y-reciclable/>*

## Pavimento ecológico para exteriores

Es un pavimento que está compuesto principalmente por calcín de vidrio, reactivos y áridos, un cemento de vidrio que se consigue del micronizado de residuos, que, con los reactivos, agua y el árido que se desee, forma el pavimento terrizo (Figura 22).



*Figura 22. Adoquines de pavimento ecológico*

*Fuente: <http://ecopavimento.blogspot.mx/>*

## ECORE (suelos de caucho y plástico reciclado)

Están hechos a partir de neumáticos y botellas de plástico (PET) reciclados, en total contienen un 95% de material reciclado, sin PVC ni compuestos orgánicos volátiles (Figura 23).



*Figura 23. Colocación de suelos ecológicos ECORE*

*Fuente: <http://blog.is-arquitectura.es/2013/03/04/suelos-ecologicos-de-caucho-y-plastico-reciclado-de-ecore/>*

## **Tableros CAF**

Se realiza primero el tamizado de todo el material recibido, y luego se comprime con calor y presión, obteniendo un panel rígido que está envuelto en papel de alta resistencia.

Los paneles CAF se pueden utilizar en la construcción como sustitutos al aislamiento de fibra de vidrio, placas de yeso, tableros de partículas, o paneles de insonorización.

## **EcoCycle**

Es una baldosa producida con un 40% de material cerámico reciclado, tiene un acabado antideslizante, parecido a la piedra y es apropiada tanto para aplicaciones residenciales como comerciales (Figura 24).



*Figura 24. Piso con acabado de baldosas EcoCycle*

*Fuente: <http://blog.is-arquitectura.es/2012/06/24/ecocycle-baldosa-con-un-40-de-material-reciclado/>*

## **Mixology**

Es una colección de azulejos metálicos para el revestimiento de superficies interiores verticales, tanto para cuartos de baños, cocinas, y otras estancias domésticas y comerciales, que tienen la interesante cualidad de estar hechos con un 50% de material reciclado (Figura 25).



*Figura 25. Acabados con azulejos metálicos Mixology*

*Fuente: <http://blog.is-arquitectura.es/2012/02/06/mixology-azulejos-metalicos-de-material-reciclado/>*

### **Crush**

Es un azulejo que está hecho al 100% con vidrio reciclado (cristales rotos de las ventanas). Se usa en revestimientos, ya sea para interiores residenciales o comerciales (Figura 26).



*Figura 26. Azulejo CRUSH*

*Fuente: <http://blog.is-arquitectura.es/2012/01/13/crush-azulejo-hecho-a-mano-con-vidrio-reciclado/>*

### **Pavimento Geo Sílex**

El Geo Sílex se fabrica con los residuos procedentes de la producción del acetileno, e incorporado a pavimentos y fachadas hace que esas superficies adquieran la capacidad de absorción de CO<sub>2</sub> y se comercializa como pasta aditiva para concretos, añadiéndose a éstos en una proporción del 3-10% del peso del concreto.

## **2.5. Secadores solares**

El secado se describe como un proceso de eliminación de sustancias volátiles (humedad) para producir un producto sólido y seco.

La operación de secado es una operación de transferencia de calor y masa de contacto gas-sólido, en la que la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, con 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, Suárez, y Bergues 2011).

Los secadores solares cuentan con dos elementos básicos: el colector, que es donde la radiación calienta el aire, y la cámara de secado, que es donde el producto es deshidratado por el aire que pasa.

El aire que circula dentro del secador tiene el fin de eliminar la humedad evaporada del producto, y dicha circulación se puede lograr por dos métodos, por circulación forzada y por convección natural (Moreno 2016).

### **Circulación forzada:**

El aire es movido por un ventilador que consume energía mecánica o eléctrica. Este tipo de circulación facilita el diseño en el caso de los equipos de tamaño grande, además de facilitar el control del proceso de secado. Usando este tipo de circulación se pueden obtener velocidades de circulación de aire entre 0.5 y 1 m/s. la principal desventaja de la circulación forzada es el hecho de que se debe disponer de una fuente de energía eléctrica.

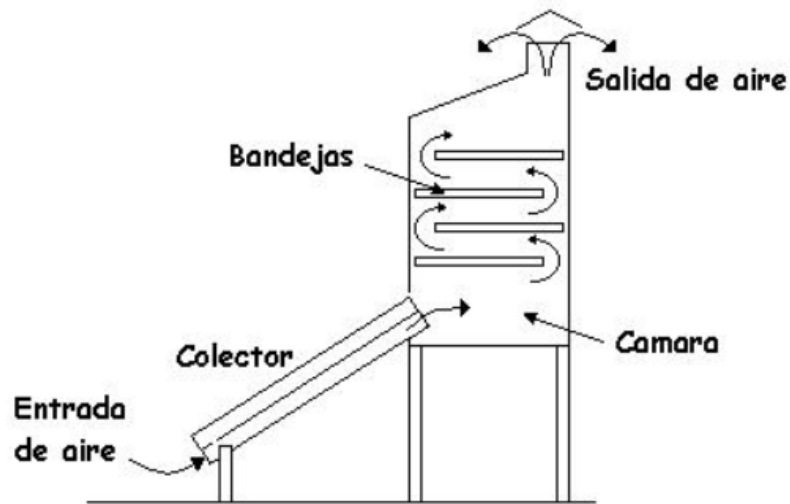
### **Circulación por convección natural:**

El aire es movido por las diferencias de temperatura entre las distintas partes del equipo, que promueven la convección térmica del aire. Este tipo de circulación se hace más difícil de incorporar con equipos grandes. Para equipos pequeños o medianos se pueden lograr velocidades de aire de 0.4 a 1 m/s al interior de la cámara, pero en equipos grandes esta velocidad no sobrepasa los 0.1 a 0.3 m/s.

De acuerdo con las condiciones del colector y la cámara de secado, los secadores solares se pueden clasificar de la siguiente manera:

### **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 (Figura 27). La cámara de secado no permite la entrada de la radiación solar. Este secador es esencialmente un secador convectivo convencional sobre el cual el sol actúa como fuente energética. Los secadores directos difieren de los indirectos en la transmisión de calor y la separación de vapor.



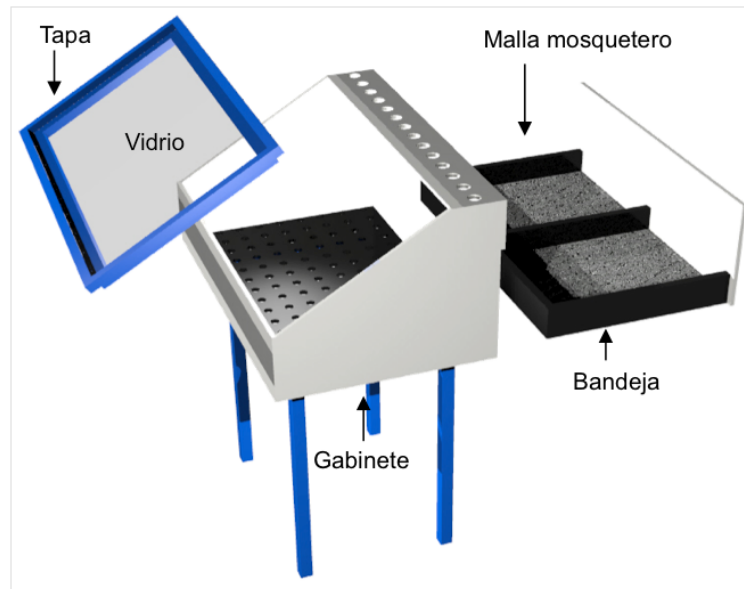
*Figura 27. Esquema de Secador Solar Indirecto*

*Fuente: Agrowaste*

### **Directo:**

En este tipo de secador, el colector y la cámara de secado, pueden juntarse, en cuyo caso la cámara que contiene el producto también cumple la función de colector recibiendo la radiación solar (Figura 28).

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. Por lo tanto, el gradiente de presiones de vapor entre el producto y aire se hace mayor y se acelera el secado. La combinación de colector y cámara en una sola unidad puede ser más económica en muchos casos, especialmente en los secadores de menor tamaño. Este tipo de secadores es casi siempre con circulación de aire por convección natural. Esto hace que a veces el control del proceso sea poco confiable. Para algunos productos la acción de la radiación solar puede destruir algún compuesto orgánico que lo compone y que tiene interés comercial.



*Figura 28. Esquema de Secador Solar Directo*

*Fuente: <http://www.elcanelo.cl/deshidratadores.html>*

### **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 (Figura 29).

El secador solar mixto presenta varias ventajas; en primer lugar, el control del proceso es más simple (sobre todo en el caso de secadores con circulación forzada de aire). Es fácil de integrar una fuente auxiliar de energía para construir un sistema híbrido. El tener una cámara de secado separada de los colectores facilita la manipulación del producto y las labores de carga y descarga. Dado que la cámara no permite la entrada de la radiación solar, este sistema permite secar en forma conveniente productos que se puedan dañar o perder su calidad de aspecto por una exposición directa al sol. Una desventaja de este tipo de secadores es el hecho de que, al añadir el colector previo a la cámara para recolectar energía solar, el tamaño del equipo y sus costos aumentan. Una segunda desventaja es que para evaporar la misma cantidad de agua se necesita mover más kilogramos de aire a mayor temperatura que en el caso de los secadores directos.

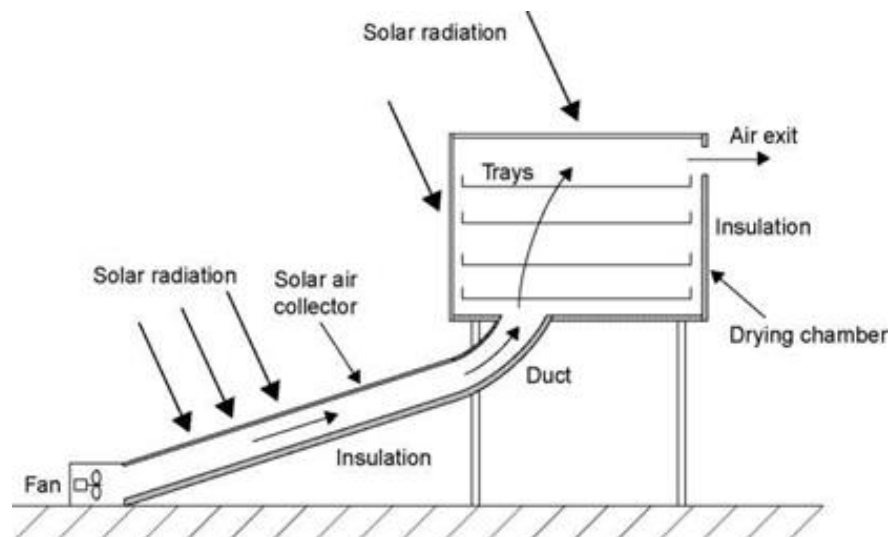


Figura 29. Esquema de Secador Solar Mixto

Fuente: <http://energyprofessionalsymposium.com/?p=10454>

## 2.6. El nopal en la construcción

El nopal u *Opuntia ficus-indica* por su nomenclatura binomial, pertenece al género *Opuntia*, de la familia de las cactáceas. Esta cactácea de la cual se conocen más de 300 especies, es originaria de Mesoamérica y hoy en día está difundida en todo el mundo (Torres et al. 2010). El nopal puede desarrollarse fácilmente, sin embargo, su crecimiento óptimo se da en las zonas áridas y semiáridas; se adapta a casi cualquier tipo de clima mientras cumpla con ciertas características básicas, tales como: buena insolación, cierta disponibilidad de agua, y que el suelo no sea salino o muy arenoso.

Además del valor que tiene como alimento consumido en forma directa, el nopal se ha utilizado en diferentes sectores como es la construcción, por sus propiedades adherentes en adobes y pinturas, como anticorrosivos o como infiltradores del suelo, entre otros (Sáenz et al. 2006).

El mucílago extraído de los cladodios o pencas, ha presentado un amplio uso en el sector de la construcción, se ha usado como clarificante de agua y como un adhesivo para la cal, se han realizado estudios para el uso del mucílago como estabilizador de bloques de adobe, del mismo modo, se han efectuado ensayos preliminares acerca del uso del mucílago en pastas de hidróxido de calcio, se ha afirmado también que la adición de mucílago a mezclas de cementos refuerza la durabilidad de estos materiales (Torres y Cano 2007).

En México hay una larga historia del uso del mucílago de nopal en combinación con cal, aumenta sus propiedades adhesivas y mejora su repelencia al agua. Tradicionalmente, se ha usado de modo similar al yeso en paredes de adobe y de ladrillo, y también como una barrera al agua en el estuco. Desde hace muchos años se ha utilizado la mezcla mucílago-cal como un adhesivo orgánico para restaurar y proteger edificios históricos debido a su

funcionamiento mejorado contra la penetración del agua y agrietamientos. El mucílago se ha utilizado también como una adición a los morteros obteniendo mejoras en las características mecánicas de la mezcla, aumentando la resistencia a la compresión (Sáenz et al. 2006).

Se ha fabricado también a partir del mucílago de nopal, pintura que actúa como impermeabilizante, el cual puede ser aplicado a cualquier construcción para protegerla. En caso de aplicarse a una vivienda, este impermeabilizante hecho a base de nopal, protege la construcción del frío, la humedad del ambiente, del agua y de los insectos (Cárdenas, Arguelles, y Goycoolea 2002).

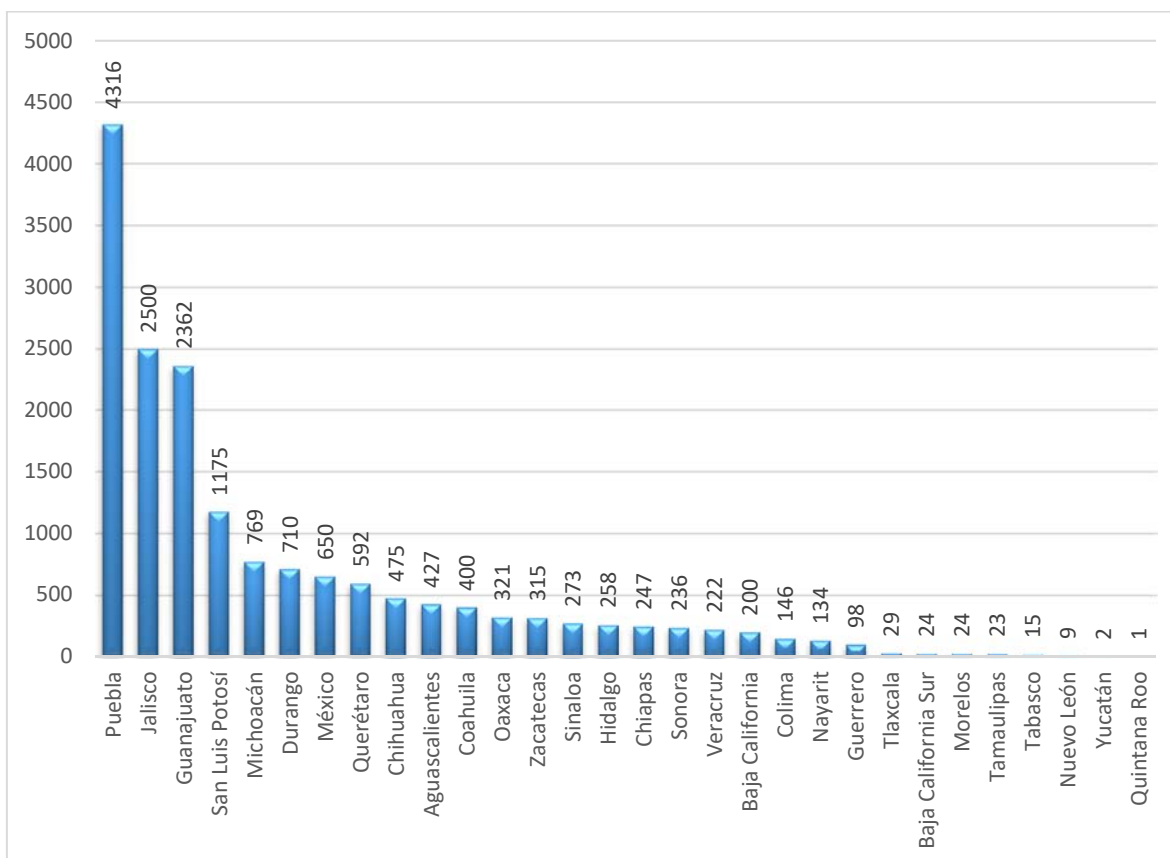
En Marruecos se han realizado estudios del uso de los cladodios para evitar la corrosión, y se ha reportado que la utilización de un extracto acuoso obtenido de los cladodios demostró ser exitoso para evitar la corrosión del hierro. Por su parte Torres-Acosta, et al. (2005), en estudios preliminares, encontraron que la adición de mucílago de cladodios al concreto evitaba la corrosión de las barras de acero inmersas en el mismo (Sáenz et al. 2006).

### **3. ANTECEDENTES**

#### **3.1. Ladrilleras**

En México, el sector ladrillero artesanal es de suma importancia debido no solo a que contribuye al fortalecimiento de la industria de la construcción de viviendas, sino a la generación de empleo e ingreso para las familias que se dedican a este sector, según datos del INEGI se crean anualmente aproximadamente 35 483 empleos con un valor de la producción de 3117 millones de pesos (SERpro 2012). Pese a dicha importancia que tienen las ladrilleras artesanales son mayormente de organización informal, por lo cual no están reconocidas por los estados y municipios y en consecuencia excluidas de las políticas públicas, sociales, económicas y ambientales (Aquino 2015).

La producción y elaboración de los ladrillos puede ser de tipo mecanizado o artesanal. A lo largo del país existen aproximadamente 16 953 productores de ladrillo artesanal, Puebla es el estado que lidera la lista con 4316 ladrilleras, seguido por Jalisco y Guanajuato con 2500 y 2362 respectivamente; las cuales producen en promedio 323 millones de unidades anuales (Red de Ladrilleras 2016). En la Figura 30 se observa el número de ladrilleras que se encuentran en cada estado y enseguida en la Tabla 15 se detalla la producción promedio anual por empresa en cada estado del país, con la cual se puede concluir que no precisamente en el estado en el que más ladrilleras se encuentran tiene la mayor producción, en este caso Tabasco, Tamaulipas y Morelos son los estados que cuentan con la mayor producción promedio anual por empresa.



**Figura 30. Número de ladrilleras artesanales por Estado de la República Mexicana**

*Fuente: Elaboración propia con datos de la Red de Ladrilleras*

**Tabla 15. Producción promedio anual por empresa ladrillera artesanal en los Estados de la República Mexicana**

| Producción promedio anual por empresa | Millares | Producción promedio anual por empresa | Millares |
|---------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|
| <b>Tabasco</b>                        | 7582.9   | <b>Aguascalientes</b>                 | 264.1    |
| <b>Tamaulipas</b>                     | 7575.6   | <b>Zacatecas</b>                      | 246.3    |
| <b>Morelos</b>                        | 3830.9   | <b>Colima</b>                         | 228.1    |
| <b>Tlaxcala</b>                       | 2126.1   | <b>Oaxaca</b>                         | 161.2    |
| <b>Veracruz</b>                       | 1823.1   | <b>Querétaro</b>                      | 156.5    |
| <b>Baja California Sur</b>            | 1249.4   | <b>Jalisco</b>                        | 154.8    |
| <b>Chiapas</b>                        | 1000.9   | <b>Coahuila</b>                       | 150.8    |
| <b>México</b>                         | 663.6    | <b>Durango</b>                        | 121.3    |
| <b>Sonora</b>                         | 582.9    | <b>Guanajuato</b>                     | 118.4    |
| <b>Sinaloa</b>                        | 543.8    | <b>Baja California</b>                | 99.1     |
| <b>San Luis Potosí</b>                | 541.0    | <b>Hidalgo</b>                        | 79.8     |
| <b>Nayarit</b>                        | 403.6    | <b>Puebla</b>                         | 71.4     |
| <b>Chihuahua</b>                      | 390.7    | <b>Guerrero</b>                       | 57.4     |
| <b>Michoacán</b>                      | 291.6    | -                                     | -        |

En México, el 86.3% de las viviendas es construido con materiales como ladrillo, tabique, block, piedra, cantera o cemento (INEGI 2010), los cuales son materiales que proveen insumos de calidad al sector de la construcción de viviendas, sin embargo, la producción de dichos materiales genera un alto impacto al ambiente.

La producción de ladrillos artesanales se realiza en casi toda la República Mexicana en donde prevalecen procesos tradicionales y hornos muy rudimentarios, se utilizan suelos fértiles para el proceso de amasado, se utiliza una gran variedad de materiales combustibles altamente contaminantes como son la leña, madera, aserrín, aceites usados, combustóleo, diésel, residuos domésticos e industriales, llantas, solventes de desecho, gas LP, por mencionar los de mayor frecuencia (SERpro 2012); dando como resultado la generación de un gran número de emisiones de contaminantes (partículas, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno) y gases de efecto invernadero, ocasionada durante el proceso de cocción (Figura 31).



*Figura 31. Emisión de gases efecto invernadero por horno ladrillero en operación*

*Fuente: <https://www.elsiglodedurango.com.mx/m/i/2016/01/482435.jpeg>*

En general, la producción de ladrillo artesanal en México se desarrolla con una baja eficiencia energética, procesos de combustión y materiales combustibles precarios, y hornos con escasa tecnificación, es por ello que se ha convertido en un tema de vital importancia el mejorar o cambiar las técnicas de producción que se han utilizado hasta ahora para poder corregir los problemas de contaminación (particularmente en el suelo y en el aire) y riesgos para la salud tanto humana como de los ecosistemas, que el sector ladrillero genera.

### **3.1.1. La construcción con materiales convencionales**

#### **Ladrillo**

Desde épocas antiguas, se ha utilizado dos clases de tabiques: el de pasta de arcilla, formado más o menos con una mezcla de arena y paja, y que en nuestro país se conoce como adobe; y el tabique cocido a fuego.

Los sumerios y babilonios secaban sus ladrillos al sol; sin embargo, para reforzar sus muros y murallas, en las partes externas, los recubrían con ladrillos cocidos, por ser estos más resistentes.

Los ladrillos se elaboraban con arcilla, que es un material sedimentario de partículas muy pequeñas de silicatos, hidratados de alúmina, además de otros minerales como el caolín, montmorillonita e illita.

Son utilizados como elemento para la construcción desde hace unos 11 000 años, sin embargo, en México no fue sino hasta la llegada de los españoles que se usó el ladrillo cocido, principalmente para la construcción de bóvedas de las iglesias, ya que resiste más las tensiones y las inclemencias del tiempo.

Un ladrillo es una pieza de construcción, generalmente cerámica y tiene la forma de un prisma rectangular o paralelepípedo ortogonal, cuyas dimensiones permiten que se pueda colocar con una sola mano por parte de un operario de la construcción.

Es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción, ya que presenta una gran resistencia, durabilidad y los acabados en ladrillo pueden llegar a tener resultados espectaculares, así mismo, el ladrillo es un material térmico, lo cual quiere decir que en temporadas calurosas el interior de la construcción es fresca y en temporadas frías el interior es cálido. Además de necesitar poco mantenimiento, el ladrillo es uno de los materiales preferidos en la decoración y en la construcción.

Es un material de fácil aplicación que suele utilizarse en la construcción de casas como parte de las fachadas y de chimeneas, aunque también se utiliza dentro de las decoraciones internas, en el revestimiento de fogones en construcciones antiguas y/o modernas, en el levantamiento de muros, edificaciones, bardas, etc.

Es muy común que en el mercado de la construcción se encuentre con diferentes presentaciones y con diferentes geometrías de ladrillos, las cuales cumplen algún requerimiento para cierto sector, ya que pueden ser estas necesidades de carácter estructural o estético. A continuación, se describen algunos tipos de ladrillos que son ampliamente usados en el sector de la construcción.

Tipos de ladrillos:

- Macizos: es el de uso más común, son planos y se obtiene mediante el extrusionado de la arcilla o bien por prensado sobre un molde (Figura 32).



*Figura 32. Ladrillo macizo*

*Fuente: <http://www.mndelgolfo.com/productos/ladrillo-de-barro-rojo-recocido-5x12x23-cm/>*

- Especiales: son de formas variadas por lo que solucionan el toque final de las paredes decoradas (Figura 33). Los hay rematados con doble canto, terminados en curvas, con ángulos esquinados, con puntas redondeadas, etc.



*Figura 33. Configuración de algunos ladrillos especiales*

*Fuente: [http://www.ceramicamatiaslopez.com/piezas\\_especiales](http://www.ceramicamatiaslopez.com/piezas_especiales)*

- Perforados: tienen agujeros que los atraviesan de lado a lado para minimizar el peso y cuentan con corrugaciones en sus caras para mejor adhesión de los morteros (Figura 34).



*Figura 34. Ladrillo perforado*

*Fuente: <http://www.ladrillosbailen.net/es/perforados>*

- Huecos: constituyen una verdadera muralla contra la humedad. Pesan muy poco y tienen múltiples aplicaciones en la construcción, como la de levantar dobles muros (Figura 35).



*Figura 35. Ladrillo hueco*

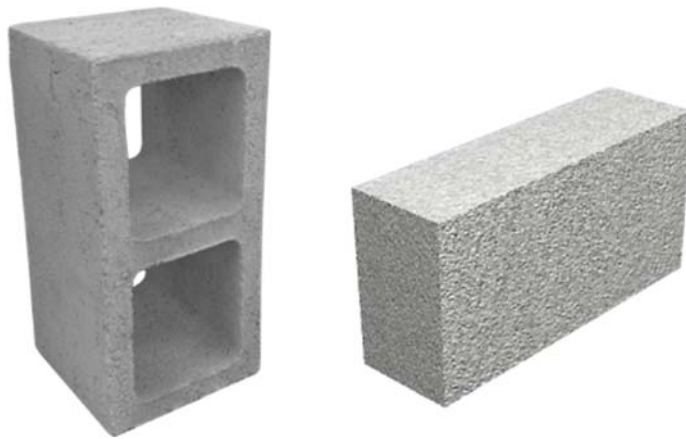
*Fuente: <http://loimar.com/producto/huecos/ladrillo-hueco-12x18x33>*

Existen diferentes calidades de ladrillos, los de interior no se deben usar para muros exteriores; los de calidad especial se emplean para levantar muros en lugares de clima duro y los de calidad corriente son los de uso más habitual. Su forma es la de un prisma rectangular, tiene entonces dimensiones que se pueden medir en ancho de la base, largo de la base y la altura o espesor del ladrillo; por otra parte, también de manera coloquial en algunos lugares le han denominado con otros nombres a sus dimensiones, ejemplo de esto son estos nombres que se enuncian: sogá, tizón y grueso, siendo la sogá su dimensión mayor.

## **Block**

El block es un trozo grande de concreto o piedra hueca sin labrar. Existen dos tipos de block, hueco (Figura 36a) y macizo (Figura 36b), el block es un material hecho a base de cemento, arena y agregados, obteniendo como resultado un material de gran resistencia estructural. El block es un material excelente que se usa en la construcción de paredes, muros y muros de carga, adaptable a diversos climas, tanto cálidos como fríos.

Usar block en una construcción tiene la ventaja de ser más económico, utiliza menos mezcla de mortero y es más rápido de colocar por ser ligero.



*Figura 36. a) Block hueco; b) Block macizo*

*Fuente: <http://www.blockdelsur.com/htdocs/hueco.htm>  
<http://dmcprefabricados.com/productos/block/block-macizo-y-tabicon/>*

## **Tabicón**

Uno de los materiales primarios para la construcción es el tabicón (Figura 37), el cual se puede encontrar en el mercado en dos presentaciones, el tabicón ligero y el tabicón pesado. Estos materiales se utilizan frecuentemente en la construcción de casas, bodegas, ampliaciones y muros de carga.

El tabicón es un material que consiste en piezas sólidas fabricadas con grava, arena y cemento, con lo que se obtiene una pieza resistente a las fuerzas de compresión aplicadas en muros divisorios o de carga. Generalmente el tabicón tiene dimensiones más grandes que las del tabique por lo que su uso permite un avance más rápido en la obra.

Debido a que el tabicón abarca una mayor área de construcción usando menos piezas se obtiene un material económico, con menor uso de mortero, un avance más rápido en la construcción y un menor presupuesto tanto en materiales como en mano de obra. El tabicón puede ser utilizado en interiores o exteriores, con un acabado plano, listo para el revestimiento posterior.



*Figura 37. Tabicón*

*Fuente: <http://www.fraicret.com/productos.php>*

## Adocreto

Los adocreto son materiales de construcción de pisos exteriores hechos a base de concreto (Figura 38). Es un adoquín de concreto que se utiliza para pavimento de uso habitacional, urbano e industrial.

Se encuentran en diferentes presentaciones, con formas y medidas adaptables a las necesidades de los clientes, hay adocreto para estacionamientos de casas, plazas comerciales, estacionamientos urbanos, plazuelas, callejones, y hay espesores tan grandes que soportan el peso de un tráfico constante.



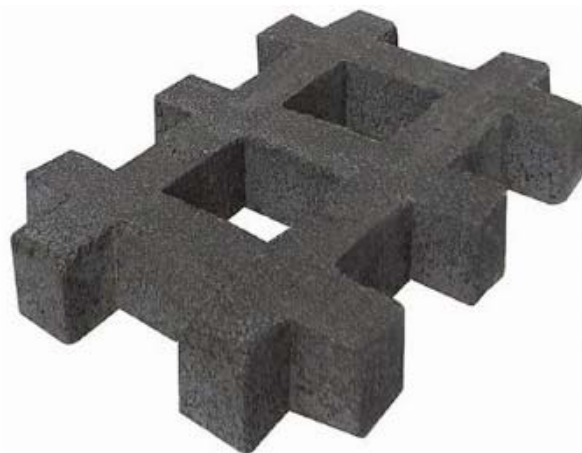
*Figura 38. Configuración de adocreto tipo S*

*Fuente: <http://www.horsel.cl/adocreto/adocreto-tipo-s-color-gris/>*

## Adopasto

En la decoración de caminos públicos destaca el uso de adopasto (Figura 39), el cual da un aspecto único a los exteriores. Es un material de construcción que se puede ver en el revestimiento de pisos exteriores como andadores, banquetas, jardines, estacionamientos y plazuelas. En los exteriores donde se busque integrar áreas verdes con un espacio para caminar libremente sin hundirse se recomienda el uso de adopasto pues es un material que permite que el agua pluvial se absorba fácilmente.

Para la fabricación de adopasto se utiliza un adoquín de concreto con resistencia de ruptura dependiendo del espesor que se escoja. Existen diferentes diseños, lo que ayuda a brindar una apariencia distinta a un mismo lugar, además se adapta a todo tipo de terreno y lo hace lucir muy bien. Es un material el cual se puede colocar de una manera muy fácil, aunque requiere de mucha precisión para no arruinar la estética del proyecto.



*Figura 39. Configuración de adopasto doble gato*

*Fuente:*[http://tejaselaguilapuebla.com/Productos/ProdID/175/CatID/12/Adopasto\\_Doble\\_Gato\\_adoquin\\_de\\_concreto\\_adocreto](http://tejaselaguilapuebla.com/Productos/ProdID/175/CatID/12/Adopasto_Doble_Gato_adoquin_de_concreto_adocreto)

### **3.1.2. Bloques ecológicos**

En la última década, con el motivo de aminorar los impactos adversos provocados al ambiente debido a la producción y consumo de ladrillos y principalmente de ladrillos de fabricación artesanal, han surgido alternativas que se incorporan como materiales ecológicos en el sector de la construcción tales como los ladrillos ecológicos, los cuales son ladrillos fabricados con materiales que no degradan el ambiente y, en algunos casos, con materiales de desecho que no cuentan con una adecuada gestión en su manejo y disposición final. Su manufactura también es respetuosa con el ambiente, frente a los ladrillos convencionales cuya fabricación y materiales no es tan inocua.

Los ladrillos ecológicos tienen cualidades similares a los convencionales utilizados para la construcción; por tanto, su uso no deriva en pérdida de calidad puesto que, como la mayoría de productos ecológicos, se someten a más pruebas que los tradicionales. En este contexto, se han hecho ladrillos ecológicos empleando diversos materiales, los cuales se presentan a continuación.

#### **Bloque de tierra comprimida**

Al BTC o Bloque de Tierra Comprimida (Figura 40), se le ha definido como aquel bloque al que se le han incorporado otros materiales con la finalidad de mejorar sus características físicas y mecánicas, pero que además en su proceso de fabricación se emplea maquinaria, que comprime al material de una manera significativa, haciendo que mejoren así, sus características mecánicas (Roux y Espuna 2012).

La tierra que se utiliza en este proceso puede tener un elevado contenido de arcilla, hasta el 25%, y se recomienda que no haya partículas de diámetro superior a 20 mm. Predomina la fracción arenosa, pero el objetivo es lograr una granulometría uniforme y una mezcla ligeramente húmeda para que el bloque tenga una adecuada adherencia entre sus partículas y por tanto presente características adecuadas de resistencia y durabilidad.

Después de la extrusión, dichos bloques deben ser sometidos a un proceso de curado mínimo de una semana debido al contenido de material estabilizante (cal, cemento o arcilla).



*Figura 40. Diferentes presentaciones del BTC*

*Fuente: Propia*

### **Ecobloques con agregados reciclados y cemento**

En Ecuador tras un proceso experimental emplearon agregados reciclados mezclados con cemento para fabricar bloques, los resultados indicaron viabilidad técnica y económica para la producción de bloques, sin embargo, las resistencias alcanzadas fueron bajas no obstante que cumplieran con las normas técnicas ecuatorianas.

En Tuxtla Gutiérrez, Chiapas se elaboró una propuesta similar y se mejoró la resistencia de las piezas para buscar que éstas puedan emplearse en zonas sísmicas (Rojas-Valencia y Aquino 2015).

### **Bitublock**

En Reino Unido se fabrican bloques compuestos de partículas de vidrio, escoria metalúrgica, lodo del alcantarillado, ceniza producida por los incineradores industriales y ceniza de combustible pulverizado de las centrales eléctricas. Este bloque conocido como Bitublock (Figura 41), es más resistente que uno de las mismas características de cemento y requiere menos energía para su fabricación que un ladrillo de arcilla, además de ser mucho más barato (Econstruyendo 2011).



*Figura 41. Bitublock*

*Fuente: <http://inhabitat.com/bitublock-concrete-will-be-obsolete/>*

### **Ecoladrillos con algas y lana**

En España se han desarrollado ecoladrillos compuestos por algas marinas, lana de oveja y arcilla (Figura 42), estos ladrillos no necesitan cocción y presentan un mayor aislamiento térmico comparado con los ladrillos comunes (Amorós 2011).



*Figura 42. Ecoladrillo con lana y algas*

*Fuente: Amorós, 2011.*

## Ecoladrillos con cascarillas de arroz

En España, específicamente en la Universidad Pública de Navarra se diseñaron ladrillos puzolánicos sin coacción, utilizando como materiales cal hidráulica natural, cemento Portland como aditivo de referencia, cascarillas de arroz como residuos procedentes de la cosecha de arroz y cenizas de cascara de arroz (Figura 43). La base de este ladrillo es un tipo de arcilla, la marga gris, un suelo considerado marginal (Cabo 2011).



*Figura 43. Probetas de ecoladrillos con cascarillas de arroz*

*Fuente: Cabo, 2011.*

## Ecoladrillos a base de botellas PET rellenas de residuos

Surgen en la organización Pura Vida de Guatemala en el año 2004; se fabrican a partir de la combinación de los dos grupos más grandes de desechos sólidos de los hogares, botellas PET y residuos plásticos (Figura 44). Las botellas de plástico PET sirven como depósito para los residuos sueltos, limpios y secos de las casas, los cuales se compactan sellando posteriormente la botella (Heisse et al. 2011).



*Figura 44. Ecoladrillos a base de botellas PET rellenas de residuos*

*Fuente: Heisse, et al., 2011.*

## Ecoladrillos con PET y cemento Portland

En Argentina, en el Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE, CONICET-AVE), se desarrolló un proceso para la utilización de plásticos reciclados en la elaboración de elementos constructivos. El proceso se lleva a cabo triturando con un molino plásticos PET procedentes de envases descartables de bebidas, luego en una hormigonera común se hace una mezcla con cemento portland y un aditivo que mejora la adherencia de las partículas plásticas al cemento, finalmente se coloca en una bloquera manual que les da forma a los ladrillos (Figura 45), (Rojas-Valencia y Aquino 2015).



*Figura 45. Ecoladrillos con residuos de PET y cemento Portland*

*Fuente: <http://www.conicet.gov.ar/botellas-descartables-para-casas-sustentables/>*

## Ecoladrillos Ecotec

En México se fabrican y distribuyen ladrillos a base de fibra de celulosa (desperdicio del proceso de fabricación de papel), arena, cemento y aserrín, por lo cual el 20% de la materia prima de estos ladrillos es material 100% reciclado (Figura 46). Es un material que cuenta con una densidad más alta que los materiales convencionales, lo que permite que conserve por más tiempo la temperatura (Ecotec 2016).



*Figura 46. Ecoladrillos Ecotec*

*Fuente: Ecotec*

## Ecoladrillos con desechos de celulosa

En España, en la Escuela Politécnica Superior de Linares (Universidad de Jaén), se fabrican ecoladrillos reciclando los residuos de celulosa provenientes de las fábricas de papel, así como los lodos procedentes de la depuración de sus aguas residuales, estos componentes se mezclan con arcilla y se fabrican mediante prensado y extrusión en máquinas (Rojas-Valencia y Aquino 2015).

## Ecoladrillos de Adobe

La palabra adobe se deriva del árabe At-ub que significa “ladrillo de tierra”; la ventaja que caracteriza al adobe es su gran inercia térmica que le permite brindar una regulación de la temperatura interna, ya que contiene fibras vegetales que le confieren esta propiedad. Además de favorecer el uso de materiales locales, requiere el uso de herramientas sencillas (Figura 47), aunque también presentan desventajas, los ladrillos de adobe son sensibles a la humedad por lo cual no son elementos óptimos para paredes estructurales. Su uso ha ido decreciendo, debido a su comportamiento inadecuado ante sismos e inundaciones.



*Figura 47. Extrusión de ecoladrillos de adobe*

*Fuente: <http://eudomus.com/como-hacer-ladrillos-de-adobe/>*

## Ecoladrillos fabricados a base de PET

Polietileno tereftalato es un tipo de plástico que tiene diversas ventajas y propiedades como:

- Alta resistencia al desgaste y corrosión.
- Tiene muy buen coeficiente de fricción.
- Tiene buena resistencia química y térmica.
- Tiene muy buena barrera a CO<sub>2</sub>, aceptable barrera a O<sub>2</sub> y humedad.

Se ha utilizado en mampostería. Los envases son triturados y así son incorporados a las mezclas cementicias, sin necesidad de desprenderle etiquetas o tapas. Por lo tanto, los bloques desarrollados con PET reciclado son una alternativa posible para la ejecución de cerramientos de construcciones, más ecológicos, más livianos y de mejor aislación térmica, además de poder construir muros de dos pisos de altura.

Estos ladrillos, el cual se muestra un ejemplo en la Figura 48, se elaboran con envases plásticos elaborados, como los de shampoo, alcohol, alimentos, agua embotellada y refrescos. Un ladrillo fabricado a base de PET resulta hasta 15 centavos más económico que uno tradicional.



*Figura 48. Ladrillo fabricado a base de PET*

*Fuente: <http://conciencia-sustentable.abilia.mx/>*

### **Ecoladrillos con pasta de papel**

El papel se recicla reduciéndolo a pasta de papel. Con dicha pasta se ha estado fabricando ladrillos de papel (Figura 49); los ladrillos de papel es una tecnología que se ha estado utilizando en países desarrollados, en donde la contaminación es muy alta y han optado por utilizar alternativas para evitar la emisión de gases y reducir el impacto ambiental.

Las pruebas actualmente se están realizando donde se comprobará la durabilidad, como se adecúa a las condiciones climáticas.



*Figura 49. Ladrillos de papel reciclado*

*Fuente: <http://www.omicrono.com/2013/02/ladrillos-hechos-de-papel-completamente-reciclables/>*

## Ecoladrillos BLOX

BLOX es un tipo de bloque de construcción que está fabricado con fibras de celulosa (en un 65%) procedentes de periódicos, guías telefónicas, boletos de lotería, y lodos de la industria papelera, además de por supuesto cemento (Figura 50), que respeta las medidas tradicionales de un bloque de adobe.

Es un material resistente al fuego, agua, termitas, moho, etc.



*Figura 50. Bloques ecológicos BLOX*

*Fuente: <http://metalurgiaymaterialesuaslp.blogspot.mx/2013/04/bloques-de-hormigon-ecologico.html>*

## 4. METODOLOGÍA

El desarrollo de la metodología se dividió en 4 fases, en la Fase I se realizó el estudio de gabinete, en la Fase II se realizó el diseño y construcción del equipo empleado el cual consistió en una máquina moldeadora de ladrillos, un secador solar y la adquisición de una máquina para fabricación de bloques prensados; se definieron los materiales empleados como materia prima, se realizó la obtención y el traslado de estos materiales, se hizo el tratamiento previo a cada uno de los materiales, así como medidas de conservación, y se definió el proceso constructivo. En la Fase III se realizó la caracterización del suelo a utilizar, se realizaron las pruebas preliminares, se diseñaron las dosificaciones correspondientes para cada mezcla, se ejecutó la fabricación masiva de los ladrillos, y se hizo la evaluación técnica mediante pruebas de resistencia a la compresión y absorción de agua, con base en la normativa mexicana. En la Fase IV se realizó la fabricación de ladrillos con la máquina adquirida y con base en las mezclas que se consideraron como óptimas en la Fase III, se realizó la comparación de los resultados de las propiedades mecánicas de ambas etapas de fabricación y se realizó el análisis económico mediante el cálculo del costo directo por unidad de fabricación de los bloques ecológicos, así como el costo de construcción de 1 m<sup>2</sup> de muro con bloque ecológico y con material convencional.

A continuación, se describe a detalle cada una de las fases correspondientes:

#### **4.1. Fase I: Estudio de gabinete**

En esta fase se recopiló y analizó información relacionada con leyes federales en materia de residuos sólidos y de manejo especial, enfocadas en los lineamientos de la norma ambiental NADF-007-RNAT-2013, añadiendo Normas Oficiales y Normas Técnicas Complementarias enfocadas al tema de residuos de construcción. Se analizaron los planes de manejo y gestión de los residuos de manejo especial con los que se cuenta, para conocer el panorama en el que se encuentra México. Paralelamente se realizó la investigación de las normas aplicables en la evaluación técnica de la calidad de los materiales de mampostería.

Así mismo, se realizó la investigación acerca de la generación, reúso y reciclaje de los residuos de construcción en diversos países del mundo.

Se investigó acerca de la situación actual del país en cuestión al sector ladrillero y la construcción con materiales convencionales, se realizó una búsqueda de qué materiales provenientes de residuos se encuentran disponibles en la industria de la construcción, así como los diferentes tipos de bloques ecológicos que se han desarrollado en la actualidad, y paralelamente se realizó la investigación referente a la construcción sustentable.

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

En esta fase se destacó el diseño detallado de los siguientes puntos principales:

- El tipo de materiales utilizados en la fabricación de los bloques ecológicos, clasificación y tratamiento asignado.
- Dimensiones de fabricación de los bloques, así como 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.

En los siguientes apartados se describe a detalle cada uno de los puntos mencionados anteriormente:

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

La elección de los materiales para la fabricación de los ladrillos se basó en el principio de la investigación, el cual es aprovechar los residuos que se generan en las diferentes etapas del proceso constructivo. Estos materiales son, primordialmente los residuos de excavación clasificados por la norma NADF-007-RNAT-2013 como tipo D, residuos de construcción provenientes del concreto (tipo A), residuos de construcción clasificados como residuos mezclados (tipo B), lo anterior con la finalidad de incorporar los residuos al ciclo de la construcción como lo establece la norma.

Se utilizó también residuos de tala y por último mucílago de nopal para incorporarse a la mezcla líquida, gracias a los aportes al sector de la construcción que se han encontrado en investigaciones previas.

En cuestión a los materiales empleados destacan dos tipos de materiales, los que trabajan como agregados y los aglomerantes, que se diferenciaron de la siguiente manera:

#### **4.2.1.1. Materiales aglomerantes**

Son materiales que tienen la función de material ligante, para el caso de esta investigación fueron los residuos de excavación. Este material fue donado por la empresa *TecnoAdobe*, ubicada en la ciudad de San Pedro Cholula, Puebla. El suelo con el que se trabajó, proveniente de San Francisco Coapa y Cuautlancingo, ambos lugares situados también en el estado de Puebla, es un suelo principalmente arcilloso, y es con el que dicha empresa fabrica los bloques que comercializa (Figura 51).



*Figura 51. Material de excavación*

La decisión de usar residuos de excavación para la fabricación de los bloques fue precisamente para seguir el principio de la investigación y utilizar los residuos que se van generando a lo largo de las etapas del proceso constructivo, así mismo, por los antecedentes constructivos que ha presentado este material, por su trabajabilidad y disponibilidad.

Antes de utilizar este material, fue necesario realizar un proceso de secado, el cual consistió en tenderlo sobre costales y exponerlo al sol durante tres días aproximadamente (Figura 52a), posteriormente, con la ayuda de un pisón de mano de alrededor de 10 kg, se apisonó el material con el objetivo de disgregar los grumos (Figura 52b), en seguida, se cernió el material (Figura 53), haciéndolo pasar por un tamiz del número 10 el cual tiene aberturas de 2 mm. Finalmente, el material seco y cernido se metió en costales para ser almacenados en el área de trabajo, en el interior del Edificio 8 del Instituto de Ingeniería, para ser utilizados conforme se avanzara en el periodo de experimentación.



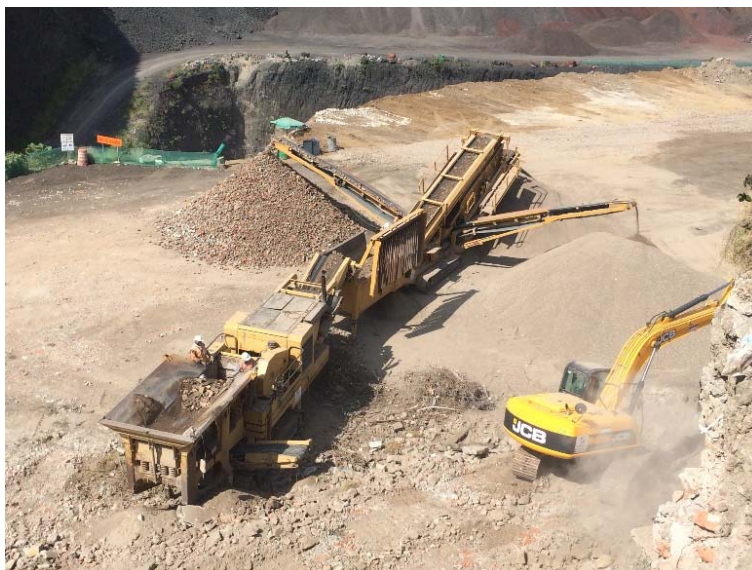
*Figura 52. a) Secado del material de excavación; b) Apisonado de material de excavación*



*Figura 53. Cernido de material de excavación*

#### **4.2.1.2. Materiales de relleno o agregados**

Son materiales que tienen la función de relleno, obtenidos a través de la trituración de residuos de construcción los cuales son clasificados como materiales potencialmente reciclables. Estos materiales fueron donados por la empresa *Concretos Reciclados*, la cual es una empresa encargada de recibir los residuos de construcción para someterlos a un proceso de separación, trituración y clasificación, y con esto generar agregados listos para su reuso (Figura 54).



*Figura 54. Obtención de agregados reciclados*

Los residuos de construcción que se utilizaron en la presente investigación fueron clasificados en dos grandes grupos: el primero como residuos de construcción solo cementantes (clasificados por la NADF-007-RNAT-2013 como tipo A) los cuales son provenientes de la trituración de materiales compuestos por residuos exclusivos de concreto y están sub clasificados de acuerdo a diferentes granulometrías, 1", 3/8" y 1/4" a finos; el segundo grupo es denominado residuos de construcción todo en uno (clasificados por la misma norma como tipo B) los cuales son provenientes de la trituración de materiales compuestos por ladrillos, bloques, cerámicos, morteros, adoquines, mamposterías y prefabricados, este grupo es producido únicamente con granulometría de 1/4" a finos. Dicha clasificación de los residuos de construcción producidos en esta empresa se ejemplifica en la Figura 55.



*Figura 55. Clasificación de agregados reciclados*

A dichos residuos se les aplicó un único tratamiento previo a su utilización, el cual consistió al igual que los residuos de excavación, en tenderlo sobre costales y exponerlos al sol durante tres días aproximadamente (Figura 56), esto con la finalidad de que estuvieran completamente secos al momento de su utilización.



*Figura 56. Secado de residuos de construcción*

#### **4.2.1.3. Residuos de tala o maderables**

La decisión de incorporar residuos de tala a la mezcla para elaboración de los bloques se basó en dos puntos principales, el primero, en el principio de elaboración de bloques de adobe el cual se fundamenta en la incorporación de arena, arcilla y paja a la mezcla; el segundo, el aprovechamiento de la madera resultante del proceso de despalme, el cual es inminente al inicio de la mayoría de las obras, ya que generalmente no es reutilizada.

La función que cumplieron los residuos de tala fue la estabilización durante la solidificación de la mezcla debido a sus propiedades fibrosas.

Estos residuos fueron proporcionados por la planta de composta de la UNAM, en este lugar son recibidos los residuos de tala provenientes de la poda y corte de árboles en Ciudad Universitaria, los cuales son sometidos a un proceso de trituración mecánica como se observa en la Figura 57, generando materiales empleados para la formación de composta, regeneración de suelos y relleno en camellones del campus.



*Figura 57. Obtención de residuos de tala*

Antes de ser utilizados, los residuos de tala se cribaron con la ayuda de un bastidor de malla, esto con el objetivo de obtener tamaños menores a 2.5 cm y que pudieran ser perfectamente incorporados a la mezcla, evitando la formación de vacíos que pudieran reducir la consistencia uniforme a los bloques (Figura 58).



*Figura 58. Cernido de residuos de tala*

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

La mezcla líquida para la integración homogénea de los componentes fue una composición entre agua y mucílago de nopal, se optó por utilizar esta combinación debido a las investigaciones previas las cuales han reportado mejoramiento físico en las pastas de cemento, morteros y mezclas empleadas en la construcción, así como el aumento de trabajabilidad y fluidez de las mezclas.

Otro punto principal sobre la elección de esta mezcla se debe a que las unidades de nopal utilizadas son realmente un producto de desecho ya que debido a la dureza de las mismas los productores no pueden comercializarlas para el consumo humano y no les queda otra opción que tirarlas o usarlas como composta en el mejor de los casos.

El nopal fue adquirido en el establecimiento denominado “Centro de acopio del Nopal-Verdura” (Figura 59), ubicado en la delegación Milpa Alta.



*Figura 59. Centro de acopio del Nopal-Verdura*

Debido al tiempo de duración del proyecto fue necesario utilizar un método de conservación de los nopales, dicha conservación se logró empleando una solución de Hipoclorito de sodio al 10%, con la cual se higienizaron cada una de las unidades en su punto de corte, aplicando dicha solución con un algodón y almacenándolas en cajas; esto con el fin de impedir procesos de putrefacción llevados a cabo por hongos o bacterias.

Para la preparación de la mezcla entre agua y mucílago de nopal se realizó el retiro de la epidermis de cada unidad para dejar únicamente el mesófilo y posteriormente se cortaron cuadros de aproximadamente 2 cm por lado como se observa en la Figura 60a, a continuación se pesaron y depositaron en un recipiente (Figura 60b), en seguida se agregó agua en una proporción 1:3 (kg de nopal: litros de agua), la combinación de ambos se dejó reposar (Figura 60c) durante un periodo de tres días; este método se optó por eficiencia, determinado en la investigación de Aquino, 2015.



*Figura 60. a) Corte de nopal en cuadros; b) Depósito de nopal en recipiente; c) Reposo de nopal*

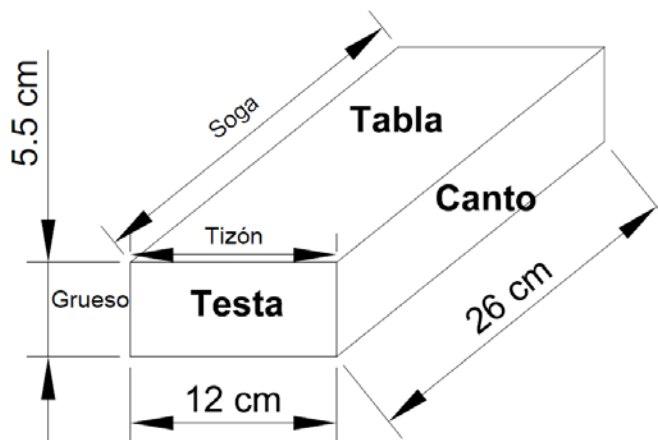
Posterior al periodo de reposo se realizó la extracción del material fluidizante, esto mediante dos fases, la primera, con un colador se separaron los trozos de nopal de la parte líquida (Figura 61a); la segunda, de los trozos de nopal resultantes, se colocaron en un trozo de tul que sirvió como filtro y se exprimió con las manos para retirar el mucílago (Figura 61b) que aún se encontraba en los trozos, esto con el fin de realizar la máxima extracción posible.



*Figura 61. a) Extracción de mucílago con colador; b) Extracción manual de mucílago*

#### 4.2.2. Dimensiones de fabricación de los ladrillos Etapa I

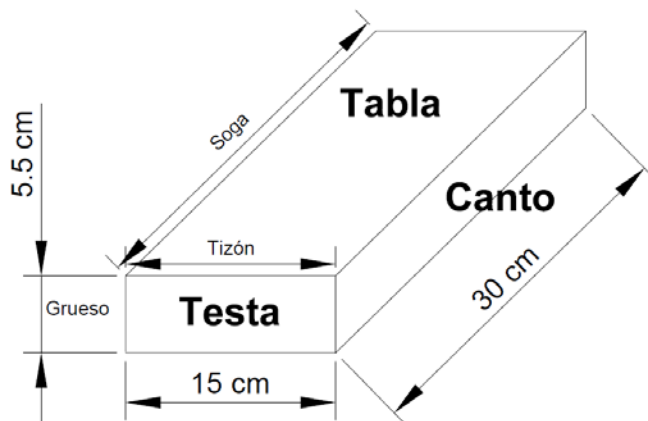
Las dimensiones de fabricación de los ladrillos se realizaron con base en la norma NMX-C-441-ONNCCE-2013. Cada pieza se realizó con las dimensiones presentadas en la Figura 62.



*Figura 62. Dimensiones de fabricación Etapa I*

#### 4.2.3. Dimensiones de fabricación de los ladrillos Etapa II

Basadas igualmente en la norma NMX-C-441-ONNCCE-2013, las dimensiones de fabricación de esta etapa tuvieron variaciones que se muestran en la Figura 63.



*Figura 63. Dimensiones de fabricación Etapa II*

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

El equipo utilizado en la fabricación de los ladrillos es de construcción sencilla, fue elaborado en el taller de carpintería del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el cual consta de una máquina moldeadora de ladrillos y un secador solar.

#### 4.2.4.1. Máquina moldeadora de ladrillos Etapa I

Diseñada para dar forma y compactar la mezcla, la máquina moldeadora de ladrillos fue fabricada con un bastidor metálico en desuso y principalmente de residuos de madera generados en el taller de carpintería del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Figura 64).



*Figura 64. Máquina moldeadora de ladrillos*

La máquina está integrada por una base metálica de 80 cm de altura, sobre la cual yace un marco de madera de 30.5 cm x 28.5 cm y 10 cm de altura, que cuenta con una tapa fabricada del mismo material cuya función es ejercer presión uniforme en la superficie de las piezas a fabricar, esto se logra con la tapa, la base del molde y 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 las piezas al ejercer presión en sentido opuesto, ya que hace emerger la base, empujando los ladrillos fuera del molde.

#### 4.2.4.2. Máquina para fabricación de ladrillos Etapa II

Esta máquina de uso manual modelo TA-100 marca TecnoAdobe (Figura 65) es una máquina para fabricar bloques ecológicos de tierra comprimida. Cuenta con una base de acero de 120 cm de largo 50 cm de ancho y 75 cm de altura, sobre la base se encuentra la cámara de prensado la cual está diseñada para fabricar bloques de 30 cm de largo, 15 cm de ancho y 10 cm de altura; dispone de una tolva para suministrar el material hacia la cámara de prensado a través de la caja dosificadora, así como una palanca con la cual se realiza la compactación del material y la extracción de los bloques.

Para la presente investigación se adecuó una placa en la cámara de prensado para que la altura de los bloques fuese de 5.5 cm y tener correlación con la altura de los ladrillos diseñados para la Etapa I.



*Figura 65. Máquina para fabricar bloques ecológicos de tierra compactada*

#### **4.2.4.3. Secador solar**

El secador solar es un equipo que aprovecha la radiación solar como fuente de energía, para acelerar la disminución del contenido de agua presente en los ladrillos ecológicos o bien para el secado de otros productos o materiales. Este secador está fabricado a partir del reúso de residuos de madera, aluminio, poliestireno expandido, una placa de vidrio y cuatro llantas de 10 cm de diámetro (Figura 66).



*Figura 66. Secador solar*

De fabricación simple, este secador presenta una estructura principal de madera compuesta por una base de 74 cm x 117 cm y paredes laterales por el lado ancho con forma trapezoidal de 35 cm a 30 cm y por el lado longitudinal paredes rectangulares. En cada uno de los lados longitudinales largos tiene unida, mediante bisagras metálicas, una aleta que cumple la función de reflector, las cuales son de triplay de 70 cm x 117 cm, se encuentran forradas con lámina de aluminio; en cada uno de sus lados longitudinales cortos cuenta con aletas móviles de 61 cm por lado igualmente forradas con lámina de aluminio.

Las paredes de la cámara de secado, tienen una capa de poliestireno expandido de 2.5 cm y luego una segunda capa de madera de 0.5 cm de ancho. Las paredes interiores están forradas por una lámina de aluminio. La tapa de la cámara es una cubierta de vidrio grueso. La introducción de los ladrillos al secador se realiza mediante el depósito de los mismos en las bases deslizables que se encuentran en los laterales cortos, fabricadas también de madera y forradas de lámina de aluminio.

Finalmente, para facilitar su desplazamiento, se colocó en cada esquina una llanta, logrado con esto, desplazar el secador de manera ágil de acuerdo a la posición del sol durante el transcurso del día, su resguardo en la noche y/o durante condiciones adversas.

El secador solar se fabricó con capacidad para almacenar en su interior de 30 a 32 ladrillos, y su funcionamiento es mediante radiación solar directa.

#### 4.2.5. Definición del proceso constructivo

Al tener definidos los materiales, dimensiones y equipo de fabricación, se definió el proceso constructivo a seguir para la fabricación de los ladrillos, dicho proceso inició en la Fase III del desarrollo de la investigación. En la Figura 67 se detalla el proceso que se siguió.

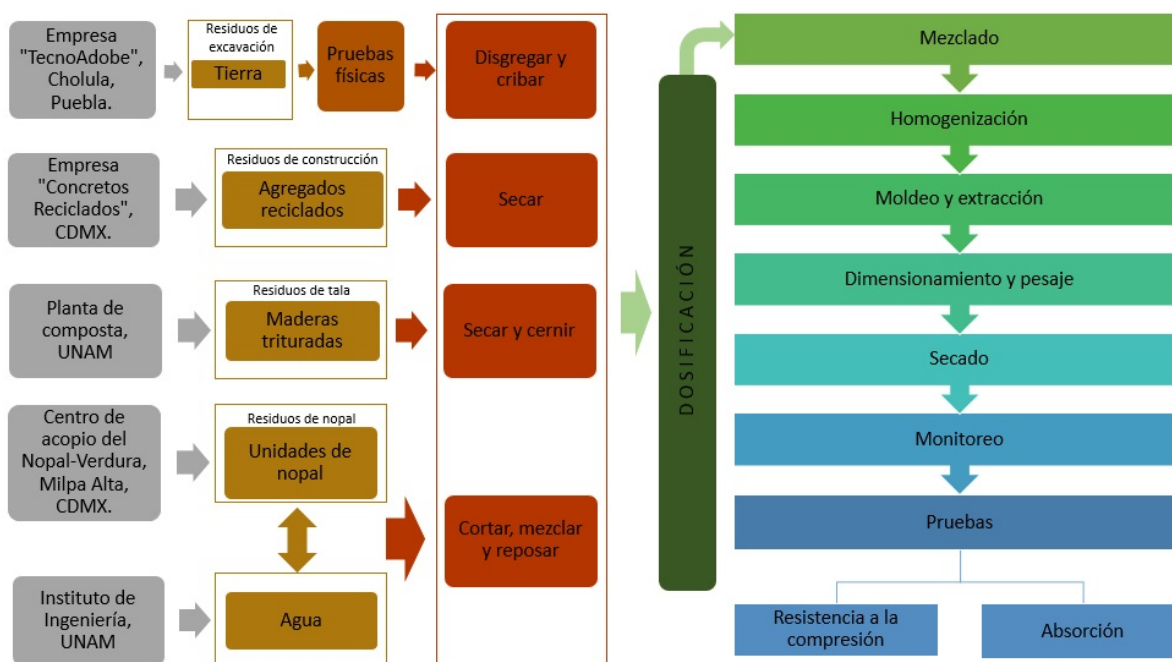


Figura 67. Proceso constructivo

### 4.3. Fase III: Fabricación de ladrillos Etapa I

Una vez definidos los materiales a utilizar, dimensiones de los especímenes y el equipo de fabricación, se inició con las pruebas preliminares al material de excavación, a fin de conocer sus características y con ello poder realizar posteriormente el diseño de mezclas necesario para la fabricación de ladrillos, principalmente, poder dosificar la cantidad de arenas (en este caso los residuos de construcción en las diferentes granulometrías).

#### 4.3.1. Pruebas preliminares

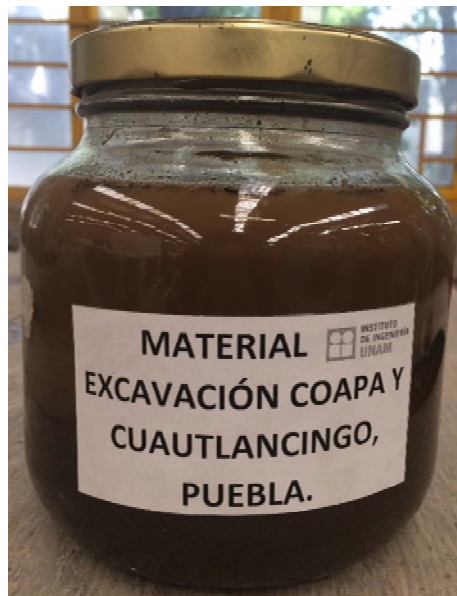
Previo a la construcción de los ladrillos fue necesario caracterizar e identificar a los residuos de excavación con los que se trabajarían, esto mediante pruebas físicas. El resultado de dichas pruebas proporcionó información sobre la calidad de la tierra en análisis y su eficacia para ser utilizada en la fabricación de ladrillos. A continuación, se describen las pruebas realizadas.

##### 4.3.1.1. Prueba granulométrica

Es una manera muy simple para conocer la proporción de los componentes en la tierra (arena, limo y arcilla), basados en el hecho de que la velocidad de caída de las partículas del suelo a través de agua aumenta con el diámetro de las mismas. El procedimiento que se siguió, se describe a continuación:

1. Se agregó en un recipiente etiquetado de 1 litro de capacidad, tierra cernida hasta la mitad de su capacidad y enseguida se adicionó la cantidad de agua suficiente para poder agitarlo.

Se agitó vigorosamente el recipiente hasta que todas las partículas de la tierra estuvieran en suspensión y se dejó en reposo sobre una superficie firme (Figura 68), por un periodo de 24 horas.



*Figura 68. Prueba granulométrica*

#### 4.3.1.2. Prueba plasticidad

Es una prueba que sirve para determinar la calidad de la tierra, y permitió determinar el nivel de plasticidad del material en análisis. El procedimiento que se siguió, se describe a continuación:

1. Se humedeció la tierra necesaria para formar un rollito de 20 cm de longitud y 1 cm de diámetro como se observa en la Figura 69, cuidando que la cantidad de agua fuera la necesaria para formar una mezcla moldeable y manejable (no aguada).



*Figura 69. Moldeo de rollito*

2. Enseguida se deslizó el rollito centímetro a centímetro sobre el borde de una mesa (Figura 70a) y a una velocidad constante, posteriormente se determinó la longitud a la cual se rompía la parte suspendida durante el proceso de deslizamiento (Figura 70b).



*Figura 70. a) Deslizamiento de rollito; b) Medición de ruptura*

3. Se realizó el mismo procedimiento con cinco rollitos. La calidad del material 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).

#### 4.3.1.3. Prueba de dureza

Como su nombre lo indica, es una prueba que da una idea de la dureza del material, para la evaluación se realizó el siguiente procedimiento:

1. Se humedeció la cantidad de tierra suficiente para moldear manualmente tres bolitas de 2 cm de diámetro y 2 pastillas de 3 cm de diámetro y 1.5 cm de espesor, como se observa en la Figura 71, cuidando la consistencia adecuada.



*Figura 71. Bolitas y pastillas de suelo*

2. Se colocaron las muestras en un lugar seco y seguro, por un periodo de 48 horas.

Posterior al tiempo de secado, se realizó el aplastamiento manual de los elementos como se observa en la Figura 72a y b respectivamente.



*Figura 72. a) Prueba de dureza a bolita; b) Prueba de dureza a pastilla*

Se consideró el siguiente criterio: cuando se rompían fácilmente se clasificaban como tierra de baja resistencia, si se rompían con dificultad se clasificaban como tierra con resistencia media o alta según la magnitud de la fuerza necesaria para romper el elemento.

#### 4.3.1.4. Prueba de mezclas

Una vez realizada la caracterización del suelo, con base en investigaciones anteriores y al análisis de los resultados previos, se realizaron combinaciones preliminares (Tabla 16), con la finalidad de observar el comportamiento de cada una y con esto poder determinar las condiciones óptimas para la fabricación masiva de ladrillos, principalmente la cantidad de arenas.

*Tabla 16. Combinaciones preliminares*

| RE  | RC S/C | RC T/U | TOTAL |
|-----|--------|--------|-------|
| 40% | 60%    | -      | 100%  |
| 50% | 50%    | -      | 100%  |
| 60% | 40%    | -      | 100%  |
| 75% | 25%    | -      | 100%  |
| 40% | -      | 60%    | 100%  |
| 50% | -      | 50%    | 100%  |
| 60% | -      | 40%    | 100%  |
| 75% | -      | 25%    | 100%  |

RE: Residuos de excavación; RC: Residuos de construcción; SC: Solo cementantes; TU: Todo en uno.

Con base en investigaciones previas (Aquino, 2015), se moldearon pequeños bloques (Figura 73a), se dejaron secar por un periodo de 48 horas y posterior al secado se realizó la compresión de cada unidad hasta llegar a la ruptura (Figura 73b), con esto se observó el comportamiento de cada una de las combinaciones.



*Figura 73. a) Bloques combinaciones preliminares; b) Bloques combinaciones preliminares probadas*

### 4.3.2. Diseño de mezclas

Finalmente, al haber obtenido las características físicas de la tierra y el comportamiento de las mezclas preliminares, se realizó el diseño experimentos (mezclas utilizadas en la fabricación de ladrillos), este diseño se basó, además, en los principios de fabricación artesanal de adobes y ladrillos, pudiendo aproximar detalladamente los pesos de los materiales utilizados.

Se diseñaron nueve mezclas con variación en proporciones y tipo de material empleado; las cinco primeras mezclas se definieron basadas únicamente en la granulometría de los materiales utilizados como agregados (residuos de construcción solo cementantes y todo en uno), las cuatro mezclas restantes se diseñaron como una combinación de los agregados, basados en el comportamiento observado en las cinco mezclas base, todas las mezclas y porcentajes de material utilizado se presentan en la Tabla 17. Se fabricaron 5 piezas por cada mezcla, debido a la cantidad de piezas necesarias para las pruebas que se realizaron posteriormente.

*Tabla 17. Porcentajes de material por cada tipo de mezcla*

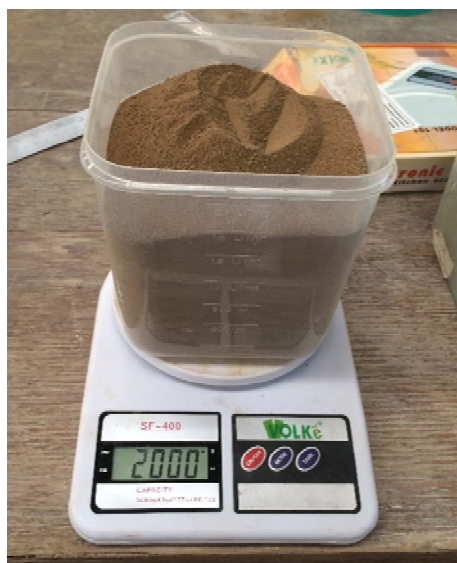
| Mezcla | Residuos<br>Excavación | Residuos<br>Tala | RC 1/4"<br>SC | RC 1/4"<br>TU | RC 3/8"<br>SC | RC 1"<br>SC |
|--------|------------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|-------------|
| 1      | 62%                    | 4%               | 34%           | -             | -             | -           |
| 2      | 62%                    | 4%               | -             | 34%           | -             | -           |
| 3      | 62%                    | 4%               | -             | -             | 34%           | -           |
| 4      | 62%                    | 4%               | -             | -             | -             | 34%         |
| 5      | 62%                    | 4%               | 34%           | -             | -             | -           |
| 6      | 62%                    | 4%               | 17%           | -             | 17%           | -           |
| 7      | 62%                    | 4%               | -             | 17%           | 17%           | -           |
| 8      | 63%                    | 4%               | 11%           | -             | 11%           | 11%         |
| 9      | 63%                    | 4%               | -             | 11%           | 11%           | 11%         |

RC: Residuos de construcción; SC: Solo cementantes; TU: Todo en uno.

### 4.3.3. Fabricación de ladrillos Etapa I

La fabricación se realizó de acuerdo con el proceso constructivo descrito anteriormente. A continuación, se describe el procedimiento seguido:

1. Se adecuó el espacio para la fabricación dentro del Edificio 8 del Instituto de Ingeniería, las condiciones ambientales fueron favorables, con temperatura entre 22 a 24°C y con ausencia de lluvia, dos días antes se realizó la preparación de la mezcla líquida necesaria para la integración homogénea de los materiales, el proceso de preparación se encuentra detallado en el apartado de preparación de la mezcla agua-mucílago de nopal.
2. Posteriormente se realizó el pesaje de las cantidades y proporciones de material requerido para la mezcla correspondiente (Figura 74). De igual manera se pesaron los residuos de tala, los cuales fueron previamente secados y cernidos. Se alistaron también las herramientas y equipo necesario para iniciar la fabricación de los ladrillos.



*Figura 74. Pesaje de materiales*

3. Enseguida, se colocaron los residuos de excavación correspondientes sobre el suelo y con la ayuda de una pala se formó un espacio al centro, en el cual se colocaron los agregados reciclados y residuos de tala respectivamente. Una vez que se tuvieron los materiales en el mismo espacio, se mezclaron en seco hasta lograr una mezcla lo más homogénea posible (Figura 75).



*Figura 75. Mezcla de materiales en seco*

4. Después de haber mezclado los materiales en seco se incorporó la mezcla líquida, formada por el mucílago de nopal con agua, esta mezcla se fue añadiendo con la ayuda de una probeta graduada en cantidades parciales (Figura 76), dicha cantidad fue determinada por las características físicas y visuales de la mezcla.



*Figura 76. Vertido de mucílago a la mezcla*

5. A continuación, con ayuda de una pala, se realizó la homogenización de los materiales (Figura 77), en la cual la finalidad fue lograr una consistencia pastosa sin que presentara características líquidas o chiclosas, de igual manera que no estuviera seca, dura o grumosa por la falta de mezcla líquida, todo esto para facilitar el moldeo de los ladrillos.



*Figura 77. Consistencia adecuada de la mezcla*

6. Una vez obtenida la consistencia adecuada, se acomodó la mezcla dentro del marco de la máquina moldeadora (Figura 78) con la ayuda de una cuchara de albañil y

hasta una altura de 5.5 cm aproximadamente, al tener dicha altura aproximada, se utilizó una espátula para texturizar la superficie (Figura 79).



*Figura 78. Acomodo de la mezcla en el marco*



*Figura 79. Texturizado de la superficie*

7. Posteriormente se cerró el molde y se ejerció presión con aplicación de fuerza en la palanca de la máquina, ésta, delimitada por la resistencia propia de la palanca

(Figura 80). Se destapó el molde y aplicando fuerza a la palanca en sentido opuesto se extrajeron los especímenes (Figura 81).



*Figura 80. Prensado de la mezcla*



*Figura 81. Extrusión de los especímenes*

8. Finalmente, se pesaron las piezas en estado fresco con ayuda de una báscula (Figura 82), y se determinaron las dimensiones de cada espécimen con la ayuda de un flexómetro (Figura 83).



**Figura 82. Pesaje de ladrillos**



**Figura 83. Determinación de las dimensiones**

Los especímenes se dejaron secar al aire libre durante tres días (Figura 84), con el objetivo de que perdieran la mayor cantidad de humedad posible y al introducirlos al secador la evaporación del agua contenida en las piezas no se quedara atrapada en él. Durante este periodo se realizaron mediciones diarias de sus dimensiones a fin de observar si existían variaciones por la pérdida de agua, de igual manera se voltearon sobre su canto (Figura 85) para permitir que la pérdida de agua fuera mayor.



*Figura 84. Exposición de ladrillos al aire libre*



*Figura 85. Volteo de ladrillos sobre su canto*

Pasado el periodo de exposición al aire libre se trasladaron al secador solar, apoyándolos sobre su canto (Figura 86), buscando que el secador estuviera expuesto directamente a los rayos solares. Se colocó dentro del secador un sensor Thermocouple thermometer data logger modelo EA15 marca Extech para medir la temperatura y un sensor con un pirómetro marca LabQuest 2 para medir la radiación solar (Figura 87), esto con la finalidad de determinar la temperatura máxima que podía alcanzar la cámara de secado, así como la radiación solar que era capaz de almacenar, se determinó un periodo al día para realizar las mediciones mencionadas, buscando que fuera el óptimo para captar la temperatura cumbre del día y la percepción máxima de radiación solar.



*Figura 86. Ladrillos al interior del secador*



*Figura 87. Equipos de medición de temperatura y radiación solar*

Así mismo, se pesó cada pieza al finalizar el periodo de medición establecido para cada día, para poder determinar en qué momento la variación de peso era nula o era mínima, y con ello concluir en cuantos días se lograba el secado de los especímenes.

El secador se trasladó a un lugar bajo techo a finalizar cada día de periodo de secado para evitar que el descenso de temperatura empapara la superficie y agregara humedad a los ladrillos.

#### **4.3.4. Realización de pruebas de resistencia a la compresión**

Previo a la realización de las pruebas de resistencia a la compresión fue necesario someter las piezas a un proceso de cabeceo para dar un acabado liso y que la carga aplicada al elemento fuera uniforme, el cual se detalla a continuación:

1. Se alistó el equipo y herramientas necesarios para realizar el cabeceo el cual consistió en una báscula, nivel de mano, espátulas, maderas rectangulares del tamaño de los lados de los bloques, abrazaderas de plástico, y un recipiente donde realizar la mezcla (Figura 88).



*Figura 88. Equipo y herramientas para cabeceo*

2. Se realizó una mezcla de yeso-cemento en una proporción 4:1 respectivamente, para esto se pesaron los materiales con ayuda de la báscula y el recipiente (Figura 89), y paralelamente se realizó el encofrado de las piezas con ayuda de las maderas y las abrazaderas de plástico (Figura 90).



*Figura 89. Pesaje de materiales para cabeceo*



*Figura 90. Encofrado de ladrillos para cabeceo*

3. Con ayuda del nivel de mano se aseguró que el encofrado estuviera nivelado (Figura 91).



*Figura 91. Nivelación de encofrado*

4. Se humedeció la superficie del ladrillo con ayuda de un atomizador para asegurar la adherencia de la mezcla con la pieza (Figura 92).



*Figura 92. Humedecimiento de la superficie del ladrillo*

5. Paralelamente se añadió agua a la mezcla yeso-cemento hasta lograr una consistencia manejable y se vertió sobre el ladrillo (Figura 93), a continuación, con la ayuda de la espátula se extendió la mezcla y texturizó la superficie (Figura 94), y se dejó secar por 24 horas.



*Figura 93. Vertido de mezcla yeso-cemento sobre la superficie del ladrillo*



*Figura 94. Acomodo de mezcla yeso-cemento y texturizarían de la superficie*

6. Pasado el tiempo de secado, con la ayuda de una lija y una pieza de madera rectangular se le dio un acabado más liso para que no hubiera problemas de desnivelación al colocarlos en la máquina de ensayo a compresión (Figura 95).



*Figura 95. Lijado de la pieza para acabado final*

El proceso se repitió para la cara opuesta de cada pieza que sería sometida a la prueba de compresión.

Cuando todos los especímenes estuvieron listos se trasladaron al laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería para la realización de las pruebas, dicho proceso se describe a continuación.

1. Se colocaron placas de metal sobre la base del equipo de manera tal que estuvieran lo más cercanas al punto de aplicación de la carga, enseguida se colocó una placa más de forma rectangular, para tener la función de soporte al ladrillo en prueba (Figura 96), a continuación, se ubicó el ladrillo y se centró alineándolo en ambos sentidos con el punto de aplicación de la carga, finalmente se colocó sobre el ladrillo, una placa rectangular igual a la ubicada en la cara inferior (Figura 97).



*Figura 96. Colocación de placas de metal sobre base de equipo para compresión axial*



*Figura 97. Colocación de ladrillo para prueba de compresión*

2. Se inició la prueba con aplicación de carga sobre el espécimen (*Figura 98*).



*Figura 98. Aplicación de carga*

3. Mientras se aplicaba la carga se verificaba que las agujas indicadoras se mantuvieran en aumento, en el momento que una de las ellas comenzaba a descender se dio por terminada, puesto que indicaba que la pieza había alcanzado su resistencia máxima (*Figura 99*). El último valor indicado por el equipo fue la lectura que se tomó para el registro de cargas soportadas (*Figura 100*).



*Figura 99. Presentación de la falla en el ladrillo*



*Figura 100. Toma de lectura de la carga máxima soportada por el ladrillo*

Se realizó el proceso descrito anteriormente para cada una de las piezas destinadas para la prueba, es importante señalar que la estructura de los ladrillos se mantuvo, lo cual indicó su alta capacidad de aplastamiento, sin presentar disgregación al momento de soportar la carga máxima de resistencia (Figura 101).



*Figura 101. Ladrillos probados manteniendo su estructura*

El resultado que presentó la máquina al final de cada prueba corresponde a la máxima resistencia de carga en kilogramos soportada por la pieza, dicho resultado se dividió entre

el área de la superficie (cm<sup>2</sup>) sobre la cual se aplicó la carga, obteniendo así la resistencia a la compresión en unidades de carga entre área, es decir, kg/cm<sup>2</sup>, correspondiente a la ecuación 1.

$$P = \frac{F}{A} \dots \dots \dots \text{Ecuación 1}$$

Donde:

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

F: Carga máxima soportada por la pieza en kg

A: Área de la superficie de la pieza en cm<sup>2</sup>

#### **4.3.5. Realización de pruebas de absorción**

Se realizó la evaluación técnica mediante pruebas de absorción máxima inicial, con base en la norma NMX-C-037-ONNCCE-2013. El procedimiento realizado se describe a continuación:

1. Se determinó el peso seco de cada ladrillo que sería sometido a la prueba, enseguida en un recipiente de forma rectangular con ancho y largo tales que su área no fuera menor a 1,936 cm<sup>2</sup> y profundidad mínima de 1.3 cm y se colocaron dos barras de metal de 13 cm de longitud y 6 mm de altura (Figura 102).



*Figura 102. Colocación de barras de metal en recipiente para prueba de absorción*

2. Se llenó el recipiente con agua potable de manera que el nivel del agua se encontrara entre 3 y 3.5 mm arriba del nivel superior de los apoyos, se ajustó la posición y nivel del agua con un ladrillo de referencia en estado saturado (Figura 103).



*Figura 103. Ajuste de niveles con ladrillo de referencia*

3. Posteriormente, se inició la prueba colocando el ladrillo en el recipiente, de manera tal que quedara 5 mm por debajo del nivel de agua (Figura 104), por un periodo de 10 minutos.



*Figura 104. Ladrillo en prueba de absorción*

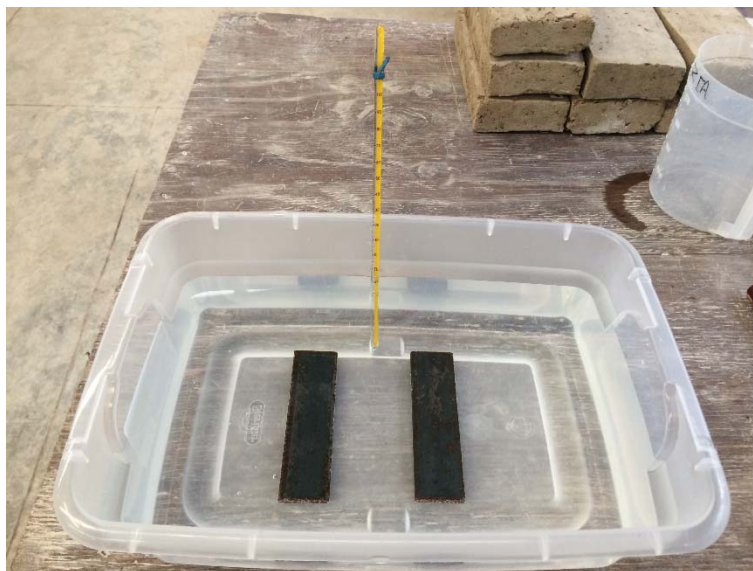
4. Al finalizar el tiempo de contacto se retiró la pieza del agua y se pesó inmediatamente (Figura 105), removiendo el exceso de agua con un trapo húmedo, no utilizando más de 10 segundos para llevar a cabo ambos procedimientos, con el fin de determinar la cantidad de agua absorbida por la pieza.



**Figura 105. Determinación de peso posterior al periodo de prueba**

Así mismo, se realizó la prueba de absorción total a pesar de que no se exige en la construcción de materiales con tierra debido a su conocido comportamiento ante la exposición total al agua. Se estableció una correlación del método establecido en la norma NMX-C-037-ONNCCE-2013 para determinar el porcentaje de absorción total, el procedimiento que se siguió fue similar al de la prueba de absorción máxima inicial, a diferencia que la pieza fue sumergida totalmente, dicha prueba se detalla a continuación.

Se colocaron las barras de metal al fondo del recipiente y se llenó con agua a una temperatura de 20°C suficiente para que la pieza en prueba se mantuviera sumergida (Figura 106).



**Figura 106. Preparación de recipiente para prueba de absorción total**

Se pesó cada pieza antes de ser sumergida y posteriormente se sumergió en el recipiente (Figura 107), cronometrando el tiempo de inicio de la prueba y monitoreando el tiempo para

realizar el pesaje de la pieza cada media hora, sacando la pieza del recipiente y secando el exceso de agua con un trapo húmedo, no utilizando más de 10 segundos para realizar este proceso y se regresó al recipiente.



*Figura 107. Sumersión de ladrillo*

El periodo total de la prueba dependió del momento en que cada pieza presentó ruptura o disgregación considerable (Figura 108), fue en ese instante en que se dio por terminada.



*Figura 108. Indicación de término de prueba de absorción total*

## 4.4. Fase IV: Fabricación de ladrillos Etapa II

### 4.4.1. Diseño de mezclas

El diseño de mezclas llevado a cabo en esta etapa se basó en el comportamiento presentado por las diferentes mezclas diseñadas en la etapa previa, seleccionando aquellas que mostraron mejor respuesta ante las pruebas de compresión y absorción de agua máxima inicial las cuales se consideraron como óptimas y se indican en la Tabla 18.

*Tabla 18. Diseño de mezclas Etapa II*

| Mezcla | Residuos<br>Excavación | Residuos<br>Tala | RC 1/4"<br>SC | RC 1/4"<br>TU | RC 3/8"<br>SC |
|--------|------------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|
| 6      | 62%                    | 4%               | 17%           | -             | 17%           |
| 7      | 62%                    | 4%               | -             | 17%           | 17%           |

RC: Residuos de construcción; SC: Solo cementantes; TU: Todo en uno.

### 4.4.2. Fabricación de ladrillos Etapa II

La fabricación de ladrillos en esta etapa se realizó siguiendo el proceso constructivo de la primera. El procedimiento de elaboración de las piezas tuvo ligeras variaciones, siendo la diferencia con mayor peso la utilización de una ladrillera mecánica la cual se menciona en apartados anteriores para lograr una mejor compactación, así como acelerar el tiempo de fabricación. El procedimiento seguido se describe a continuación:

1. El espacio para la fabricación de los ladrillos fue al interior del edificio 8 del Instituto de Ingeniería, con condiciones ambientales favorables, una temperatura de alrededor de 21°C con ausencia de lluvia. La mezcla líquida para la integración de los materiales fue preparada con antelación, para facilitar el proceso de integración de los materiales.
2. Se realizó el pesaje de las cantidades de material requerido para la mezcla correspondiente y se depositó en una bandeja de plástico (Figura 109) para su posterior mezclado. Paralelamente se alistaron las herramientas y equipo necesario para llevar a cabo la elaboración de los especímenes.



*Figura 109. Materiales constituyentes de la mezcla*

3. A continuación, se realizó el mezclado de los materiales en seco con ayuda de una espátula, hasta que los materiales formaran una mezcla tan homogénea como fuera posible. Una vez integrados los materiales en seco, se añadió la mezcla líquida con ayuda de la probeta graduada en cantidades parciales (Figura 110a), la cantidad de mezcla líquida fue determinada por las características físicas y visuales de la mezcla; se determinó que la mezcla estaba lista cuando tenía un aspecto pastoso (Figura 110b).



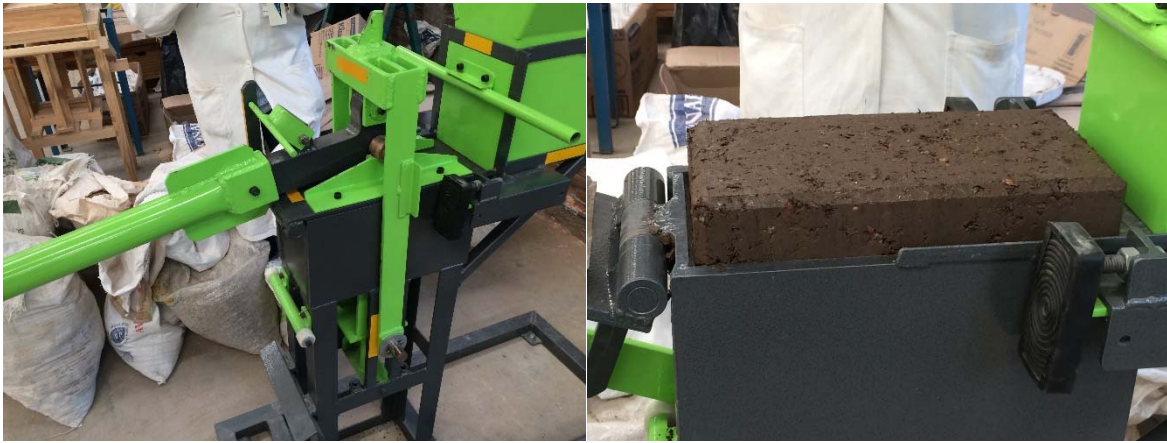
*Figura 110. a) Mezcla de agua-mucílago de nopal para integración de materiales; b) consistencia adecuada para la fabricación de ladrillos*

4. Se depositó el material en la tolva de la ladrillera para su posterior distribución en la cámara de prensado (Figura 111).



*Figura 111. Material dispuesto en la cámara de prensado*

5. Enseguida se cerró la cámara de prensado y se realizó la compactación con ayuda de la palanca con la que dispone la máquina (Figura 112a) y finalmente se realizó la extracción de las piezas (Figura 112b).



*Figura 112. a) Compactación de la mezcla en la cámara de prensado; b) Extracción de espécimen*

Los elementos fabricados se pesaron en estado fresco con ayuda de una báscula y se determinaron las dimensiones de cada una con ayuda de un flexómetro. Los especímenes al igual que en la fase de fabricación previa, se dejaron secar al aire libre durante tres días para lograr la mayor pérdida de agua posible antes de introducirlos al secador solar.

Cuando se cumplió el tiempo de exposición al aire libre se introdujeron los especímenes al secador solar el cual estuvo dotado de igual manera de los sensores mencionados en la fase de fabricación previa. Se realizó el monitoreo de temperatura interior y exterior, así como la radiación solar durante el periodo establecido, con la finalidad de determinar el periodo de secado de las piezas y medir el rendimiento del secador (temperatura máxima que alcanzó la cámara de secado y radiación solar máxima que pudo captar).

#### **4.4.3. Realización de pruebas de resistencia a compresión**

Para llevar a cabo las pruebas de compresión fue necesario realizar el proceso de cabeceo de las piezas, el cual se describe en la fase de fabricación previa.

Cuando todas las piezas estuvieron cabeceadas se trasladaron al laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería para llevar a cabo las pruebas. Paralelamente se preparó el equipo colocando las placas necesarias para que las piezas se encontraran a la altura y posición adecuada y poder aplicar la carga de manera concéntrica. El proceso seguido se describe a continuación.

1. Se colocó la pieza sobre las placas de acero previamente ubicadas en la máquina y a continuación se colocó una placa más sobre la pieza (Figura 113) cuidando que la posición y alineación tanto del ladrillo como de las placas fuese correcta para asegurar la aplicación de la carga de manera correcta.



*Figura 113. Adecuación de placas de acero para alineación de espécimen*

2. Una vez que la pieza estaba en la posición adecuada se inició la prueba con la aplicación de la carga, ésta se detuvo al momento en que una de las agujas indicadoras se separaba de la otra (Figura 114a) lo cual indicaba la que el espécimen había llegado a su resistencia máxima (Figura 114b).



*Figura 114. a) Separación de las agujas indicadoras; b) Presentación de la falla en espécimen*

Este procedimiento fue aplicado a todos los especímenes reservados para la prueba de resistencia a compresión.

El cálculo de la resistencia a compresión se hizo con la *Ecuación 1* señalada en apartados anteriores, dividiendo la carga en kg soportada por la pieza (la cual es la indicada en la máquina) entre el área de la superficie de la pieza.

#### **4.4.4. Realización de pruebas de absorción de agua máxima inicial**

La determinación de la absorción de agua máxima inicial de las piezas se llevó a cabo realizando el proceso descrito en la fase previa el cual está basado en la norma NMX-C-037-ONNCCE-2013.

## 5. RESULTADOS

Los resultados obtenidos correspondientes a cada fase de la metodología se presentan a continuación:

### 5.1. Resultados Fase I. Normativa aplicable en la evaluación de la calidad para ladrillos y bloques

El Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), establece las especificaciones enfocadas en la evaluación de la calidad de los materiales que contienen los requerimientos para bloques y ladrillos, entre ellas las normas de calidad con las cuales se evaluaron los ladrillos de la presente tesis y se presentan en la Tabla 19.

*Tabla 19. Normas empleadas en la evaluación de la calidad de los ladrillos fabricados*

| NORMA            | AÑO  | CONTENIDO                                                                                                                                             |
|------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NMX-C-036-ONNCCE | 2013 | 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 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-Bloques, tabiques o ladrillos para uso estructural-Especificaciones.                                                     |

#### 5.1.1. Especificaciones de la normativa de evaluación para ladrillos y bloques

La norma NMX-C-441-ONNCCE-2013 especifica los requerimientos mínimos para piezas de construcción de uso no estructural en cuanto al cumplimiento de resistencia a compresión y absorción de agua máxima inicial para bloques, tabiques o ladrillos y tabicones, los cuales se deben encontrar dentro de los parámetros que se presentan en la Tabla 20 y la Tabla 21 respectivamente.

**Tabla 20. Valores de resistencia a la compresión establecidos en la NMX-C-441-ONNCCE-2013**

| Tipo de pieza      | Configuración       | Resistencia media |                    | Resistencia mínima individual |                    |
|--------------------|---------------------|-------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|
|                    |                     | MPa               | kg/cm <sup>2</sup> | MPa                           | kg/cm <sup>2</sup> |
| 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 21. Valores de absorción de agua máxima inicial establecidos en la NMX-C-441-ONNCCE**

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

## 5.2. Resultados Fase II: Diseño

La norma NMX-C-441-ONNCCE-2013 establece las dimensiones de fabricación de ladrillos, dicha norma especifica que “*Las dimensiones de fabricación de las piezas deben cumplir con las siguientes dimensiones mínimas: 50 mm de alto, 70 mm de ancho y 190 mm de largo y las dimensiones reales no deben diferir en más de  $\pm 3$  mm en cualquier dimensión con respecto a las de fabricación.*”

Las dimensiones de fabricación promedio por unidad de ladrillo de ambas etapas fueron las indicadas en la Tabla 22.

**Tabla 22. Resultados de las dimensiones de fabricación de ambas etapas**

| Dimensiones de fabricación |          |           |
|----------------------------|----------|-----------|
|                            | Etapas I | Etapas II |
| Grueso                     | 55 mm    | 55 mm     |
| Tizón                      | 120 mm   | 150 mm    |
| Soga                       | 260 mm   | 300 mm    |

Con las dimensiones anteriores se corrobora el cumplimiento de los lineamientos establecidos en la norma NMX-C-441-ONNCCE-2013.

Con base en los parámetros examinados, se definió la proporción de materiales para la fabricación de los ladrillos, la cual se presenta en la Tabla 23.

**Tabla 23. Proporción de materiales para la fabricación de ladrillos**

| Material                 | Proporción (%) |
|--------------------------|----------------|
| Arcilla                  | 62             |
| Residuos de construcción | 34             |
| Residuos de tala         | 4              |
| Agua-mucílago de nopal   | 20-23          |

Cabe resaltar que en el caso de esta investigación los residuos de construcción de 1/4" a finos, cumplieron la función de arena en las mezclas.

### 5.3. Resultados Fase III: Fabricación de ladrillos Etapa I

Los primeros resultados obtenidos durante esta fase fueron el porcentaje de la parte líquida para cada una de las mezclas fabricadas, el cual fue determinado por las condiciones y las características de la mezcla al momento de su fabricación, estos porcentajes se presentan en la columna de color verde de la Tabla 24, los cuales van desde 15% hasta 24% del peso seco de la mezcla, a partir de esto se determinó un parámetro de adición de 20% a 23% como la cantidad adecuada para la realización óptima de la mezcla.

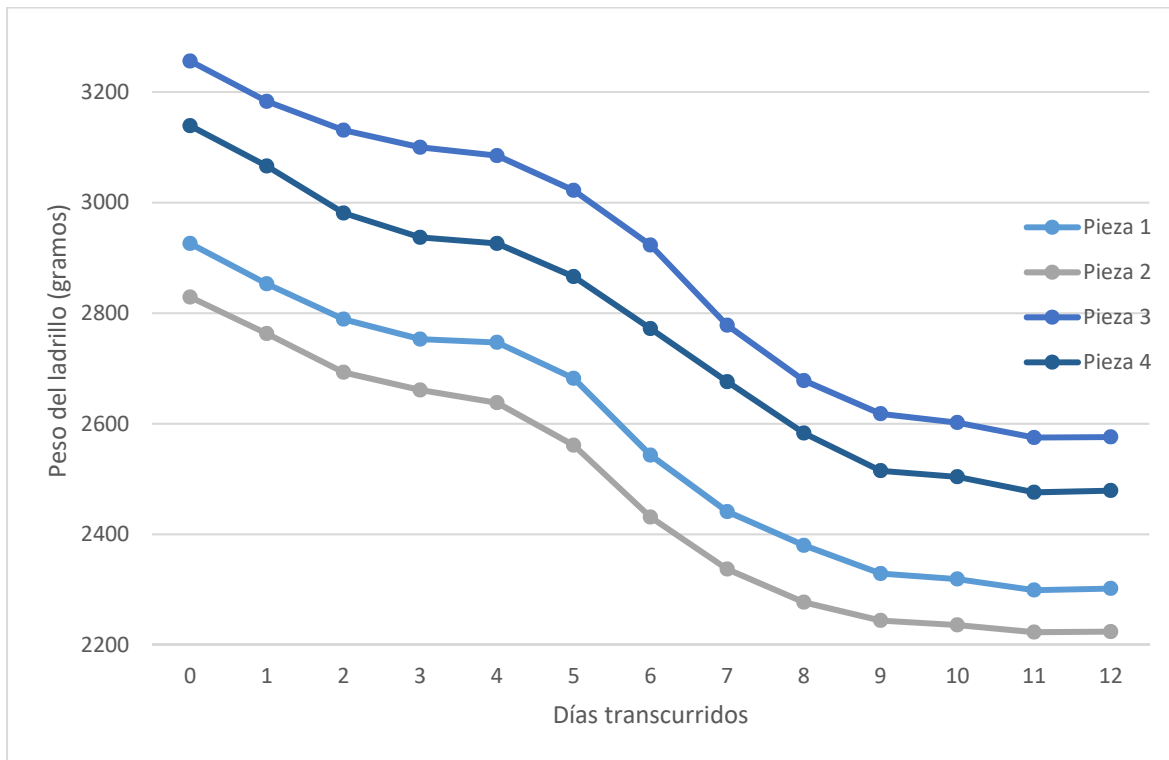
**Tabla 24. Porcentaje de agua-mucílago de nopal para cada mezcla diseñada**

| Mezcla | Residuos Excavación | Residuos Tala | RC 1/4" SC | RC 1/4" TU | RC 3/8" SC | RC 1" SC | Agua-mucílago |
|--------|---------------------|---------------|------------|------------|------------|----------|---------------|
| 1      | 62%                 | 4%            | 34%        | -          | -          | -        | 24%           |
| 2      | 62%                 | 4%            | -          | 34%        | -          | -        | 21%           |
| 3      | 62%                 | 4%            | -          | -          | 34%        | -        | 15%           |
| 4      | 62%                 | 4%            | -          | -          | -          | 34%      | 15%           |
| 5      | 62%                 | 4%            | 34%        | -          | -          | -        | 23%           |
| 6      | 62%                 | 4%            | 17%        | -          | 17%        | -        | 16%           |
| 7      | 62%                 | 4%            | -          | 17%        | 17%        | -        | 20%           |
| 8      | 63%                 | 4%            | 11%        | -          | 11%        | 11%      | 20%           |
| 9      | 63%                 | 4%            | -          | 11%        | 11%        | 11%      | 20%           |

RC: Residuos de construcción; SC: Solo cementantes; TU: Todo en uno.

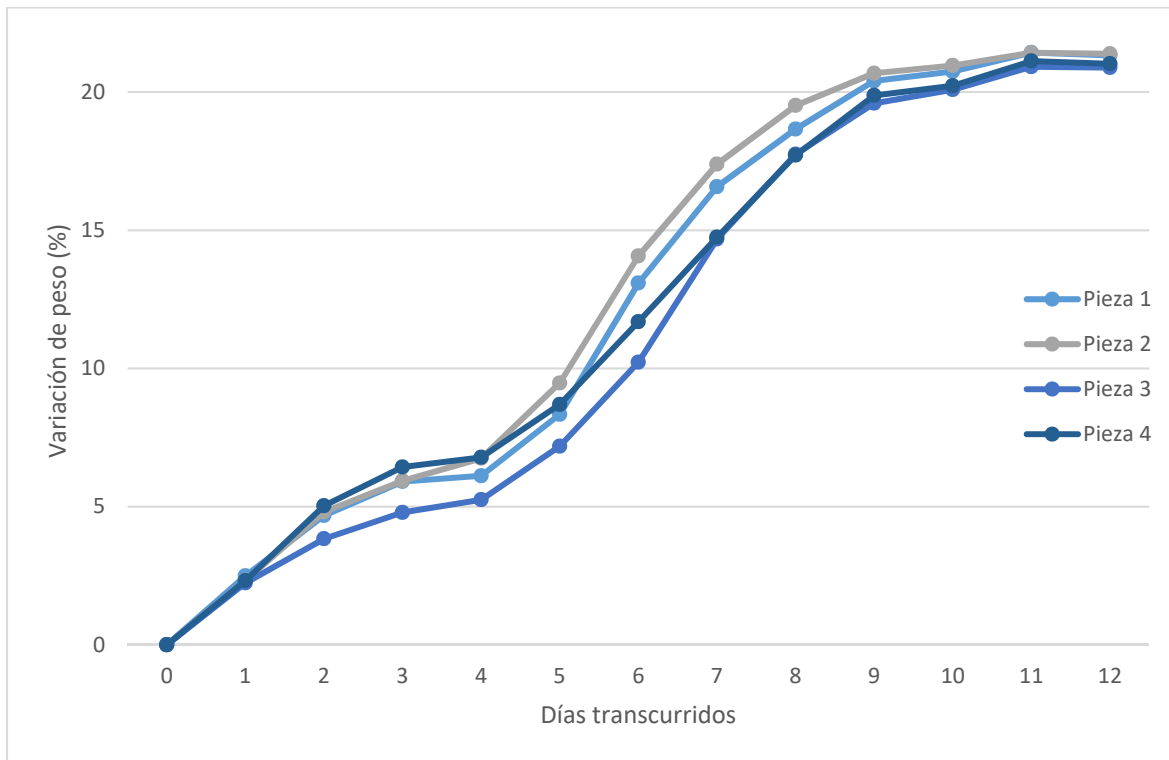
#### 5.3.1. Determinación del periodo de secado

La determinación del periodo de secado se logró al monitorear el peso diario de los ladrillos al finalizar el periodo previamente establecido, se consideró que la pieza estaba seca al momento de no presentar variación de peso o que la variación era mínima entre un día y otro. Los resultados, presentados en la Figura 115, los cuales corresponden a valores para los especímenes de la mezcla 6, indican que se secaron a los 11 días posteriores a su fabricación, exponiéndolos 3 días al aire libre y 8 días en el interior del secador solar.



*Figura 115. Variación de peso diario mezcla 6 Etapa I*

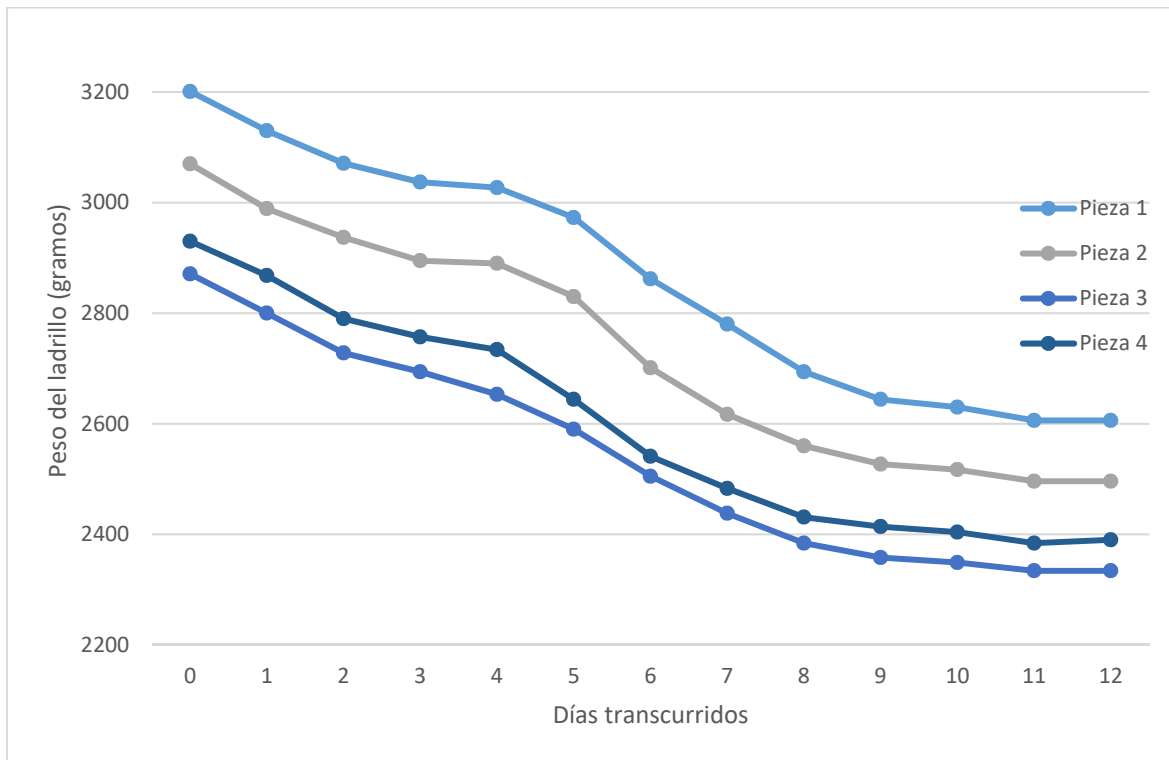
Por otro lado, se presenta en la Figura 116 la evolución de las pérdidas de peso expresadas en porcentaje, en la que se evidencia que existe similitud en el proceso de secado de todas las muestras de estudio; que en resumen se simplifica como una rápida y constante pérdida de humedad hasta los 8 días, para después pasar a ser reducida a mínima en los siguientes 4.



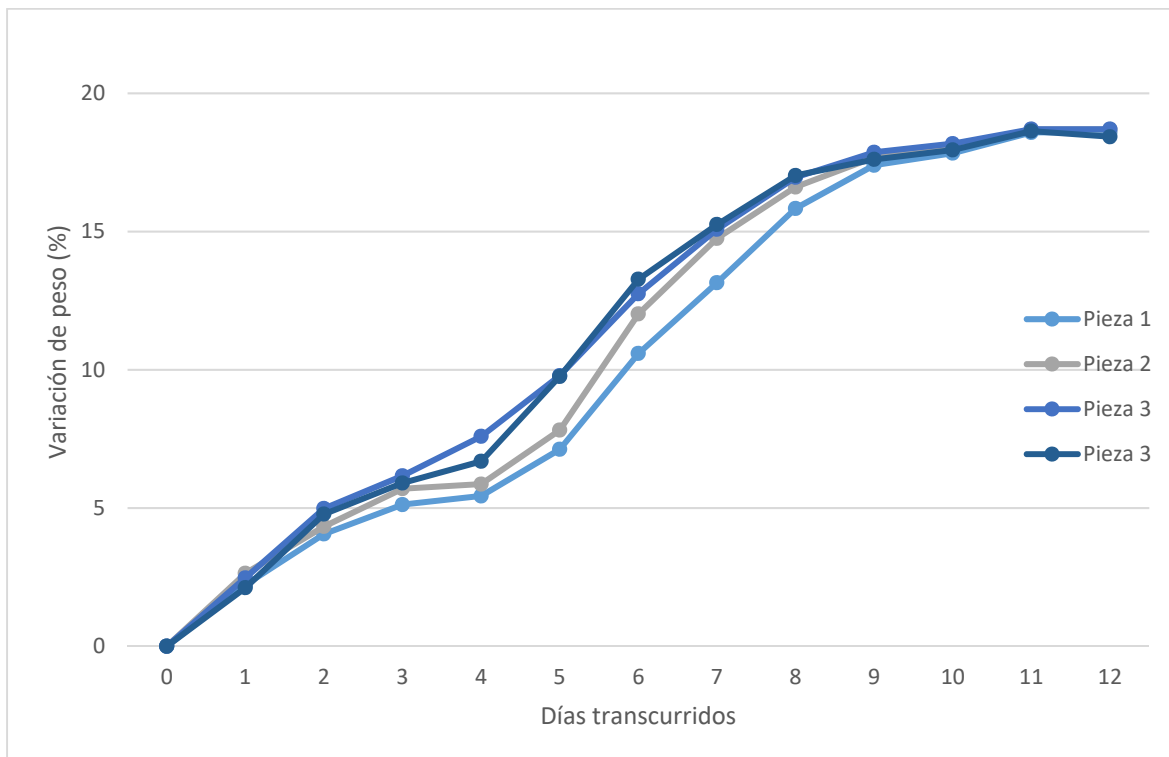
**Figura 116. Variación porcentual de peso diario mezcla 6 Etapa I**

De manera paralela se realizó el monitoreo de la variación de peso de las piezas de la mezcla 7 el cual se presenta en la Figura 117, en la que se observa que todas las piezas tienen un comportamiento similar entre ellas respecto a la disminución del peso día con día, concretando el secado a los 11 días subsecuentes a la fabricación.

Así mismo al llevar a cabo el análisis de la evolución de peso diario se pudo determinar el porcentaje de pérdida de peso total el cual se presenta en la Figura 118, se observó una pérdida del orden del 20%.



*Figura 117. Variación de peso diario mezcla 7 Etapa I*

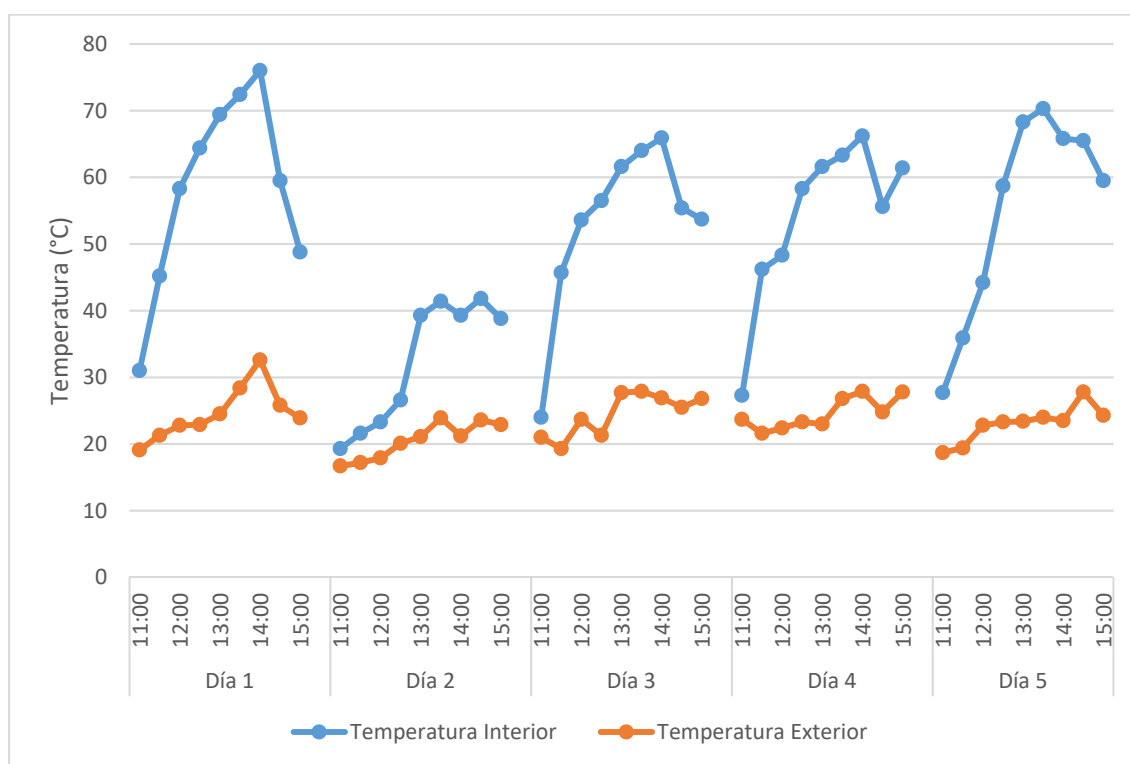


*Figura 118. Variación porcentual de peso diario mezcla 7 Etapa I*

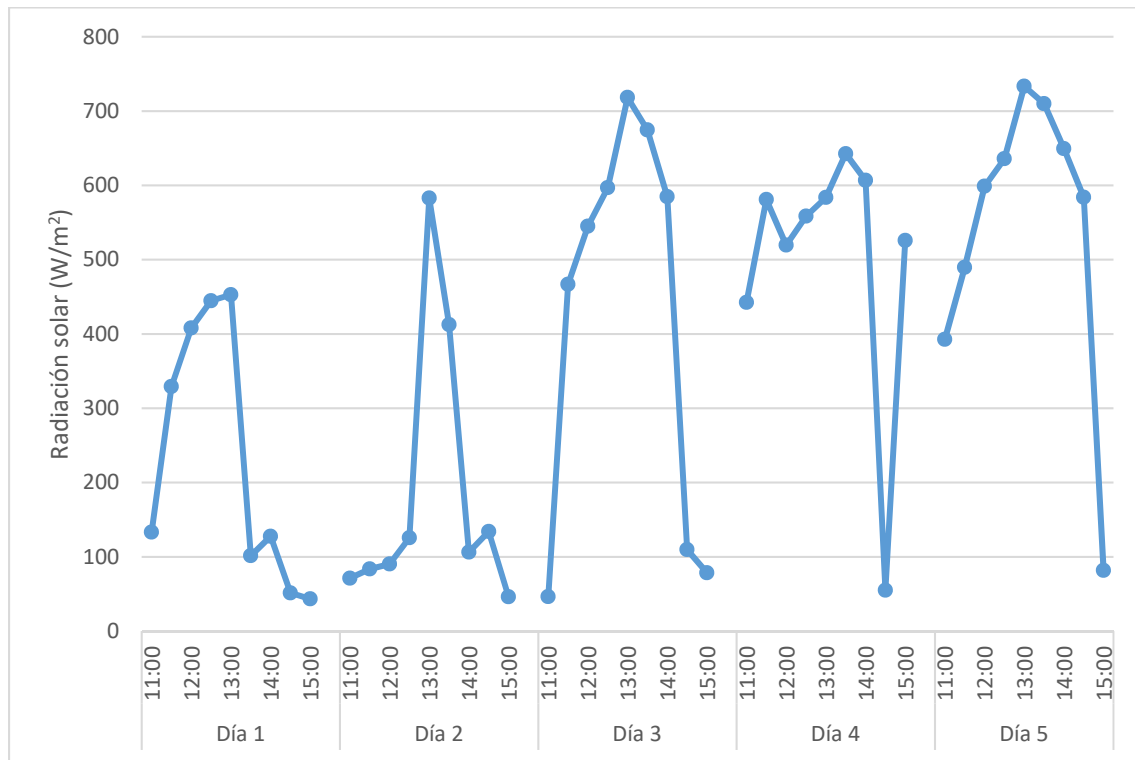
### 5.3.1.1. Condiciones presentadas por el secador solar

Con la ayuda de los sensores de medición fue posible determinar la temperatura máxima que pudo alcanzar el interior del secador solar, así como la radiación solar captada, detalladas en la Figura 119 y la Figura 120 respectivamente.

Se muestra la variación que se presentó en un periodo de 5 días por un lapso de análisis de 4 horas diarias con toma de lecturas a cada 30 minutos, 76°C fue la temperatura máxima que alcanzó el secador y 21.1°C fue la mínima, lo que indicó un comportamiento aceptable al lograr secar las piezas en poco tiempo (9 días al interior), cabe destacar que ambas se presentaron en condiciones soleadas y la estación del año en la cual se realizó el análisis fue otoño. La radiación solar máxima captada por del secador fue de 733.4 W/m<sup>2</sup> en condiciones soleadas y la mínima 43.3 W/m<sup>2</sup> en condiciones nubladas.



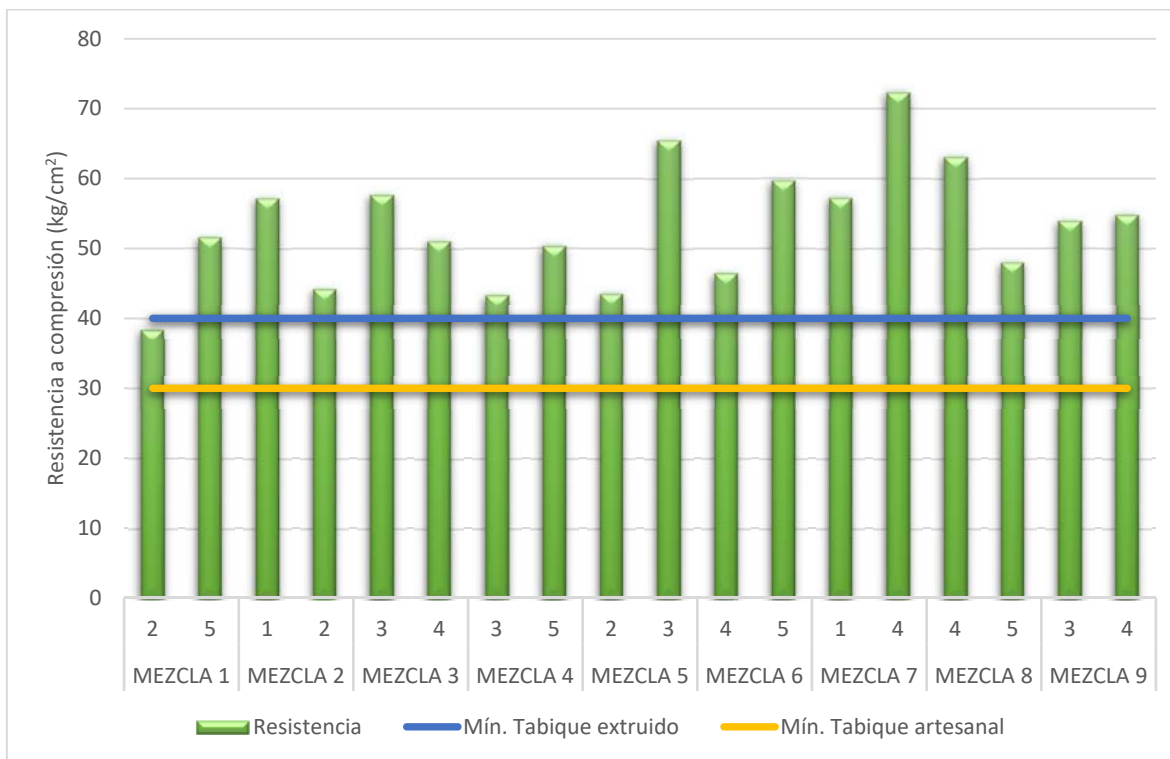
*Figura 119. Condiciones de temperatura respecto al periodo de secado Etapa I*



**Figura 120. Radiación solar captada por el secador solar Etapa I**

### 5.3.2. Resistencia a la compresión Etapa I

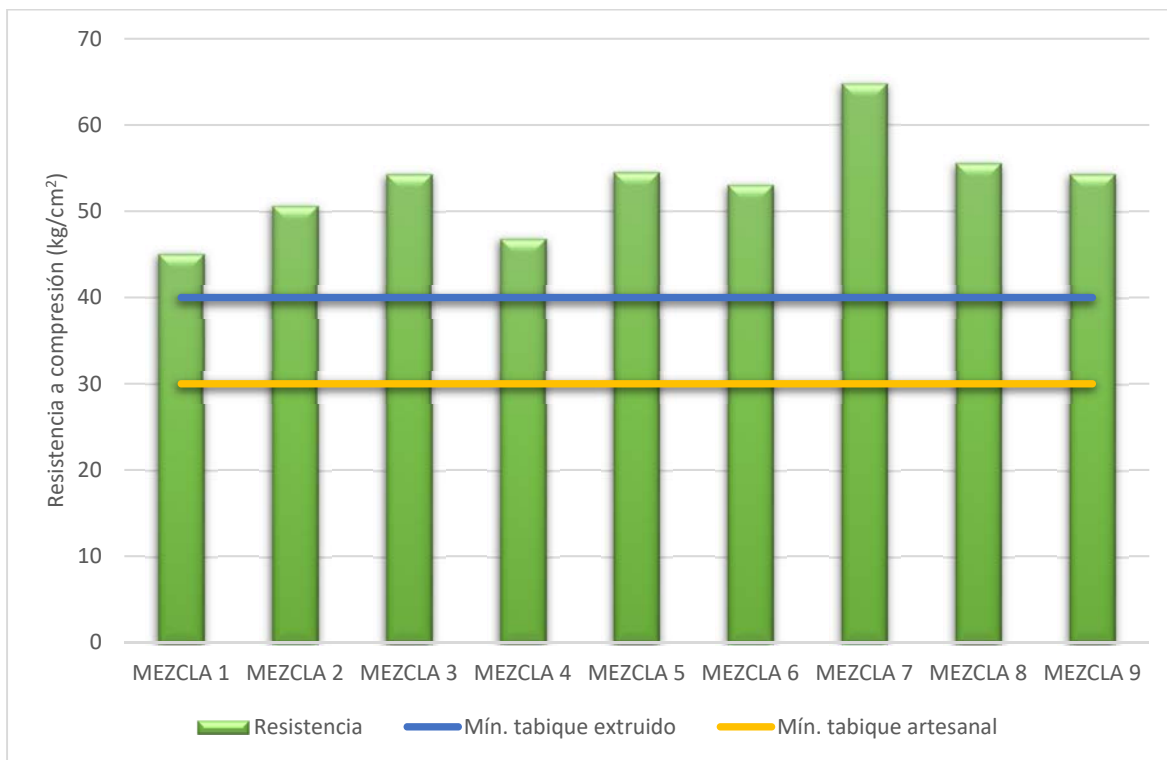
La realización de las pruebas de resistencia a compresión arrojó los resultados que se muestran en la Figura 121, los cuales corresponden a la aplicación de la *Ecuación 1* mencionada anteriormente.



**Figura 121. Resultados de resistencia a compresión Etapa I**

Con la finalidad de obtener un valor representativo para cada tipo de mezcla diseñada, se realizó un promedio por tipo de mezcla basado en los resultados anteriores y que se muestran en la Figura 122.

Estos resultados se tomaron como referencia para la evaluación entre los valores de resistencias obtenidas y los parámetros que establece la NMX-C-ONNCCE-441-2013. Se observa que todas las mezclas diseñadas cumplieron satisfactoriamente con el valor mínimo tanto para tabique artesanal y para tabique extruido, los cuales son de 30 kg/cm<sup>2</sup> y 40 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente.



**Figura 122. Resultados de resistencia a compresión promedio por mezcla diseñada Etapa I**

Cabe destacar la resistencia alcanzada por las mezclas 3, 5, 6, 7 y 8, en las cuales predominaron granulometrías para los residuos de construcción, de 3/8", 1/4" a finos solo cementantes y 1/4" a finos todo en uno, indicando un mejor comportamiento de resistencia que para las mezclas sin contenido de residuos de 1".

Las mezclas 6 y 7 integradas por residuos de construcción de 3/8" solo cementantes, 1/4" a finos todo en uno y 1/4" a finos solo cementantes presentaron valores de resistencia que cumplían con los parámetros mínimos establecidos por la normatividad mexicana, por lo que se consideraron como las mezclas óptimas. Este comportamiento se atribuye a la poca cantidad de huecos en las mezclas puesto que los espacios formados entre los residuos de 3/8" fueron perfectamente ocupados por los residuos de 1/4" a finos y en conjunto con los residuos de excavación, y en consecuencia comportándose mejor ante la exposición de carga.

Para el caso de las mezclas 3 y 5 a pesar de contener una sola granulometría de residuos de construcción su comportamiento en cuanto a resistencia fue superior en comparación a otras mezclas, esto se atribuye a que los residuos de construcción utilizados fueron de 3/8" y 1/4" a finos respectivamente, ambos solo cementantes, los cuales pudieron mejorar la resistencia y sujeción entre partículas puesto que provienen del concreto. Respecto a la mezcla 8 la resistencia alcanzada se encuentra entre los cuatro valores mayores, a pesar de que contiene granulometría de 1" y esto ocasionó una cantidad considerable de huecos los cuales no fueron completamente ocupados por las demás granulometrías, todos los residuos que integraron la mezcla fueron procedentes de concreto, lo que hace suponer que fue ese aspecto lo que ayudó al comportamiento de la mezcla.

### 5.3.2.1. Condiciones óptimas de fabricación

A partir del análisis de los resultados anteriores, se determinaron las condiciones óptimas de fabricación presentadas en las Figura 123a y b respectivamente, las cuales pertenecen a la mezcla 6 y 7, puesto que se obtuvieron resistencias de entre 45 kg/cm<sup>2</sup> a 70 kg/cm<sup>2</sup>, además de una buena trabajabilidad al momento de la fabricación de las mezclas y después del periodo de secado elementos de consistencia sólida.

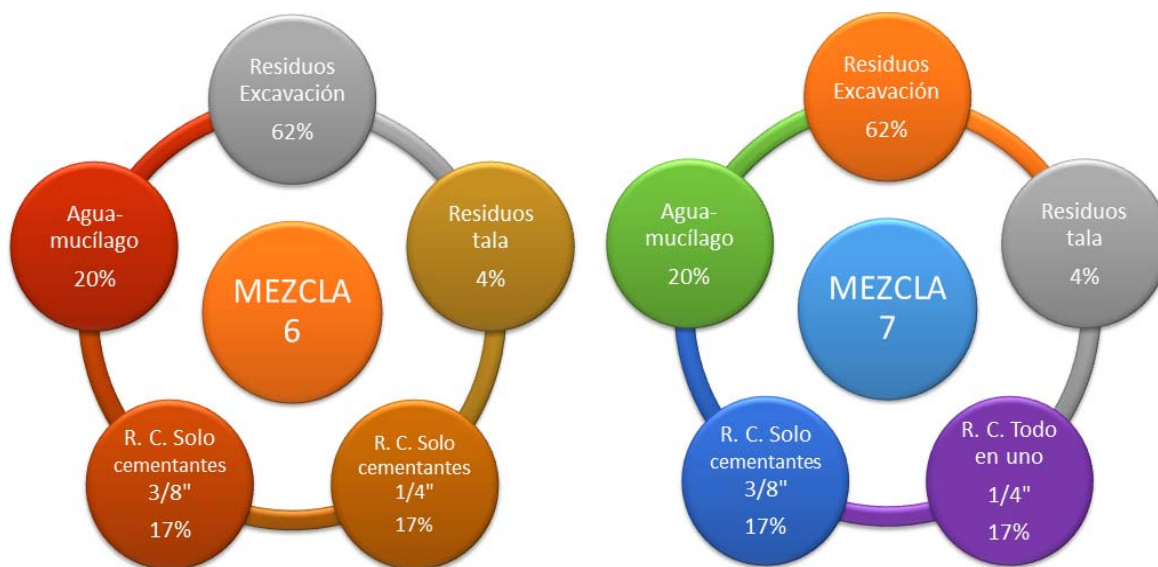
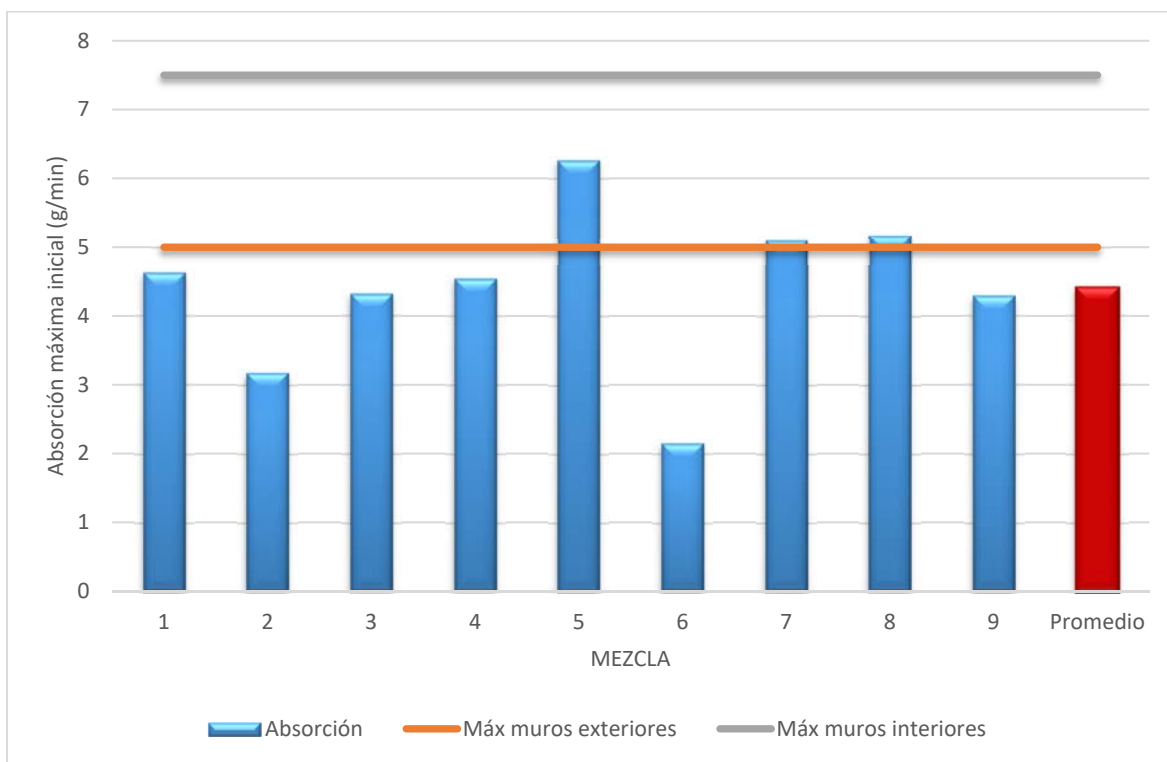


Figura 123. a) Condiciones óptimas de fabricación mezcla 6; b) Condiciones óptimas de fabricación mezcla 7

### 5.3.3. Absorción de agua máxima inicial Etapa I

Los resultados de la prueba de absorción máxima inicial se muestran en la Figura 124, éstos indicaron que las mezclas 5, 7 y 8 rebasan el límite máximo aceptado de absorción inicial para muros expuestos al exterior, sin embargo, el promedio de todas las mezclas fabricadas fue de 4 g/min, cumpliendo así los lineamientos de la norma NMX-C-037-ONNCCE-2013 la cual establece que el límite máximo para muros expuestos al exterior es de 5 g/min y el límite máximo para muros interiores o con recubrimiento es de 7.5 g/min.



*Figura 124. Resultados de absorción de agua máxima inicial Etapa I*

### 5.3.3.1. Absorción total

La absorción total se presentó en promedio después de una hora de sumersión total, registrando una absorción mínima del 5% y una absorción máxima del 12%, las cuales se detallan en la Tabla 25, cabe resaltar que la determinación de este parámetro resultó complicada puesto que los especímenes aumentaban de peso al absorber el agua del recipiente, pero perdían masa al irse disgregando de las esquinas. De este parámetro se concluye que los ladrillos se mantienen íntegros al estar sumergidos totalmente en agua por un periodo aproximado de 1 hora  $\pm$  5 minutos, con un porcentaje de absorción total entre 5% al 10%.

*Tabla 25. Resultados de absorción total*

|                                   | Mínima     | Máxima     |
|-----------------------------------|------------|------------|
| <b>Mezcla</b>                     | 4          | 7          |
| <b>Peso inicial</b>               | 2530 gr    | 2531 gr    |
| <b>Peso final</b>                 | 2645 gr    | 2820 gr    |
| <b>Hora inicial</b>               | 11:10 a.m. | 12:30 p.m. |
| <b>Hora final</b>                 | 12:02 p.m. | 13:33 p.m. |
| <b>Tiempo total</b>               | 52 minutos | 63 minutos |
| <b>Cantidad de agua absorbida</b> | 115 gr     | 289 gr     |
| <b>% Absorción total</b>          | 5%         | 12%        |

## 5.4. Resultados Fase IV: Fabricación de ladrillos Etapa II

Como se mencionó anteriormente, en esta fase se fabricaron piezas únicamente con las mezclas seleccionadas como óptimas, por lo que únicamente se reportan los porcentajes de la mezcla agua-mucílago de nopal, de las mezclas 6 y 7 las cuales se presentan en la Tabla 26 en la columna de color verde.

*Tabla 26. Diseño de mezclas Etapa II*

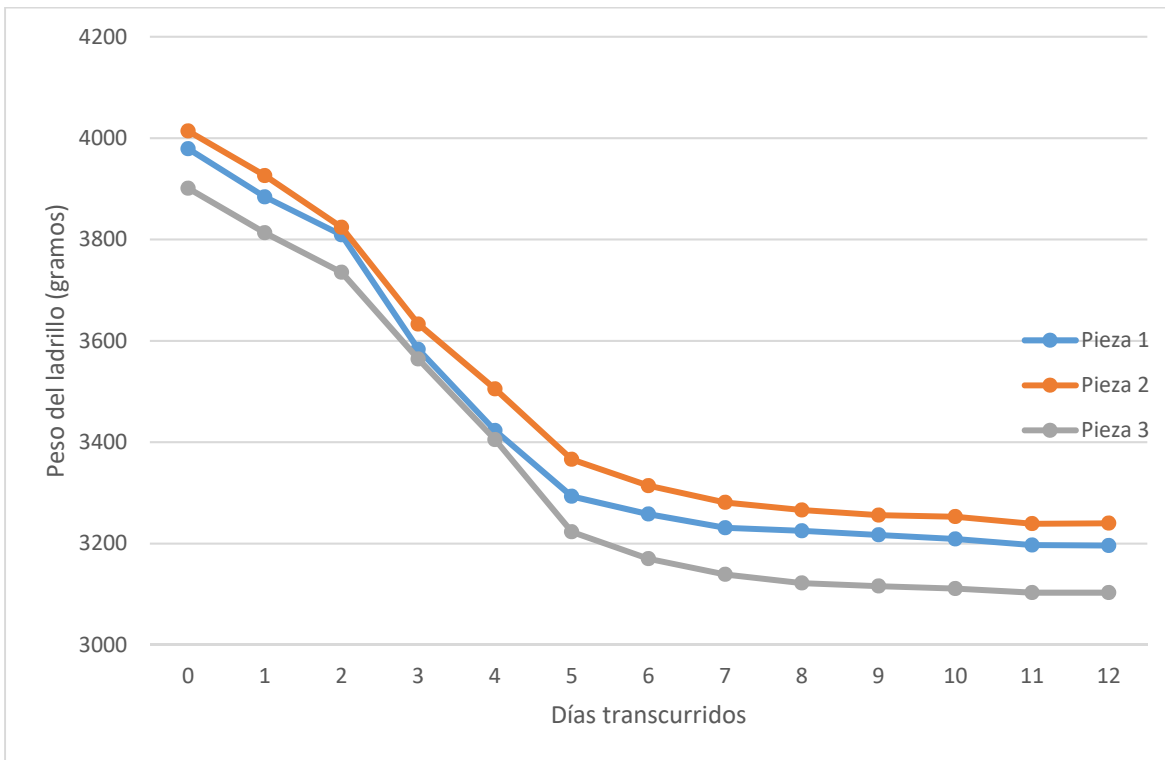
| Mezcla | Residuos Excavación | Residuos Tala | RC 1/4" SC | RC 1/4" TU | RC 3/8" SC | Agua-mucílago |
|--------|---------------------|---------------|------------|------------|------------|---------------|
| 6      | 62%                 | 4%            | 17%        | -          | 17%        | 19%           |
| 7      | 62%                 | 4%            | -          | 17%        | 17%        | 20%           |

RC: Residuos de construcción; SC: Solo cementantes; TU: Todo en uno.

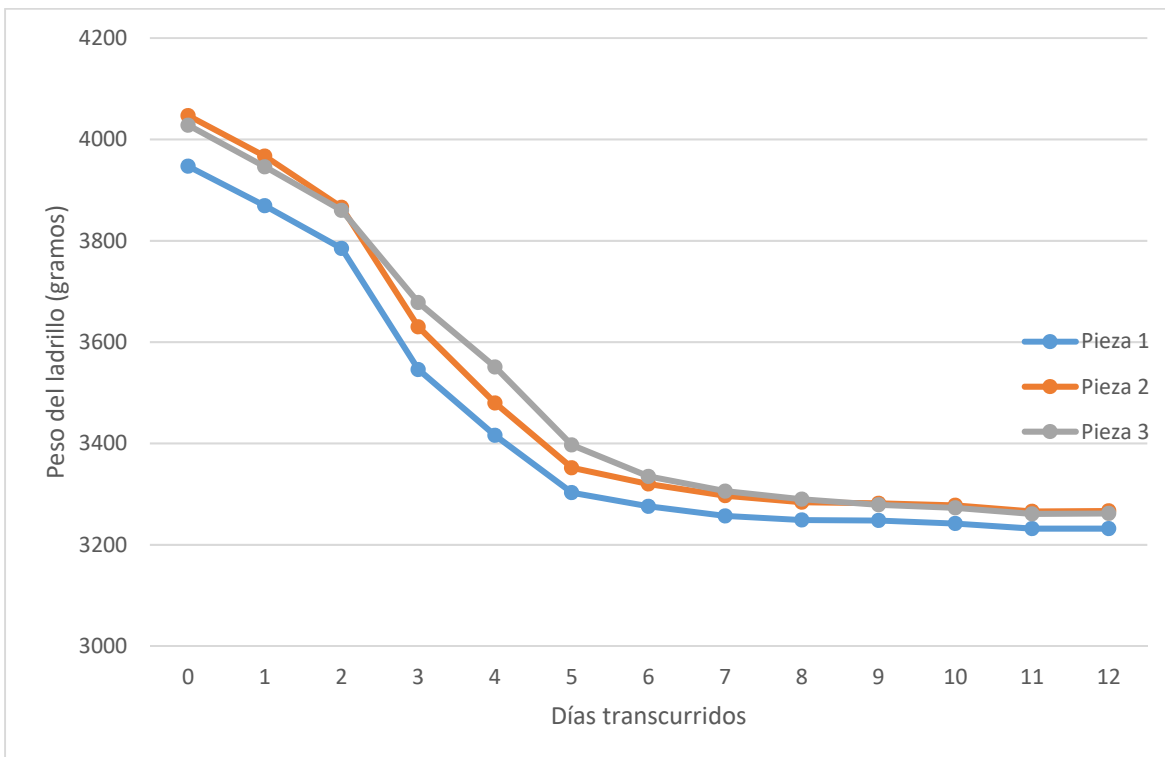
### 5.4.1. Determinación del periodo de secado

El monitoreo del peso diario al finalizar el periodo establecido (4 horas), de cada una de las piezas de esta fase fue indispensable para determinar el periodo de secado, esto se decretó al momento de no presentar variación de peso de un día a otro o la variación fuera casi nula. Los resultados se presentan en la Figura 125 y en la Figura 126 los cuales corresponden a las piezas de la mezcla 6 y mezcla 7 respectivamente. Tanto en la mezcla 6 como en la mezcla 7 se puede observar que el periodo de secado se presenta al mismo tiempo, es decir 11 días posterior a su fabricación, puesto que en el día número 12 el peso es el mismo o con una mínima variación (alrededor de 1 g) que el día anterior.

Este comportamiento fue el mismo que en la fase de fabricación previa, por lo que se establece que el rendimiento del secador solar para secar ladrillos es de 11 días posteriores a la fabricación, 3 días expuestos al aire libre y 8 días en la cámara de secado.



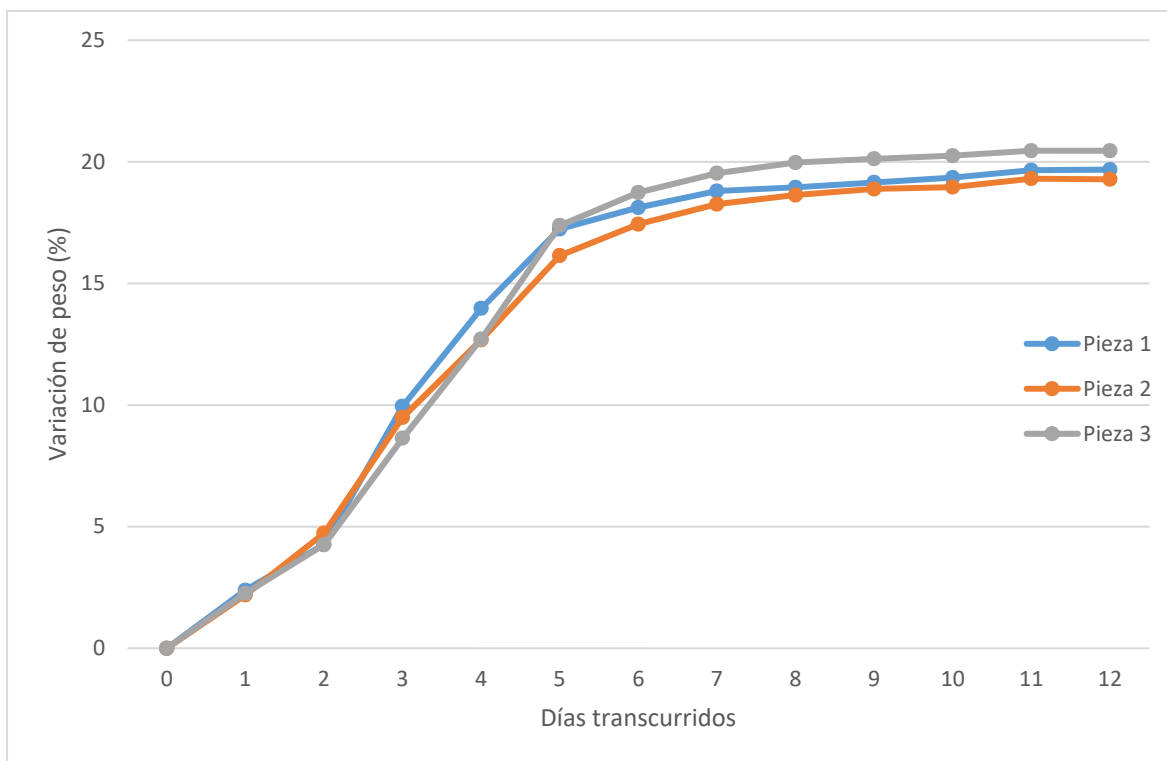
**Figura 125. Variación de peso diario mezcla 6 Etapa II**



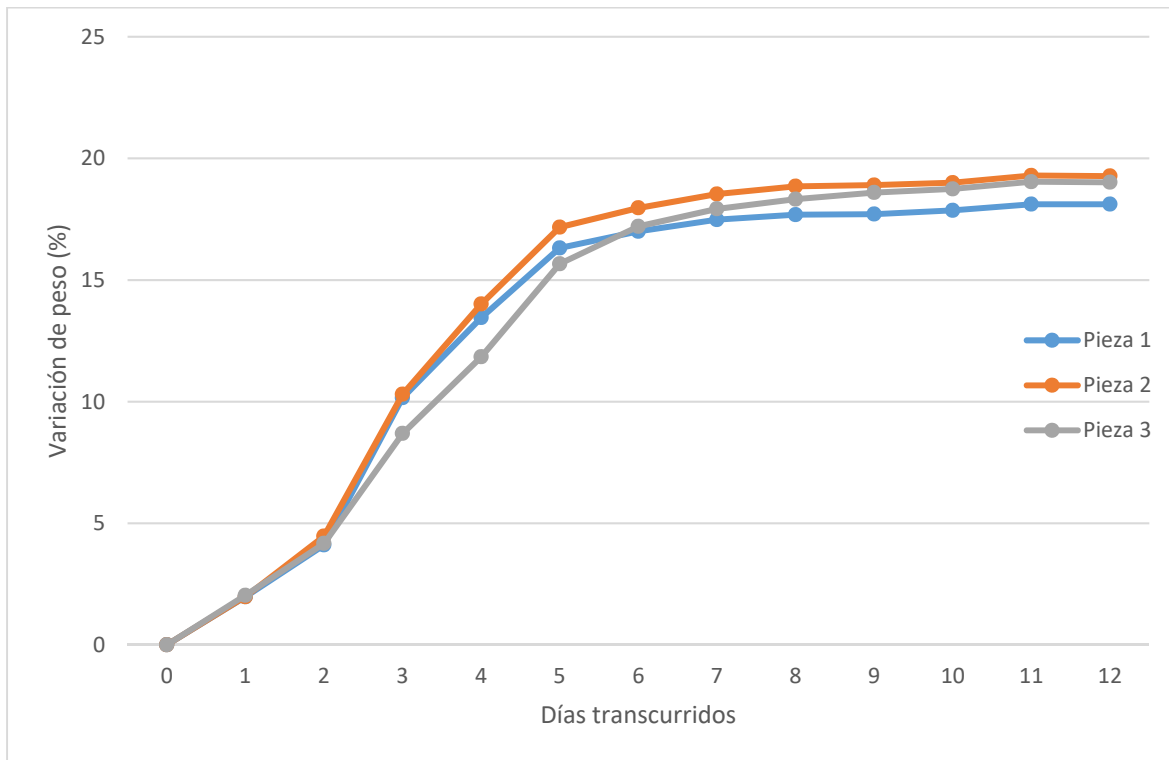
**Figura 126. Variación de peso diario mezcla 7 Etapa II**

Se determinó también el porcentaje de peso que pierden las piezas lo cual se puede observar en la Figura 127 y Figura 128 las cuales corresponden a las mezclas 6 y 7

respectivamente. La mezcla 6 presentó una pérdida del orden del 20% mientras que para la mezcla 7 fue del orden del 19%; aunque los resultados tuvieron una variación muy pequeña, al inicio se comportaron de manera similar pues se observa que en ambas mezclas es durante los primeros 5 días posteriores a la fabricación cuando pierden la mayor cantidad de peso, ya que pierden el 85% del total correspondiente y es en los 6 días restantes cuando pierden el 15% faltante.



**Figura 127. Variación porcentual de peso diario mezcla 6 Etapa II**

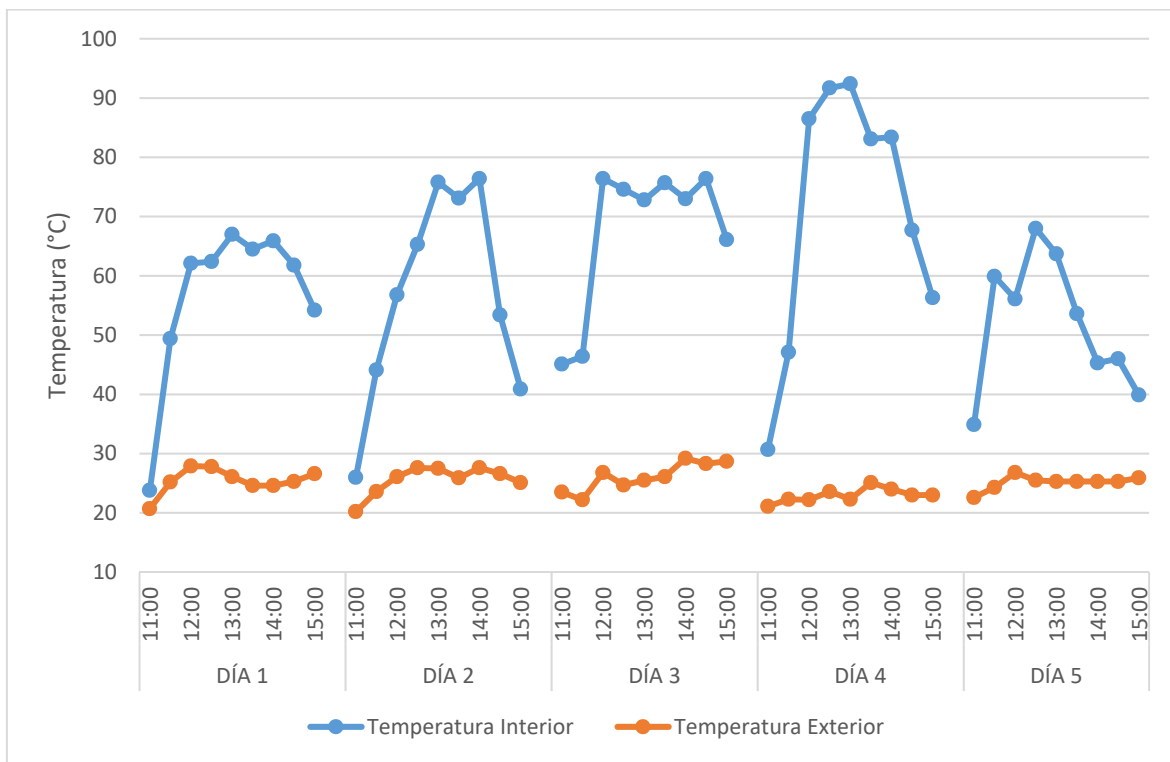


*Figura 128. Variación porcentual de peso diario mezcla 7 Etapa II*

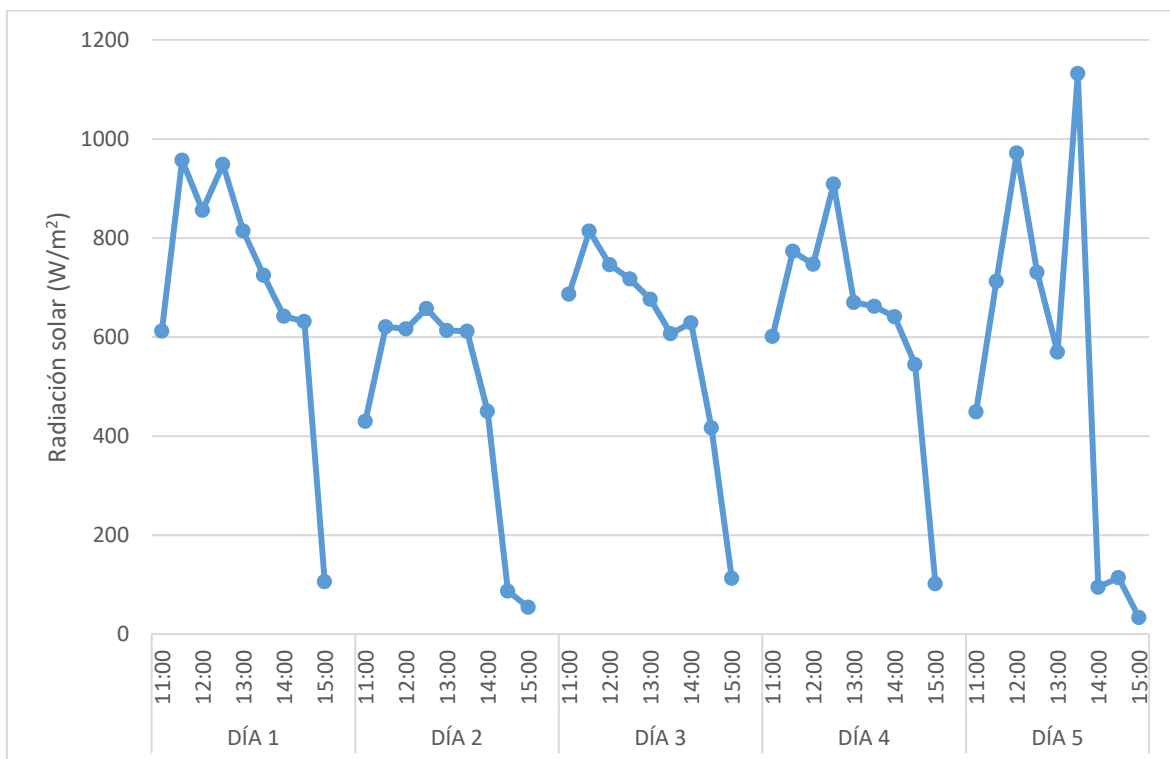
#### **5.4.1.1. Condiciones presentadas por el secador solar**

Las condiciones ambientales estuvieron directamente relacionadas con los resultados que presentó el secador solar puesto que a pesar de llevar a cabo las mediciones en invierno (enero) todos los días en que se realizaron las mediciones fueron soleados, y en la fase I los días fueron cambiantes, algunos días fueron soleados y otros nublados. En la Figura 129 se muestran las condiciones presentadas por el secador solar, la temperatura máxima interior fue de 92.4°C comparado contra la fase I en la que alcanzó 76°C y la mínima fue de 23.8°C comparado contra 21.1°C alcanzado en la fase I.

Así mismo, en la Figura 130 se muestra la radiación solar captada por el secador, la cual tuvo una captación máxima de 1132.2 W/m<sup>2</sup> comparado contra 733.4 W/m<sup>2</sup> de la fase I la mínima fue de 34.0 W/m<sup>2</sup> y en la fase I fue de 43.3 W/m<sup>2</sup>.



**Figura 129. Condiciones de temperatura respecto al periodo de secado Etapa II**

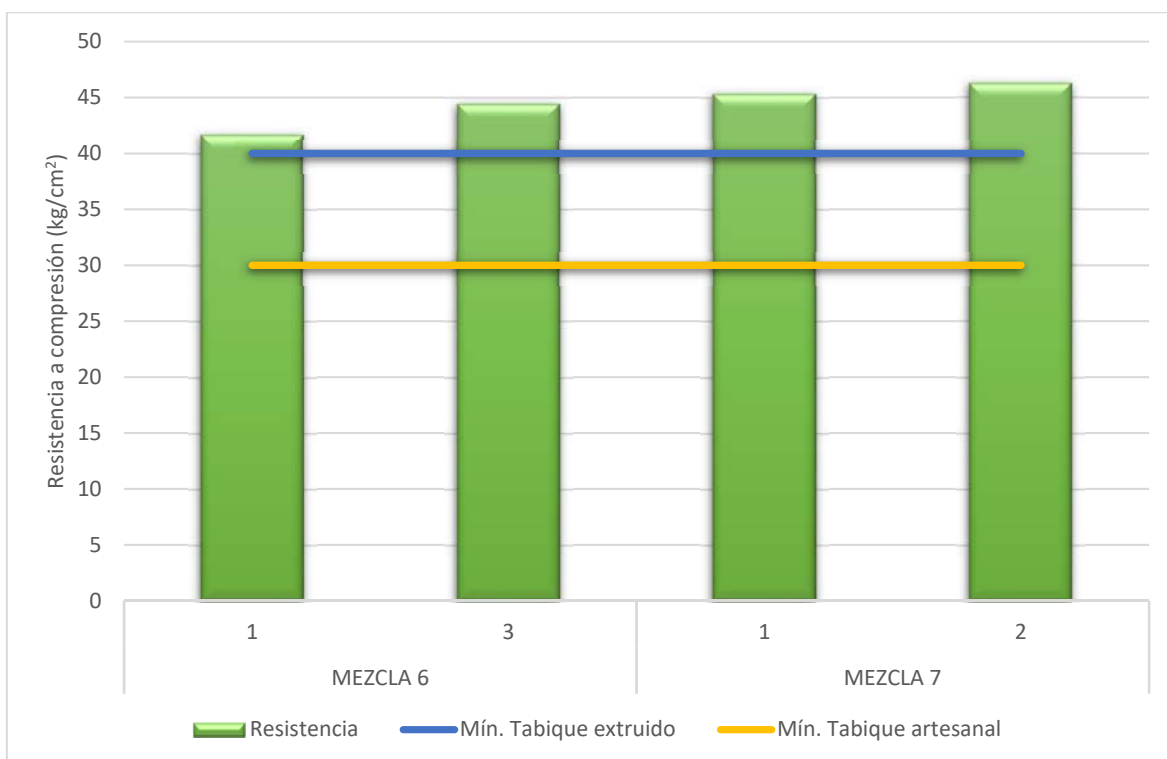


**Figura 130. Radiación solar captada por el secador solar Etapa II**

### 5.4.2. Resistencia a la compresión Etapa II

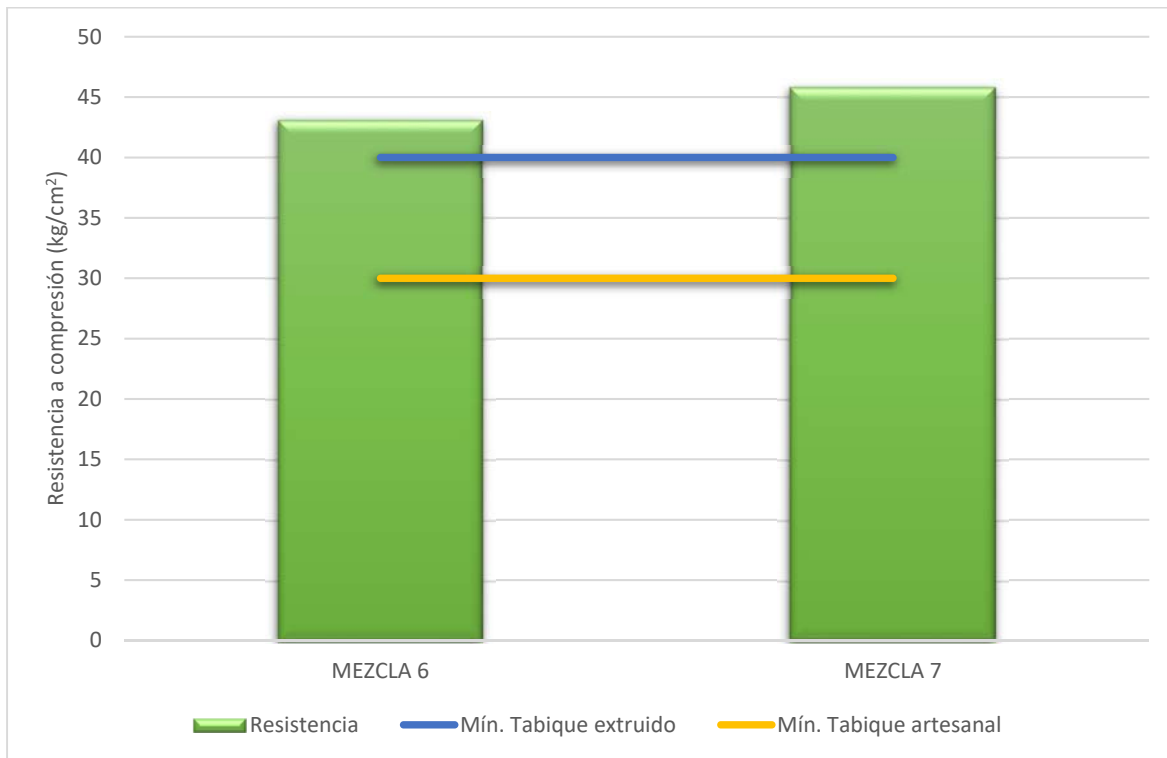
Los resultados de la resistencia a compresión alcanzada por las piezas de esta etapa se presentan en la Figura 131, los cuales fueron obtenidos con la aplicación de la Ecuación 1 detallada en apartados previos.

Se sometieron a prueba dos especímenes por cada mezcla, de las cuales se observa que todas las piezas alcanzaron las especificaciones mínimas requeridas establecidas por la norma NMX-C-441-ONNCCE-2013 para tabiques de fabricación artesanal ( $30 \text{ kg/cm}^2$ ) y para tabiques extruidos ( $40 \text{ kg/cm}^2$ ).



**Figura 131. Resultados de resistencia a compresión Etapa II**

Con el propósito de observar el comportamiento general de cada mezcla se realizó un promedio de las mezclas anteriores el cual se presenta en la Figura 132, en la cual se observa que la resistencia alcanzada para cada tipo de mezcla en efecto cumple con los requerimientos mínimos que exige la normatividad mexicana.

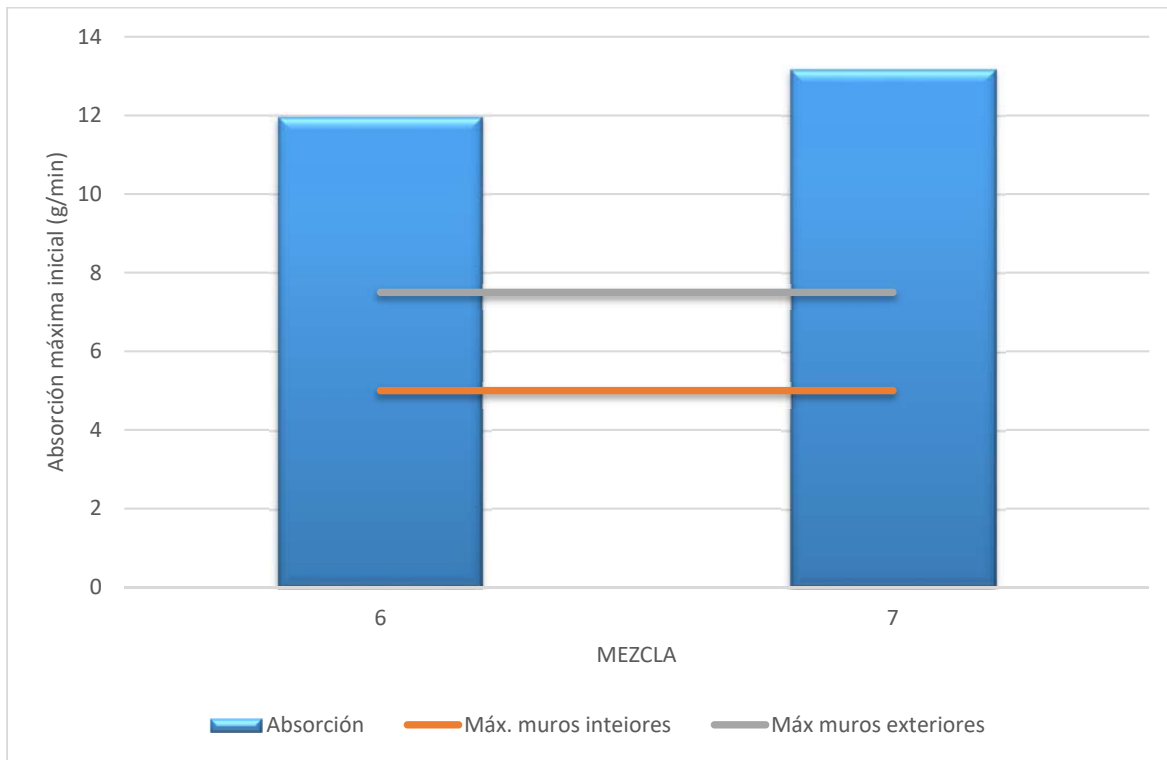


*Figura 132. . Resultados de resistencia a compresión promedio por mezcla diseñada Etapa II*

#### **5.4.3. Absorción de agua máxima inicial Etapa II**

Los resultados de la prueba de absorción de agua máxima inicial se muestran en la Figura 133, en la cual se observa que rebasan por mucho los límites máximos permisibles establecidos por la norma NMX-C-037-ONNCCE-2013 (5 g/min para muros exteriores y 7.5 g/min para muros interiores), estos resultados se atribuyen a que la compactación ejercida con la máquina utilizada en esta etapa no logró sellar suficientemente los huecos entre las arenas (residuos de excavación) y las gravas (residuos de construcción), resultado que también se ve reflejado en la disminución de la resistencia a compresión.

A pesar de los resultados obtenidos, las piezas no se consideran como rechazadas, sin embargo, en el apartado de recomendaciones se plantean las acciones a llevar a cabo para mejorar estos resultados.



*Figura 133. Resultados de absorción de agua máxima inicial Etapa II*

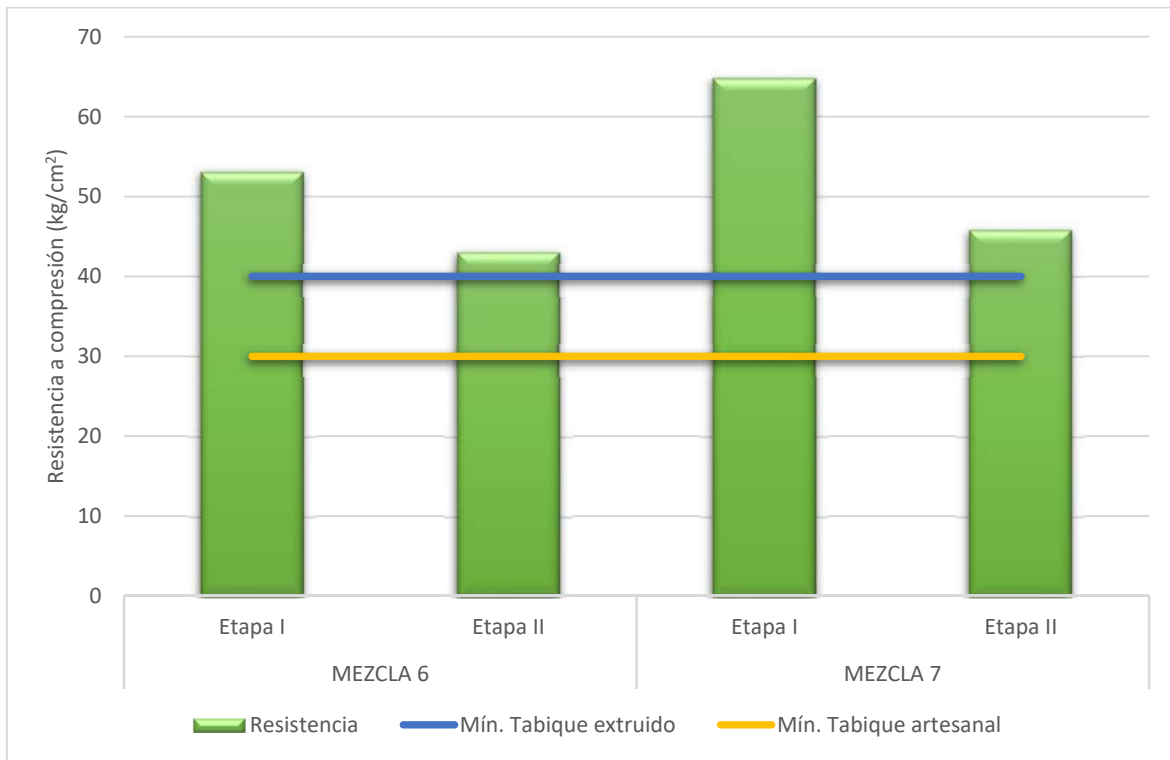
### 5.5. Comparativa de resultados entre ambas Etapas

Con el objetivo de analizar el comportamiento que tuvieron las mezclas seleccionadas como óptimas en ambas etapas se realizó la comparación de los resultados de resistencia a compresión y absorción de agua máxima inicial, los cuales se presentan a continuación:

#### Resistencia a compresión

La comparación de resultados de resistencia a compresión que presentaron ambas etapas se muestran en la Figura 134 en la que se puede observar una disminución de la resistencia de ambas mezclas para la segunda etapa, del orden del 19% para la mezcla 6 y 29% para la mezcla 7.

A pesar de que los resultados de la segunda etapa se mantuvieron por arriba de los límites mínimos establecidos por la normatividad el comportamiento no fue el esperado, puesto que al haber utilizado una máquina de carácter industrial para la fabricación de las piezas era deseable la mejora en la compactación de la mezcla y por ende se vería reflejado en el aumento de la resistencia a compresión, y caso contrario a lo que se especulaba la resistencia presentó una disminución. Este comportamiento se atribuye a que el hecho de utilizar agregados con granulometría de 3/8" no permitió que en la cámara de prensado se llevara a cabo la adecuada compactación, por lo que las piezas tuvieron huecos en su matriz que mermaron el rendimiento.

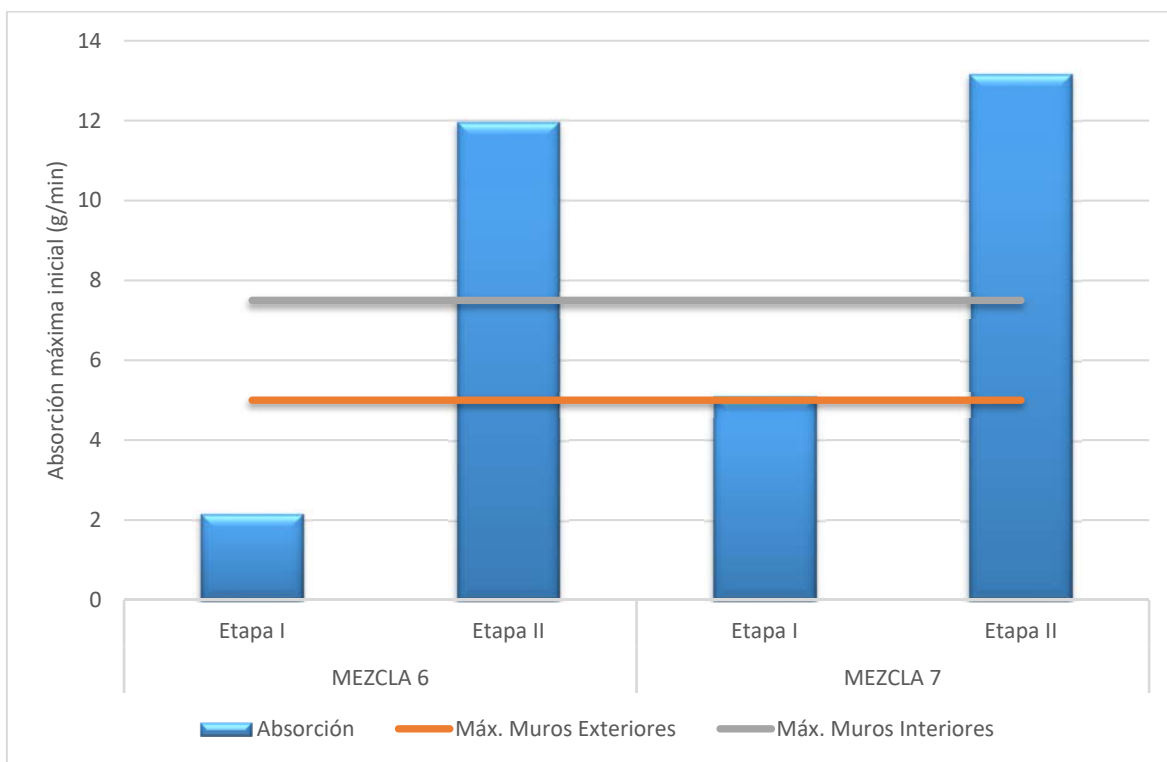


**Figura 134. Comparativa de resistencia a compresión**

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

La comparación de resultados de absorción de agua máxima inicial se muestra en la Figura 135. Los valores que presentaron las mezclas 6 y 7 de la segunda etapa superaron en un gran porcentaje (81% para la mezcla 6, 62% para la mezcla 7) a los de la primera etapa, los cuales superan los parámetros máximos permisibles por la normatividad mexicana para muros interiores y exteriores.

La idea de utilizar la máquina para fabricación de bloques se centró en la mejora de las propiedades mecánicas (resistencia a compresión, absorción de agua), sin embargo, la respuesta de los especímenes fue adversa; este comportamiento va de la mano con el análisis de la resistencia a compresión, los huecos en la matriz de los bloques causados por los residuos de construcción con granulometría de 3/8" provocaron una mayor permeabilidad en los especímenes, generando el aumento drástico de los valores de absorción de agua.



*Figura 135 Comparativa de absorción de agua máxima inicial*

## 5.6. Análisis económico

El análisis económico llevado a cabo en la presente investigación se basó en el cálculo del costo directo de fabricación por unidad de ladrillo descrito en la Etapa I el cual se muestra en la Tabla 27; la idea de considerar dicha configuración de pieza fue para poder compararla contra un material convencional, que en este caso fue el ladrillo rojo.

Se consideró un costo nulo para los residuos de excavación, así como para los residuos de tala dado que estos materiales fueron donados por TecnoAdobe y la planta de composta de la UNAM respectivamente; sin embargo, el precio de los agregados reciclados si fue considerado puesto que al llevar a cabo una producción a mayor escala es inminente la adquisición de estos materiales realizando la erogación correspondiente para su obtención (caso contrario con los residuos de excavación, puesto que en numerosas ocasiones los residuos de excavación que generan las diferentes obras no se comercializan y únicamente se disponen en bancos de tiro). El costo de los demás materiales y mano de obra fue obtenido de acuerdo a bases de datos actualizadas a mayo de 2017 en 00/MN.

Se observa que el costo directo de la mano de obra influye en más del 70% del costo total, por lo que se hace imprescindible la búsqueda de optimización de producción ya sea mediante técnicas de producción en masa como en el caso de los productores artesanales que alcanzan una producción de 200 a 500 unidades (Aquino 2015) o dotando el proceso con maquinaria y equipo que aceleren el proceso.

Tabla 27. Cálculo del costo directo por unidad de bloque ecológico

| CONCEPTO                                                                              |                                               |        |          |          | UNIDAD  |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------|----------|----------|---------|--------|
| Ladrillo Ecológico en ladrillera artesanal con mezcla líquida agua-mucilago de nopal. |                                               |        |          |          | Pieza   |        |
| MATERIALES                                                                            | DESCRIPCIÓN                                   | UNIDAD | CANTIDAD | COSTO    | IMPORTE | %      |
|                                                                                       | Agua de toma                                  | m³     | 0.0006   | \$26.99  | \$0.02  | 0.78%  |
|                                                                                       | Agregados reciclados 3/8"                     | m³     | 0.000198 | \$900.00 | \$0.18  | 9.22%  |
|                                                                                       | Agregados reciclados 1/4"                     | m³     | 0.000198 | \$74.00  | \$0.01  | 0.76%  |
|                                                                                       | Residuos de tala                              | kg     | 0.112    | \$0.00   | \$0.00  | 0.00%  |
|                                                                                       | Nopal                                         | kg     | 0.190    | \$2.00   | \$0.38  | 19.66% |
|                                                                                       | Residuos de excavación                        | kg     | 1.736    | \$0.00   | \$0.00  | 0.00%  |
|                                                                                       | Costo Directo Materiales (CDM) =              |        |          |          | \$0.59  | 30.42% |
| MANO DE OBRA                                                                          | CATEGORÍA                                     | UNIDAD | CANTIDAD | SR       | IMPORTE | %      |
|                                                                                       | Ayudante General                              | Jor    | 0.004    | \$160.08 | \$0.64  | 33.13% |
|                                                                                       | Ayudante General                              | Jor    | 0.004    | \$160.08 | \$0.64  | 33.13% |
|                                                                                       | Costo Directo Mano de obra (CDMO) =           |        |          |          | \$1.28  | 66.26% |
| MAQUINARIA Y EQUIPO                                                                   | CATEGORÍA                                     | UNIDAD | CANTIDAD | CH       | IMPORTE | %      |
|                                                                                       | Herramienta menor                             | %      | 5%       | \$1.28   | \$0.06  | 3.31%  |
|                                                                                       | Costo Directo Maquinaria y Equipo (CDM y E) = |        |          |          | \$0.06  | 3.31%  |
|                                                                                       | Costo Directo =                               |        |          |          | \$1.93  | 100%   |

Así también se realizó el cálculo del costo directo de 1 m<sup>2</sup> de muro construido con bloques ecológicos y de 1 m<sup>2</sup> de muro construido con ladrillo rojo presentados en la Tabla 28 y Tabla 29 respectivamente, a fin de poder hacer la comparación económica entre ambos elementos constructivos. Se observa que la construcción de 1 m<sup>2</sup> de muro con bloque ecológico es más económica (12%) que 1 m<sup>2</sup> de ladrillo convencional, esto se debe a la influencia que tiene el costo del ladrillo respecto al costo total correspondiente (45% bloque ecológico, 53% ladrillo rojo).

En consecuencia, la fabricación de este bloque ecológico atiende a la necesidad de la industria de la construcción de implementar materiales más económicos mediante la utilización de RCD y que su producción tenga un menor daño al ambiente puesto que al ser un bloque sin llevar un proceso de cocción éste no genera gases de efecto invernadero.

Tabla 28. Cálculo del costo directo de 1 m<sup>2</sup> de muro construido con bloque ecológico

| CONCEPTO                                                                                                         |                                               |        |          |           | UNIDAD   |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------|----------|-----------|----------|------|
| Muro de Ladrillo Ecológico de 5.5x12x26cm, juntado con mortero cal-arena 1:3 de 1 cm de espesor, acabado rústico |                                               |        |          |           | m²       |      |
| MATERIALES                                                                                                       | DESCRIPCIÓN                                   | UNIDAD | CANTIDAD | COSTO     | IMPORTE  | %    |
|                                                                                                                  | Mortero cal arena 1:3                         | m³     | 0.0222   | \$1512.82 | \$33.61  | 13 % |
|                                                                                                                  | Ladrillo ecológico de 5.5x12x26 cm            | millar | 0.0600   | \$1932.64 | \$115.96 | 45%  |
|                                                                                                                  |                                               |        |          |           |          |      |
|                                                                                                                  | Costo Directo Materiales (CDM) =              |        |          |           | \$149.57 | 58%  |
| MANO DE OBRA                                                                                                     | CATEGORÍA                                     | UNIDAD | CANTIDAD | S.R.      | IMPORTE  | %    |
|                                                                                                                  | Albañil                                       | Jor    | 0.1000   | \$607.08  | \$60.71  | 23%  |
|                                                                                                                  | Ayudante Albañil                              | Jor    | 0.1000   | \$358.35  | \$35.84  | 14%  |
|                                                                                                                  | Cabo                                          | Jor    | 0.0125   | \$685.90  | \$8.57   | 3%   |
|                                                                                                                  |                                               |        |          |           |          |      |
|                                                                                                                  | Costo Directo Mano de obra (C.D.M.O.) =       |        |          |           | \$105.12 | 40%  |
| MAQUINARIA Y EQUIPO                                                                                              | CATEGORÍA                                     | UNIDAD | CANTIDAD | CH        | IMPORTE  | %    |
|                                                                                                                  | Herramienta menor                             | %      | 5%       | \$105.12  | \$5.26   | 2%   |
|                                                                                                                  |                                               |        |          |           |          |      |
|                                                                                                                  | Costo Directo Maquinaria y Equipo (CDM y E) = |        |          |           | \$5.26   | 2%   |
| Costo Directo =                                                                                                  |                                               |        |          |           | \$259.95 | 100% |

Tabla 29. Cálculo del costo directo de 1 m<sup>2</sup> de muro construido con ladrillo convencional

| CONCEPTO                                                                                                              |                                               |        |          |           | UNIDAD   |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------|----------|-----------|----------|------|
| Muro de tabique rojo recocido de 6x12x24cm, juntado con mortero cemento-arena 1:5 de 1 cm de espesor, acabado rústico |                                               |        |          |           | m²       |      |
| MATERIALES                                                                                                            | DESCRIPCIÓN                                   | UNIDAD | CANTIDAD | COSTO     | IMPORTE  | %    |
|                                                                                                                       | Mortero cemento arena 1:5                     | m³     | 0.02133  | \$1330.34 | \$28.38  | 10%  |
|                                                                                                                       | Tabique rojo recocido de 6x12x24 cm           | millar | 0.0600   | \$2590.00 | \$155.40 | 53%  |
|                                                                                                                       |                                               |        |          |           |          |      |
|                                                                                                                       | Costo Directo Materiales (CDM) =              |        |          |           | \$183.78 | 62%  |
| MANO DE OBRA                                                                                                          | CATEGORÍA                                     | UNIDAD | CANTIDAD | S.R.      | IMPORTE  | %    |
|                                                                                                                       | Albañil                                       | Jor    | 0.1000   | \$607.08  | \$60.71  | 21%  |
|                                                                                                                       | Ayudante Albañil                              | Jor    | 0.1000   | \$358.35  | \$35.84  | 12%  |
|                                                                                                                       | Cabo                                          | Jor    | 0.0125   | \$685.90  | \$8.57   | 3%   |
|                                                                                                                       |                                               |        |          |           |          |      |
|                                                                                                                       | Costo Directo Mano de obra (CDMO) =           |        |          |           | \$105.12 | 36%  |
| MAQUINARIA Y EQUIPO                                                                                                   | CATEGORÍA                                     | UNIDAD | CANTIDAD | CH        | IMPORTE  | %    |
|                                                                                                                       | Herramienta menor                             | %      | 5%       | \$105.12  | \$5.26   | 2%   |
|                                                                                                                       |                                               |        |          |           |          |      |
|                                                                                                                       | Costo Directo Maquinaria y Equipo (CDM y E) = |        |          |           | \$5.26   | 2%   |
| Costo Directo =                                                                                                       |                                               |        |          |           | \$294.15 | 100% |

## 6. CONCLUSIONES

Con base en la investigación y realización de las pruebas, se llega a las siguientes conclusiones:

Al realizar el análisis de la normativa en materia de manejo de residuos, se conoció el panorama a nivel nacional; la LGPGIR regula la gestión de los residuos de manejo especial y de manera particular solo en la Ciudad de México, estos son regulados por la norma ambiental NADF-007-RNAT-2013 en la cual se promueve el reúso y reciclaje de estos residuos.

En cuanto a generación y aprovechamiento de los residuos de construcción, se determinó que a nivel nacional e internacional en más del 80% de los países analizados, el mayor porcentaje de generación proviene de las excavaciones, en segundo lugar, a los residuos provenientes del concreto, seguidos de los residuos de tipo mezclado y con una menor generación los residuos clasificados como residuos sólidos, con esto se concluye que existe una alta disponibilidad de los materiales para la fabricación de los bloques en estudio.

La realización de la comparativa entre ambas etapas permitió interpretar las deficiencias que presentaron las propiedades mecánicas de las mezclas de la Etapa II en comparación con la Etapa I y con ello poder proponer las recomendaciones adecuadas para posteriores investigaciones.

A pesar de haber presentado en la Etapa II disminución de la resistencia a compresión y aumento de la absorción de agua, los ladrillos estudiados en esta tesis, son una alternativa sustentable para el aprovechamiento de los residuos de la construcción puesto que cumplen con los parámetros de calidad establecidos en la normativa mexicana.

El empleo del mucílago de nopal para la integración de la mezcla líquida para la fabricación de los bloques representa una alternativa de aprovechamiento de las grandes cantidades de nopal que se disponen como residuos, puesto que además de darle un nuevo uso a ese material orgánico se demostró que ayuda a mejorar las propiedades mecánicas.

El proceso constructivo planteado resultó eficiente para la fabricación de ladrillos, el cual puede ser empleado a mayor o menor escala de fabricación.

El comportamiento final de los ladrillos estudiados en esta tesis demuestra que pueden ser empleados sin mayor problema en el sector de la construcción.

Tanto el costo de producción como el de construcción con este bloque ecológico hacen que sea una alternativa económica a la industria de la construcción proveyendo un material de calidad que cumple con los parámetros de calidad que la normatividad existente exige.

## 7. RECOMENDACIONES

Es importante considerar que cada vez que el material de excavación provenga de sitios diferentes se deben realizar las pruebas correspondientes para conocer sus propiedades y así poder realizar un diseño de mezclas adecuado. Cabe destacar que no cualquier material de excavación podrá ser utilizado para la fabricación de bloques, todo dependerá de las propiedades con las que cuente.

Es necesario llevar a cabo la caracterización del suelo para conocer sus propiedades granulométricas y de plasticidad y con ello poder realizar una correcta dosificación de materiales para el diseño de las mezclas.

La cantidad de material líquido (agua-mucílago de nopal) estará determinada por las características visuales de la mezcla, la cual debe ser pastosa.

Para la fabricación de bloques llevados a cabo en la máquina utilizada en la Etapa II se recomienda realizar el diseño de mezclas únicamente con RCD de 1/4" a finos para una mayor unificación de los componentes en la cámara de prensado.

Así también se recomienda aumentar la altura planteada para los bloques diseñados en la Etapa II, puesto que al tener mayor relación de proporcionalidad entre sus medidas el bloque puede mostrar mejoras en sus propiedades físicas y mecánicas; considerando realizar un modelo como el ladrillo con huecos para disminuir el peso de los elementos.

La recomendación de cambiar las medidas de los bloques en de la Etapa II también es por cuestiones constructivas, ya que, si se fabrica un bloque de dimensiones mayores, se utilizarían menos piezas para la configuración de elementos constructivos, conllevando a un avance más rápido en el programa de obra, así como un menor costo.

Surge la contradicción de no utilizar agregados con granulometría de 3/8" para la fabricación de ladrillos y acotar únicamente a la utilización de granulometrías de 1/4" a finos, puesto que en la Etapa I las mezclas que contenían este tamaño de agregado fueron seleccionadas como óptimas, pero se propone esta recomendación puesto que la empresa que comercializa la máquina opera con granulometrías menores (material de excavación) a 3/8" para la fabricación de sus bloques y esta podría ser la causa de la disminución de la resistencia a compresión entre la utilización de la ladrillera artesanal y la máquina mencionada.

Es importante considerar el costo de acarreo para futuros análisis de precios unitarios; en la presente investigación no fue considerado debido a que el instituto de ingeniería proporcionó el vehículo para transportar los materiales, no obstante, para una producción a nivel industrial este costo es inminente para no ocasionar pérdidas económicas.

Se recomienda la realización del acomodo de una mini planta de procesamiento para llevar a cabo la fabricación de bloques con una mayor eficiencia de producción y con un proceso constructivo más eficiente.

Los bloques fabricados en la presente investigación se evaluaron de acuerdo a los parámetros establecidos por la normatividad mexicana la cual considera materiales existentes en el mercado, esto conlleva a la recomendación de constituir una normatividad que establezca parámetros de referencia de materiales de construcción fabricados a base de RCD.

La evaluación de los bloques fue únicamente para considerarlos como de uso no estructural, por lo que se recomienda realizar las pruebas especificadas en la normatividad existente para tener parámetros de comparación y poder llegar a incluirlos como bloques de uso estructural.

## **8. ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS**

Se realizó una estancia de investigación en la Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona de la Universidad Politécnica de Cataluña, en la ciudad de Barcelona, España. (constancias en el anexo 1).

El objetivo de la estancia fue el análisis de muestras de los bloques ecológicos de la presente tesis, mediante técnicas especializadas como son la Difracción de Rayos X (XRD por sus siglas en inglés), Análisis Termo Gravimétrico (TGA por sus siglas en inglés) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM por sus siglas en inglés), y con esto tener un panorama del efecto que causa la adición de mucílago a las mezclas (mejora de resistencia a la compresión y disminución de la absorción de agua máxima inicial) en comparación con la utilización únicamente de agua como material para la integración homogénea de los componentes.

Además, el resultado del análisis llevado a cabo sirvió para la redacción de un artículo que fue publicado en una revista científica de divulgación internacional (anexo 2).

## REFERENCIAS

- Amorós, Marta. 2011. "Desarrollo de Un Nuevo Ladrillo de Tierra Cruda, Con Aglomerantes Y Aditivos Estructurales de Base Vegetal." Universidad Politécnica de Madrid.
- Andión, Ronald, José Suárez, and Ciro Bergues. 2011. "Diseño Y Construcción de Un Secador Solar Tipo Gabinete Para El Secado de Hollejos de Naranja." *ECOSOLAR*.
- Aquino, Esperanza. 2015. "Reciclaje de Residuos de La Construcción Para La Fabricación de Ladrillos Sustentables." Universidad Nacional Autónoma de México.
- Burgos, Diego. 2010. "Guía Para La Gestión Y Tratamiento de Residuos Y Desperdicios de Proyectos de Construcción Y Demolición." Universidad Austral de Chile.
- Cabo, María. 2011. "Ladrillo Ecológico Como Material Sostenible Para La Construcción."
- Cárdenas, A., W. M. Arguelles, and F. M. Goycoolea. 2002. "On the Possible Role of Opuntia Ficus-Indica Mucilage in Lime Mortar Performance in the Protection of Historical Buildings." Hermosillo, Sonora.
- Centro de Iniciativas para la Edificación Sostenible. 2016. "Materiales de Construcción." *Actividaluisacastrillon*. Accessed January 30. <https://actividaluisacastrillon.wordpress.com/materiales-de-construccion/>.
- CMIC. 2013. "Plan de Manejo de Residuos de La Construcción Y La Demolición." Ciudad de México.
- CMIC. 2014. "La Industria de La Construcción En México." Ciudad de México.
- Econstruyendo. 2011. "Bitublock: Ladrillos Hechos Con Basura." <http://econstruyendo.com/bitublock-ladrillos-hechos-con-basura/>.
- Ecotec. 2016. "Ficha Técnica Ladrillo Ecotec." Accessed May 23. [http://construyesustentable.com/FichasTecnicas/FT\\_Ladrillo.pdf](http://construyesustentable.com/FichasTecnicas/FT_Ladrillo.pdf).
- Granell, Enrique. 2014. "Experiencia Empresarial de Los RCD En México." Ciudad de México.
- Heisse, Susanne, Victor Arias, Lenny Limpus, and Karla Olascoaga. 2011. "Manual Sistema Constructivo Pura Vida."
- INEGI. 2010. "Banco de Información INEGI." *Banco de Información INEGI*. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biinegi/?ind=3114003001>.
- LPGGIR. 2003. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
- Luna, Daniel. 2012. "Reúso de Residuos de Construcción Y Demolición Enfoque Ambiental Y Sustentable." Universidad Nacional Autónoma de México.
- Martínez, Imelda. 2013. "Residuos de Construcción Y Demolición (RCD). Situación Actual Y Correcta Gestión Para El Proceso de Reciclaje En La Industria Mexicana." Universidad Nacional Autónoma de México.
- Méndez, Fidel, Pedro Velasco, Ana Gabilondo, Rodrigo Galindo, and Marco López. 2013. "Estrategia Nacional Para La Vivienda Sustentable."

- Monier, V., M. Hestin, M. Trarieux, S. Mimid, L. Domröse, M. Van-Acoleyen, and S. Mudgal. 2011. "Study on the Management of Construction and Demolition Waste in the EU. Final Report for the European Commission."
- Morales, Manuel, Mario Villalta, Sofía Solano, Sergio Morgan, and Mónica Schultz. 2011. "Guía de Manejo de Escombros Y Otros Residuos de La Construcción." San José.
- Moreno, Gamaliel. 2016. "Manual de Construcción Y Operación de Una Secadora Solar." *Manual de Construcción Y Operación de Una Secadora Solar*. Accessed March 5. <https://es.scribd.com/document/242029589/manual-de-construccion-y-operacion-de-un-secador-solar-pdf#user-util-view-profile>.
- Morillón, David. 2011. "Edificación Sustentable En México: Retos Y Oportunidades." México, D.F.
- NADF-007-RNAT-2013. Norma ambiental para el Distrito Federal, que establece la Clasificación y Especificaciones de Manejo para Residuos de la Construcción y Demolición, en el Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal.
- NMX-AA-164-SCFI-2013. Norma Mexicana de Edificación Sustentable-Criterios y requerimientos mínimos.
- 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-404-ONNCCE-2012. Norma Mexicana - Industria de la construcción para bloques, tabiques o ladrillos para uso estructural- Especificaciones.
- NMX-C-441-ONNCCE-2013. Norma Mexicana - Industria de la construcción – Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural –Especificaciones.
- NOM-161-SEMARNAT-2011. Norma Oficial Mexicana. Criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo.
- Ossa, Alexandra, and José García. 2015. "Residuos de Construcción Y Demolición (RCD)." Ciudad de México.
- RAE. 2016. "REAL ACADEMIA ESPAÑOLA." <http://dle.rae.es/?id=W9sEaKE>.
- Red de Ladrilleras. 2016. "Red de Ladrilleras." <http://www.redladrilleras.net/index.php>.
- Rivela, Beatriz. 2012. "Propuesta Metodológica de Aplicación Sectorial de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) Para La Evaluación Ambiental de La Edificación En España." Universidad Politécnica de Madrid.

- Rojas-Valencia, María, and Esperanza Aquino. 2015. "Fabricación de Ladrillos Ecológicos." *Ingeniería Civil*.
- Rojas-Valencia, María, and Diana Macías. 2013. "Manejo de Los Residuos de Construcción." *Ingeniería Civil*, 20–24.
- Roux, Rubén, and José Espuna. 2012. *Bloques de Tierra Comprimida Adicionados Con Fibras Naturales*. Tampico, Tamaulipas: Plaza y Valdés.
- Sáenz, Carmen, Horst Berger, Joel Corrales, Ljubica Galleti, Roberto Cuevas, Enrique Arias, and Cadmo Rosell. 2006. "Utilización Agroindustrial Del Nopal." Roma.
- SERpro. 2012. "Diagnóstico Nacional Del Sector Ladrillero Artesanal de México." *Diagnóstico Nacional Del Sector Ladrillero Artesanal de México*. <http://www.redladrilleras.net/assets/files/692ecaa0a857372af35a529441387778.pdf>.
- SMA. 2007. "Diagnóstico Básico de Residuos de La Construcción Del Estado de México." Estado de México.
- Torres-Acosta, A. A., Martínez-Madrid, M., Loveday, D. C., & Silsbee, M. R. (2005). Nopal and Aloe vera additions in concrete: electrochemical behavior of the reinforcing steel. In 60th Annual Conference and Exposition CORROSION/2005. Houston, Texas. Estados Unidos de América.
- Torres, Andrés, and Prisciliano Cano. 2007. "Las Bondades Del Nopal."
- Torres, Andrés, César Celis, Wilfrido Martínez, and María Lomelí. 2010. "Mejora En La Durabilidad de Materiales Base Cemento, Utilizando Adiciones Deshidratadas de Dos Cactáceas." Sanfandila, Querétaro.
- Villoria, Paola. 2014. "Sistema de Gestión de Residuos de Construcción Y Demolición En Obras de Edificación Residencial. Buenas Prácticas En La Ejecución de Obra." Universidad Politécnica de Madrid.

## GLOSARIO

**Aditivo:** sustancia que se agrega a otras para darles cualidades de que carecen o para mejorar las que poseen.

**Aglomerante:** son materiales con propiedades adhesivas que, amasados con agua, fraguan primero y endurecen después

**Aglutinante:** se aplica a la sustancia, elemento o característica que une.

**Agregados pétreos:** son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos.

**Aguas residuales:** agua que procede de viviendas, poblaciones o zonas industriales y arrastra suciedad y detritos.

**Asbesto:** Silicato cálcico magnésico que constituye una variedad impura del amianto; se presenta en forma de haces de fibras delgadas, duras y rígidas

**Bentonita:** arcilla de gran poder de absorción con múltiples usos industriales.

**Carpeta asfáltica:** es la parte superior del pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento.

**Combustóleo:** aceite combustible residual derivado de la destilación del petróleo crudo, es el combustible líquido más utilizado para la generación de electricidad.

**Escarificación de caminos:** es la acción que consiste en desgastar un camino.

**Fresado de concreto:** consiste principalmente en el corte de material para eliminar las deformaciones superficiales producidas por una construcción deficiente o bien por el desnivel entre losas.

**Gradiente de presión:** es el cambio producido en la presión por unidad de profundidad, expresado normalmente en unidades de psi/pie o kPa/m.

**Granulometría:** parte de la petrografía que trata de la medida del tamaño de las partículas, granos y rocas de los suelos.

**Guarniciones:** son los elementos parcialmente enterrados, comúnmente de concreto hidráulico o mampostería, que se emplean principalmente para limitar las banquetas, franjas separadoras centrales, camellones o isletas y delinear la orilla del pavimento.

**Lodo bentonítico:** es una mezcla de agua con bentonita, un tipo de arcilla muy densa; es utilizado para perforar pozos de sondeo y muy frecuentemente, mientras se perforan pozos de petróleo y gas natural.

**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 caracterizarse por estar sin labrar (o con una labra muy tosca).

**Mortero:** conglomerado o masa constituida por arena, conglomerante y agua, que puede contener además algún aditivo.

**Mucílago:** sustancia viscosa, de mayor o menor transparencia, que se halla en ciertas partes de algunos vegetales, o se prepara disolviendo en agua materias gomosas.

**Paramento:** es cada una de las caras de todo elemento constructivo vertical, como paredes o lienzos de muros

**Pedraplén:** terraplén hecho de piedras a modo de camino que une dos puntos separados por el mar.

**Puzolana:** roca volcánica muy desmenuzada, de la misma composición que el basalto, la cual se encuentra en puzol, población próxima a Nápoles, y en sus cercanías, y sirve para hacer, mezclada con cal, mortero hidráulico.

**Relleno sanitario:** es un método diseñado para la disposición final de la basura. Este método consiste en depositar en el suelo los desechos sólidos, los cuales se esparcen y compactan reduciéndolos al menor volumen posible para que así ocupen un área pequeña. Luego se cubren con una capa de tierra y se compactan nuevamente.

**Tamizado:** método físico para separar dos sólidos formados por partículas de tamaño diferente. Consiste en pasar una mezcla de partículas de diferentes tamaños por un tamiz o un colador.

**Terraplén:** macizo de tierra con que se rellena un hueco, o que se levanta para hacer una defensa, un camino u otra obra semejante.

# **ANEXO 1**

## **CONSTANCIAS**



## CERTIFICADO

### 1. Estancia de investigación - información del estudiante

- 1.1 Nombre del estudiante :** ARMANDO DE JESUS AGUILAR PENAGOS  
**1.2 Pasaporte :** G13025336  
**1.3 Plan :** MASTER EN CONSTRUCCIÓN AVANZADA EN LA EDIFICACIÓN  
**1.4 Procedencia :** UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
**1.5 Destino :** UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
**1.6 Duración :** De 13 marzo 2017 a 31 mayo 2017  
**1.7 Supervisor/a Origen :** Rojas Valencia, Ma. Neftalí  
**1.8 Supervisor/a Destino :** JESUS ABAD PUENTE

### 2. Cursado

#### 2.1 Cuatrimestres

| Cuatrimestre | Asignatura                | Evaluación    | Cal. Local | Cal. ECTS | Créditos ECTS |
|--------------|---------------------------|---------------|------------|-----------|---------------|
| 2016(2)      | ESTANCIA DE INVESTIGACIÓN | Sobresaliente | 10.0       | A         | 20.0          |

Total de créditos obtenidos : 20,0

Firmado : JESUS ABAD PUENTE, supervisor UPC

Fecha : Barcelona, 02 de junio de 2017

  
  
  
Escola Politècnica Superior  
d'Edificació de Barcelona



Escola Politècnica Superior  
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Av. Doctor Marañón, 44-50  
08028 Barcelona  
Tel. 93 401 63 00  
Fax 93 401 77 00

## CERTIFICADO DE ASISTENCIA

Nombre de la institución de destino: **Universitat Politècnica de Catalunya**  
Nombre de la Escuela: **Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona**  
País de destino: **España**

### SE CERTIFICA QUE

El **Sr. Armando de Jesús Aguilar Penagos**, con número de pasaporte G13025336, procedente de la Universidad Nacional Autónoma de México, ha realizado una estancia de investigación en nuestra institución desde el **13/03/2017** hasta el **31/05/2017**.

Nombre del firmante: **José Manuel Gómez Soberón**  
**Departamento de Construcciones Arquitectónicas II**

02/06/2017

[fecha]

(El certificado debe ser firmado DESPUÉS de la finalización de la estancia (nunca antes). Por tanto, la fecha de la firma debe ser IGUAL o MAYOR a la fecha de finalización de la estancia)



[firma y sello]

### Validez del certificado

1. El certificado debe ser original.
2. El certificado debe estar firmado por el coordinador institucional de movilidad.
3. El certificado debe estar sellado por la institución.
4. El certificado no debe tener enmiendas o correcciones.



## Informe sobre la estancia académica

El estudiante **Armando de Jesús Aguilar Penagos**, inscrito en la maestría: Màster Universitari en Construcció Avançada en l'Edificació de la Universidad Nacional Autónoma de México ha realizado una estancia de investigación en la Escuela Politécnica Superior de Barcelona, de la Universitat Politècnica de Catalunya, bajo mi supervisión.

Su estancia se inició el 13 de marzo del 2017 y finalizó el 31 de mayo de 2017. A lo largo de estos meses **Armando de Jesús Aguilar Penagos** ha realizado un proyecto de 20 créditos ECTS sobre la temática: "Fabricación de bloques con material originados de las diferentes etapas de una construcción; las cuales incluirán desde el desmonte de un terreno (tala de árboles y arbustos), hasta la demolición del propio edificio", y considero que ha cumplido con los objetivos de formación y desarrollo establecidos al inicio de su estancia y, por tanto la valoración final que ha obtenido es de 10 sobresaliente.

Cordialmente,

José Manuel Gómez Soberón  
Departamento de Construcciones Arquitectónicas II  
Universitat Politècnica de Catalunya

Barcelona, 31 de mayo de 2017

# **ANEXO 2**

## **ARTÍCULO**

# Physicochemical, mineralogical and microscopic evaluation of sustainable bricks manufactured with construction wastes

Armando Aguilar-Penagos <sup>1</sup>, José Manuel Gómez-Soberón<sup>2,\*</sup> and Ma. Neftalí Rojas-Valencia<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Engineering, Coordination of Environmental Engineering, National Autonomous University of Mexico, Av. Universidad 3000, Distrito Federal MX 04510, Mexico; aguilarp0609@gmail.com (A. A.-P.); nrov@pumas.iingen.unam.mx (M. N. R.-V.)

<sup>2</sup> Department of Construction Technology, Barcelona School of Building Construction, Polytechnic University of Catalonia, Av. Doctor Marañón 44-50, Barcelona 08028, Spain; josemanuel.gomez@upc.edu

\* Correspondence: josemanuel.gomez@upc.edu; Tel.: +34-934-016-242

Academic Editor: Takayoshi Kobayashi

Received: date; Accepted: date; Published: date

**Abstract:** At international level, enormous volumes of construction and demolition wastes are generated: 170 million tons/year in the USA, 500 million tons/year in the EU and 12 million tons/year in Mexico. Alternative uses for these heterogeneous materials, such as the manufacture of sustainable bricks, are potential solutions to this growing environmental issue. Based on previous studies and in compliance with Mexican standards, four different types of secondary materials were utilized in the composition of a sustainable brick matrix. Temperature and solar radiation used for drying purposes were determined as well as weight loss, resistance and initial maximum absorption. In order to characterize the resulting matrix, observations were made with a scanning electron microscope, the chemical composition of the samples was determined by detecting basic compounds using mapping through X-ray diffraction microanalysis, connected to the SEM unit. Finally, thermogravimetric analyses were performed to correlate mechanical and chemical behavior, and resistance to high temperatures of the mixtures. The results obtained showed that all-in-one (AiO) is the most appropriate material for brick manufacturing, *Opuntia ficus-indica* mucilage improves physical properties such as increased compressive strength and reduced water absorption, while wood residues, clay minerals and illite enhance mechanical properties.

**Keywords:** Bricks; construction waste; mineralogical; physical properties; thermogravimetric analyses

---

## 1. Introduction

Bricks, especially the various types of conventional ceramic bricks [11], are the elements most commonly used in the construction of exterior and interior walls [1-2],[26]. Their production requires the baking of virgin clay in an oven at high temperature (of the order of 1000<sup>0</sup> C), affecting the environment in two ways: the use of non-renewable materials and the release of a significant amount of greenhouse gases -0.41 kg of CO<sub>2</sub> per brick- [15], [31].

Therefore, the search for alternatives that reduce the environmental impact of the ceramic brick industry, such as the use of recycled second generation materials from construction and demolition (CD) and processes that do not require baking, is a priority.

The incorporation of CD recycled aggregates (up to 25 or 50% maximum contents), together with Ordinary Portland Cement (OPC) or Fly Ash (FA), does not significantly affect the compressive strength of concrete bricks; and even bricks manufactured exclusively with replacement materials (100% CD aggregates) show resistance values of up to 49 at 28 days [25]. In a similar study, CD wastes, wood residues, and water with a cactus pulp extract (*Opuntia ficus-indica*) were used to manufacture an unbaked clay brick having compressive strength and water absorption characteristics appropriate for use as a non-structural adobe [27]. Finally, the use of clays and stabilizing lime in the manufacture of unbaked bricks has also been investigated, showing that these materials can be energy and cost efficient (no baking requirement) [23].

As to the use of second generation materials from other industries for the production of bricks, previous researches focused on the use of FA in an 84:6:10 (residue:FA:clay) ratio and 12.5 to 15% water; [4], FA making up in some case up to 40% [12], or even more [14]. On the other hand, the use of additives has also been studied with encouraging results [10]. The manufacturing processes usually include a phase of pressure compaction -of the order of 20-25 MPa- [23] and subsequent baking in oven at temperatures between 980 and 1050°C [3],[23]. Compressive strength [12],[23] up to 12.4 MPa [12] or even 40 MPa [10]; water absorption [7],[10],[23] of the order of 13.8% [12]; apparent [17] density [16] [23] up to 28% below reference bricks [10], porosity, and fissures and cracks expansion [12] have been determined. In all cases, the properties studied have been considered acceptable [10],[12],[23].

BFS, as well as kaolin, and granite-basalt residues [5], have also been used as a replacement clay to manufacture baked bricks [13]. Physical, mechanical, leaching [13],[30] and chemical [5] tests have been conducted, concluding that heavy metal concentrations (determined by leaching) are acceptable, establishing a direct relationship between the increase in BFS content and the compressive strength; and an inverse relationship as regards absorption [13]. Similarly, it was discovered that the ratios of the different components making up the matrix of the bricks have a relevant impact on the various properties studied [7]. Finally, it was evidenced that a baking temperature ranging from 1000 to 1250°C was appropriate to obtain bricks of acceptable quality [5], [13].

Likewise, soil and sand (SS) of petroleum effluents mixed with stone materials has been used to make baked bricks. In a study [29], the results of the physical, chemical and mechanical tests led to the conclusion that the use of SS in brick manufacturing reduces water and fuel requirements, generating a product that complies with all the regulations and "encapsulates" toxic metals through vitrification (leaching studies validate compliance with the requirements of the US Environmental Protection Agency).

Some special cases have also been studied, such as the use of a mixture of organic materials, for example sawdust (5%), oil polluted soils (15%), compost (10%) and marble (15%) in the manufacture of light bricks baked at 1050°C that achieved compressive strength, porosity and absorption appropriate for use in construction [6].

Likewise, the use of paper waste as an additive in the manufacture of porous and lightweight clay bricks has led to the obtainment of bricks showing adequate thermal conductivity and compressive strength [6].

Ceramic bricks and tiles manufactured using quarrying and mining materials, for example granite rock cutting residues, have also been studied. Their physical and mineralogical characteristics can be considered comparable to those manufactured with conventional materials, and can therefore partially replace them [6]. In another study, tailings from gold mills mixed with red soils were used

to make bricks. The different replacement percentages suitable to obtain compressive strength, water absorption and shrinkage equivalent to the reference bricks were determined [28].

Dredging sediments have also been used as a base material for baked bricks (replacing the usual clay) and, in this case also, the ASTM criteria were met [17], [18].

Finally, residues that could be considered inappropriate for use in construction, such as cigarette butts, have also been investigated as materials to be potentially incorporated in baked clay bricks. The density, strength, thermal conductivity and leaching values of the bricks obtained with this material have demonstrated that this material can also be considered suitable for use in the manufacture of light bricks [9].

Therefore, it is clear that the search for new alternatives of secondary materials to replace the usual non-renewable materials for making bricks or blocks is desirable, feasible, and even necessary, CD wastes being apparently the most suitable option because of their intrinsic properties and widespread availability. Likewise, the incorporation of organic renewable materials such as wood or other vegetable wastes can be another suitable source of complementary materials. Moreover, if in addition to using the combination of the above materials, baking in oven could be omitted, then the brick manufacturing industry would drastically reduce its environmental footprint. Therefore, an experimental study for the manufacture of a sustainable brick combining the above mentioned elements has been proposed in this research in order to technically and environmentally validate its application in the construction industry.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Materials

Four different types of secondary materials were used in the composition of the sustainable brick matrix, resulting in a product that fulfills the regulatory requirements and possesses characteristics comparable to those of a traditional brick.

The materials used were:

1. Excavation wastes obtained from a company that manufactures adobe bricks (19°05'30.7" N 98°19'39.9" W); non-standardized field tests determined that it was a hard plastic clay-sandy material appropriate for being used in the matrix.
2. Two types of construction wastes obtained from a CD processing plant (19°19'12.3" N 99°03'16.2" W). On the one hand, CD with crushed cementitious materials from only concrete (OC) – classified as type A according to NADF-007-RNAT-2013 [19]–, with particle size (PS) of 9.5 mm and 6.3 mm to fines. On the other hand, construction wastes known as all-in-one (AiO), classified as type B materials, and originating from an uncontrolled mixture of bricks, blocks, ceramics, mortars, paving stones, masonry and prefabricated materials, with a particle size ranging from 6.3 mm to fines.
3. Felling wastes obtained from a composting plant (19°18'39.2" N 99°10'37.5" W), including residues from cutting and pruning trees, branches and shrubs from the surrounding zone. The only requirement was  $PS \leq 5$  mm, achieved through mechanical sieving, in order to facilitate a correct mixture with the other materials.
4. A vegetal liquid mix of gelatinous viscous aspect was processed using water and mucilage from nopal plants (*Opuntia ficus-indica*). The mucilage was produced by removing the epidermis from each tuber, and then the section of its central part (mesophyll) was cut in cubes with side length 2 cm that were introduced in water in a 1:3 (kg of nopal: liters of water) ratio for three days. The substance was then drained

using a colander, and filtered applying manual pressure with a cloth to obtain the final substance.

## 2. 2. Methods and Experimentation Process

### 2.2.1. Mixtures design

Two dosages and the use of water or water plus mucilage, and the differential use of OC or AiO in the 6.3 mm size fraction, were investigated. The rationale for the election of these variables originated in a previous study that determined that the use of mucilage influenced the resistance of the bricks [27]; although OC and AiO could be considered as "equivalent" materials, AiO is produced in a higher volume and, contrary to OC (recycled concrete with CD aggregates), it has no application in solutions, and thus this technique would turn AiO into a useful material. The nomenclature used for the mixtures was: X-XX-X, in which the first X refers to control trials or referent (R), or to the study variables (V); XX can be OC when a PS 6.3 mm OC is used, or AiO when a PS 6.3 mm AiO is used; and the last X refers to the use of water (W) or mucilage (M). The suitable percentages of each material used, obtained as a result of the dosage experience of the mixtures studied, are presented in Table 1. Approximately 12 kilograms of each study mixture were manufactured to make the test bricks. The substitution of different materials (OC and AiO) was carried out by weight, since their volumetric weights are close. The specific quantities of each material used correspond to values resulting from a previous study of mixture optimization (Rojas and Aquino, 2015).

**Table 1.** Dosing of study mixtures.

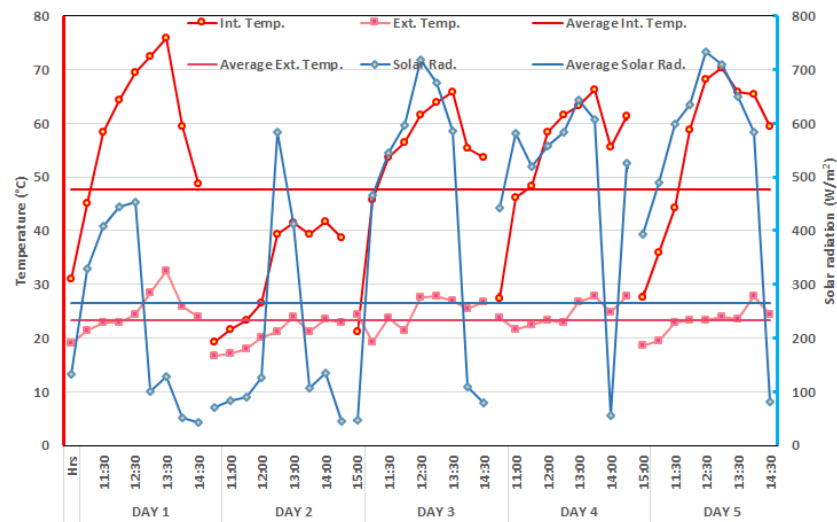
| Mixture     | Excavation<br>wastes<br>(%) | Felling<br>wastes<br>(%) | PS 6.3 mm OC<br>(%) | PS 6.3 mm AiO<br>(%) | PS 9.5 mm OC<br>(%) |
|-------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| R-OC-W      |                             |                          | 17                  | -                    |                     |
| V-OC-M      |                             |                          | 17                  | -                    |                     |
| R-AiO-<br>W | 62                          | 4                        | -                   | 17                   | 17                  |
| V-AiO-<br>M |                             |                          | -                   | 17                   |                     |

### 2.2.2. Sustainable brick manufacturing process

The solid materials were manually mixed with a shovel till they were homogeneously integrated. Then, two-thirds of the liquid component (W or M) were added to the mixture which was allowed to rest during 10 minutes to facilitate the hydration process. Afterwards, the materials were mixed until a uniform consistency was obtained. Finally, the remaining liquid component was added under continuous mixing till suitable handling consistency was achieved.

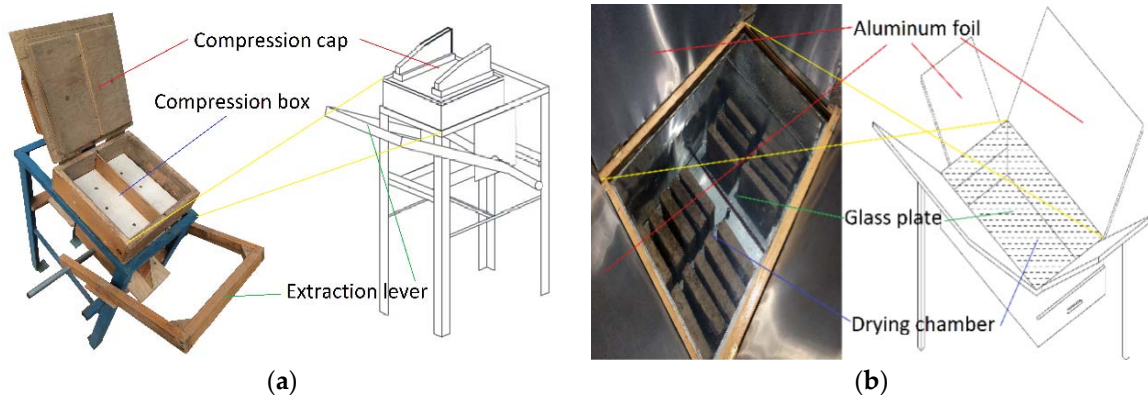
Four bricks were made from each mixture for compressive strength, absorption and microstructural characterization tests. Once the mixture was ready, it was placed in the brick making machine. The manufactured sustainable bricks were 26 cm long, 12 cm wide and 5.5 cm high in accordance with NMX-C-441-ONNCCE-2013 [20]. The process consisted of an initial manual compaction of three layers having a thickness of approximately 2 cm each, accomplished with a 15 x 7 cm wood plate. Then, a second manual compaction was performed with the cap of the molding machine. Once the molding process had been completed, the bricks were extracted from the mold by means of the extraction lever.

The sustainable bricks were then exposed outdoors for three days for drying. Afterwards, they were introduced into a solar desiccator to accelerate the drying process. The daily monitoring of internal and external temperatures, and the solar radiation captured by the desiccator allowed to establish the conditions to which the bricks were exposed (Figure 1). Data were recorded during five days after the initial external drying and readings were performed every 30 minutes during the maximum solar intensity period (around noon). The purpose of these determinations was to reference the testing environment and collect data for future correlations with other investigations. A thermocouple-thermometer data logger model EA15 brand Extech and a sensor with pyrometer LabQuest-2 were used to determine temperatures and solar radiations, respectively. The drying process of a sustainable brick was assumed to be complete when a constant weight was obtained in two readings taken on two consecutive days.



**Figure 1** Environmental conditions of the brick drying process

Figure 2 (a, b) shows images of the configuration and functioning of the two devices (brick making machine and desiccator) specifically designed for this study.



**Figure 2a)** Configuration of brick making machine; **b)** Desiccator

### 2.2.3. Brick specifications and test procedures

Simple compressive strength tests and initial maximum water absorption tests were performed in accordance with NMX-036-ONNCCE-2013 and NMX-037-ONNCCE-2013, respectively. For the compressive strength tests, a 120-t manual compression machine, ELACONSA brand, was used, while the water absorption tests were performed with auxiliary laboratory equipment such as a mercury thermometer with a range from -22 to 100°C and a digital scale 5 kg x 1 g, ADIR brand, model 1676, in compliance with NMX-037-ONNCCE-2013. The compressive strength tests were performed at 14 days while the water absorption tests were performed at 28 days.

To characterize the matrix of the resulting material, observations were made using scanning electron microscopy (SEM) with JEOL JSM-6510 machine, with 30X, 65X and 200X magnification images of resin-embedded bricks and posterior surface polishing. Later, the chemical composition of the samples was determined through the detection of basic compounds using the X-ray diffraction (XRD) microanalysis technique, connected to the SEM unit.

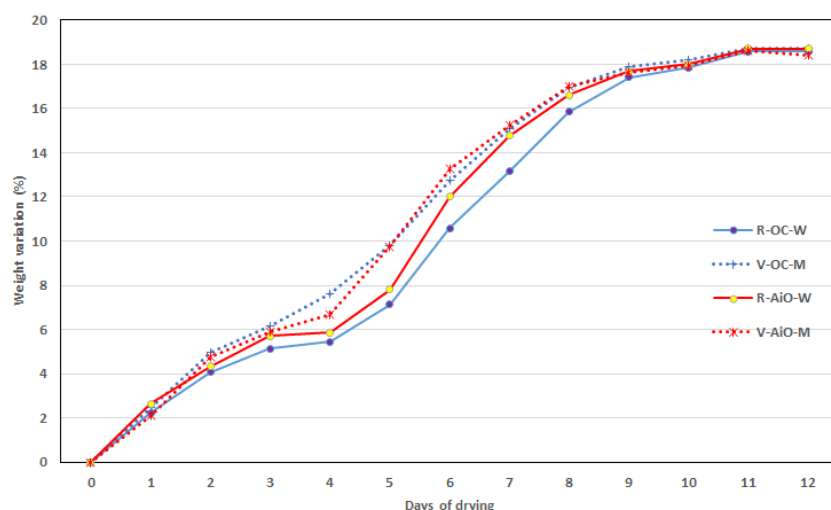
Finally, a thermal gravimetric analysis (TGA) was performed to correlate the mechanical, chemical and resistance behaviors to the high temperatures of the mixtures. The study was conducted in a Naber Industrieofenbau oven equipped with a data acquisition system (model LSM-200, PCE Group brand) that automatically records the weight and temperature to which the samples are submitted within the test crucible (maximum volume capacity of 10 mL). The temperature ramp was 3°C per minute in the range from 50 to 950°C.

The samples used for the TGA study were obtained from manually crushing untested bricks to obtain particles smaller than 4 mm. A granulometry study was performed to normalize particle size distribution. This, together with the volumetric weight obtained from usual procedures [8] permitted to obtain scale samples representative of the original.

## 3. Results and Discussion

### 3.1. Brick drying by solar radiation

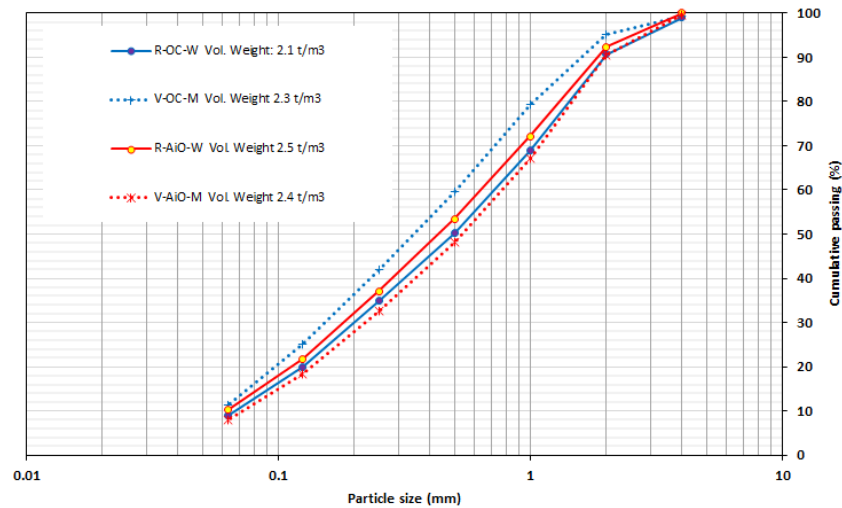
Figure 3 shows weight loss evolution expressed in percentage. There is an obvious similarity in the drying process of all the study samples, characterized by a rapid and constant loss of humidity until Day 8, followed by a relative stabilization during the following four days.



**Figure 3** Weight loss caused by brick desiccation

### 3.2. Volumetric weights

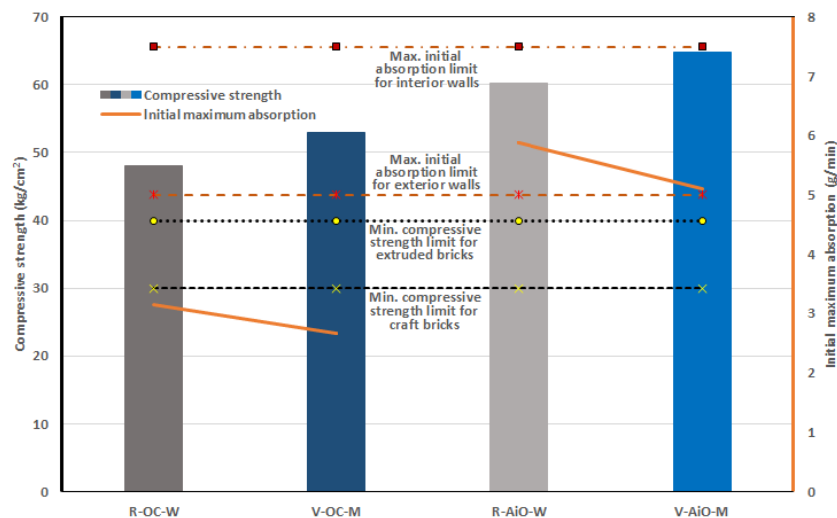
Figure 4 shows the sample profiles and volumetric weights; all profiles follow a similar trend, leading to conclude that all the samples were submitted to a similar process.



**Figure 4** Profiles and volumetric weights of the crushed samples

### 3.3. Compressive strength and initial maximum absorption

Figure 5 shows the results of the compressive strength tests and the minimum acceptable limits, in both craft bricks (30 kg/cm<sup>2</sup>) and extruded bricks (40 kg/cm<sup>2</sup>) in accordance with NMX-C-036-ONNCCE-2013 [21]. Compared to their respective reference samples, V-OC-M led to a 9% compressive strength increase at 53.03 kg/cm<sup>2</sup>, while V-AiO-M led to a 7% compressive strength increase at 64.78 kg/cm<sup>2</sup>. These data evidence the favorable effect of the use of component M in the mixtures. Comparing both mixtures, V-AiO-M is 22% more resistant than V-OC-M, and thus the use of AiO as an OC replacement material - at least as far as resistance is concerned - can be considered.



**Figure 5** Compressive strength and Initial maximum absorption values

Compared to their corresponding references, the initial maximum water absorption value obtained with V-OC-M mixture is 15% lower, while it is 13% lower with V-AiO-M. Moreover, both samples also meet the maximum absorption requirements established in NMX-C-037-ONNCCE-2013 [22]. As regards initial maximum water absorption and compressive strength, the use of M generates identical deviations (2%) compared to their corresponding references, enhancing coherence and solidity. OC shows a 52% lower absorption capacity than AiO and since the absorption of the components of a matrix is a parameter of interest (dosage, durability, etc.), this fact will have to be taken into account in deciding whether a sustainable brick is appropriate for a given application.

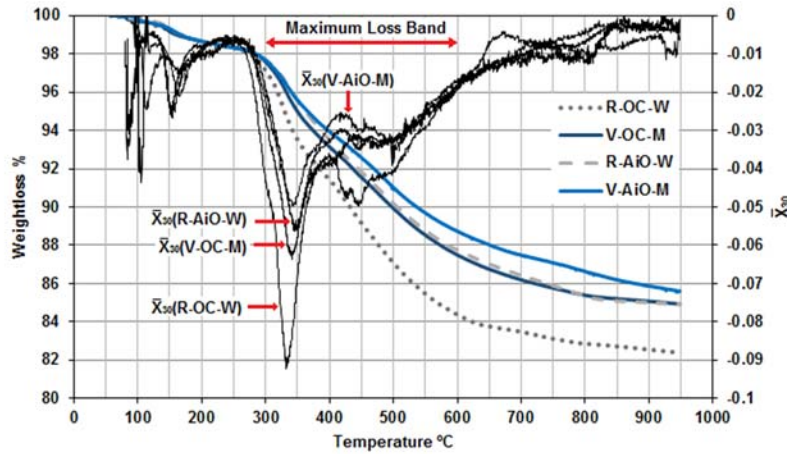
### 3.4. Thermal gravimetric analysis

The TGA test was selected as a calibration indicator of the mechanical behavior of the sustainable bricks because it permits to determine the limit and link said determination to the matrix basic components.

The TGA results presented in Figure 6 indicate a weight loss, for all samples studied, ranging from 14% to 18% with respect to the initial weight. The maximum loss band is located in the adjacent range between 300°C and 600°C; limits were established by the moving average curves with base 30 ( $\bar{X}_{30}$ ) (Equation 1) (30 was the value selected to determine the curves for favoring a better sensitivity coupling to the curves obtained from the TGA):

$$\bar{X}_{30} = \sum_{i=1}^n x_i / n \quad (1)$$

Where: ( $\bar{X}_{30}$ ) = Moving average. N = 30, where each individual value ( $x_i$ ) represents the percentage difference of weight loss between consecutive TGA measurement.



**Figure 6** Weight loss vs. temperature increase

The weight loss (from the limits of the bands previously established) to the final weight ratio was obtained by comparing the partial and total areas under the curves: percentage weight loss vs. temperature increase. The calculation process was based on the trapezoid method according to Equation 2 for each pair of increase values of its weight loss percentage (W) and its respective temperature (T), in order to determine the total area under the desired curve.

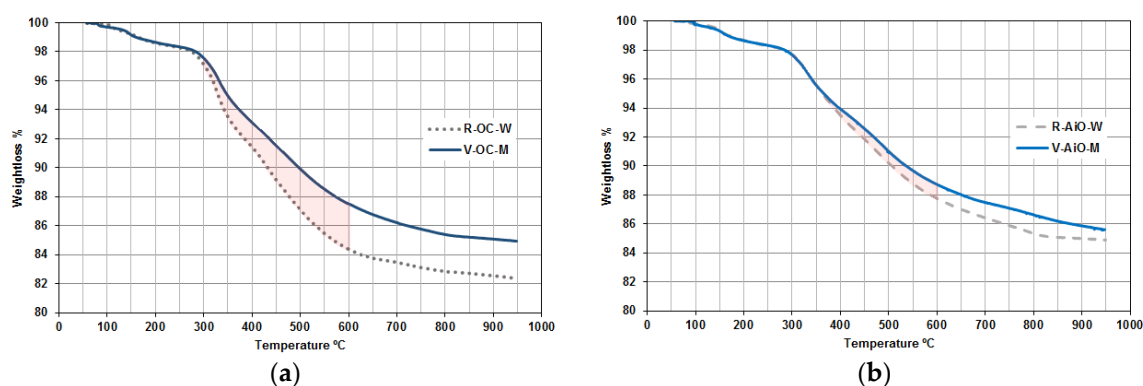
$$\int_0^i f(x)dx = (t_2 - t_1) \left[ \frac{W_1 + W_2}{2} \right] \quad (2)$$

Where:  $t_1$  (°C) is the initial temperature of the studied pair of values;  $t_2$  (°C) is the final temperature of the studied pair of values;  $W_1$  (%) is the initial weight percentage of the studied pair

of values;  $W_2$  (%) is the final weight percentage of the studied pair of values; and  $f(x)$  (%-°C) is the area under the W-T curve.

Comparing the areas obtained in the maximum loss band to the total area led to determine that they occur in 33.8% vs. 33.9% of the total area (a difference of only 0.1%), which corresponds to a weight loss variation from 72% to 64% (8%) – similar to the critical area of the maximum loss band with significant sample weight loss –; so its study and linkage with the behavior of the mixtures is binding.

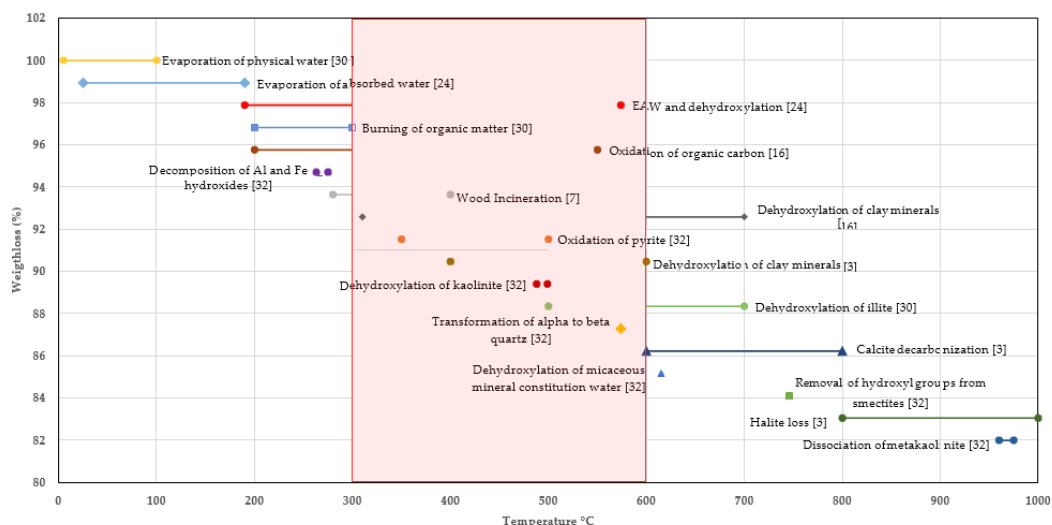
The analysis of the individual mixtures permitted to determine a 13% weight loss percentage with V-OC-M, 2% less than the control mixture, showing thus that the use of M brings about a structural improvement to the matrix (Figure 7a). A similar trend was observed with V-AiO-M (11% weight loss compared to the initial weight, representing a 1% reduction) (Figure 7b). In both cases, the correlation between mechanical resistance increase or absorption reduction and weight loss reduction indicates microstructural improvements (better union of constituent particles) and increased densification of the sustainable brick matrix.



**Figure 7** a) TGA of OC; b) TGA of AiO

As regards the use of OC and AiO materials, the comparison between the two curves shows a 1% difference between them, indicating that the use of AiO material in the matrix is clearly appropriate.

In order to determine the compounds or materials that contribute to the mechanical improvement of the matrix of the different samples, Figure 8 presents the compounds and materials identified in previous studies. Absorbed water, organic charcoal, wood residues, clay minerals, pyrite, kaolinite, illite and alpha quartz have a significant impact on weight loss (shaded area).



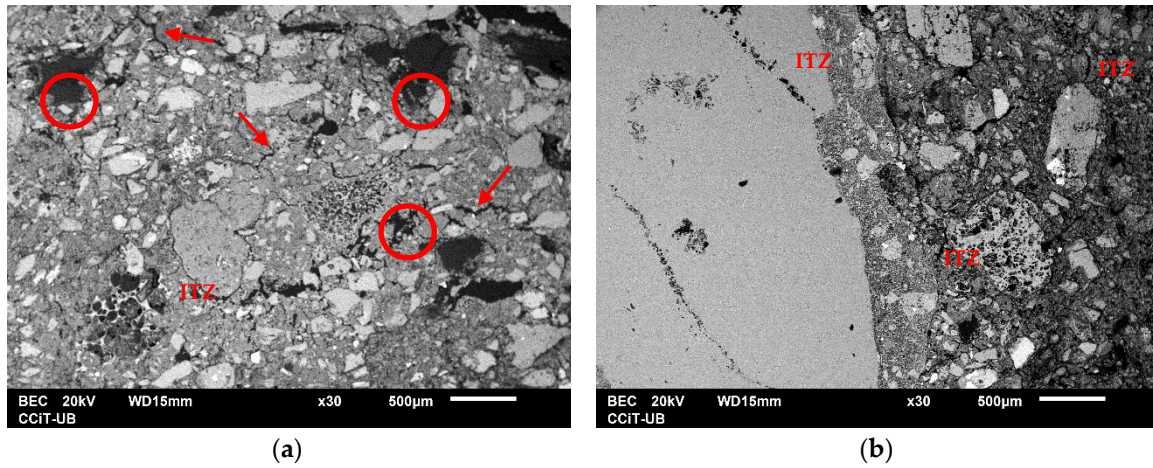
**Figure 8** Weight loss ranges for different materials due to the increase in the temperature of ceramic matrices

The general behavior of each one of the study samples may possibly be due to the total combination of the different compounds constituting it. However, it is also evident that some of these compounds may have a significant direct impact. Thus, in order to determine the incidence of each one of the compounds or materials, a comparison of the areas below the curves in the maximum loss range was performed for each compound present in this zone.

The comparison between V-OC-M and its reference highlighted three compounds that showed a higher incidence, which are, in descending order of importance in the matrix, wood residues, clay minerals and illite. Similarly, the comparison between V-AiO-M and its reference established that wood residues and clay minerals were also the two compounds having the greatest impact on the general behavior of the samples, the third one being, in this case, organic carbon [24].

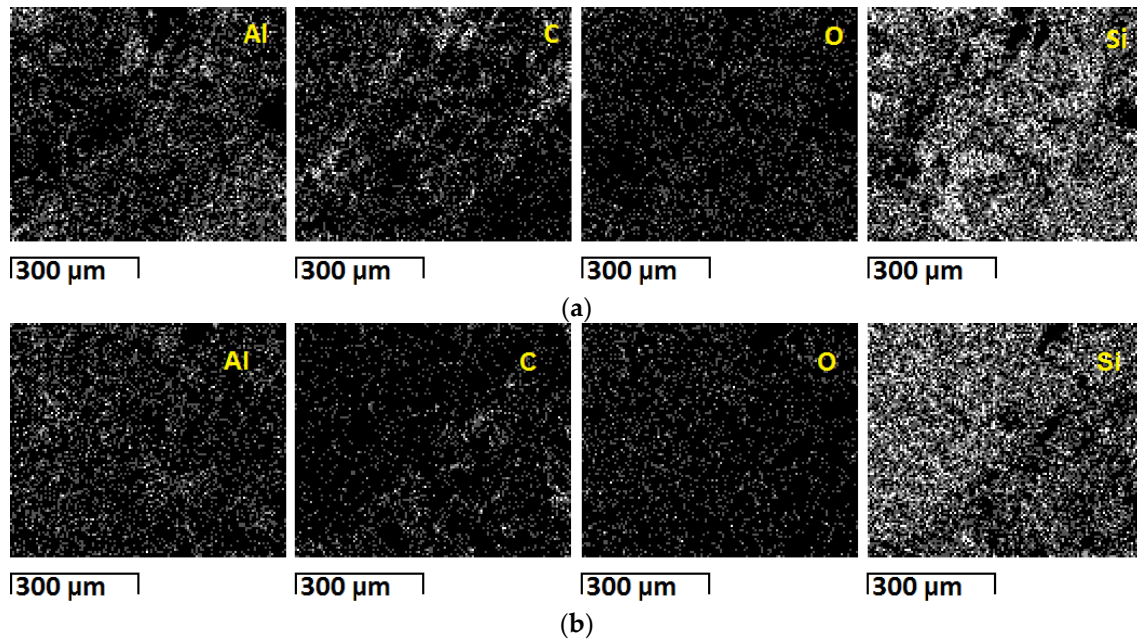
Illite (to a greater extent) and kaolinite (to a lesser extent) are present in both mixtures (V-OC-M and V-AiO-M), both compounds being more abundant in the first mixture, and thus causing the greatest weight loss by incineration. The above comments are linked to the results of compressive strength and absorption tests, in which resistance increase and absorption reduction were observed in the samples that lost less weight in the thermogravimetric analysis compared to their corresponding reference samples.

To validate the previous relationships, the matrix of each sample was observed by SEM. In Figure 9 (a and b) two images are presented in which zones of low density or high porosity (circles), presence of fissures (arrows) and tortuous interfacial transition zone (ITZ) with poor element integration can be identified in the case of V-OC-M, while the opposite is observed in the case of V-AiO-M.



**Figure 9** SEM of study samples a) V-OC-M; b) V-AiO-M

TGA tests had previously established that the basic chemical elements are carbon, oxygen, aluminum and silica. By mapping these elements with the complementary XRD technique of the SEM study, their significant presence is validated and this could explain the mechanical and physical behavior of the studied mixtures, since the greater presence of said elements in the reference samples could lead to a worse behavior. Figure 10 (a, b) shows the chemical elements of each mixture, identifying their presence, the images correspond to the same mixtures, but to different observation zones.



**Figure 10** Micro DRX through mapping of the main elements established in SEM assays for the samples a) V-OC-M; b) V-AiO-M

#### 4. Conclusions

The use of construction wastes for the manufacture of sustainable bricks can be an environmentally friendly and technologically feasible alternative since, on the one hand, it makes use of materials considered as residues and no thermal baking is involved in their manufacture and, on the other hand, it meets the requirements of the local regulations for application as construction elements for nonstructural purposes.

The use of nopal mucilage in the mixture improves the mechanical and physical properties of the bricks, increasing their compressive strength and lowering their initial maximum water absorption compared to bricks that are manufactured only with water. Moreover, it enhances resistance to high temperatures. Likewise, the matrix of the bricks incorporating mucilage shows a better adhesion between its particles, a smaller amount of pores and stronger zones of interfacial transition.

Contrary to concrete wastes, the use of construction wastes (AiO) is not regulated. However, this study validates the fact that construction wastes could be used as an alternative in the manufacture of sustainable bricks since, besides complying with the minimum parameters established by the local regulations, its performance is comparable to that of bricks manufactured with only concrete (CD).

Therefore, the use of the materials considered in this study can be deemed both technically and environmentally feasible.

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to TA-EPSEB-UPC, PMI-UNAM and CONACYT.

**Author Contributions:** Ma. Neftalí Rojas-Valencia and J. Manuel Gómez-Soberón (research concept and design); Armando Aguilar-Penagos, José Manuel Gómez-Soberón and Ma. Neftalí Rojas-Valencia (data collection); Armando Aguilar-Penagos and José Manuel Gómez-Soberón (data analysis and interpretation); Armando Aguilar-Penagos and José Manuel Gómez-Soberón (writing of the article); Ma. Neftalí Rojas-Valencia (critical revision and correction of the article); José Manuel Gómez-Soberón and Ma. Neftalí Rojas-Valencia (final approval of the article).

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest

#### References

1. Behrens, A.; Giljum, S.; Kovanda, J. and Niza, S. The material basis of the global economy. Worldwide patterns of natural resource extraction and their implications for sustainable resource use policies. *Ecol. Econom. J.* **2007**, *64*, 444–453
2. Colomer, F.; Esteban, J. and Gallardo, A. Application of inert wastes in the construction, operation and closure of landfills: Calculation tool. *Waste Management* **2017**, *59*, pp. 276–285.
3. Coronado, J.; Paiva, H.; Velosa, A. and Ferreira, V. Characterization of Renders, Joint Mortars, and Adobes from Traditional Constructions in Aveiro (Portugal). *Inter. J. of Archit. Herit.* **2010** *4*, pp. 102–114, DOI. <http://dx.doi.org/10.1080/15583050903121877>.
4. Chen, Y.; Zhang, Y.; Chen, T.; Zhao, Y. and Bao, S. Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings. *Constr. Build. Mater.* **2011** *25*, pp. 2107–2111, DOI. [10.1016/j.conbuildmat.2010.11.025](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.025).
5. El-Mahllawy, M. S. Characteristics of acid resisting bricks made from quarry residues and waste steel slag. *Constr. Build. Mater.* **2008** *22*(8), pp. 1887–1896, DOI. [10.1016/j.conbuildmat.2008.02.079](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.079).
6. Eliche-Quesada, D.; Corpas-Iglesias, F.; Pérez-Villarejo, L. and Iglesias-Godino, F. Recycling of sawdust, spent earth from oil filtration, compost and marble residues for brick manufacturing. *Constr. Build. Mater.* **2012** *34*, pp. 275–284, DOI. [10.1016/j.conbuildmat.2012.02.079](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.079).
7. FAO. Carbonization processes. In *Simple technologies for charcoal making*; Editor Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO); Publisher: Rome, Italy, 1987; Volume 41, ISBN 92-5-101328-1; Available online: <http://www.fao.org/docrep/X5328E/X5328E00.htm> (accessed on 20 July 2017).

8. Juárez, E. and Rico, A. *Mecánica de Suelos I: Fundamentos de la Mecánica de Suelos* [Soil Mechanics I: Fundamentals of Soil Mechanics] (In Spanish). Publisher: D. F. Mexico, **2012**; pp. 51-62, ISBN-13: 978-9681800697
9. Kadir, A.; Mohajerani, A.; Roddick, F. and Buckeridge, J. Density, Strength, Thermal Conductivity and Leachate Characteristics of Light-Weight Fired Clay Bricks Incorporating Cigarette Butts. *Proceeding of the World Academy of Science, Engineering and Technology*; **2009**; 53 pp. 1035–1040.
10. Kayali, O. High Performance Bricks from Fly Ash. *Proceedings of the World Coal Ash*, Lexington, Kentucky, USA. April 11-15 **2005**, pp. 1–13.
11. Kazmi, S.; Abbas, S.; Saleem, M.; Munir, M. and Khitab, A. Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes. *Constr. Build. Mater.* **2016**, 120, pp. 29–41, DOI. 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.084.
12. Kute, S. and Deodhar, S. Effect of fly ash and temperature on properties of burnt clay bricks. *J. Inst. Eng. India. Civ. Eng.* **2003**, Div 84, pp. 82–85.
13. Lin, K. Feasibility study of using brick made from municipal solid waste incinerator fly ash slag. *J. Hazard. Mater.* **2006**, 137(3), pp. 1810–1816, DOI. 10.1016/j.jhazmat.2006.05.027.
14. Lingling, X.; Wei, G.; Tao, W. and Nanru, Y. Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio. *Constr. Build. Mater.* **2005**, 19, pp. 243–247, DOI. 10.1016/j.conbuildmat.2004.05.017.
15. Lippiat, B. *Building for Environmental and Economic Sustainability Technical Manual and User Guide*. Available online: <https://www.nist.gov/publications/bees-40-building-environmental-and-economic-sustainability-technical-manual-and-user> (accessed on 26 July 2017).
16. Mckinney, D. *Kinetic and Finite Element Modeling for Firing Brick*. Master of Science (MS), Clemson University TigerPrints, may 2010. All Theses. Paper 761.
17. Menezes, R.; Ferreira, H.; Neves, G.; Lira, H. and Ferreira, H. Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles. *J. Eur. Ceram. Soc.* **2005**, 25(7), pp. 1149–1158, DOI. 10.1016/j.jeurceramsoc.2004.04.020.
18. Mezencevova, A.; Yeboah, N.; Burns, S.; Kahn, L. and Kurtis, E. Utilization of Savannah Harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick. *J. Environ. Manage.* **2012**, 113, pp. 128–136, DOI. 10.1016/j.jenvman.2012.08.030.
19. NADF-007-RNAT-2013. 2013 Proyecto de Norma Ambiental. Clasificación y especificaciones de manejo para residuos de la construcción y demolición en el Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente. [Project of Environmental Standard. Handling classification and specification for construction and demolition wastes in the Federal District. Secretariat of the Environment] Official Gazette of the Federal District, City of Mexico, Mexico (In Spanish).
20. ONNCCE. 2013. NMX-C-441-ONNCCE-2013. Norma mexicana-industria de la construcción-Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural-especificaciones. [Mexican standard-construction industry-Blocks, partitions or bricks and partitions for non-structural use-specifications] (In Spanish).
21. ONNCCE. 2013. NMX-C-036-ONNCCE-2013. Norma Mexicana-Industria de la construcción-Bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines-Resistencia a la compresión-Método de prueba. [Mexican standard-Construction industry-Blocks, partitions or bricks, walls and pavers-Compression resistance-Test method] (In Spanish).
22. ONNCCE. 2013. 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. [Mexican standard- Construction industry-Masonry-Determination of the total absorption and initial absorption of water in blocks, partitions or bricks and tabicones test method] (In Spanish).
23. Oti, J. and Kinuthia, J. Stabilised unfired clay bricks for environmental and sustainable use. *Applied Clay Scienc. J.* **2012**, 58, pp. 52–59, DOI. 10.1016 / j.clay.2012.01.011.
24. Pérez, N.; Bucio, L.; Lima, E.; Soto, E. and Cedillo, C. Identification of allophane and other semi-crystalline and amorphous phases on pre-Hispanic Mexican adobe earth bricks from Cholula, Mexico. *Microchemical J.* **2015**, 126, pp. 349–358, DOI. 10.1016/j.microc.2015.12.033.

25. Poon, C.; Kou, S. and Lam, L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Constr. Build. Mater.* **2002**, (16)5, pp. 281–289, DOI. 10.1016/S0950-0618(02)00019-3.
26. Raut, S.; Ralegaonkar, R. and Mandavgane, S. Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-create bricks. *Constr. Build. Mater.* **2011**, 25(10), p. 4037–4042, DOI. 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.038.
27. Rojas, M. and Aquino, E. Sustainable adobe bricks with construction wastes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management*; **2016**, 169(4), pp. 158–165, DOI. <https://doi.org/10.1680/jwarm.16.00014>.
28. Roy, S.; Adhikari, G. and Gupta, R. Use of gold mill tailings in making bricks: a feasibility study. *Waste Manag. & Research.* **2007**, 25(5), pp. 475–482, DOI. 10.1177/0734242X07076944.
29. Sengupta, P.; Saikia, N. and Borthakur, P. Bricks from petroleum effluent treatment plant sludge: properties and environmental characteristic. *J. of Environ. Chemical Engin.* **2005**, 128(11), pp. 1090–1094, DOI. 10.1061/(ASCE) 0733-9372(2002)128:11(1090).
30. Sutcu M.; and Akkurt, S. The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity. *Ceramics Inter.* **2009**, 35(7), pp. 2625–2631, DOI. 10.1016/j.ceramint.2009.02.027.
31. Venkatarama, B. and Jagadish, K. Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. *Ener. & Buil.* **2003**, 35(2), pp. 129–137, DOI. 10.1016/S0378-7788(01)00141-4.
32. Vieira, C.; Sánchez, R. and Monteiro, S. Characteristics of clays and properties of building ceramics in the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Constr. Build. Mater.* **2008**, 22(5), pp. 781–787, DOI. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.006>.



© 2017 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).