

Pontificia Universidad  
Católica del Ecuador



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

FACULTAD DE INGENIERÍA

*ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL*

DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

---

**ELABORACIÓN DE UN MAMPUESTO ECOLÓGICO  
COMO MATERIAL SOSTENIBLE DE CONSTRUCCIÓN  
UTILIZANDO BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR**

---

**AUTORES:**

SANTIAGO DANIEL BRAVO REINOSO

FELIPE ANDRÉS ESPINOZA HERRERA

**DIRECTOR:**

Ing. JORGE DAVID ALBUJA SÁNCHEZ, MSc.

QUITO, 2019

## DECLARACIÓN DE TRABAJO PROPIO

### **Declaración:**

Este documento es de nuestra autoría. Cualquier cita o descripción, a partir del trabajo de otros, es reconocido mediante la referencia de las fuentes, sea que hayan sido publicadas o no publicadas.

\_\_\_\_\_  
Santiago Daniel Bravo Reinoso

\_\_\_\_\_  
Felipe Andrés Espinoza Herrera

## **Agradecimiento**

*A Dios, quien ha labrado un camino lleno de luz en mi nombre con el fin de que realice lo correcto, dándome una razón por la cual despertarme y luchar cada día mediante la fe; también por la fidelidad con la cual pusiste cada regalo de gracia en los procesos para complementar cada una de las etapas de la vida y permitir que este sueño se haga realidad.*

*A mis padres Santiago Bravo Cortez y Magali Reinoso Cedeño, quienes han sido los responsables de brindarme valores para sobrellevar un vuelo equilibrado sobre el trayecto de la vida, permitiéndome triunfar con éxito ante todas las metas propuestas; gracias a mi padre por legar mis estudios además de siempre a confiar en que cada acción que hago, lo hago con lo mejor de mi sin importar una nota física más bien una enseñanza; a mi madre por estar siempre para mí, dispuesta a ayudarme y llenarme apoyo para levantarme cuando se han presentado obstáculos que me han hecho caer.*

*A mis hermanas María José Bravo Reinoso y Victoria Bravo Sánchez, quienes han sido las responsables de complementar el apoyo de mis padres como mis mejores amigas de vida, motivándome para ser mejor con consejos que han dado un sustento a mis decisiones, ayudándome en los momentos que más he necesitado con amor y fortaleza.*

*A mis abuelos, quienes han sido el ejemplo más claro de disciplina y constancia, dejándome enseñanzas fundamentales con las cuales he podido sentirme seguro cuando subo cada peldaño que tiene la vida.*

*A nuestro director, el Ingeniero Jorge Albuja y demás docentes, quienes nos han llenado de conocimiento y sabiduría para llevar a cabo este proyecto.*

*Al personal del laboratorio de Materiales de Construcción, quienes con su entrega física y enseñanza teórica, permitieron que la tesis se realice de manera correcta y viable.*

*Al fondo de investigación de la Universidad Católica del Ecuador, por aceptar este proyecto y brindarnos la oportunidad de financiarlo*

Santiago Daniel Bravo Reinoso

## **Dedicatoria**

*A mi familia en especial a mis padres y hermanas por haberme guiado y aconsejado constantemente, permitiendo que mi formación como persona sea correcta con la finalidad de llegar a ser un profesional de éxito.*

*A mi abuela Victoria Cortez Bedoya, quien ha sido el pilar fundamental de mi vida, con enseñanzas que me han permitido forjar mi carácter para cumplir mis sueños.*

*A mis mejores amigos, los cuales han complementado la parte sentimental de mi vida, apoyándome y dándome ánimos para ser feliz.*

Santiago Daniel Bravo Reinoso

## Agradecimiento

*A Dios, por caminar a mi lado en cada paso que doy, levantándome con todas sus fuerzas cuando caigo, por demostrarme por qué vale la pena creer y enseñarme a ser agradecido con cada pequeño detalle, porque la vida misma es una bendición.*

*A mis padres, Francisco Espinoza Galeas y Patricia Herrera Cisneros, por inculcarme valores íntegros y por mover cielo y tierra para apoyar, con amor incondicional, cada paso que he decidido dar en la vida, impulsándome por sobre todos los obstáculos.*

*A mi hermana, Andrea Espinoza Herrera, por apoyarme con su amor y dulzura, enseñándome que, sin importar lo que suceda, debemos salir adelante con una sonrisa.*

*A mi abuelita, Ana María Cisneros Caicedo, por su gran corazón, por ser un ejemplo de superación y fortaleza, e infundir el espíritu emprendedor y trabajador en mí.*

*A mi compañera de vida, Denisse Astudillo Valarezo, la luz que a pesar de haber alumbrado solo una parte de todo este camino se ha convertido en un apoyo incondicional para mis sueños, y que me guía a ser cada vez una mejor persona.*

*A esta, la mejor facultad de ingeniería del país, mi alma máter. Por haberme regalado los cinco mejores años de mi vida, entregándome conocimientos invaluable, enseñándome la importancia de la solidaridad y el espíritu necesario para salir adelante ante cualquier circunstancia. Por demostrarme las capacidades que tengo y haberme dado la oportunidad de conocer a grandes seres humanos.*

*A Jorge Albuja Sánchez, nuestro director, por guiarnos durante todo el proceso hacia la conclusión de esta etapa de nuestras vidas y brindarnos todas las facilidades para el desarrollo satisfactorio de la presente investigación.*

*Al personal del Laboratorio de Materiales de Construcción - PUCE, por su participación e interés en todos los procesos relacionados a la ejecución de ensayos.*

*A la Dirección de Investigación, por haber otorgado el financiamiento necesario para la realización de este proyecto, a través del Fondo Concursable "Públcalo".*

Felipe Andrés Espinoza Herrera

## **Dedicatoria**

*A la tierra que me vio nacer, Riobamba, cuna de gente capaz, talentosa y trabajadora, que me acogió y formó durante mis primeros 18 años de vida, a la cual llevo en el corazón.*

*A mi abuelo, Delfín Aurelio Espinoza Flores, un hombre sencillo, firme, honesto y dedicado, que vive en mis recuerdos por siempre.*

*A mi bisabuelo, José Absalón Galeas Aguiar, cuya vida se apagó tempranamente, logrando plasmar solamente una pequeña parte de todos sus grandes sueños, dejándome como legado, que no se debe escatimar al momento de soñar.*

*A la memoria de cada uno de mis antepasados y sus diversos orígenes, cuyo ejemplo se ve plasmado en mis acciones, y cuya sangre está viva en mis venas.*

Felipe Andrés Espinoza Herrera

## Resumen

La presente investigación tiene como objetivo la obtención de un mampuesto ecológico, el cual busca representar una alternativa sostenible ante los mampuestos tradicionalmente empleados en la construcción, debido a que su fabricación requiere altas cantidades de energía e involucra una importante generación de emisiones. Para este fin, se han empleado materiales de fuentes locales, como son: suelo, cemento y cenizas de bagazo de caña de azúcar, siendo este último, un residuo notable de las industrias fabricantes de azúcar y etanol. Estos han sido combinados e investigados con el objeto de determinar una dosificación óptima para la elaboración del mampuesto señalado, cuyas propiedades han sido determinadas y evaluadas mediante una comparación con los requisitos establecidos por normativas nacionales e internacionales, y con los resultados de una investigación previa a nivel local. Los resultados obtenidos muestran que el mampuesto desarrollado cumple satisfactoriamente con las características esperadas para este tipo de material, y que tras fabricarse en serie, puede ser comercializado a un precio aproximado de \$0.40, valor que resulta competitivo frente a la oferta existente en el mercado. No obstante, su aplicación en obras de infraestructura presenta limitaciones y consideraciones especiales en términos de aplicabilidad, metodología constructiva, cuidados y reparaciones, que deben ser tomadas en cuenta.

**Palabras clave:** mampuesto ecológico, sostenible, ceniza de bagazo de caña de azúcar.

## **Abstract**

The objective of this investigation is to obtain an ecological masonry unit, which seeks to represent a sustainable alternative to masonry units traditionally used in construction, due to the significant quantities of energy and emissions involved in their manufacturing. For this purpose, locally available materials, as: soil, cement and sugarcane bagasse ash, a substantial waste from the sugar and ethanol industries, have been used. These have been combined and investigated with the object of determining an optimal dosage for the manufacture of the masonry unit proposed, whose properties have been determined and assessed through a comparison with the specifications established by national and international standards, and with the results of a previous local investigation. The results obtained show that the masonry unit that has been developed, successfully complies with the expected properties for this type of material, and after being mass produced, it can be marketed for a price of approximately \$0.40, which results competitive in comparison with the offer available in the market. However, its application in infrastructure facilities has limitations and special considerations in terms of applicability, construction methodology, cares and reparations, that should be noted.

**Keywords:** ecological masonry unit, sustainable, sugarcane bagasse ash.

## Índice de contenidos

---

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Resumen</b> .....  | <b>VII</b>  |
| <b>Abstract</b> .....   | <b>VIII</b> |
| <b>Índice de contenidos</b> .....   | <b>IX</b>   |
| <b>Índice de tablas</b> .....   | <b>XIV</b>  |
| <b>Índice de figuras</b> .....  | <b>XVII</b> |
| <b>Índice de ecuaciones</b> .....   | <b>XXI</b>  |
| <br>  |             |
| <b>1. Generalidades</b> .....   | <b>1</b>    |
| 1.1.    Introducción.....   | 1           |
| 1.2.    Reseña del proyecto.....  | 3           |
| 1.3.    Objetivos.....  | 3           |
| 1.3.1. <i>Objetivo General</i> .....  | 3           |
| 1.3.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....   | 3           |
| 1.4.    Alcance.....  | 4           |
| 1.5.    Marco conceptual.....   | 5           |
| 1.6.    Marco teórico.....  | 6           |
| 1.6.1. <i>Antecedentes</i> .....  | 6           |
| 1.6.2. <i>Perspectiva de los mampuestos ecológicos frente a los ladrillos tradicionales</i> ..... | 7           |
| 1.6.3. <i>Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido</i> .....                                      | 8           |
| 1.6.4. <i>La producción de caña de azúcar en el Ecuador y sus usos</i> .....                      | 9           |
| 1.6.5. <i>El bagazo de caña de azúcar y sus usos</i> .....  | 16          |
| <b>2. Mampostería</b> .....   | <b>19</b>   |
| 2.1.    Ladrillos tradicionales.....  | 19          |
| 2.1.1. <i>Definición</i> .....  | 19          |
| 2.1.2. <i>Características</i> .....   | 19          |
| 2.1.3. <i>Fabricación</i> .....   | 20          |
| 2.2.    Bloques de hormigón.....  | 22          |
| 2.2.1. <i>Definición</i> .....  | 23          |
| 2.2.2. <i>Características</i> .....   | 23          |
| 2.2.3. <i>Fabricación</i> .....   | 23          |
| 2.3.    Mampuestos ecológicos.....  | 25          |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 2.3.1.    | <i>Parámetros de sostenibilidad requeridos</i> .....                          | 26        |
| 2.3.2.    | <i>Mampuestos Ecológicos Cocidos</i> .....                                    | 33        |
| 2.3.3.    | <i>Mampuestos Ecológicos Cementados</i> .....                                 | 37        |
| 2.3.4.    | <i>Mampuestos Ecológicos Geopolimerizados</i> .....                           | 40        |
| 2.3.5.    | <i>Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido (CSEB)</i> .....                  | 42        |
| <b>3.</b> | <b>Diseño de la mezcla</b> .....  | <b>48</b> |
| 3.1.      | Caracterización de materiales .....   | 48        |
| 3.1.1.    | <i>Suelo</i> .....  | 48        |
| 3.1.2.    | <i>Cemento</i> .....  | 60        |
| 3.1.3.    | <i>Cenizas de bagazo de caña de azúcar</i> .....                              | 66        |
| 3.2.      | Procedimiento general .....   | 73        |
| 3.2.1.    | <i>Preparación de materiales</i> .....  | 73        |
| 3.2.2.    | <i>Determinación de la adición de cemento</i> .....                           | 75        |
| 3.2.3.    | <i>Determinación de los reemplazos parciales de cemento por cenizas</i> ..... | 77        |
| 3.2.4.    | <i>Densidad máxima y humedad óptima de moldeo</i> .....                       | 79        |
| 3.2.5.    | <i>Curado</i> .....   | 80        |
| 3.2.6.    | <i>Compresión simple</i> .....  | 83        |
| 3.3.      | Densidad máxima y humedad óptima de moldeo de dosificaciones .....            | 85        |
| 3.3.1.    | <i>Mezcla suelo-cemento (CBA0)</i> .....                                      | 85        |
| 3.3.2.    | <i>Mezcla con reemplazo del 10% de cemento por cenizas (CBA10)</i> .....      | 86        |
| 3.3.3.    | <i>Mezcla con reemplazo del 20% de cemento por cenizas (CBA20)</i> .....      | 87        |
| 3.3.4.    | <i>Mezcla con reemplazo del 30% de cemento por cenizas (CBA30)</i> .....      | 88        |
| 3.3.5.    | <i>Mezcla con reemplazo del 40% de cemento por cenizas (CBA40)</i> .....      | 89        |
| 3.4.      | Compresión simple de probetas .....   | 90        |
| 3.4.1.    | <i>Mezcla suelo-cemento (CBA0)</i> .....                                      | 90        |
| 3.4.2.    | <i>Mezcla con reemplazo del 10% de cemento por cenizas (CBA10)</i> .....      | 91        |
| 3.4.3.    | <i>Mezcla con reemplazo del 20% de cemento por cenizas (CBA20)</i> .....      | 92        |
| 3.4.4.    | <i>Mezcla con reemplazo del 30% de cemento por cenizas (CBA30)</i> .....      | 93        |
| 3.4.5.    | <i>Mezcla con reemplazo del 40% de cemento por cenizas (CBA40)</i> .....      | 94        |
| 3.4.6.    | <i>Comparación de desempeño de dosificaciones</i> .....                       | 95        |
| <b>4.</b> | <b>Mampuesto ecológico</b> .....  | <b>97</b> |
| 4.1.      | Características .....   | 97        |
| 4.1.1.    | <i>Dosificación</i> .....   | 97        |
| 4.1.2.    | <i>Dimensiones</i> .....  | 97        |
| 4.1.3.    | <i>Densidad seca</i> .....  | 100       |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 4.2.      | Proceso de fabricación .....                             | 100        |
| 4.2.1.    | <i>Preparación de materiales</i> .....                   | 100        |
| 4.2.2.    | <i>Moldeo de probetas cilíndricas</i> .....              | 101        |
| 4.2.3.    | <i>Corte de mampuestos</i> .....                         | 102        |
| 4.2.4.    | <i>Curado</i> .....                                      | 104        |
| 4.3.      | Ensayos y resultados .....                               | 106        |
| 4.3.1.    | <i>Resistencia a la compresión</i> .....                 | 107        |
| 4.3.2.    | <i>Resistencia a la flexión</i> .....                    | 112        |
| 4.3.3.    | <i>Absorción</i> .....                                   | 115        |
| 4.4.      | Comparación de propiedades y discusión.....              | 117        |
| 4.4.1.    | <i>Resistencia a la compresión</i> .....                 | 121        |
| 4.4.2.    | <i>Resistencia a la flexión</i> .....                    | 126        |
| 4.4.3.    | <i>Absorción</i> .....                                   | 128        |
| <b>5.</b> | <b>Aproximación hacia los costos de fabricación.....</b> | <b>132</b> |
| 5.1.      | Línea de producción.....                                 | 133        |
| 5.2.      | Inversión inicial .....                                  | 134        |
| 5.3.      | Cantidades de materiales por mampuesto.....              | 135        |
| 5.4.      | Precios por unidad de material.....                      | 136        |
| 5.4.1.    | <i>Suelo</i> .....                                       | 136        |
| 5.4.2.    | <i>Cemento</i> .....                                     | 136        |
| 5.4.3.    | <i>Cenizas</i> .....                                     | 136        |
| 5.4.4.    | <i>Agua</i> .....  | 137        |
| 5.5.      | Costos directos .....                                    | 138        |
| 5.5.1.    | <i>Materia prima</i> .....                               | 138        |
| 5.5.2.    | <i>Mano de obra</i> .....                                | 139        |
| 5.5.3.    | <i>Electricidad</i> .....                                | 140        |
| 5.5.4.    | <i>Combustibles</i> .....                                | 141        |
| 5.6.      | Costos indirectos.....                                   | 142        |
| 5.6.1.    | <i>Personal complementario</i> .....                     | 142        |
| 5.6.2.    | <i>Gastos administrativos y complementarios</i> .....    | 143        |
| 5.7.      | Resumen de costos directos e indirectos.....             | 144        |
| 5.7.1.    | <i>Costos directos</i> .....                             | 144        |
| 5.7.2.    | <i>Costos indirectos</i> .....                           | 144        |
| 5.8.      | Costos de fabricación y precio de venta .....            | 145        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 5.8.1.    | <i>Costo de fabricación</i> .....   | 145        |
| 5.8.2.    | <i>Propuesta de precio de venta</i> .....                                   | 145        |
| 5.8.3.    | <i>Utilidades</i> .....   | 146        |
| <b>6.</b> | <b>Consideraciones de aplicación del producto en infraestructuras</b> ..... | <b>147</b> |
| 6.1.      | Mamposterías adecuadas para la utilización.....                             | 147        |
| 6.1.1.    | <i>Paredes externas</i> .....   | 147        |
| 6.1.2.    | <i>Paredes internas</i> .....   | 148        |
| 6.1.3.    | <i>Muros portantes</i> .....  | 148        |
| 6.1.4.    | <i>Muros aislantes de fuego</i> .....                                       | 149        |
| 6.1.5.    | <i>Bóvedas y cúpulas</i> .....  | 149        |
| 6.1.6.    | <i>Pisos</i> .....  | 149        |
| 6.2.      | Manipulación general.....   | 149        |
| 6.2.1.    | <i>Capacitación del personal involucrado en los procesos</i> .....          | 149        |
| 6.2.2.    | <i>Transporte, entrega y almacenamiento</i> .....                           | 150        |
| 6.3.      | Construcción.....   | 151        |
| 6.3.1.    | <i>Habilidades y calidad del trabajo</i> .....                              | 151        |
| 6.3.2.    | <i>Morteros</i> .....   | 152        |
| 6.3.3.    | <i>Altura de construcción por jornada</i> .....                             | 154        |
| 6.3.4.    | <i>Formación de aberturas</i> .....   | 154        |
| 6.3.5.    | <i>Juntas de movimiento</i> .....   | 155        |
| 6.3.6.    | <i>Esquinas</i> .....   | 155        |
| 6.3.7.    | <i>Fijación de marcos</i> .....   | 155        |
| 6.4.      | Enlucidos.....  | 155        |
| 6.4.1.    | <i>Tipos de enlucidos</i> .....   | 156        |
| 6.4.2.    | <i>Destrezas de trabajo</i> .....   | 157        |
| 6.4.3.    | <i>Herramientas y técnicas</i> .....  | 157        |
| 6.4.4.    | <i>Tiempo de secado</i> .....   | 158        |
| 6.5.      | Pinturas y otros recubrimientos.....  | 158        |
| 6.5.1.    | <i>Pinturas de cal</i> .....  | 158        |
| 6.5.2.    | <i>Pinturas comerciales</i> .....   | 159        |
| 6.5.3.    | <i>Otros acabados</i> .....   | 159        |
| 6.5.4.    | <i>Acabados inapropiados</i> .....  | 160        |
| 6.6.      | Colocación de instalaciones hidrosanitarias y eléctricas.....               | 160        |
| 6.6.1.    | <i>Rutas de servicios</i> .....   | 160        |
| 6.6.2.    | <i>Servicios de agua</i> .....  | 160        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 6.7.      | Colocación de elementos para sujeción de objetos.....                                    | 161        |
| 6.7.1.    | <i>Instalación de elementos en mampuestos</i> .....                                      | 161        |
| 6.7.2.    | <i>Instalación de elementos en morteros</i> .....  | 161        |
| 6.7.3.    | <i>Herramientas de colocación</i> .....  | 162        |
| 6.8.      | Cuidados posteriores.....  | 162        |
| 6.8.1.    | <i>Control de humedad</i> .....  | 162        |
| 6.8.2.    | <i>Calentamiento</i> .....   | 162        |
| 6.8.3.    | <i>Precaución de impactos</i> .....  | 163        |
| 6.9.      | Problemas y soluciones durante la vida útil.....   | 163        |
| 6.9.1.    | <i>Defectos comunes en nuevas construcciones</i> .....                                   | 163        |
| 6.9.2.    | <i>Causas inusuales de daño</i> .....  | 164        |
| 6.9.3.    | <i>Reparaciones y mantenimiento</i> .....  | 165        |
| 6.9.4.    | <i>Alteraciones</i> .....  | 166        |
| <b>7.</b> | <b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>   | <b>168</b> |
| 7.1.      | Conclusiones.....  | 168        |
| 7.1.1.    | <i>Capítulo 1 - Generalidades</i> .....  | 168        |
| 7.1.2.    | <i>Capítulo 2 - Mampostería</i> .....  | 169        |
| 7.1.3.    | <i>Capítulo 3 – Diseño de la mezcla</i> .....  | 169        |
| 7.1.4.    | <i>Capítulo 4 – Mampuesto ecológico</i> .....  | 171        |
| 7.1.5.    | <i>Capítulo 5 – Aproximación hacia los costos de fabricación</i> .....                   | 173        |
| 7.1.6.    | <i>Capítulo 6 – Consideraciones de aplicación del producto en infraestructuras</i> ..... | 173        |
| 7.2.      | Recomendaciones .....  | 175        |
| 7.2.1.    | <i>Capítulo 1 - Generalidades</i> .....  | 175        |
| 7.2.2.    | <i>Capítulo 2 - Mampostería</i> .....  | 175        |
| 7.2.3.    | <i>Capítulo 3 – Diseño de la mezcla</i> .....  | 176        |
| 7.2.4.    | <i>Capítulo 4 – Mampuesto ecológico</i> .....  | 177        |
| 7.2.5.    | <i>Capítulo 5 – Aproximación hacia los costos de fabricación</i> .....                   | 177        |
| 7.2.6.    | <i>Capítulo 6 – Consideraciones de aplicación del producto en infraestructuras</i> ..... | 178        |
|           | <b>Referencias Bibliográficas .....</b>  | <b>180</b> |

## Índice de tablas

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1.</b> Producción de caña de azúcar para fabricación de azúcar en Ecuador (Instituto Ecuatoriano de Estadística y Censos, 2018). Adaptación propia. ....                   | 12 |
| <b>Tabla 2.</b> Producción de caña de azúcar para otros usos en Ecuador (Instituto Ecuatoriano de Estadística y Censos, 2018). Adaptación propia. ....                              | 12 |
| <b>Tabla 3.</b> Coeficientes de energía embebida de diversos materiales de construcción (Rocha Tamayo, 2011, a partir de la Victoria University of Wellington, Nueva Zelanda). .... | 29 |
| <b>Tabla 4.</b> Investigaciones sobre mampuestos ecológicos cocidos (Zhang, 2013). Adaptación propia. ....  | 35 |
| <b>Tabla 5.</b> Investigaciones sobre mampuestos cocidos analizadas en términos de duración y temperatura de cocción (Murmu & Patel, 2018). Elaboración propia. ....                | 36 |
| <b>Tabla 6.</b> Investigaciones de mampuestos ecológicos cementados (Zhang, 2013). Adaptación propia. ....  | 39 |
| <b>Tabla 7.</b> Investigaciones sobre mampuestos geopolimerizados (Zhang, 2013). Adaptación propia. ....  | 41 |
| <b>Tabla 8.</b> Contenido de humedad natural del suelo. ....  | 50 |
| <b>Tabla 9.</b> Análisis granulométrico por tamizado. ....  | 51 |
| <b>Tabla 10.</b> Análisis granulométrico por sedimentación (hidrometría). ....  | 52 |
| <b>Tabla 11.</b> Distribución de finos de acuerdo al análisis granulométrico por sedimentación (hidrometría). ....  | 52 |
| <b>Tabla 12.</b> Contenidos de humedad correspondientes a diferentes números de golpes. ....  | 54 |
| <b>Tabla 13.</b> Límite Líquido. ....   | 55 |
| <b>Tabla 14.</b> Contenidos de humedad correspondientes al Límite Plástico. ....  | 56 |
| <b>Tabla 15.</b> Resumen de límites de plasticidad. ....  | 56 |
| <b>Tabla 16.</b> Gravedad específica del suelo. Fuente: LMC-PUCE. ....  | 57 |
| <b>Tabla 17.</b> Resumen de datos para la clasificación del suelo bajo el sistema SUCS. ....  | 58 |
| <b>Tabla 18.</b> Clasificación del suelo. ....  | 59 |
| <b>Tabla 19.</b> Datos para curva de compactación de suelo natural. ....  | 60 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Tabla 20.</b> Densidad de Cemento Holcim GU.....  | 61  |
| <b>Tabla 21.</b> Gravedad específica de Cemento Holcim GU. ....  | 62  |
| <b>Tabla 22.</b> Finura de Cemento Holcim GU. ....   | 62  |
| <b>Tabla 23.</b> Composición química de Cemento Holcim GU – Origen: Latacunga (Garófalo, 2015). Adaptación propia.....                                 | 66  |
| <b>Tabla 24.</b> Composición de aditivo para diferentes dosificaciones. ....   | 78  |
| <b>Tabla 25.</b> Porcentaje en peso de suelo seco de aditivos para diferentes dosificaciones.....  | 79  |
| <b>Tabla 26.</b> Curva de compactación de la mezcla CBA0.....  | 85  |
| <b>Tabla 27.</b> Curva de compactación de la mezcla CBA10.....   | 86  |
| <b>Tabla 28.</b> Curva de compactación de la mezcla CBA20.....   | 87  |
| <b>Tabla 29.</b> Curva de compactación de la mezcla CBA30.....   | 88  |
| <b>Tabla 30.</b> Curva de compactación de la mezcla CBA40.....   | 89  |
| <b>Tabla 31.</b> Características y resultados de probetas de la mezcla CBA0.....   | 90  |
| <b>Tabla 32.</b> Características y resultados de probetas de la mezcla CBA10.....  | 91  |
| <b>Tabla 33.</b> Características y resultados de probetas de la mezcla CBA20.....  | 92  |
| <b>Tabla 34.</b> Características y resultados de probetas de la mezcla CBA30.....  | 93  |
| <b>Tabla 35.</b> Características y resultados de probetas de la mezcla CBA30.....  | 94  |
| <b>Tabla 36.</b> Cantidad de suelo para mezcla y moldeo de mampuestos. ....  | 97  |
| <b>Tabla 37.</b> Cantidades de aditivos para mezcla y moldeo de mampuestos.....  | 97  |
| <b>Tabla 38.</b> Dimensiones del mampuesto real (Aureka) y el mampuesto desarrollado. ....   | 99  |
| <b>Tabla 39.</b> Características de compactación de la dosificación CBA20.....   | 100 |
| <b>Tabla 40.</b> Densidad de probetas cilíndricas de 6” obtenidas por compactación. ....   | 102 |
| <b>Tabla 41.</b> Factores de corrección de resistencia (Heathcote & Jankulovski, 1992, como se citaron en Morel et al., 2007). Adaptación propia. .... | 110 |
| <b>Tabla 42.</b> Resistencia a la compresión de mampuestos a los 14 días.....  | 111 |
| <b>Tabla 43.</b> Resistencia a la compresión de mampuestos a los 28 días.....  | 112 |
| <b>Tabla 44.</b> Módulo de rotura de mampuestos a los 28 días. ....  | 114 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabla 45.</b> Absorción de mampuestos a los 28 días. ....  | 117 |
| <b>Tabla 46.</b> Normativa nacional sobre ladrillos tradicionales cocidos.....  | 117 |
| <b>Tabla 47.</b> Normativa internacional sobre mampuestos de suelo comprimido analizada por Murmu & Patel (2018).....                                   | 119 |
| <b>Tabla 48.</b> Características del suelo utilizado por Mena & Camacho (2018).....   | 120 |
| <b>Tabla 49.</b> Clasificación del suelo utilizado por Mena & Camacho (2018). ....  | 120 |
| <b>Tabla 50.</b> Aditivos empleados por Mena & Camacho (2018).....  | 120 |
| <b>Tabla 51.</b> Dimensiones del mampuesto desarrollado por Camacho & Mena (2018) relacionadas al cálculo del factor de corrección de resistencia. .... | 123 |
| <b>Tabla 52.</b> Corrección sobre la resistencia a la compresión a los 14 días obtenida por Camacho & Mena (2018).....                                  | 123 |
| <b>Tabla 53.</b> Corrección sobre la resistencia a la compresión a los 28 días obtenida por Camacho & Mena (2018).....                                  | 124 |
| <b>Tabla 54.</b> Aproximación de requerimiento de adquisición de maquinaria y equipamiento. ....  | 134 |
| <b>Tabla 55.</b> Cálculo de cantidades estándar de materiales para la elaboración de una unidad de mampuesto. ....                                      | 135 |
| <b>Tabla 56.</b> Determinación del precio unitario por kg de suelo. ....  | 136 |
| <b>Tabla 57.</b> Determinación del precio unitario por kg de cemento. ....  | 136 |
| <b>Tabla 58.</b> Determinación del precio unitario por kg de ceniza. ....   | 136 |
| <b>Tabla 59.</b> Precio unitario por m <sup>3</sup> de agua. ....   | 137 |
| <b>Tabla 60.</b> Determinación del costo directo de materia prima por unidad de mampuesto. ...  | 138 |
| <b>Tabla 61.</b> Determinación del costo directo de mano de obra por unidad de mampuesto....  | 139 |
| <b>Tabla 62 .</b> Determinación del costo directo de electricidad de equipo por unidad de mampuesto. ....   | 140 |
| <b>Tabla 63.</b> Determinación del costo directo de combustibles de equipo por unidad de mampuesto. ....  | 141 |
| <b>Tabla 64.</b> Determinación del costo indirecto de personal complementario. ....   | 142 |
| <b>Tabla 65.</b> Determinación del costo indirecto de gastos administrativos y complementarios. ....  | 143 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Tabla 66.</b> Resumen de costos directos. ....  | 144 |
| <b>Tabla 67.</b> Resumen de costos indirectos. ....  | 144 |
| <b>Tabla 68.</b> Costo de fabricación del mampuesto propuesto.....                             | 145 |
| <b>Tabla 69.</b> Comparación de precio de venta propuesto frente a la oferta del mercado. .... | 145 |
| <b>Tabla 70.</b> Precio de venta del mampuesto propuesto. ....                                 | 145 |
| <b>Tabla 71.</b> Estructura de la utilidad bruta por unidad. ....                              | 146 |
| <b>Tabla 72.</b> Estructura de la utilidad bruta mensual.....                                  | 146 |

## Índice de figuras

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Estructura productiva de la agroindustria azucarera en el Ecuador (Corporación Financiera Nacional, 2017). ....  | 10 |
| <b>Figura 2.</b> Producción de cultivos permanentes en peso (Instituto Ecuatoriano de Estadística y Censos, 2018). ....   | 11 |
| <b>Figura 3.</b> Participación de cultivos en la superficie plantada total (Instituto Ecuatoriano de Estadística y Censos, 2018). ....  | 11 |
| <b>Figura 4.</b> Provincias con producción de caña de azúcar en Ecuador. De acuerdo con los colores: Naranja: Región Costa, Azul: Región Sierra, Verde: Región Amazónica. Elaboración propia mediante Pypus, 2019. .... | 13 |
| <b>Figura 5.</b> Totales de energía embebida en una casa australiana por categoría de materiales utilizados en la construcción (Giga Joules, GJ). (Rocha Tamayo, 2011, a partir de CSIRO, 2010). ....                   | 30 |
| <b>Figura 6.</b> Mampuestos ecológicos cocidos fabricados con cenizas de bagazo de caña de azúcar y cenizas de cáscara de arroz (Kazmi, Abbas, Saleem, Munir, & Khitab, 2016). ....                                     | 33 |
| <b>Figura 7.</b> Proceso de fabricación de mampuestos ecológicos cocidos (Murmu & Patel, 2018). Adaptación propia. ....   | 34 |
| <b>Figura 8.</b> Resistencia a la compresión de acuerdo con la duración de cocción (Murmu & Patel, 2018). Adaptación propia.....  | 36 |
| <b>Figura 9.</b> Resistencia a la compresión de acuerdo con la temperatura de cocción (Murmu & Patel., 2018). Adaptación propia.....  | 37 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 10.</b> Mampuestos ecológicos cementados fabricados con residuos de algodón, polvo de piedra caliza y Cemento Portland Ordinario (Algin & Turgut, 2007). .....       | 37 |
| <b>Figura 11.</b> Proceso de fabricación de mampuestos ecológicos cementados (Murmu & Patel, 2018). Adaptación propia.....   | 38 |
| <b>Figura 12.</b> Mampuesto fabricado con geopolímeros de polvo de silicato de potasio (Noble Alchem Private Limited, 2019).....   | 40 |
| <b>Figura 13.</b> Bloque de Suelo Estabilizado Comprimido (Earth Blocks India Private Ltd., 2018). .....   | 42 |
| <b>Figura 14.</b> Conductividad Térmica y Densidad Promedio en diferentes tipos de mampuestos (Murmu & Patel, 2018). Adaptación propia. ....                                   | 46 |
| <b>Figura 15.</b> Depósito localizado en Calacalí, Distrito Metropolitano de Quito.....  | 48 |
| <b>Figura 16.</b> Curva granulométrica de la muestra de suelo.....   | 52 |
| <b>Figura 17.</b> Curva de flujo del Límite Líquido.....   | 55 |
| <b>Figura 18.</b> Carta de Plasticidad (Casagrande).....   | 58 |
| <b>Figura 19.</b> Curva de compactación de suelo natural. ....   | 60 |
| <b>Figura 20.</b> Principio de la estabilización de suelos con cemento (Venkatarama Reddy, 2012). Adaptación propia.....   | 61 |
| <b>Figura 21.</b> Microscopía electrónica de barrido de Cemento Portland Ordinario en estado original (Jamsawang et al., 2017). ....   | 63 |
| <b>Figura 22.</b> Microscopía electrónica de barrido de Cemento Portland Ordinario en fase temprana de hidratación (Cerro-Prada, 2018). Adaptación propia. ....                | 64 |
| <b>Figura 23.</b> Microscopía electrónica de barrido de Cemento Portland Ordinario tras concluir el proceso químico de hidratación (Cerro-Prada, 2018). Adaptación propia..... | 65 |
| <b>Figura 24.</b> Bagazo de caña de azúcar y cenizas de diferentes orígenes (Alderetes, 2016). ..  | 66 |
| <b>Figura 25.</b> Bagazo de caña de azúcar obtenido de la Hacienda Santa Mercedes, Ibarra, Imbabura, Ecuador.....  | 67 |
| <b>Figura 26.</b> Proceso de generación de cenizas de bagazo de caña de azúcar (Xu et al., 2019). Adaptación propia.....   | 67 |
| <b>Figura 27.</b> Ciclo de generación de energía debido a la combustión de bagazo (Alderetes, 2016). .....   | 68 |
| <b>Figura 28.</b> Proceso de combustión de bagazo (Alderetes, 2016). .....   | 69 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 29.</b> Planta del Ingenio Azucarero del Norte. ....  | 71 |
| <b>Figura 30.</b> Depósito de cenizas de bagazo de caña de azúcar. ....   | 72 |
| <b>Figura 31.</b> Depósito de cenizas de bagazo de caña de azúcar. ....   | 72 |
| <b>Figura 32.</b> Suelo sin procesar con humedad natural. ....  | 74 |
| <b>Figura 33.</b> Suelo secado al aire y procesado. ....  | 74 |
| <b>Figura 34.</b> Ceniza en estado natural. ....  | 75 |
| <b>Figura 35.</b> Ceniza seca al horno y tamizada. ....   | 75 |
| <b>Figura 36.</b> Clasificación de la fracción de suelos limosos y arcillosos en el sistema AASHTO (Das, 2015). ....                | 76 |
| <b>Figura 37.</b> Requerimiento de cemento para grupos de suelo AASHTO (Portland Cement Association, 1992). Adaptación propia. .... | 77 |
| <b>Figura 38.</b> Apilado de Bloques de Suelo para el curado (Venkatarama Reddy, 2012). ....  | 81 |
| <b>Figura 39.</b> Curado de prefabricados en cuarto de vapor (GharPedia, 2019). ....  | 81 |
| <b>Figura 40.</b> Curado de probetas de dosificaciones en el LMC-PUCE. ....   | 83 |
| <b>Figura 41.</b> Compresión simple de probeta cilíndrica correspondiente a dosificación en el LMC-PUCE. ....                       | 84 |
| <b>Figura 42.</b> Curva de compactación de suelo natural. ....  | 85 |
| <b>Figura 43.</b> Curva de compactación de la mezcla CBA10. ....  | 86 |
| <b>Figura 44.</b> Curva de compactación de la mezcla CBA20. ....  | 87 |
| <b>Figura 45.</b> Curva de compactación de la mezcla CBA30. ....  | 88 |
| <b>Figura 46.</b> Curva de compactación de la mezcla CBA40. ....  | 89 |
| <b>Figura 47.</b> Resistencia a la compresión en el tiempo de la mezcla CBA0. ....  | 90 |
| <b>Figura 48.</b> Resistencia a la compresión en el tiempo de la mezcla CBA10. ....   | 91 |
| <b>Figura 49.</b> Resistencia a la compresión en el tiempo de la mezcla CBA20. ....   | 92 |
| <b>Figura 50.</b> Resistencia a la compresión en el tiempo de la mezcla CBA30. ....   | 93 |
| <b>Figura 51.</b> Resistencia a la compresión en el tiempo de la mezcla CBA40. ....   | 94 |
| <b>Figura 52.</b> Comparación de resistencia a la compresión de dosificaciones de acuerdo con la edad. ....                         | 95 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 53.</b> Dimensiones del mampuesto desarrollado. ....   | 99  |
| <b>Figura 54.</b> Probeta cilíndrica de 6” con doble protección. ....  | 102 |
| <b>Figura 55.</b> Corte vertical de probeta cilíndrica. ....   | 103 |
| <b>Figura 56.</b> Corte final para la obtención de mampuestos. ....  | 103 |
| <b>Figura 57.</b> Mampuesto obtenido. ....   | 103 |
| <b>Figura 58.</b> Resistencia ante curado envuelto (Jamsawang et al., 2017). Adaptación propia. ....   | 104 |
| <b>Figura 59.</b> Resistencia ante curado sumergido (Jamsawang et al., 2017). Adaptación propia. ....  | 104 |
| <b>Figura 60.</b> Curado de probetas cilíndricas de 6” con doble protección (película plástica y bolsa hermética) en cuarto de curado. ....  | 106 |
| <b>Figura 61.</b> Preparación y curado de mampuestos tras corte en el LMC-PUCE: a) 1° capa de protección con película plástica, b) 2° capa de protección con bolsa plástica de cierre hermético, c) colocación en cuarto de curado. .... | 106 |
| <b>Figura 62.</b> Compresión simple sobre mitad de mampuesto. ....   | 109 |
| <b>Figura 63.</b> Factor de corrección respecto a la relación de aspecto (Heathcote & Jankulovski, 1992, como se citaron en Morel et al., 2007). Elaboración propia. ....  | 111 |
| <b>Figura 64.</b> Flexión sobre mampuesto. ....  | 113 |
| <b>Figura 65.</b> Absorción de mampuestos. ....  | 116 |
| <b>Figura 66.</b> Comparación de resultados de resistencia a la compresión frente a normativa nacional. ....   | 121 |
| <b>Figura 67.</b> Comparación de resultados de resistencia a la compresión frente a normativa internacional. ....  | 122 |
| <b>Figura 68.</b> Comparación de resultados de resistencia a la compresión a los 14 días frente a la experiencia previa de Camacho & Mena, 2018. ....  | 124 |
| <b>Figura 69.</b> Comparación de resultados de resistencia a la compresión a los 28 días frente a la experiencia previa de Camacho & Mena, 2018. ....  | 125 |
| <b>Figura 70.</b> Comparación de resultados de módulo de rotura a los 28 días frente a enfoques internacionales. ....  | 127 |
| <b>Figura 71.</b> Comparación de resultados de absorción frente a normativa nacional. ....   | 128 |
| <b>Figura 72.</b> Comparación de resultados de absorción frente a normativa internacional. ....  | 129 |

**Figura 73.** Comparación de resultados de absorción frente a la experiencia previa de Camacho & Mena (2018)..... 130

**Figura 74.** Línea de producción planteada para la fabricación del mampuesto ecológico.. 133

## Índice de ecuaciones

---

**Ecuación 1.** Índice de Plasticidad..... 56

**Ecuación 2.** Gravedad específica. .... 61

**Ecuación 3.** Resistencia característica en Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido.  
Adaptación propia. .... 107

**Ecuación 4.** Resistencia a la compresión de mampuestos..... 109

**Ecuación 5.** Módulo de rotura de mampuestos. .... 113

**Ecuación 6.** Determinación de la absorción de mampuestos. .... 116

## **1. Generalidades**

### **1.1. Introducción**

---

La industria de la construcción constituye un sector de operación permanente en la economía a nivel mundial, y como tal, representa el mayor usuario de materiales de las fuentes naturales (Barbuta, Bucur, Cimpeanu, Paraschiv, & Bucur, 2015), muchos de los cuales requieren ser procesados para la obtención de materiales de construcción, consumiendo una gran cantidad de energía térmica y eléctrica, y provocando la contaminación del aire, agua y suelo, afectando de esta manera a la flora, la fauna y sobre todo, al estilo de vida de las personas (Jumaat, Safiuddin, Salam, & Hashim, 2010), razón por la cual, es posible inferir que este sector es un protagonista en el cambio climático, un fenómeno de interés mundial.

En ciertos países, el alto crecimiento poblacional ha sido una causa para la reducción crónica de la disponibilidad de materiales de construcción, debido a una elevada y permanente demanda de vivienda (Madurwar, Ralegaonkar, & Mandavgane, 2013), lo cual más allá de señalar una falta de capacidad de producción, indica que las fuentes de materia prima no son capaces de abastecer los requerimientos para la fabricación de materiales de construcción.

Estas razones, sumadas a que el costo de la energía es elevado, hacen que el costo de los materiales de construcción se incremente en el transcurso del tiempo, por lo cual, es necesario reformular la fabricación de materiales de construcción a través de la búsqueda de la inclusión de componentes alternativos, en pro de la conservación de las fuentes naturales y el ahorro de energía, para lo cual, se requieren esfuerzos globales en investigación y desarrollo, con la finalidad de producir materiales de construcción sostenibles y ambientalmente amigables (Jumaat et al., 2010).

La disposición de residuos sólidos generados a partir de la producción agroindustrial es un serio problema en países en vías de desarrollo, dado que presenta inconvenientes debido a su gran volumen, la falta de opciones para el procesamiento y el déficit de rellenos sanitarios. La mayor cantidad de residuos

generados son: bagazo de caña de azúcar, tallos y cáscaras de arroz y trigo, desechos vegetales, productos alimenticios, te, aceites, fibras de yute, cáscaras de nuez molida, aserrín, cáscara de coco, tallos de algodón, entre otros (Madurwar et al., 2013).

Ventajosamente, en los últimos tiempos se ha llevado a cabo una extensa investigación en búsqueda de la inclusión de estos residuos dentro de la fabricación de varios tipos de materiales de construcción, como: paneles de aglomerado, aislantes térmicos, ladrillos y bloques, aglomerantes cementicios, materiales puzolánicos, reforzamientos de fibras, entre otros (Madurwar et al., 2013), lo cual otorga una idea de la versatilidad que estos poseen al adaptarlos a cada proceso de elaboración.

Se han llevado a cabo diversas investigaciones enfocadas hacia la fabricación de ladrillos, y se ha definido que el proceso convencional de fabricación mediante cocción emite varios tipos de gases contaminantes, produce cenizas, genera en promedio un 20% de ladrillos de calidad menor a la estándar, que necesariamente deben ser desalojados, y requiere una gran cantidad de energía, lo cual no es ambientalmente amigable (Murmu & Patel, 2018), incluso si en el proceso de fabricación se incluyen residuos sólidos orgánicos o inorgánicos, dado que la huella de carbono resultante del proceso de cocción es relevante. En virtud de lo indicado, la investigación y el desarrollo de mampuestos se debe enfocar a la obtención de productos que no requieran cocción.

El propósito de la presente disertación es el desarrollo de un mampuesto empleando ceniza de bagazo de caña de azúcar, un residuo importante de la industria azucarera nacional, a través de la investigación de los materiales y la determinación de la dosificación óptima mediante la metodología de estabilización de suelos, para posteriormente, obtener probetas prismáticas con dimensiones acordes a la normativa nacional vigente para ladrillos tradicionales, con la finalidad de efectuar ensayos de resistencia mecánica y absorción, procediendo a la comparación con los requerimientos de la normativa señalada, normativa internacional y los resultados de la investigación previa de Camacho & Mena

(2018) sobre mampuestos elaborados con cáscara de arroz y ceniza de cáscara de arroz.

## **1.2. Reseña del proyecto**

---

El desarrollo del proyecto inicia con la definición de los objetivos y alcance, la exposición del marco conceptual, los antecedentes y el marco teórico (Capítulo 1), la presentación de las características de la mampostería tradicional y mampostería ecológica (Capítulo 2), el proceso de diseño de la dosificación (Capítulo 3), la dosificación óptima, la fabricación del mampuesto final y la ejecución de los ensayos de resistencia mecánica y absorción (Capítulo 4), una aproximación hacia los costos de fabricación (Capítulo 5), y las consideraciones de aplicación del producto en infraestructuras en cuanto a transporte y almacenamiento, uso adecuado, morteros y materiales de recubrimiento, colocación de instalaciones hidrosanitarias y eléctricas, cuidados y reparaciones (Capítulo 6). Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones resultantes de la investigación (Capítulo 7).

## **1.3. Objetivos**

---

### **1.3.1. Objetivo General**

Elaborar un mampuesto ecológico como material sostenible de construcción utilizando bagazo de caña de azúcar en conjunto con suelo y cemento.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Establecer las características del suelo requeridas para el proceso de diseño, mediante ensayos de laboratorio de tipo: contenido de humedad, granulometría, límites de consistencia, gravedad específica y clasificación de suelo SUCS.

- Proporcionar la dosificación óptima de los materiales que posteriormente permita obtener las mejores propiedades mecánicas en los mampuestos a fabricarse.
- Fabricar muestras del mampuesto ecológico que cumplan con la geometría admitida por la normativa para ladrillos tradicionales.
- Presentar las consideraciones fundamentales para la aplicación del mampuesto ecológico en obras de infraestructura.

#### **1.4. Alcance**

---

La presente investigación busca determinar la dosificación óptima para la fabricación de un mampuesto ecológico, sobre el cual se procederá a comparar sus propiedades mecánicas con las de un ladrillo tradicional y las propiedades obtenidas de la elaboración de mampuestos con cáscara de arroz y ceniza de cáscara de arroz en una investigación pasada.

Inicialmente el tipo de investigación planteada será exploratoria debido a que existe escasa información acerca de la fabricación de mampuestos con ceniza de bagazo de caña de azúcar; no obstante, existen líneas establecidas para su utilización en el mejoramiento de suelos y fabricación de ladrillos, que servirán como referencia experimental para la consecución de este producto.

Una vez orientados en la teoría impartida por el estado del arte, se estipularán las características esenciales de los materiales para el proceso de diseño y fabricación del mampuesto, así como las propiedades del producto final mediante estudios descriptivos.

Se realizarán estudios correlacionales tanto en el proceso de diseño como sobre los resultados finales, de forma que en primera instancia se determine la relación entre el suelo, cemento y bagazo de caña de azúcar ideal para obtener las mejores características de la mezcla, y en segunda instancia, al vincular los resultados específicos del elemento obtenido con los resultados de los mampuestos elaborados en base a ceniza de cáscara de arroz y cáscara de arroz, además de los

requerimientos presentados para los ladrillos existentes en el mercado, de manera que sea posible definir la viabilidad o el descarte del producto conseguido.

Finalmente, se pretende efectuar una aproximación hacia los costos de elaboración del mampuesto ecológico y las consideraciones de su aplicabilidad en infraestructuras, como una referencia de la competitividad que este tendría ante los ladrillos convencionales que se ofertan en el mercado.

### **1.5. Marco conceptual**

---

A continuación, se definen los conceptos fundamentales a tratarse; cabe indicar que, por una parte, existen definiciones técnicas, que han sido obtenidas de autores, mientras que desde otro punto de vista, se han establecido ciertas definiciones puntuales para establecer terminología característica de la presente investigación:

Ladrillo: Jiménez López (2005), dentro de los materiales de construcción, define a un ladrillo como “una pieza cerámica empleada en albañilería, de forma ortoédrica, fabricada por moldeo, secado y cocción de una pasta arcillosa...”.

Ladrillo tradicional o convencional: en la presente investigación, se entiende como tal a un ladrillo que se encuentra disponible en el mercado y cumple con los requisitos establecidos por la normativa nacional vigente.

Mampuesto: el diccionario de la Real Academia Española (2018), establece: “dicho de un material: que se emplea en una obra de mampostería”, definición que resulta más adecuada para el elemento a ser desarrollado en este proyecto, puesto que su noción de carácter general permite que sea adoptada para el material de construcción a ser elaborado.

Bagazo de caña de azúcar: Vargas Peñate (1990), señala: “el bagazo es el residuo del proceso de fabricación de azúcar a partir de la caña, el remanente de los tallos de la caña después que ha sido extraído el jugo azucarado”.

Ecológico: una definición apropiada y que se adapta al contexto de la presente obra es la mostrada por el Macmillan Education Dictionary (2019), en donde se define

el término *ecological* como: “*working to protect the environment*” [trabajando para proteger el medio ambiente].

Sostenible: un concepto universalmente aceptado parte de la definición de “desarrollo duradero”, que es sinónimo del “desarrollo sostenible”, presentada en el Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de la Asamblea General de las Naciones Unidas (1987), a partir de la cual, se deduce que un objeto sostenible es aquel que es capaz de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias.

## **1.6. Marco teórico**

---

### **1.6.1. Antecedentes**

En la práctica se ha observado una amplia gama de suelos cuyas propiedades físicas, químicas y mecánicas, no cumplen con los parámetros necesarios para su utilización en fines de ingeniería, razón por la cual, se ha emprendido su estabilización a través de materiales sostenibles de diversos tipos, mejorando notablemente sus características. Siguiendo con la misma filosofía, para la elaboración de ladrillos tradicionales cocidos se han implementado residuos orgánicos de las agroindustrias con diferentes porcentajes que oscilan entre el 5 al 20% del total de peso, obteniéndose efectos positivos de diversos tipos (Luna-Cañas, Ríos-Reyes, & Quintero-Ortíz, 2014).

No obstante, el proceso de cocción es altamente nocivo para el medio ambiente; Maithel & Uma, y Kumar, Lalchaldani & Kanungo (como se citaron en Murmu & Patel, 2018) señalan que un horno de ladrillos produce diversos tipos de emisiones: alrededor de 70-282 g de dióxido de carbono, 0.001-0.29 g de carbono negro, 0.29-5.78 g de monóxido de carbono y 0.15-1.56 g de material particulado por cada kilogramo de ladrillo cocido, requiriendo entre 0.54 y 3.14 MJ (0.15-0.87 kWh) de energía específica para ser fabricado,

siendo definidos los rangos de emisiones y energía de acuerdo al tipo de horno y el combustible utilizado.

Considerando el impacto ambiental que el proceso de cocción genera al momento de la fabricación de los ladrillos, se han llevado a cabo diversas investigaciones para la elaboración de mampuestos, que sin ser cocidos, y utilizando de igual manera residuos orgánicos de las agroindustrias, poseen una menor huella ecológica, lo cual se manifiesta en un consumo energético 7 veces menor en su proceso de fabricación frente a los ladrillos tradicionales cocidos (Cabo Laguna, 2011), alcanzándose un material relativamente robusto, resistente al fuego, aislante térmico y capaz de mantener niveles internos de humedad moderados (Sutton, Black, & Walker, 2011).

Una posibilidad para la estabilización de suelos involucra la utilización del bagazo de caña de azúcar, incorporándolo en forma de cenizas, conjuntamente con Cemento Portland, obteniéndose una mezcla que es capaz de elevar la resistencia a la compresión tanto como si se efectuara el mejoramiento solamente con cemento, al reemplazar un 20% del peso del cemento por cenizas de bagazo (Jamsawang, Poorahong, Yoobanpot, Songpiriyakij, & Jongpradist, 2017), presentándose como una alternativa potencial de aplicación para la elaboración de mampuestos ecológicos.

### **1.6.2. Perspectiva de los mampuestos ecológicos frente a los ladrillos tradicionales**

La fabricación de los ladrillos tradicionales disponibles en el mercado requiere de la utilización de grandes cantidades de energía, tanto durante el proceso de la extracción de arcilla como en la cocción, y esto conlleva a la producción de grandes cantidades de gases de efecto invernadero (Zhang, 2013). Por esta razón, se considera que la fabricación de ladrillos tradicionales no es un proceso sostenible a largo plazo.

En la actualidad, las agroindustrias generan cantidades importantes de residuos orgánicos que pueden constituir nuevos materiales para su adición en productos existentes. Estos residuos, debido a su alto contenido de materia orgánica, se pueden disponer de manera segura. No obstante, a futuro se espera que la cantidad de residuos generados aumente notablemente, hecho que frente a los costos de rellenos sanitarios, regulaciones ambientales cada vez más severas y el interés en el desarrollo sostenible, constituye una oportunidad para su utilización en la fabricación de ladrillos tradicionales y mampuestos (Luna-Cañas et al., 2014).

Frente a la evidencia del cambio climático, se ha generado la necesidad de concebir proyectos enmarcados dentro de una conciencia ecológica, que involucren el ahorro de energía y la reducción de emisiones de dióxido de carbono hacia la atmósfera, utilizando materiales de construcción sostenibles. Los mampuestos elaborados bajo procesos que no requieren cocción, resultan ambientalmente más amigables que los ladrillos tradicionales, incluso si estos últimos incluyen residuos orgánicos en su composición (Cabo Laguna, 2011).

### **1.6.3. Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido**

Dentro de los mampuestos ecológicos, se encuentran los Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido (*Compressed Stabilized Earth Blocks, CSEB*), que básicamente se fabrican de acuerdo con una dosificación dada por el procedimiento de estabilización de suelos, la cual es comprimida para obtener una probeta prismática, que representa un mampuesto como tal. El uso de suelo como material para la construcción de mampostería posee, fundamentalmente, las siguientes ventajas (Venkatarama Reddy, 2012):

- Disponibilidad local.
- Bajo costo.
- Reciclabilidad.
- Es ecológico.

La durabilidad del mampuesto se encuentra fuertemente relacionada a su resistencia a la compresión, la cual dependerá de la estabilización conseguida.

La presente investigación, en base al precedente del mejoramiento de suelos con ceniza de bagazo de caña de azúcar y Cemento Portland presentado por Jamsawang et al. (2017), pretende su aplicación en la elaboración de mampuestos de tipo Bloque de Suelo Estabilizado Comprimido, para así obtener un material de construcción sostenible que represente una alternativa eficiente y ecológica frente a los sistemas tradicionales de elaboración de ladrillos, apoyándose en la evolución de la resistencia a la compresión y el mejoramiento de la composición química y propiedades a nivel de microestructura obtenidas en el mencionado proceso de estabilización de suelos, considerando que las cenizas de bagazo de caña de azúcar representan un residuo significativo de la agroindustria.

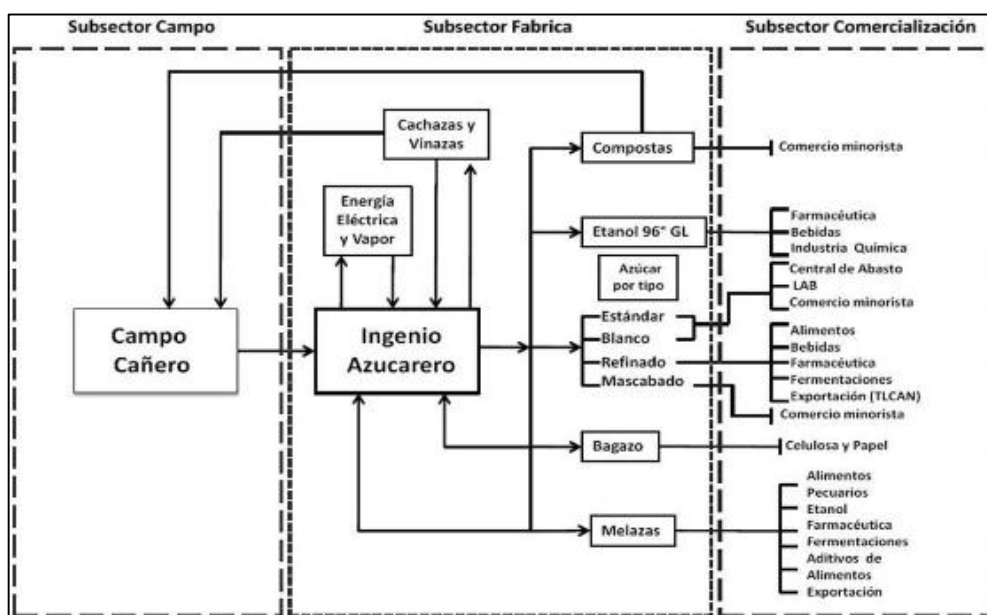
#### **1.6.4. La producción de caña de azúcar en el Ecuador y sus usos**

El Ecuador es un país que posee una fuerte actividad en el cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*), puesto que permite la obtención de múltiples productos, entre los cuales se destaca el azúcar, elemento primordial de la canasta básica, y que representa un componente fundamental de alimentos semi elaborados y elaborados que son de consumo masivo (Castillo & Silva, 2004), así como alcohol etílico (etanol) y varios subproductos de los procesos productivos, como son cachazas y vinazas, compostas, bagazo y melazas. El cultivo de caña de azúcar es un integrante importante del Producto Interno Bruto del Ecuador, alcanzando un 3.30% de participación en el 2016 (Corporación Financiera Nacional, 2017). La actividad es llevada a cabo por los ingenios azucareros y los cañicultores, que se estima en una proporción de alrededor del 60% y el 40% de intervención, respectivamente (Revista Líderes, 2016).

De acuerdo al ciclo de producción, el cultivo de caña de azúcar se clasifica como permanente, entendiéndose como tal, a aquel que posee un período de

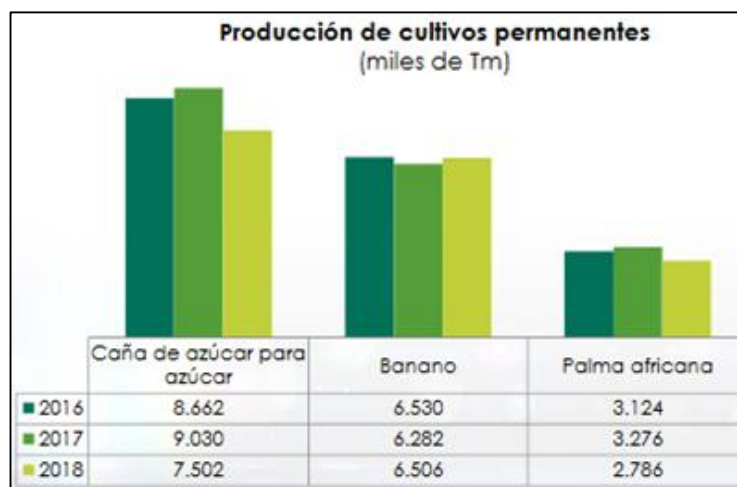
producción prolongado, que posibilita la cosecha durante varios años sin requerir la siembra después de cada cosecha (Sistema de Indicadores de Soberanía y Seguridad Alimentaria y Nutricional - SISSAN, s.f.). La Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua – ESPAC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2018) muestra que en dicho año, la suma de la superficie de cultivos plantados de caña de azúcar para los distintos usos, fue de 132,771.43 hectáreas, que constituye el 0.52% del territorio nacional continental.

El cultivo de caña de azúcar se lleva a cabo con el objetivo de obtener diferentes productos, que se comercializan dentro de varios sectores:



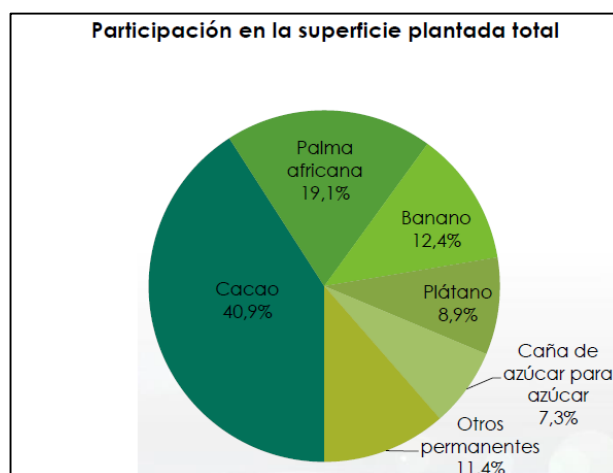
*Figura 1.* Estructura productiva de la agroindustria azucarera en el Ecuador (Corporación Financiera Nacional, 2017).

La producción de cultivos permanentes en el país está liderada por el cultivo de caña de azúcar para fabricación de azúcar, dado que ha generado la mayor cantidad en peso (toneladas métricas), sobre el banano y la palma africana, durante los tres últimos años.



*Figura 2.* Producción de cultivos permanentes en peso (Instituto Ecuatoriano de Estadística y Censos, 2018).

No obstante, en términos de superficie plantada total, el cultivo de caña de azúcar para fabricación de azúcar se sitúa por detrás de otros tipos de cultivos permanentes: cacao, palma africana, banano y plátano.



*Figura 3.* Participación de cultivos en la superficie plantada total (Instituto Ecuatoriano de Estadística y Censos, 2018).

La Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua – ESPAC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2018) presenta la producción existente en las 24 provincias de Ecuador, segmentada en producción para fabricación de azúcar y producción para otros usos:

| <b>Producción de caña de azúcar para fabricación de azúcar</b> |                        |                          |
|--|------------------------|--------------------------|
| <b>Provincia</b>   | <b>Producción (Tm)</b> | <b>Participación (%)</b> |
| <i><b>Región Sierra</b></i>                                    |                        |                          |
| Cañar  | 397,154                | 5.29%                    |
| Carchi   | 6,134                  | 0.08%                    |
| Imbabura   | 313,354                | 4.18%                    |
| Loja   | 192,343                | 2.56%                    |
| <i><b>Región Costa</b></i>                                     |                        |                          |
| Esmeraldas   | 737                    | 0.01%                    |
| Guayas   | 6,536,416              | 87.13%                   |
| Los Ríos   | 56,113                 | 0.75%                    |
| <b>Total</b>   | <b>7,502,251</b>       | <b>100.00%</b>           |

*Tabla 1.* Producción de caña de azúcar para fabricación de azúcar en Ecuador (Instituto Ecuatoriano de Estadística y Censos, 2018). Adaptación propia.

| <b>Producción de caña de azúcar para otros usos</b> |                        |                          |
|---|------------------------|--------------------------|
| <b>Provincia</b>                                    | <b>Producción (Tm)</b> | <b>Participación (%)</b> |
| <i><b>Región Sierra</b></i>                         |                        |                          |
| Azuay   | 15,691                 | 4.64%                    |
| Bolívar   | 22,131                 | 6.54%                    |
| Cañar   | 21                     | 0.01%                    |
| Carchi  | 318                    | 0.09%                    |
| Cotopaxi  | 38,078                 | 11.25%                   |
| Imbabura  | 3,903                  | 1.15%                    |
| Loja  | 56,238                 | 16.62%                   |
| Pichincha   | 48,108                 | 14.22%                   |
| Santo Domingo de los Tsáchilas                      | 7,434                  | 2.20%                    |
| <i><b>Región Costa</b></i>                          |                        |                          |
| El Oro  | 23,661                 | 6.99%                    |
| Esmeraldas  | 57                     | 0.02%                    |
| Manabí  | 57,660                 | 17.04%                   |
| <i><b>Región Amazónica</b></i>                      |                        |                          |
| Morona Santiago                                     | 29,069                 | 8.59%                    |
| Pastaza   | 12,232                 | 3.61%                    |
| Sucumbíos   | 2,377                  | 0.70%                    |
| Zamora Chinchipe                                    | 21,405                 | 6.33%                    |
| <b>Total</b>  | <b>338,383</b>         | <b>100.00%</b>           |

*Tabla 2.* Producción de caña de azúcar para otros usos en Ecuador (Instituto Ecuatoriano de Estadística y Censos, 2018). Adaptación propia.

Siendo Guayas el primer productor de caña de azúcar a nivel nacional, cuya producción se emplea exclusivamente para la fabricación de azúcar. Por otro lado, el mayor productor de caña de azúcar para otros usos es Manabí, que se



Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador - CINCAE (2013), organización sin fines de lucro que desarrolla variedades y tecnologías para el cultivo de la caña de azúcar, apoyada por los tres ingenios más grandes del país: La Troncal, San Carlos y Valdez, conserva 601 variedades introducidas, 4 variedades nacionales y 110 clones promisorios de siete series de selección desarrollados entre 1998 y 2004, de las cuales, se define que la variedad más sembrada en Ecuador es la CC 85-92, seguida por las especies ECU-01 y Ragnar (Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador - CINCAE, 2017).

Los procesos productivos de azúcar y etanol dan como resultado la generación de cenizas (Alderetes, 2016), constituyéndose como mayores productores de este residuo a nivel nacional, los ingenios azucareros. De acuerdo con Pérez Quintero (2019), en el Ecuador existen 8 ingenios activos:

- Ingenio San Carlos – Marcelino Maridueña, Guayas.
- Ingenio Valdez – Milagro, Guayas.
- Ingenio La Troncal (Coazúcar) – La Troncal, Cañar.
- Ingenio Monterrey – Catamayo, Loja.
- Ingenio La Familiar (Isabel María) – Babahoyo, Los Ríos.
- Ingenio Azucarero del Norte (IANCEM) – Ibarra, Imbabura.
- Ingenio Miguel Ángel – El Triunfo, Guayas.
- Ingenio San Juan – General Villamil, Guayas.

El procesamiento de caña de azúcar en la zona norte del país está liderado por el Ingenio Azucarero del Norte Compañía de Economía Mixta - IANCEM, que se abastece de plantaciones en las siguientes localidades (Ingenio Azucarero del Norte Compañía Mixta, como se citó en Albuja & Rodríguez, 2012), cuya zona de influencia fundamentalmente engloba a las zonas del Valle del Chota y el Valle de Salinas (Zambonino, 2013):

- Ambuquí (Ibarra, Imbabura)
- El Sagrario (Ibarra, Imbabura)
- Salinas (Ibarra, Imbabura)
- La Carolina (Ibarra, Imbabura)
- Imbaya (Antonio Ante, Imbabura)
- Pimampiro (Imbabura)
- Pablo Arenas (Urququí, Imbabura)
- Tumbabiro (Urququí, Imbabura)
- La Concepción (Mira, Carchi)
- San Vicente (Bolívar, Carchi)
- San Rafael (Bolívar, Carchi)
- Los Andes (Bolívar, Carchi)

En donde se cosechan 5 variedades de caña (Diario La Hora, 2012):

- CC 85-92
- CB 40-69, “Campos de Brasil”
- PR-980, “Puerto Rico”
- RD 75-11, “República Dominicana”
- V 71-51, “Venezuela”

Para la presente investigación, se ha considerado la obtención de ceniza de bagazo de caña de azúcar de dicha entidad, cuya planta de procesamiento se ubica en la parroquia Ambuquí, cantón Ibarra, provincia de Imbabura, y opera en intervalos de alrededor de 320 días que dura el período de la “zafra” (Zambonino, 2013), entendiéndose como zafra a la cosecha de la caña de azúcar. Esta proviene de la incineración de bagazo en la misma planta con el fin de producir calor, dentro del proceso de fabricación de azúcar. Una mayor profundización acerca del proceso de obtención de ceniza, así como su caracterización, será llevada a cabo en el capítulo 3.

### **1.6.5. El bagazo de caña de azúcar y sus usos**

De acuerdo a Almazán del Olmo, Hernández, Brizuela, Carvajal, & Arias (2013), el bagazo de caña se define como el “residuo lignocelulósico, fibroso, obtenido a la salida del último molino del tándem, que, en la fábrica de azúcar, extrae el jugo de la caña”. Es decir, es la fibra resultante de la caña cuando esta se somete al proceso de la molienda. Este constituye el 28% del peso de la caña que ingresa a procesamiento, y está compuesto por aproximadamente: 45% de fibra, 2 a 3% de sólidos solubles (fundamentalmente sacarosa y ceras), 2 a 3% de sólidos no solubles (piedras, suelo y materia extraña resultado de los procesamientos, corte y recolección) y entre un 49 a 51% de agua. Además, es el subproducto de mayor peso y volumen resultante del procesamiento de caña de azúcar.

En cuanto a la estructura, los autores mencionados definen que posee una morfología heterogénea elevada, y está compuesta por dos partes bien diferenciadas:

- Fibra: de estructura cristalina y química estable, lo cual permite que la planta sea rígida, constituyendo el 50% de la morfología.
- Parénquima: de estructura amorfa, con absorción alta, correspondiente al 30% de la morfología.

Constituyéndose la parte restante por:

- Vasos (15% de la morfología).
- Epidermis (5% de la morfología).

El bagazo de caña de azúcar es generado en cantidades considerables, lo cual ha propiciado la búsqueda de fines para su uso desde varias décadas atrás. En la década de 1960, Srinivasan & Han (1969) fueron pioneros en la recopilación de sus usos, los cuales se llevan a cabo hasta el día de hoy, y se complementan de acuerdo a Know Sumo (2015), a continuación, para la obtención de productos:

- **Combustible:** se utiliza dentro del concepto de “cogeneración”, el cual se define como el proceso de generación de calor para el procesamiento de azúcar, simultáneamente con la producción de electricidad, que es utilizada para el abastecimiento de electricidad de las plantas, o bien, suministrada a la red eléctrica, al quemar el bagazo resultante de la misma planta. Las emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes del proceso generalmente son menores a la cantidad que las plantaciones de caña de azúcar absorben de la atmósfera en su fase de desarrollo (aproximadamente 18 meses, de acuerdo al Ingenio Azucarero Del Norte, 2017), lo que hace que la cogeneración sea neutral en cuanto a emisiones. El uso del bagazo como combustible genera, como resultado, cenizas de bagazo de caña de azúcar.
- **Pulpa de papel:** posteriormente se procesa y permite obtener papel de escritura, papel de impresión, papel periódico y cartón para cajas.
- **Tableros de aglomerados:** utilizados para la separación de ambientes y como paneles acústicos.
- **Hormigones livianos:** desarrollados con reemplazos parciales de cemento por fibras secas de bagazo.
- **Compost:** producto del secado, molido, hidratado y mezclado con compuestos de nitrógeno, fósforo y potasio.
- **Alimento bovino:** forraje constituido al ser mezclado con concentrados de leguminosas.

No obstante, en los últimos tiempos, se ha identificado que los residuos de bagazo de caña de azúcar representan una materia prima ideal para la fabricación de materiales compuestos, debido a que logran mezclarse bien con otros tipos de materiales, lo que permite la obtención de nuevos productos con las siguientes características (Loh, Sujan, Rahman, & Das, 2013):

- **Bajos costos de fabricación:** los costos asociados a la extracción, modificación química y pretratamientos de materiales convencionales se reducen potencialmente al reemplazarlos por bagazo de caña de azúcar.

- **Calidad equivalente o superior a la de los productos convencionales:** los productos conseguidos pueden ser fabricados bajo los mismos estándares de calidad y pueden poseer características mejoradas.
- **Carácter ecológico:** biodegradables, reciclables y reutilizables.

El bagazo de caña de azúcar es fácil de tratar y modificar con químicos, y al aplicar procesos de manufactura apropiados, es capaz de mejorar las propiedades mecánicas de los materiales, como: resistencia a la tensión y compresión, módulo de flexión, dureza y resistencia a los impactos. Por estas razones, existen perspectivas de aplicación de residuos de bagazo de caña de azúcar hacia el futuro en una gran variedad de productos, entre los cuales, se encuentran varios materiales de construcción (Loh et al., 2013):

- Recubrimiento de cables eléctricos.
- Tuberías.
- Paneles de aglomerado.
- Tableros OSB (Virutas orientadas).
- Espumas aislantes para juntas.
- Recubrimientos aislantes para techo y paredes.
- Almohadillas aislantes para mesones de cocina y aparatos de cocina.
- Hormigones con reemplazo parcial de cemento por cenizas de bagazo.
- Morteros.
- Bloques de hormigón.

## **2. Mampostería**

### **2.1. Ladrillos tradicionales**

---

Los procesos de elaboración de ladrillos no han tenido un cambio significativo en función al tiempo. Sin embargo, se ha observado que con la implementación de nuevas tecnologías se ha podido realizar técnicas más eficientes, otorgando como resultado, una mejora en la calidad de los productos (The Brick Industry Association, 2006).

#### **2.1.1. Definición**

Barranzuela Lescano (2014) señala que los ladrillos son piezas prismáticas que se componen de suelo arcilloso, sometido a un proceso de moldeo, compresión y cocción, siendo el objetivo de este procedimiento dar una consistencia cerámica al material, que permite la obtención de un producto de fácil manejo en la construcción.

#### **2.1.2. Características**

El componente principal de los ladrillos es la arcilla, uno de los minerales naturales más abundantes del planeta, que se forma principalmente por silicatos de aluminio hidratados, provenientes de la degradación de los minerales de aluminio. El motivo por el cual este material resulta apropiado para la elaboración de ladrillos radica en su capacidad de adquirir una plasticidad que permita el moldeo bajo los parámetros que se consideren necesarios, al ser mezclado con agua. Adicionalmente, al someter a esta mezcla a altas temperaturas, las partículas son capaces de mejorar sus enlaces entre sí, mejorando la cohesión (The Brick Industry Association, 2006).

Estos elementos de construcción históricamente han sido considerados eficientes para la elaboración de muros de albañilería, proceso para el cual

resulta necesario efectuar un correcto moldeado, con el fin evitar superficies irregulares y asegurar la obtención de una geometría homogénea. Además, estos deben tener una porosidad controlada, con el fin de evitar la intrusión de humedad en exceso y sales solubles que puedan causar eflorescencias (Barranzuela Lescano, 2014).

### **2.1.3. Fabricación**

La fabricación de los ladrillos tradicionales se sustenta en el desarrollo de resistencia a partir de la cocción de la pasta arcillosa durante períodos establecidos de tiempo.

#### **1. Extracción y almacenamiento**

Según The Brick Industry Association (2006), la arcilla se obtiene de las diferentes minas, pozos o terrenos mediante el uso de equipo pesado. Una vez obtenido el material, se procede a transportarlo al lugar donde se lo va a almacenar, para continuar con el proceso productivo. Se recomienda tener la arcilla almacenada en cantidades suficientes, con la finalidad de garantizar el abastecimiento de materia prima durante varios días de operación en planta, tomando en cuenta que esta debe almacenarse en condiciones ambientales constantes. Resulta necesario indicar que la exposición a la intemperie influye directamente en la descomposición de la posible materia orgánica que puede estar contenida en el material. Previo al moldeo del ladrillo, los materiales tienen que pasar por un proceso de tamizado y disgregación de terrones, ya que, al provenir de una extracción de mina, estas contienen partículas gruesas, como piedras o arenas. Estas técnicas se realizan mediante tamices vibratorios, que controlan el tamaño de partículas.

#### **2. Humidificación y depósito de materia prima procesada**

Este proceso inicia con la homogenización de la materia triturada en lugares cubiertos, con la finalidad de tener condiciones químicas y físicas

uniformes. Posteriormente, se procede a la adición de la cantidad de agua necesaria para generar la humedad óptima del material mediante mezcladores. Por lo general esta humedad se encuentra en un rango del 15% al 20%. Finalmente, se debe llevar a cabo una desaireación, con el fin de eliminar el contenido de aire que queda en los vacíos para poder tener un material más denso y trabajable (Cún Sánchez, 2010).

### **3. Moldeo**

Una vez obtenida una mezcla plástica y homogénea, el material pasa por la máquina extrusora, que es la encargada de generar especímenes sólidos, proceso en el cual es posible aplicar texturas y recubrimientos al ladrillo, con el fin de cuidarlo frente a la intemperie, procediendo a cortarlos mediante maquinaria automatizada, con la finalidad de obtener especímenes con las dimensiones requeridas (The Brick Industry Association, 2006).

### **4. Secado**

The Brick Industry Association (2006) indica que el secado constituye uno de los procesos más importantes y delicados de la producción, dado que de esta fase depende directamente la calidad del material y la ausencia de fisuras. Esta actividad permite eliminar los excesos de agua de los ladrillos, que provienen del proceso de moldeo y presentan una humedad entre el 7% y el 30%, por lo que primero se los lleva a un proceso de secado en hornos entre 38 °C - 204 °C (100 °F - 400 °F), antes de la cocción propiamente dicha. El tiempo por el cual se debe secar el material generalmente es de 24 a 48 horas.

### **5. Cocción**

Este proceso comienza con la puesta de los moldes secos en hornos de túnel o periódicos, donde son cocidos por un lapso entre 10 y 40 horas. Es necesario considerar que estos hornos utilizan como combustible carbón, gas natural o una combinación de ambos. La cocción tiene diferentes

niveles de temperatura: el secado final, con una temperatura de hasta 204°C, la deshidratación, desde 149°C hasta 982°C, la oxidación, desde 538°C hasta 982°C, la vitrificación, desde 871°C hasta 1316°C y la reducción de quemado, con un descenso de temperatura. De las mencionadas, la más importante es la vitrificación, ya que define la solidificación de la arcilla. Después de que la temperatura ha llegado a su punto máximo, se procede al proceso de enfriamiento, que tiene como duración, un lapso entre 5 y 24 horas en hornos periódicos, y de hasta 10 horas en hornos de túnel. Este proceso influye directamente en el color resultante del ladrillo por lo que debe ser controlado detenidamente (The Brick Industry Association, 2006).

## **6. Almacenamiento**

Previo al proceso de embalaje, los ladrillos son clasificados de acuerdo con su textura y tamaño sobre pallets, para poder ser manipulados y transportados fácilmente. Se deberá embalar los ladrillos con cintas metálicas o plásticas, para así cuidarlos en los depósitos, previo a su traslado final (Cún Sánchez, 2010).

## **2.2. Bloques de hormigón**

---

La construcción con bloques de hormigón ha ganado importancia y se ha convertido en una gran alternativa en comparación con construcción que emplea ladrillos convencionales. Tomando en cuenta que el hormigón es capaz de alcanzar una gran trabajabilidad, se ha podido lograr una producción de bloques con variedad en formas y tamaños. Al contar con un menor peso, este tipo de mampuestos mejoran la productividad en obra, lo cual permite acelerar el proceso de construcción (Swiss Resource Centre and Consultancies for Development, 2017).

### **2.2.1. Definición**

Los bloques son piezas o elementos prismáticos, ya sean sólidos o huecos, que se forman gracias a la mezcla de cemento, agua y agregados. Este tipo de mampuestos son utilizados, dentro de los sistemas constructivos, principalmente en la conformación de paredes y muros (Gamboa de León Régil, 2005).

### **2.2.2. Características**

Gamboa de León Régil (2005), analiza las características de los bloques de hormigón. Los elementos más importantes que conforman la mezcla para hacer bloques son: agua, cemento, agregado fino y agregado grueso. Debido a que existen varios tipos de cementos en el mercado, se puede utilizar cualquier cemento hidráulico para uso general, considerando la resistencia requerida. Los agregados son componentes fundamentales de la mezcla, ya que ocupan entre un 85% y 90% de cada unidad.

La tradicional clasificación de los bloques, según su utilidad, hace referencia a 3 tipos:

- Bloques huecos
- Bloques celulares
- Bloques sólidos

### **2.2.3. Fabricación**

El algoritmo que se debe llevar a cabo para el proceso de fabricación de este tipo de mampuestos, de acuerdo con Gamboa de León Régil (2005), presenta las siguientes condiciones:

## **1. Materiales y almacenamiento**

Se debe buscar uniformidad en las propiedades de los materiales, por lo cual, se busca un solo proveedor o fuente que pueda cumplir con las cantidades necesarias para tener una producción constante, así como los parámetros de calidad y resistencia requeridos.

## **2. Dosificación**

Uno de los puntos más importantes para realizar este procedimiento radica en contar con los equipos necesarios para el pesaje de los materiales, ya que la dosificación requiere de este tipo de mediciones. Para tener un producto de calidad, se deben determinar las cantidades de materiales necesarias, de manera que cada bloque cuente con las siguientes características:

- Cohesión suficiente de los materiales, tal que una vez desmoldados no se afecten o dañen.
- Materiales con máxima compactación para reducir la porosidad, y por ende, la absorción.
- Cumplir con la resistencia deseada.
- Proporcionar el acabado requerido.

## **3. Mezclado**

Para conformar la mezcla, se debe colocar el agregado grueso en conjunto con las tres cuartas partes del agua en una mezcladora especial para concreto por treinta segundos. Posteriormente, se procede a añadir el cemento, para finalizar con el agregado de arena y el agua restante.

## **4. Moldeado**

Una vez que se haya verificado que los moldes se encuentren limpios y en correcto estado, se procede a colocar la mezcla hasta las tres cuartas partes del volumen, después, se vibra el contenido del molde por tres segundos en promedio, para acomodar la mezcla. Se llena el molde hasta completar su capacidad y se quitan los excesos, realizando un enrasado. Finalmente, se

gira completamente el molde, con la finalidad de aplicar los martillos compactadores sobre la mezcla. Después de este proceso, es necesario llevar a cabo una última vibración, con el propósito de obtener la compactación suficiente.

### **5. Fraguado**

Se debe almacenar los bloques en un lugar que permita protegerlos del sol y de las corrientes de viento, de manera que se mantengan condiciones constantes hasta que el producto adquiera la resistencia requerida para la manipulación, sin que este se seque durante el proceso. El lapso necesario para que se produzca el proceso de endurecimiento oscila entre las 12 y 24 horas.

### **6. Curado**

Durante este proceso, se requiere mantener los bloques en condiciones húmedas y a una temperatura controlada, con el objetivo de que estos alcancen la resistencia deseada. Se recomienda llevarlo a cabo, por lo menos, durante los primeros siete días desde el moldeo, y generalmente se utilizan cuartos de curado, o a su vez, se recubren los especímenes con plásticos, simulando un entorno hermético.

## **2.3. Mampuestos ecológicos**

---

Dado que la fabricación de mampuestos convencionales requiere grandes cantidades de energía e implica la emisión de gases de efecto invernadero, se propone agrupar a los mampuestos que incluyen residuos en su proceso de elaboración y/o son manufacturados empleando procesos con mayor eficiencia energética y menor producción de emisiones, dentro de la categoría de “mampuestos ecológicos”.

Zhang (2013), en base a una revisión de investigaciones de este campo, plantea la subcategorización de este tipo de mampuestos en tres categorías, de acuerdo con los métodos de fabricación:

- Cocidos
- Cementados
- Geopolimerizados

No obstante, define limitaciones para la producción industrial en la actualidad, debido a diversas razones:

- Implementación de los métodos de fabricación para la producción en serie.
- Potencial contaminación de los residuos utilizados.
- Ausencia de normas relevantes para este tipo de productos.
- Lenta aceptación por parte de la industria de la construcción y el mercado.

Por estas razones, la implementación de estos materiales de construcción exige una profundización en la investigación y el desarrollo, no solamente en los aspectos técnicos, económicos y ambientales, sino además en la emisión de normas, políticas gubernamentales y educación pública, relacionadas al reciclaje de residuos y el desarrollo sostenible.

### **2.3.1. Parámetros de sostenibilidad requeridos**

El desarrollo de mampuestos ecológicos forma parte de los esfuerzos que se han llevado a cabo dentro de la iniciativa *Green Building* (Edificación Verde), en búsqueda de la reducción o eliminación de impactos negativos y la creación de impactos positivos sobre el clima y el entorno natural, dentro de las fases de diseño, construcción y operación de edificaciones, de manera que se preserven las fuentes naturales y se mejore la calidad de vida, constituyéndose como un proyecto que apoya la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, definidos con el propósito de lograr un crecimiento desligado del cambio climático, la pobreza y la desigualdad

(World Green Building Council, 2019). Es decir, el *Green Building* es una política ligada a la construcción sostenible.

Dicha iniciativa es impulsada por el *World Green Building Council* (WGBC), a través de la administración de sistemas de certificación de construcción sostenible, entre los cuales, se destacan por su alcance internacional:

- BREEAM - *Building Research Establishments Assessment Method* (Reino Unido)
- DGNB - *Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen* (Alemania)
- EDGE - *Excellence in Design for Greater Efficiencies* (Mundial)
- HQE - *Haute Qualité Environnementale* (Francia)
- LEED - *Leadership in Energy and Environmental Design* (Estados Unidos)
- WELL - *WELL Building Standard* (Mundial)
- CASBEE - *Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency* (Japón)

Para acogerse a un sistema de certificación de construcción sostenible, los mampuestos ecológicos, y en general, los materiales de construcción a emplear dentro de los proyectos de infraestructura, deben cumplir con un conjunto de parámetros de sostenibilidad sujetos a evaluación, los cuales han sido recogidos y analizados por Rocha Tamayo (2011):

### **1. Obtención local**

La extracción de materias primas y la fabricación de materiales, dentro de lo posible, deben realizarse a distancias cortas de las construcciones, con el objeto de minimizar al máximo la energía y las emisiones ligadas al transporte desde el lugar de producción hasta el proyecto. En el caso de utilizar materiales de lugares lejanos, es conveniente evaluar otros aspectos de sostenibilidad que logren mitigar el efecto negativo del transporte. Cabe destacar que en ningún caso resulta una medida de protección de las industrias locales.

## **2. Renovabilidad**

Implica la utilización de materias primas de origen agrícola y/o de origen animal. Es necesario garantizar la continuidad de la renovación, de manera que se evite el agotamiento de la tierra y/o los recursos hídricos.

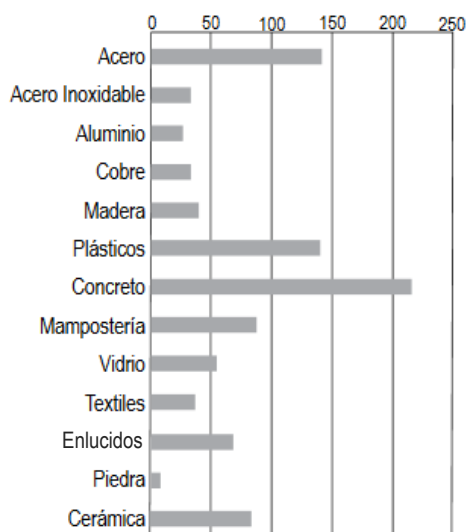
## **3. Menor energía embebida posible**

Se refiere a toda la energía requerida para la obtención de materias primas, procesos de transformación y transporte de los materiales hasta el proyecto de infraestructura. Es notable señalar que generalmente se utiliza para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub>, la cual es una medida directa de impacto ambiental. Al conocer la energía embebida de cada uno de los materiales y procesos, es posible calcular la energía embebida total de una edificación. Entre algunos coeficientes de energía embebida por unidad de volumen de materiales usuales en la industria de la construcción se tienen:

| MATERIAL                                 | MJ/m <sup>3</sup> |
|--|-------------------|
| Paja                                     | 30,5              |
| Agregados de río                         | 36,0              |
| Agregados de cantera                     | 63,0              |
| Arena                                    | 232               |
| Adobe, estabilizado con bituminosa       | 490               |
| Adobe, estabilizado con cemento          | 710               |
| Bloque de tierra prensado                | 810               |
| Piedra local                             | 2.030             |
| Poliestireno expandido                   | 2.340             |
| Concreto, 40 MPa                         | 3.890             |
| Ladrillo cerámico                        | 5.170             |
| Teja cerámica                            | 5.250             |
| Madera contrachapada                     | 5.720             |
| Asfalto                                  | 7.140             |
| MDF                                      | 8.330             |
| Fibro-cemento                            | 13.550            |
| Ladrillo cerámico vitrificado            | 14.760            |
| Cemento                                  | 15.210            |
| Aluminio reciclado                       | 21.870            |
| Papel                                    | 33.670            |
| Acero reciclado                          | 37.210            |
| Vidrio endurecido                        | 37.550            |
| Vidrio laminado                          | 41.080            |
| Poliuretano                              | 44.400            |
| Polipropileno                            | 57.600            |
| Caucho de látex natural                  | 62.100            |
| Vidrio endurecido                        | 66.020            |
| Acero reciclado, reforzado, seccionado   | 69.790            |
| PVC                                      | 93.620            |
| Pisos de vinilo                          | 105.990           |
| Pinturas con base en agua                | 115.000           |
| Aluminio reciclado, extruido y anodizado | 115.830           |
| Caucho sintético                         | 118.800           |
| Pinturas con base en solventes           | 127.500           |
| Linóleo                                  | 150.930           |
| Acero estructural                        | 274.570           |
| Zinc                                     | 371.280           |
| Aluminio, extruido, anodizado            | 612.900           |
| Cobre                                    | 631.164           |

**Tabla 3.** Coeficientes de energía embebida de diversos materiales de construcción (Rocha Tamayo, 2011, a partir de la Victoria University of Wellington, Nueva Zelanda).

El hormigón, los ladrillos y bloques convencionales poseen energía embebida relativamente baja respecto a otros materiales de alto nivel de procesamiento como los metales y polímeros, pero su utilización en grandes cantidades provoca una aportación de energía embebida significativa a toda la edificación, que generalmente excede notablemente a la suma de la energía embebida de los materiales con energía embebida individual alta, pero que son utilizados en menor escala, como es posible apreciar en el ejemplo de una casa australiana de acuerdo a una investigación de CSIRO, como se citó en Rocha Tamayo (2011):



*Figura 5.* Totales de energía embebida en una casa australiana por categoría de materiales utilizados en la construcción (Giga Joules, GJ). (Rocha Tamayo, 2011, a partir de CSIRO, 2010).

Por tanto, uno de los retos principales del desarrollo de materiales de construcción es la reducción de la energía embebida. Para este fin, resulta positiva la utilización de fuentes de energía limpia dentro del procesamiento, así como la obtención de materiales livianos, dado que, a pesar de su utilización en masa, la energía embebida global resultaría menor que la derivada del empleo de materiales comunes.

#### **4. Menor contaminación de ecosistemas posible**

La extracción de materiales de construcción, así como su procesamiento, además de consumir energía y generar emisiones, es capaz de provocar daños ecológicos a los cuerpos hídricos, el suelo, la fauna y la flora. La principal manera de garantizar la utilización de materia prima y/o materiales con impacto ambiental asociado bajo o controlado es mediante la adquisición de productos certificados, para lo cual, existen sistemas de certificación ambiental para productores, entre los principales:

- ISO
- FSC
- GreenSpec
- Green Seal
- EPA

## **5. Reciclabilidad**

Al utilizar materiales reciclables, se reduce el impacto ambiental provocado por la extracción y producción de materias primas para la obtención de nuevos materiales o productos. En la actualidad es posible definir que casi todos los materiales son reciclables, a excepción de determinados productos compuestos.

## **6. Comportamiento térmico adecuado**

El propósito principal es alcanzar el “confort térmico” en los ambientes interiores de las edificaciones, de manera que no se requiera la implementación de equipos eléctricos o mecánicos de climatización. Esta característica depende de la conjunción del diseño arquitectónico, que debe responder a las condiciones climáticas del lugar, y de las propiedades térmicas de los materiales empleados. El comportamiento térmico de los materiales se mide en términos de los coeficientes de resistencia y conductividad térmica, y dependen de las dimensiones, forma y combinaciones de materias primas.

Cuando se seleccionan adecuadamente los materiales de construcción de los elementos envolventes (pisos, muros, cubiertas, puertas y ventanas), de forma que se posibilite la retención o transmisión de calor entre ambientes o hacia el exterior, de acuerdo a la necesidad de mantener cierta temperatura, el uso de sistemas activos de climatización es suprimido o reducido drásticamente, lo cual reduce efectivamente el impacto ambiental generado durante la vida útil de la edificación.

En el caso de requerir la utilización de sistemas activos para garantizar condiciones de temperatura y humedad específicas, el consumo energético estará determinado por la capacidad de aislamiento térmico de los materiales de los elementos envolventes y la hermeticidad de los espacios, que depende de una construcción ejecutada correctamente.

### **7. Facilidad de mantenimiento**

El mantenimiento de componentes implica costos y uso de energía, además de la generación de residuos y posible contaminación del agua y/o suelo. Debido a estas razones, se requiere pronosticar el mantenimiento requerido en toda la edificación durante la vida útil de operación, con el objetivo de establecer el uso de materiales que tengan características que posibiliten su minimización.

### **8. Durabilidad**

Se traduce como una vida útil prolongada, conseguida a partir de la utilización de materiales con resistencia a agentes externos, como: abrasión, viento, radiación solar, entre otros. Los avances tecnológicos, el crecimiento de las ciudades, la revalorización del suelo en el tiempo y las nuevas tendencias arquitectónicas hacen que exista la necesidad de derrocar edificaciones funcionales, por esta razón, se debe estudiar la posibilidad de que los materiales tengan una durabilidad suficiente para garantizar su reutilización a futuro en otras edificaciones.

### **9. Reutilizabilidad**

Resulta necesario tomar en cuenta la posibilidad de que, a futuro, se obtengan componentes de una construcción existente para su utilización nuevamente en otra construcción, con un uso similar o diferente al de la concepción original, evitando procesos mayores de transformación. Por esta razón, eventualmente, resulta esencial prolongar la vida útil de los materiales y emplear estrategias de diseño, como el “Diseño para Desmantelamiento” (Design for Deconstruction – DfD) al final de la vida

útil de la edificación, de tal manera que los materiales no se destruyan en el proceso.

### **10. Disipación de calor**

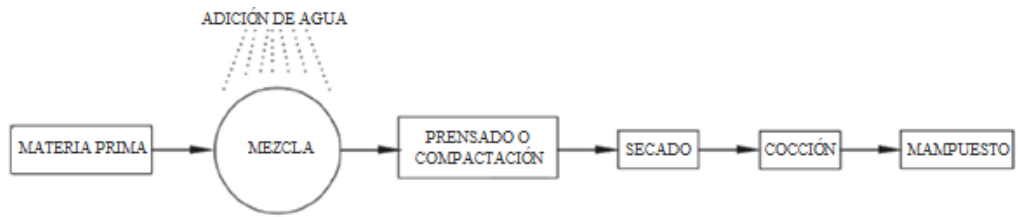
Los materiales de cubiertas y fachadas de edificaciones, en el caso de no ser capaces de reflejar adecuadamente la radiación solar recibida en el día, contribuyen al aumento de la temperatura a nivel urbano, efecto conocido como “isla de calor”. Este parámetro se determina a partir del factor SRI (Índice de Reflectancia Solar o Solar Reflectance Index), definiéndose que los materiales con mayor SRI poseen menores aumentos de temperatura, y los materiales con menor SRI, retienen más calor.

#### **2.3.2. Mampuestos Ecológicos Cocidos**



*Figura 6.* Mampuestos ecológicos cocidos fabricados con cenizas de bagazo de caña de azúcar y cenizas de cáscara de arroz (Kazmi, Abbas, Saleem, Munir, & Khitab, 2016).

Emplean materiales residuales para sustituir una fracción de arcilla, y se elaboran mediante cocción, en hornos de numerosos tipos. Murmu & Patel (2018) definen de manera general el proceso de fabricación de la siguiente manera:



*Figura 7.* Proceso de fabricación de mampuestos ecológicos cocidos (Murmu & Patel, 2018).  
Adaptación propia.

Zhang (2013), recoge la utilización de residuos dentro de esta categoría, de acuerdo con varias investigaciones:

Elaboración de un Mampuesto Ecológico como Material Sostenible de Construcción utilizando Bagazo de Caña de Azúcar  
Santiago Daniel Bravo Reinoso - Felipe Andrés Espinoza Herrera

| N° | Material de residuo (% de peso)   | Tamaño (mm)                          | Condición de secado/cocción   |
|----|---|--------------------------------------|---|
| 1  | Relaves de hematita (77-100%) y cenizas volantes de clase F (0-8%)  | 50 x 50 (cilindros)                  | Secado en horno a 105 °C por 6-8 h y cocción en horno eléctrico a 6 °C/min hasta 850-1050 °C por 2 h  |
| 2  | Cenizas volantes de clase F (0, 50, 60, 70 y 80% en volumen)  | 60 x 60 x 25                         | Secado en condición ambiente por 2 días, a 60 °C por 4 h y 100 °C por 6 h, posteriormente cocción en horno eléctrico a 100 °C/h debajo de 500 °C, 50 °C/h de 500 °C a 1000 °C, 1050 °C o 1100 °C, y a la temperatura más alta por 8 h                                     |
| 3  | Cenizas volantes de clase F (0%, 20%, 40% y 60%)  | 95 x 45 x 45                         | Secado al aire por 2 días y después cocción en horno de laboratorio respectivamente a 850 y 1000 °C por 24 h  |
| 4  | Cenizas volantes de clase F (0-60% en volumen)  | Varios tamaños                       | Siguiendo el proceso de una planta de ladrillos comerciales de arcilla  |
| 5  | Cenizas volantes (100%)   | -                                    | Secado por 3 días y después cocción a 1000-1300 °C por varias horas   |
| 6  | Residuos del corte de granito (0-60%)   | Varios tamaños                       | Cocción a diferentes temperaturas entre 750 y 1200 °C   |
| 7  | Residuos de incineradores municipales de residuos sólidos (0-40%)   | 50 x 25 x 50                         | Secado a temperatura ambiente por 24 h, secado al horno a 80°C por 24 h, y finalmente cocción en horno eléctrico a 750, 850, o 950 °C por 9 h   |
| 8  | Relaves del procesamiento de oro (0-75%)  | 100 x 100 x 76                       | Secado a temperatura ambiente por 2 días, en el sol por 3 días, y después cocción en horno eléctrico a 750, 850 o 950 °C por 9 horas  |
| 9  | Residuos de caolín fino de minería (50%), Escoria granulada de altos hornos (10-40%), Residuos de granito y basalto finos de minería (10-40%) | 50 x 50 x 50                         | Secado en un desecador eléctrico a 80 °C por 24 h y después cocción a diferentes temperaturas: 1100, 1125, 1150 y 1175 °C a un incremento de 5 °C/min, y curado por 4 h en una mufla bajo condición de oxidación  |
| 10 | Residuos de la producción de papel (0%, 10%, 20% y 30%)   | 85 x 85 x 10                         | Conservación durante la noche a temperatura de ambiente cerrado, después secado a 45 °C por 1 h en horno y cocción en horno eléctrico a un incremento de 2.5 °C/min hasta llegar a 600 °C, luego con incrementos de 10 °C/min hasta 1100 °C, por 1 h                      |
| 11 | Colillas de cigarrillo (0%, 5%, 10%, 15% y 20%)   | 300 x 100 x 50                       | Secado a 105 °C por 24 h, después cocción en horno a 1050 °C  |
| 12 | Cenizas de cáscara de arroz (0%, 5%, 10%, 15% y 20%)  | 50 x 50 x 50                         | Secado al sol a 30 °C por 8 días, a 105 °C por 24 h en horno, y posteriormente cocción en horno continuamente a 250, 500, 750 °C por 2 h cada uno, y finalmente a 1000 °C a 2, 4 o 6 h  |
| 13 | Residuos de planta de tratamiento de efluente petrolera (41%)   | 280 x 130 x 170                      | Secado a temperatura ambiente y cocción en horno comercial de ladrillo tipo Bull a carbón, conjuntamente con ladrillos comerciales, a 1000-1100 °C  |
| 14 | Residuos de la producción de celulosa (2.5%)  | 33 x 40 (cilindros)<br>25 x 25 x 150 | Secado a 21 °C por 72 h, y después a 105 °C en horno, luego cocción a un incremento de 2 °C/min hasta 600 °C, luego a 5 °C/min hasta 900 °C, por 30 min   |
| 15 | Residuos de té (5%)   | 100 x 70 x 40                        | Secado a 21 °C por 72 h, y después a 105 °C en horno, luego cocción a un incremento de 2 °C/min hasta 600 °C, luego a 5 °C/min hasta 900 °C, por 30 min   |
| 16 | Sedimentos de río (15%)   | 60 x 220 x 220                       | Secado a través de un túnel de desecación hasta a 80 °C, después cocción a través de un horno tipo túnel con una temperatura máxima de 1000 °C  |
| 17 | Residuos de vidrio de computadoras y televisiones (<2%)   | 100 x 20 x 10                        | Secado a temperatura ambiente en una atmósfera no controlada por 48 h, después en un horno eléctrico a 100 °C durante la noche, y finalmente cocción en un horno eléctrico tipo cámara a incrementos de 100 °C/h hasta 900, 950 o 1000 °C por 4 h                         |
| 18 | Cenizas volantes de incineración de residuos sólidos municipales (20%)  | -                                    | Secado a alrededor de 60 °C y después cocción a 950 °C  |
| 19 | Aserrín (0-10%), suelo contaminado por filtración de aceites (0-30%), compost (0-30%), o mármol (0-20%)                                       | 30 x 10 x 60                         | Cocción en horno de laboratorio a incrementos de 3 °C/min hasta 950 o 1050 °C por 4 h   |
| 20 | Subproductos de fundición (0-50%)   | 150 x 30 x 15                        | Cocción en mufla de laboratorio a incrementos de 2 °C/min hasta 850, 950 o 1050 °C por 3.5 h  |
| 21 | Residuos de polvo de mármol (20-100%)   | 41 x 8 x 8                           | Cocción en horno eléctrico a incrementos de 5 °C/min hasta 900, 1000 o 1100 °C por 3 h  |
| 22 | Escoria Waelz y residuos de arena de fundición (20-40%)   | 100 x 80 x 20                        | Secado a 96-104 °C y cocción en un horno industrial tipo túnel a una temperatura máxima de 850 °C (incremento de temperatura de aproximadamente 0.85 °C/min, tasa de enfriamiento de aproximadamente 1.14 °C/min, y sumersión de 1 h)                                     |
| 23 | Sedimentos de río (100% o 50%)  | 54 x 54 x (5-10)                     | Secado en horno a temperatura con incremento gradual de 25 a 110 °C hasta masa constante, después cocción en horno eléctrico de laboratorio a diferentes temperaturas, de 900 a 1000 °C con variaciones en el incremento de calor, y luego a temperatura máxima sostenida |
| 24 | Ceniza de bagazo de caña de azúcar (hasta un 20%)   | 25 (diámetro)                        | Secado a 110 °C por 24 h y después cocción en horno eléctrico a 1100 °C, enfriamiento por 24 h  |

**Tabla 4.** Investigaciones sobre mampuestos ecológicos cocidos (Zhang, 2013). Adaptación propia.

Los resultados de diversas investigaciones, analizados por Murmu & Patel (2018), han permitido determinar que el proceso de cocción, dependiendo de los residuos empleados, solamente requiere una duración de entre 2 a 8 horas para alcanzar la resistencia requerida, y esta tiende a aumentar a medida que se incrementa la temperatura, como ha sido observado en las siguientes investigaciones:

| Ref. | Autores                      | Residuos Empleados  |
|------|------------------------------|---|
| 38   | Tay (1987)                   | Lodos de aguas residuales   |
| 40   | Weng et al. (2003)           | Lodos de aguas residuales   |
| 41   | Shih et al. (2004)           | Escoria siderúrgica   |
| 42   | Huang et al. (2005)          | Residuos de tratamiento de agua   |
| 45   | Roy et al. (2007)            | Relaves del procesamiento de oro  |
| 47   | El-Mahllawy (2008)           | Residuos de canteras y escoria siderúrgica  |
| 48   | Chiang et al. (2009)         | Lodos y cáscara de arroz  |
| 51   | Chen et al. (2011)           | Relaves de hematita   |
| 53   | Eliche-Quesada et al. (2011) | Lodos de aguas residuales, lodos de industria cervecera, lodos de procesamiento de aceite de oliva, bagazo de caña de azúcar, residuos de la molienda de café |
| 60   | Gencil et al. (2013)         | Escoria de ferrocromo y zeolita   |
| 99   | Eliche-Quesada et al. (2011) | Residuos de la fabricación de biodiesel   |
| 104  | Uslu & Arol (2004)           | Boro  |
| 106  | Lin (2006)                   | Cenizas de incinerador de desechos sólidos  |
| 108  | Rahman (1987)                | Cenizas de cáscara de arroz   |

Tabla 5. Investigaciones sobre mampuestos cocidos analizadas en términos de duración y temperatura de cocción (Murmu & Patel, 2018). Elaboración propia.

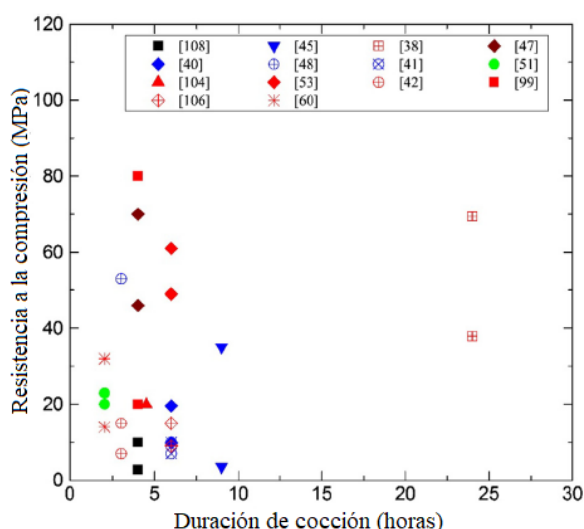


Figura 8. Resistencia a la compresión de acuerdo con la duración de cocción (Murmu & Patel, 2018). Adaptación propia.

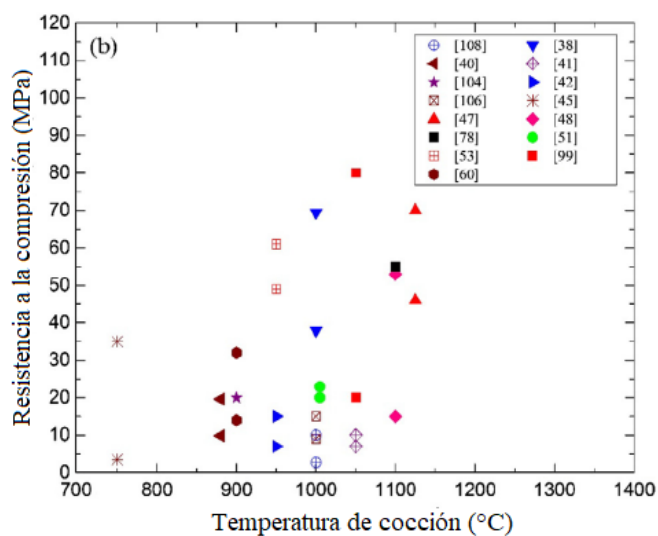


Figura 9. Resistencia a la compresión de acuerdo con la temperatura de cocción (Murmur & Patel., 2018). Adaptación propia.

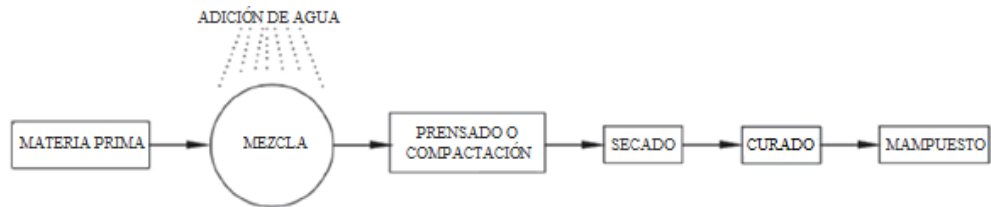
### 2.3.3. Mampuestos Ecológicos Cementados



Figura 10. Mampuestos ecológicos cementados fabricados con residuos de algodón, polvo de piedra caliza y Cemento Portland Ordinario (Algin & Turgut, 2007).

Se apoyan en la conformación de una matriz mediante la unión de un agente cementante con materiales de residuo, el reemplazo parcial del cemento con materiales residuales en mampuestos de hormigón, la mezcla de varios materiales de residuo capaces de cementarse entre sí, o la mezcla entre suelo y un agente cementante, que puede ser parcialmente reemplazado en algunos casos por materiales residuales, generalmente en partículas pequeñas.

Murmu & Patel (2018) explican genéricamente la fabricación, de acuerdo con el siguiente proceso:



*Figura 11.* Proceso de fabricación de mampuestos ecológicos cementados (Murmu & Patel, 2018). Adaptación propia.

Zhang (2013), presenta la utilización de residuos dentro de esta categoría, de acuerdo con varias investigaciones:

Elaboración de un Mampuesto Ecológico como Material Sostenible de Construcción utilizando Bagazo de Caña de Azúcar  
Santiago Daniel Bravo Reinoso - Felipe Andrés Espinoza Herrera

| N° | Material de residuo (% de peso)  | Material cementante   | Tamaño (mm)   | Condición de curado   |
|----|--|---|---|---|
| 1  | Relaves del procesamiento de oro (0-75%)   | Cemento Portland Ordinario  | 100 x 100 x 76  | Curado en agua a diferentes edades  |
| 2  | Escoria granulada de altos hornos (5-35%)  | Cal hidratada   | 190 x 90 x 90   | Curado al 95 % de humedad a una temperatura de 270-272 °C por 28 días   |
| 3  | Agregados reciclados (reemplazando del 25 al 100% de los agregados naturales)                | Cemento Portland Ordinario solo o mezclado con cenizas volantes   | 225 x 105 x 75  | Ladrillos: curado a temperatura ambiente por 28 días; Bloques: curado en vapor a 65 °C por 6 h y después en ambiente cerrado hasta 28 días                            |
| 4  | Cenizas volantes de clase F (60-90%)   | Fosfoyeso calcinado y cal   | 220 x 110 x 75<br>150 x 150 x 150<br>(Ladrillos huecos) | Conservación bajo cobertura de sacos de yute durante una semana, después curado en tanque de agua a 23 ± 2 °C   |
| 5  | Cenizas volantes de clase C (100%)   | El material por sí solo   | 200 x 100 x 55  | Curado en cuarto húmedo a 23 ± 2 °C y humedad relativa no menor al 95 %   |
| 6  | Cenizas volantes de clase C (100%)   | El material por sí solo   | 200 x 100 x 55  | Curado en cámara de curado a temperatura de ambiente cerrado por más de 2 semanas   |
| 7  | Relaves de mina de cobre (8%, 12% y 15%)   | Cemento Portland Ordinario  | 190 x 90 x 90   | Colocación en cuarto bien ventilado a temperatura ambiente por 24 h y después curado en agua  |
| 8  | Cenizas volantes de clase F (50-80%)   | Cal hidratada   | Diámetro de 45 mm                                       | Pre-curado por alrededor de 24 h y después vaporizado con autoclave a presión de 0.5-2 MPa por 3-12 h   |
| 9  | Aserrín y polvo de piedra caliza (86-89%)  | Cemento Portland Ordinario  | 105 x 95 x 75   | Curado a temperatura de ambiente cerrado por 24 h, inmersión en tanque de agua mezclada con cal a 22 °C por 28 días, luego secado en horno ventilado a 105 ° por 24 h |
| 10 | Residuos de algodón y polvo de piedra caliza (84-89%)  | Cemento Portland Ordinario  | 105 x 95 x 75   | Curado a temperatura de ambiente cerrado por 24 h, inmersión en tanque de agua mezclada con cal a 22 °C por 28 días, luego secado en horno ventilado a 105 ° por 24 h |
| 11 | Polvo de residuos de vidrio y polvo de piedra caliza (89%)                                   | Cemento Portland Ordinario  | Varios  | Curado a temperatura de ambiente cerrado por 24 h, en tanque de agua mezclada con cal a 22 °C por 28 días, luego secado en horno ventilado a 105/115 ° por 24 h       |
| 12 | Migas de caucho (0-29%)  | Cemento Portland Ordinario  | 100 x 100 x 75  | Curado al aire por 6 h, inmersión en tanque de agua mezclada con cal a 22 °C por 28 días, y después secado en horno ventilado a 65 °C por 48 h                        |
| 13 | Cenizas volantes de clase F (95% y 100%)   | Cal hidratada   | 15 x 65 x 10  | Colocación en cámara húmeda al 98% de humedad relativa por 3 días, después aplicación de autoclave a 125-135 °C y presión de 0.14 MPa por 4 h                         |
| 14 | Cenizas de la combustión de calderas de lecho fluidizado (centrales eléctricas) (58.3%-100%) | Cemento Portland Ordinario, cal y/o cenizas volantes de clase F   | 90 x 65 x 90  | Colocación en cuarto a 23 °C y con el 100 % de humedad relativa por 1 día, después curado al aire a temperatura de ambiente cerrado a diferentes edades               |
| 15 | Residuos de sílica de baja calidad (83%)   | Cenizas volantes, escoria, polvo de clinker y activadores adicionales                                   | 240 x 115 x 53  | Sellado en bolsa plástica por 6 h, después curado por autoclave a una sola edad.  |
| 16 | Polvo de caliza y cenizas volantes de clase C (100%)   | El material por sí mismo  | 105 x 75 x 225  | Curado a temperatura de ambiente cerrado por 48 h, en tanque de agua a 22 °C por 7, 28 y 90 días, después secado en horno ventilado a 105 °C por 24 h                 |
| 17 | Residuos de la coagulación de las aguas residuales de la elaboración de colorantes (33-50%)  | Cemento Portland Ordinario, clinker de silicato-cemento molido, cemento de alúmina o cemento de escoria | 40 x 40 x 160   | Curado a 20 °C al 100% de humedad por 24 h, después curado en agua a 20 °C por 28 días  |
| 18 | Relaves de cobre con bajo contenido de óxido de silicio (0-88%)                              | Cal   | 100 x 100 x 50  | Calentado por 2 h hasta 170-190 °C, reposo por 5-8 h y después enfriamiento por 3 h   |
| 19 | Polvo de caliza, cenizas volantes de clase C y humo de sílice (100%)                         | Cenizas volantes de clase C y/o humo de sílice  | 225 x 105 x 75  | Curado por aspersión de agua adicional superficial a temperatura de ambiente cerrado por 48 h, después curado en agua a diferentes edades                             |
| 20 | Residuo del reciclaje de papel (80-95%)  | Cemento Portland Ordinario  | 230 x 105 x 80  | Secado al sol   |
| 21 | Relaves de hematita (70%)  | Cal   | 50 x 23 (cilindro)                                      | Pre-curado por alrededor de 24 h, después vaporizado por autoclave a cierta edad.   |
| 22 | Cenizas volantes de clase CFBC (77-100%) y escoria (0-20%)                                   | Cemento Portland Ordinario o cal  | 50 x 50 (cilindro)<br>240 x 115 x 53                    | Curado a 25-30 °C y 80-90% de humedad por cierta edad, después autoclave por 3-8 h  |
| 23 | Residuos de fosfoyeso (75%)  | Cemento Portland Ordinario y cal hidratada  | 240 x 115 x 53  | Curado húmedo por 1 día, secado a 180 °C por 2 h, inmersión en agua por 1 h y curado naturalmente   |
| 24 | Residuos de la combustión de carbón (70% en peso, 90% en volumen)                            | Cemento Portland Ordinario  | 140 x 140 x 90  | Humedecimiento mediante aspersión de agua y conservación bajo láminas plásticas negras  |
| 25 | Cenizas volantes, polvo de minería y limallas de acero (85% y 90%)                           | Cemento Portland Ordinario  | 200 x 90 x 60   | Conservación debajo de estopa húmeda durante la noche, después curado en cajas plásticas de almacenamiento a 22 °C y 95% de humedad relativa                          |

Tabla 6. Investigaciones de mampuestos ecológicos cementados (Zhang, 2013). Adaptación propia.

### 2.3.4. Mampuestos Ecológicos Geopolimerizados



*Figura 12.* Mampuesto fabricado con geopolímeros de polvo de silicato de potasio (Noble Alchem Private Limited, 2019).

La geopolimerización es una tecnología que se sustenta en un proceso químico desarrollado entre componentes. Se basa en la reacción química del sílice amorfo y los sólidos ricos en alúmina, en este caso provenientes de los materiales de residuo, con una solución de alta alcalinidad, a temperatura ambiente o ligeramente elevada, que transforma polímeros inorgánicos amorfos a aluminosilicatos semicristalinos, que se denominan geopolímeros. Estos poseen estructuras tridimensionales de silicoaluminatos, formadas por tetraedros de  $\text{SiO}_4$  y  $\text{AlO}_4$  (silicatos y aluminatos), conectados al compartir todos los átomos de oxígeno (Zhang, 2013).

Los mampuestos ecológicos geopolimerizados nacen como una alternativa a los mampuestos ecológicos cocidos y cementados, puesto que, en ambos casos, aún se emplean moderadas a altas cantidades de energía y se producen emisiones de gases de efecto invernadero, en el proceso de cocción y en la obtención de algunos materiales cementantes, respectivamente.

Zhang (2013), de acuerdo a varias investigaciones, expone los siguientes casos de mampuestos desarrollados bajo este proceso:

| N° | Material de residuo (% de peso)  | Activador alcalino   | Tamaño (mm)                          | Condición de curado  |
|----|--|--|--------------------------------------|--|
| 1  | Cenizas volantes y cenizas de fondo (100%)   | Solución de silicato de sodio  | 40 x 57 (cilindro)<br>300 x 140 x 90 | Curado al ambiente a 20-23 °C con humedad relativa del 35-60% por 28 días  |
| 2  | Cenizas volantes de clase F (100%)   | Solución de silicato de sodio y solución de hidróxido de sodio   | 190 x 90 x 50                        | Tratado al horno y vaporizado a 40, 60, 80, 100 °C por 2, 4, 6, 24, 48, 72 h y después curado a condición ambiente |
| 3  | Cenizas de fondo de la combustión de calderas de lecho fluidizado (centrales de generación eléctrica) (100%) | Solución de silicato de sodio, solución de hidróxido de sodio, solución de hidróxido de potasio y solución de hidróxido de litio | 100 x 100 x 200                      | Curado a 40 °C y 100% de humedad a diferentes edades   |
| 4  | Relaves de mina de cobre (100%)  | Solución de hidróxido de sodio   | 33.4 x 72.5 (cilindro)               | Curado en horno a 60-120 °C por 7 días   |
| 5  | Relaves de mina de cobre (90-100%) y polvo de hornos de cemento (0-10%)                                      | Solución de hidróxido de sodio   | 33.4 x 72.5 (cilindro)               | Curado en horno a 90 °C por 7 días   |
| 6  | Cenizas volantes (80% y 90%) y lodos rojos (20% y 10%)   | Mezcla 1:1 de solución de hidróxido de sodio y solución de silicato de sodio   | Bloque en forma de I                 | Cubierto por láminas plásticas y curado a temperatura ambiente por 28 días   |

*Tabla 7.* Investigaciones sobre mampuestos geopolimerizados (Zhang, 2013). Adaptación propia.

El autor señala que los geopolímeros proveen un desempeño comparable al del Cemento Portland Ordinario (Tipo I) dentro de los mampuestos, además de ciertas ventajas adicionales, incluyendo:

- Fuentes abundantes de materia prima.
- Rápido desarrollo de resistencia mecánica.
- Buena durabilidad.
- Resistencia superior a los ataques químicos.
- Habilidad para inmovilizar agentes contaminantes.
- Reducen significativamente el consumo de energía y la emisión de gases de efecto invernadero.

Características que permiten definir a los geopolímeros como un material ideal para el desarrollo sostenible.

### 2.3.5. Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido (CSEB)



*Figura 13.* Bloque de Suelo Estabilizado Comprimido (Earth Blocks India Private Ltd., 2018).

Los Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido (*Compressed Stabilized Earth Blocks, CSEB*), mencionados con anterioridad, representan propiamente un tipo de mampuesto ecológico cementado. Sin embargo, se ha considerado necesario el tratamiento por separado, con la finalidad de abordar apropiadamente sus características, teniendo en cuenta que el mampuesto a desarrollar pertenece a este subgrupo.

Las propiedades del suelo que influyen decisivamente en las propiedades del producto, de acuerdo a Venkatarama Reddy (2012), son:

- Granulometría
- Plasticidad

Las cuales, conforme a dicho autor, son modificadas mediante una conjunción de tres métodos de estabilización:

1. **Estabilización mecánica:** mezcla de diferentes tipos de suelos para obtener una granulometría adecuada, de ser requerido. Los resultados de un conjunto de diversas investigaciones analizadas por Murmu & Patel (2018) han definido que, generalmente, los suelos utilizados para la elaboración de Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido suelen tener como límites de composición:

- Arena: 36-82%
- Limos: 12-34%
- Arcillas: 6-30%

Venkatarama Reddy (2012) establece, como regla general, que los Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido se elaboran a partir del pasante del tamiz de 5 mm, que, desde el punto de vista del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), elimina la fracción de gravas. Adicionalmente, indica que existe un contenido óptimo de arcilla que conduce a la máxima resistencia a la compresión, siendo aproximadamente del 15% para suelos arenosos de grano grueso, y de alrededor del 10% para suelos limosos de grano fino. De forma genérica, determina que el contenido ideal de arcilla se sitúa en un rango del 10% al 15%.

- 2. Estabilización por compactación:** a través de compactación estática o dinámica con una energía y contenido de agua de moldeo específicos, de manera que la densificación del suelo conduzca hacia un incremento de la resistencia y una reducción de la porosidad, favoreciendo la durabilidad. Generalmente se emplea la humedad óptima, que está asociada a la mayor densidad posible, y esta a su vez, al mejor desempeño mecánico posible. Bahar et al., como se mencionan en Murmu & Patel (2018), señalan que el método de compactación dinámica conduce a una mayor resistencia a la compresión.
- 3. Estabilización por aditivos:** utilización de aditivos orgánicos e inorgánicos en estado líquido o sólido, que se añaden para modificar las propiedades del suelo. Generalmente, se emplean aditivos como:
  - a. Cemento
  - b. Cal
  - c. Bitumen
  - d. Polímeros
  - e. Sales
  - f. Aglutinantes orgánicos
  - g. Fibras orgánicas e inorgánicas

La selección del tipo de aditivo depende de la alteración esperada hacia las propiedades del suelo y la aplicación del producto final. Los aditivos de mayor utilización para la obtención de Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido son el cemento y la cal. Venkatarama Reddy (2012) indica que los suelos con minerales de arcillas de baja expansividad, como la caolinita, pueden ser estabilizados utilizando Cemento Portland, mientras que los suelos que contengan minerales expansivos, como la montmorillonita, deben ser estabilizados con cal (generalmente en forma de hidróxido de calcio), con la finalidad de contrarrestar los cambios de volumen en el producto final.

Una mayor profundización sobre los requerimientos de los materiales a emplear será llevada a cabo en el capítulo 3, dentro del marco de la caracterización de los materiales y el diseño de la mezcla.

Posteriormente, con el suelo estabilizado, se procede a la fabricación, que puede ser tanto a pequeña escala (en obra), como a gran escala (con fines comerciales), mediante la utilización de máquinas de compactación manuales, semiautomáticas o totalmente automáticas, desarrolladas desde la década de 1950 y comercializadas en varios países a nivel internacional. El producto, al presentar niveles adecuados de resistencia y durabilidad, puede emplearse en mampostería estructural (Venkatarama Reddy, 2012).

Morton, Walker, Venkatarama Reddy et al., & Morel et al. (como se mencionan en Riza, Rahman, Mujahid, & Zaidi, 2010) reúnen las ventajas que favorecen a este tipo de mampostería:

- Utilización de materia prima local, dado que generalmente existen los suelos adecuados en las inmediaciones de la zona del proyecto.
- Reducción del costo de transporte, en el caso de fabricarse in-situ.
- Hacen que vivienda de calidad sea accesible a más personas, ya que el producto obtenido posee características aptas para la edificación.
- Impulsan la economía local, al no requerir la obtención de materiales externos.

- Métodos constructivos de mayor facilidad y rapidez, debido a un requerimiento inferior de mano de obra capacitada.
- Resistencia adecuada.
- Aislamiento.
- Propiedades térmicas.
- Producción con menores emisiones de carbono y menor energía incorporada en el proceso.
- Obtención de una cantidad significativamente menor de desperdicios, que son fácilmente descartables.
- No causan contaminación ambiental directa durante todo su ciclo de vida.
- Absorben la humedad atmosférica, creando un ambiente saludable al interior de las edificaciones para sus ocupantes.

Murmu & Patel (2018) han efectuado una comparación de diferentes tipos de mampuestos frente a los Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido, en términos de la conductividad térmica, densidad promedio y resistencia a la compresión en estado saturado, obteniendo los siguientes resultados:

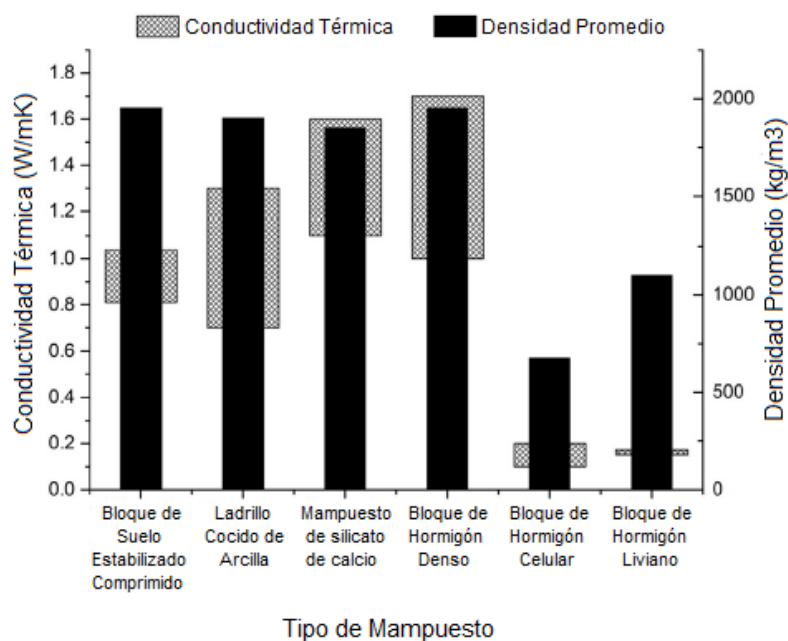


Figura 14. Conductividad Térmica y Densidad Promedio en diferentes tipos de mampuestos (Murmu & Patel, 2018). Adaptación propia.

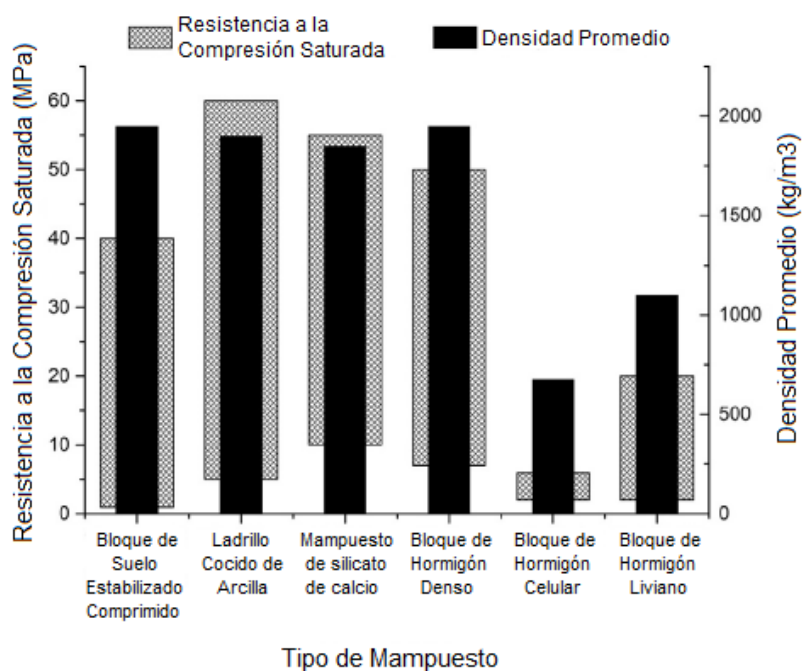


Figura 15. Resistencia a la Compresión Saturada y Densidad Promedio en diferentes tipos de mampuestos (Murmu & Patel, 2018). Adaptación propia.

Al observarse que no existe una gran variación en los parámetros de resistencia a la compresión saturada y conductividad térmica entre los Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido y los Ladrillos Cocidos de Arcilla (Ladrillos Convencionales), los autores concluyen que las propiedades esperadas en un

Ladrillo Convencional pueden ser alcanzadas en los Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido al optimizar adecuadamente sus componentes y fabricarlos de manera apropiada. En términos de densidad, los Bloques de Suelo Estabilizado poseen una mayor densidad, razón por la cual, con fines de reducir la carga transmitida por mampostería, estos deberían desarrollarse considerando la posibilidad de incluir aditivos de baja densidad, como es el caso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar, material a ser utilizado en la presente investigación.

Los Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido pueden ser vulnerables a la acción del agua, dado que tienden a perder la resistencia y estabilidad dimensional al entrar en contacto con ella por largos períodos, pudiendo llegar a disgregarse, lo cual depende de la composición y los procesos de estabilización. En este caso, los mampuestos cocidos poseen una mayor durabilidad. (Murmu & Patel, 2018).

La durabilidad de los Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido resulta de consideración especial en áreas expuestas a las lluvias, dado que pueden conducir a la falla de unidades de mampostería, razón por la cual, requieren previsiones y cuidados específicos, que serán analizados en el capítulo 6.

### 3. Diseño de la mezcla

#### 3.1. Caracterización de materiales

---

Dentro del marco de los parámetros de sostenibilidad analizados en el capítulo anterior, los materiales para la elaboración del mampuesto ecológico propuesto han sido obtenidos de fuentes cercanas al Distrito Metropolitano de Quito, de forma que, dentro de lo posible, se obtengan de fuentes locales, lo cual está ligado a un menor impacto provocado por el transporte, resultando además en un ahorro económico. El punto de investigación y desarrollo del proyecto fue el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (LMC-PUCE), ubicado en la zona centro-norte de la ciudad de Quito.

##### 3.1.1. Suelo

El suelo empleado ha sido recuperado de un depósito de material al aire libre ubicado en la parroquia Calacalí, cercano a la fábrica de prefabricados y ladrillos Terraforte, y transportado 38 km hacia el LMC-PUCE, dentro de bolsas plásticas revestidas por sacos de polipropileno, de manera que sea posible preservar la humedad natural del suelo durante el almacenamiento.

El material del depósito fue previamente obtenido de minas localizadas en la parroquia rural Pacto, cantón Quito, provincia de Pichincha.



*Figura 15.* Depósito localizado en Calacalí, Distrito Metropolitano de Quito.

Considerando el tamaño de partículas, la fabricación de Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido, de manera general, se lleva a cabo eliminando la fracción superior a un tamaño de partícula de 5 mm (Venkatarama Reddy, 2012), es decir, de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), descarta la fracción correspondiente a gravas. Dicho proceso ha sido efectuado en laboratorio mediante la utilización del tamiz N° 4 (4.75 mm).

En términos de plasticidad, Walker, como se menciona en Murmu & Patel (2018), recomienda que el suelo tenga un Índice de Plasticidad ubicado entre 5 y 15, dado que a medida que este se incrementa, la resistencia de los Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido decrece.

El contenido óptimo de arcilla depende del material cementante a utilizar. Venkatarama Reddy & Latha, citados por Murmu & Patel (2018), definen que existe un contenido óptimo de arcilla correspondiente a la menor relación de vacíos en una mezcla dada de suelo, que conduce a la mayor resistencia a la compresión, siendo del 10% para suelos de grano fino y del 14% para suelos de grano grueso.

Los suelos que contienen una fracción excesiva de limos pueden provocar que el mampuesto obtenido tenga una resistencia muy baja para soportar la manipulación a edades tempranas, en cuyo caso, se recomienda el reemplazo de una parte de dicha fracción por gravas o arenas. Por otra parte, los suelos con contenido orgánico y/o de sulfatos generalmente no son adecuados para la estabilización utilizando únicamente cemento o cal, requiriendo de manera adicional la utilización de aditivos acelerantes (Venkatarama Reddy, 2012).

La caracterización del suelo natural ha arrojado los siguientes resultados:

**a) Contenido de humedad**

Se rige por la norma ASTM D2216-19: *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. El contenido de humedad se define como la relación de la masa del agua contenida en los espacios intersticiales del suelo o la roca y la

masa de partículas sólidas, y representa una propiedad significativa al influir en el comportamiento del suelo (American Society for Testing and Materials, 2019b).

| N° de muestra | Peso [cap] (g) | Peso [cap + sh] (g) | Peso [cap + ss] (g) | % w individual | % w promedio |
|---------------|----------------|---------------------|---------------------|----------------|--------------|
| 1             | 16.91          | 68.74               | 64.06               | 9.93           | 9.97         |
| 2             | 16.68          | 71.32               | 66.35               | 10.01          |              |

cap: cápsula / sh: suelo húmedo / ss: suelo seco / % w: porcentaje de humedad

*Tabla 8.* Contenido de humedad natural del suelo.

### b) Granulometría

Dicho ensayo posee como objetivo la determinación de la distribución de tamaños de partículas en el suelo a ser empleado, y resulta esencial para definir la clasificación que este posee. La caracterización completa de la distribución granulométrica se efectúa a través de dos procedimientos, llevados a cabo sobre diferentes fracciones del material:

**Granulometría a través de análisis de tamices**, normada por la ASTM D6913-17, *Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*, empleada para caracterizar la fracción situada entre el tamiz de 3” (75 mm) y N° 200 (75 µm), denominada “fracción gruesa”, que se lleva a cabo al separar la muestra en diferentes rangos de tamaño a través del uso de tamices dispuestos en orden decreciente de abertura, determinando cuantitativamente la masa de las partículas en cada rango (American Society for Testing and Materials, 2017d).

| Tamiz,<br>N°:                 | 3"    | 2"    | 1 ½"  | 1"    | ¾"    | 3/8"  | 4     | 10   | 40    | 200   |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| Abertura,<br>mm:              | 75.0  | 50.0  | 37.5  | 25.0  | 19.0  | 9.5   | 4.75  | 2.0  | 0.425 | 0.075 |
| Porcentaje<br>retenido,<br>%: | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.76 | 1.12  | 15.27 |
| Porcentaje<br>que pasa,<br>%: | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 99.2 | 98.9  | 84.7  |

*Tabla 9.* Análisis granulométrico por tamizado.

**Granulometría a través de análisis de sedimentación (hidrometría)**, normada por la ASTM D7928-17, *Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis*, que se utiliza para el estudio de la fracción pasante del tamiz N° 200 (75 µm), denominada “fracción fina”, permitiendo definir las cantidades de limos y arcillas. Para esto, se basa en la Ley de Stokes, que define que las partículas más grandes caen a través de un fluido más rápido que las partículas de menor tamaño, asumiendo que todas ellas son esféricas. De esta forma, las partículas son ordenadas por tamaño al determinar el tiempo y posición al decantar en líquido estacionario con la asistencia de un hidrómetro, que mide la densidad de la mezcla suelo-agua y determina la cantidad de partículas en suspensión en tiempos y posiciones específicas (American Society for Testing and Materials, 2017e).

| Tamaño de partícula (mm) | Porcentaje más fino (%) |
|--------------------------|-------------------------|
| 0.084                    | 74.1                    |
| 0.061                    | 68.1                    |
| 0.044                    | 64.1                    |
| 0.032                    | 59.7                    |
| 0.023                    | 55.8                    |
| 0.016                    | 51.8                    |
| 0.012                    | 45.9                    |
| 0.009                    | 36.0                    |
| 0.006                    | 30.0                    |
| 0.0047                   | 22.1                    |
| 0.0033                   | 16.2                    |
| 0.0024                   | 12.2                    |
| 0.0014                   | 6.3                     |
| 0.0010                   | 4.3                     |

Tabla 10. Análisis granulométrico por sedimentación (hidrometría).

| Tamaño de partícula (mm) | Porcentaje más fino (%) | Tipo de fino |
|--------------------------|-------------------------|--------------|
| 0.075                    | 74.1                    | Limo         |
| 0.005                    | 23.9                    | Limo         |
| 0.002                    | 10.1                    | Arcilla      |

Tabla 11. Distribución de finos de acuerdo al análisis granulométrico por sedimentación (hidrometría).

La combinación de ambas distribuciones permite definir la curva granulométrica completa de la muestra de suelo:

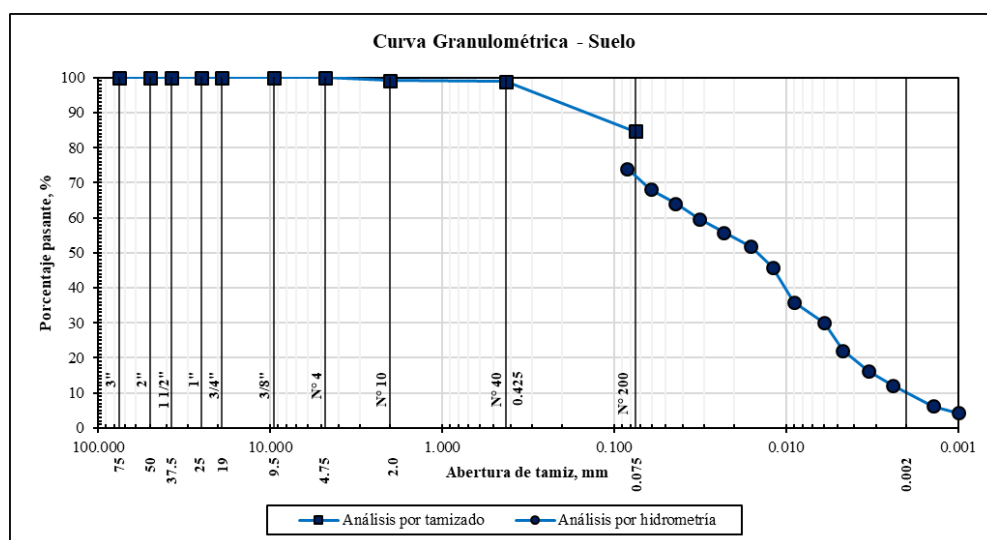


Figura 16. Curva granulométrica de la muestra de suelo.

### **c) Límites de plasticidad**

Se definen como los contenidos de humedad del suelo que delimitan sus estados de consistencia, y están representados por el Límite Líquido (LL), Límite Plástico (LP) y Límite de Contracción (LC), que conjuntamente son conocidos como “Límites de Atterberg”. El Límite Líquido (LL) y el Límite Plástico (LP) permiten el cálculo del Índice de Plasticidad (IP), que conjuntamente, permiten la clasificación del suelo bajo diversos sistemas y la identificación de su comportamiento en términos de compresibilidad, permeabilidad, compactibilidad, consolidación y expansión, y resistencia al corte. Dicha determinación se lleva a cabo únicamente en la fracción pasante del tamiz N° 40 o de 425 µm (American Society for Testing and Materials, 2017c).

Por estas razones, con fines ingenieriles, generalmente son determinados el Límite Líquido (LL), Límite Plástico (LP) y el Índice de Plasticidad (IP), a través del procedimiento establecido por la norma ASTM D4318-17, *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*.

#### **Límite Líquido (LL)**

Se define como el contenido de humedad bajo el cual un suelo cambia de estado plástico a líquido (Day, 1999). Para su identificación, la muestra de suelo es procesada a través del tamiz N° 40 (0.425 mm) y se llevan a cabo diversas pruebas, en las cuales, una porción de suelo es dispersada en una copa de bronce (Copa de Casagrande) y dividida en dos por una herramienta ranuradora, para posteriormente permitir que se vuelva a unir en una longitud de 13 mm debido a los golpes provocados al dejar caer repetidamente la copa en un equipo mecánico, bajo ciertas restricciones dadas (American Society for Testing and Materials, 2017c).

Dicho procedimiento se realiza a través de dos alternativas:

- i. **Método multi-punto:** se llevan a cabo tres o más pruebas con diferentes contenidos de humedad y la información obtenida (número de golpes y contenido de humedad) es graficada para determinar una relación, en la cual se determina el Límite Líquido (LL), que se establece como el contenido de humedad correspondiente a un número de 25 golpes.
- ii. **Método uni-punto:** se llevan a cabo dos pruebas a un mismo contenido de humedad, multiplicado por un factor de corrección para determinar el límite líquido.

De acuerdo con la American Society for Testing and Materials (2017c), el método multi-punto generalmente es más preciso que el método uni-punto, razón por la cual, ha sido seleccionado para la presente investigación:

| <b>Límite Líquido</b> |                       |                            |                            |                       |
|-----------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| <b>N° de golpes</b>   | <b>Peso [cap] (g)</b> | <b>Peso [cap + sh] (g)</b> | <b>Peso [cap + ss] (g)</b> | <b>% w individual</b> |
| 32                    | 9.43                  | 26.84                      | 22.25                      | 35.80                 |
| 26                    | 8.69                  | 31.11                      | 24.98                      | 37.63                 |
| 18                    | 8.87                  | 30.34                      | 24.25                      | 39.60                 |

cap: cápsula / sh: suelo húmedo / ss: suelo seco / % w: porcentaje de humedad

*Tabla 12.* Contenidos de humedad correspondientes a diferentes números de golpes.

Al contar con la información de tres pruebas, se procede a la determinación del Límite Líquido (LL) tras definir una recta de regresión lineal, sobre la cual se identifica el contenido de humedad correspondiente a un número de 25 golpes, que debe ser redondeado a un número entero:

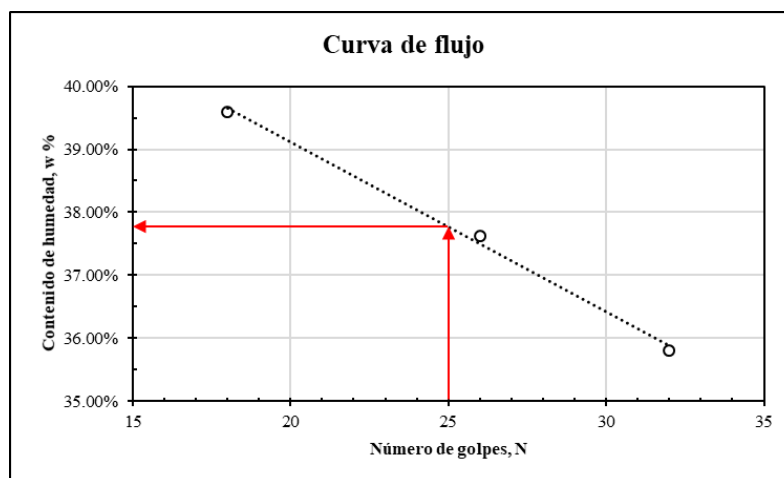


Figura 17. Curva de flujo del Límite Líquido.

De forma que se identifica el Límite Líquido (LL):

| Número de golpes | Contenido de humedad |
|------------------|----------------------|
| 25               | LL=38 %              |

Tabla 13. Límite Líquido.

### Límite Plástico (LP)

Por otra parte, el Límite Plástico se define como el contenido de humedad que corresponde al cambio entre estado sólido y semisólido (Day, 1999). Este es determinado al presionar y enrollar alternadamente la muestra hacia un rollo con un diámetro de 3.2 mm, hasta que el contenido de humedad sea reducido a punto en el cual, el rollo se desmenuce con un tamaño mayor o igual a la medida indicada, y no sea posible presionar y volver a enrollar (American Society for Testing and Materials, 2017c).

Así, el Límite Plástico (LP) es determinado al redondear el valor del contenido de humedad correspondiente a las condiciones señaladas:

| <b>Límite Plástico</b> |                       |                            |                            |                       |                     |
|------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------|
| <b>N° de muestra</b>   | <b>Peso [cap] (g)</b> | <b>Peso [cap + sh] (g)</b> | <b>Peso [cap + ss] (g)</b> | <b>% w individual</b> | <b>% w promedio</b> |
| 1                      | 6.11                  | 16.16                      | 14.12                      | 25.47                 |                     |
| 2                      | 6.13                  | 16.69                      | 14.57                      | 25.12                 | <b>25.29</b>        |

cap: cápsula / sh: suelo húmedo / ss: suelo seco / % w: porcentaje de humedad

*Tabla 14.* Contenidos de humedad correspondientes al Límite Plástico.

### Índice de Plasticidad (IP)

Tras conocer el Límite Líquido (LL) y el Límite Plástico (LP), el Índice de Plasticidad (IP) se determina según:

$$IP = LL - LP$$

*Ecuación 1.* Índice de Plasticidad.

Los límites de plasticidad resultantes se resumen de la siguiente forma:

| <b>Límites de Plasticidad</b>     |    |
|-----------------------------------|----|
| <b>Límite Líquido, LL:</b>        | 38 |
| <b>Límite Plástico, LP:</b>       | 25 |
| <b>Índice de Plasticidad, IP:</b> | 12 |

*Tabla 15.* Resumen de límites de plasticidad.

### d) Gravedad específica

El procedimiento para la determinación de este parámetro está regido por la normativa ASTM D854-14: *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*.

La gravedad específica (GS) es un parámetro adimensional que relaciona la densidad seca del suelo con la densidad del agua (Day, 1999), procedimiento que se lleva a cabo al sumergir en agua destilada un matraz que contiene un slurry de suelo, teniéndose condiciones controladas de temperatura (con el agua a 4°C de diferencia respecto a la temperatura ambiente). La temperatura ambiente debe estar en un rango entre 15-30

°C, y se prefiere que esta sea de 25° C en lo posible (American Society for Testing and Materials, 2014).

|  |        |
|--|--------|
| <b>Matraz N°:</b>                        | 1      |
| <b>Masa [matraz + agua + suelo], g:</b>  | 692.09 |
| <b>Temperatura, °C:</b>                  | 23.0   |
| <b>Masa [matraz + agua], g:</b>          | 648.05 |
| <b>Masa [suelo], g:</b>                  | 71.33  |
| <b>Gravedad específica (GS):</b>         | 2.61   |
| <b>Gravedad específica a 20 °C (GS):</b> | 2.61   |

*Tabla 16.* Gravedad específica del suelo. Fuente: LMC-PUCE.

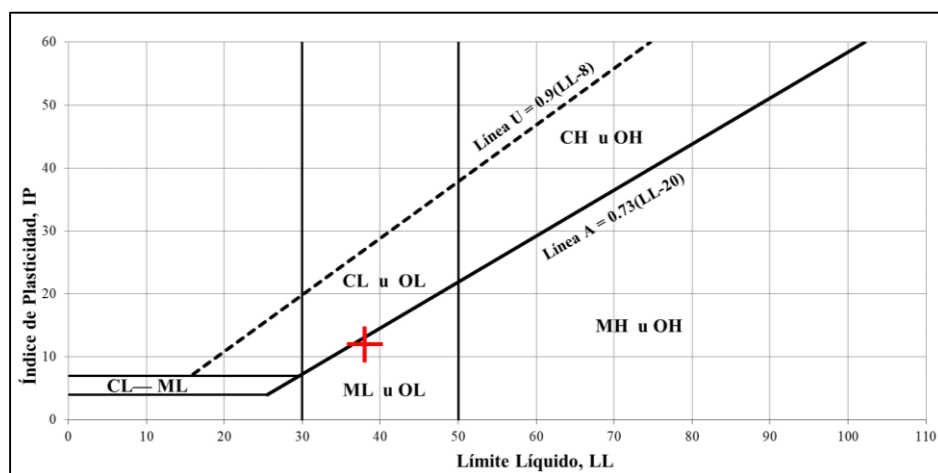
#### e) Clasificación de suelo

La clasificación de suelo obtenido se lleva a cabo mediante el sistema indicado por la norma ASTM D2487-17: *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, conocido en español como “Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), en base a los resultados obtenidos en términos de granulometría y límites de plasticidad, añadiéndose complementariamente, la humedad natural y un desglose de la granulometría de la fracción gruesa y la fracción fina:

| HUMEDAD NATURAL                        |      |
|--|------|
| Contenido de humedad, %:               | 9.97 |
| LÍMITES DE PLASTICIDAD                 |      |
| Límite Líquido, LL:                    | 38   |
| Límite Plástico, LP:                   | 25   |
| Índice de Plasticidad, IP:             | 12   |
| ANÁLISIS DE GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO |      |
| Grava, %:                              | 0    |
| Arena, %:                              | 15   |
| Finos, %:                              | 85   |

*Tabla 17.* Resumen de datos para la clasificación del suelo bajo el sistema SUCS.

El análisis de granulometría por tamizado indica una cantidad de finos superior al 50%, razón por la cual, se procede a la caracterización del suelo de acuerdo a la plasticidad (American Society for Testing and Materials, 2017b):



*Figura 18.* Carta de Plasticidad (Casagrande).

Tras el análisis, se procede a la clasificación del suelo dentro de un grupo determinado:

| CLASIFICACIÓN S.U.C.S. |    |
|------------------------|----|
| Limo con arena         | ML |

*Tabla 18.* Clasificación del suelo.

#### **f) Densidad máxima**

Esta característica ha sido determinada bajo el procedimiento dictado por la norma ASTM D1557-12: *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>))*, en el cual, se compacta un suelo bajo un determinado contenido de humedad en 5 capas, dentro de un molde de determinadas dimensiones, compactando cada capa con 25 o 56 golpes de un martillo de 44.48 N, con una caída desde una altura de 457.2 mm, lo cual somete al suelo a un esfuerzo total de compactación de alrededor de 2700 kN-m/m<sup>3</sup>, para finalmente, determinar el peso unitario resultante. Este procedimiento es repetido, con diferentes contenidos de humedad, hasta obtener un número suficiente de contenidos de humedad, relacionados a una densidad seca, que permitan establecer una relación curvilínea entre el peso unitario seco y el contenido de humedad del suelo, sobre la cual, se determina el peso unitario seco máximo, que está relacionado a un contenido de humedad óptimo (American Society for Testing and Materials, 2012).

El suelo, como material de ingeniería, es compactado hacia un estado denso para mejorar sus propiedades respecto a resistencia al corte, compresibilidad y permeabilidad (American Society for Testing and Materials, 2012), lo cual será aprovechado en la presente investigación, con implicaciones que serán profundizadas más adelante. Dado que se prevé la adición de cemento y cenizas de bagazo de caña de azúcar, la densidad máxima del suelo en estado natural representa un parámetro de comparación importante frente a la densidad obtenida en las diferentes dosificaciones.

Dado que el suelo a ser empleado será procesado a través del tamiz N°4 (4.75 mm), al no existir retenido en dicho tamiz, se procede a la selección del método A, que contempla la compactación de 5 capas de suelo con 25 golpes cada una.

| Prueba, N°:                        | 1     | 2     | 3     | 4     | Resultados                                |       |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|---|-------|
| Humedad de moldeo, %:              | 7.98  | 11.33 | 14.15 | 17.29 | Humedad óptima, %:                        | 12.85 |
| Densidad seca, g/cm <sup>3</sup> : | 1.794 | 1.856 | 1.854 | 1.806 | Densidad seca máxima, g/cm <sup>3</sup> : | 1.860 |

Tabla 19. Datos para curva de compactación de suelo natural.

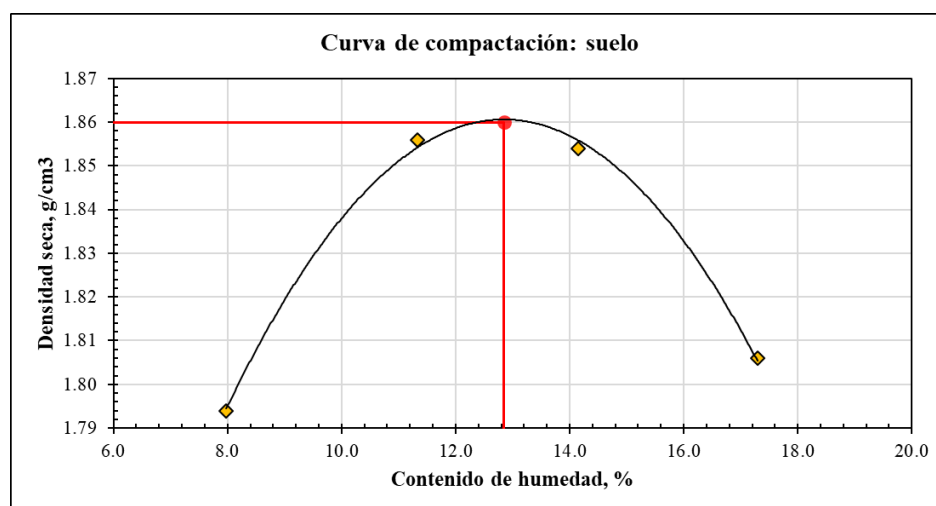
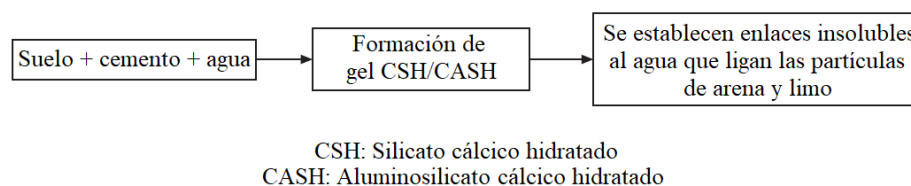


Figura 19. Curva de compactación de suelo natural.

### 3.1.2. Cemento

En el proceso de fabricación de Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido, la estabilización con cemento es llevada a cabo con la finalidad de mejorar la resistencia mecánica (especialmente en condición saturada), la resistencia a la erosión por lluvias y la durabilidad (Venkatarama Reddy, 2012), de acuerdo con el siguiente principio:



*Figura 20.* Principio de la estabilización de suelos con cemento (Venkatarama Reddy, 2012).  
Adaptación propia.

Resulta necesaria la selección de un cemento de fácil accesibilidad y que cuente con disponibilidad a nivel nacional. Por esta razón, se ha seleccionado un cemento de marca Holcim tipo GU – Construcción general, fabricado en la Planta Holcim Latacunga, clasificado de acuerdo con la norma NTE INEN 2380:2011, “Cemento Hidráulico. Requisitos de desempeño para Cementos Hidráulicos”, equivalente a la norma ASTM C1157-10, *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*. Holcim Ecuador (2016) define a este producto como un Cemento Hidráulico compuesto por clínker de Cemento Portland, sulfato de calcio y adiciones de puzolanas naturales.

Dentro de las propiedades de dicho material, cabe destacar:

#### a) Gravedad específica

Este valor ha sido obtenido a partir de la información proporcionada por el LMC-PUCE, resultante del ensayo establecido por la norma NTE INEN 156:2009 – Cemento Hidráulico. Determinación de la densidad, que a su vez, se define como la masa de una unidad de volumen de sólidos.

---

|                  |                       |
|------------------|-----------------------|
| <b>Densidad:</b> | $2.75 \frac{g}{cm^3}$ |
|------------------|-----------------------|

---

*Tabla 20.* Densidad de Cemento Holcim GU.

La gravedad específica se determina de la siguiente manera:

$$\text{Gravedad Específica} = \frac{\text{Densidad del cemento}}{\text{Densidad del agua a } 4^{\circ}\text{C}}$$

*Ecuación 2.* Gravedad específica.

Considerando que la densidad del agua a 4° C es de 1 g/cm<sup>3</sup> (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009), la gravedad específica (GS) se define como un valor adimensional:

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| <b>Gravedad específica:</b> | 2.75 |
|-----------------------------|------|

*Tabla 21.* Gravedad específica de Cemento Holcim GU.

#### **b) Finura por el método Blaine**

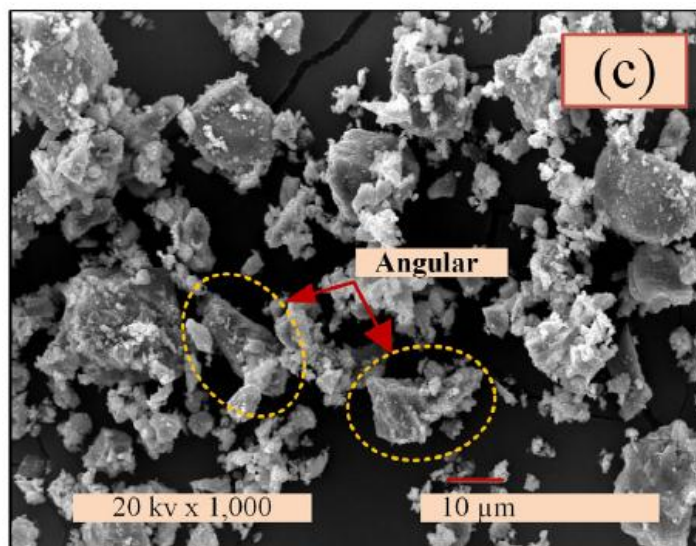
Joshi & Lohita (1997), definen a la finura por el método Blaine como el área de la superficie específica determinada a partir de la permeabilidad al aire del material, mientras que la superficie específica representa el área de la superficie por unidad de volumen o unidad de masa de las partículas de un material (Tan, 2011). Como referencia, una mayor finura se traduce en una superficie específica mayor del material, que involucra una mayor tasa de desarrollo de la resistencia en la fase inicial, dado que existe una mayor superficie que entra en contacto con agua (Chalishgaonkar, 2003). En el caso de los Cementos Portland modernos, se esperan valores entre 300-350 kg/m<sup>2</sup> (Taylor, 1997).

Los resultados proporcionados por el LMC-PUCE son:

|                                |                         |
|--------------------------------|-------------------------|
| <b>Finura – Método Blaine:</b> | 352.92 $\frac{kg}{m^3}$ |
|--------------------------------|-------------------------|

*Tabla 22.* Finura de Cemento Holcim GU.

### c) Microestructura



*Figura 21.* Microscopía electrónica de barrido de Cemento Portland Ordinario en estado original (Jamsawang et al., 2017).

Cerro-Prada (2018), realiza una descripción del proceso de desarrollo de la microestructura del cemento durante la hidratación, en el cual se llevan a cabo diversos procesos físico-químicos de manera coordinada, y que dan lugar a la obtención de materiales con propiedades excepcionales. En este proceso, el clínker de cemento reacciona con el agua, generando productos de hidratación de naturaleza insoluble, los cuales en una pasta cementante (mezcla de cemento y agua), en el hormigón (una pasta cementante que contiene agregados gruesos y finos), o en materiales que involucran el uso de cemento, agua y partículas de suelo, gradualmente se encargan de reemplazar el agua que originalmente ocupó los espacios entre los granos de cemento y las partículas de material, resultando eventualmente en una matriz de materiales efectivamente adheridos.

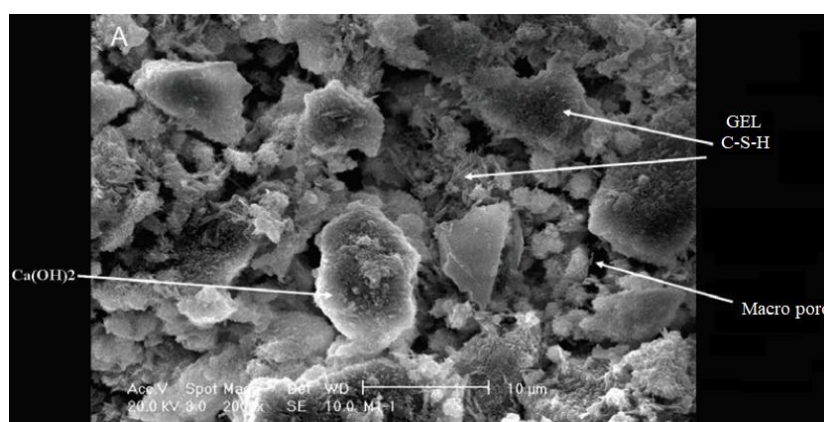
La autora señala que la reacción de endurecimiento de una pasta cementante está principalmente asociada a la hidratación de los dos compuestos de silicatos de calcio presentes en el cemento (silicato tricálcico -alita-, y dicálcico -belita-), que ocupan más del 80% en masa

del clinker del Cemento Portland ordinario, generando fundamentalmente dos compuestos:

- Gel C-S-H, denominado Silicato Cálcico Hidratado, de morfología coloidal.
- $Ca(OH)_2$  o CH, denominado Hidróxido de Calcio o “Portlandita”, solución cristalina que tiende a formar grandes cristales con morfología prismática hexagonal.

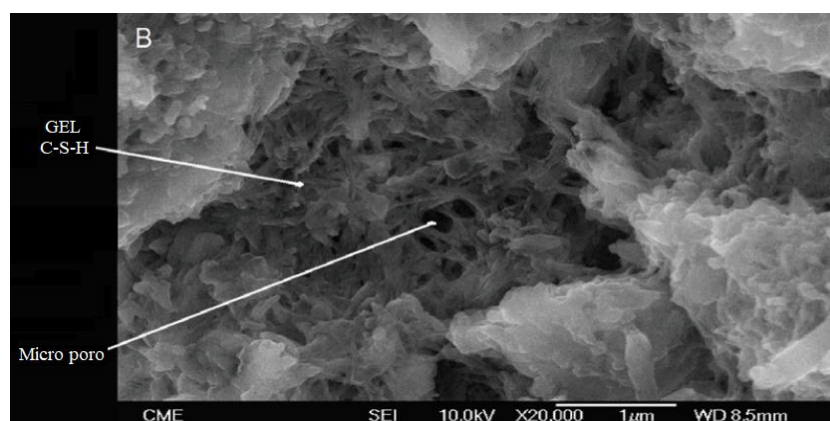
Tras haber sido mezclado el cemento con agua, se produce de manera inicial, una rápida formación de recubrimientos de hidratos gelatinosos alrededor de los granos de cemento, y después de un período de letargo, dichos recubrimientos se desarrollan paulatinamente hacia una red reticular entre granos de cemento, conformada por gel C-S-H (Cerro-Prada, 2018), procesos que pueden ser explicados a través de la visualización de micrografías realizadas en microscopios electrónicos de barrido (SEM).

La autora señala que en la fase temprana de hidratación de la pasta cementante se observa un recubrimiento de aspecto amorfo, conformado por gel C-S-H, que une los granos de cemento en sus puntos de contacto, observándose además CH (Portlandita) a lo largo de los micro y macroporos de la estructura:



**Figura 22.** Microscopía electrónica de barrido de Cemento Portland Ordinario en fase temprana de hidratación (Cerro-Prada, 2018). Adaptación propia.

Por otra parte, una pasta cementante madura, que ha concluido el proceso físico-químico de hidratación, muestra un gel C-S-H de morfología fibrosa, que provee de una red reticular dentro de todo el sistema (Cerro-Prada, 2018):



*Figura 23.* Microscopía electrónica de barrido de Cemento Portland Ordinario tras concluir el proceso químico de hidratación (Cerro-Prada, 2018). Adaptación propia.

De esta manera, se considera que el gel C-S-H es el responsable de la resistencia y durabilidad de los materiales basados en el uso de cemento al conformar el esqueleto interno de la pasta, propiciando la adherencia de la pasta a los agregados en la formación de mortero y hormigón (Cerro-Prada, 2018), así como la adherencia con las partículas de suelo dentro del proceso de estabilización de suelos (Venkatarama Reddy, 2012).

#### **d) Composición química**

Garófalo (2015), presenta la composición química de diversos cementos disponibles en el mercado ecuatoriano, entre los cuales se encuentra la composición correspondiente al cemento seleccionado para la presente investigación:

| <b>Cemento Holcim tipo GU (Origen: Latacunga)</b> |                               |
|---|-------------------------------|
| <b>Compuesto</b>                                  | <b>Porcentaje (%) en masa</b> |
| <i>SiO<sub>2</sub></i>                            | 30.80                         |
| <i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>                | 7.98                          |
| <i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>                | 4.14                          |
| <i>CaO</i>  | 48.4                          |
| <i>MgO</i>  | 2.06                          |
| <i>SO<sub>3</sub></i>                             | 1.98                          |
| <i>K<sub>2</sub>O</i>                             | 0.48                          |
| <i>Na<sub>2</sub>O</i>                            | 1.54                          |
| <i>TiO<sub>2</sub></i>                            | 0.46                          |
| <i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>                 | 0.24                          |
| <i>P.F.</i>                                       | 1.20                          |
| <i>Na<sub>2</sub>O Eq.</i>                        | 1.85                          |
| <b>Total</b>                                      | <b>99.1</b>                   |

*Tabla 23.* Composición química de Cemento Holcim GU – Origen: Latacunga (Garófalo, 2015). Adaptación propia.

Cabe notar que el cemento tipo GU (NTE INEN 2380), a diferencia del cemento de clasificación Portland (NTE INEN 152) y cemento de clasificación compuesta (NTE INEN 490), no posee restricciones de composición (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

### 3.1.3. Cenizas de bagazo de caña de azúcar



*Figura 24.* Bagazo de caña de azúcar y cenizas de diferentes orígenes (Alderetes, 2016).

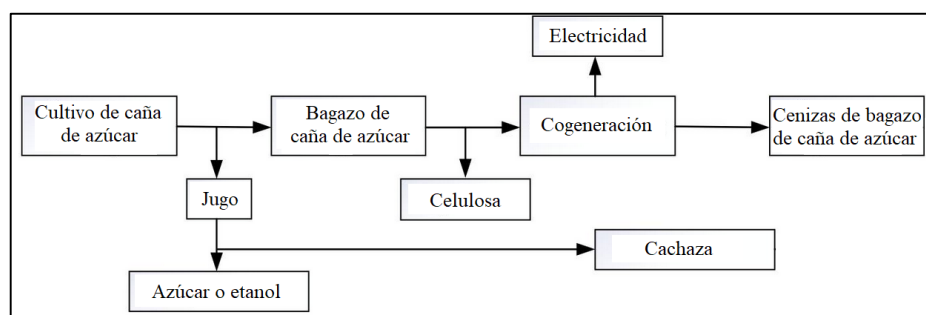
Las cenizas de bagazo de caña de azúcar (*Sugar Cane Bagasse Ash, SCBA*, o también denominadas solamente *Bagasse Ash, BA*) constituyen un residuo final del procesamiento de caña de azúcar para la fabricación de azúcar y etanol. El

bagazo obtenido de la molienda representa alrededor del 30-32% en peso de la caña cruda (Reddy & Yang, 2015), y cada tonelada de bagazo incinerado es capaz de generar de 25 a 40 kg de cenizas (Sales & Lima, como se mencionan en Xu, Ji, Gao, Yang, & Wu, 2018), lo cual otorga una idea de la gran cantidad de cenizas que son producidas.



*Figura 25.* Bagazo de caña de azúcar obtenido de la Hacienda Santa Mercedes, Ibarra, Imbabura, Ecuador.

El proceso de obtención de cenizas de bagazo de caña de azúcar se resume de la siguiente forma:

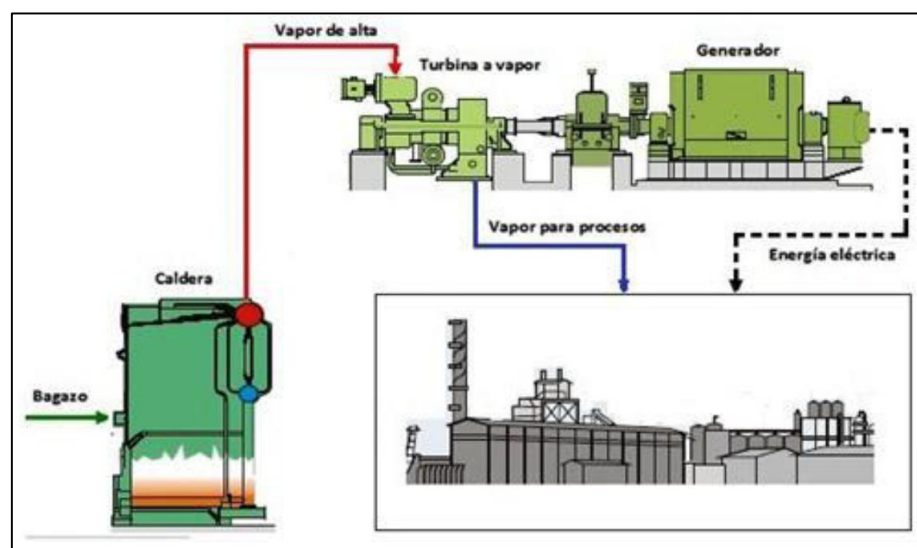


*Figura 26.* Proceso de generación de cenizas de bagazo de caña de azúcar (Xu et al., 2019). Adaptación propia.

Como se había señalado con anterioridad, el bagazo de caña de azúcar se utiliza como combustible en las industrias de procesamiento de caña de azúcar. Alderetes (2016), efectúa una profundización del proceso, señalando que la combustión del bagazo, llevada a cabo dentro de una caldera, denominada “caldera de bagazo”, permite la cogeneración, definida como la “producción

secuencial de dos formas de energía útil a partir de una misma fuente primaria o combustible” (Morvay et al., Flin, & Kiameh, como se citaron en Alderetes, 2016) , produciéndose vapor.

Por una parte, el vapor provee energía térmica para las operaciones de calentamiento, evaporación, cocción, dilución, refundición, centrifugación y secado, procesos demandados por la fabricación del azúcar, así como los procesos de calentamiento, destilación, rectificación y deshidratación, dentro de la fabricación de etanol. Por otra parte, impulsa las turbinas de un generador de electricidad, la cual se utiliza para abastecer las necesidades de la planta, y en el caso de existir excedentes, permite el suministro hacia la red pública (Alderetes, 2016). El autor señala además, que, en un ingenio típico, de forma aproximada, del total de energía aprovechable a partir del bagazo de caña de azúcar, el 6% se convierte en energía eléctrica, el 65% representa energía para las operaciones de transferencia de calor, y el 29% restante se pierde en los procesos de conversión.



*Figura 27.* Ciclo de generación de energía debido a la combustión de bagazo (Alderetes, 2016).



*Figura 28.* Proceso de combustión de bagazo (Alderetes, 2016).

La incineración de bagazo a temperaturas controladas tiende a mejorar las propiedades (Sata, Jaturapitakkul, & Kiattikomol, como se mencionaron en Rosseira et al., 2018), señalándose que, de acuerdo a varias investigaciones, dicha temperatura es menor a 800 °C (Rosseira et al., 2018). No obstante, Alderetes (2016), señala que el proceso de combustión del bagazo, tradicionalmente, es llevado a cabo en un ambiente de alta temperatura no controlable. Dicho ambiente es denominado “hogar de la caldera”. El autor señala que es posible separarlo en las etapas mostradas a continuación, pero en la realidad, dentro del proceso industrial, estas pueden producirse al mismo tiempo y superponerse:

- **Secado:** calentamiento y evaporación de la humedad del bagazo. Se da en un rango de temperatura entre la temperatura ambiente y 100 °C.
- **Pirólisis:** degradación térmica de alta complejidad química, procesos de transferencia de calor y masa con liberación de gases orgánicos e inorgánicos y líquidos. Provocado entre los 200 y 400 °C.
- **Ignición:** momento en el cual se inicia la combustión y es posible que el proceso de quemado se sostenga sin ayuda de una fuente externa. Producido entre 220 y 290 °C.
- **Gasificación:** transformación total o parcial de los componentes del material sólido en gases combustibles. Producido generalmente entre 800 y 1100 °C.
- **Combustión de materia volátil y alquitranes residuales:** los gases y partículas del material combustible reaccionan en presencia del

oxígeno, produciendo dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y vapor de agua.

Debido a la variabilidad de temperaturas dentro de todo el proceso, no es posible definir con exactitud un rango de temperaturas en el cual se ha incinerado el bagazo que ha permitido la obtención de las cenizas de la presente investigación.

A lo largo del tiempo se han realizado diversos estudios que han llevado a la conclusión de que las cenizas de bagazo de caña de azúcar poseen una alta reactividad hacia la cal y el cemento, resultando especialmente adecuada como reemplazo parcial del Cemento Portland (Chusilp et al., Cordeiro et al., Paya et al., Fairbairn et al., Martirena et al., Jiménez-Quero et al., & Ganesan et al., como se citan en Torres Agredo, Mejía de Gutierrez, Escandón Giraldo, & González Salcedo, 2014), debido a sus propiedades puzolánicas.

Las propiedades puzolánicas del material pueden ser mejoradas a través de un procesamiento de las cenizas recolectadas de la caldera, para lo cual, cabe resaltar, es necesario llevar a cabo un estudio específico para las cenizas a utilizar, como es el caso de Bahurudeen & Santhanam (2015), que al recolectar las cenizas de la planta de *Madras Sugar Limited*, localizada en *Tamil Nadu, India*, tras haber ensayado diferentes métodos de reincineración, tamizado, y trituración de partículas, determinaron que la máxima actividad puzolánica de dicha ceniza se alcanzó al tamizarla a través de un tamiz de 300  $\mu\text{m}$  (aproximadamente un tamiz N° 50), y triturar sus partículas hasta alcanzar la finura del cemento (300  $\text{kg}/\text{m}^2$ ).

Particularmente, se ha descubierto que la ceniza de bagazo de caña de azúcar puede reemplazar potencialmente al cemento hasta en un 20%, lo cual se sustenta en investigaciones llevadas a cabo en hormigones por Ganesan et al., & Cordeiro et al., citados por Torres Agredo et al. (2014), además de Jamsawang et al. (2017), que específicamente han efectuado de manera exitosa el reemplazo indicado dentro de la estabilización de suelos.

Las cenizas empleadas para el desarrollo del proyecto han sido recuperadas de la planta de producción del Ingenio Azucarero del Norte Compañía de Economía Mixta – IANCEM, ubicada en la parroquia Ambuquí, cantón Ibarra, provincia de Imbabura, Panamericana Norte km 25, vía Ibarra-Tulcán, y transportadas 149 km hacia el LMC-PUCE. Dicho ingenio azucarero representa la fuente de cenizas de bagazo de caña de azúcar más cercana al sitio base de investigación.



*Figura 29.* Planta del Ingenio Azucarero del Norte.

La planta mencionada efectúa periódicamente una limpieza en seco de la ceniza resultante de la incineración, la cual es transportada dentro del complejo industrial hacia un depósito a cielo abierto ubicado en una explanada, junto a la zona de balanzas. De la totalidad de este material, una fracción es mezclada con cachaza y bagazo, para posteriormente ser sometida a un proceso aeróbico para la elaboración de compostaje para los cultivos propios (Biosfera Gestión Ambiental, 2012), y otra fracción se pone a la venta, cuya única finalidad en la actualidad es el uso como fertilizante para cultivos.



*Figura 30.* Depósito de cenizas de bagazo de caña de azúcar.



*Figura 31.* Depósito de cenizas de bagazo de caña de azúcar.

El material recuperado ha sido transportado y almacenado dentro de bolsas plásticas revestidas por sacos de polipropileno, con el fin de evitar la pérdida de material fino.

La condición original del material incluye residuos de bagazo sin incinerar y parcialmente incinerados, agregaciones de partículas, elementos vegetales e insectos. Al haber estado expuesto a la intemperie, adicionalmente, posee humedad natural, que complica el proceso de dosificación. Por esta razón, con la finalidad de no alterar las propiedades químicas, descartar las impurezas y eliminar el contenido de humedad natural, las cenizas han sido colocadas en un horno de laboratorio a 60 °C hasta mantener una masa constante, para posteriormente, ser procesadas a través de un tamiz N° 40 (0.425 mm), seleccionado debido a la facilidad del procesamiento del material y como una aproximación conservadora a la solución de Bahurudeen & Santhanam (2015).

## **3.2. Procedimiento general**

---

### **3.2.1. Preparación de materiales**

El proceso de dosificación requiere del procesamiento previo de los materiales, con la finalidad de que este cumpla con características establecidas.

#### **a) Suelo**

El suelo, al haber estado expuesto a la intemperie, posee una humedad natural elevada y superior a los contenidos de humedad requeridos para los diferentes procesos de moldeado. Por esta razón, se ha procedido a colocarlo en bandejas para su secado al aire durante al menos 24 horas, para posteriormente ser tamizado a través del tamiz N° 4 (4.75 mm), que permite obtener la fracción empleada para todo el proceso de diseño de la mezcla y fabricación de los mampuestos.



*Figura 32.* Suelo sin procesar con humedad natural.



*Figura 33.* Suelo secado al aire y procesado.

### **b) Cemento**

El cemento ha sido almacenado en un ambiente ventilado, bajo techo, libre de humedad y dentro de bolsas plásticas, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. Con la finalidad de no exceder el tiempo de conservación máximo (60 días), considerando que una fracción desconocida de este período es consumida por el almacenamiento en el punto de distribución, este material se ha adquirido al mismo distribuidor al inicio de cada una de las dos fases de desarrollo del proyecto en laboratorio: diseño de la mezcla y elaboración de mampuestos.

### **c) Cenizas de bagazo de caña de azúcar**

Como se ha indicado anteriormente, las cenizas han sido colocadas en un horno de laboratorio a 60 °C hasta mantener una masa constante, de manera que sea posible eliminar el contenido de humedad natural, y

procurando mantener inalteradas las propiedades químicas del material, para posteriormente, facilitar el procesamiento a través de un tamiz N° 40 (0.425 mm), que ha permitido eliminar las impurezas detectadas.



*Figura 34.* Ceniza en estado natural.



*Figura 35.* Ceniza seca al horno y tamizada.

### **3.2.2. Determinación de la adición de cemento**

Las adiciones de cemento se consideran en porcentaje respecto al peso seco de suelo. Minke (2006), señala que la resistencia a la compresión de la estabilización de suelo puede ser inferior a la correspondiente al suelo sin estabilizar cuando se coloca cemento en cantidades menores al 5%, lo cual se debe a que éste interfiere con las fuerzas de enlace de los minerales de arcilla, mientras que, en cantidades superiores, incrementa la resistencia a la compresión, como es el caso de Haralambos (2009), que experimentó un incremento de la resistencia a medida que se incrementó la adición de cemento.

De manera adicional, Walker, como se menciona en Murmu & Patel (2018), revela que un contenido de cemento mayor al 10% se considera no económico para la producción de Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido.

La Portland Cement Association (1992), enfocándose en el uso de mezclas suelo-cemento para la construcción vial, identifica como principal requerimiento a la resistencia a la exposición hacia ciclos de saturación-secado y congelamiento-descongelamiento, dejando como requerimiento secundario a la resistencia mecánica, argumentando que la mayoría de mezclas suelo-cemento poseen una resistencia adecuada para su uso dentro de estos fines. En este contexto, se presenta la posibilidad de estimar, de forma preliminar, un rango adecuado de contenido de cemento a partir de la Clasificación AASHTO, tomando en cuenta que dicho contenido considera la exposición de la mezcla, que, en cierta medida, resulta una previsión aproximada que apunta hacia la obtención de una durabilidad adecuada de la mezcla para la elaboración de mampuestos.

El suelo empleado en la investigación, de acuerdo con el análisis granulométrico y de límites de consistencia presentados previamente, corresponde a la categoría AASHTO A-6:

| Grupo de clasificación                                    | A-4            | A-5     | A-6               | A-7<br>A-7.5*<br>A-7.6† |
|---|----------------|---------|-------------------|-------------------------|
| Análisis de tamiz (porcentaje de paso)                    |                |         |                   |                         |
| Núm. 10   |                |         |                   |                         |
| Núm. 40   |                |         |                   |                         |
| Núm. 200  | 36 mín.        | 36 mín. | 36 mín.           | 36 mín.                 |
| Características de la fracción de paso núm. 40            |                |         |                   |                         |
| Límite líquido  | 40 máx.        | 41 mín. | 40 máx.           | 41 mín.                 |
| Índice de plasticidad                                     | 10 máx.        | 10 máx. | 11 mín.           | 11 mín.                 |
| Tipos comunes de materiales significativos constituyentes | Suelos limosos |         | Suelos arcillosos |                         |
| Clasificación general de la subrasante                    | Regular a malo |         |                   |                         |

**Figura 36.** Clasificación de la fracción de suelos limosos y arcillosos en el sistema AASHTO (Das, 2015).

| Grupo de suelo AASHTO | Rango usual de requerimiento de cemento |                    | Contenido estimado de cemento para la utilización en ensayos de humedad - densidad, porcentaje en peso | Contenido de cemento para ensayos saturación-secado y congelamiento-descongelamiento porcentaje en peso |
|-----------------------|---|--------------------|--|---|
|                       | Porcentaje en volumen                   | Porcentaje en peso |  |   |
| A-1-a                 | 5- 7                                    | 3- 5               | 5  | 3- 4- 5- 7  |
| A-1-b                 | 7- 9                                    | 5- 8               | 6  | 4- 6- 8   |
| A-2                   | 7- 10                                   | 5- 9               | 7  | 5- 7- 9   |
| A-3                   | 8- 12                                   | 7- 11              | 9  | 7- 9- 11  |
| A-4                   | 8- 12                                   | 7- 12              | 10   | 8-10-12   |
| A-5                   | 8- 12                                   | 8- 13              | 10   | 8-10-12   |
| A-6                   | 10-14                                   | 9- 15              | 12   | 10-12-14  |
| A-7                   | 10-14                                   | 10-16              | 13   | 11-13-15  |

*Figura 37.* Requerimiento de cemento para grupos de suelo AASHTO (Portland Cement Association, 1992). Adaptación propia.

De esta manera, es posible definir un rango de requerimiento de cemento entre el 9-15%, procediendo a elegir el límite superior del 15%, de manera conservadora, puesto que de acuerdo con la relación adición-resistencia, resultaría en la mayor resistencia mecánica posible dentro del rango. Adicionalmente, es necesario considerar que dicho porcentaje posteriormente será disminuido al efectuar reemplazos parciales de cemento por cenizas de bagazo de caña de azúcar.

### 3.2.3. Determinación de los reemplazos parciales de cemento por cenizas

Considerando que el cemento es un material de construcción costoso que posee altas cantidades de energía embebida e involucra grandes emisiones nocivas para el medio ambiente, con alrededor del 8% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial (Rodgers, 2018), existe la necesidad de reemplazarlo parcialmente por materiales alternativos que aseguren un desempeño de características iguales o superiores.

Uno de los materiales que posibilita el reemplazo parcial del cemento es la ceniza de bagazo de caña de azúcar, debido a que posee una composición química que lo hace apropiado para el uso como material puzolánico, dado que posee un alto contenido de sílice (Akram et al., & Ganesan et al., citados por

Jamsawang et al., 2017). Este proceso ha permitido la obtención de hormigones de desempeño mejorado, de acuerdo a investigaciones llevadas por Ganesan et al., Singh et al., Coirdeiro et al., & Morales et al., como se mencionan en Jamsawang et al. (2017). Por otra parte, Alavéz-Ramírez, Montes-García, Martínez-Reyes, Altamirano-Juárez, & Gochi-Ponce (2012), tras conseguir de manera exitosa el mejoramiento de la durabilidad y las propiedades mecánicas de Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido utilizando como aditivos solamente cenizas de bagazo mezcladas con cal, reconocen el potencial que poseen ambos materiales para reemplazar parcialmente el uso de cemento, que se emplea comúnmente como único aditivo en la fabricación de este tipo de mampuestos.

Jamsawang et al. (2017), tras identificar una escasa existencia de estudios de estabilización de arcillas blandas que reemplacen el cemento por cenizas de bagazo, propone comparar el desempeño de diferentes mezclas suelo-cemento-ceniza frente a la mezcla suelo-cemento, en términos de la resistencia a la compresión no confinada a diferentes edades de curado, de forma que se logre determinar un porcentaje óptimo de reemplazo. La presente investigación contempla la terminología y dosificaciones propuestas por los autores.

El aditivo, denominado *Cement-Bagasse Ash* (CBA), está estructurado con diferentes proporciones que buscan reemplazar el cemento por cenizas de bagazo, de manera que se identifican las dosificaciones de la siguiente manera:

| Denominación de la dosificación | Composición del aditivo |                   |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------|
|                                 | Cemento                 | Cenizas de bagazo |
| CBA0                            | 100%                    | 0%                |
| CBA10                           | 90%                     | 10%               |
| CBA20                           | 80%                     | 20%               |
| CBA30                           | 70%                     | 30%               |
| CBA40                           | 60%                     | 40%               |

*Tabla 24.* Composición de aditivo para diferentes dosificaciones.

Los cuales se expresan en porcentaje de peso de suelo seco según:

| Denominación de la dosificación | Porcentaje (%) en peso de suelo seco |                   |
|---------------------------------|--------------------------------------|-------------------|
|                                 | Cemento                              | Cenizas de bagazo |
| CBA0                            | 15.0%                                | 0.0%              |
| CBA10                           | 13.5%                                | 1.5%              |
| CBA20                           | 12.0%                                | 3.0%              |
| CBA30                           | 10.5%                                | 4.5%              |
| CBA40                           | 9.0%                                 | 6.0%              |

*Tabla 25.* Porcentaje en peso de suelo seco de aditivos para diferentes dosificaciones.

Los porcentajes, al poseer variaciones del 10% entre sí, permiten una clara diferenciación de resultados entre diferentes dosificaciones a la misma edad de curado y la determinación de tendencias marcadas entre las diferentes edades de curado.

#### **3.2.4. Densidad máxima y humedad óptima de moldeo**

El ensayo de compactación es efectuado con el objetivo de determinar el contenido de humedad de moldeo que conduce a la densidad máxima de cada una de las dosificaciones planteadas, dado que de esta manera, es posible obtener una mayor resistencia mecánica y durabilidad (Guettala et al., & Venkatarama Reddy et al., como se citaron en Murmu & Patel, 2018), teniendo como perspectiva, la posibilidad de alcanzar la densidad máxima en un proceso de fabricación en serie, que permita la obtención de mampuestos con características similares.

El tipo de ensayo de compactación seleccionado posee un esfuerzo de compactación modificado, correspondiente a la norma ASTM D1557-12: *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>))*, y su elección se sustenta en el hecho de que, al aplicar una mayor energía de compactación respecto al método de compactación de esfuerzo estándar ASTM D698-12: *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>))*, las partículas de suelo

se acomodan de forma más estrecha, obteniéndose diversos resultados (American Society for Testing and Materials, 2012):

- Mayor peso unitario seco.
- Menor contenido de humedad óptimo.
- Mayor resistencia al corte.
- Mayor rigidez.
- Menor compresibilidad.
- Menores vacíos de aire.
- Menor permeabilidad.

Bajo estos argumentos, resultaría ideal el moldeo de especímenes que presenten la máxima densidad seca. No obstante, el procedimiento de compactación, al estar sujeto a manipulación humana del equipo y condiciones ambientales que afectan la humedad de la mezcla al momento de la elaboración, imposibilita la consecución de resultados exactos. Sin embargo, el resultado obtenido mediante compactación manual entrega una aproximación que, aunque posee variaciones entre moldeos, conduce a densidades con gran aproximación hacia la densidad máxima. De esta manera, la totalidad de las probetas elaboradas durante la investigación serán moldeadas con densidades secas altamente cercanas a la densidad máxima, tanto en la fase de investigación de dosificaciones, como en la fabricación del mampuesto en base a la dosificación seleccionada.

### **3.2.5. Curado**

Los Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido que poseen cemento necesitan humedad para el desarrollo de los productos de la hidratación del cemento, que son responsables de la generación de enlaces insolubles al agua y por ende, de la obtención de un producto de mayor resistencia, razón por la cual, necesitan curado (Venkatarama Reddy, 2012). Existen dos métodos de curado que han sido empleados en el desarrollo de este tipo de mampuestos:

- **Apilado con rociado:** los mampuestos son apilados uno encima de otro, y se rocía agua sobre ellos de 3 a 4 veces al día, o bien, se colocan textiles húmedos sobre ellos, durante 4 semanas (Venkatarama Reddy, 2012). Dicho proceso posee una vasta aplicación en países como la India (Bowen, 2017).



*Figura 38.* Apilado de Bloques de Suelo para el curado (Venkatarama Reddy, 2012).

- **Vapor:** permite la reducción del tiempo de curado de períodos de meses a menos de un día, con la obtención de resistencias mayores. No obstante, resulta en un método costoso y que demanda de energía adicional (Venkatarama Reddy, 2012).



*Figura 39.* Curado de prefabricados en cuarto de vapor (GharPedia, 2019).

El curado mediante vapor, dadas las limitaciones señaladas, y considerando además que resultaría difícil de aplicar a gran escala, se descarta para la

presente investigación. Por otra parte, el apilado con rociado requiere de cuidados continuos durante períodos de tiempo prolongados, que incluso contemplarían días no laborables, lo cual, para sistematizarse, demandaría algún tipo de automatización.

#### **a) Curado de dosificaciones**

Dado que el curado tradicional mediante rociado involucra condiciones ambientales de gran variabilidad y procesos rudimentarios de humedecimiento, se plantea la posibilidad de llevar a cabo el curado de las probetas de dosificaciones en un ambiente cerrado y con condiciones relativamente controladas de temperatura y humedad ambiental.

Por otra parte, debido a la amplia diversidad de posibilidades de métodos de humedecimiento que se podrían adoptar, dado que no se han encontrado metodologías establecidas para dicho procedimiento, con el objetivo de llevar a cabo una generalización con los resultados, se plantea la posibilidad de efectuar el curado exponiendo las probetas de dosificaciones directamente al ambiente señalado, de manera que este se lleve a cabo únicamente con la humedad de moldeo, que se reduce en el tiempo, y la humedad ambiental, escenario que se considera crítico, y por ende, reflejaría la evolución de la resistencia en un caso extremo de condiciones marginales de curado. El lugar seleccionado para el curado es el cuarto de ensayos de consolidación e hidrometría, ubicado al interior del Laboratorio de Suelos del LMC-PUCE, que presenta temperaturas ambientales entre 15 a 30 °C y una humedad relativa del 25% al 60%.



*Figura 40.* Curado de probetas de dosificaciones en el LMC-PUCE.

### **3.2.6. Compresión simple**

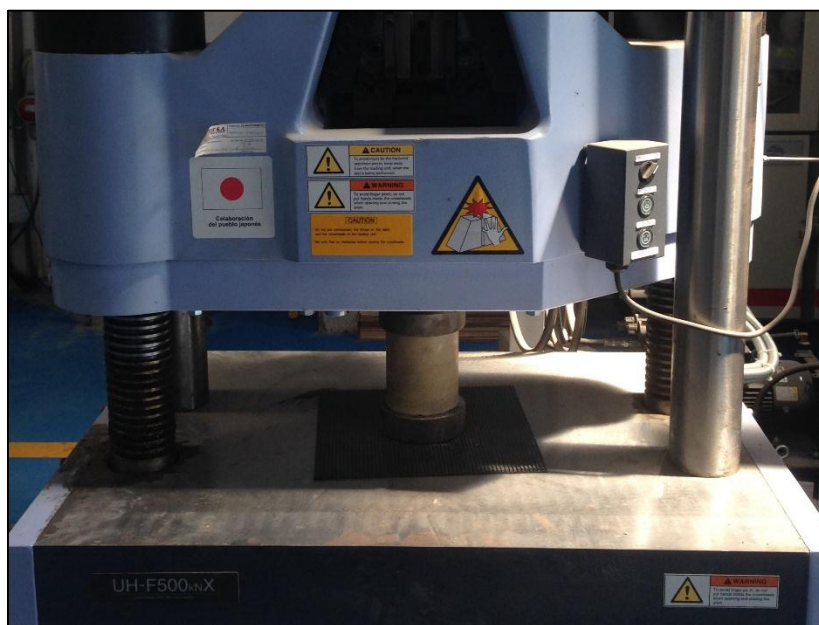
Tras conocer la humedad óptima de cada una de las dosificaciones, se fabrican probetas de suelo estabilizado, de manera que se elaboren dos probetas para cada edad de ensayo. La metodología a ejecutar se apoya en la norma ASTM D1633-17: *Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders*.

La fabricación, de acuerdo a la fracción de suelo a emplear, se llevará a cabo por el método A, utilizando equipos del ensayo de compactación modificada. Las probetas a moldear serán ejecutadas mediante un molde de apertura lateral, con dimensiones internas de aproximadamente:

- Diámetro: ~ 4" (101.6 mm)
- Altura: ~ 4.58" (116.33 mm)

Bajo la misma energía de compactación del ensayo de compactación modificada, que es de 56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>), con las mismas características de peso de martillo y caída, en 5 capas con 25 golpes cada una. Posteriormente, se procederá a la extracción de las probetas a través de una gata mecánica. Tras la obtención de cada una de las probetas, se procederá al curado, y una vez finalizado, se ensayarán cada una de ellas en una máquina

universal de compresión, a una velocidad de 1.3 mm/min (American Society for Testing and Materials, 2017a). El equipo a utilizar posee una capacidad de 500 kN.



*Figura 41.* Compresión simple de probeta cilíndrica correspondiente a dosificación en el LMC-PUCE.

### 3.3. Densidad máxima y humedad óptima de moldeo de dosificaciones

Se ha procedido a determinar la humedad óptima, que conduce a la densidad máxima de cada una de las dosificaciones, con la finalidad de conocer la humedad de moldeo requerida para las probetas correspondientes a los ensayos de compresión simple.

#### 3.3.1. Mezcla suelo-cemento (CBA0)

| Prueba, N°:                        | 1     | 2     | 3     | 4     | Resultados                                |       |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|---|-------|
| Humedad de moldeo, %:              | 8.20  | 11.20 | 13.81 | 16.47 | Humedad óptima, %:                        | 13.19 |
| Densidad seca, g/cm <sup>3</sup> : | 1.777 | 1.819 | 1.830 | 1.806 | Densidad seca máxima, g/cm <sup>3</sup> : | 1.829 |

Tabla 26. Curva de compactación de la mezcla CBA0.

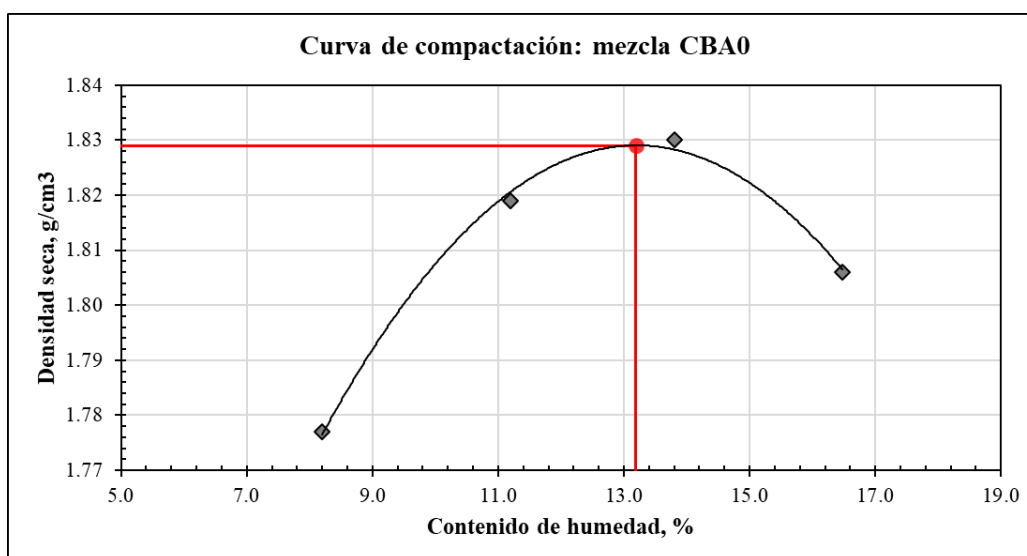


Figura 42. Curva de compactación de suelo natural.

### 3.3.2. Mezcla con reemplazo del 10% de cemento por cenizas (CBA10)

| Prueba, N°:                        | 1     | 2     | 3     | 4     | Resultados                                |       |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|---|-------|
| Humedad de moldeo, %:              | 12.52 | 15.43 | 18.50 | 21.44 | Humedad óptima, %:                        | 15.51 |
| Densidad seca, g/cm <sup>3</sup> : | 1.807 | 1.834 | 1.808 | 1.717 | Densidad seca máxima, g/cm <sup>3</sup> : | 1.836 |

Tabla 27. Curva de compactación de la mezcla CBA10.

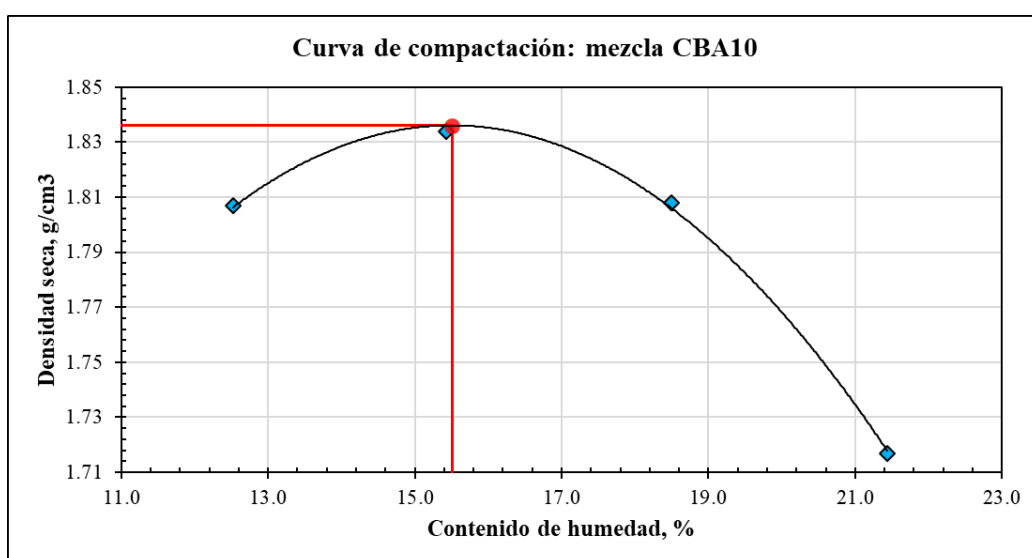


Figura 43. Curva de compactación de la mezcla CBA10.

### 3.3.3. Mezcla con reemplazo del 20% de cemento por cenizas (CBA20)

| Prueba, N°:                        | 1     | 2     | 3     | 4     | Resultados                                |       |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|---|-------|
| Humedad de moldeo, %:              | 12.82 | 15.51 | 18.50 | 21.95 | Humedad óptima, %:                        | 15.95 |
| Densidad seca, g/cm <sup>3</sup> : | 1.739 | 1.768 | 1.748 | 1.661 | Densidad seca máxima, g/cm <sup>3</sup> : | 1.768 |

Tabla 28. Curva de compactación de la mezcla CBA20.

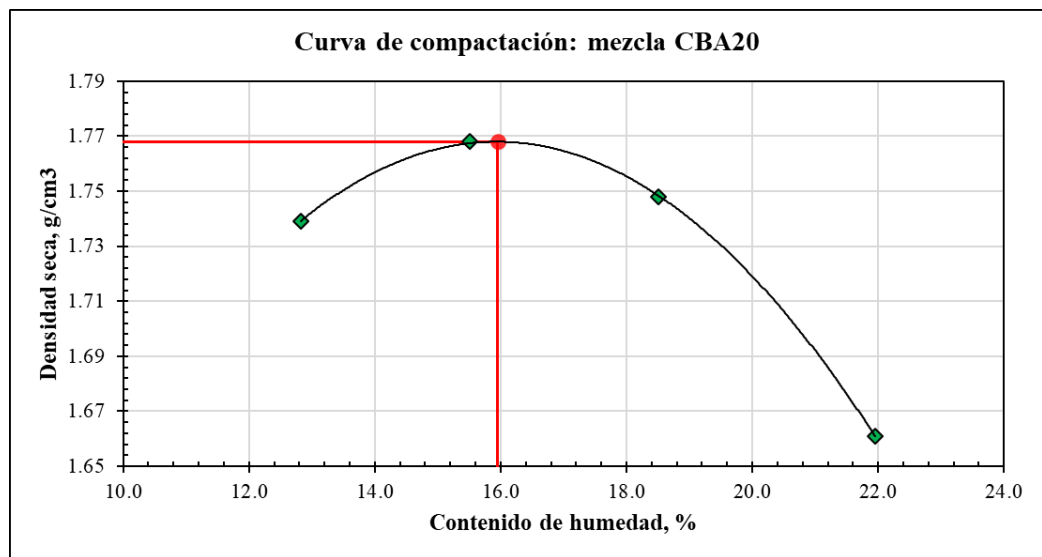


Figura 44. Curva de compactación de la mezcla CBA20.

### 3.3.4. Mezcla con reemplazo del 30% de cemento por cenizas (CBA30)

| Prueba, N°:                        | 1     | 2     | 3     | 4     | Resultados                                |       |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|---|-------|
| Humedad de moldeo, %:              | 10.45 | 13.25 | 16.54 | 19.40 | Humedad óptima, %:                        | 14.67 |
| Densidad seca, g/cm <sup>3</sup> : | 1.722 | 1.750 | 1.748 | 1.713 | Densidad seca máxima, g/cm <sup>3</sup> : | 1.754 |

Tabla 29. Curva de compactación de la mezcla CBA30.

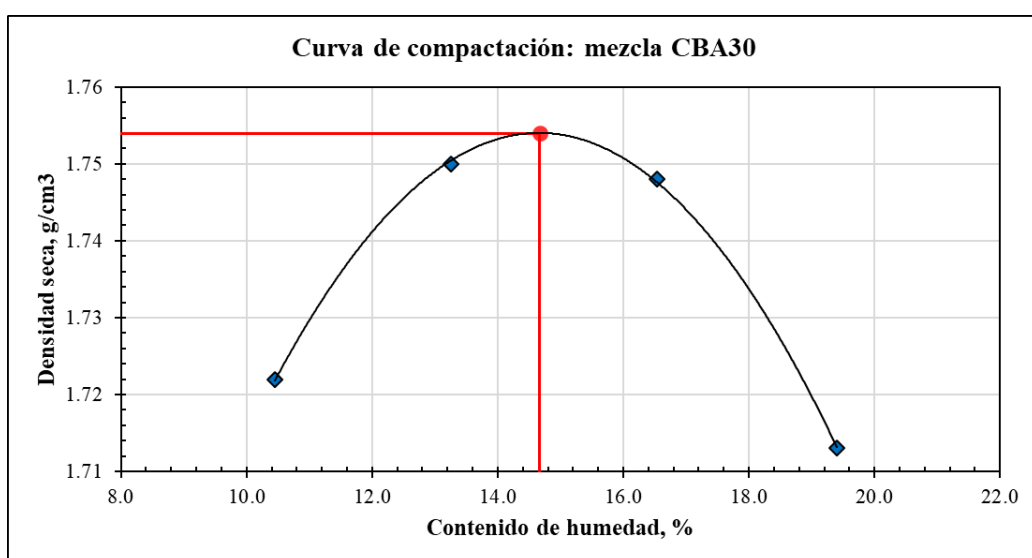


Figura 45. Curva de compactación de la mezcla CBA30.

### 3.3.5. Mezcla con reemplazo del 40% de cemento por cenizas (CBA40)

| Prueba, N°:                        | 1     | 2     | 3     | 4     | Resultados                                |       |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|---|-------|
| Humedad de moldeo, %:              | 11.44 | 14.85 | 17.63 | 21.47 | Humedad óptima, %:                        | 15.52 |
| Densidad seca, g/cm <sup>3</sup> : | 1.694 | 1.716 | 1.714 | 1.665 | Densidad seca máxima, g/cm <sup>3</sup> : | 1.719 |

Tabla 30. Curva de compactación de la mezcla CBA40.

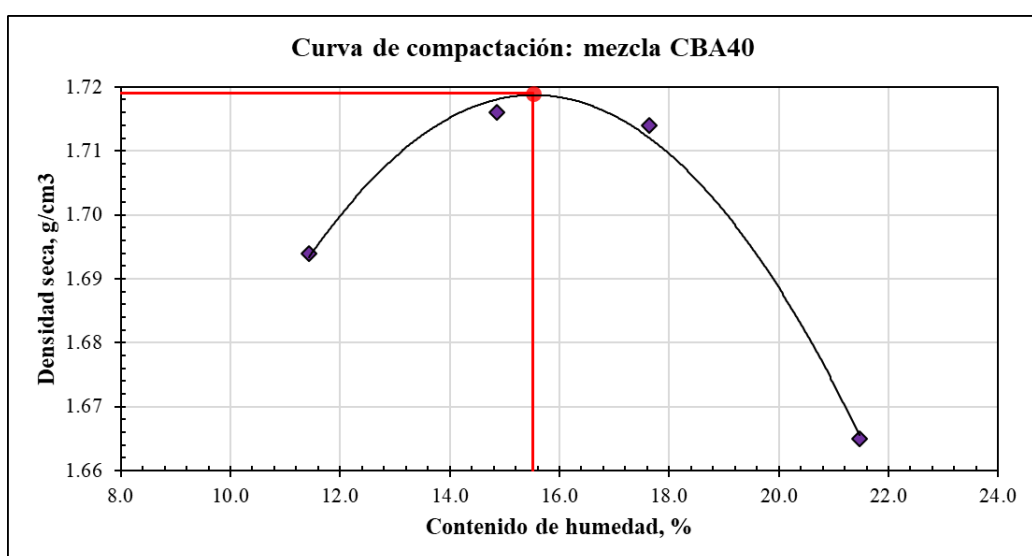


Figura 46. Curva de compactación de la mezcla CBA40.

### 3.4. Compresión simple de probetas

De acuerdo a la metodología establecida, se ha procedido a la ejecución de ensayos de compresión, a una velocidad de 1.3 mm/min.

#### 3.4.1. Mezcla suelo-cemento (CBA0)

| Edad:                              | 3 días      |       | 7 días      |       | 14 días     |       | 28 días     |       |
|------------------------------------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
| Probeta, N°:                       | I           | II    | I           | II    | I           | II    | I           | II    |
| Densidad seca, g/cm <sup>3</sup> : | 1.805       | 1.776 | 1.814       | 1.818 | 1.795       | 1.798 | 1.817       | 1.782 |
| Grado de compactación, %:          | 98.69       | 97.10 | 99.18       | 99.40 | 98.14       | 98.31 | 99.34       | 97.43 |
| Esfuerzo último individual, MPa:   | 4.30        | 4.32  | 6.85        | 6.96  | 7.35        | 7.59  | 9.51        | 9.27  |
| Esfuerzo último promedio, MPa:     | <b>4.31</b> |       | <b>6.90</b> |       | <b>7.47</b> |       | <b>9.39</b> |       |

Tabla 31. Características y resultados de probetas de la mezcla CBA0.

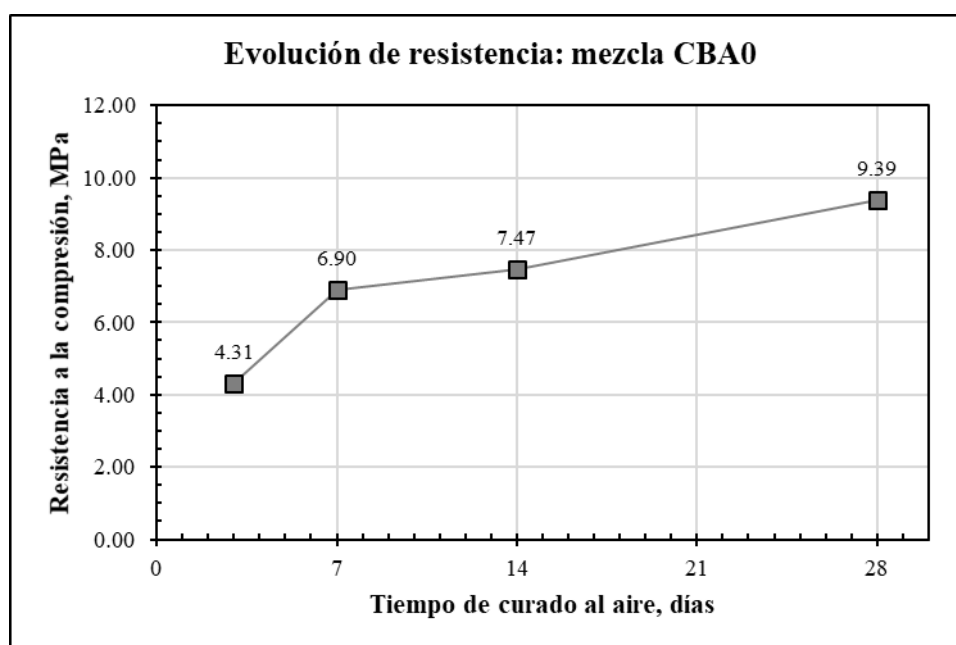


Figura 47. Resistencia a la compresión en el tiempo de la mezcla CBA0.

### 3.4.2. Mezcla con reemplazo del 10% de cemento por cenizas (CBA10)

| Edad:                              | 3 días      |       | 7 días      |       | 14 días     |       | 28 días     |       |
|------------------------------------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
| Probeta, N°:                       | I           | II    | I           | II    | I           | II    | I           | II    |
| Densidad seca, g/cm <sup>3</sup> : | 1.767       | 1.788 | 1.790       | 1.781 | 1.787       | 1.795 | 1.796       | 1.788 |
| Grado de compactación, %:          | 96.24       | 97.39 | 97.49       | 97.00 | 97.33       | 97.77 | 97.82       | 97.39 |
| Esfuerzo último individual, MPa:   | 4.15        | 4.08  | 6.31        | 6.49  | 7.13        | 7.25  | 9.55        | 9.38  |
| Esfuerzo último promedio, MPa:     | <b>4.11</b> |       | <b>6.40</b> |       | <b>7.19</b> |       | <b>9.46</b> |       |

Tabla 32. Características y resultados de probetas de la mezcla CBA10.

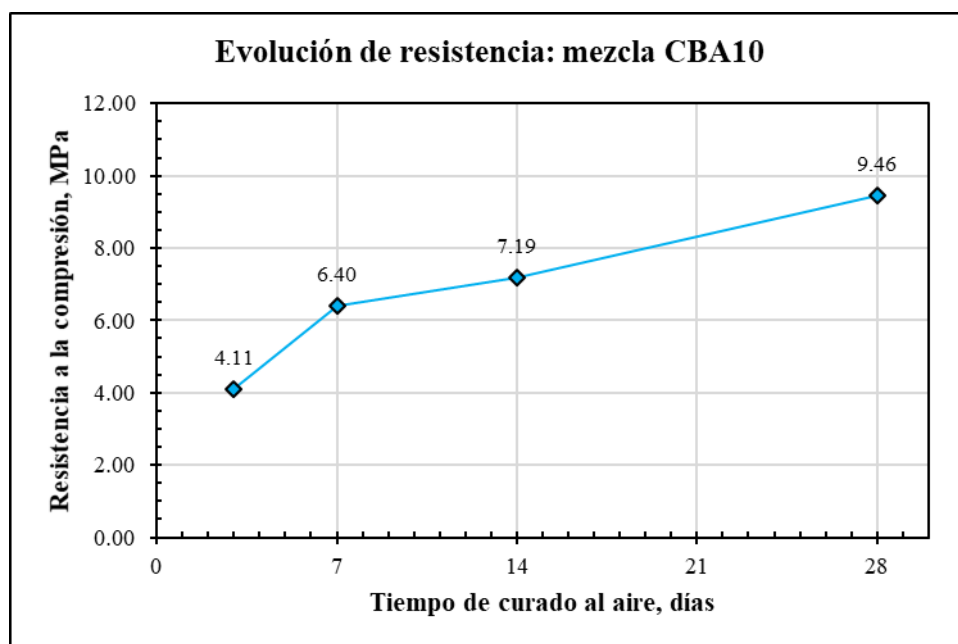


Figura 48. Resistencia a la compresión en el tiempo de la mezcla CBA10.

### 3.4.3. Mezcla con reemplazo del 20% de cemento por cenizas (CBA20)

| Edad:                              | 3 días      |        | 7 días      |       | 14 días     |        | 28 días     |       |
|------------------------------------|-------------|--------|-------------|-------|-------------|--------|-------------|-------|
| Probeta, N°:                       | I           | II     | I           | II    | I           | II     | I           | II    |
| Densidad seca, g/cm <sup>3</sup> : | 1.771       | 1.774  | 1.764       | 1.751 | 1.768       | 1.785  | 1.758       | 1.757 |
| Grado de compactación, %:          | 100.17      | 100.34 | 99.77       | 99.04 | 100.00      | 100.96 | 99.43       | 99.38 |
| Esfuerzo último individual, MPa:   | 4.25        | 3.95   | 6.15        | 6.01  | 7.45        | 7.57   | 9.64        | 9.32  |
| Esfuerzo último promedio, MPa:     | <b>4.10</b> |        | <b>6.08</b> |       | <b>7.51</b> |        | <b>9.48</b> |       |

Tabla 33. Características y resultados de probetas de la mezcla CBA20.

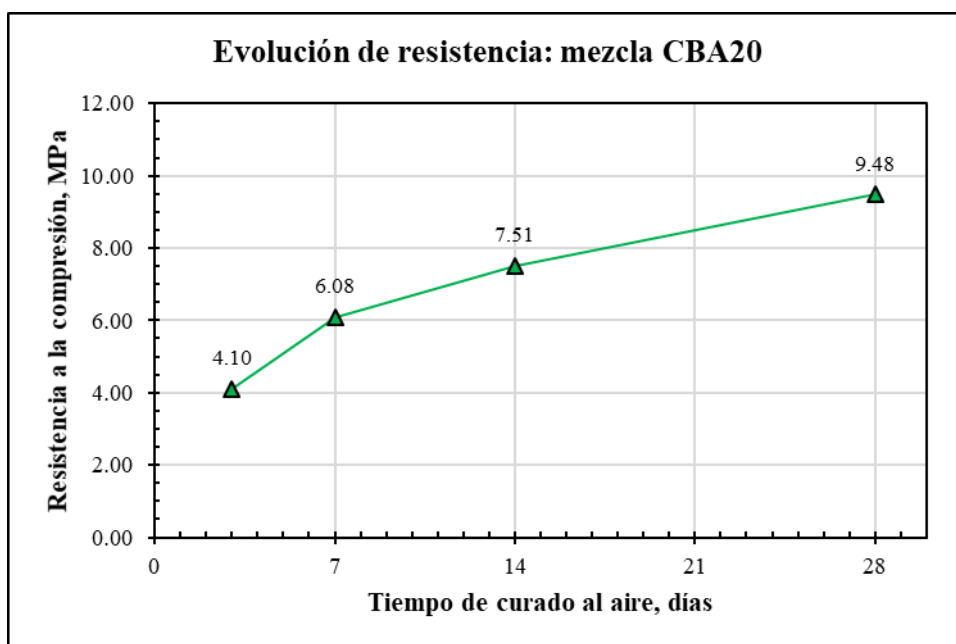


Figura 49. Resistencia a la compresión en el tiempo de la mezcla CBA20.

### 3.4.4. Mezcla con reemplazo del 30% de cemento por cenizas (CBA30)

| Edad:                              | 3 días      |       | 7 días      |       | 14 días     |       | 28 días     |       |
|------------------------------------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
| Probeta, N°:                       | I           | II    | I           | II    | I           | II    | I           | II    |
| Densidad seca, g/cm <sup>3</sup> : | 1.727       | 1.710 | 1.719       | 1.719 | 1.730       | 1.717 | 1.739       | 1.715 |
| Grado de compactación, %:          | 98.46       | 97.49 | 98.00       | 98.00 | 98.63       | 97.89 | 99.14       | 97.78 |
| Esfuerzo último individual, MPa:   | 3.55        | 3.49  | 4.66        | 4.42  | 5.77        | 5.83  | 7.53        | 7.20  |
| Esfuerzo último promedio, MPa:     | <b>3.52</b> |       | <b>4.54</b> |       | <b>5.80</b> |       | <b>7.36</b> |       |

Tabla 34. Características y resultados de probetas de la mezcla CBA30.

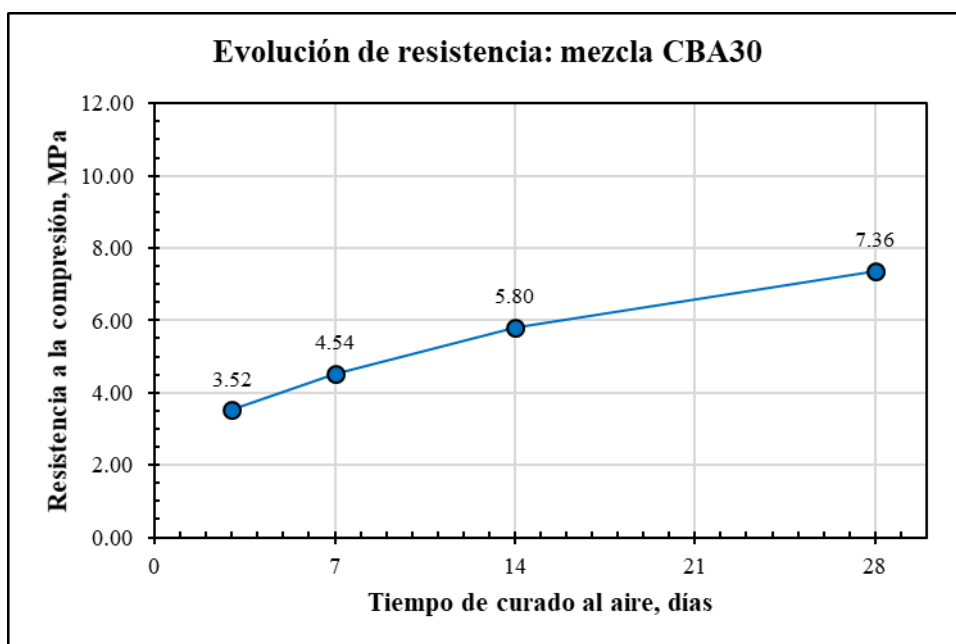


Figura 50. Resistencia a la compresión en el tiempo de la mezcla CBA30.

### 3.4.5. Mezcla con reemplazo del 40% de cemento por cenizas (CBA40)

| Edad:                              | 3 días      |       | 7 días      |        | 14 días     |       | 28 días     |        |
|------------------------------------|-------------|-------|-------------|--------|-------------|-------|-------------|--------|
| Probeta, N°:                       | I           | II    | I           | II     | I           | II    | I           | II     |
| Densidad seca, g/cm <sup>3</sup> : | 1.697       | 1.710 | 1.726       | 1.799  | 1.715       | 1.710 | 1.710       | 1.735  |
| Grado de compactación, %:          | 98.72       | 99.48 | 100.41      | 100.81 | 99.77       | 99.48 | 99.48       | 100.93 |
| Esfuerzo último individual, MPa:   | 3.44        | 3.46  | 4.35        | 4.46   | 6.12        | 6.00  | 7.15        | 6.81   |
| Esfuerzo último promedio, MPa:     | <b>3.45</b> |       | <b>4.40</b> |        | <b>6.06</b> |       | <b>6.98</b> |        |

Tabla 35. Características y resultados de probetas de la mezcla CBA30.

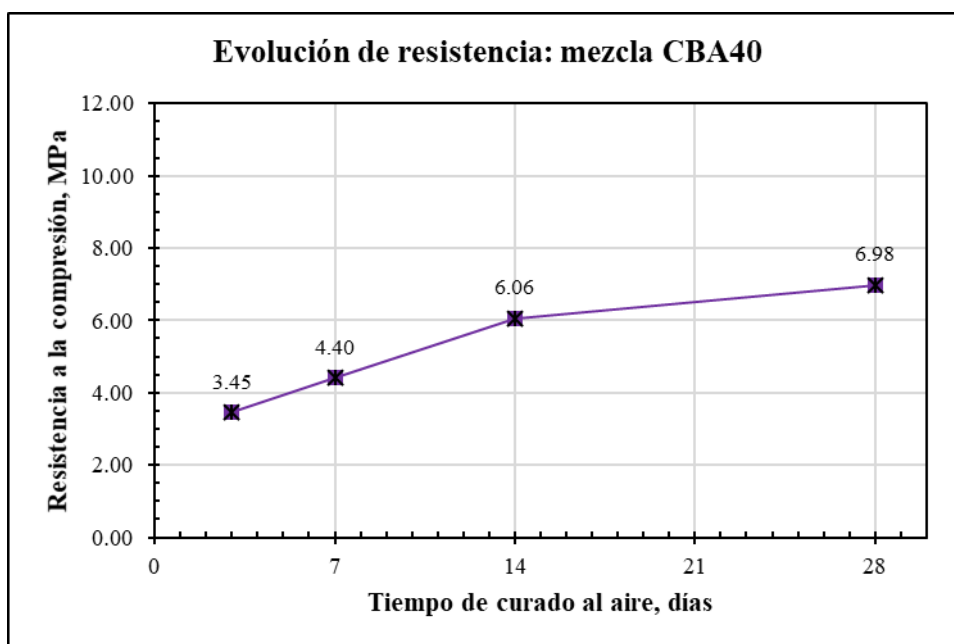


Figura 51. Resistencia a la compresión en el tiempo de la mezcla CBA40.

### 3.4.6. Comparación de desempeño de dosificaciones

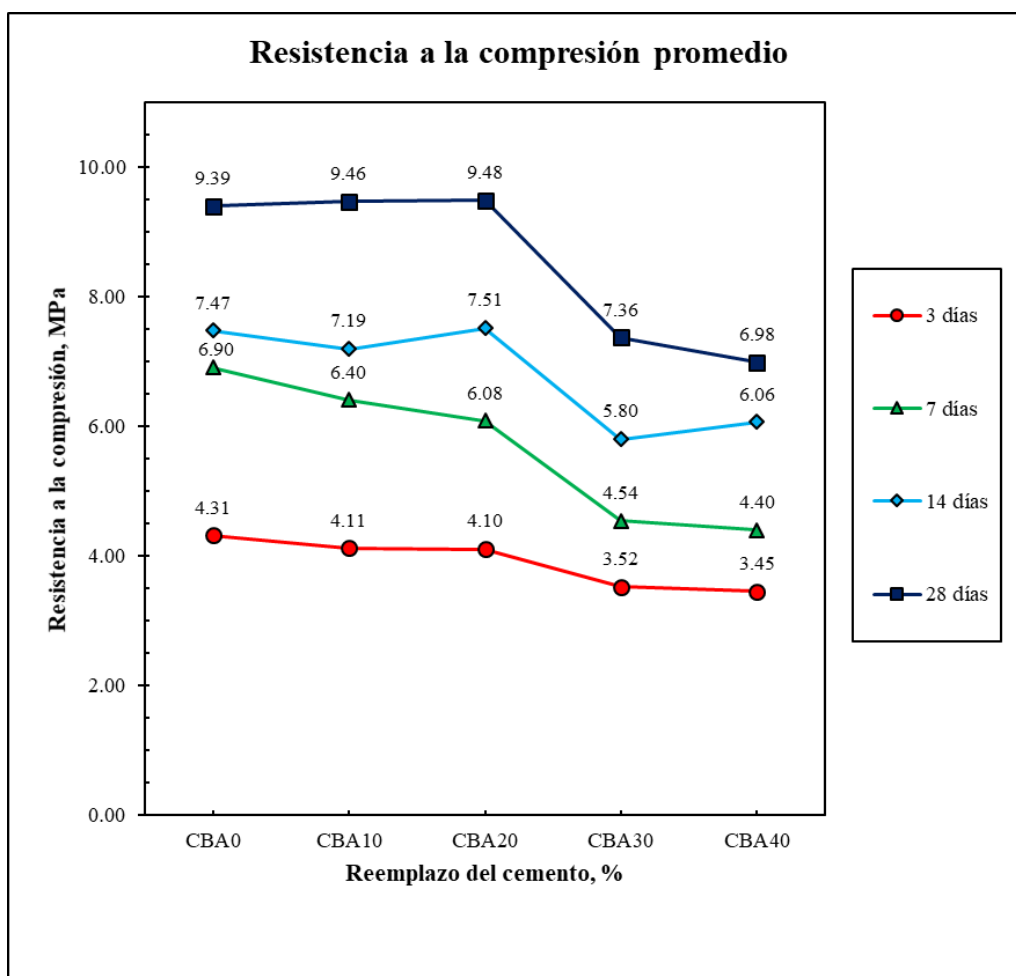


Figura 52. Comparación de resistencia a la compresión de dosificaciones de acuerdo con la edad.

De acuerdo con Jamsawang et al., (2017), el reemplazo del 20% de cemento por cenizas de bagazo (bajo condiciones apropiadas de curado) provoca el mayor aumento de resistencia debido a que genera las proporciones apropiadas de  $SiO_2$  (a partir de las cenizas) y  $Ca(OH)_2$  (a partir de la hidratación del cemento) para la reacción puzolánica que genera mayoritariamente la formación de gel C-S-H (Silicato Cálcico Hidratado), provocando la menor relación de vacíos y la máxima resistencia debido a que los productos de hidratación, como el gel C-S-H y la etringita, llenan los espacios porosos de la mezcla de suelo-cemento-ceniza, formando enlaces en los espacios intersticiales.

No obstante, en este caso, es posible apreciar que, tras haber efectuado el proceso de curado en condiciones marginales, la dosificación que arroja la mayor resistencia a la compresión a la mayor edad corresponde al mismo reemplazo del 20% del cemento por cenizas de bagazo analizado por Jamsawang et al. (2017), razón por la cual, se selecciona esta dosificación para la elaboración de los mampuestos ecológicos y se plantea el cambio de las características de curado, con el objetivo de potenciar el proceso de reacción físico-química de la hidratación del cemento y su interacción con los componentes puzolánicos de la ceniza de bagazo.

## 4. Mampuesto ecológico

En el presente capítulo se describen los diferentes parámetros de fabricación y evaluación de los mampuestos desarrollados, permitiendo definir las características y propiedades, con la finalidad de establecer la viabilidad de utilización, conforme a la normativa vigente.

### 4.1. Características

---

#### 4.1.1. Dosificación

Haciendo referencia a los resultados del estudio de la resistencia a compresión sobre diferentes dosificaciones, obtenidos en el capítulo 3, se tiene por consiguiente que el mejor comportamiento para el diseño final de la mezcla al peso está dado por la dosificación que logra reemplazar un 20% del cemento (CBA20), conformada por los siguientes materiales:

| Suelo          | Cantidad de mezcla |
|----------------|--------------------|
| Limo con arena | 6000 g             |

*Tabla 36.* Cantidad de suelo para mezcla y moldeo de mampuestos.

| Aditivos                            | Cantidad (peso de suelo seco) |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| Cemento tipo GU                     | 12 %                          |
| Cenizas de bagazo de caña de azúcar | 3 %                           |

*Tabla 37.* Cantidades de aditivos para mezcla y moldeo de mampuestos.

#### 4.1.2. Dimensiones

La normativa vigente correspondiente a ladrillos cerámicos NTE INEN 3049-1, “Términos y definiciones, clasificación y requisitos de las dimensiones modulares”, establece: “Los fabricantes de unidades de mampostería de ladrillos cerámicos eligen libremente las medidas de fabricación de sus productos como modulares o no modulares. En el caso de ofrecer medidas modulares deben especificar si están coordinadas horizontal, vertical o

espacialmente...” (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2018), lo cual, tras la inexistencia de normativa nacional para mampuestos de suelo comprimido, se puede generalizar hacia el producto a desarrollar. Adicionalmente, según Houben et al. & Standards Australia, como se citaron en Morel, Pkla, & Walker (2007), las dimensiones de bloques de suelo comprimido, en general, varían ampliamente. De esta manera, la selección de dimensiones resulta de libre elección.

No obstante, debido a la imposibilidad de acceso hacia maquinaria propiamente establecida para la fabricación de este tipo de mampuestos, las dimensiones del mampuesto a desarrollar se encuentran limitadas a las condiciones de compactación disponibles en el LMC-PUCE, considerando que este debe ser compactado en capas paralelas a la dirección horizontal de colocación del mampuesto en obra, tal como se fabricaría en serie con equipos especializados.

Con la finalidad de garantizar la mejor aproximación hacia la densidad máxima obtenida a través del ensayo de compactación modificada, dada su interrelación con la mayor resistencia mecánica y mayor durabilidad (Guettala et al., & Venkatarama Reddy et al., como se citaron en Murmu & Patel, 2018), se prevé el moldeo de especímenes bajo dicho ensayo, para lo cual, el molde de mayor volumen presenta las dimensiones:

- Diámetro: ~ 6.00” (152.4 mm)
- Altura: ~ 4.58” (116.3 mm)

Permitiendo la obtención de una probeta cilíndrica sobre la cual se puede proyectar la sección horizontal de un mampuesto, que debe ser obtenido mediante corte y tallado.

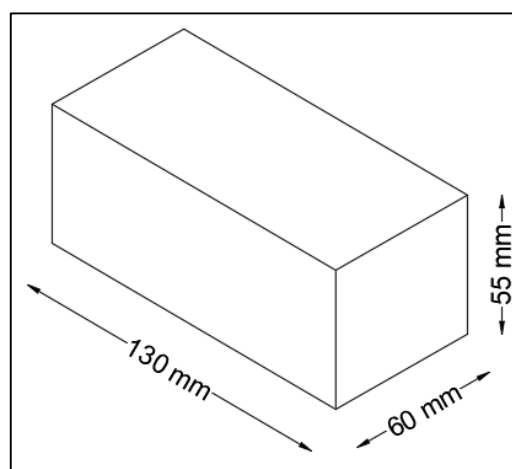
El fabricante de maquinaria para la fabricación de mampuestos de suelo comprimido Aureka (2014), propone, dentro de la gama de moldes para la fabricación de mampuestos, un producto con las siguientes dimensiones, que cumplen características modulares:

- Largo: 240 mm
- Ancho: 115 mm
- Altura: 90 mm

Sin embargo, la selección de dimensiones del mampuesto a desarrollar está condicionada por el tamaño del mayor molde del ensayo de compactación modificada, por lo cual, se ha previsto la reducción de dimensiones del producto propuesto por Aureka para obtener un mampuesto con dimensiones de largo y ancho a escala con similar proporcionalidad frente a las dimensiones reales, y modificando la altura para permitir la obtención de 2 mampuestos de cada probeta cilíndrica, sin necesidad de cortes adicionales en horizontal que pudiesen provocar fisuración de las muestras. Así, las dimensiones de largo y ancho proyectadas resultan múltiplos de 1.0 cm, permitiendo una mayor exactitud en el corte de especímenes.

|                  | Mampuesto<br>Aureka | Mampuesto<br>desarrollado | Factor de reducción<br>de dimensión real |
|------------------|---------------------|---------------------------|--|
| <b>Longitud:</b> | 240 mm              | 130 mm                    | 0.54                                     |
| <b>Ancho:</b>    | 115 mm              | 60 mm                     | 0.52                                     |
| <b>Altura:</b>   | 90 mm               | 55 mm                     | 0.61                                     |

*Tabla 38.* Dimensiones del mampuesto real (Aureka) y el mampuesto desarrollado.



*Figura 53.* Dimensiones del mampuesto desarrollado.

### 4.1.3. Densidad seca

Los mampuestos ecológicos requieren ser moldeados con una densidad seca aproximada a la densidad seca máxima de la dosificación seleccionada, CBA20, que, de acuerdo con el ensayo de compactación previamente ejecutado, está asociada a una humedad óptima de moldeo:

|  |       |
|--|-------|
| <b>Humedad óptima, %:</b>                      | 15.95 |
| <b>Densidad seca máxima, g/cm<sup>3</sup>:</b> | 1.768 |

*Tabla 39.* Características de compactación de la dosificación CBA20.

## 4.2. Proceso de fabricación

---

### 4.2.1. Preparación de materiales

Tomando en cuenta la sensibilidad de los materiales frente a condiciones externas que pueden poner en riesgo las propiedades requeridas, es indispensable definir la forma adecuada de preparación de los materiales. Dicho proceso ha sido llevado de acuerdo con los mismos lineamientos presentados en el capítulo 3, resumidos a continuación:

#### a) Suelo

El suelo utilizado en la dosificación de los mampuestos, al ser un material tomado directamente de campo, posee una humedad variable que puede estar por encima o por debajo de la humedad específica para obtener la densidad máxima en la compactación, así que de esta manera se ha considerado necesario colocarlo en bandejas para ser secado al aire, al menos durante 24 horas. Una vez finalizado este proceso, se ha efectuado un tamizado a través del tamiz No. 4 con el fin de remover las partículas superiores a 4.75 mm existentes en el material.

#### **b) Cemento**

Considerando que el cemento no puede estar en contacto con humedad o influencia de agua debido a su reacción instantánea de hidratación, se lo ubicó en un lugar ventilado, bajo techo y dentro de bolsas plásticas.

#### **c) Cenizas de bagazo de caña de azúcar**

Las cenizas provenientes de la incineración del bagazo de la caña de azúcar poseen restos de materia orgánica sin incinerar y presencia de materiales extraños debido al almacenamiento a la intemperie. Por esta razón, se ha tamizado el material en el tamiz N° 40 (0.425 mm), previa la colocación del material en un horno de temperatura controlada, a 60 °C, con la finalidad de eliminar la humedad natural y facilitar el procesamiento.

#### **4.2.2. Moldeo de probetas cilíndricas**

Se ha empleado el mismo método de compactación estipulado en el capítulo 3, de acuerdo a la normativa ASTM D1557-12: *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>))*, con la diferencia de que, por la geometría del mampuesto requerido, como se ha explicado en puntos anteriores, ha sido seleccionado el método C, con un molde de 6” (152.4 mm) de diámetro y 4.58” (116.3 mm) de altura, empleando 56 golpes distribuidos en 5 capas, manteniendo la misma energía de compactación que en el proceso de determinación de la dosificación adecuada.

Se ha procedido con el moldeo de 8 probetas cilíndricas, ya que, por las dimensiones resultantes de cada una, se pudo obtener 2 mampuestos mediante el proceso de corte.

| Identificación:                    | 1     | 2     | 3      | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|------------------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Densidad seca, g/cm <sup>3</sup> : | 1.739 | 1.739 | 1.786  | 1.764 | 1.737 | 1.725 | 1.743 | 1.720 |
| Grado de compactación, %:          | 98.41 | 98.41 | 101.10 | 99.81 | 98.28 | 97.64 | 98.67 | 97.34 |

Tabla 40. Densidad de probetas cilíndricas de 6" obtenidas por compactación.

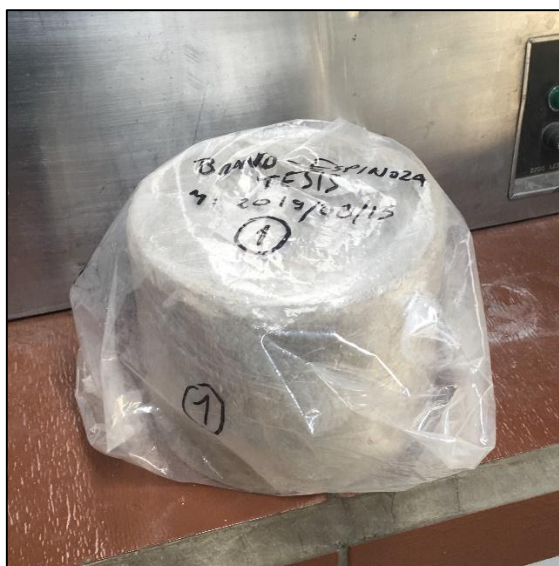


Figura 54. Probeta cilíndrica de 6" con doble protección.

#### 4.2.3. Corte de mampuestos

Tomando en cuenta que las probetas obtenidas del proceso de moldeo tienen forma cilíndrica, se ha requerido cortar las aristas, para así obtener la geometría del mampuesto. El corte fue realizado con una máquina de sierra en el LMC-PUCE, de manera que las capas resultantes del proceso de compactación resulten perpendiculares a la dirección en la cual se va a ensayar la compresión de estos, que, a la vez, se basa en el sentido de colocación del mampuesto en obra.

El proceso de corte ha permitido la obtención de mampuestos para los ensayos previstos:

- 5 mampuestos para el ensayo de compresión.
- 5 mampuestos para el ensayo de flexión (módulo de rotura).
- 5 mampuestos para el ensayo de absorción.



*Figura 55.* Corte vertical de probeta cilíndrica.



*Figura 56.* Corte final para la obtención de mampuestos.



*Figura 57.* Mampuesto obtenido.

#### 4.2.4. Curado

Jamsawang et al. (2017), en el proceso de estabilización de arcillas blandas mediante cemento reemplazado parcialmente por cenizas de bagazo, han llevado a cabo el curado de especímenes para ensayos de compresión simple mediante 2 metodologías:

- Envueltos en plástico inmediatamente tras el desmolde, de manera que se retenga la humedad de moldeo durante el proceso de curado, manteniendo los especímenes protegidos a temperatura ambiente.
- Sumergidos en agua potable.

Obteniendo mayores resistencias en los especímenes envueltos en plásticos:

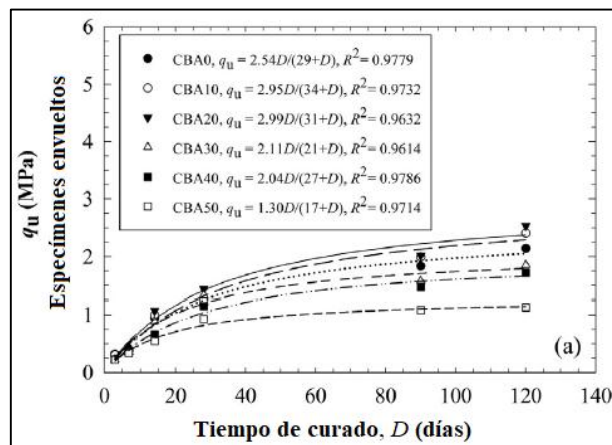


Figura 58. Resistencia ante curado envuelto (Jamsawang et al., 2017). Adaptación propia.

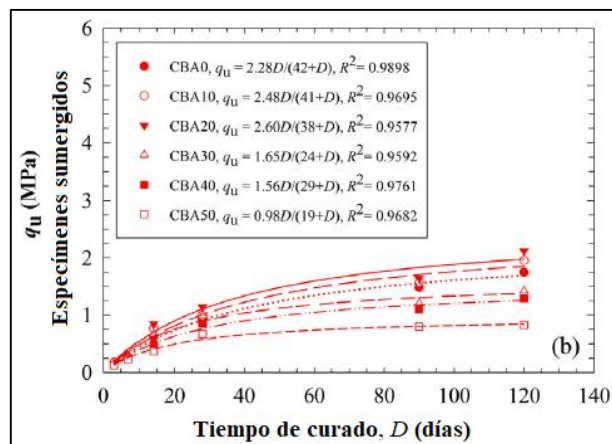
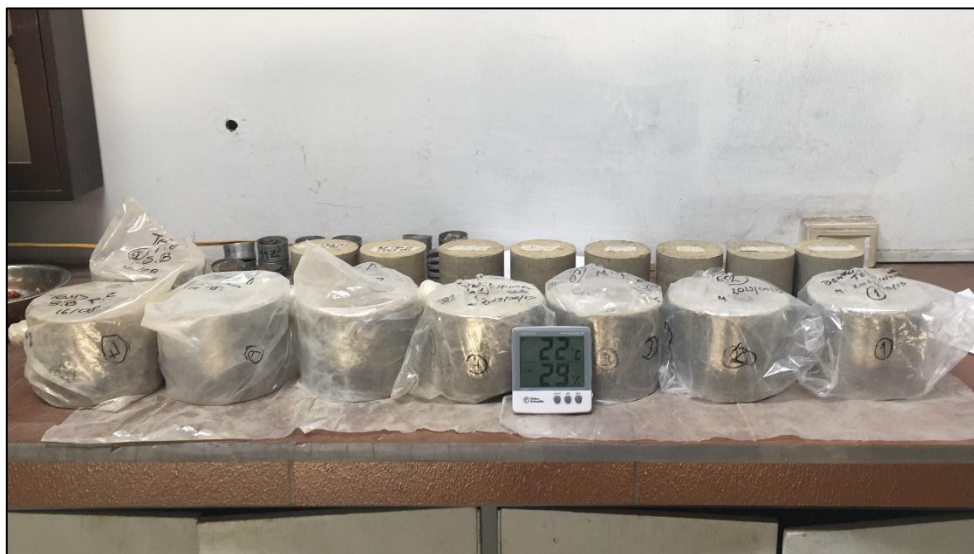


Figura 59. Resistencia ante curado sumergido (Jamsawang et al., 2017). Adaptación propia.

En base al curado planteado por Jamsawang et al. (2017), considerando que este es llevado a cabo bajo condiciones de humedad aproximadamente constantes (al tener los especímenes envueltos) y temperatura relativamente controlada (al mantener las probetas en un ambiente cerrado), se plantea la posibilidad de llevar a cabo el curado de los mampuestos bajo la misma metodología, representando una evolución respecto al curado marginal efectuado previamente en la investigación de dosificaciones. En este caso, la fabricación en serie debería desarrollar un método de curado que alcance condiciones similares, de manera que se tendría una alternativa al curado rudimentario y bajo condiciones no controladas que es llevado a cabo en la actualidad para la fabricación en serie de mampuestos. Para el curado de especímenes, al igual que en el procedimiento de investigación de dosificaciones, este es llevado a cabo en el cuarto de ensayos de consolidación e hidrometría, al interior del Laboratorio de Suelos del LMC-PUCE, con temperaturas ambientales entre 15 a 30 °C y una humedad relativa del 25% al 60%, con la diferencia de que se han envuelto los especímenes con una película plástica y se ha procedido a colocarlos en una bolsa plástica con cierre hermético, constituyéndose una doble protección, con la finalidad de mantener la humedad de moldeo.

Cabe indicar que las probetas cilíndricas han sido curadas durante 4 días con la doble protección indicada hasta alcanzar una dureza adecuada del material que permita el corte de mampuestos sin despostillado y disgregado, para proceder nuevamente y de forma inmediata a colocar la doble protección a los mampuestos obtenidos por corte y completar su curado hasta las edades requeridas para los ensayos contemplados.



*Figura 60.* Curado de probetas cilíndricas de 6'' con doble protección (película plástica y bolsa hermética) en cuarto de curado.



*Figura 61.* Preparación y curado de mampuestos tras corte en el LMC-PUCE: a) 1° capa de protección con película plástica, b) 2° capa de protección con bolsa plástica de cierre hermético, c) colocación en cuarto de curado.

### 4.3. Ensayos y resultados

---

A partir de cada una de las probetas cilíndricas de 6'' obtenidas mediante compactación, se han obtenido 2 mampuestos (identificados como A y B, para cada número de probeta cilíndrica) con dimensiones aproximadas a las seleccionadas, los cuales han sido asignados a los ensayos previstos.

Gambhir (2006), define a la resistencia característica de los materiales como el valor de resistencia correspondiente al 5° percentil de una distribución, lo cual indica que se espera que dicho valor sea superado por el 95% de las muestras de

un universo, con un 5% de muestras que tendrían una resistencia inferior a esta. Dentro de los Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido, Middleton, mencionado por Walker (1997), indica que la resistencia característica puede ser determinada de acuerdo con:

$$f' = f_m - 1.65s$$

*Ecuación 3. Resistencia característica en Bloques de Suelo Estabilizado Comprimido. Adaptación propia.*

Donde:

$f'$  = Resistencia mecánica.

$f_m$  = Resistencia mecánica promedio.

$s$  = Desviación estándar sin sesgo.

Expresión que asume un comportamiento estadístico del material dentro de una distribución normal (The Royal Academy of Engineering, 2010).

En base a lo señalado, se ha procedido a efectuar el cálculo de la resistencia característica en términos de la resistencia a la compresión y resistencia a la flexión (módulo de rotura), con la finalidad de llevar a cabo una comparación de desempeño posteriormente, puesto que resulta más conservador que el valor de resistencia promedio.

#### **4.3.1. Resistencia a la compresión**

El ensayo de compresión en elementos de albañilería es la propiedad más importante, ya que define de manera directa la calidad estructural que estos poseen, tomando en cuenta que este tipo de elementos van a presenciar solicitudes como ésta durante toda la vida útil de la estructura (Enciso Peralta, 2012).

El presente ensayo se rige a la normativa NTE INEN 3049-5, Ladrillos Cerámicos. Parte 5: Métodos de ensayo (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2019d), y presenta la misma metodología que la norma ASTM

*C67/C67M – 19: Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile* (American Society for Testing and Materials, 2019a).

**a) Especímenes empleados**

Para obtener las unidades de mampuesto para los ensayos, fue necesario cortar 5 mampuestos en mitades, la muestra mínima solicitada por la norma, obteniéndose 10 especímenes, los cuales fueron provistos para la evaluación de resistencia a los 14 y 28 días de curado a partir de la fecha de moldeo, con 5 especímenes para cada una. Previo a la ejecución del ensayo, estos fueron secados en un horno de 110°C por 24 horas, tomando en cuenta que las normas mencionadas anteriormente exigen que la temperatura oscile entre los 105 y 115°C.

**b) Refrentado**

Una vez que los especímenes se secaron al horno y estuvieron a temperatura ambiente, se refrentaron las superficies donde se colocarían los apoyos en el ensayo de compresión, con el fin de eliminar las irregularidades en dichas caras y asegurar que sean paralelas. Para este fin, de acuerdo con la normativa, se ha empleado yeso de alta resistencia, ya que es un material que no falla antes que el material ensayado.

**c) Procedimiento**

Se colocaron los especímenes sobre una superficie plana, para proceder al ensayo con una maquina universal con capacidad de 30 ton-f (294.2 kN). La dirección de la carga fue provista de manera perpendicular a las capas de compactación, tomando en cuenta que los mampuestos serán puestos en servicio de esta manera. La carga fue aplicada con una velocidad de 1.3 mm/min.



*Figura 62.* Compresión simple sobre mitad de mampuesto.

#### **d) Cálculo**

La resistencia a la compresión se obtiene como se indica a continuación:

$$\text{Resistencia a la compresión, } C = \frac{W}{A}$$

*Ecuación 4.* Resistencia a la compresión de mampuestos.

Donde:

$C$  = Resistencia a la compresión, MPa.

$W$  = Carga máxima de rotura, N.

$A$  = Promedio de las áreas superior e inferior del espécimen, mm<sup>2</sup>.

#### **e) Factores de corrección de resistencia**

Murmu & Patel (2018), señalan que las dimensiones de los mampuestos afectan la resistencia a la compresión de forma significativa, dado que el método de ensayo requiere la aplicación de carga axial mediante la utilización de dos placas metálicas, lo cual conlleva al desarrollo de fricción entre las caras del espécimen y las placas mencionadas, provocando restricción en la expansión lateral del espécimen. Este hecho posee como consecuencia la sobreestimación de la resistencia a la compresión.

No obstante, Morel, Pkla, & Walker (2007) señalan que, a medida que la relación entre la distancia entre las placas y el ancho del espécimen (denominada “relación de aspecto”) se incrementa, la influencia de las placas en la restricción de la expansión se reduce. Este fenómeno ha permitido definir factores de corrección para la resistencia a la compresión obtenida directamente de los ensayos, de acuerdo con la relación de aspecto del espécimen.

Existen diversos puntos de vista acerca de los factores de corrección adecuados para mampuestos de suelo comprimido. Standards New Zealand, Standards Australia, y Middleton, como se citan en Morel et al. (2007), así como Krefeld, citado por Murmu & Patel (2018), proponen la utilización de factores de corrección derivados para ladrillos cocidos de arcilla. Por otra parte, Heathcote & Jankulovski, como se citaron en Morel et al. (2007), proponen factores de corrección desarrollados sobre mampuestos de suelo comprimido, que resultan más adecuados y conservadores, aunque poseen una relación no lineal entre sí.

|  |   |      |      |      |      |       |
|--|---|------|------|------|------|-------|
| <b>Relación de aspecto (Altura/Ancho):</b> | 0 | 0.4  | 0.7  | 1.0  | 3.0  | ≥ 5.0 |
| <b>Factor de corrección:</b>               | 0 | 0.25 | 0.40 | 0.58 | 0.90 | 1.00  |

*Tabla 41.* Factores de corrección de resistencia (Heathcote & Jankulovski, 1992, como se citaron en Morel et al., 2007). Adaptación propia.

Dentro del intervalo de relación de aspecto 0 a 1.0 se ha definido un ajuste de línea de tendencia cúbica, con la finalidad de obtener los factores de corrección de resistencia:

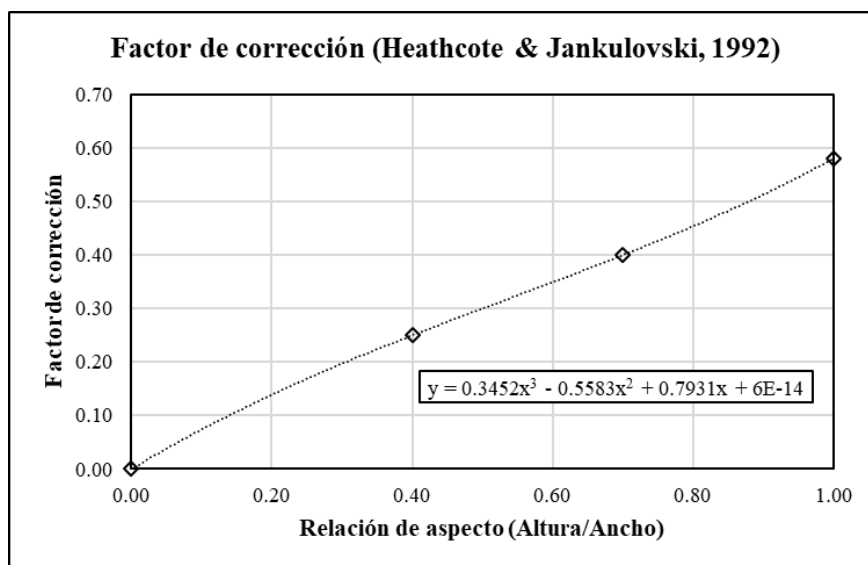


Figura 63. Factor de corrección respecto a la relación de aspecto (Heathcote & Jankulovski, 1992, como se citaron en Morel et al., 2007). Elaboración propia.

## f) Resultados

Los resultados obtenidos de mitades de mampuestos, correspondientes a las edades de 14 y 28 días, respectivamente, son:

| Edad: 14 días                      |             |             |             |             |             |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Identificación:                    | 1A-1        | 1B-1        | 6B-1        | 7B-1        | 8B-1        |
| Densidad seca, g/cm <sup>3</sup> : | 1.739       | 1.739       | 1.725       | 1.743       | 1.720       |
| Grado de compactación, %:          | 98.41       | 98.41       | 97.64       | 98.67       | 97.34       |
| Área promedio (A), mm:             | 3995.03     | 4108.09     | 3928.79     | 3903.16     | 3968.09     |
| Relación de aspecto:               | 0.87        | 0.88        | 0.93        | 0.89        | 0.90        |
| Factor de corrección:              | 0.496       | 0.499       | 0.530       | 0.506       | 0.514       |
| Carga de rotura (W), N:            | 28826       | 16829       | 23627       | 21430       | 22713       |
| Resistencia sin corregir (C), MPa: | 7.22        | 4.10        | 6.01        | 5.49        | 5.72        |
| R. sin corregir promedio, MPa:     |             |             | 5.71        |             |             |
| Resistencia corregida, MPa:        | <b>3.58</b> | <b>2.04</b> | <b>3.19</b> | <b>2.78</b> | <b>2.94</b> |
| R. corregida promedio, MPa:        |             |             | <b>2.91</b> |             |             |
| Desviación estándar, MPa:          |             |             | 0.57        |             |             |
| Resistencia característica, MPa:   |             |             | <b>1.97</b> |             |             |

Tabla 42. Resistencia a la compresión de mampuestos a los 14 días.

| <b>Edad: 28 días</b>                      |             |             |             |             |             |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Identificación:</b>                    | 1A-1        | 1B-1        | 6B-1        | 7B-1        | 8B-1        |
| <b>Densidad seca, g/cm<sup>3</sup>:</b>   | 1.739       | 1.739       | 1.725       | 1.743       | 1.720       |
| <b>Grado de compactación, %:</b>          | 98.41       | 98.41       | 97.64       | 98.67       | 97.34       |
| <b>Área promedio (A), mm:</b>             | 3803.12     | 4077.51     | 3808.58     | 3957.94     | 3933.65     |
| <b>Relación de aspecto:</b>               | 0.87        | 0.89        | 0.96        | 0.91        | 0.93        |
| <b>Factor de corrección:</b>              | 0.497       | 0.505       | 0.550       | 0.522       | 0.535       |
| <b>Carga de rotura (W), N:</b>            | 25078       | 34777       | 31870       | 30518       | 26566       |
| <b>Resistencia sin corregir (C), MPa:</b> | 6.59        | 8.53        | 8.37        | 7.71        | 6.75        |
| <b>Resistencia corregida, MPa:</b>        | <b>3.28</b> | <b>4.31</b> | <b>4.60</b> | <b>4.02</b> | <b>3.61</b> |
| <b>R. sin corregir promedio, MPa:</b>     |             |             | 7.59        |             |             |
| <b>R. corregida promedio, MPa:</b>        |             |             | <b>3.96</b> |             |             |
| <b>Desviación estándar, MPa:</b>          |             |             | 0.53        |             |             |
| <b>Resistencia característica, MPa:</b>   |             |             | <b>3.10</b> |             |             |

*Tabla 43.* Resistencia a la compresión de mampuestos a los 28 días.

#### 4.3.2. Resistencia a la flexión

La resistencia a flexión resulta un parámetro que expresa la resistencia a cargas laterales en muros sometidos a condiciones naturales inusuales, tales como ciclones, inundaciones o terremotos, de manera que la determinación de dicha resistencia permitiría adoptar un diseño estructural con un enfoque hacia el tipo de sollicitaciones indicadas (Jayasinghe & Mallawaarachchi, 2009).

Debido a la inexistencia de normativa nacional vigente aplicable, este ensayo ha sido realizado bajo las disposiciones indicadas por la norma ASTM C67/C67M – 19: *Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile* (American Society for Testing and Materials, 2019a).

##### a) Especímenes utilizados

Se han utilizado 5 especímenes con las dimensiones propuestas, cumpliendo con el número mínimo de muestras a ensayar. Estos especímenes fueron secados en un horno a 110°C por 24 horas, tomando

en cuenta que la norma referente a este ensayo exige que la temperatura oscile entre los 105 a 115°C.

### b) Procedimiento

Este ensayo se llevó a cabo en una maquina universal con capacidad de 30 ton-f (294.2 kN), al colocar cada uno de los especímenes sobre una base con dos apoyos de rotación libre, obteniéndose un vano en la cara inferior con una longitud de alrededor de 1" (25.4 mm) menos que la longitud de cada mampuesto. La aplicación de carga sobre la cara superior ha sido efectuada mediante una placa de alrededor de 6 mm de espesor y un ancho de 38 mm, con una velocidad de 1.3 mm/min.



*Figura 64.* Flexión sobre mampuesto.

### c) Cálculo

La resistencia a la flexión se expresa a través del módulo de rotura, mediante la ecuación:

$$S = \frac{3W \left( \frac{l}{2} - x \right)}{bd^2}$$

*Ecuación 5.* Módulo de rotura de mampuestos.

Donde:

$S$  = Módulo de rotura del espécimen en el plano de falla, MPa.

$W$  = Carga máxima indicada por la máquina de ensayo, N.

$l$  = Distancia entre apoyos (vano), mm.

$b$  = Ancho neto del espécimen en el plano de falla, mm.

$d$  = Altura del espécimen en el plano de falla, mm.

$x$  = Distancia promedio desde la mitad del vano hasta el plano de falla, medida en dirección del vano, a lo largo del eje central de la cara sujeta a tracción, mm.

#### d) Resultados

Los resultados correspondientes a la resistencia a flexión (módulo de rotura), obtenidos a los 28 días de curado, son:

| Edad: 28 días   |             |         |         |         |         |
|---|-------------|---------|---------|---------|---------|
| Identificación:   | 3B          | 5A      | 6A      | 7A      | 8A      |
| Densidad seca, g/cm <sup>3</sup> :                                  | 1.786       | 1.737   | 1.725   | 1.743   | 1.720   |
| Grado de compactación, %:   | 101.10      | 98.28   | 97.64   | 98.67   | 97.34   |
| Distancia entre apoyos (l), mm:                                     | 118.46      | 118.46  | 118.46  | 118.46  | 118.46  |
| Ancho neto (b), mm:   | 62.06       | 61.25   | 62.69   | 62.26   | 62.21   |
| Altura (d), mm:   | 54.67       | 57.46   | 54.77   | 55.64   | 54.40   |
| Distancia desde la mitad del claro hacia el plano de falla (x), mm: | 3.19        | 1.94    | -       | 1.31    | 2.86    |
| Carga de rotura (W), N:   | 1642.20     | 2019.40 | 2157.90 | 2384.90 | 1776.20 |
| Módulo de rotura individual (S), MPa:                               | 1.49        | 1.72    | -       | 2.15    | 1.63    |
| Módulo de rotura promedio, MPa:                                     | <b>1.75</b> |         |         |         |         |
| Desviación estándar, MPa:   | 0.29        |         |         |         |         |
| Módulo de rotura característico, MPa:                               | 1.28        |         |         |         |         |

Tabla 44. Módulo de rotura de mampuestos a los 28 días.

Es necesario puntualizar que, en el caso del espécimen 5A, se produjo una falla en los apoyos, que al no contar con el parámetro de distancia  $x$ , entregaría un módulo de rotura alto, que distorsionaría el promedio de resultados, razón por la cual, se ha descartado del cálculo general.

### **4.3.3. Absorción**

Riza et al. (2010) define la importancia de la absorción de mampuestos de suelo comprimido al indicar que afecta la resistencia y la durabilidad del material. Por esta razón, no se prevé la exposición de este tipo de materiales al agua. No obstante, es necesario conocer el desempeño del producto a emplear y tomar las precauciones necesarias para evitar su exposición a dichas condiciones.

Este ensayo se rige a las disposiciones dadas por la norma NTE INEN 3049-5, Ladrillos Cerámicos. Parte 5: Métodos de ensayo (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2019d), que presenta la misma metodología que la norma ASTM C67/C67M – 19: *Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile* (American Society for Testing and Materials, 2019a).

#### **a) Especímenes utilizados**

Se han utilizado 5 especímenes con las dimensiones propuestas, cumpliendo con el número mínimo de muestras a ensayar. Estos especímenes fueron secados en un horno a 110°C por 24 horas, tomando en cuenta que la norma referente a este ensayo exige que la temperatura oscile entre los 105 a 115°C.

#### **b) Procedimiento**

Después del secado al horno, se han dejado los mampuestos al aire dentro del LMC-PUCE durante un tiempo de 4 horas, para proceder con la determinación de la masa seca. Posteriormente, se sumergieron en agua potable a una temperatura entre 15.5 °C y 30.0 °C durante 24 horas.

Finalmente, fueron retirados del agua y se procedió a frotar los especímenes cuidadosamente con una toalla húmeda, continuando con el registro de la masa saturada.



*Figura 65.* Absorción de mampuestos.

### c) Cálculo

La absorción se determina de acuerdo con la expresión:

$$\text{Absorción, \%} = \frac{100 (W_{ss} - W_s)}{W_s}$$

*Ecuación 6.* Determinación de la absorción de mampuestos.

Donde:

$W_s$  = Masa seca del espécimen antes de la inmersión, g.

$W_{ss}$  = Masa del espécimen saturado luego de la inmersión, g.

#### d) Resultados

Tras el procedimiento señalado, se han obtenido los siguientes resultados:

| Edad: 28 días                      |             |        |        |        |        |
|------------------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| Identificación:                    | 2A          | 2B     | 3A     | 4A     | 5A     |
| Densidad seca, g/cm <sup>3</sup> : | 1.739       | 1.739  | 1.786  | 1.764  | 1.725  |
| Grado de compactación, %:          | 98.43       | 98.43  | 101.10 | 99.81  | 98.28  |
| Masa seca ( $W_s$ ), g:            | 770.03      | 673.24 | 841.32 | 799.66 | 782.26 |
| Masa saturada ( $W_s$ ), g:        | 912.28      | 804.06 | 995.19 | 949.96 | 924.17 |
| Absorción individual, %:           | 18.5        | 19.4   | 18.3   | 18.8   | 18.1   |
| Absorción promedio, %:             | <b>18.6</b> |        |        |        |        |

Tabla 45. Absorción de mampuestos a los 28 días.

#### 4.4. Comparación de propiedades y discusión

En base a los resultados obtenidos, es posible efectuar una comparación frente a los requisitos establecidos de acuerdo con los siguientes lineamientos:

**Normativa nacional:** dada la ausencia de normativa nacional aplicable a mampuestos de suelo comprimido, se plantea la comparación de resultados frente a los requisitos para ladrillos tradicionales cocidos, de acuerdo con la normativa NTE INEN 3049:2018, “Ladrillos Cerámicos”.

| Siglas           | Título  | Ente regulador y año                               | País    |
|------------------|---|--|---------|
| NTE INEN<br>3049 | Ladrillos cerámicos. Parte 2:<br>Unidades de mampostería<br>estructural. Requisitos.    | Instituto Ecuatoriano de<br>Normalización (2018b). | Ecuador |
| NTE INEN<br>3049 | Ladrillos cerámicos. Parte 3:<br>Unidades de mampostería no<br>estructural. Requisitos. | Instituto Ecuatoriano de<br>Normalización (2018c). | Ecuador |
| NTE INEN<br>3049 | Ladrillos cerámicos. Parte 4:<br>Unidades de mampostería de<br>fachada. Requisitos.     | Instituto Ecuatoriano de<br>Normalización (2018d)  | Ecuador |

Tabla 46. Normativa nacional sobre ladrillos tradicionales cocidos.

**Normativa internacional:** la utilización de suelo representa uno de los métodos constructivos más antiguos y más comunes utilizados en la construcción de vivienda dentro de los países en vías de desarrollo (Arumala & Gondal, 2007), lo cual ha conducido al desarrollo de normativas específicas para mampuestos de suelo comprimido a nivel mundial. Las normativas de relevancia en la actualidad han sido analizadas por Murmu & Patel (2018), y que serán empleadas para la comparación de resultados, son:

| <b>Siglas</b>             | <b>Título</b>   | <b>Ente regulador y año</b>  | <b>País</b>    |
|---------------------------|---|--|----------------|
| <b>IS<br/>1725</b>        | Soil Based Blocks used in General Building Construction.  | Bureau of Indian Standards (1982).   | India          |
| <b>NBR<br/>8491</b>       | Tijolo maciço de solo-cimento.  | Associação Brasileira de Normas Técnicas ( 1964).  | Brasil         |
| <b>SAZS<br/>724</b>       | Standard Code of Practice for Rammed Earth Structures.  | Standards Association of Zimbabwe (2001).  | Zimbabwe       |
| <b>NT<br/>2133</b>        | Blocs de terre comprimée ordinaires – spécifications techniques.  | Institut national de la normalisation et de la propriété industrielle (Tunisian Standards) (1996). | Túnez          |
| <b>NZS<br/>4298</b>       | Materials and workmanship for earth buildings.  | Standards New Zealand (1998).  | Nueva Zelanda  |
| <b>KS<br/>02-1070</b>     | Specifications for Stabilized Soil Blocks.  | Kenya Bureau of Standards (1993).  | Kenia          |
| <b>XP<br/>P 13-901</b>    | Compressed earth blocks for walls and partitions: definitions - specifications - test methods - delivery acceptance conditions. | Association française de Normalisation (2001).   | Francia        |
| <b>NTC<br/>5324</b>       | Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificaciones. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega.    | Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2004).                                    | Colombia       |
| <b>UNE<br/>41410</b>      | Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques: Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.                         | Asociación Española de Normalización y Certificación (2008).                                       | España         |
| <b>SLS<br/>1382</b>       | Specification for Compressed Stabilized Earth Blocks, Part 1: Requirements.   | Sri Lanka Standards Institute (2009).  | Sri Lanka      |
| <b>ASTM<br/>E2392-M10</b> | Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems.   | American Society for Testing and Materials, (2010).  | Estados Unidos |
| <b>NMAC<br/>14.7.4</b>    | New Mexico Earthen Building Materials Code.   | Construction Industries Division of the New Mexico Regulation & Licensing Department (2009).       | Estados Unidos |

*Tabla 47.* Normativa internacional sobre mampuestos de suelo comprimido analizada por Murmu & Patel (2018).

**Experiencia previa:** Camacho & Mena (2018) desarrollaron un mampuesto ecológico en el LMC-PUCE bajo una metodología similar a la del presente proyecto, con los siguientes componentes:

- **Suelo**

El suelo empleado tuvo las siguientes características:

| <b>LÍMITES DE PLASTICIDAD</b>                     |    |
|---|----|
| <b>Límite Líquido, LL:</b>                        | 37 |
| <b>Límite Plástico, LP:</b>                       | 24 |
| <b>Índice de Plasticidad, IP:</b>                 | 13 |
| <b>ANÁLISIS DE GRANULOMETRÍA<br/>POR TAMIZADO</b> |    |
| <b>Grava, %:</b>                                  | 0  |
| <b>Arena, %:</b>                                  | 11 |
| <b>Finos, %:</b>                                  | 89 |

*Tabla 48.* Características del suelo utilizado por Mena & Camacho (2018).

El cual corresponde al siguiente tipo de suelo, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.):

| <b>CLASIFICACIÓN S.U.C.S.</b> |    |
|-------------------------------|----|
| Arcilla de baja plasticidad   | CL |

*Tabla 49.* Clasificación del suelo utilizado por Mena & Camacho (2018).

- **Aditivos**

El mampuesto fue elaborado con los siguientes aditivos:

| <b>Aditivos</b>             | <b>Cantidad (peso de suelo seco)</b> |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| Cemento Portland            | 14 %                                 |
| Cenizas de cáscara de arroz | 6 %                                  |
| Cáscaras de arroz           | 4 %                                  |

*Tabla 50.* Aditivos empleados por Mena & Camacho (2018).

#### 4.4.1. Resistencia a la compresión

##### a) Normativa nacional

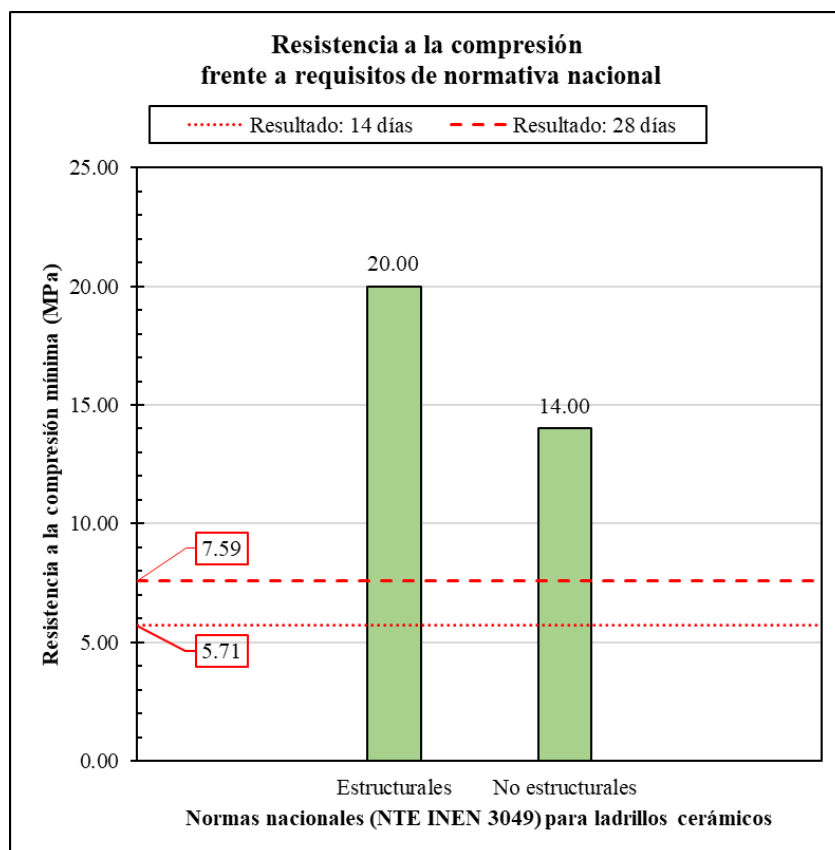


Figura 66. Comparación de resultados de resistencia a la compresión frente a normativa nacional.

Dado que la normativa NTE INEN 3049 no contempla la aplicación de factores de reducción de resistencia para ladrillos cerámicos ni un tratamiento estadístico, se ha llevado a cabo una comparación de resultados de resistencia a la compresión promedio sin corregir, a los 14 y 28 días de curado. De esta manera, es posible señalar que los mampuestos desarrollados no cumplen los requisitos correspondientes señalados por la norma, la cual, cabe destacar, ha sido considerada para el análisis a falta de una normativa específica para mampuestos de suelo comprimido.

## b) Normativa internacional

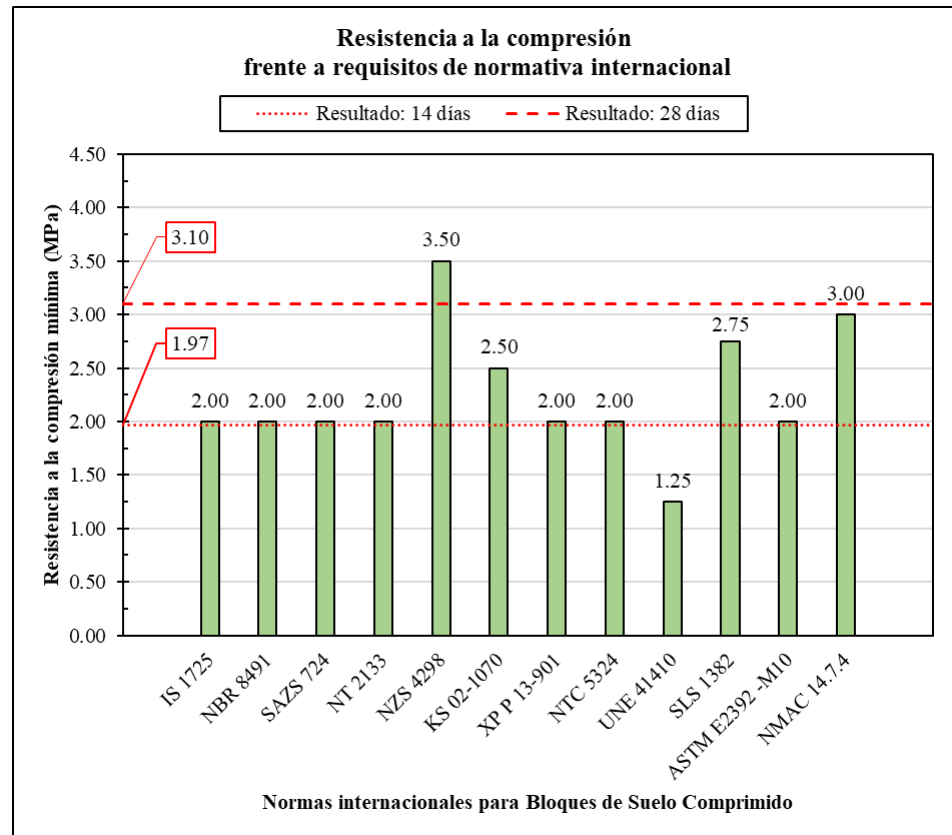


Figura 67. Comparación de resultados de resistencia a la compresión frente a normativa internacional.

Por otra parte, la normativa internacional desarrollada para mampuestos de suelo comprimido considera la aplicación de factores de reducción de resistencia y en ciertos casos la resistencia característica, según lo cual, se ha procedido a comparar los resultados de resistencia característica a la compresión, a los 14 y 28 días de curado. Así, se ha observado que el resultado a la edad de 28 días ha sido capaz de superar todos los requisitos de resistencia a la compresión mínima en seco solicitados por las normas estudiadas, a excepción del requisito de la normativa NZS 4298 (Nueva Zelanda), que cabe destacar, posee una mayor exigencia técnica que las demás normativas dentro de varios aspectos.

Jayasinghe & Mallawaarachchi (2009) indican que los mampuestos de suelo estabilizado comprimido poseen una resistencia a la compresión que resulta adecuada para la construcción de estructuras portantes de 1 y 2

pisos. Este hecho y la existencia de requisitos de resistencia menores a los solicitados por la normativa de ladrillos constituye un indicador de que la comparación de requerimientos de resistencia a la compresión de mampuestos de suelo comprimido frente a la de ladrillos cerámicos no es factible, considerando que su ámbito de aplicación es distinto y ambos son materiales de diferente naturaleza.

### c) Experiencia previa

Como se señaló anteriormente, el efecto de las placas de ensayo en la restricción de la expansión de especímenes señalada por Morel et al. (2007), causante de la sobreestimación de la resistencia a la compresión, requiere la corrección de resultados. De esta manera, para proceder con la comparación de la resistencia obtenida por Camacho & Mena (2018), se ha procedido a la corrección de los resultados de dicha investigación, según lo propuesto por Heathcote & Jankulovski, como se citaron en (Morel et al., 2007).

Cabe señalar que, a falta de un tratamiento estadístico de la resistencia por parte de las autoras, se ha procedido a efectuar una comparación solamente en términos de la resistencia a la compresión promedio corregida.

| Altura (mm) | Ancho (mm) | Relación de aspecto | Factor de corrección |
|-------------|------------|---------------------|----------------------|
| 40          | 80         | 0.50                | 0.300                |

*Tabla 51.* Dimensiones del mampuesto desarrollado por Camacho & Mena (2018) relacionadas al cálculo del factor de corrección de resistencia.

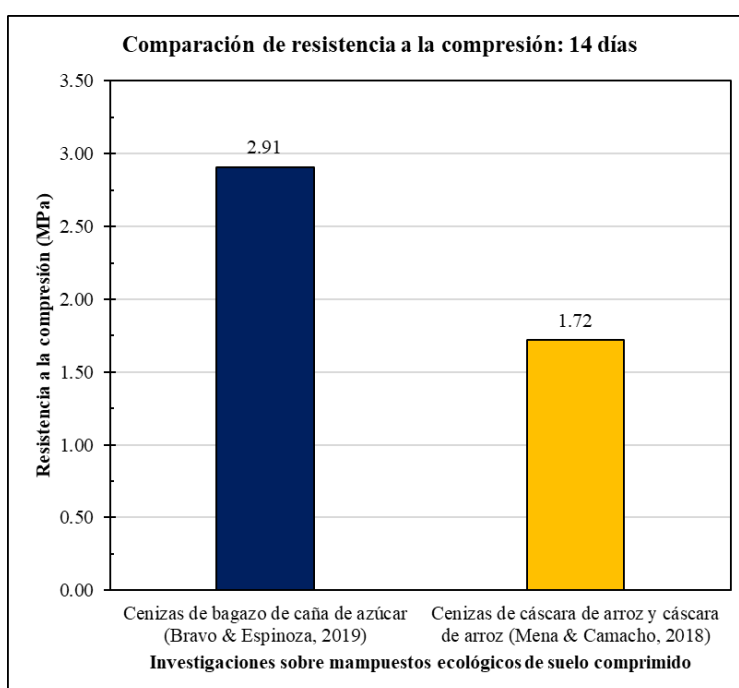
| Edad: 14 días                                    |      |      |      |
|--|------|------|------|
| <b>Resistencia sin corregir individual, MPa:</b> | 5.60 | 5.65 | 5.94 |
| <b>Resistencia corregida individual, MPa:</b>    | 1.68 | 1.70 | 1.78 |
| <b>Resistencia corregida promedio, MPa:</b>      | 1.72 |      |      |

*Tabla 52.* Corrección sobre la resistencia a la compresión a los 14 días obtenida por Camacho & Mena (2018).

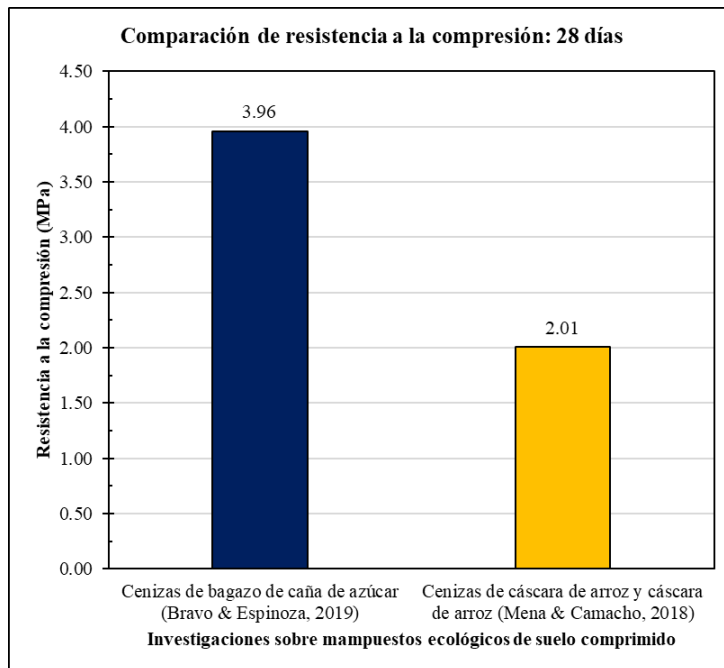
| <b>Edad: 28 días</b>                             |      |      |      |
|--|------|------|------|
| <b>Resistencia sin corregir individual, MPa:</b> | 6.31 | 6.33 | 7.48 |
| <b>Resistencia corregida individual, MPa:</b>    | 1.89 | 1.90 | 2.24 |
| <b>Resistencia corregida promedio, MPa:</b>      | 2.01 |      |      |

*Tabla 53.* Corrección sobre la resistencia a la compresión a los 28 días obtenida por Camacho & Mena (2018).

Según lo cual, es posible efectuar una comparación gráfica de resultados, de la siguiente forma:



*Figura 68.* Comparación de resultados de resistencia a la compresión a los 14 días frente a la experiencia previa de Camacho & Mena, 2018.



*Figura 69.* Comparación de resultados de resistencia a la compresión a los 28 días frente a la experiencia previa de Camacho & Mena, 2018.

Al analizar los resultados de resistencia a la compresión corregida de ambas investigaciones, se aprecia que el producto desarrollado presenta una ventaja de resistencia del 69.19 % y 97.01 % a los 14 y 28 días respectivamente, sobre el mampuesto obtenido por Camacho & Mena (2018), lo cual se debe principalmente a que este posee una densidad seca máxima inferior (1.655 g/cm<sup>3</sup> versus 1.768 g/cm<sup>3</sup> del mampuesto de la presente investigación) y fue fabricado con capas de compactación paralelas a la dirección de aplicación de carga.

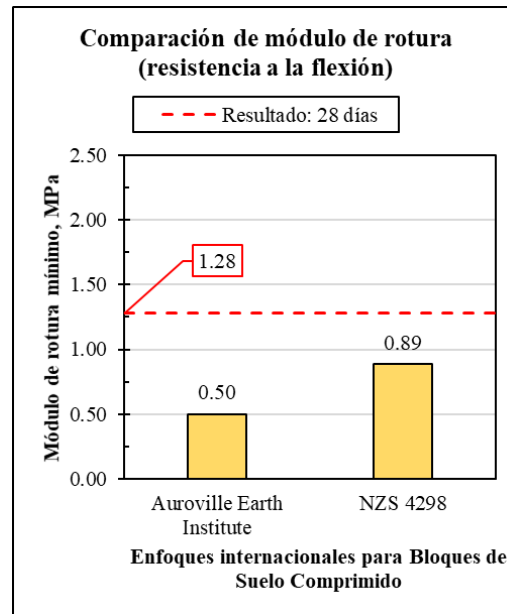
#### **4.4.2. Resistencia a la flexión**

La variación de las condiciones del ensayo de módulo de rotura en términos de equipo y cálculo propuestas por las diferentes normativas hace que no sea posible llevar a cabo una comparación con requisitos específicamente establecidos, así como refleja la inviabilidad de efectuar una comparación con los resultados obtenidos por Camacho & Mena (2018). Además, resulta necesario señalar que, en la actualidad, la normativa nacional vigente sobre ladrillos cerámicos (NTE INEN 3049) no contempla la ejecución de ensayos de flexión. Por esta razón, la comparación de resultados se ha llevado a cabo de forma superficial, aunque en base al módulo de rotura en términos de resistencia característica.

Esteve Cantón (2016) propone la evaluación frente al rango general de resistencia dictado por el Auroville Earth Institute (2012), que va de 0.5 MPa hasta 2.0 MPa, con lo cual, el producto ha alcanzado una resistencia dentro de lo esperado.

Desde otro punto de vista, la norma NZS 4298 (Standards New Zealand, 1998), define que el módulo de rotura es un parámetro de alta variabilidad, cuyos resultados mayoritariamente se ubican debajo del 30% de la resistencia a la compresión, de manera que establece que, como medida de control, la resistencia a la compresión, como referencia, debe ser de alrededor de 3.5 veces el valor del módulo de rotura. En base a lo expuesto, el módulo de rotura

mínimo, correspondiente a la edad de 28 días de curado, debería ser de 0.89 MPa, el cual se ha superado satisfactoriamente.



*Figura 70.* Comparación de resultados de módulo de rotura a los 28 días frente a enfoques internacionales.

### 4.4.3. Absorción

#### a) Normativa nacional

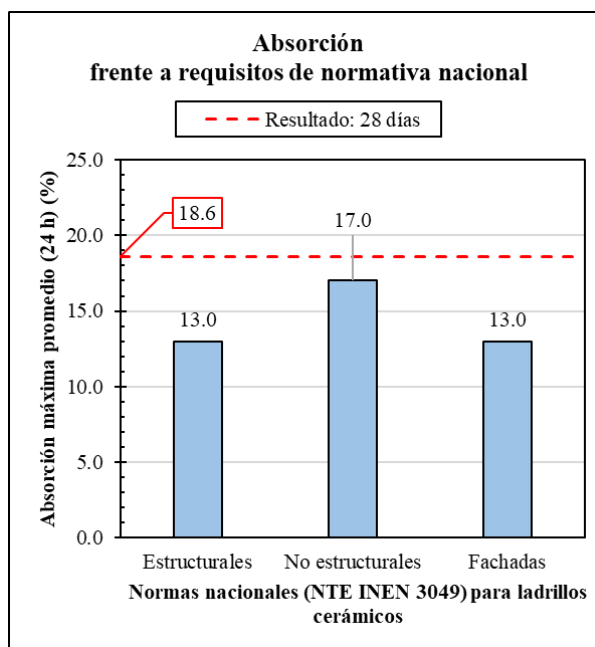


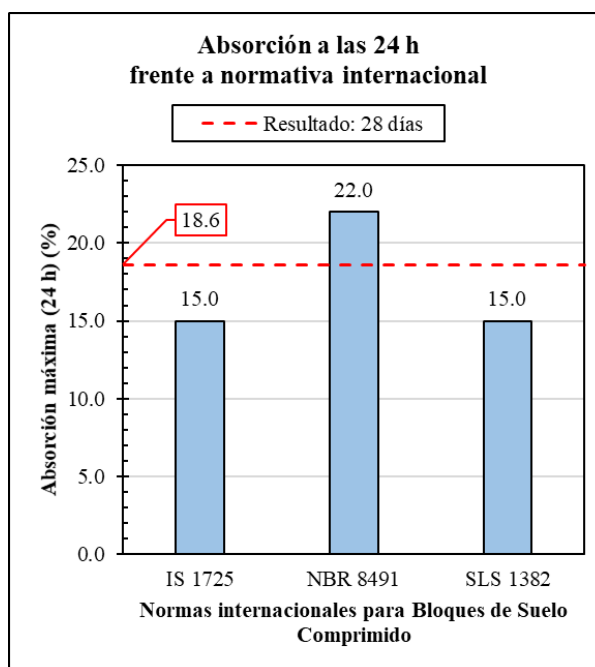
Figura 71. Comparación de resultados de absorción frente a normativa nacional.

El valor de absorción promedio obtenido en la presente investigación no satisface los requerimientos establecidos por la normativa NTE INEN 3049. No obstante, este hecho no resulta determinante para la evaluación definitiva del producto, puesto que el material de fabricación es distinto al material tomado como referencia.

#### b) Normativa internacional

A diferencia del caso de la comparación del parámetro de resistencia a la compresión, dentro del grupo de normativas estudiadas, solamente existen 3 normativas internacionales con requisitos comparables de absorción a las 24 horas, puesto que estas resultan las únicas que poseen una metodología de ensayo igual a la efectuada sobre los mampuestos desarrollados. Resulta importante mencionar que varias normativas no

consideran la ejecución de este ensayo, ya que ha sido reemplazado por ensayos más avanzados, como es el caso del ensayo de succión.



*Figura 72.* Comparación de resultados de absorción frente a normativa internacional.

En el caso de la comparación frente a estándares internacionales, existe una alta exigencia que no se satisface en el caso de las normas IS 1725 (India) y SLS 1382 (Sri Lanka), ambas asiáticas, en contraparte de la norma NBR 8491 (Brasil), sudamericana, que si se cumple.

Dado el escaso número de normativas comparables, se considera necesario, en futuras investigaciones, el estudio de la durabilidad del mampuesto desarrollado a través de ensayos más avanzados, el cual permitiría establecer de manera definitiva, la idoneidad del uso de este producto.

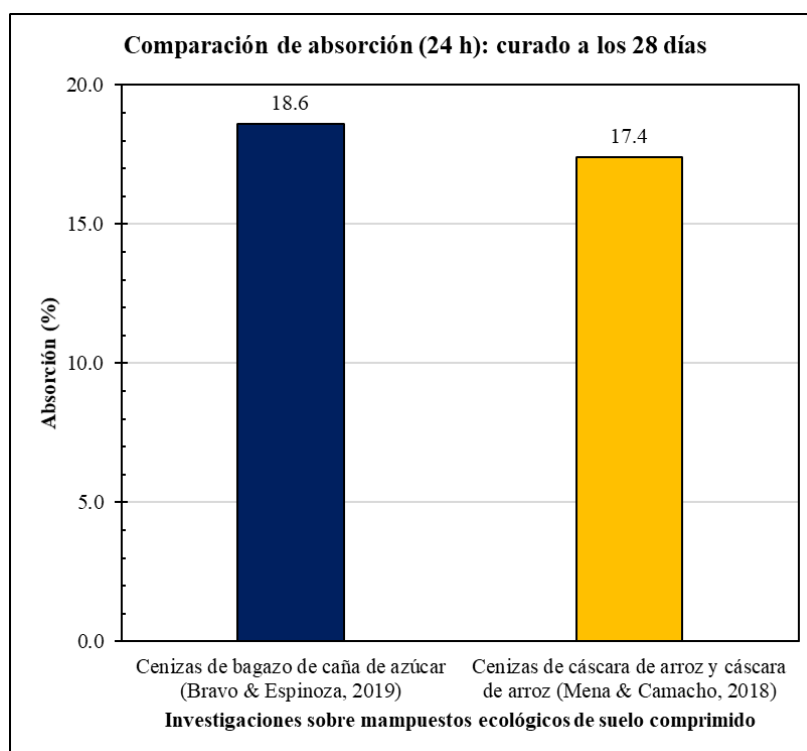
En todo caso, el parámetro de absorción podría ser mejorado mediante dos posibilidades:

1. Al incrementar la edad de curado de los mampuestos previa la ejecución del ensayo (Oti et al., como se citó en Irwan, Zamer, & Othman, 2016).

- Disminuyendo la cantidad de finos en la granulometría del suelo, puesto que los bloques de suelo estabilizado elaborados con suelos de grano grueso presentan valores de absorción menores (Venkatarama Reddy & Latha, 2013) .

Como medidas de precaución debido a la obtención de un valor de absorción fuera de dos normativas, se sugiere la construcción hasta cierto nivel con mampostería de ladrillo convencional, que posee una mejor respuesta ante la existencia de humedad y capilaridad, y en zonas con existencia de lluvias, se debería evitar el uso de este tipo de mampuesto en las paredes exteriores.

### c) Experiencia previa



*Figura 73.* Comparación de resultados de absorción frente a la experiencia previa de Camacho & Mena (2018).

El mampuesto desarrollado por Camacho & Mena (2018), aunque posee una absorción menor en 1.2 %, se encuentra en un escenario igual en

términos de comparación frente a normativa nacional vigente y normativas internacionales. No obstante, la absorción resultante de ambos concuerda razonablemente con los resultados obtenidos por Venkatarama Reddy & Latha (2013), que obtuvieron absorciones entre el 18 % y 20 % tras ensayar suelos finos con contenidos de arcilla entre el 8 % y el 31.6 %, por lo cual, es posible definir que ambos resultados se encuentran en el rango esperado para el tipo de material.

## 5. Aproximación hacia los costos de fabricación

El presente capítulo aborda un análisis aproximado hacia los costos de fabricación del producto, en base al enfoque comúnmente llevado a cabo en el análisis de costos de la industria de ladrillos cerámicos.

El costo de fabricación del producto propuesto ha sido obtenido mediante un análisis de costos directos e indirectos, asociados a una línea de producción definida y una estructura organizacional de producción, administración y ventas optimizada, de manera que se reduzca el capital humano al mínimo posible, y, por ende, el costo relacionado.

De manera complementaria, se presenta la inversión inicial aproximada requerida para la puesta en marcha del proceso productivo, con la finalidad de proponer un período de recuperación de esta.

El análisis mostrado ha sido efectuado en base a las siguientes consideraciones:

- La planta de producción se encontraría en la parroquia Calacalí, Distrito Metropolitano de Quito, provincia de Pichincha.
- Los precios tratados corresponden a octubre de 2019.
- Se considera que la producción diaria es de 3200 mampuestos.
- No se considera la adquisición de instalaciones en la inversión inicial, no obstante, estas se reflejan en el costo de arrendamiento mensual.
- Los costos de personal (producción, administración y ventas) cumplen con los salarios mínimos y beneficios contemplados por la ley ecuatoriana.
- Los costos de importación de equipo consideran un impuesto ad-valorem del 25%, un valor alto para ciertos equipos, que, por ende, resulta conservador.
- El cálculo de cantidades de suelo y cenizas, considerando el cambio de densidad de los materiales debido al transporte, ha sido tratado de acuerdo con el Caterpillar Performance Handbook 48 (Caterpillar, 2018).
- Los precios de materia prima y su transporte son sujetos a reducción en base a una negociación con los proveedores.

### 5.1. Línea de producción

La línea de producción propuesta ha sido definida en base a los requerimientos y la capacidad de producción de la máquina de prensado de bloques de suelo comprimido Auram Press 4000, que es capaz de producir 3200 mampuestos macizos diarios en una jornada de 8 horas.

Debido a que se ha identificado que el costo de la mano de obra posee una influencia notable sobre los costos de fabricación, se ha concebido una línea de producción con el mayor grado de automatización posible en términos de traslado de materias primas entre procesos, que adicionalmente, contempla la ejecución de los procesos de disgregado, tamizado y mezclado mediante equipo especializado, de manera que se posibilite la reducción del personal de producción.

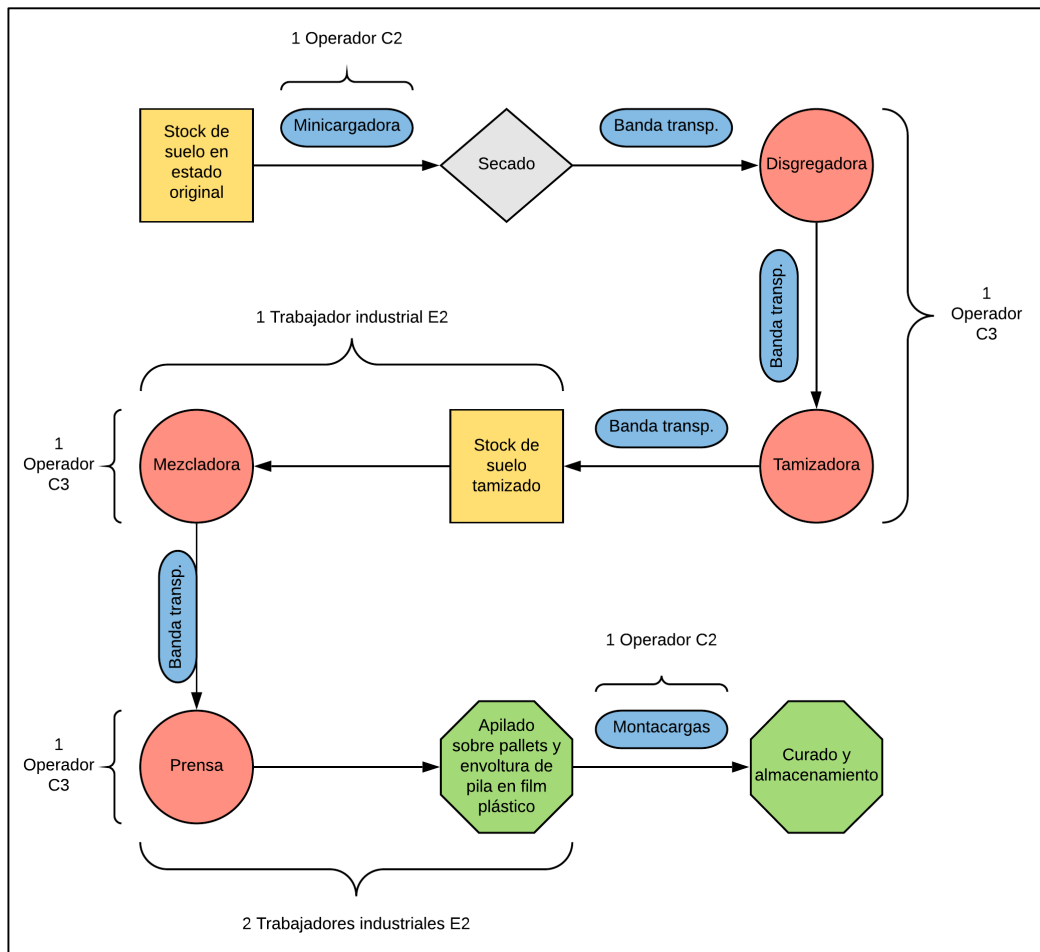


Figura 74. Línea de producción planteada para la fabricación del mampuesto ecológico.

## 5.2. Inversión inicial

| Tipo   | Descripción                           | Fuente de energía | Costo total aproximado |
|--|---------------------------------------|-------------------|------------------------|
| Horno de laboratorio                                   | ELE International / EI88-0130         | Electricidad      | \$ 4,600.26            |
| Balanza industrial                                     | Radwag / HY 10.150.HRP - 150 kg x 1 g | Electricidad      | \$ 7,509.76            |
| Minicargadora  | Caterpillar / 216B3                   | Diésel            | \$ 35,000.00           |
| Banda secado-disgregado                                | Miniveyor / Portable Conveyor         | Electricidad      | \$ 10,041.14           |
| Disgregadora   | GME / GME14 Hammermill                | Electricidad      | \$ 19,337.51           |
| Banda disgregado-tamizado                              | Miniveyor / Portable Conveyor         | Electricidad      | \$ 10,041.14           |
| Tamizadora   | Screener / VS48x24                    | Electricidad      | \$ 10,085.14           |
| Banda tamizado-stock tamizado                          | Miniveyor / Portable Conveyor         | Electricidad      | \$ 10,041.14           |
| Equipo de laboratorio compacto                         | CEB Soil Analysis Mobile Testing Lab  | Electricidad      | \$ 1,892.89            |
| Mezcladora   | PMSA / V200 Turbine Pan Mixer         | Electricidad      | \$ 15,449.01           |
| Banda mezcladora-prensadora                            | Miniveyor / Portable Conveyor         | Electricidad      | \$ 10,041.14           |
| Prensadora   | Aureka / Auram Press 4000             | Electricidad      | \$ 18,653.29           |
| Montacargas  | Caterpillar / GP15NM - 1.5 t          | Diésel            | \$ 30,000.00           |
| Camión   | Chevrolet / NPR 815 EIII - 4.8 t      | Diésel            | \$ 37,190.00           |
| Subtotal de maquinaria:                                |                                       |                   | \$219,882.39           |
| Equipamiento adicional                                 | 5 % de la inversión en maquinaria:    |                   | \$ 10,994.12           |
| $\Sigma =$   |                                       |                   | \$230,876.51           |
| <b>Inversión inicial en maquinaria y equipamiento:</b> |                                       | <b>\$</b>         | <b>230,876.51</b>      |

Tabla 54. Aproximación de requerimiento de adquisición de maquinaria y equipamiento.

### 5.3. Cantidades de materiales por mampuesto

---

| <b>Ensayo de compactación</b>             |        |
|---|--------|
| Densidad seca máxima, kg/m <sup>3</sup> : | 1768   |
| Humedad óptima, %                         | 15.95% |

| <b>Características del mampuesto:</b> |          |
|---------------------------------------|----------|
| Largo, m:                             | 0.24     |
| Ancho, m:                             | 0.115    |
| Alto, m:                              | 0.09     |
| Volumen, m <sup>3</sup> :             | 0.002484 |
| Masa seca, kg:                        | 4.392    |

| <b>Cantidades brutas</b>               |           |
|--|-----------|
| <b>Suelo</b>                           |           |
| Suelo seco, kg:                        | 3.8189    |
| <b>Cemento</b>                         |           |
| Cemento, kg:                           | 0.4583    |
| <b>Ceniza</b>                          |           |
| Ceniza seca tamizada, kg:              | 0.1146    |
| Impurezas, %:                          | 30%       |
| Ceniza seca con impurezas, kg:         | 0.1489    |
| <b>Agua</b>                            |           |
| Agua, kg:                              | 0.7005    |
| Densidad del agua, kg/m <sup>3</sup> : | 1000.0000 |
| Agua, m <sup>3</sup> :                 | 0.0007    |

*Tabla 55.* Cálculo de cantidades estándar de materiales para la elaboración de una unidad de mampuesto.

## 5.4. Precios por unidad de material

### 5.4.1. Suelo

| <b>Material</b>               |           |
|-------------------------------|-----------|
| Precio de venta en mina / m3: | \$ 6.00   |
| Densidad suelta, kg/m3:       | 1660.0000 |
| Peso en mina, kg:             | 1660.000  |
| Precio de venta en mina / kg: | \$ 0.0036 |
| <b>Transporte</b>             |           |
| Costo de transporte, viaje:   | \$ 75.00  |
| Capacidad de volqueta, m3:    | 8         |
| Peso transportado, kg:        | 13280     |
| Costo de transporte / kg:     | \$ 0.0056 |
| <b>Precio unitario</b>        |           |
| Precio unitario / kg:         | \$ 0.0093 |

Tabla 56. Determinación del precio unitario por kg de suelo.

### 5.4.2. Cemento

| <b>Material</b>                 |          |
|---------------------------------|----------|
| Saco de cemento - Holcim 50 kg: | \$ 8.25  |
| <b>Precio unitario</b>          |          |
| Precio unitario / kg:           | \$0.1650 |

Tabla 57. Determinación del precio unitario por kg de cemento.

### 5.4.3. Cenizas

| <b>Material</b>                  |          |
|----------------------------------|----------|
| Precio de venta en planta / ton: | \$ 15.50 |
| Precio de venta en planta / kg:  | \$0.0155 |
| <b>Transporte</b>                |          |
| Costo de transporte, viaje:      | \$120.00 |
| Capacidad de volqueta, m3:       | 8        |
| Densidad suelta, kg/m3:          | 560      |
| Peso transportado, kg:           | 4480     |
| Costo de transporte / kg:        | \$0.0268 |
| <b>Precio unitario</b>           |          |
| Precio unitario / kg:            | \$0.0423 |

Tabla 58. Determinación del precio unitario por kg de ceniza.

#### 5.4.4. Agua

| <b>Precio unitario</b> |          |
|------------------------|----------|
| Precio unitario / m3:  | \$0.6600 |

*Tabla 59.* Precio unitario por m3 de agua.

## 5.5. Costos directos

### 5.5.1. Materia prima

| Material  | Unidad | Cantidad estándar | Desperdicio | Cantidad mayorada | P.U.     | Costo    | Participación |
|---|--------|-------------------|-------------|-------------------|----------|----------|---------------|
| Suelo   | kg     | 3.8189            | 6%          | 4.0480            | \$0.0093 | \$0.0375 | 30.53%        |
| Cemento   | kg     | 0.4583            | 3%          | 0.4720            | \$0.1650 | \$0.0779 | 63.42%        |
| Ceniza  | kg     | 0.1489            | 10%         | 0.1638            | \$0.0423 | \$0.0069 | 5.64%         |
| Agua  | m3     | 0.0007            | 10%         | 0.0008            | \$0.6600 | \$0.0005 | 0.41%         |
| $\Sigma =$  |        |                   |             |                   |          | \$0.1228 | 100.00%       |
| <hr/>   |        |                   |             |                   |          |          |               |
| <b>Costo directo de materia prima / unidad: \$ 0.1228</b> |        |                   |             |                   |          |          |               |

*Tabla 60.* Determinación del costo directo de materia prima por unidad de mampuesto.

### 5.5.2. Mano de obra

| Sector   | Cargo                                  | Salario mínimo mensual | Salario nominal mensual | 13° sueldo | 14° sueldo | Vacaciones | Aporte patronal IESS (11.15%) | Fondos de reserva | CCC    | Salario real mensual | Costo diario individual | Cantidad | Costo diario por cargo | Participación |
|--|--|------------------------|-------------------------|------------|------------|------------|-------------------------------|-------------------|--------|----------------------|-------------------------|----------|------------------------|---------------|
| Producción                                     | Trabajador industrial (E2)             | \$402.62               | \$405.00                | \$33.75    | \$32.83    | \$ 16.88   | \$ 45.16                      | \$33.75           | \$4.05 | \$571.42             | \$ 27.21                | 3        | \$ 81.63               | 42.02%        |
|  | Operador de maquinaria industrial (C3) | \$412.45               | \$415.00                | \$34.58    | \$32.83    | \$ 17.29   | \$ 46.27                      | \$34.58           | \$4.15 | \$584.71             | \$ 27.84                | 3        | \$ 83.53               | 43.00%        |
|  | Operador de minicargadora (C2)         | \$433.35               | \$435.00                | \$36.25    | \$32.83    | \$ 18.13   | \$ 48.50                      | \$36.25           | \$4.35 | \$611.31             | \$ 29.11                | 1        | \$ 29.11               | 14.98%        |
|  |  |                        |                         |            |            |            |                               |                   |        |                      |                         | Σ =      | \$ 194.27              | 100.00%       |
| <b>Costo diario de mano de obra:</b>           |  | \$                     | 194.27                  |            |            |            |                               |                   |        |                      |                         |          |                        |               |
| <b>Producción (unidades/día):</b>              |  | 3200                   |                         |            |            |            |                               |                   |        |                      |                         |          |                        |               |
| <b>Costo directo de mano de obra / unidad:</b> |  | \$                     | 0.0607                  |            |            |            |                               |                   |        |                      |                         |          |                        |               |

*Tabla 61.* Determinación del costo directo de mano de obra por unidad de mampuesto.

### 5.5.3. Electricidad

| Tipo   | Descripción                           | Unidades | Potencia horaria (kWh) | Potencia diaria bruta (kWh/día) | Factor de uso | Potencia diaria neta (kWh/día) | Participación |
|--|---------------------------------------|----------|------------------------|---------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|
| Horno de laboratorio                           | ELE International / EI88-0130         | 1        | 1.92                   | 15.3600                         | 1.0           | 15.3600                        | 8.69%         |
| Balanza industrial                             | Radwag / HY 10.150.HRP – 150 kg x 1 g | 1        | 0.02                   | 0.1600                          | 0.8           | 0.1280                         | 0.07%         |
| Banda transportadora                           | Miniveyor / Portable Conveyor         | 4        | 0.37                   | 11.8400                         | 0.8           | 9.4720                         | 5.36%         |
| Disgregadora                                   | GME / GME14 Hammermill                | 1        | 11.19                  | 89.5200                         | 0.8           | 71.6160                        | 40.54%        |
| Tamizadora                                     | Screeener / VS48x24                   | 1        | 4.10                   | 32.8000                         | 0.8           | 26.2400                        | 14.85%        |
| Mezcladora                                     | PMSA / V200 Turbine Pan Mixer         | 1        | 3.00                   | 24.0000                         | 1.0           | 24.0000                        | 13.59%        |
| Prensadora                                     | Aureka / Auram Press 4000             | 1        | 3.73                   | 29.8400                         | 1.0           | 29.8400                        | 16.89%        |
|  |                                       |          | Σ =                    | 203.5200                        | Σ =           | 176.6560                       | 100.00%       |
| <b>Horas laborables / día:</b>                 |                                       | 8        |                        |                                 |               |                                |               |
| <b>Costo horario de energía (kWh):</b>         | \$                                    | 0.1009   |                        |                                 |               |                                |               |
| <b>Costo diario de energía:</b>                | \$                                    | 17.8246  |                        |                                 |               |                                |               |
| <b>Producción (unidades/día):</b>              |                                       | 3200     |                        |                                 |               |                                |               |
| <b>Costo directo de electricidad / unidad:</b> | \$                                    | 0.0056   |                        |                                 |               |                                |               |

Tabla 62 . Determinación del costo directo de electricidad de equipo por unidad de mampuesto.

#### 5.5.4. Combustibles

| Tipo  | Descripción                  | Fuente de energía | Cantidad | Consumo (gal/h) | Consumo bruto diario (gal/día) | Factor de uso | Consumo neto diario (gal/día) | Participación |
|---|------------------------------|-------------------|----------|-----------------|--------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|
| Minicargadora                                 | Caterpillar / 216B3          | Diésel            | 1        | 2.0000          | 16.0000                        | 0.25          | 4.0000                        | 74.43%        |
| Montacargas                                   | Caterpillar / GP15NM - 1.5 t | Diésel            | 1        | 0.6869          | 5.4954                         | 0.25          | 1.3738                        | 25.57%        |
|   |                              |                   |          | Σ =             | 21.4954                        | Σ =           | 5.3738                        | 100.00%       |
| <hr/>   |                              |                   |          |                 |                                |               |                               |               |
| <b>Horas laborables / día:</b>                | 8                            |                   |          |                 |                                |               |                               |               |
| <b>Costo / galón de diésel industrial:</b>    | \$                           | 2.1657            |          |                 |                                |               |                               |               |
| <b>Costo diario de combustible:</b>           | \$                           | 11.6380           |          |                 |                                |               |                               |               |
| <b>Producción (unidades/día):</b>             | 3200                         |                   |          |                 |                                |               |                               |               |
| <hr/>   |                              |                   |          |                 |                                |               |                               |               |
| <b>Costo directo de combustible / unidad:</b> | \$                           | 0.0036            |          |                 |                                |               |                               |               |

*Tabla 63.* Determinación del costo directo de combustibles de equipo por unidad de mampuesto.

## 5.6. Costos indirectos

### 5.6.1. Personal complementario

| Sector  | Cargo                      | Salario mínimo mensual | Salario nominal mensual | 13° sueldo | 14° sueldo | Vacaciones | Aporte patronal IESS (11.15%) | Fondos de reserva | CCC    | Salario real mensual | Costo diario individual | Cantidad | Costo diario por cargo | Participación |
|---|----------------------------|------------------------|-------------------------|------------|------------|------------|-------------------------------|-------------------|--------|----------------------|-------------------------|----------|------------------------|---------------|
| Producción  | Jefe de planta (A1)        | \$428.59               | \$430.00                | \$35.83    | \$32.83    | \$ 17.92   | \$ 47.95                      | \$ 35.83          | \$4.30 | \$ 604.66            | \$ 28.79                | 1        | \$ 28.79               | 13.38%        |
| Administrativo  | Gerente (A1)               | \$411.79               | \$800.00                | \$66.67    | \$32.83    | \$ 33.33   | \$ 89.20                      | \$ 66.67          | \$8.00 | \$1,096.70           | \$ 52.22                | 1        | \$ 52.22               | 24.27%        |
|   | Asistente de gerencia (D1) | \$401.64               | \$405.00                | \$33.75    | \$32.83    | \$ 16.88   | \$ 45.16                      | \$ 33.75          | \$4.05 | \$ 571.42            | \$ 27.21                | 1        | \$ 27.21               | 12.64%        |
|   | Chofer (C2)                | \$605.62               | \$610.00                | \$50.83    | \$32.83    | \$ 25.42   | \$ 68.02                      | \$ 50.83          | \$6.10 | \$ 844.03            | \$ 40.19                | 1        | \$ 40.19               | 18.68%        |
|   | Guardia y aseo (E1)        | \$398.33               | \$600.00                | \$50.00    | \$32.83    | \$ 25.00   | \$ 66.90                      | \$ 50.00          | \$6.00 | \$ 830.73            | \$ 39.56                | 1        | \$ 39.56               | 18.38%        |
| Ventas  | Vendedor (C3)              | \$403.72               | \$405.00                | \$33.75    | \$32.83    | \$ 16.88   | \$ 45.16                      | \$ 33.75          | \$4.05 | \$ 571.42            | \$ 27.21                | 1        | \$ 27.21               | 12.64%        |
|   |                            |                        |                         |            |            |            |                               |                   |        |                      |                         | Σ =      | \$ 215.19              | 100.00%       |
| <b>Costo indirecto diario de personal complementario:</b>   |                            | \$                     | 215.19                  |            |            |            |                               |                   |        |                      |                         |          |                        |               |
| <b>Producción (unidades/día):</b>                           |                            |                        | 3200                    |            |            |            |                               |                   |        |                      |                         |          |                        |               |
| <b>Costo indirecto de personal complementario / unidad:</b> |                            | \$                     | 0.0672                  |            |            |            |                               |                   |        |                      |                         |          |                        |               |

Tabla 64. Determinación del costo indirecto de personal complementario.

### 5.6.2. Gastos administrativos y complementarios

| Descripción  | Costo mensual     | Costo diario    | Costo por unidad | Participación  |
|--|-------------------|-----------------|------------------|----------------|
| Arriendo   | \$1,000.00        | \$ 47.62        | \$ 0.0149        | 26.81%         |
| Limpieza   | \$ 200.00         | \$ 9.52         | \$ 0.0030        | 5.36%          |
| Teléfono   | \$ 40.00          | \$ 1.90         | \$ 0.0006        | 1.07%          |
| Internet   | \$ 40.00          | \$ 1.90         | \$ 0.0006        | 1.07%          |
| Luz  | \$ 50.00          | \$ 2.38         | \$ 0.0007        | 1.34%          |
| Agua   | \$ 150.00         | \$ 7.14         | \$ 0.0022        | 4.02%          |
| Mantenimiento de maquinaria y equipo                                       | \$1,200.00        | \$ 57.14        | \$ 0.0179        | 32.17%         |
| Suministros de oficina   | \$ 50.00          | \$ 2.38         | \$ 0.0007        | 1.34%          |
| Honorarios legales   | \$ 200.00         | \$ 9.52         | \$ 0.0030        | 5.36%          |
| Honorarios de contabilidad   | \$ 200.00         | \$ 9.52         | \$ 0.0030        | 5.36%          |
| Honorarios de seguridad industrial   | \$ 200.00         | \$ 9.52         | \$ 0.0030        | 5.36%          |
| Impuestos y tasas  | \$ 150.00         | \$ 7.14         | \$ 0.0022        | 4.02%          |
| Gastos bancarios   | \$ 50.00          | \$ 2.38         | \$ 0.0007        | 1.34%          |
| Operación de camión  | \$ 200.00         | \$ 9.52         | \$ 0.0030        | 5.36%          |
| <b>Total de gastos previstos</b>   | <b>\$3,730.00</b> | <b>\$177.62</b> | <b>\$ 0.0555</b> | <b>100.00%</b> |
| Imprevistos (10% de gastos previstos)                                      | \$ 373.00         | \$ 17.76        | \$ 0.0056        | 10.00%         |
|  | $\Sigma =$        | \$195.38        | \$ 0.1166        | 110.00%        |
| <hr/>  |                   |                 |                  |                |
| <b>Costo indirecto diario por gasto administrativo y complementario:</b>   | \$ 195.38         |                 |                  |                |
| <b>Producción (unidades/día):</b>  | 3200              |                 |                  |                |
| <hr/>  |                   |                 |                  |                |
| <b>Costo indirecto por gasto administrativo y complementario / unidad:</b> | \$ 0.0611         |                 |                  |                |

Tabla 65. Determinación del costo indirecto de gastos administrativos y complementarios.

## 5.7. Resumen de costos directos e indirectos

---

### 5.7.1. Costos directos

| Desgloce de costos directos |                  |               |
|-----------------------------|------------------|---------------|
| Componente                  | Costo por unidad | Participación |
| Suelo                       | \$ 0.0375        | 19.45%        |
| Cemento                     | \$ 0.0779        | 40.41%        |
| Ceniza                      | \$ 0.0069        | 3.59%         |
| Agua                        | \$ 0.0005        | 0.26%         |
| Electricidad                | \$ 0.0056        | 2.89%         |
| Combustible                 | \$ 0.0036        | 1.89%         |
| Mano de obra                | \$ 0.0607        | 31.50%        |
| Total                       | \$ 0.1927        | 100.00%       |

*Tabla 66.* Resumen de costos directos.

### 5.7.2. Costos indirectos

| Desgloce de costos indirectos            |                  |               |
|--|------------------|---------------|
| Componente                               | Costo por unidad | Participación |
| Personal complementario                  | \$ 0.0672        | 52.41%        |
| Gastos administrativos y complementarios | \$ 0.0611        | 47.59%        |
| Total                                    | \$ 0.1283        | 100.00%       |

*Tabla 67.* Resumen de costos indirectos.

## 5.8. Costos de fabricación y precio de venta

### 5.8.1. Costo de fabricación

| Desglose del costo de fabricación |                  |               |
|-----------------------------------|------------------|---------------|
| Componente                        | Costo por unidad | Participación |
| Total de costos directos          | \$ 0.1927        | 60.03%        |
| Total de costos indirectos        | \$ 0.1283        | 39.97%        |
| Costo de fabricación              | \$ 0.3210        | 100.00%       |

*Tabla 68.* Costo de fabricación del mampuesto propuesto.

### 5.8.2. Propuesta de precio de venta

El precio de venta propuesto ha sido seleccionado al comparar diferentes opciones de mampuestos disponibles en el mercado:

| Tipo de producto                                  | Dimensiones<br>(Largo x Ancho x Altura) | Proveedor                               | Precio de<br>venta |
|---|---|---|--------------------|
| Bloque pesado de hormigón                         | 39 x 9 x 19 (cm)                        | Bloqcim                                 | \$ 0.75            |
| Bloque cerámico de arcilla                        | 41 x 20 x 9 (cm)                        | Dolmen                                  | \$ 0.70            |
| Bloque cerámico de arcilla                        | 30 x 13 x 10 (cm)                       | Alfadomus                               | \$ 0.65            |
| Bloque liviano de hormigón                        | 39 x 9 x 19 (cm)                        | Bloqcim                                 | \$ 0.49            |
| <b>Mampuesto de suelo estabilizado comprimido</b> | <b>24 x 11.5 x 9 (cm)</b>               | <b>Santiago Bravo y Felipe Espinoza</b> | <b>\$ 0.40</b>     |
| Ladrillo mambrón                                  | 29 x 13 x 7 (cm)                        | Varios                                  | \$ 0.35            |
| Ladrillo burrito                                  | 24 x 12 x 8 (cm)                        | Disensa                                 | \$ 0.25            |

*Tabla 69.* Comparación de precio de venta propuesto frente a la oferta del mercado.

| Estructura del precio de venta |                  |               |
|--------------------------------|------------------|---------------|
| Componente                     | Costo por unidad | Participación |
| Costo de fabricación           | \$ 0.3210        | 80.26%        |
| Utilidad bruta                 | \$ 0.0790        | 19.74%        |
| Precio de venta al público     | \$ 0.4000        | 100.00%       |

*Tabla 70.* Precio de venta del mampuesto propuesto.

### 5.8.3. Utilidades

| <b>Desglose de utilidad bruta por unidad (hasta el 10° año)</b>   |                         |
|---|-------------------------|
| <b>Descripción</b>  | <b>Valor por unidad</b> |
| Utilidad deducible por depreciación de maquinaria e instalaciones (máx. anual: 10%) - no sujeta a impuestos | \$ 0.0286               |
| Utilidad sujeta a deducciones adicionales e impuestos   | \$ 0.0503               |
| <b>Utilidad bruta por unidad</b>  | <b>\$ 0.0790</b>        |

*Tabla 71.* Estructura de la utilidad bruta por unidad.

| <b>Desglose de utilidad bruta mensual (hasta el 10° año)</b>  |                    |
|---|--------------------|
| Utilidad deducible por depreciación de maquinaria e instalaciones (máx. anual: 10%) - no sujeta a impuestos | \$ 1,923.97        |
| Utilidad sujeta a deducciones adicionales e impuestos   | \$ 3,382.73        |
| <b>Utilidad bruta mensual</b>   | <b>\$ 5,306.70</b> |

*Tabla 72.* Estructura de la utilidad bruta mensual.

De acuerdo con la legislación nacional vigente, el monto máximo deducible por depreciación de maquinaria e instalaciones corresponde al 10% de la inversión inicial, el cual no estaría sujeto a impuestos, y, por ende, se podría considerar directamente como el capital para la recuperación de la inversión, que se daría en un lapso de 10 años. No obstante, al existir una utilidad restante, la cual cabe señalar, se encuentra sujeta a deducciones adicionales e impuestos, dicho lapso podría reducirse en función de una reducción de la utilidad a percibir.

## **6. Consideraciones de aplicación del producto en infraestructuras**

Morton (2010) establece lineamientos sobre el uso de mampostería de suelo (*earth masonry*), como es el caso del producto conseguido, que son aplicables durante todas las etapas de los proyectos de infraestructura que consideren su uso, como son: planificación, ejecución, control y mantenimiento. En base a las indicaciones del autor señalado, a lo largo del presente capítulo, se exponen las consideraciones más relevantes que se deben tener en cuenta para el correcto uso de este tipo de materiales de construcción, con la finalidad de proyectar su aplicabilidad hacia futuros proyectos.

### **6.1. Mamposterías adecuadas para la utilización**

---

Los mampuestos pueden ser usados de distintas maneras en el campo de la construcción. Los límites que establecen un tipo de uso varían con el clima y la cultura, al igual que los potenciales beneficios obtenidos. Por ejemplo, en lugares secos y calientes se puede explotar la masa térmica en paredes monolíticas y techos abovedados, mientras que en climas fríos o húmedos estos se encargan de regular la humedad interna en construcciones realizadas con capas.

La arquitectura moderna y el diseño ingenieril tienen suficiente potencia para trascender las diferentes limitaciones cuando hablamos del uso de los mampuestos. Sin embargo, dicho trabajo se encuentra comenzando, al igual que la disponibilidad de los productos de alto rendimiento de arcilla sin cocer. Las aplicaciones más comunes que se encuentran en el mercado son:

#### **6.1.1. Paredes externas**

Los mampuestos pueden ser usados en paredes externas tomando en cuenta los siguientes puntos:

##### **a) Comportamiento térmico**

La mampostería con materiales térreos proporciona una buena masa térmica más no un buen aislamiento térmico. Es decir, la masa puede equilibrar un día caluroso contra una noche fría, pero no podrá prolongar

la temperatura de un verano contra la de un invierno. Si se quiere añadir la capacidad de controlar la humedad, se deberá colocar algún recubrimiento.

#### **b) Condiciones climáticas**

Los requerimientos del constructor frente al uso de mampuestos deben ser especificados de manera que estos no estén en contacto a ciclos de congelación, descongelación, periodos largos de exposición con agua y erosión significativa.

### **6.1.2. Paredes internas**

La principal aplicación para los mampuestos térreos es para paredes internas. Este uso se vuelve viable por el hecho de que, al no estar expuesto a la intemperie, no sufren cambios de temperatura o influencia de entes que las vuelvan vulnerable. Dentro de los factores más importantes para utilizar este medio son:

#### **a) Prevención de altos impactos**

Dada la circunstancia de que la ubicación de la pared esté comprometida a fuertes impactos o abrasión, se la deberá proteger con un material más robusto.

#### **b) Influencia de agua**

Se deberá evitar la colocación de mampuestos de este tipo en lugares que tengan influencia de humedades constantes como baños o donde se puedan dar salpicaduras. En el caso de que se requiera su utilización, se deberá colocar un revestimiento en su superficie.

### **6.1.3. Muros portantes**

Los muros de mampostería propuestos son capaces de soportar cargas estructurales significativas, tomando en cuenta que su reacción frente a esfuerzos de compresión es buena y de tensión es mala.

#### **6.1.4. Muros aislantes de fuego**

Los mampuestos térreos se pueden usar para paredes de separación de fuego ya que adquieren una consistencia cerámica que las permite estar expuestas a altas temperaturas.

#### **6.1.5. Bóvedas y cúpulas**

La construcción con bóvedas y cúpulas es muy común en construcciones tradicionales que se han llevado a cabo a lo largo de la historia. Esto se debe a que con estos materiales se puede obtener grandes resistencias estructurales, en conjunto con una buena estética.

#### **6.1.6. Pisos**

Los mampuestos de suelo comprimido pueden ser utilizados en pisos por estética o cuando se requiere un aislamiento acústico. Es indispensable tomar en cuenta que pueden darse inundaciones y que no se las podrá lavar, por lo que se recomienda colocar una capa de cera.

### **6.2. Manipulación general**

---

#### **6.2.1. Capacitación del personal involucrado en los procesos**

La mayoría de las personas involucradas en el campo de la construcción no están familiarizadas con los materiales de tierra y sus cualidades. Hay casos en los que se los trata de manera errónea como bloques de cemento o ladrillos convencionales, dando así como resultado comportamientos no esperados. De igual forma, si no se tiene una correcta capacitación, se podrá generar un sobredimensionamiento de recursos, ocasionando un incremento de la duración del proyecto y su costo.

Es una buena práctica informar a las personas involucradas para cada proyecto acerca de los materiales se van a utilizar, con el fin de tener una correcta socialización y abolir futuras negligencias.

### **6.2.2. Transporte, entrega y almacenamiento**

El manejo de los materiales desde el lugar de producción al de construcción usualmente no presenta problemas, pero es importante tomar en cuenta los siguientes pasos para prevenir daños:

#### **a) Conservación de la humedad de los materiales**

##### **Transporte**

Los mampuestos de tierra necesitan ser protegidos de humedad durante el transporte mediante cobertores. Si los mampuestos se llegan a mojar, se puede elevar el contenido de humedad por encima del límite de contracción, ocasionando fisuras o grietas de la construcción.

Los materiales deben estar lo más secos posibles antes de envolverlos para la entrega. Así mismo, los materiales deberán ser inspeccionados en el momento de la entrega y, si es necesario, realizar pruebas de calidad. En algunos casos, los materiales húmedos podrán secarse satisfactoriamente, si no estos deberán ser desechados inmediatamente.

##### **Almacenamiento**

Los materiales térreos tienen que ser almacenados bajo cobertores, pero con una adecuada ventilación para asegurar que no ocurra condensación. También se deberá colocar el material arriba del piso a una suficiente distancia que evite el paso de la humedad contenida en el suelo.

## **b) Prevención de daños**

### **Almacenamiento**

Para almacenarlos en el lugar de trabajo, se deberá buscar una ubicación apropiada, de manera que no se puedan dar impactos al momento de los movimientos en los procesos de construcción.

### **Entrega**

Los mampuestos de tierra son más vulnerables a sufrir daños por impactos que cualquier otro tipo de mampuesto. Cuando se entregan en paletas, los mampuestos pueden dañarse fácilmente si son removidos con sistemas de agarre. En su lugar, se deben utilizar máquinas que levanten la paleta totalmente, evitando el ajetreo y reduciendo el riesgo de impacto.

## **6.3. Construcción**

---

La construcción de paredes con mampostería de tierra rara vez presentan problemas significativos; no obstante, se debe tener cuidado con los siguientes puntos:

### **6.3.1. Habilidades y calidad del trabajo**

La construcción de muros con mampostería de tierra generalmente necesita el mismo algoritmo de construcción que la mampostería tradicional de bloque o ladrillo cocido. Los datos que se tienen de contratistas que utilizan esta metodología determinan que hay una rápida adaptación frente al uso de la misma, permitiendo realizar el trabajo a la misma velocidad que en los otros tipos de mampostería. Rara vez se encuentra la necesidad de realizar una capacitación especial previo a la construcción, sin embargo, se necesita orientación e instrucción planificada.

Los albañiles calificados pueden alcanzar una alta calidad técnica y estética de trabajo usando materiales de tierra. De igual manera, el trabajo simple puede ser completamente llevado a cabo por personas con habilidades bajas, si previamente se les da una correcta orientación y supervisión. Esto vuelve a la mampostería de tierra una metodología de construcción apropiada para voluntarios.

### **6.3.2. Morteros**

El uso de un mortero apropiado resulta clave para la construcción de mampostería de suelo. Los morteros de arcilla, a veces con aditivos, son los más utilizados. Además, se utilizan ocasionalmente también morteros de cal.

A continuación, se discuten los principales parámetros acerca de los morteros requeridos. La regla fundamental a seguir consiste en que el mortero debe tener una resistencia y características de comportamiento de retracción/contracción que sean compatibles con los mampuestos a utilizar.

- **Compatibilidad**

Los morteros tradicionales de arcilla generalmente cumplen con la regla señalada, siempre y cuando sean utilizados en mampuestos de tipo adobe o producidos por extrusión.

Los morteros de cal poseen resistencia adicional, y se recomienda su uso solamente cuando se utilicen mampuestos de alta resistencia, generalmente asociados a una alta densidad, como es el caso del mampuesto desarrollado. En el caso de utilizar morteros de arcilla para mampuestos de alta resistencia, debido al alto contenido de humedad que requiere la obtención de la pasta, se obtendría un mortero con una resistencia a la compresión insuficiente, y, por ende, con una rigidez incompatible.

Por otra parte, los morteros de cemento nunca se deberían utilizar para mampostería de suelo, dado que poseen una rigidez considerablemente

superior que los mampuestos, la cual induce esfuerzos en las uniones mampuesto-mortero cuando existen cambios de temperatura y humedad, que podrían hacer que los especímenes fallen.

- **Juntas**

La mampostería moderna tiende a utilizar juntas de alrededor de 10 mm de espesor, cuyo secado usualmente no restringe el progreso de la construcción. Se pueden requerir uniones de mayor espesor cuando se prevea la colocación de elementos de sujeción entre mampuestos. Es posible emplear uniones de menor espesor al utilizar morteros finamente graduados y mampuestos dimensionalmente de buena regularidad, lo cual acelera el secado.

En consecuencia de la relativa debilidad de resistencia en la unión de la mampostería de tierra, es importante lograr mezclas de mortero con la dosificación requerida precisa para que estas sean consistentes y deberán tener un contenido de humedad apropiado para que no se afecte el de los mampuestos. Es indispensable evitar las mezclas demasiado húmedas ya que por su plasticidad estas se pueden caer, adquirir grietas por contracción de los materiales o una resistencia inicial no apta durante la construcción. Sin embargo, los morteros demasiado secos también se deberán evitar porque no logran una correcta adherencia con los mampuestos y serán difíciles de mezclar.

- Los morteros de arcilla o arena usualmente pueden permanecer por horas antes de comenzar a secarse. Si el mortero contiene aditivos para mejorar la unión entre los mampuestos, el tiempo de trabajo puede ser menor y puede que sea posible que no se pueda volver a humedecerlo para su correcto curado.
- La preparación del mortero de cal deberá seguir las prácticas recomendadas. Los morteros de cal requieren un mayor cuidado y atención que los realizados con arcilla ya que se establecen por acción química y son más abrasivos.

- Los adhesivos para juntas delgadas siempre deberán ser usados bajo supervisión.
- Las juntas entre mampuestos siempre deberán estar completamente llenas, ya que de esta manera otorgarán un buen aislamiento acústico.
- El sumergir los mampuestos en agua previa a su colocación, puede reducir la absorción en la superficie y mejorar la resistencia en la unión.

### **6.3.3. Altura de construcción por jornada**

Dependiendo de los tipos de materiales y las condiciones de secado, la altura de construcción de cada jornada puede estar limitada por la posibilidad de asentamiento de la mampostería subyacente debido a la compresión prematura del mortero en estado húmedo. Dado que las circunstancias individuales varían considerablemente, cuando no existan indicaciones del fabricante de los mampuestos, se puede ejecutar una sección de mampostería de prueba para establecer límites apropiados.

### **6.3.4. Formación de aberturas**

En la formación de aberturas, se debe minimizar los potenciales movimientos diferenciales entre los materiales adyacentes y los de esfuerzos localizados en la mampostería. Los arcos y bóvedas se deben formar acorde con lo establecido en las prácticas de los otros tipos de mampostería, tomando en cuenta que el tiempo de fraguado del mortero es diferente.

Los elementos que se encuentren generando una carga directa encima de la mampostería de tierra como dinteles, deberán ubicarse y dimensionarse de manera que se pueda distribuir la solicitud. Los dinteles deberán realizarse con materiales que eviten cambios de humedad significativos y por ende movimientos diferenciales.

### **6.3.5. Juntas de movimiento**

Este tipo de juntas no son comunes en la construcción con mampostería de tierra ya que, por su baja rigidez, estas son capaces de absorber movimientos menores. Sin embargo, con morteros de cal en donde se vuelve un sistema más rígido, se puede dar el caso de necesitarlas.

### **6.3.6. Esquinas**

Las esquinas de muros que utilizan mampostería de tierra son vulnerables a impactos dañinos. Este problema se puede reducir mediante el uso de esquinas redondeadas o biseladas, revestimientos y elementos protectores de carpintería.

### **6.3.7. Fijación de marcos**

Los marcos para puertas o ventanas deberán estar diseñados de manera que puedan permitir potenciales movimientos de la mampostería e impactos ocasionados por el cierre y apertura de estos.

## **6.4. Enlucidos**

---

Generalmente, se utilizan enlucidos para recubrir la mampostería de suelo, entregando acabados atractivos y duraderos. Los enlucidos de arcilla son los más comunes, aunque existen otro tipo de materiales que se emplean para entregar un acabado más robusto. Los enlucidos deben ser compatibles con las características de humedad y movimientos de contracción y retracción de la mampostería a revestir, razón por la cual, los morteros de arena-cemento no deben ser utilizados. Los enlucidos a emplear pueden incluir aditivos, como arenas finas, paja, cáñamo, pulpa de papel o almidón, de acuerdo con el tipo de acabado que se quiera otorgar.

### **6.4.1. Tipos de enlucidos**

Existen 3 tipos de enlucidos que se pueden colocar sobre mampostería de suelo:

- **Enlucidos de arcilla**

Este tipo de enlucidos usualmente resultan los más compatibles con la mampostería de suelo. Sin embargo, al utilizar mampuestos de alta densidad o hechos con mezclas de estabilización, como es el caso del mampuesto desarrollado, resulta más apropiado utilizar otro tipo de acabado.

- **Enlucidos de cal**

Los enlucidos de cal ofrecen un acabado más robusto que los enlucidos de arcilla, con la posibilidad de obtener una gran variedad de colores y texturas. Se utilizan arenas finas, que otorgan cierto color, aunque el acabado final se ejecuta con pintura de cal, las cuales pueden ser tinturadas a través pigmentos minerales. La superficie de los enlucidos de cal puede también ser pintada directamente, al estilo de la pintura artística de tipo “fresco”.

Los enlucidos con cal poseen un costo relativamente elevado, y requieren la ejecución por parte de obreros con experiencia. A pesar de que la cal es un material antiséptico, es un material cáustico fuertemente alcalino, por lo cual requiere un manejo cuidadoso, por lo que no resulta apropiado de utilizar sin una capacitación especializada.

Este tipo de enlucido posee una mayor rigidez que los enlucidos de arcilla. Aunque posee una alta permeabilidad al vapor, su adherencia frente a mampostería de arcilla puede fallar en circunstancias en las cuales exista un alto nivel de humedad o cambios de temperatura. No obstante, es posible mejorar la adherencia al generar una textura en la superficie del mampuesto de arcilla, y los efectos del cambio de temperatura se pueden mitigar al utilizar arcilla mezclada con cal en las

primeras capas del proceso de enlucido. Son aptos para recubrimientos en ambientes externos.

- **Enlucidos de yeso**

Son recubrimientos relativamente rígidos e impermeables, lo que los hace generalmente inapropiados para condiciones húmedas, lo cual condiciona su colocación en mamposterías que tengan condiciones relativamente secas y sobre todo estables.

#### **6.4.2. Destrezas de trabajo**

La experiencia con enlucidos de arcilla no es común dentro de la mano de obra calificada para la ejecución de enlucidos. Debido a que los enlucidos de arcilla son más suaves y la masa de arcilla es soluble en agua, estos no son compatibles con las prácticas comunes de enlucido con yeso o cal.

Las destrezas necesarias para la ejecución de enlucidos de arcilla, conjuntamente con la percepción del tiempo necesario para el secado bajo diversas condiciones pueden ser adquiridas tras instrucción de especialistas y práctica, lo cual debería ser practicado previamente a la ejecución del trabajo. Resulta útil poner en práctica la obtención y ensayo sobre muestras de control, con la finalidad de establecer técnicas y definir el nivel de calidad.

#### **6.4.3. Herramientas y técnicas**

El recubrimiento de arcilla puede ser llevado a cabo mediante alisado o pulverización del mismo sobre la mampostería. Se recomienda humedecer las caras de los mampuestos con el fin de mejorar la adherencia y reducir la succión inicial. En las juntas con dinteles o marcos de puertas y ventanas deberán ser reforzados con láminas metálicas o con yute.

#### **6.4.4. Tiempo de secado**

En buenas condiciones, el enlucido se puede secar en un día; mientras que, en malas condiciones, el secado podría durar más de una semana. El tiempo que dura en secarse la pasta de arcilla varía de acuerdo a su tipo, ubicación, superficie y condiciones climáticas. Por otra parte, el secado del enlucido de cal puede durar entre unas pocas horas hasta un día.

### **6.5. Pinturas y otros recubrimientos**

---

Los acabados con pintura pueden mejorar la durabilidad de las superficies de mampostería de suelo, incrementando la resistencia a la abrasión y la humedad, permitiendo al mismo tiempo los cambios de humedad. Son capaces de mostrar sutilmente la textura de la mampostería, y otorgan una gran libertad en elección de tonos y colores.

#### **6.5.1. Pinturas de cal**

Este tipo de recubrimiento tradicionalmente complementa el enlucido con cal, aunque es posible colocarlo directamente sobre la mampostería, sin efectuar el enlucido. Es un acabado visualmente atractivo y ligeramente antiséptico, constituyéndose como un terminado simple y efectivo para mampostería de suelo.

Debido a que posee una superficie translúcida, requiere múltiples capas de acabado para alcanzar una buena calidad, con el número de capas establecido por la diferencia de color que se quiera alcanzar en la superficie terminada. La pintura de cal requiere ser restregada, a diferencia de la pintura común, volviéndose opaca a medida que se incrementa el número de capas, y a medida que se seca, muestra un acabado mate suave.

Existen varias consideraciones de salud y seguridad al utilizar pintura de cal, debido a que la cal es un material alcalino altamente cáustico, por lo que se

requiere protección de la piel y los ojos durante la aplicación. Un amplio número de pigmentos minerales, incluyendo arcillas, pueden ser utilizados para dar color a la pintura.

### **6.5.2. Pinturas comerciales**

Una gran variedad de pinturas con alta permeabilidad al vapor resulta ser un acabado apropiado, ya sea que estas se coloquen directamente sobre la mampostería de suelo, o bien, sobre los enlucidos de arcillas, y se encuentran disponibles en un amplio rango de colores. Algunos tipos de pinturas de origen natural poseen una baja durabilidad, mientras que existen pinturas sintéticas que gozan de una alta permeabilidad al vapor, por lo cual, se recomienda investigar las opciones existentes en el mercado y solicitar asesoría de los distribuidores.

### **6.5.3. Otros acabados**

Existe la posibilidad de aplicar aceites sobre los materiales de suelo, con la finalidad de mejorar la dureza de la superficie, resistencia a la humedad y reducir los problemas de polvo. Estos pueden reducir la permeabilidad al vapor, y algunos, como el aceite de linaza, pueden contener químicos orgánicos volátiles que pueden provocar daños a la salud. Otros tipos de aceites son de carácter benigno, y pueden ser acabados apropiados para la mampostería de suelo en algunas circunstancias, oscureciendo la apariencia del material y dándole la sensación de profundidad.

Otro acabado ocasionalmente empleado en mampostería de suelo es el silicato de sodio, el cual no resulta apropiado a largo plazo, debido a su relativa impermeabilidad.

#### **6.5.4. Acabados inapropiados**

La compatibilidad resulta un asunto clave en el caso de los recubrimientos. Los materiales con una baja permeabilidad al vapor tenderán a crear presiones de humedad en las superficies de la mampostería de suelo, hecho que eventualmente conduce a la rotura del recubrimiento, llegando incluso a dañar la superficie de los mampuestos.

Los materiales con baja permeabilidad de vapor, ya sean ciertas pinturas sintéticas, recubrimientos de vinil u otros tipos de acabados con esta característica, nunca deben ser colocados sobre mampostería de suelo.

### **6.6. Colocación de instalaciones hidrosanitarias y eléctricas**

---

#### **6.6.1. Rutas de servicios**

Algunos materiales patentados han incorporado agujeros para servicios de enrutamiento para instalaciones hidrosanitarias y eléctricas. También se pueden construir mampuestos con cavidades o se podrán cortar una vez terminados. En paredes delgadas, los agujeros deben ser considerados como secciones críticas para que no debiliten la resistencia de la pared.

Cuando los servicios se van a enlucir, deben estar a una profundidad suficiente para permitir el doblaje y el refuerzo con malla de yute o malla metálica, para evitar grietas en el acabado. La distribución de las instalaciones deberá ser planificada con anticipación para evitar problemas en sitio.

#### **6.6.2. Servicios de agua**

Se deberá tener un especial cuidado en la distribución de agua ya que cualquier fuga puede causar desgastes significativos en los mampuestos de tierra. El diseño de las instalaciones sanitarias deberá ser óptimo para que, en el caso de haber una fuga, sean fáciles de reparar.

## **6.7. Colocación de elementos para sujeción de objetos**

---

Los diferentes materiales de tierra disponibles hoy en día responden de manera muy diferente a las alternativas y tipo de fijaciones que son apropiadas para una pared individual. La instalación y fijación de elementos usualmente no deben sobrepasar los 150 mm de un borde para evitar grietas y dependen de la resistencia de la mampostería.

### **6.7.1. Instalación de elementos en mampuestos**

La colocación de tornillos es generalmente más viable en la mampostería de tierra que los clavos ya que estos pueden ocasionar grietas o divisiones hasta en los mampuestos más densos. Estos deben ser perforados previamente con tacos si es necesario. Los proveedores deben ser capaces de orientar al usuario de como colocar los elementos de acuerdo al tipo de cargas que se va a utilizar. Caso contrario, se recomienda hacer una prueba simple con los elementos previo a su construcción. Los mampuestos huecos, con cavidades o con alto contenido de fibra tienden a soportar bajas resistencias a elementos de fijaciones.

Otra alternativa de poder colocar fijaciones en mampostería de tierra es mediante listones de madera continuos, los cuales podrán proporcionar diferentes ubicaciones. Estos también podrán ser pintados o terminados con yeso para brindar el acabado requerido

### **6.7.2. Instalación de elementos en morteros**

Las instalaciones de elementos en morteros, por ejemplo, en ataduras entre paredes, deberán seguir la práctica normal. Si se utiliza un mortero grueso o una junta delgada, la junta podrá necesitar estar más gruesa localmente. El constructor también deberá permitir que el mortero gane toda su resistencia antes de someterlo a cualquier carga de fijación.

### **6.7.3. Herramientas de colocación**

En el caso de bloques densos, se recomienda utilizar las herramientas de mampostería normal para hacer agujeros y colocar elementos de fijación. Para los bloques más ligeros y blandos, es mejor utilizar las herramientas que se utilizan para tratar la madera.

## **6.8. Cuidados posteriores**

---

Los requerimientos para cuidados posteriores siguen los mismos lineamientos explicados anteriormente en el proceso de construcción; sin embargo, hay que tomar en cuenta los siguientes puntos:

### **6.8.1. Control de humedad**

Los materiales de tierra deben ser capaces de secarse constantemente para alcanzar una humedad equilibrio, por lo que se recomienda que estas tengan medidas de ventilación.

Si el edificio no es apto para estar en contacto con la intemperie, con condiciones como congelamientos o lluvias, se deberá colocar protección local a los elementos que contengan mampostería de tierra. Además, se debe abolir aquellos procesos constructivos que involucren altos niveles de humedad atmosférica y riesgos de inundaciones del sitio.

### **6.8.2. Calentamiento**

El calentamiento mejora el proceso de secado; no obstante, es indispensable tomar en consideración que si este adquiere un nivel muy alto de temperatura puede generar grietas por contracción y dilatación.

### **6.8.3. Precaución de impactos**

Al ser un sistema constructivo vulnerable a altos impactos, se deberá eliminar cualquier tipo de influencia a daño de otras actividades constructivas que se encuentren cercanas. Esto principalmente hasta que los elementos adquieran gran parte de su resistencia o su totalidad.

## **6.9. Problemas y soluciones durante la vida útil**

---

### **6.9.1. Defectos comunes en nuevas construcciones**

Si se siguen las reglas para la construcción con mampostería de tierra, generalmente no se encontrarán fallas o defectos. Este tipo de mampuestos comúnmente se convierten en un material más resistente y duradero a medida que el nivel de humedad de la construcción disminuye.

Puede darse el caso de que se generen fallas graves, por ejemplo cuando se genera una mezcla de mortero mala o cuando se tiene niveles altos de humedad. Existe un gran número de maneras en las cuales se pueden presentar fallas menores, dejando como resultado una mala práctica en sitio.

#### **a) Grietas de los mampuestos**

No se deberían presentar contracciones significativas en la mampostería de tierra si el trabajo es realizado correctamente y se lleva a cabo un control de humedad. Sin embargo, pueden producirse grietas en respuesta a movimientos relacionados de la estructura o de otros materiales.

El nivel de daño por agrietamiento se relaciona con el comportamiento de la madera frente a la humedad. En algunos casos, será necesario reparar la mampostería y en otros requerirá una reconstrucción.

### **b) Grietas de enlucidos**

Las grietas en el enlucido son más comunes que las del mampuesto propiamente dicho, ya que se relacionan directamente con la contracción del acabado húmedo en lugar de los movimientos estructurales. La contracción del enlucido se genera cuando este es aplicado sobre materiales mojados, al secarse excesivamente, o al colocarse en capas muy gruesas. La superficie por lo general se repara con el humedecimiento y corrección en enlucidos de arcilla o estucando con otra capa de acabado.

### **c) Presencia de polvo en la superficie**

Esto ocurrirá en el enlucido de arcilla cuando este ha sido sobretrabajado por humectación excesiva o demasiado uso de herramientas como llanas o flotadores, especialmente si son de acero. Esto atrae el polvo de arcilla a la superficie, y cuando se seca, queda como una capa no agradable estéticamente. Para evitar que se produzca este problema, se pueden aplicar recubrimientos, que estabilizarán la superficie del enlucido pero que cambiarán totalmente la apariencia de la pared.

## **6.9.2. Causas inusuales de daño**

Existen pocas causas de daños potenciales hacia la mampostería de tierra sobre las cuales se debe tener cuidado.

### **a) Animales**

Los animales comúnmente suelen lamer o frotarse contra las paredes de mampostería de tierra, lo cual, con el tiempo, puede convertirse en una fuente de descomposición progresiva. Este hecho generalmente solo afecta a edificaciones en las cuales los animales viven junto a mampostería de tierra expuesta, como el caso de los establos.

### **b) Aspersiones y salpicaduras**

La mampostería de tierra expuesta es vulnerable a las aspersiones y salpicaduras de agua. Se debe tener en consideración a los patrones repetitivos de mantenimiento que empleen agua, como el riego de jardines, la aspersión de cultivos y la limpieza de pisos y ventanas, dado que pueden afectar a lo largo del tiempo, a la mampostería de tierra adyacente.

### **c) Plantas**

Las plantas trepadoras, como las hiedras, pueden insertar sus raíces en la mampostería de tierra y dañarla, especialmente cuando estas se encuentren húmedas, presenten grietas o tengan texturas con aberturas. Usualmente, resulta inapropiado permitir el crecimiento de plantas sobre este tipo de mampostería.

## **6.9.3. Reparaciones y mantenimiento**

Los métodos para reparar y mantener la mampostería de tierra son muy simples. Cuando se producen fallas relativas a movimientos estructurales o humedad, se requerirá asesoramiento especializado.

### **a) Mampuestos rotos o agrietados**

Los daños por impacto que rompen individualmente los mampuestos pueden ser reparados cortando el mortero y los mampuestos afectados en un orden controlado para ser reemplazados por otros nuevos del mismo tamaño. En el caso de que los mampuestos nuevos no coincidan con los originales, es posible proporcionar nuevos mampuestos a partir del material removido, remojándoles y formándoles a mano en moldes.

### **b) Superficies desgastadas**

Las superficies de los mampuestos de tierra que han sido desgastados por abrasión pueden ser difíciles de reparar, lo cual obliga al reemplazo de los mampuestos afectados. Esta abrasión generalmente tiene una fuente

específica o foco. En muchos casos, es más fácil anticipar los daños y eliminar su fuente que repararlos.

#### **c) Salpicaduras**

Los daños ocasionados por salpicaduras en lugares que tengan o puedan tener presencia de agua, tienen el mismo tratamiento de reparación y mantenimiento que los que tienen superficies desgastadas ya que también es un daño progresivo. Si el problema no puede ser evitado totalmente y se ve la posibilidad de que se tenga presencia de agua nuevamente, es mejor que se reemplace los mampuestos de tierra por mampuestos cocidos.

#### **d) Daños en el acabado del enlucido de arcilla**

Estos daños pueden ser causados por la presencia de impactos, abrasión y salpicaduras. Si bien se aplican los mismos principios anteriores de proteger y evitar los daños progresivos, el enlucido es más fácil de reparar. Esto se logra quitando y remojando el enlucido dañado antes de ser aplicado nuevamente a la pared. En el caso de que no se tenga suficiente material para ser colocado, se recomienda usar uno nuevo. Se recomienda retener cualquier exceso de enlucido después de la construcción para el uso en reparaciones menores.

### **6.9.4. Alteraciones**

La mampostería en general es susceptible a sufrir alteraciones. Las fisuras y pequeños huecos son fáciles de reparar, mientras que las grietas y roturas requerirán un análisis estructural con el fin de determinar si se necesita alguna consideración adicional.

En el caso de que se vaya a retirar una sección de la pared, en lugar de demolerla totalmente, es preferible que se realice el corte con una sierra adecuada en vez de romperla manualmente con una herramienta de impacto, como los martillos o combos.

Al ampliar paredes de mampostería de tierra, se debe tomar precauciones para asegurar una adherencia apropiada y la tolerancia dada para cualquier movimiento potencial de la nueva mampostería.

## **7. Conclusiones y recomendaciones**

Las conclusiones y recomendaciones serán divididas de acuerdo con cada capítulo abordado en la presente investigación.

### **7.1. Conclusiones**

---

#### **7.1.1. Capítulo 1 - Generalidades**

- La industria de la construcción, al constituirse como el mayor usuario global de las fuentes naturales, emplear altas cantidades de energía y provocar la contaminación del medio ambiente, necesariamente requiere ser orientada hacia un enfoque sostenible y amigable con el entorno, sin comprometer la entrega de soluciones de infraestructura aptas.
- La fabricación de ladrillos cerámicos posee una notable huella de carbono, principalmente debido al proceso de cocción involucrado. Por esta razón, resulta ecológicamente no viable desde todo punto de vista.
- La escasez de materiales de construcción experimentada en ciertos países, relacionada a una demanda de vivienda elevada y permanente, representa una alerta sobre la necesidad del desarrollo de materiales de construcción alternativos, que sean capaces de cubrir el déficit existente, permitiendo una edificación sostenible, continua, accesible, segura y de calidad.
- El proceso de cogeneración de los ingenios azucareros, al ser neutral en términos de emisiones, hace que la ceniza de bagazo de caña de azúcar sea un material sin emisiones asociadas, una cualidad de excepcionales características al momento de ser utilizada como reemplazo parcial del cemento, puesto que este es un material que posee una energía embebida muy alta, y cuya producción está asociada a la generación de alrededor del 8% de emisiones globales de CO<sub>2</sub>.

### 7.1.2. Capítulo 2 - Mampostería

- La mayoría de los mampuestos ecológicos revisados en base a investigaciones existentes, a pesar de ser capaces de entregar propiedades adecuadas, al ser fabricados bajo condiciones demasiado específicas en el entorno de la misma investigación o muy variables entre investigaciones, tornan complicada la producción en serie, lo cual no sucede con los ladrillos cocidos y bloques de hormigón.
- En la fabricación de mampuestos ecológicos cocidos, a pesar de que se ha determinado que el tiempo de cocción puede ser reducido a unas pocas horas al incorporar ciertos residuos y llevar a cabo el proceso a una determinada temperatura, existe una huella ecológica importante como resultado de la cocción, por lo cual, su fabricación no es sostenible a futuro.
- El producto desarrollado ha sido capaz de satisfacer varios parámetros evaluados por las diversas certificaciones internacionales de edificación sostenible, como son: obtención local (las fuentes de materiales son las más cercanas al punto tentativo de fabricación), menor energía embebida posible (de 6 a 7 veces menor que la de un ladrillo cerámico, de acuerdo con la **Tabla 3**), reciclabilidad (debido a la utilización de cenizas de bagazo de caña de azúcar, un residuo de la industria azucarera) y comportamiento térmico adecuado (evitando o reduciendo la implementación de equipos de climatización, debido a que es un material equilibrante térmico, al tener una conductividad térmica notablemente menor que la de un ladrillo cocido, como se observa en la **Figura 14**).

### 7.1.3. Capítulo 3 – Diseño de la mezcla

- El suelo empleado posee un Índice de Plasticidad de 12, que al encontrarse dentro del rango de 5 a 15 propuesto por Walker, como se menciona en Murmu & Patel (2018), no provoca una reducción de la resistencia mecánica de las mezclas suelo-cemento-ceniza ensayadas.

- En el caso de suelos de grano fino, el contenido óptimo de arcilla, determinado por Venkatarama Reddy & Latha, citados por Murmu & Patel (2018), es del 10%. Por ende, el suelo utilizado, al poseer un contenido de arcilla del 10.1%, sería capaz de entregar una resistencia a la compresión mayor que un suelo de la misma clasificación que posea contenidos de arcilla diferentes, característica que resulta favorable para la elaboración de mampuestos de suelo estabilizado comprimido, puesto que la resistencia a la compresión representa la característica de mayor relevancia a ser evaluada en este tipo de materiales de construcción.
- El proceso de combustión del bagazo de caña de azúcar llevado a cabo en los ingenios azucareros no presenta condiciones controladas de temperatura, razón por la cual, no es posible obtener cenizas con las mejores propiedades posibles. No obstante, al haber utilizado dichos residuos y haberlos sometido a un nivel de procesamiento bajo (tamiz N° 40), se han obtenido resultados favorables, razón por la cual, se concluye que dicho procesamiento resulta suficiente para obtener un material con las características adecuadas para reemplazar parcialmente el contenido de cemento en la estabilización de suelos.
- La dosificación que conduce a la mayor resistencia a la compresión a los 14 y 28 días corresponde al reemplazo del 20% de cemento por cenizas (mezcla CBA20), siendo este resultado producto de la generación de las proporciones adecuadas de  $SiO_2$  (dióxido de silicio) a partir de las cenizas y  $Ca(OH)_2$  (hidróxido de calcio) a partir de la hidratación del cemento, logrando llenar los poros de la mezcla suelo-cemento-ceniza con productos de hidratación, como el gel C-S-H y la etringita, conduciendo a la menor relación de vacíos entre todas las dosificaciones, que a su vez se relaciona con la mayor resistencia posible.

#### 7.1.4. Capítulo 4 – Mampuesto ecológico

- La resistencia característica, al tener una probabilidad de ocurrencia del 95%, representa un valor conservador para la comparación frente a requisitos establecidos por normativas y los resultados de otras investigaciones. Además, aporta una alta certeza cuando se produce cumplimiento de requisitos.
- La resistencia a la compresión sin corrección obtenida a los 14 y 28 días (5.76 MPa y 7.59 MPa, respectivamente) no cumple con la resistencia mínima especificada para la normativa nacional de ladrillos cerámicos NTE INEN 3049 (20.00 MPa para muros estructurales y 14.00 MPa para muros no estructurales, sin factor de corrección). Sin embargo, ambos materiales son de distinta naturaleza y ámbito de aplicación, y el producto desarrollado ha sido capaz de cumplir con dicho requisito en 11 de las 12 normativas internacionales sobre mampuestos de suelo estabilizado comprimido analizadas, lo cual demuestra que no es correcto efectuar una comparación de las propiedades de mampuestos de suelo estabilizado comprimido con los requisitos dictados por normativas para ladrillos cerámicos.
- Al llevar a cabo una comparación de la resistencia a la compresión con los requisitos de normativas internacionales de mampuestos de suelo comprimido (en términos de resistencia característica), ha sido posible observar que la resistencia a los 14 días de curado solamente satisface los requerimientos en 1 de 12 normativas, aunque se encuentra muy próxima al valor mínimo requerido por 7 normativas; y por otro lado, a los 28 días de curado, cumple con los requisitos en 11 de 12 normativas, sin satisfacer solamente el requerimiento de la normativa NZS 4298, que representa la normativa más exigente sobre diversos aspectos. Por esta razón, a falta de una normativa nacional específica para el producto desarrollado, se concluye que este presenta una resistencia a la compresión a los 28 días (3.10 MPa) que es capaz de superar la resistencia mínima solicitada por casi la totalidad de normativas analizadas a nivel mundial y supera los

requisitos de las dos únicas normas latinoamericanas presentes (2.00 MPa: NBR 8491 – Brasil y 2.00 MPa: NTC 5324 – Colombia).

- Dado que los ensayos de flexión existentes en las diversas normativas analizadas presentan diferentes características de equipamiento, condiciones de ensayo y metodología entre sí y frente a las características de la normativa empleada (ASTM C67), es posible establecer que los resultados obtenidos no son comparables con los requerimientos establecidos en dichas normativas. No obstante, como referencia, ha sido posible efectuar una comparación del valor característico obtenido (1.28 MPa) con el rango generalmente obtenido en ensayos de módulo de rotura indicado por el Auroville Earth Institute (India), que va de 0.5 MPa hasta 2.0 MPa, con lo cual, se define que el producto se comporta de acuerdo con lo esperado. Adicionalmente, la norma NZS 4298 (Nueva Zelanda) ha propuesto que, como medida de control, la resistencia a la compresión debe ser de alrededor de 3.5 veces el valor del módulo de rotura, con lo cual, el módulo de rotura mínimo debería ser de 0.89 MPa, el cual se cumple satisfactoriamente.
- Ha sido posible identificar una escasa cantidad de normativa que contempla la ejecución del ensayo de absorción a las 24 horas (3 de 12 normativas analizadas), lo cual es un indicador de que dicho ensayo se está volviendo obsoleto.
- Al efectuar una comparación del resultado de absorción obtenido (18.6%) frente a normativa internacional, se ha observado el incumplimiento del parámetro máximo de 15.0% dictado por las normas IS 1725 (India) y SLS 1382 (Sri Lanka), en contraparte de la norma NBR 8491 (Brasil), que contempla un valor máximo del 22.0%, el cual se ha cumplido. Es necesario indicar que el valor obtenido (18.6%) se encuentra dentro del rango del 18% al 20% obtenido por Venkatarama Reddy & Latha (2013) para suelos con contenido de arcilla entre el 8% y 31.6%, considerando que el suelo empleado posee un 10.1% de arcilla.

### **7.1.5. Capítulo 5 – Aproximación hacia los costos de fabricación**

- El cemento posee una participación del 40.41% de los costos directos, superando ampliamente la participación de los demás materiales (suelo: 19.45%, ceniza: 3.59% y agua: 0.26%), sobrepasando incluso el costo de la mano de obra (31.50%), a pesar de representar solamente el 10.35% del peso total requerido de materiales, razón por la cual, es posible establecer que el cemento es un material que encarece de forma importante el costo de fabricación de los mampuestos de suelo estabilizado comprimido, lo que obliga a determinar con exactitud el contenido óptimo de cemento requerido para cada tipo de suelo a utilizar.
- En términos de costo por unidad de mampuesto, el costo de la ceniza es 11.24 veces menor que el costo del cemento, lo cual, al momento de efectuar un reemplazo del 20% del cemento, permite reducir el costo del aditivo aproximadamente en un 12.94%, suponiendo un ahorro de \$0.0126 por unidad fabricada y de \$846.72 por mes.
- El precio de venta seleccionado (\$0.40) resulta competitivo frente a los productos existentes en el mercado, considerando que el producto desarrollado poseería un acabado de alta calidad que superaría al acabado existente en los ladrillos artesanales de tipo mambrón y burrito (\$0.35 y \$0.25 respectivamente), y se podría comparar con el acabado disponible en productos de gama mayor, como es el caso de los bloques cerámicos (\$0.65 y \$0.70). No obstante, es necesario considerar que el producto desarrollado requiere de métodos constructivos diferentes y posee un ámbito de aplicabilidad diferente.

### **7.1.6. Capítulo 6 – Consideraciones de aplicación del producto en infraestructuras**

- La implementación del producto desarrollado, al estar sujeto a precauciones específicas de manejo, transporte, almacenamiento, construcción y elaboración de acabados, da la idea de que el mercado

ecuatoriano no percibiría positivamente su inclusión como reemplazo de los mampuestos convencionales disponibles en el mercado, por lo cual, su inclusión en el mercado resultaría viable solamente al edificar obras de infraestructura con los métodos constructivos específicos para este tipo de material, lo cual resulta una oportunidad para la implementación de un emprendimiento que fabrique el producto y desarrolle edificaciones con metodologías apropiadas, de forma que se constituya un círculo de calidad que permita una especialización hacia todos los procesos requeridos y presente una alternativa independiente a los métodos de construcción tradicionales, instaurando una edificación sostenible y competitiva.

- Los requerimientos de materiales necesarios para la edificación de obras de infraestructura con mampuestos de suelo estabilizado comprimido, a nivel de Ecuador, son de fácil cumplimiento, lo cual no sucede con obtención de mano de obra, que no puede ser obtenida del sector de la construcción convencional, obligando a capacitarla en los métodos constructivos requeridos, lo cual debería ser llevado a cabo con la intención de lograr especializarla hasta obtener la máxima productividad posible, de forma que se pueda adoptar la misma mano de obra para el desarrollo de diferentes proyectos.
- La utilización de mampuestos de suelo comprimido, dentro de los tipos de estructuras que se pueden desarrollar, está limitada solamente por las condiciones climáticas y la exposición a humedad, ante lo cual se han contemplado soluciones en términos de recubrimientos e incluso la construcción parcial con elementos de mampostería que no experimenten problemas ante este tipo de circunstancias. Por estas razones, se determina que la construcción de mampuestos de suelo estabilizado comprimido es viable al llevar a cabo las previsiones necesarias, en base a una investigación continua de métodos constructivos que implemente soluciones prácticas, sobre las cuales, en la actualidad, existe una gran base de experiencias a nivel internacional.

## **7.2. Recomendaciones**

---

### **7.2.1. Capítulo 1 - Generalidades**

- El crecimiento del volumen de producción de residuos agroindustriales, sumado a un déficit de soluciones para su procesamiento, constituye una oportunidad para su utilización en la elaboración de nuevos materiales de construcción dentro de diversos campos.
- Debido a la huella ecológica resultante del proceso de cocción de los ladrillos tradicionales cerámicos, las investigaciones sobre materiales de mampostería deben ser guiadas hacia el desarrollo de mampuestos de diferente naturaleza, ya sean cementados o geopolimerizados, que tengan prestaciones adecuadas, un precio competitivo y un proceso constructivo de sencilla implementación, de forma que sea posible suplir el uso de este material convencional.
- La disponibilidad de ceniza de bagazo de caña de azúcar en ingenios azucareros de varios puntos del país (Guayas, Cañar, Loja, Los Ríos e Imbabura) podría ser aprovechada a nivel nacional para el uso en el desarrollo de materiales de construcción, específicamente en el reemplazo del cemento, dentro de los campos de estabilización de suelos y la fabricación de hormigones y morteros, representando un material que podría ser investigado a profundidad.

### **7.2.2. Capítulo 2 - Mampostería**

- Dentro de los diferentes tipos de mampuestos ecológicos existentes, a nivel de Ecuador, resulta factible llevar a cabo investigación acerca de mampuestos de suelo estabilizado comprimido, dado que existen las facilidades para alcanzar los tres métodos de estabilización requeridos (mecánica, compactación y colocación de aditivos), existe oferta variada de equipos para la fabricación a nivel internacional que podrían ser importados a costos relativamente bajos, y existe una gran variedad de

residuos que pueden ser investigados con vista a reemplazar parcialmente los aditivos comúnmente empleados.

- La utilización de mampuestos ecológicos en proyectos de infraestructura permite tener una ventaja frente a los mampuestos convencionales desde el punto de vista de las certificaciones de construcción sostenible. El mampuesto desarrollado resulta apto para la construcción de edificaciones de baja altura, razón por la cual, podría resultar favorable para la obtención de certificaciones para conjuntos habitacionales de viviendas unifamiliares.

### **7.2.3. Capítulo 3 – Diseño de la mezcla**

- La existencia de una fracción excesiva de limos, como es el caso del suelo empleado, puede provocar que el mampuesto no tenga una resistencia adecuada para soportar la manipulación a edades tempranas, por lo cual, en el caso del suelo empleado, para nuevas investigaciones o el desarrollo de productos, conforme a lo señalado por Venkatarama Reddy (2012), se recomienda el reemplazo de una fracción de dicho material por arenas, de manera que sea posible alcanzar un contenido del 36% al 82%, límites recomendados por Murmu & Patel (2018), aunque es necesario considerar que dicho procedimiento aumentaría los costos de producción.
- Dado que el proceso de curado con humedad propicia la generación de productos de la hidratación del cemento, responsables de la formación de enlaces entre las partículas de suelo, se recomienda llevar a cabo un estudio sobre diferentes condiciones de curado replicables en la producción de mampuestos, de manera que sea posible estandarizar un método de curado que produzca los mejores resultados posibles.
- Considerando la naturaleza de las cenizas de bagazo de caña de azúcar como un material puzolánico, se recomienda experimentar con su procesamiento adicional en términos de reincineración, trituración y tamizado, como ha sido el caso de Bahurudeen & Santhanam (2015), con

la finalidad de alcanzar la mayor actividad puzolánica posible, buscando el aprovechamiento al máximo de dicha cualidad en el desarrollo de materiales de construcción.

#### **7.2.4. Capítulo 4 – Mampuesto ecológico**

- Tras señalar que el ensayo de absorción es una prueba en camino a ser obsoleta, en su lugar, se recomienda la evaluación de futuros productos en términos de diferentes parámetros de durabilidad, como ensayos de erosión o evaluación de ciclos de saturación y secado.
- Una posible introducción de mampuestos de bloques de suelo estabilizado comprimido al Ecuador, dada la inexistencia de normativa nacional aplicable, debería estar acompañada de una normativa nacional elaborada para este tipo de material, o en su defecto, de una normativa internacional cuyo uso sea autorizado a nivel nacional, de manera que sea posible definir parámetros específicos de cumplimiento para este tipo de material.
- Con la finalidad de cumplir con los requerimientos de absorción máxima que no se han cumplido, los cuales fueron establecidos por las normativas IS 1725 (India) y SLS 1382 (Sri Lanka), en base a Venkatarama Reddy & Latha, (2013), se propone reemplazar una porción de finos del material obtenido por arenas, dado que los mampuestos de suelo estabilizado comprimido elaborados con suelos de grano grueso presentan menores valores de absorción.

#### **7.2.5. Capítulo 5 – Aproximación hacia los costos de fabricación**

- La presente investigación ha desarrollado exclusivamente una aproximación de los costos del mampuesto propuesto, por lo cual, la viabilidad de la producción de este producto a gran escala se puede establecer únicamente mediante un estudio de mercado y un análisis económico-financiero.

- Se ha identificado que el costo de fabricación se podría optimizar al intervenir en el costo del cemento (directo), el personal complementario (indirecto) y los gastos administrativos y complementarios (indirecto), que representan los componentes de mayor impacto, con participaciones sobre el costo de fabricación del 24.26%, 20.95%, y 19.02%, respectivamente.
- Con la finalidad de generar el mayor impacto posible sobre el costo de fabricación, se recomienda actuar sobre el principal componente, el cemento, para lo cual, sería posible optimizar el contenido del cemento para cumplir con un requerimiento de resistencia de normativa específico, realizar reemplazos parciales con materiales puzolánicos mejorados (como es el caso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar reincinerada, triturada o tamizada), realizar un reemplazo total o parcial con cal (dependiendo del tipo de suelo, o consiguiendo una negociación con el proveedor).

#### **7.2.6. Capítulo 6 – Consideraciones de aplicación del producto en infraestructuras**

- El mampuesto desarrollado, al ser un producto que requiere consideraciones especiales desde el momento de la producción hasta el terminado en construcción, que son diferentes a las requeridas para los mampuestos convencionales, necesariamente precisa de un proceso de capacitación previa y control constante hacia todas las personas involucradas en cada uno de los procesos posteriores a la producción, con la finalidad de evitar la existencia de acciones negligentes que afecten la calidad y serviciabilidad del producto terminado en obra
- Dado que el mampuesto obtenido posee una alta densidad, el proceso constructivo deberá ser llevado a cabo mediante el uso de morteros de cal, considerando que estos poseen características de rigidez compatibles, y enlucidos de cal, en base a la compatibilidad de las características de variación de humedad y movimientos de contracción y retracción, para finalmente, colocar un acabado de pintura directamente, al estilo fresco, o

un acabado de pintura de cal. Todos estos procesos deberán ser ejecutados mediante mano de obra capacitada y especializada, que, de acuerdo a la experiencia de constructores a nivel internacional, puede entregar los mismos rendimientos esperados para la construcción de mampostería con materiales convencionales.

- El mercado ecuatoriano posee una completa inclinación hacia la construcción con materiales convencionales, como son las estructuras edificadas con ladrillos cocidos y los bloques de hormigón, que poseen un tipo de acabado distinto al requerido por el mampuesto propuesto. En base a que el producto desarrollado apunta hacia la construcción de viviendas unifamiliares, y tomando como ventaja el tipo de acabado final, complementado con un costo razonable y características funcionales positivas en materia de comportamiento térmico, resistencia mecánica y carácter ecológico, se recomienda que una posible introducción de este producto al mercado nacional se enfoque hacia la construcción de vivienda de estilo rústico.

## Referencias Bibliográficas

- Alavéz-Ramírez, R., Montes-García, P., Martínez-Reyes, J., Altamirano-Juárez, D. C., & Gochi-Ponce, Y. (2012). The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. *Construction and Building Materials*, *34*, 296–305.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.072>
- Albuja, J., & Rodríguez, P. (2012). Diseño de sistema de riego controlado mediante tubería para la Hacienda Santa Mercedes. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Alderetes, C. O. (2016). *Calderas a Bagazo - Proyecto, operación y mantenimiento* (1a ed.; C. O. Alderetes, Ed.). Corrientes: Moglia Ediciones SRL.
- Almazán del Olmo, O., Hernández, A., Brizuela, M. A., Carvajal, O., & Arias, G. N. (2013). *El bagazo de la caña de azúcar: conocimiento y potencial*. La Habana: ICIDCA.
- American Society for Testing and Materials. (2010). *ASTM E2392-M10. Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems*. West Conshohoken: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2012). *ASTM D1557-12. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>))*. West Conshohoken: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2014). *ASTM D854-14. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. West Conshohoken: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2017a). *ASTM D1633-17: Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders*. West Conshohoken: ASTM International.

- American Society for Testing and Materials. (2017b). *ASTM D2487-17. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohoken: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2017c). *ASTM D4318-17. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. West Conshohoken: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2017d). *ASTM D6913-17. Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. West Conshohoken: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2017e). *ASTM D7928-17. Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis*. West Conshohoken: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2019a). *ASTM C67/C67M-19: Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile*. West Conshohoken: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2019b). *ASTM D2216-19. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1520/D2216-19>
- Arumala, J. O., & Gondal, T. (2007). Compressed Earth Building Blocks For Affordable Housing. *The construction and building research conference of the Royal Institution of Chartered Surveyors*, (September), 1–18.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2008). *UNE 41410-2008. Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques: Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*. Madrid: AENOR.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1964). *NBR 8491-1964. Tijolo maciço de solo-cimento*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Association française de Normalisation. (2001). *XP P13-901-2001. Compressed*

*earth blocks for walls and partitions: definitions - specifications - test methods - delivery acceptance conditions.* Saint-Denis: AFNOR.

- Aureka. (2014). Auram Press 4000. Recuperado el 18 de septiembre de 2019, de Earth Construction equipment website: <http://www.aureka.com/earth-construction-equipment/auram-press-4000-e>
- Auroville Earth Institute. (2012). Compressed Stabilised Earth Block. Recuperado el 24 de septiembre de 2019, de [http://www.earth-auroville.com/compressed\\_stabilised\\_earth\\_block\\_en.php](http://www.earth-auroville.com/compressed_stabilised_earth_block_en.php)
- Bahurudeen, A., & Santhanam, M. (2015). Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. *Cement and Concrete Composites*, 56, 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.002>
- Barbuta, M., Bucur, R. D., Cimpeanu, S. M., Paraschiv, G., & Bucur, D. (2015). Wastes in Building Materials Industry. *IntechOpen, i(Wastes in Building Materials Industry)*, 13. <https://doi.org/10.5772/59933>
- Barranzuela Lescano, J. (2014). *Proceso productivo de los ladrillos de arcilla producidos en la región Piura* (Universidad de Piura). Recuperado de [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1755/ICI\\_199.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1755/ICI_199.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Biosfera Gestión Ambiental. (2012). *Auditoría Ambiental Inicial (Estudio De Impacto Ambiental Expost) Y Plan De Manejo Ambiental Del “Ingenio Azucarero Del Norte Compañía De Economía Mixta (LANCEM)”*. Recuperado de <http://www.tababuella.com/direcciones/BorradorEsIA.pdf>
- Bowen, T. (2017). *A Best Practices Manual for Using Compressed Earth Blocks in Sustainable Home Construction in Indian Country*. Boulder: U.S. Department of Housing and Urban Development.
- Bureau of Indian Standards. (1982). *IS 1725-1982. Soil Based Blocks used in General Building Construction*. Manak Bhawan: BIS.
- Cabo Laguna, M. (2011). *Ladrillo Ecológico como Material Sostenible para la*

*Construcción*. Universidad Pública de Navarra.

Camacho, A., & Mena, M. J. (2018). *Diseño y fabricación de un ladrillo ecológico como material sostenible de construcción y comparación de sus propiedades mecánicas con un ladrillo tradicional*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Castillo, R., & Silva, E. (2004). Fisiología , Floración y Mejoramiento Genetico de la Caña de Azúcar en Ecuador. *CINCAE*, (Publicación Técnica No. 3), 27.

Caterpillar. (2018). *Caterpillar Performance Handbook* (48a ed.). Recuperado de [https://wheelercat.com/wp-content/uploads/2018/07/SEBD0351\\_ED48.pdf](https://wheelercat.com/wp-content/uploads/2018/07/SEBD0351_ED48.pdf)

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador - CINCAE. (2013). Colección de germoplasmatle. Recuperado el 7 de julio de 2019, de <http://cincae.org/areas-de-investigacion/programa-de-variedades/variedades-introducidas/coleccion-de-germoplasma/>

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador - CINCAE. (2017). *Informe anual 2017*. Guayaquil.

Cerro-Prada, E. (2018). Cement Microstructure: Fostering Photocatalysis. *Intech*, (Cement Based Materials), 13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/57353>

Chalisgaonkar, C. (2003). *Computer Aided Concrete Mix Design*. New Delhi: Allied Publishers.

Construction Industries Division of the New Mexico Regulation & Licensing Department. (2009). *NMAC 14.7.4-2009. New Mexico Earthen Building Materials Code*. NMAC.

Corporación Financiera Nacional. (2017). *Ficha sectorial: Azúcar*. Quito.

Cún Sánchez, M. F. (2010). *Mejoramiento y tecnificación de extrusora para la elaboración de ladrillos artesanales* (Escuela Superior Politécnica del Litoral). Recuperado de <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/18982/1/D-90348.pdf>

- Day, R. (1999). *Geotechnical Engineer's Portable Handbook*. New York: McGraw-Hill Professional.
- Diario La Hora. (2012). Minutereros - Noticias Imbabura. Recuperado el 7 de julio de 2019, de <https://www.lahora.com.ec/noticia/1101404273/home>
- Earth Blocks India Private Ltd. (2018). Earth Blocks India. Recuperado el 2 de octubre de 2019, de <https://earthblock.in/>
- Enciso Peralta, F. (2012). *Ensayos a la unidad de albañilería*. Recuperado de [https://www.academia.edu/10643669/ENSAYOS\\_A\\_LA\\_UNIDAD\\_DE\\_ALBAÑILERIA\\_A\\_](https://www.academia.edu/10643669/ENSAYOS_A_LA_UNIDAD_DE_ALBAÑILERIA_A_)
- Esteve Cantón, M. (2016). *Estudio de las características del Bloque de Tierra Comprimida industrializado* (Universidad Politécnica de Madrid). Recuperado de <https://es.slideshare.net/MaraEsteveCantn/tfgestudio-de-las-caractersticas-del-bloque-de-tierra-comprimida-industrializado>
- Gambhir, M. L. (2006). *Fundamentals of Reinforced Concrete Design*. New Delhi: PHI Learning.
- Gamboa de León Régil, O. E. (2005). *Optimización del proceso de fabricación de bloques de concreto del estándar 15x20x40 cm con grado de resistencia 28 kg/cm<sup>2</sup>, caso específico fuerte block, máquinas #1 y #2* (Universidad de San Carlos de Guatemala). Recuperado de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_1468\\_IN.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1468_IN.pdf)
- Garófalo, A. (2015). *Evaluación físico-química de los cementos a partir de la correlación de sus propiedades asociadas con la producción de hormigón*. Recuperado de <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/98438/D-CD102084.pdf>
- GharPedia. (2019). How to Cure Concrete by Steam Curing at Ordinary Pressure? Recuperado el 2 de octubre de 2019, de <https://gharpedia.com/blog/how-to-cure-concrete-by-steam-curing-at-ordinary-pressure/>
- Haralambos, S. I. (2009). Compressive Strength of Soil Improved with Cement.

*Ground Modification, Problem Soils, and Geo-Support*, (International Foundation Congress and Equipment Expo), 289–296.

[https://doi.org/10.1061/41023\(337\)37](https://doi.org/10.1061/41023(337)37)

Holcim Ecuador. (2016). *Soluciones en cemento. Holcim Fuerte. Ficha técnica*. Holcim Ecuador S.A.

Ingenio Azucarero Del Norte. (2017). Caña de Azúcar. Recuperado el 14 de julio de 2019, de <https://www.tababuela.com/index.php/materia-prima/cana-de-azucar>

Institut national de la normalisation et de la propriété industrielle (Tunisian Standards). (1996). *NT 2133-1996. Blocs de terre comprimée ordinaires – spécifications techniques*. Tunisie: INNORPI.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2004). *NTC 5324-2004. Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificaciones. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega*. Bogotá: ICONTEC.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2009). *NTE INEN 156. Cemento hidráulico. Determinación de la densidad*. Quito: INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). *NTE INEN 2380-2011. Cemento Hidráulico. Requisitos de Desempeño para Cementos Hidráulicos*. (1a ed.). Quito: INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2018). *NTE INEN 3049-2018. Ladrillos cerámicos. Parte 1: Términos y definiciones, clasificación y requisitos de las dimensiones modulares*. Quito: INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2019a). *NTE INEN 3049-2019. Ladrillos cerámicos. Parte 2: Unidades de mampostería estructural. Requisitos*. Quito: INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2019b). *NTE INEN 3049-2019. Ladrillos cerámicos. Parte 3: Unidades de mampostería no estructural. Requisitos*. Quito: INEN.

- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2019c). *NTE INEN 3049-2019. Ladrillos cerámicos. Parte 4: Unidades de mampostería de fachada. Requisitos*. Quito: INEN.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2019d). *NTE INEN 3049-2019. Ladrillos cerámicos. Parte 5: Métodos de ensayo*. Quito: INEN.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2018). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua - ESPAC*. Recuperado de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/encuesta-de-superficie-y-produccion-agropecuaria-continua-bbd/>
- Irwan, J. M., Zamer, M. M., & Othman, N. (2016). A review on interlocking compressed earth blocks (ICEB) with addition of bacteria. *MATEC Web of Conferences*, 47, 2–6. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164701017>
- Jamsawang, P., Poorahong, H., Yoobanpot, N., Songpiriyakij, S., & Jongpradist, P. (2017). Improvement of soft clay with cement and bagasse ash waste. *Construction and Building Materials*, 154, 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.188>
- Jayasinghe, C., & Mallawaarachchi, R. S. (2009). Flexural strength of compressed stabilized earth masonry materials. *Materials and Design*, 30(9), 3859–3868. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.029>
- Jiménez López, L. (2005). *Técnica de la construcción con ladrillo* (Grupo Plan). Madrid.
- Joshi, R. C., & Lohita, R. P. (1997). *Fly Ash in Concrete: Production, Properties and Uses* (1a ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Jumaat, Z., Safiuddin, M., Salam, M. A., & Hashim, R. (2010). Utilization of solid wastes in construction materials. En *International Journal of the Physical Sciences*.
- Kazmi, S. M. S., Abbas, S., Saleem, M. A., Munir, M. J., & Khitab, A. (2016). Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane

- bagasse and rice husk ashes. *Construction and Building Materials*, 120, 29–41.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.084>
- Kenya Bureau of Standards. (1993). *KS 02-1070-1993. Specifications for Stabilized Soil Blocks*. Nairobi: KEBS.
- Know Sumo. (2015). Uses Of Bagasse. Recuperado el 14 de julio de 2019, de Simple Science website: <http://www.knowsumo.com/uses-of-bagasse/>
- Loh, Y. R., Sujan, D., Rahman, M. E., & Das, C. A. (2013). Sugarcane bagasse - The future composite material: A literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, 75, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.03.002>
- Luna-Cañas, L. M., Ríos-Reyes, C. A., & Quintero-Ortíz, L. A. (2014). Recycling of agroindustrial solid wastes as additives in brick manufacturing for development of sustainable construction materials. *Dyna*, 81(188), 34–41.  
<https://doi.org/10.15446/dyna.v81n188.39717>
- Macmillan Education. (2019). Macmillan Dictionary. Recuperado el 3 de julio de 2019, de <https://www.macmillandictionary.com/dictionary/british/ecological>
- Madurwar, M. V., Ralegaonkar, R. V., & Mandavgane, S. A. (2013). Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.011>
- Minke, G. (2006). *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Basel: Birkhäuser.
- Morel, J.-C., Pkla, A., & Walker, P. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 21(2), 303–309.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021>
- Morton, T. (2010). Earth Masonry: Design and Construction Guidelines. En *Design and Construction Guidelines* (1a ed.). Watford: IHS BRE Press.
- Murmu, A. L., & Patel, A. (2018). Towards sustainable bricks production: An overview. *Construction and Building Materials*, 165, 112–125.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.038>

- Naciones Unidas. (1987). Nuestro futuro común. En *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*.  
<https://doi.org/10.3917/ridp.723.0975>
- Noble Alchem Private Limited. (2019). Geopolymer. Recuperado el 2 de octubre de 2019, de <http://noblealchem.com/geopolymer/>
- Pérez Quintero, M. (2019). Quiénes Somos. Recuperado el 12 de septiembre de 2019, de Federación Nacional de Azucareros del Ecuador website:  
<http://fenazucar.com.ec/quienes-somos/>
- Portland Cement Association. (1992). *Soil-Cement Laboratory Handbook*. Skokie: PCA.
- Real Academia Española. (2018). Diccionario de la lengua española. Recuperado el 1 de julio de 2019, de <https://dle.rae.es/?id=O70ZsUv>
- Reddy, N., & Yang, Y. (2015). Fibers from Sugarcane Bagasse. En *Innovative Biofibers from Renewable Resources* (pp. 29–30). [https://doi.org/10.1007/978-3-662-45136-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-45136-6_8)
- Revista Líderes. (2016). La industria azucarera proyecta un año con bajos indicadores Este contenido ha sido publicado originalmente por Revista Líderes en la siguiente dirección: <https://www.revistalideres.ec/lideres/industria-azucar-produccion-impuestos-bebidas.html>. Si está pe. Recuperado el 7 de julio de 2019, de <https://www.revistalideres.ec/lideres/industria-azucar-produccion-impuestos-bebidas.html>
- Riza, F. V., Rahman, I. A., Mujahid, A., & Zaidi, A. (2010). A brief review of Compressed Stabilized Earth Brick (CSEB). *CSSR 2010 - 2010 International Conference on Science and Social Research*, (January), 999–1004.  
<https://doi.org/10.1109/CSSR.2010.5773936>
- Rocha Tamayo, E. (2011). Construcciones sostenibles: materiales, certificaciones y LCA. *Nodo: Arquitectura. Ciudad. Medio Ambiente.*, 6(11), 99–116.
- Rodgers, L. (2018, diciembre). Climate change: The massive CO2 emitter you may

not know about. *BBC News - Science & Environment*. Recuperado de  
<https://www.bbc.com/news/science-environment-46455844>

Rosseira, A., Sarbini, N. N., Ibrahim, I. S., Shukor Lim, N. H. A., Mohd Sam, A. R., & Nazira Abkarim, N. F. (2018). Overview of the Influence of Burning Temperature and Grinding Time to the Properties of Cementitious Material based Agricultural Waste Products. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 431(8). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/431/8/082004>

Sistema de Indicadores de Soberanía y Seguridad Alimentaria y Nutricional SISSAN. (s/f). Superficie de cultivos permanentes. Recuperado el 5 de julio de 2019, de  
[http://www.siise.gob.ec/siiseweb/PageWebs/SISSAN/ficsan\\_K006.htm](http://www.siise.gob.ec/siiseweb/PageWebs/SISSAN/ficsan_K006.htm)

Sri Lanka Standards Institute. (2009). *SLS 1382-2009. Specification for Compressed Stabilized Earth Blocks, Part 1: Requirements*. Colombo: SLSI.

Srinivasan, V. R., & Han, Y. W. (1969). Utilization of Bagasse. *Advances in Chemistry*, (Cellulases and Their Applications), 447–460.  
<https://doi.org/10.1021/ba-1969-0095.ch025>

Standards Association of Zimbabwe. (2001). *SAZS 724-2001. Standard Code of Practice for Rammed Earth Structures*. Harare: SAZ.

Standards New Zealand. (1998). *NZS 4298-1998. Materials and workmanship for earth buildings*. Wellington: SNZ.

Sutton, A., Black, D., & Walker, P. (2011). Unfired Clay Masonry : An Introduction to low-impact building materials. *Information Paper, BRE Publication*, 1–6.  
Recuperado de  
[https://www.bre.co.uk/filelibrary/pdf/projects/low\\_impact\\_materials/IP16\\_11.pdf](https://www.bre.co.uk/filelibrary/pdf/projects/low_impact_materials/IP16_11.pdf)

Swiss Resource Centre and Consultancies for Development. (2017). *Concrete Blocks*. Recuperado de <http://skat.ch/wp-content/uploads/2017/01/concreteblocks.pdf>

- Tan, K. H. (2011). *Principles of Soil Chemistry* (4a ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Taylor, H. F. W. (1997). *Cement Chemistry* (2a ed.). London: Thomas Telford Publishing.
- The Brick Industry Association. (2006). Manufacturing of Brick. *Technical Notes on Brick Construction*, 9(December 2006), 1–7. Recuperado de <http://www.gobrick.com/docs/default-source/read-research-documents/technicalnotes/9-manufacturing-of-brick.pdf?sfvrsn=0>
- The Royal Academy of Engineering. (2010). *The Mathematics of Material Quality Control* (pp. 1–6). pp. 1–6. Recuperado de <https://www.raeng.org.uk/publications/other/6-concrete-testing>
- Torres Agredo, J., Mejía de Gutierrez, R., Escandón Giraldo, C. E., & González Salcedo, L. O. (2014). Characterization of sugar cane bagasse ash as supplementary material for Portland cement. *Ingeniería e Investigación*, 34(1), 5–10.
- Vargas Peñate, S. (1990). *Bioteología: amenazas y perspectivas para el desarrollo de América Central* (SELA-CADES). San José.
- Venkatarama Reddy, B. V. (2012). Stabilised soil blocks for structural masonry in earth construction. En *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications*. <https://doi.org/10.1533/9780857096166.3.324>
- Venkatarama Reddy, B. V., & Latha, M. S. (2013). Influence of soil grading on the characteristics of cement stabilised soil compacts. *Materials and Structures*, 47(10), 1633–1645. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0142-1>
- Walker, P. (1997). Characteristics of Pressed Earth Blocks in Compression. *Proceedings of the 11th International Brick/Block Masonry Conference: Shanghai, P.R. China*, 2(1), 1–10. Recuperado de <http://www.hms.civil.uminho.pt/ibmac/1997/1.pdf>
- World Green Building Council. (2019). About Green Building. Recuperado el 2 de agosto de 2019, de <https://www.worldgbc.org/what-green-building>

- Xu, Q., Ji, T., Gao, S. J., Yang, Z., & Wu, N. (2018). Characteristics and applications of sugar cane bagasse ash waste in cementitious materials. *Materials*, *12*(1), 1–19. <https://doi.org/10.3390/ma12010039>
- Zambonino, J. (2013). *Análisis de alternativas para el tratamiento de aguas industriales del Ingenio Azucarero del Norte IANCEM* (Universidad Central del Ecuador). Recuperado de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/609/1/T-UCE-0012-141.pdf>
- Zhang, L. (2013). Production of bricks from waste materials - A review. *Construction and Building Materials*, *47*, 643–655. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043>