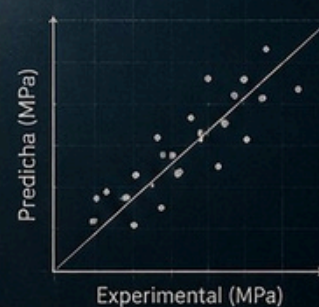
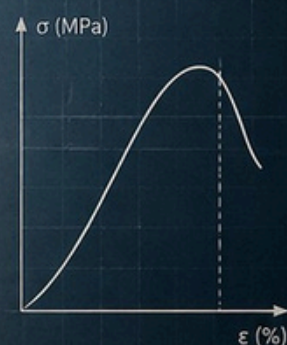


ENTRE LA COMPRESIÓN — Y LA — RUPTURA

PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA
EN LADRILLOS DE TIERRA COMPRIMIDA
EN LOS ANDES DEL PERÚ



Jesús Ángel Huamán Chávez, Carlos Alberto Jesus Sedano,
Severo Simeon Calderon Samaniego, Maribel Carmen Ruiz
Balvin, Fidel Castro Cayllahua

Entre la Compresión y la Ruptura
Predicción de la Resistencia Mecánica
en Ladrillos de Tierra Comprimida en
los Andes del Perú

Editor



Jesús Ángel Huamán Chávez

jhuamanch@continental.edu.pe

 <https://orcid.org/0009-0008-7908-6586>

Universidad Continental, Lima - Perú

Carlos Alberto Jesus Sedano

cjesusedano@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0003-1014-6791>

Universidad Peruana Los Andes, Lima - Perú

Severo Simeon Calderon Samaniego

d.scalderon@upla.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0001-9758-699X>

Universidad Peruana Los Andes, Lima - Perú

Maribel Carmen Ruiz Balvin

maribelruizbalvin77@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-3426-128X>

Universidad Nacional del Centro del Perú, Lima - Perú

Fidel Castro Cayllahua

d.fcastro@ms.upla.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0001-8521-8524>

Universidad Peruana Los Andes, Lima - Perú

RESEÑA

El presente libro desarrolla un análisis integral sobre la evaluación mecánica de los ladrillos de tierra comprimida (CEB/LTC), abordando una de las principales limitaciones en su estudio y aplicación: la dificultad para determinar de manera accesible la resistencia a tracción en materiales de comportamiento frágil. A través de un enfoque que combina fundamentos teóricos, experimentación y modelamiento matemático, la obra propone una alternativa innovadora para la caracterización de este tipo de materiales en contextos reales.

En una primera parte, el libro presenta un desarrollo teórico sólido sobre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción, analizando los factores que influyen en el comportamiento mecánico de los materiales de tierra estabilizada. Se abordan aspectos como la granulometría, la dosificación de cemento, la compactación y el tiempo de curado, integrando aportes de la mecánica de materiales y la ingeniería geotécnica. Esta base conceptual permite comprender la naturaleza del material y establecer los fundamentos para el análisis experimental.

Posteriormente, la obra introduce un caso de estudio en el que se evalúan ladrillos de tierra comprimida elaborados bajo distintas condiciones de dosificación y curado. A través de ensayos de resistencia a compresión y del desarrollo de un método empírico de tracción —denominado **Tensile Field Test**—, se obtienen resultados que permiten analizar el comportamiento del material desde una perspectiva cuantitativa y cualitativa. Este método constituye uno de los principales aportes del libro, al ofrecer una herramienta accesible, reproducible y fundamentada en principios físicos.

Uno de los aspectos más destacados de la obra es el desarrollo de un modelo matemático que establece una relación funcional entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción. Mediante el uso de funciones logarítmicas, modelos polinómicos y técnicas de regresión avanzada como Ridge, se logra construir una herramienta predictiva con un alto nivel de ajuste, permitiendo estimar propiedades mecánicas complejas a partir de ensayos más simples.

El libro también incorpora un análisis correlacional detallado y un proceso de validación del modelo, evidenciando la coherencia entre los resultados experimentales y las predicciones matemáticas. Este enfoque refuerza la confiabilidad del método propuesto y demuestra su aplicabilidad en contextos prácticos, especialmente en entornos donde el acceso a tecnología avanzada es limitado.

En términos de contribución, la obra se posiciona como un aporte significativo al campo de los materiales de construcción sostenibles, al integrar conocimiento técnico con soluciones prácticas. Su enfoque permite no solo mejorar la caracterización de los ladrillos de tierra comprimida, sino también promover su uso en la ingeniería civil como una alternativa viable, económica y ambientalmente responsable.

Dirigido a investigadores, ingenieros, docentes y profesionales del sector construcción, este libro ofrece herramientas teóricas y metodológicas que facilitan la comprensión y evaluación de materiales no convencionales. Asimismo, abre nuevas líneas de investigación orientadas al desarrollo de metodologías accesibles y al fortalecimiento de tecnologías constructivas sostenibles.

En síntesis, la obra combina rigor científico, innovación metodológica y aplicabilidad práctica, consolidándose como una referencia relevante para el estudio y uso de los ladrillos de tierra comprimida en la ingeniería contemporánea.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| RESEÑA..... | 1 |
| INTRODUCCION..... | 9 |
| CAPITULO I | 11 |
| 1.1 Referentes teóricos sobre resistencia a compresión..... | 12 |
| 1.1.1. Evolución del uso de materiales de tierra en la construcción..... | 13 |
| 1.1.2. Estudios internacionales sobre CEB/LTC..... | 15 |
| 1.1.3. Influencia del tipo de suelo en la resistencia..... | 17 |
| 1.1.4. Impacto de la dosificación de cemento en el comportamiento mecánico .. | 19 |
| 1.1.5. Influencia del proceso de compactación | 21 |
| 1.1.6. Relación entre densidad y resistencia..... | 23 |
| 1.1.7. Comparación entre materiales tradicionales y materiales de tierra estabilizada | 25 |
| 1.1.8. Investigaciones recientes sobre optimización de resistencia en materiales sostenibles | 27 |
| 1.2 Nociones básicas de la resistencia a compresión | 29 |
| 1.2.1. Definición de resistencia a compresión..... | 30 |
| 1.2.2. Fundamentos de mecánica de materiales aplicados a suelos estabilizados | 32 |
| 1.2.3. Variables que influyen en la resistencia:..... | 34 |
| 1.2.4. Comportamiento esfuerzo-deformación..... | 44 |
| 1.2.5. Modos de falla en materiales frágiles..... | 45 |
| 1.2.6. Métodos de ensayo normalizados..... | 47 |
| 1.2.7. Limitaciones de los ensayos convencionales | 49 |
| 1.2.8. Interpretación de resultados en CEB | 51 |
| CAPÍTULO II | 56 |
| 2.1 Referentes teóricos sobre resistencia a tracción..... | 57 |
| 2.1.1. Importancia de la resistencia a tracción en materiales frágiles | 59 |
| 2.1.2. Diferencia entre tracción directa e indirecta..... | 61 |
| 2.1.3. Estudios previos en materiales similares (concreto, adobe, suelo-cemento) | 63 |
| 2.1.4. Métodos tradicionales de evaluación de tracción..... | 65 |
| 2.1.5. Limitaciones técnicas y económicas de los ensayos convencionales..... | 67 |

| | |
|---|-----|
| 2.1.6. Investigaciones sobre correlaciones mecánicas | 69 |
| 2.1.7. Fundamentos físicos de la tracción en sólidos | 71 |
| 2.2 Nociones básicas de la resistencia a tracción | 73 |
| 2.2.1. Definición de resistencia a tracción..... | 74 |
| 2.2.2. Principios de equilibrio de fuerzas | 76 |
| 2.2.3. Relación esfuerzo–área..... | 77 |
| 2.2.4. Comportamiento del material bajo carga tensional..... | 79 |
| 2.2.5. Mecanismos de falla por tracción..... | 81 |
| 2.2.6. Variables que afectan la resistencia a tracción:..... | 83 |
| 2.2.7. Introducción a ensayos no estandarizados..... | 89 |
| 2.2.8. Fundamento del Tensile Field Test | 91 |
| 2.2.9. Ventajas del ensayo empírico en contextos reales | 93 |
| CAPÍTULO III | 97 |
| 3.1 Diseño metodológico del estudio | 98 |
| 3.1.1. Tipo y enfoque de investigación | 100 |
| 3.1.2. Diseño experimental..... | 101 |
| 3.1.3. Variables de estudio: | 103 |
| 3.1.4. Número de muestras (120 por dosificación) | 108 |
| 3.1.5. Procedimiento general..... | 110 |
| 3.2 Caracterización del material..... | 111 |
| 3.2.1. Clasificación del suelo (SUCS y AASHTO)..... | 112 |
| 3.2.2. Análisis granulométrico | 114 |
| 3.2.3. Límites de Atterberg..... | 116 |
| 3.2.4. Determinación de humedad óptima..... | 117 |
| 3.2.5. Densidad seca máxima | 119 |
| 3.3 Elaboración de los ladrillos CEB/LTC | 121 |
| 3.3.1. Selección de materiales | 122 |
| 3.3.2. Proceso de mezclado | 123 |
| 3.3.3. Compactación..... | 125 |
| 3.3.4. Prensado manual..... | 127 |
| 3.3.5. Curado | 129 |

| | |
|--|-----|
| 3.3.6. Control dimensional | 131 |
| 3.4 Ensayo de resistencia a compresión | 133 |
| 3.4.1. Equipos utilizados | 135 |
| 3.4.2. Procedimiento experimental..... | 137 |
| 3.4.3. Condiciones de carga..... | 140 |
| 3.4.4. Cálculo de la resistencia | 142 |
| 3.5 Ensayo de tracción empírico (Tensile Field Test)..... | 144 |
| 3.5.1. Descripción del sistema..... | 146 |
| 3.5.2. Componentes estructurales..... | 149 |
| 3.5.3. Principio de funcionamiento | 151 |
| 3.5.4. Aplicación de carga mediante agua..... | 153 |
| 3.5.5. Generación del vector de fuerza..... | 155 |
| 3.5.6. Procedimiento experimental..... | 157 |
| 3.5.7. Cálculo de resistencia a tracción | 158 |
| 3.6 Resultados experimentales | 160 |
| 3.6.1. Resultados de compresión | 162 |
| 3.6.2. Resultados de tracción..... | 163 |
| 3.6.3. Influencia del cemento | 165 |
| 3.6.4. Influencia del tiempo de curado | 167 |
| 3.6.5. Identificación de dosificación óptima (20% – 28 días)..... | 168 |
| 3.7 Análisis correlacional..... | 170 |
| 3.7.1. Relación entre compresión y tracción | 171 |
| 3.7.2. Coeficiente de correlación ($r = 0.77$)..... | 173 |
| 3.7.3. Interpretación de resultados..... | 174 |
| 3.8 Modelamiento matemático..... | 176 |
| 3.8.1. Desarrollo de función logarítmica..... | 177 |
| 3.8.2. Modelo polinómico | 179 |
| 3.8.3. Aplicación de regresión Ridge | 181 |
| 3.8.4. Evaluación del modelo | 183 |
| 3.8.5. Coeficiente de determinación ($R^2 \approx 87.62\%$)..... | 184 |
| 3.9 Validación del modelo | 186 |

| | |
|---|------------|
| 3.9.1. Comparación entre valores experimentales y predichos | 187 |
| 3.9.2. Análisis de error | 189 |
| 3.9.3. Aplicabilidad en campo..... | 191 |
| REFLEXIONES FINALES | 193 |
| BIBLIOGRAFIA | 196 |

INTRODUCCION

La evaluación mecánica de los materiales de construcción constituye un aspecto fundamental para garantizar su desempeño estructural y su seguridad en servicio. En el caso de los ladrillos de tierra comprimida, ampliamente utilizados en contextos de producción artesanal y semiindustrial, esta evaluación presenta limitaciones importantes debido a la predominancia de métodos empíricos que carecen de rigurosidad técnica. Esta situación genera incertidumbre en la calidad del material, especialmente en lo referido a su comportamiento frente a esfuerzos mecánicos, lo que repercute directamente en la confiabilidad de las edificaciones donde se emplea.

En muchos entornos productivos, la caracterización de estos ladrillos se realiza mediante prácticas tradicionales basadas en la experiencia del fabricante, sin el respaldo de procedimientos estandarizados ni equipamiento especializado. Si bien estos métodos permiten una aproximación inicial al comportamiento del material, resultan insuficientes para establecer parámetros técnicos consistentes, particularmente cuando se requiere evaluar propiedades como la resistencia a tracción, la cual es determinante en la comprensión del comportamiento estructural de materiales frágiles.

Paralelamente, el creciente interés por el uso de materiales sostenibles en la construcción ha impulsado la revalorización de tecnologías constructivas basadas en tierra. Los ladrillos de tierra comprimida se posicionan como una alternativa eficiente debido a su bajo impacto ambiental, su disponibilidad local y su reducido consumo energético en comparación con materiales convencionales. No obstante, su adopción a mayor escala exige superar las limitaciones asociadas a la falta de control técnico en su fabricación y evaluación, lo que implica desarrollar herramientas que permitan validar su desempeño de manera confiable.

Uno de los principales vacíos en este campo es la inexistencia de metodologías estandarizadas para la determinación de la resistencia a tracción en ladrillos de tierra comprimida. A diferencia de la resistencia a compresión, que cuenta con procedimientos

más consolidados, la evaluación de la tracción suele omitirse o reemplazarse por estimaciones indirectas. Esta limitación impide una caracterización completa del material, afectando la posibilidad de predecir su comportamiento ante sollicitaciones reales.

Frente a esta problemática, surge la necesidad de establecer relaciones funcionales entre las propiedades mecánicas más relevantes del material, en particular entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción. La correlación entre estas variables permite no solo comprender mejor el comportamiento del material, sino también desarrollar modelos predictivos que faciliten la estimación de propiedades difíciles de medir en condiciones convencionales.

En este marco, el presente estudio propone el desarrollo y aplicación de un sistema experimental accesible para la evaluación de la resistencia a tracción, basado en principios físicos fundamentales y adaptado a condiciones de campo. Este sistema busca constituirse como una alternativa viable frente a la ausencia de normativas específicas, permitiendo obtener resultados consistentes mediante procedimientos replicables.

Adicionalmente, se incorpora un enfoque de modelamiento matemático orientado a establecer una relación cuantitativa entre las variables estudiadas, utilizando herramientas de análisis estadístico que permitan validar la capacidad predictiva del modelo propuesto. La combinación de experimentación y modelamiento representa un aporte significativo para la comprensión del comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida, contribuyendo al fortalecimiento de su aplicación en la ingeniería civil contemporánea.

De esta manera, el desarrollo de este trabajo se orienta no solo a la generación de conocimiento técnico, sino también a la propuesta de soluciones prácticas que puedan ser implementadas en contextos reales de producción, promoviendo una construcción más sostenible, accesible y técnicamente fundamentada.

CAPITULO I

RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN LADRILLOS DE TIERRA COMPRIMIDA

La resistencia a compresión constituye una de las propiedades mecánicas más relevantes en el análisis y diseño de materiales de construcción, especialmente en aquellos destinados a trabajar predominantemente bajo cargas verticales, como es el caso de los ladrillos de tierra comprimida. Esta propiedad no solo permite evaluar la capacidad portante del material, sino que también sirve como parámetro base para estimar su comportamiento estructural, su durabilidad y su idoneidad en diferentes aplicaciones constructivas.

En el contexto de los ladrillos de tierra comprimida, la resistencia a compresión adquiere una importancia particular debido a la naturaleza heterogénea del material, el cual depende en gran medida de las características del suelo utilizado, la dosificación de estabilizantes, el contenido de humedad y las condiciones del proceso de fabricación. A diferencia de materiales industrializados con alta uniformidad, estos ladrillos presentan variabilidad en sus propiedades, lo que hace indispensable comprender los factores que influyen en su desempeño mecánico.

El proceso de compactación del suelo, junto con la incorporación de agentes estabilizantes como el cemento, modifica significativamente la estructura interna del material, incrementando su densidad y mejorando su capacidad para resistir cargas. Sin embargo, este comportamiento no es lineal ni uniforme, ya que intervienen múltiples variables que condicionan el desarrollo de la resistencia a lo largo del tiempo, particularmente durante el periodo de curado.

Asimismo, la resistencia a compresión no debe analizarse de manera aislada, sino como parte de un conjunto de propiedades interrelacionadas que definen el comportamiento global del material. En este sentido, su estudio permite establecer bases para comprender

otras propiedades mecánicas, como la resistencia a tracción, facilitando el desarrollo de modelos que integren distintas variables en la predicción del desempeño del material.

Este capítulo aborda, en primer lugar, los principales referentes teóricos relacionados con la resistencia a compresión en materiales de tierra estabilizada, considerando aportes de investigaciones previas y avances recientes en el campo de los materiales sostenibles. Posteriormente, se desarrollan las nociones fundamentales que explican el comportamiento del material bajo cargas compresivas, analizando las variables que influyen en su resistencia y los mecanismos de falla asociados.

El objetivo es proporcionar un marco conceptual sólido que permita interpretar adecuadamente los resultados experimentales y sustentar el análisis correlacional que se desarrollará en capítulos posteriores, contribuyendo a una comprensión integral del comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida.

1.1 REFERENTES TEÓRICOS SOBRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

El estudio de la resistencia a compresión en materiales de construcción ha sido ampliamente abordado en la literatura científica debido a su papel determinante en la evaluación del desempeño estructural. En el caso de los ladrillos de tierra comprimida, este análisis adquiere particular relevancia al tratarse de un material cuya composición y comportamiento dependen directamente de factores naturales y de procesos de fabricación no siempre estandarizados.

A lo largo del tiempo, diversas investigaciones han permitido comprender cómo variables como la granulometría del suelo, el contenido de finos, la plasticidad, la humedad y la energía de compactación influyen en la resistencia final del material. Asimismo, la incorporación de estabilizantes, principalmente cemento, ha sido objeto de numerosos estudios que evidencian mejoras significativas en las propiedades mecánicas, aunque también introducen nuevas dinámicas en el comportamiento del material, especialmente en relación con su rigidez y modo de falla.

Los avances en el campo de los materiales sostenibles han impulsado un renovado interés por los sistemas constructivos basados en tierra, promoviendo investigaciones orientadas a optimizar su desempeño sin comprometer sus ventajas ambientales. En este contexto, la resistencia a compresión ha sido utilizada como indicador principal para comparar diferentes dosificaciones, técnicas de fabricación y condiciones de curado, permitiendo establecer criterios técnicos para su uso en aplicaciones estructurales y no estructurales.

Por otro lado, el desarrollo de metodologías experimentales y modelos analíticos ha contribuido a mejorar la comprensión del comportamiento mecánico de estos materiales. Sin embargo, persisten desafíos asociados a la variabilidad de los resultados y a la falta de uniformidad en los procedimientos de ensayo, lo que dificulta la generalización de conclusiones y la formulación de normas técnicas aplicables a distintos contextos.

En este apartado se revisan los principales aportes teóricos y estudios relevantes relacionados con la resistencia a compresión en ladrillos de tierra comprimida, con el propósito de establecer una base conceptual que permita contextualizar el presente trabajo. Este análisis no solo considera investigaciones previas, sino que también incorpora enfoques recientes que buscan integrar criterios de sostenibilidad, eficiencia y accesibilidad en la evaluación de materiales de construcción.

1.1.1. Evolución del uso de materiales de tierra en la construcción

El uso de la tierra como material de construcción se remonta a las primeras civilizaciones humanas, constituyéndose como uno de los recursos más antiguos y ampliamente utilizados en la edificación de viviendas y estructuras. Desde las construcciones en adobe en Mesopotamia y Egipto hasta las técnicas de tapial en diversas regiones de Asia, África y América Latina, la tierra ha sido empleada por su disponibilidad, facilidad de manejo y adecuadas propiedades térmicas. Estas técnicas tradicionales permitieron el desarrollo de sistemas constructivos adaptados a condiciones climáticas y

culturales específicas, consolidando un conocimiento empírico transmitido a lo largo de generaciones (Houben & Guillaud, 1994).

Durante siglos, los materiales de tierra dominaron la construcción en zonas rurales y urbanas, siendo el adobe uno de los sistemas más difundidos. Sin embargo, con la industrialización y el auge de materiales como el concreto y el acero en el siglo XX, el uso de la tierra fue progresivamente desplazado, principalmente debido a la percepción de baja resistencia, durabilidad limitada y ausencia de normativas técnicas que respaldaran su uso estructural (Walker, 2005). Este cambio estuvo acompañado de una creciente estandarización de los materiales industriales, lo que reforzó su adopción en proyectos de mayor escala.

No obstante, en las últimas décadas se ha producido un resurgimiento del interés por los materiales de tierra, impulsado por la necesidad de adoptar soluciones constructivas más sostenibles. Este renovado enfoque reconoce las ventajas ambientales de la tierra, como su bajo consumo energético, reducida emisión de gases contaminantes y mínima huella de carbono en comparación con materiales convencionales (Minke, 2012). Asimismo, su capacidad de regulación térmica y su disponibilidad local la convierten en una alternativa viable para el desarrollo de viviendas de bajo costo y alto confort.

En este contexto, han surgido tecnologías mejoradas que buscan superar las limitaciones de los sistemas tradicionales. Entre ellas destacan los ladrillos de tierra comprimida (CEB o LTC), los cuales incorporan procesos de compactación mecánica y, en muchos casos, estabilización con cemento o cal. Estas innovaciones permiten obtener unidades con mayor resistencia mecánica, mejor uniformidad y mayor durabilidad, facilitando su uso en aplicaciones estructurales (Walker et al., 2007).

Diversos estudios han demostrado que la incorporación de estabilizantes y el control de variables como la granulometría y la humedad permiten optimizar significativamente las propiedades del material. Además, el desarrollo de normativas técnicas en distintos países

ha contribuido a validar el uso de estos materiales en proyectos formales, promoviendo su integración en la ingeniería contemporánea (Reddy & Gupta, 2006).

A pesar de estos avances, aún persisten desafíos relacionados con la estandarización de los métodos de ensayo y la variabilidad inherente del material. En particular, la evaluación de propiedades mecánicas como la resistencia a tracción continúa siendo limitada, lo que evidencia la necesidad de seguir desarrollando herramientas técnicas que permitan una caracterización más completa y confiable.

En síntesis, la evolución del uso de materiales de tierra en la construcción refleja un tránsito desde prácticas empíricas tradicionales hacia enfoques más técnicos y sostenibles. Este proceso ha permitido revalorizar un material ancestral, adaptándolo a las exigencias actuales mediante la incorporación de conocimientos científicos y tecnológicos que buscan garantizar su desempeño estructural y su viabilidad a largo plazo.

1.1.2. Estudios internacionales sobre CEB/LTC

En las últimas décadas, los ladrillos de tierra comprimida (CEB/LTC) han sido objeto de un creciente número de investigaciones a nivel internacional, motivadas principalmente por la búsqueda de materiales de construcción sostenibles, económicos y de bajo impacto ambiental. Este interés ha dado lugar a una amplia diversidad de estudios enfocados en la caracterización mecánica, la optimización de mezclas, la incorporación de estabilizantes y el análisis del comportamiento estructural de estos materiales en distintos contextos geográficos.

Uno de los aspectos más investigados ha sido la resistencia a compresión como indicador principal de calidad. Diversos estudios han demostrado que esta propiedad depende significativamente de variables como la densidad seca, el contenido de cemento y la humedad del material. En este sentido, se ha evidenciado que existe una relación directa entre el incremento de la energía de compactación y la resistencia mecánica, así como una correlación positiva con el porcentaje de estabilizante incorporado. Asimismo, investigaciones experimentales han señalado que contenidos de cemento entre 4% y 12%

permiten alcanzar valores de resistencia superiores a los mínimos requeridos para aplicaciones estructurales básicas, especialmente cuando se combinan con adecuados procesos de curado.

En paralelo, numerosos estudios han explorado la influencia de la composición del suelo en el desempeño mecánico de los CEB. Se ha identificado que la proporción de arena, limo y arcilla juega un papel determinante en la resistencia final, existiendo combinaciones óptimas que maximizan la capacidad portante del material. Por ejemplo, investigaciones recientes indican que un incremento excesivo de arena no siempre mejora la resistencia, evidenciando la existencia de proporciones óptimas en la mezcla suelo-cemento. Este comportamiento refleja la complejidad del material y la necesidad de un control adecuado de sus componentes.

Otro campo relevante dentro de los estudios internacionales es el análisis del uso de estabilizantes alternativos y materiales reciclados. Investigaciones recientes han evaluado la incorporación de cementos reciclados, cenizas y fibras naturales, demostrando que estos pueden mejorar las propiedades mecánicas y reducir el impacto ambiental del material. Por ejemplo, se ha comprobado que la sustitución parcial del cemento por materiales reciclados puede mantener niveles adecuados de resistencia, al tiempo que contribuye a la sostenibilidad del proceso constructivo.

Asimismo, el desarrollo de investigaciones comparativas ha permitido posicionar a los CEB como una alternativa viable frente a materiales convencionales. Aunque su resistencia a compresión suele ser inferior a la de los ladrillos cocidos o bloques de concreto, diversos estudios indican que los valores obtenidos (generalmente entre 2 y 5 MPa) son suficientes para viviendas de baja altura, especialmente en contextos de construcción sostenible. Además, su bajo costo y disponibilidad local los convierten en una solución estratégica para programas de vivienda social y desarrollo rural.

Por otro lado, revisiones recientes de la literatura científica han evidenciado un avance significativo en la comprensión integral del comportamiento de los CEB, incluyendo

propiedades mecánicas, térmicas e higroscópicas. Estas investigaciones resaltan la importancia de integrar múltiples variables en el análisis del material, así como la necesidad de continuar desarrollando metodologías que permitan mejorar su desempeño y ampliar su campo de aplicación.

A pesar de estos avances, persisten desafíos importantes en la estandarización de los métodos de ensayo y en la reducción de la variabilidad de resultados entre estudios. En particular, la mayoría de las investigaciones se han centrado en la resistencia a compresión, mientras que otras propiedades, como la resistencia a tracción, han recibido menor atención, lo que evidencia una brecha en el conocimiento técnico que aún requiere ser abordada.

En conjunto, los estudios internacionales sobre CEB/LTC han permitido consolidar una base científica sólida que respalda su uso como material de construcción sostenible. Sin embargo, también han puesto en evidencia la necesidad de continuar investigando y desarrollando herramientas que permitan una caracterización más completa, precisa y accesible del comportamiento mecánico de estos materiales.

1.1.3. Influencia del tipo de suelo en la resistencia

El tipo de suelo constituye uno de los factores más determinantes en el comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida, ya que define en gran medida la estructura interna del material, su capacidad de compactación y su respuesta frente a esfuerzos externos. A diferencia de materiales industrializados con composiciones controladas, los CEB/LTC dependen directamente de las características naturales del suelo, lo que introduce variabilidad en sus propiedades y hace imprescindible comprender la influencia de cada uno de sus componentes.

Desde el punto de vista granulométrico, la proporción de arena, limo y arcilla juega un papel fundamental en la resistencia a compresión. La fracción arenosa aporta estabilidad y reduce la retracción, mientras que la arcilla actúa como agente cohesivo que permite la unión entre partículas. Sin embargo, un exceso de arcilla puede generar problemas de contracción y fisuración durante el secado, afectando negativamente la resistencia del

material. Por el contrario, una cantidad insuficiente de finos reduce la cohesión interna, debilitando la estructura del ladrillo (Houben & Guillaud, 1994).

Diversos estudios han identificado rangos óptimos de composición del suelo que favorecen el desarrollo de la resistencia mecánica. En general, se considera que una mezcla equilibrada con contenido moderado de arcilla y una adecuada proporción de arena permite obtener mejores resultados, ya que combina cohesión y estabilidad estructural. Investigaciones experimentales han demostrado que suelos clasificados como arenas arcillosas (SC) o limos arcillosos presentan un comportamiento favorable cuando son adecuadamente compactados y estabilizados (Reddy & Gupta, 2006).

Asimismo, los límites de consistencia, como el límite líquido y el límite plástico, son indicadores clave para evaluar la idoneidad del suelo en la fabricación de CEB. Estos parámetros permiten estimar la plasticidad del material y su capacidad de deformarse sin perder cohesión. Suelos con índices de plasticidad moderados tienden a presentar un mejor desempeño, mientras que valores extremos pueden afectar la trabajabilidad y la resistencia final del producto (Das & Sobhan, 2014).

Otro aspecto relevante es la influencia de la humedad en la estructura del suelo. El contenido de agua durante el proceso de compactación es determinante para alcanzar una densidad seca óptima, la cual está directamente relacionada con la resistencia del material. Un contenido de humedad inferior al óptimo impide una adecuada reorganización de las partículas, mientras que un exceso genera vacíos y reduce la densidad, disminuyendo la resistencia a compresión (Walker, 2005).

Además, la mineralogía del suelo también influye en su comportamiento mecánico. La presencia de minerales arcillosos activos, como la montmorillonita, puede provocar expansiones y contracciones significativas, afectando la estabilidad dimensional del ladrillo. En contraste, suelos con predominancia de caolinita tienden a ser más estables y adecuados para la fabricación de unidades constructivas (Minke, 2012).

En investigaciones más recientes, se ha evidenciado que la interacción entre el tipo de suelo y los estabilizantes, como el cemento, es clave para mejorar las propiedades mecánicas del material. La eficacia del proceso de estabilización depende de la capacidad del suelo para reaccionar con el agente estabilizante, lo que varía según su composición y características físico-químicas (Walker et al., 2007).

En síntesis, el tipo de suelo no solo condiciona la resistencia a compresión de los ladrillos de tierra comprimida, sino que también influye en su durabilidad, estabilidad dimensional y comportamiento frente a condiciones ambientales. Por ello, la adecuada selección y caracterización del suelo constituye un paso fundamental en la fabricación de CEB/LTC, siendo necesario considerar tanto sus propiedades físicas como su interacción con otros componentes del sistema constructivo.

1.1.4. Impacto de la dosificación de cemento en el comportamiento mecánico

La incorporación de cemento como agente estabilizante en los ladrillos de tierra comprimida constituye una de las estrategias más utilizadas para mejorar sus propiedades mecánicas y su durabilidad. La dosificación de este material influye directamente en la resistencia a compresión, la rigidez, la cohesión interna y la resistencia frente a agentes ambientales, convirtiéndose en una variable crítica en el diseño y fabricación de CEB/LTC.

Desde una perspectiva mecánica, el cemento actúa como un material conglomerante que, al reaccionar con el agua, forma productos de hidratación que generan enlaces entre las partículas del suelo. Este proceso reduce la porosidad del material, incrementa su densidad y mejora la capacidad de transferencia de esfuerzos, lo que se traduce en un aumento significativo de la resistencia a compresión (Reddy & Gupta, 2006). En consecuencia, a medida que se incrementa el porcentaje de cemento en la mezcla, se observa generalmente una mejora en el desempeño mecánico del material.

Diversos estudios han demostrado que existe una relación positiva entre la dosificación de cemento y la resistencia mecánica, aunque dicha relación no es estrictamente lineal. En rangos bajos de dosificación, pequeños incrementos de cemento generan mejoras

sustanciales en la resistencia; sin embargo, a partir de ciertos niveles, el incremento en la resistencia tiende a estabilizarse, evidenciando un comportamiento de rendimientos decrecientes (Walker et al., 2007). Este fenómeno sugiere la existencia de un punto óptimo de dosificación que equilibra el desempeño mecánico con la eficiencia económica del material.

En investigaciones experimentales, se ha identificado que dosificaciones entre 5% y 10% de cemento pueden ser suficientes para alcanzar resistencias adecuadas en aplicaciones de baja y mediana exigencia estructural. No obstante, contenidos mayores, como 15% o 20%, permiten obtener resistencias superiores, especialmente cuando se busca mejorar la durabilidad y reducir la susceptibilidad del material frente a la humedad (Minke, 2012). Estos valores coinciden con estudios recientes que evidencian un incremento progresivo de la resistencia a compresión conforme aumenta el contenido de cemento, particularmente en edades de curado más prolongadas.

Además de la resistencia, la dosificación de cemento también influye en el comportamiento frente a la deformación y en los modos de falla del material. A medida que aumenta el contenido de cemento, el material tiende a comportarse de manera más rígida y frágil, presentando fallas más abruptas en comparación con mezclas con menor contenido de estabilizante, que exhiben un comportamiento más dúctil (Walker, 2005). Esta transición en el comportamiento mecánico debe ser considerada en el diseño estructural, ya que influye en la capacidad del material para disipar energía.

Por otro lado, el contenido de cemento afecta la interacción con otras variables del proceso, como la humedad y el tiempo de curado. Un adecuado proceso de hidratación requiere condiciones controladas de humedad, siendo el curado un factor determinante para el desarrollo de la resistencia. Estudios han demostrado que el incremento de la resistencia con el tiempo es más pronunciado en mezclas con mayor contenido de cemento, debido a la progresiva formación de productos cementantes (Reddy & Gupta, 2006).

Sin embargo, el aumento del porcentaje de cemento también implica consideraciones económicas y ambientales. El cemento es uno de los materiales con mayor huella de carbono dentro de la industria de la construcción, por lo que su uso excesivo puede contradecir los principios de sostenibilidad que motivan el empleo de materiales de tierra. En este sentido, la optimización de la dosificación se convierte en un aspecto clave, buscando maximizar el desempeño mecánico con el menor consumo posible de estabilizante (Minke, 2012).

Investigaciones recientes han explorado alternativas para reducir el contenido de cemento mediante la incorporación de materiales complementarios, como cenizas, residuos industriales y fibras naturales, logrando resultados prometedores en términos de resistencia y sostenibilidad. Estas estrategias evidencian la importancia de continuar desarrollando enfoques innovadores que permitan mejorar el comportamiento del material sin incrementar significativamente su impacto ambiental.

En síntesis, la dosificación de cemento es una variable determinante en el comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida, influyendo no solo en su resistencia a compresión, sino también en su rigidez, durabilidad y modo de falla. La identificación de un rango óptimo de dosificación resulta fundamental para garantizar un equilibrio entre desempeño estructural, viabilidad económica y sostenibilidad, constituyendo un aspecto central en el diseño de este tipo de materiales.

1.1.5. Influencia del proceso de compactación

El proceso de compactación constituye una etapa fundamental en la fabricación de ladrillos de tierra comprimida, ya que determina la densificación del material y, en consecuencia, su comportamiento mecánico. A través de la aplicación de energía mecánica, las partículas del suelo se reordenan, reduciendo los vacíos internos y aumentando el contacto entre ellas, lo que permite desarrollar una estructura más estable y resistente frente a cargas externas.

La relación entre compactación y resistencia a compresión ha sido ampliamente estudiada en la ingeniería geotécnica y de materiales. Se ha demostrado que existe una

correlación directa entre la densidad seca alcanzada y la resistencia del material, siendo la densidad máxima uno de los principales indicadores de desempeño mecánico. A mayor grado de compactación, menor es la porosidad y mayor la capacidad del material para soportar esfuerzos, debido a la mejora en la transmisión de cargas entre partículas (Das & Sobhan, 2014).

Un aspecto clave dentro de este proceso es el contenido de humedad del suelo al momento de la compactación. La presencia de agua actúa como lubricante entre las partículas, facilitando su reorganización y permitiendo alcanzar mayores niveles de densificación. Sin embargo, este efecto es óptimo solo dentro de un rango específico. Existe un contenido de humedad denominado humedad óptima, en el cual se logra la máxima densidad seca. Valores inferiores dificultan la compactación, mientras que un exceso de agua genera una separación entre partículas, incrementando los vacíos y reduciendo la resistencia del material (Proctor, 1933).

El control de la energía de compactación también es determinante en el resultado final. Métodos de compactación manual, como el uso de prensas mecánicas o hidráulicas en la fabricación de CEB/LTC, deben asegurar una presión suficiente y uniforme para garantizar la homogeneidad del material. Estudios han demostrado que incrementos en la presión de compactación producen mejoras significativas en la resistencia a compresión, especialmente cuando se combinan con condiciones adecuadas de humedad y granulometría (Walker, 2005).

Además, la compactación influye en la microestructura del material, afectando no solo su resistencia, sino también su durabilidad y comportamiento frente a agentes externos. Una compactación adecuada reduce la permeabilidad del ladrillo, limitando la penetración de agua y mejorando su resistencia a la erosión y a ciclos de humedad-secado. Este aspecto es particularmente importante en materiales de tierra, que son sensibles a la acción del agua (Houben & Guillaud, 1994).

Por otro lado, la interacción entre compactación y estabilización química, especialmente con cemento, genera un efecto sinérgico que mejora aún más las propiedades del material. Una mayor densificación facilita la formación de enlaces cementantes más efectivos, contribuyendo al incremento de la resistencia mecánica y a la cohesión interna del sistema (Reddy & Gupta, 2006). Sin embargo, una compactación inadecuada puede limitar la eficacia del estabilizante, evidenciando la necesidad de un control integral del proceso.

Investigaciones recientes han enfatizado la importancia de optimizar simultáneamente la energía de compactación y el contenido de humedad para maximizar el desempeño del material. Este enfoque permite establecer condiciones óptimas de fabricación que garanticen resultados consistentes y reproducibles, reduciendo la variabilidad inherente a los materiales de origen natural.

En síntesis, el proceso de compactación es un factor determinante en la resistencia a compresión de los ladrillos de tierra comprimida, al influir directamente en su densidad, porosidad y estructura interna. Su adecuada ejecución, en conjunto con un control preciso del contenido de humedad y la energía aplicada, resulta esencial para obtener materiales con propiedades mecánicas óptimas y comportamiento confiable en aplicaciones constructivas.

1.1.6. Relación entre densidad y resistencia

La densidad del material constituye uno de los parámetros más representativos en la evaluación del comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida, debido a su estrecha relación con la resistencia a compresión. En términos generales, la densidad refleja el grado de compactación alcanzado en el material, así como la cantidad de vacíos presentes en su estructura interna, factores que influyen directamente en su capacidad para soportar cargas.

Desde un enfoque físico, la resistencia a compresión depende de la eficiencia en la transmisión de esfuerzos entre partículas. En materiales con mayor densidad, las partículas se encuentran más próximas entre sí, lo que incrementa el área de contacto y mejora la

distribución de cargas, reduciendo la concentración de esfuerzos y aumentando la resistencia global del sistema. Por el contrario, en materiales con menor densidad, la presencia de vacíos genera discontinuidades que debilitan la estructura interna y facilitan la propagación de fallas (Das & Sobhan, 2014).

Diversas investigaciones han evidenciado una relación directa y proporcional entre la densidad seca y la resistencia a compresión en materiales de suelo estabilizado. Este comportamiento se explica por la reducción de la porosidad y el aumento de la cohesión interna del material a medida que se incrementa la densificación. En el caso de los ladrillos de tierra comprimida, alcanzar una densidad seca máxima es un objetivo clave en el proceso de fabricación, ya que está asociado con el óptimo desempeño mecánico del material (Walker, 2005).

La relación entre densidad y resistencia también está estrechamente vinculada al contenido de humedad durante la compactación. Como se ha señalado previamente, existe un punto óptimo de humedad en el cual se alcanza la máxima densidad seca. Este punto representa una condición ideal en la que el material presenta la mejor reorganización de partículas, lo que se traduce en un incremento significativo de la resistencia a compresión. Valores de humedad por debajo o por encima de este óptimo generan una disminución en la densidad alcanzada y, en consecuencia, en la resistencia del material (Proctor, 1933).

Además, la densidad no solo influye en la resistencia, sino también en otras propiedades relevantes del material, como la durabilidad, la permeabilidad y la resistencia a la erosión. Materiales con mayor densidad presentan menor capacidad de absorción de agua, lo que reduce su vulnerabilidad frente a condiciones ambientales adversas. Este aspecto es particularmente importante en los ladrillos de tierra comprimida, cuya estabilidad depende en gran medida de su comportamiento frente a la humedad (Houben & Guillaud, 1994).

En el caso de materiales estabilizados con cemento, la densidad adquiere un rol aún más relevante, ya que facilita la formación de enlaces cementantes más efectivos. Una

mayor densificación permite una mejor distribución del cemento dentro de la matriz del suelo, favoreciendo la cohesión y aumentando la resistencia mecánica del material. En este sentido, la interacción entre densidad y estabilización química resulta determinante para optimizar el desempeño de los CEB/LTC (Reddy & Gupta, 2006).

Sin embargo, es importante señalar que la relación entre densidad y resistencia no es ilimitada. A partir de ciertos niveles de compactación, los incrementos en densidad pueden generar mejoras marginales en la resistencia, lo que evidencia la existencia de un punto de eficiencia óptima en el proceso de fabricación. Este comportamiento refuerza la necesidad de controlar adecuadamente las variables del proceso, evitando esfuerzos innecesarios que no se traduzcan en beneficios significativos.

En síntesis, la densidad es un parámetro clave que permite comprender y predecir la resistencia a compresión de los ladrillos de tierra comprimida. Su relación directa con la estructura interna del material y su interacción con variables como la humedad, la compactación y la dosificación de cemento la convierten en un indicador fundamental para el diseño y control de calidad en la fabricación de este tipo de unidades constructivas.

1.1.7. Comparación entre materiales tradicionales y materiales de tierra estabilizada

La comparación entre materiales tradicionales de construcción, como el concreto y el ladrillo cocido, y los materiales de tierra estabilizada, como los ladrillos de tierra comprimida (CEB/LTC), resulta fundamental para comprender sus ventajas, limitaciones y potencial de aplicación en distintos contextos constructivos. Esta comparación no solo se centra en el desempeño mecánico, sino también en aspectos económicos, ambientales y tecnológicos que influyen en la selección de materiales en la ingeniería civil contemporánea.

Desde el punto de vista mecánico, los materiales tradicionales presentan, en general, mayores valores de resistencia a compresión. El concreto y los ladrillos cerámicos cocidos pueden alcanzar resistencias significativamente superiores, lo que los hace adecuados para estructuras de mayor exigencia. En contraste, los ladrillos de tierra comprimida suelen

presentar resistencias más moderadas, típicamente en rangos adecuados para edificaciones de baja y mediana altura. No obstante, diversos estudios han demostrado que, mediante procesos adecuados de estabilización y compactación, los CEB pueden alcanzar niveles de resistencia suficientes para aplicaciones estructurales básicas (Walker, 2005).

Sin embargo, la comparación no debe limitarse únicamente a la resistencia. Los materiales de tierra estabilizada presentan ventajas importantes en términos de comportamiento térmico. Su alta inercia térmica permite regular las variaciones de temperatura en el interior de las edificaciones, generando ambientes más confortables sin necesidad de sistemas adicionales de climatización. Esta propiedad contrasta con materiales como el concreto, que, aunque resistentes, presentan menor capacidad de regulación térmica (Minke, 2012).

En el ámbito ambiental, la diferencia entre ambos tipos de materiales es aún más significativa. La producción de materiales tradicionales, especialmente el cemento y los ladrillos cocidos, implica un alto consumo energético y la emisión considerable de gases de efecto invernadero. Por el contrario, los materiales de tierra estabilizada requieren procesos de fabricación menos intensivos en energía, lo que reduce su huella de carbono. Además, su producción puede realizarse in situ, minimizando el transporte y el impacto ambiental asociado (Houben & Guillaud, 1994).

Desde una perspectiva económica, los ladrillos de tierra comprimida representan una alternativa competitiva, particularmente en contextos rurales o de bajos recursos. La disponibilidad local de materia prima y la posibilidad de utilizar tecnologías de fabricación simples reducen significativamente los costos de producción. En contraste, los materiales tradicionales dependen de procesos industriales más complejos y de cadenas de suministro más extensas, lo que incrementa su costo final (Reddy & Gupta, 2006).

No obstante, los materiales de tierra estabilizada también presentan limitaciones que deben ser consideradas. Su desempeño depende en gran medida de la calidad del suelo, el control del proceso de fabricación y las condiciones ambientales. Además, la ausencia de

normativas ampliamente estandarizadas en algunos contextos limita su aceptación en proyectos formales. En cambio, los materiales tradicionales cuentan con normas consolidadas y una amplia experiencia de uso, lo que facilita su aplicación en la práctica profesional.

En términos de durabilidad, los materiales tradicionales presentan una mayor resistencia frente a condiciones ambientales adversas, especialmente en lo relacionado con la humedad. Sin embargo, la incorporación de estabilizantes en los CEB ha permitido mejorar significativamente su resistencia al agua y a la erosión, ampliando su campo de aplicación y reduciendo una de sus principales debilidades históricas (Walker et al., 2007).

En síntesis, la comparación entre materiales tradicionales y materiales de tierra estabilizada evidencia que, si bien los primeros ofrecen mayores niveles de resistencia y estandarización, los segundos destacan por su sostenibilidad, bajo costo y adaptabilidad a contextos locales. La elección entre ambos no debe basarse únicamente en criterios mecánicos, sino en un análisis integral que considere el tipo de proyecto, las condiciones del entorno y los objetivos de sostenibilidad. En este sentido, los ladrillos de tierra comprimida se posicionan como una alternativa viable dentro de una construcción más eficiente y ambientalmente responsable.

1.1.8. Investigaciones recientes sobre optimización de resistencia en materiales sostenibles

En los últimos años, la investigación en materiales de construcción sostenibles ha experimentado un crecimiento significativo, impulsado por la necesidad de reducir el impacto ambiental del sector sin comprometer el desempeño mecánico de los materiales. En este contexto, la optimización de la resistencia se ha convertido en una línea de estudio prioritaria, orientada a mejorar las propiedades estructurales mediante el uso eficiente de recursos, la incorporación de materiales alternativos y el desarrollo de nuevas metodologías de diseño.

Uno de los enfoques más relevantes en la optimización de resistencia ha sido la incorporación de residuos industriales y subproductos en la fabricación de materiales de construcción. Estudios recientes han demostrado que la inclusión de materiales como cenizas, polvo de vidrio o residuos de mármol puede mejorar las propiedades mecánicas de los bloques de tierra comprimida, al tiempo que reduce el consumo de cemento y el impacto ambiental asociado. Por ejemplo, investigaciones han evidenciado que la adición de residuos en bloques estabilizados permite mejorar tanto la resistencia como la durabilidad, evidenciando un comportamiento estructural más eficiente y sostenible .

Otro campo de desarrollo importante es el uso de fibras naturales y materiales biológicos como refuerzo. La incorporación de fibras vegetales, como el coco o residuos agrícolas, ha mostrado efectos positivos en la resistencia mecánica y en la capacidad de disipación de energía del material. Estas fibras actúan como elementos de refuerzo que mejoran la cohesión interna y limitan la propagación de fisuras, contribuyendo a un comportamiento más resistente y menos frágil. Asimismo, este tipo de soluciones favorece el aprovechamiento de recursos locales y promueve la economía circular en el sector construcción .

Paralelamente, la optimización de la resistencia también ha sido abordada desde el punto de vista del diseño de mezclas y el modelamiento predictivo. Investigaciones recientes han incorporado herramientas avanzadas como el aprendizaje automático y la optimización bayesiana para predecir la resistencia de materiales sostenibles, permitiendo identificar combinaciones óptimas de componentes con un menor número de ensayos experimentales. Este enfoque ha demostrado mejorar la eficiencia en el diseño de mezclas, logrando un equilibrio entre resistencia mecánica y reducción de impacto ambiental .

Asimismo, estudios recientes han destacado la importancia de la optimización geométrica y del diseño estructural de los bloques. En el caso de los bloques de tierra comprimida, el desarrollo de geometrías interlock o bloques encajables ha permitido mejorar la distribución de cargas y el comportamiento sísmico, aumentando la eficiencia estructural sin necesidad de incrementar significativamente la resistencia del material base.

Este tipo de innovaciones refleja una tendencia hacia soluciones integrales que combinan material, forma y sistema constructivo para optimizar el desempeño global .

Otro aspecto relevante es la optimización simultánea de propiedades múltiples, como resistencia, durabilidad y comportamiento térmico. Las investigaciones actuales no se limitan únicamente a maximizar la resistencia, sino que buscan un equilibrio entre distintas propiedades del material, considerando su desempeño a lo largo de todo el ciclo de vida. En este sentido, la ingeniería de materiales sostenibles se orienta hacia soluciones multifuncionales que respondan tanto a exigencias estructurales como ambientales .

En síntesis, las investigaciones recientes evidencian una evolución significativa en la optimización de la resistencia en materiales sostenibles, pasando de enfoques tradicionales basados en prueba y error a metodologías integradas que combinan experimentación, modelamiento y diseño avanzado. Estos avances permiten no solo mejorar el desempeño mecánico de los materiales, sino también reducir su impacto ambiental, posicionando a los ladrillos de tierra comprimida y otros materiales similares como alternativas viables dentro de una construcción más eficiente y sostenible.

1.2 NOCIONES BÁSICAS DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

La resistencia a compresión constituye uno de los conceptos fundamentales en la mecánica de materiales y en la ingeniería civil, al representar la capacidad de un material para soportar cargas que tienden a reducir su volumen. En el caso de los ladrillos de tierra comprimida, esta propiedad adquiere especial relevancia, ya que define en gran medida su aptitud para ser utilizados como elementos estructurales o de cerramiento en sistemas constructivos.

A diferencia de materiales homogéneos y altamente controlados, los ladrillos de tierra comprimida presentan un comportamiento que depende de múltiples factores interrelacionados, tales como la composición del suelo, el contenido de humedad, el grado de compactación y la presencia de estabilizantes. Esta complejidad hace necesario

comprender no solo la definición de resistencia a compresión, sino también los principios físicos que gobiernan su desarrollo y las variables que influyen en su magnitud.

Desde una perspectiva teórica, la resistencia a compresión está asociada a la relación entre la carga aplicada y el área sobre la cual actúa, lo que permite cuantificar el esfuerzo que el material es capaz de soportar antes de fallar. Sin embargo, en materiales como los CEB/LTC, este comportamiento no se limita a una relación simple, sino que involucra fenómenos como la redistribución de esfuerzos, la interacción entre partículas y la formación de microfisuras que preceden a la falla.

Asimismo, el análisis de la resistencia a compresión implica considerar el comportamiento del material bajo carga, incluyendo su respuesta elástica inicial, la aparición de deformaciones plásticas y, finalmente, el colapso estructural. Este proceso está influenciado por la estructura interna del material y por la calidad del proceso de fabricación, lo que resalta la importancia de un adecuado control de las condiciones de producción.

En este apartado se desarrollan los conceptos básicos necesarios para comprender la resistencia a compresión en ladrillos de tierra comprimida, abordando sus fundamentos teóricos, las variables que la afectan y los mecanismos de falla asociados. Este marco conceptual permitirá interpretar de manera adecuada los resultados experimentales y establecer las bases para el análisis comparativo y el modelamiento que se desarrollarán en los capítulos posteriores.

1.2.1. Definición de resistencia a compresión

La resistencia a compresión se define como la capacidad de un material para soportar esfuerzos que tienden a reducir su volumen, sin experimentar falla estructural. Este parámetro representa uno de los indicadores más importantes del desempeño mecánico en materiales de construcción, especialmente en aquellos diseñados para trabajar predominantemente bajo cargas verticales, como es el caso de los ladrillos de tierra comprimida.

Desde un punto de vista mecánico, la resistencia a compresión se expresa como la relación entre la carga máxima aplicada sobre un material y el área de su sección transversal. Este concepto se fundamenta en la teoría básica de esfuerzos, donde el esfuerzo compresivo se calcula dividiendo la fuerza aplicada entre el área sobre la cual actúa. Esta relación permite cuantificar la capacidad del material para resistir cargas antes de alcanzar su punto de falla (Gere & Timoshenko, 1997).

En materiales homogéneos, como ciertos metales, la resistencia a compresión presenta un comportamiento relativamente uniforme y predecible. Sin embargo, en materiales heterogéneos como los ladrillos de tierra comprimida, esta propiedad está influenciada por múltiples factores internos, tales como la distribución de partículas, la presencia de vacíos, la cohesión entre componentes y la calidad del proceso de fabricación. Por ello, la resistencia a compresión en estos materiales no es una propiedad intrínseca constante, sino el resultado de la interacción de diversas variables físicas y mecánicas (Das & Sobhan, 2014).

El proceso de falla bajo compresión en materiales frágiles, como los CEB/LTC, se caracteriza generalmente por la aparición y propagación de microfisuras internas que se desarrollan progresivamente hasta provocar la ruptura del elemento. Estas fisuras suelen iniciarse en zonas de concentración de esfuerzos o en discontinuidades dentro del material, lo que evidencia la importancia de una estructura interna homogénea y bien compactada para mejorar la resistencia (Callister & Rethwisch, 2018).

Asimismo, la resistencia a compresión está estrechamente relacionada con la densidad y la porosidad del material. Materiales con menor contenido de vacíos y mayor densidad presentan una mejor capacidad para transmitir esfuerzos, lo que se traduce en mayores valores de resistencia. En este sentido, el control del proceso de compactación y del contenido de humedad resulta fundamental para optimizar esta propiedad en los ladrillos de tierra comprimida (Walker, 2005).

En el ámbito normativo, la resistencia a compresión se determina mediante ensayos estandarizados que permiten evaluar el comportamiento del material bajo condiciones controladas. Estos ensayos consisten en aplicar una carga progresiva sobre el espécimen hasta alcanzar la falla, registrando la carga máxima soportada. Los resultados obtenidos sirven como base para la clasificación del material y para su uso en el diseño estructural.

En síntesis, la resistencia a compresión es una propiedad esencial que permite evaluar la capacidad portante de los materiales de construcción. En el caso de los ladrillos de tierra comprimida, su correcta comprensión implica considerar no solo la relación entre carga y área, sino también la influencia de factores internos y externos que determinan su comportamiento mecánico. Este concepto constituye la base para el análisis experimental y el desarrollo de modelos predictivos que serán abordados en el presente estudio.

1.2.2. Fundamentos de mecánica de materiales aplicados a suelos estabilizados

El análisis de los suelos estabilizados desde la mecánica de materiales implica comprender cómo un sistema originalmente granular y heterogéneo adquiere capacidad resistente mediante procesos de compactación y estabilización química. A diferencia de los materiales continuos idealizados, los ladrillos de tierra comprimida se comportan como un medio particulado cohesivo, donde la resistencia resulta de la interacción entre partículas sólidas, agua y productos cementantes formados durante el proceso de estabilización.

Desde la perspectiva de la mecánica de materiales, el comportamiento bajo carga se describe en términos de esfuerzo y deformación. El esfuerzo compresivo aplicado genera una respuesta interna en el material que depende de su rigidez, la cual está asociada al módulo de elasticidad. En suelos estabilizados, este módulo no es constante, ya que varía en función de la densidad, la humedad y el contenido de estabilizante. En etapas iniciales de carga, el material puede presentar un comportamiento cuasi elástico; sin embargo, a medida que se incrementa el esfuerzo, se desarrollan deformaciones no lineales hasta alcanzar la falla (Gere & Timoshenko, 1997).

Un concepto fundamental en suelos es el principio de esfuerzos efectivos, el cual establece que la resistencia del material está gobernada por las fuerzas transmitidas a través del esqueleto sólido, descontando la presión del agua presente en los vacíos. En suelos estabilizados, aunque el efecto del agua es menor debido a la reducción de porosidad, este principio sigue siendo relevante para comprender la evolución del comportamiento mecánico, especialmente durante el proceso de curado (Terzaghi, Peck & Mesri, 1996).

La estabilización con cemento introduce un cambio significativo en la respuesta del material, al generar enlaces químicos entre partículas mediante productos de hidratación como los silicatos y aluminatos cálcicos. Estos compuestos actúan como un “puente” que incrementa la cohesión interna y mejora la capacidad del material para resistir esfuerzos. Como resultado, el suelo estabilizado adquiere características intermedias entre un material granular y un material cementado, presentando mayor rigidez y resistencia, pero también un comportamiento más frágil ante la falla (Reddy & Gupta, 2006).

Otro aspecto clave es la relación esfuerzo–deformación, la cual permite describir el comportamiento del material desde la aplicación de carga hasta su ruptura. En los ladrillos de tierra comprimida estabilizados, esta relación suele presentar una fase inicial relativamente lineal, seguida de una zona no lineal donde se desarrollan microfisuras internas. Finalmente, se alcanza un punto máximo de esfuerzo, a partir del cual ocurre la falla, generalmente de forma súbita, característica típica de materiales frágiles (Callister & Rethwisch, 2018).

Asimismo, la mecánica de materiales aplicada a suelos estabilizados debe considerar la anisotropía y heterogeneidad del material. La orientación de las partículas, la distribución del cemento y las variaciones en la compactación pueden generar comportamientos distintos según la dirección de carga. Esto implica que la resistencia no es uniforme en todo el material, lo que debe ser considerado en su análisis y aplicación estructural (Das & Sobhan, 2014).

La interacción entre compactación y estabilización también es fundamental. Una adecuada densificación permite reducir los vacíos y mejorar la distribución de los productos cementantes, lo que incrementa la eficiencia de la estabilización. En este sentido, la resistencia del material no depende únicamente del contenido de cemento, sino de la combinación adecuada entre composición, humedad y energía de compactación (Walker, 2005).

En síntesis, los fundamentos de la mecánica de materiales aplicados a suelos estabilizados permiten comprender cómo un material natural puede transformarse en un elemento constructivo con capacidad estructural. La interacción entre partículas, agua y estabilizantes, junto con las condiciones de fabricación, define un comportamiento complejo que requiere ser analizado desde un enfoque integral. Este entendimiento es esencial para interpretar los resultados experimentales y para el desarrollo de modelos que permitan predecir el comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida.

1.2.3. Variables que influyen en la resistencia:

La resistencia a compresión de los ladrillos de tierra comprimida es el resultado de la interacción de múltiples variables que actúan de manera conjunta durante el proceso de fabricación y curado del material. A diferencia de materiales industrializados con composiciones altamente controladas, los CEB/LTC presentan una mayor sensibilidad a las condiciones de producción, lo que hace imprescindible identificar y comprender los factores que influyen en su desempeño mecánico.

Una de las variables más relevantes es la **dosificación de cemento**, la cual actúa como agente estabilizante y contribuye a la formación de enlaces entre las partículas del suelo. Un incremento en el contenido de cemento suele generar un aumento en la resistencia, debido a la mayor cantidad de productos de hidratación que fortalecen la estructura interna del material. Sin embargo, este efecto presenta un comportamiento no lineal, ya que a partir de ciertos niveles los incrementos de resistencia tienden a disminuir en relación con el

aumento del contenido de cemento, lo que evidencia la existencia de un rango óptimo de dosificación (Reddy & Gupta, 2006).

El **contenido de humedad** durante la compactación es otro factor determinante. La presencia de agua facilita la reorganización de las partículas del suelo, permitiendo alcanzar una mayor densidad. No obstante, este efecto es óptimo solo dentro de un rango específico. Un contenido de humedad inferior al óptimo dificulta la compactación, mientras que un exceso de agua genera vacíos internos que reducen la resistencia del material. La determinación de la humedad óptima es, por tanto, un paso esencial en el proceso de fabricación (Proctor, 1933).

La **energía de compactación** también influye directamente en la resistencia, ya que determina el grado de densificación del material. Una mayor presión de compactación reduce la porosidad y mejora el contacto entre partículas, lo que incrementa la capacidad del material para transmitir esfuerzos. En el caso de los ladrillos de tierra comprimida, el uso de prensas mecánicas o hidráulicas permite alcanzar niveles de compactación adecuados, siempre que se mantenga una distribución uniforme de la presión aplicada (Walker, 2005).

Otra variable clave es el **tiempo de curado**, especialmente en materiales estabilizados con cemento. Durante este periodo, ocurren reacciones químicas que permiten el desarrollo progresivo de la resistencia. A medida que aumenta el tiempo de curado, se incrementa la formación de productos cementantes, lo que mejora la cohesión interna del material. Este proceso es más significativo en los primeros días, aunque puede continuar desarrollándose a lo largo de varias semanas (Reddy & Gupta, 2006).

La **composición del suelo** también desempeña un papel fundamental. La proporción de arena, limo y arcilla influye en la cohesión y estabilidad del material. Una adecuada combinación de estos componentes permite obtener una estructura equilibrada que favorece el desarrollo de la resistencia. Suelos con exceso de arcilla pueden presentar problemas de

retracción, mientras que aquellos con bajo contenido de finos pueden carecer de cohesión suficiente (Houben & Guillaud, 1994).

Asimismo, la **densidad seca alcanzada** durante el proceso de compactación está directamente relacionada con la resistencia a compresión. Materiales con mayor densidad presentan menor porosidad y una mejor distribución de esfuerzos, lo que se traduce en mayores valores de resistencia. Este parámetro sintetiza el efecto combinado de variables como la humedad y la energía de compactación (Das & Sobhan, 2014).

Finalmente, factores como la **homogeneidad de la mezcla**, la **calidad del proceso de fabricación** y las **condiciones ambientales** durante el curado también influyen en el comportamiento mecánico del material. Variaciones en cualquiera de estas condiciones pueden generar diferencias significativas en los resultados, lo que resalta la importancia de un control adecuado en todas las etapas del proceso.

En conjunto, estas variables no actúan de manera independiente, sino que se encuentran interrelacionadas, generando un comportamiento complejo que requiere ser analizado de forma integral. La comprensión de estos factores permite no solo optimizar el proceso de fabricación, sino también establecer bases para el desarrollo de modelos predictivos que faciliten la estimación de la resistencia a compresión en ladrillos de tierra comprimida.

1.2.3.1. Dosificación de cemento

La dosificación de cemento constituye una de las variables más influyentes en la resistencia a compresión de los ladrillos de tierra comprimida, al actuar como el principal agente estabilizante que transforma un material granular en un sistema con mayor cohesión y capacidad estructural. La incorporación de cemento permite mejorar la interacción entre las partículas del suelo mediante la formación de compuestos cementantes que incrementan la rigidez y reducen la porosidad del material.

Desde el punto de vista químico, el cemento reacciona con el agua durante el proceso de hidratación, generando productos como los silicatos cálcicos hidratados (C-S-H), los cuales se adhieren a las partículas del suelo y crean una matriz más compacta y resistente. Este proceso no solo incrementa la resistencia a compresión, sino que también mejora la durabilidad del material frente a agentes externos, como la humedad y la erosión (Reddy & Gupta, 2006).

Diversos estudios han demostrado que existe una relación directa entre el porcentaje de cemento y la resistencia mecánica del material. A medida que aumenta la dosificación, se incrementa la cantidad de enlaces cementantes, lo que se traduce en una mayor capacidad para soportar cargas. Sin embargo, este incremento no es indefinido ni lineal. En etapas iniciales, pequeñas adiciones de cemento generan mejoras significativas en la resistencia; no obstante, a partir de ciertos niveles, el aumento de la resistencia tiende a estabilizarse, evidenciando un comportamiento de rendimientos decrecientes (Walker et al., 2007).

En términos prácticos, investigaciones han identificado rangos de dosificación que permiten alcanzar un equilibrio entre desempeño mecánico y viabilidad económica. Dosificaciones bajas, del orden de 5% a 8%, pueden ser suficientes para aplicaciones no estructurales o de baja exigencia. Por otro lado, contenidos intermedios y altos, como 10%, 15% o incluso 20%, permiten obtener resistencias mayores, adecuadas para condiciones más exigentes o para mejorar la durabilidad del material en ambientes adversos (Minke, 2012).

Además de la resistencia, la dosificación de cemento influye en el comportamiento mecánico global del material. A mayor contenido de cemento, el material tiende a presentar un comportamiento más rígido y frágil, con menor capacidad de deformación antes de la falla. En contraste, mezclas con menor contenido de cemento presentan una respuesta más dúctil, aunque con menores valores de resistencia. Este cambio en el modo de comportamiento es relevante para el diseño estructural y la evaluación del desempeño del material (Callister & Rethwisch, 2018).

Asimismo, la eficacia de la dosificación de cemento está condicionada por su interacción con otras variables del proceso, como la humedad, la compactación y la composición del suelo. Una dosificación elevada no garantiza por sí sola un incremento significativo en la resistencia si no se cumplen condiciones adecuadas de fabricación. Por ejemplo, una mala compactación o un contenido de humedad inadecuado pueden limitar la formación de enlaces cementantes, reduciendo la eficiencia del estabilizante (Das & Sobhan, 2014).

Por otro lado, es importante considerar el impacto económico y ambiental asociado al uso de cemento. Si bien su incorporación mejora las propiedades mecánicas del material, el cemento es uno de los insumos con mayor huella de carbono en la construcción. En este sentido, la optimización de la dosificación se convierte en un aspecto clave, buscando maximizar la resistencia con la menor cantidad posible de estabilizante, en coherencia con los principios de sostenibilidad (Minke, 2012).

En síntesis, la dosificación de cemento es una variable determinante que influye de manera directa en la resistencia a compresión y en el comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida. Su adecuada selección requiere un análisis integral que considere no solo el incremento de la resistencia, sino también la interacción con otras variables del proceso y los aspectos económicos y ambientales asociados.

1.2.3.2. Contenido de humedad

El contenido de humedad es una de las variables más determinantes en el comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida, ya que influye directamente en el proceso de compactación, en la densidad alcanzada y, en consecuencia, en la resistencia a compresión del material. La presencia de agua en la mezcla cumple una función fundamental al facilitar la movilidad y reorganización de las partículas del suelo, permitiendo una mejor densificación durante la aplicación de la energía de compactación.

Desde el punto de vista físico, el agua actúa como un agente lubricante entre las partículas sólidas, reduciendo la fricción interna y favoreciendo su acomodo en una

configuración más compacta. Sin embargo, este efecto es altamente dependiente de la cantidad de agua presente. Existe un rango específico denominado **contenido de humedad óptimo**, en el cual se alcanza la máxima densidad seca del material y, por ende, su mayor resistencia a compresión. Este concepto es ampliamente reconocido en la mecánica de suelos y se determina mediante ensayos de compactación, como el ensayo Proctor (Proctor, 1933).

Cuando el contenido de humedad es inferior al óptimo, la falta de agua limita la capacidad de las partículas para reorganizarse, generando una estructura con mayor cantidad de vacíos y menor densidad. Esto se traduce en una reducción de la resistencia mecánica, ya que la transmisión de esfuerzos entre partículas es menos eficiente. Por otro lado, un exceso de humedad produce el efecto contrario: el agua ocupa los espacios entre partículas, generando presiones internas que dificultan la compactación y aumentan la porosidad del material, lo que también disminuye su resistencia (Das & Sobhan, 2014).

En el caso de los ladrillos de tierra comprimida estabilizados con cemento, el contenido de humedad adquiere una doble importancia. Además de su función en la compactación, el agua es indispensable para el proceso de hidratación del cemento, el cual permite la formación de compuestos cementantes responsables del incremento de la resistencia. Una cantidad insuficiente de agua puede limitar estas reacciones químicas, mientras que un exceso puede afectar la estructura del material y generar debilidad en la matriz resultante (Reddy & Gupta, 2006).

Asimismo, el control del contenido de humedad durante el proceso de fabricación es esencial para garantizar la uniformidad de los ladrillos. Variaciones en este parámetro pueden generar diferencias significativas en la densidad y resistencia entre especímenes, afectando la calidad del producto final. Por ello, es necesario establecer procedimientos adecuados de dosificación y mezclado que permitan mantener condiciones consistentes en la producción.

El contenido de humedad también influye en el comportamiento del material durante el proceso de curado. Una adecuada retención de humedad favorece el desarrollo progresivo de la resistencia, especialmente en las primeras etapas, donde las reacciones de hidratación del cemento son más activas. La pérdida excesiva de agua en esta fase puede interrumpir estos procesos, reduciendo el potencial de resistencia del material (Walker, 2005).

En síntesis, el contenido de humedad es una variable crítica que afecta tanto el proceso de fabricación como el desempeño mecánico de los ladrillos de tierra comprimida. Su control adecuado permite optimizar la densificación del material, favorecer las reacciones de estabilización y garantizar una mayor resistencia a compresión. La identificación del contenido de humedad óptimo y su mantenimiento durante la producción constituye, por tanto, un requisito fundamental para obtener materiales de calidad y comportamiento confiable.

1.2.3.3. Energía de compactación

La energía de compactación es un parámetro clave en la fabricación de ladrillos de tierra comprimida, ya que determina el grado de densificación alcanzado en el material y, por ende, su resistencia a compresión. Este concepto hace referencia a la cantidad de trabajo mecánico aplicado al suelo para reducir los vacíos internos y mejorar el contacto entre partículas, generando una estructura más compacta y estable.

Desde el punto de vista físico, la aplicación de energía de compactación permite vencer las fuerzas de fricción y cohesión entre las partículas del suelo, facilitando su reorganización en una configuración más densa. A medida que se incrementa la energía aplicada, las partículas se acomodan de manera más eficiente, reduciendo la porosidad y aumentando la densidad seca del material. Este proceso tiene una relación directa con la resistencia mecánica, ya que una mayor densificación mejora la capacidad del material para transmitir esfuerzos (Das & Sobhan, 2014).

En el caso de los ladrillos de tierra comprimida, la energía de compactación se aplica generalmente mediante prensas manuales, mecánicas o hidráulicas. La magnitud de la

presión ejercida y la uniformidad de su aplicación influyen directamente en la calidad del producto final. Estudios han demostrado que incrementos en la presión de compactación generan mejoras significativas en la resistencia a compresión, especialmente cuando se combinan con condiciones óptimas de humedad (Walker, 2005).

Sin embargo, la relación entre energía de compactación y resistencia no es indefinida. Existe un punto a partir del cual incrementos adicionales en la energía aplicada generan mejoras marginales en la densidad y, por consiguiente, en la resistencia. Este comportamiento responde a la limitación física del material para seguir reduciendo sus vacíos, lo que indica la existencia de un nivel óptimo de compactación que maximiza la eficiencia del proceso.

La energía de compactación también está estrechamente vinculada al contenido de humedad del material. Como se ha señalado previamente, la humedad actúa como un facilitador del proceso de compactación, permitiendo que la energía aplicada sea más efectiva en la reorganización de partículas. En este sentido, la combinación adecuada entre energía de compactación y contenido de humedad es fundamental para alcanzar la máxima densidad seca y, por ende, la mayor resistencia a compresión (Proctor, 1933).

Además, la energía de compactación influye en la homogeneidad del material. Una distribución uniforme de la presión garantiza que todas las zonas del ladrillo presenten propiedades similares, evitando puntos débiles que puedan convertirse en zonas de falla. Por el contrario, una compactación irregular puede generar diferencias en la densidad interna, afectando negativamente el comportamiento mecánico del material.

En materiales estabilizados con cemento, una adecuada energía de compactación favorece la distribución homogénea del estabilizante y mejora el contacto entre partículas, lo que potencia la formación de enlaces cementantes. Este efecto contribuye a un incremento adicional de la resistencia y a una mayor cohesión interna del material (Reddy & Gupta, 2006).

En síntesis, la energía de compactación es una variable fundamental que influye directamente en la densidad, la porosidad y la resistencia a compresión de los ladrillos de tierra comprimida. Su adecuada aplicación, en combinación con un control preciso del contenido de humedad y de la composición del suelo, permite optimizar el desempeño mecánico del material y garantizar su calidad en aplicaciones constructivas.

1.2.3.4. Tiempo de curado

El tiempo de curado es una variable fundamental en el desarrollo de la resistencia a compresión de los ladrillos de tierra comprimida, especialmente cuando estos han sido estabilizados con cemento. Este periodo corresponde al intervalo durante el cual el material experimenta procesos físico-químicos que permiten el incremento progresivo de su resistencia, como resultado de la hidratación del cemento y la consolidación de la estructura interna.

Desde el punto de vista químico, el curado está directamente asociado a las reacciones de hidratación del cemento, mediante las cuales se forman compuestos como los silicatos cálcicos hidratados (C-S-H), responsables de la cohesión entre partículas. Estas reacciones no son instantáneas, sino que se desarrollan de manera gradual en el tiempo, lo que explica el aumento progresivo de la resistencia a medida que transcurren los días de curado (Reddy & Gupta, 2006).

En términos generales, se ha observado que el desarrollo de la resistencia es más significativo durante las primeras etapas del curado, especialmente en los primeros 7 a 14 días, periodo en el cual ocurre la mayor parte de las reacciones iniciales de hidratación. Posteriormente, el incremento de resistencia continúa, aunque a un ritmo menor, pudiendo extenderse hasta 28 días o más, dependiendo de las condiciones del material y del entorno (Neville, 2011).

El control de las condiciones de curado es esencial para garantizar un adecuado desarrollo de la resistencia. Factores como la humedad y la temperatura influyen directamente en la velocidad y eficiencia de las reacciones químicas. Un ambiente con

suficiente humedad favorece la continuidad de la hidratación, mientras que la pérdida prematura de agua puede interrumpir este proceso, limitando el potencial de resistencia del material. Por ello, es común mantener los ladrillos en condiciones controladas durante el curado, evitando la exposición directa a condiciones extremas (Walker, 2005).

En el caso de los ladrillos de tierra comprimida, el tiempo de curado no solo influye en la resistencia, sino también en la estabilidad dimensional y la durabilidad del material. Un curado adecuado permite reducir la aparición de fisuras por retracción y mejora el comportamiento frente a la acción del agua y otros agentes externos. En contraste, un curado insuficiente puede generar materiales con baja cohesión y mayor susceptibilidad a la degradación.

Además, el tiempo de curado interactúa con otras variables del proceso, como la dosificación de cemento y la densidad del material. Mezclas con mayor contenido de cemento tienden a mostrar incrementos más significativos de resistencia a lo largo del tiempo, debido a la mayor cantidad de compuestos hidratables presentes. Asimismo, una adecuada compactación favorece el desarrollo uniforme de la resistencia durante el curado, al facilitar la distribución homogénea del cemento en la matriz del material.

En investigaciones experimentales, es común evaluar la resistencia a compresión en diferentes edades de curado, como 7, 14, 21 y 28 días, con el fin de analizar la evolución del comportamiento mecánico del material. Este enfoque permite identificar tendencias y establecer relaciones entre el tiempo de curado y la resistencia obtenida, lo que resulta fundamental para el diseño y control de calidad en la fabricación de ladrillos de tierra comprimida.

En síntesis, el tiempo de curado es una variable crítica que condiciona el desarrollo de la resistencia a compresión en materiales estabilizados. Su adecuada gestión permite maximizar el potencial mecánico del material, garantizar su durabilidad y asegurar un comportamiento confiable en aplicaciones constructivas. Comprender su influencia es

esencial para interpretar los resultados experimentales y optimizar los procesos de fabricación.

1.2.4. Comportamiento esfuerzo-deformación

El comportamiento esfuerzo–deformación describe la respuesta mecánica de un material cuando es sometido a una carga, permitiendo analizar cómo este se deforma y en qué punto alcanza su capacidad máxima antes de fallar. En el caso de los ladrillos de tierra comprimida, este comportamiento presenta características particulares debido a su naturaleza heterogénea y a la interacción entre sus componentes, como el suelo, el agua y los productos de estabilización.

Desde un enfoque teórico, la relación esfuerzo–deformación se representa mediante una curva que refleja las distintas etapas del comportamiento del material bajo carga. En una primera fase, el material suele presentar un comportamiento aproximadamente lineal, donde el esfuerzo es proporcional a la deformación, lo que corresponde a una respuesta elástica. En esta etapa, si se retira la carga, el material puede recuperar parcialmente su forma original (Gere & Timoshenko, 1997).

A medida que la carga aumenta, el material entra en una zona no lineal donde comienzan a desarrollarse deformaciones permanentes. En los ladrillos de tierra comprimida, esta etapa está asociada a la reorganización interna de las partículas y al inicio de microfisuras en la matriz del material. Estas microfisuras se generan en puntos de concentración de esfuerzos o en zonas de menor cohesión, y su propagación progresiva conduce a una disminución en la rigidez del material (Callister & Rethwisch, 2018).

Posteriormente, se alcanza un punto máximo en la curva, correspondiente al esfuerzo último o resistencia a compresión. Este punto representa la capacidad máxima del material para soportar carga. En materiales frágiles como los CEB/LTC, este máximo suele alcanzarse con deformaciones relativamente bajas, lo que indica una limitada capacidad de deformación antes de la falla.

Después de alcanzar el esfuerzo máximo, el material experimenta una pérdida abrupta de resistencia, entrando en la etapa de falla. En esta fase, la propagación de fisuras se vuelve incontrolable, provocando la ruptura del elemento. A diferencia de materiales dúctiles, donde la falla ocurre de manera progresiva, los ladrillos de tierra comprimida tienden a fallar de forma súbita, característica típica de materiales con baja capacidad de deformación plástica (Das & Sobhan, 2014).

El comportamiento esfuerzo–deformación en estos materiales también está influenciado por variables como la dosificación de cemento, la densidad y el contenido de humedad. Un mayor contenido de cemento suele incrementar la rigidez del material, generando curvas más pronunciadas y una menor deformación antes de la falla. Por otro lado, materiales con menor estabilización pueden presentar una respuesta más gradual, aunque con menores valores de resistencia (Reddy & Gupta, 2006).

Asimismo, la compactación y la homogeneidad del material influyen en la forma de la curva. Una adecuada densificación permite una distribución más uniforme de esfuerzos, lo que mejora la respuesta mecánica y retrasa la aparición de fisuras. En contraste, la presencia de vacíos o irregularidades internas puede generar concentraciones de esfuerzos que aceleran el proceso de falla (Walker, 2005).

En síntesis, el análisis del comportamiento esfuerzo–deformación permite comprender no solo la resistencia máxima del material, sino también su capacidad de deformación y su modo de falla. En los ladrillos de tierra comprimida, este comportamiento refleja la interacción de múltiples variables que determinan su desempeño mecánico, constituyendo una herramienta fundamental para la interpretación de resultados experimentales y el diseño de aplicaciones estructurales.

1.2.5. Modos de falla en materiales frágiles

Los ladrillos de tierra comprimida se comportan predominantemente como materiales frágiles, es decir, presentan una limitada capacidad de deformación antes de la falla y tienden a romperse de manera súbita una vez alcanzada su resistencia máxima. El

análisis de los modos de falla en este tipo de materiales es fundamental para comprender su comportamiento estructural, identificar sus debilidades y mejorar su desempeño mediante un adecuado control de las variables de fabricación.

En términos generales, la falla en materiales frágiles está asociada a la iniciación y propagación de fisuras internas que se desarrollan bajo la acción de esfuerzos mecánicos. Estas fisuras suelen originarse en defectos o discontinuidades presentes en la estructura del material, como vacíos, microgrietas preexistentes o zonas de menor cohesión. A medida que la carga aumenta, las fisuras se propagan de forma progresiva hasta alcanzar un punto crítico en el que se produce la ruptura del material (Callister & Rethwisch, 2018).

Uno de los modos de falla más comunes en ladrillos de tierra comprimida sometidos a compresión es la **falla por aplastamiento**, caracterizada por la fragmentación del material en múltiples piezas. Este tipo de falla ocurre cuando el esfuerzo compresivo supera la capacidad de resistencia del material, generando un colapso interno debido a la pérdida de cohesión entre partículas.

Otro modo frecuente es la **falla por fisuración vertical**, en la cual se desarrollan grietas longitudinales paralelas a la dirección de la carga. Este comportamiento está relacionado con la generación de tensiones laterales internas, producto del efecto de Poisson, que inducen esfuerzos de tracción en direcciones perpendiculares a la carga aplicada. Dado que los materiales frágiles presentan baja resistencia a tracción, estas tensiones provocan la formación de fisuras que conducen a la falla (Gere & Timoshenko, 1997).

Asimismo, puede presentarse la **falla por corte o cizallamiento**, especialmente en materiales con baja cohesión o en condiciones de carga no uniforme. En este caso, la ruptura ocurre a lo largo de planos inclinados, evidenciando un deslizamiento relativo entre las partículas del material. Este modo de falla está influenciado por la fricción interna y la cohesión del sistema, así como por la calidad de la compactación.

En materiales estabilizados con cemento, la presencia de enlaces cementantes modifica los modos de falla, generando un comportamiento más rígido y, en muchos casos,

más frágil. Si bien el incremento de la resistencia reduce la probabilidad de falla bajo cargas normales, también puede provocar una ruptura más abrupta, con menor aviso previo. Este comportamiento debe ser considerado en el diseño estructural, ya que limita la capacidad del material para redistribuir esfuerzos (Reddy & Gupta, 2006).

El tipo de suelo, la densidad alcanzada y la homogeneidad de la mezcla también influyen en los modos de falla. Materiales con alta porosidad o compactación deficiente tienden a presentar fallas más irregulares y menos predecibles, mientras que aquellos con una estructura más uniforme muestran patrones de falla más definidos. De igual manera, la presencia de humedad puede debilitar la cohesión interna, facilitando la propagación de fisuras.

Desde un enfoque práctico, la identificación de los modos de falla permite evaluar la calidad del material y la eficacia del proceso de fabricación. La observación de patrones de ruptura en ensayos de laboratorio proporciona información valiosa sobre las condiciones internas del material y sobre las variables que deben ser optimizadas para mejorar su desempeño.

En síntesis, los modos de falla en materiales frágiles como los ladrillos de tierra comprimida están determinados por la interacción de factores mecánicos, físicos y de fabricación. Su comprensión es esencial para interpretar los resultados de ensayos, mejorar la calidad del material y garantizar su comportamiento adecuado en aplicaciones constructivas. Este análisis complementa el estudio de la resistencia a compresión, proporcionando una visión integral del desempeño mecánico del material.

1.2.6. Métodos de ensayo normalizados

La determinación de la resistencia a compresión en materiales de construcción requiere la aplicación de métodos de ensayo normalizados que garanticen la confiabilidad, repetibilidad y comparabilidad de los resultados. En el caso de los ladrillos de tierra comprimida, el uso de procedimientos estandarizados permite evaluar su desempeño

mecánico bajo condiciones controladas, facilitando su clasificación y su eventual aplicación en sistemas constructivos formales.

Los métodos de ensayo normalizados establecen lineamientos específicos respecto a la preparación de las muestras, las condiciones de carga, la velocidad de aplicación del esfuerzo y la forma de calcular la resistencia. Estas directrices buscan minimizar la variabilidad de los resultados atribuible a factores externos, asegurando que las diferencias observadas respondan únicamente a las características propias del material (ASTM, 2018).

En general, el ensayo de resistencia a compresión consiste en someter un espécimen a una carga axial creciente hasta alcanzar su falla. Durante el ensayo, se registra la carga máxima soportada por el material, la cual se utiliza para calcular la resistencia a compresión mediante la relación entre la fuerza aplicada y el área de la sección transversal del espécimen. Este procedimiento es ampliamente utilizado en diversos materiales, incluyendo concreto, cerámica y unidades de mampostería (Neville, 2011).

En el ámbito específico de los ladrillos y unidades de albañilería, existen normas técnicas que establecen procedimientos detallados para la evaluación de la resistencia a compresión. Estas normas incluyen especificaciones sobre la geometría de las muestras, el acondicionamiento previo al ensayo, el uso de materiales de nivelación (como morteros o placas intermedias) y la velocidad de carga. El cumplimiento de estos requisitos es esencial para obtener resultados representativos y comparables.

En el contexto peruano, normas como la ITINTEC 331.018 han sido utilizadas como referencia para la evaluación de la resistencia a compresión en unidades de albañilería, incluyendo materiales no convencionales. A nivel internacional, normas como ASTM C67 y ASTM C39 establecen procedimientos para el ensayo de unidades de mampostería y cilindros de concreto, respectivamente, sirviendo como base metodológica para la evaluación de materiales similares (ASTM, 2018).

Sin embargo, en el caso de los ladrillos de tierra comprimida, la aplicación de estas normas presenta ciertas limitaciones. La variabilidad en la forma, tamaño y composición de

los especímenes, así como la naturaleza heterogénea del material, puede dificultar la adaptación directa de procedimientos diseñados para materiales más uniformes. Esto ha llevado a la necesidad de ajustar o complementar los métodos existentes para adecuarlos a las particularidades de los CEB/LTC.

A pesar de estas limitaciones, el uso de ensayos normalizados sigue siendo fundamental para validar el comportamiento mecánico del material y establecer parámetros de calidad. La estandarización de los procedimientos permite comparar resultados entre diferentes estudios, identificar tendencias y desarrollar modelos predictivos basados en datos confiables.

En síntesis, los métodos de ensayo normalizados constituyen una herramienta esencial para la evaluación de la resistencia a compresión en ladrillos de tierra comprimida. Su aplicación adecuada permite garantizar la calidad de los resultados, facilitar la comparación entre investigaciones y contribuir al desarrollo de criterios técnicos que respalden el uso de estos materiales en la ingeniería civil.

1.2.7. Limitaciones de los ensayos convencionales

Los ensayos convencionales de resistencia a compresión han sido ampliamente utilizados para evaluar el comportamiento mecánico de materiales de construcción, proporcionando resultados estandarizados y comparables. Sin embargo, cuando se aplican a materiales como los ladrillos de tierra comprimida, presentan una serie de limitaciones que deben ser consideradas para una correcta interpretación de los resultados y para el desarrollo de metodologías más adecuadas a la naturaleza de estos materiales.

Una de las principales limitaciones radica en la **heterogeneidad del material**. A diferencia de materiales industriales con composición uniforme, los CEB/LTC dependen de la variabilidad del suelo, lo que puede generar diferencias significativas entre muestras. Esta variabilidad dificulta la obtención de resultados consistentes, incluso cuando se siguen procedimientos estandarizados, afectando la repetibilidad del ensayo (Houben & Guillaud, 1994).

Otra limitación importante es la **adaptación de normas diseñadas para otros materiales**. Muchos ensayos de compresión utilizados en CEB se basan en normativas desarrolladas para concreto o ladrillos cerámicos, los cuales presentan propiedades físicas y mecánicas distintas. Esta adaptación puede generar inconsistencias en la evaluación, ya que no siempre se consideran las particularidades del comportamiento de los materiales de tierra, como su sensibilidad a la humedad o su estructura granular (Walker, 2005).

Asimismo, los ensayos convencionales suelen requerir **equipamiento especializado**, como máquinas universales de ensayo, que no siempre están disponibles en contextos donde se producen ladrillos de tierra comprimida, especialmente en zonas rurales o de producción artesanal. Esta limitación restringe la posibilidad de realizar controles de calidad sistemáticos, lo que afecta la confiabilidad del material en aplicaciones reales.

Otra restricción relevante es que estos ensayos se enfocan principalmente en la **resistencia a compresión**, dejando de lado otras propiedades mecánicas importantes, como la resistencia a tracción. En materiales frágiles, la tracción juega un papel clave en el inicio de fallas, por lo que su ausencia en la evaluación limita la comprensión integral del comportamiento mecánico del material. Esta situación genera una dependencia excesiva de la resistencia a compresión como único parámetro de evaluación.

Además, los ensayos convencionales no siempre reproducen las **condiciones reales de servicio**. Las pruebas se realizan bajo condiciones controladas que pueden diferir significativamente de las situaciones a las que el material estará expuesto en la práctica, como variaciones de humedad, cargas no uniformes o efectos ambientales. Esto puede generar discrepancias entre los resultados de laboratorio y el comportamiento real del material en obra.

También se debe considerar la **sensibilidad del ensayo a la preparación de la muestra**. Factores como la nivelación de las superficies, la alineación durante la carga y la uniformidad del espécimen pueden influir en los resultados obtenidos. En materiales como los CEB, donde pequeñas variaciones en la fabricación pueden generar cambios

significativos en el comportamiento, esta sensibilidad adquiere mayor relevancia (Das & Sobhan, 2014).

Finalmente, la interpretación de los resultados puede verse limitada por la **falta de modelos específicos** que integren las particularidades de los materiales de tierra. Si bien los ensayos proporcionan valores de resistencia, estos no siempre permiten establecer relaciones claras con otras propiedades del material o predecir su comportamiento en diferentes condiciones.

En síntesis, aunque los ensayos convencionales de compresión son una herramienta fundamental para la evaluación mecánica, presentan limitaciones importantes cuando se aplican a ladrillos de tierra comprimida. Estas limitaciones evidencian la necesidad de desarrollar metodologías complementarias y enfoques alternativos que permitan una caracterización más completa, accesible y representativa del comportamiento real del material.

1.2.8. Interpretación de resultados en CEB

La interpretación de los resultados obtenidos en ensayos de resistencia a compresión en ladrillos de tierra comprimida constituye una etapa clave para evaluar el desempeño del material y establecer su viabilidad en aplicaciones constructivas. A diferencia de materiales industrializados con comportamientos más uniformes, los CEB/LTC presentan una mayor variabilidad, por lo que el análisis de los resultados debe realizarse considerando no solo los valores numéricos obtenidos, sino también el contexto de fabricación y las condiciones del ensayo.

En primer lugar, es fundamental reconocer que los valores de resistencia a compresión deben analizarse en función de las **condiciones de producción del material**, tales como la dosificación de cemento, el contenido de humedad, la energía de compactación y el tiempo de curado. Estas variables influyen directamente en los resultados, por lo que comparaciones entre diferentes muestras solo son válidas cuando se han mantenido condiciones similares en su elaboración (Reddy & Gupta, 2006).

Asimismo, la interpretación de resultados debe considerar la **variabilidad inherente del material**. En los ladrillos de tierra comprimida, es común encontrar dispersión en los valores de resistencia debido a la heterogeneidad del suelo y a pequeñas variaciones en el proceso de fabricación. Por ello, es recomendable analizar los resultados mediante medidas estadísticas, como el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación, que permiten obtener una visión más representativa del comportamiento del conjunto de muestras (Das & Sobhan, 2014).

Otro aspecto importante es la **identificación de tendencias** en los resultados. Más allá de los valores individuales, el análisis debe enfocarse en cómo varía la resistencia en función de las variables estudiadas. Por ejemplo, incrementos en la dosificación de cemento o en el tiempo de curado suelen reflejarse en aumentos progresivos de la resistencia, lo que permite establecer relaciones funcionales entre estas variables y el comportamiento mecánico del material.

La interpretación también debe incorporar el análisis de los **modos de falla observados durante los ensayos**. La forma en que el material se fractura proporciona información valiosa sobre su comportamiento interno, la calidad de la compactación y la homogeneidad de la mezcla. Fallas uniformes y bien definidas suelen indicar un material bien consolidado, mientras que fallas irregulares pueden evidenciar deficiencias en el proceso de fabricación (Callister & Rethwisch, 2018).

Además, es importante contextualizar los resultados en función de los **requerimientos de uso del material**. No todos los valores de resistencia deben ser evaluados con los mismos criterios; su adecuación depende del tipo de aplicación constructiva. En edificaciones de baja altura, valores moderados de resistencia pueden ser suficientes, mientras que aplicaciones más exigentes requieren mayores niveles de desempeño mecánico (Walker, 2005).

En el caso de investigaciones experimentales, como la presente, la interpretación de resultados también implica el desarrollo de **relaciones correlacionales y modelos**

predictivos. La identificación de patrones entre variables, como la relación entre resistencia a compresión y resistencia a tracción, permite avanzar hacia una comprensión más integral del comportamiento del material y facilita la estimación de propiedades a partir de ensayos más accesibles.

Finalmente, la interpretación de resultados debe realizarse con un enfoque crítico, considerando las **limitaciones del ensayo y las condiciones experimentales**. Factores como la precisión de los equipos, la preparación de las muestras y las condiciones ambientales pueden influir en los resultados, por lo que es necesario evaluar su impacto en el análisis final.

En síntesis, la interpretación de resultados en ladrillos de tierra comprimida requiere un enfoque integral que combine el análisis cuantitativo con la comprensión del proceso de fabricación y del comportamiento del material. Esta interpretación no solo permite evaluar la calidad del producto, sino que también constituye la base para el desarrollo de modelos, la optimización de procesos y la aplicación segura del material en la construcción.

El análisis desarrollado en el presente capítulo ha permitido establecer una comprensión integral de la resistencia a compresión en los ladrillos de tierra comprimida, abordando tanto sus fundamentos teóricos como las variables que influyen en su comportamiento mecánico. A lo largo de las secciones expuestas, se ha evidenciado que esta propiedad no depende de un único factor, sino de la interacción compleja entre la composición del suelo, la dosificación de cemento, el contenido de humedad, la energía de compactación y el tiempo de curado.

Asimismo, se ha demostrado que la resistencia a compresión no debe interpretarse de manera aislada, sino como parte de un sistema de propiedades interrelacionadas que definen el desempeño estructural del material. Conceptos como la densidad, la porosidad y el comportamiento esfuerzo–deformación permiten comprender cómo el material responde ante la aplicación de cargas, mientras que el análisis de los modos de falla proporciona información clave sobre sus limitaciones y mecanismos de ruptura.

Por otro lado, la revisión de los métodos de ensayo normalizados ha permitido identificar la importancia de contar con procedimientos estandarizados para la evaluación del material, al mismo tiempo que se han reconocido las limitaciones que estos presentan cuando se aplican a materiales de naturaleza heterogénea como los CEB/LTC. Esta situación pone en evidencia la necesidad de complementar los enfoques tradicionales con metodologías que se adapten mejor a las condiciones reales de producción y uso.

La interpretación de resultados, abordada en las últimas secciones, ha resaltado la importancia de un análisis crítico que considere tanto los valores obtenidos como el contexto en el que se generan. Este enfoque permite no solo evaluar la calidad del material, sino también identificar tendencias, establecer relaciones entre variables y sentar las bases para el desarrollo de modelos predictivos.

En conjunto, este capítulo ha proporcionado el sustento teórico necesario para comprender la resistencia a compresión como una variable fundamental en el comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida. Este marco conceptual resulta esencial para el desarrollo del presente estudio, ya que permite contextualizar los resultados experimentales y fundamentar el análisis correlacional que se plantea en los capítulos siguientes.

En este sentido, la comprensión de la resistencia a compresión no solo constituye un fin en sí mismo, sino que se convierte en un punto de partida para explorar otras propiedades mecánicas del material. Particularmente, la relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción emerge como un aspecto clave que será abordado en el siguiente capítulo, donde se profundizará en el análisis de esta segunda variable y en su evaluación mediante métodos experimentales alternativos.

De esta manera, se establece una transición natural hacia el estudio de la resistencia a tracción, considerada una propiedad complementaria que permitirá ampliar la comprensión del comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida y fortalecer el enfoque integral del presente trabajo.

CAPÍTULO II

RESISTENCIA A TRACCIÓN Y ENSAYOS EMPÍRICOS EN CEB

La resistencia a tracción constituye una de las propiedades mecánicas menos estudiadas y, al mismo tiempo, más relevantes en el análisis del comportamiento estructural de los ladrillos de tierra comprimida. A pesar de que estos materiales trabajan predominantemente bajo esfuerzos de compresión, la tracción desempeña un papel determinante en el inicio de fallas, ya que los materiales frágiles presentan una capacidad limitada para resistir esfuerzos tensionales. En este sentido, la comprensión de la resistencia a tracción resulta esencial para lograr una evaluación más completa del desempeño mecánico de los CEB/LTC.

A diferencia de la resistencia a compresión, cuya determinación cuenta con procedimientos relativamente estandarizados, la evaluación de la resistencia a tracción en ladrillos de tierra comprimida enfrenta importantes limitaciones. La ausencia de normas específicas y la complejidad de reproducir condiciones de tracción directa en este tipo de materiales han llevado a que esta propiedad sea frecuentemente estimada de manera indirecta o, en muchos casos, omitida en los procesos de caracterización. Esta situación genera un vacío en el conocimiento técnico, limitando la capacidad de predecir con precisión el comportamiento del material ante sollicitaciones reales.

En respuesta a esta problemática, han surgido enfoques alternativos basados en ensayos empíricos que buscan aproximar la resistencia a tracción mediante sistemas accesibles y adaptados a contextos de producción artesanal o de recursos limitados. Estos métodos, aunque no estandarizados, se fundamentan en principios básicos de la mecánica de materiales y ofrecen una alternativa viable para la evaluación de esta propiedad en condiciones donde no es posible emplear equipamiento especializado.

En este capítulo se aborda, en primer lugar, el marco teórico relacionado con la resistencia a tracción en materiales frágiles, incluyendo sus fundamentos mecánicos, su relación con otras propiedades y los principales métodos utilizados para su evaluación. Posteriormente, se analiza el desarrollo y aplicación de ensayos empíricos en ladrillos de tierra comprimida, destacando su potencial como herramienta práctica para la caracterización del material.

El propósito de este capítulo es proporcionar una base conceptual y metodológica que permita comprender la importancia de la resistencia a tracción en el comportamiento de los CEB/LTC, así como justificar la necesidad de implementar métodos alternativos de evaluación. Este enfoque servirá como soporte para el análisis experimental y el desarrollo de modelos correlacionales que serán presentados en el capítulo de estudio de caso, contribuyendo a una comprensión más integral del comportamiento mecánico del material.

2.1 REFERENTES TEÓRICOS SOBRE RESISTENCIA A TRACCIÓN

La resistencia a tracción es una propiedad fundamental en la mecánica de materiales, particularmente relevante en el estudio de materiales frágiles como los ladrillos de tierra comprimida, donde el comportamiento ante esfuerzos tensionales condiciona el inicio y propagación de fallas. Aunque estos materiales están diseñados principalmente para trabajar bajo compresión, la tracción juega un papel crítico en su desempeño estructural, ya que incluso pequeñas tensiones pueden generar fisuras que comprometen su integridad.

A lo largo del desarrollo de la ingeniería de materiales, diversos estudios han abordado la resistencia a tracción desde enfoques teóricos y experimentales, estableciendo principios que permiten comprender su comportamiento en distintos tipos de materiales. En sistemas frágiles, como los suelos estabilizados, la resistencia a tracción suele ser significativamente menor que la resistencia a compresión, lo que explica su alta susceptibilidad a la fisuración. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en

materiales como el concreto, la cerámica y los suelos cementados, donde la tracción se reconoce como el factor crítico en el inicio de la falla (Callister & Rethwisch, 2018).

En el caso específico de los materiales de tierra, la investigación sobre resistencia a tracción ha sido más limitada en comparación con la compresión, debido a la dificultad de reproducir ensayos controlados y a la ausencia de metodologías estandarizadas. No obstante, algunos estudios han explorado la relación entre ambas propiedades, proponiendo modelos que permiten estimar la resistencia a tracción a partir de la resistencia a compresión, lo que ha contribuido a ampliar la comprensión del comportamiento mecánico de estos materiales.

Asimismo, se han desarrollado diferentes métodos para evaluar la resistencia a tracción, tanto directos como indirectos. Entre los métodos indirectos destacan ensayos como la tracción por división o ensayo brasileño, ampliamente utilizado en concreto y materiales similares. Sin embargo, la aplicación de estos métodos en ladrillos de tierra comprimida presenta limitaciones debido a la geometría de las muestras y a la heterogeneidad del material, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas más adecuadas.

En este contexto, los ensayos empíricos han emergido como una opción relevante, especialmente en entornos donde no se dispone de equipos especializados. Estos métodos, aunque no estandarizados, se basan en principios fundamentales de equilibrio de fuerzas y permiten obtener estimaciones razonables de la resistencia a tracción. Su desarrollo responde a la necesidad de adaptar la evaluación mecánica a las condiciones reales de producción y uso de los materiales de tierra.

En este apartado se revisan los principales fundamentos teóricos relacionados con la resistencia a tracción, así como los enfoques y metodologías desarrollados para su evaluación en materiales frágiles. Este análisis permitirá contextualizar la importancia de esta propiedad y establecer las bases para el estudio de los ensayos empíricos aplicados a ladrillos de tierra comprimida, que serán abordados en las siguientes secciones.

2.1.1. Importancia de la resistencia a tracción en materiales frágiles

La resistencia a tracción es una propiedad crítica en el comportamiento de los materiales frágiles, ya que, a diferencia de su respuesta bajo compresión, estos presentan una capacidad muy limitada para soportar esfuerzos tensionales. En sistemas como los ladrillos de tierra comprimida, el inicio de la falla está estrechamente asociado a la generación de tensiones de tracción, incluso cuando el material se encuentra sometido a cargas predominantemente compresivas. Esta condición convierte a la resistencia a tracción en un parámetro determinante para comprender la integridad estructural del material.

Desde el punto de vista mecánico, los materiales frágiles se caracterizan por una baja capacidad de deformación plástica, lo que implica que no pueden redistribuir eficientemente los esfuerzos internos antes de fallar. Como consecuencia, pequeñas concentraciones de tensiones de tracción, originadas por discontinuidades, defectos internos o irregularidades geométricas, pueden desencadenar la formación de microfisuras que evolucionan rápidamente hacia la ruptura total del material (Callister & Rethwisch, 2018).

En estructuras construidas con materiales de tierra, la importancia de la resistencia a tracción se manifiesta en múltiples escenarios. Por ejemplo, durante la aplicación de cargas verticales, el efecto de Poisson genera deformaciones laterales que inducen tensiones de tracción en direcciones perpendiculares a la carga. Asimismo, acciones externas como asentamientos diferenciales, variaciones térmicas o cambios en el contenido de humedad pueden generar esfuerzos tensionales que superan la capacidad resistente del material, provocando fisuración y pérdida de estabilidad (Gere & Timoshenko, 1997).

A pesar de esta relevancia, la resistencia a tracción ha sido históricamente subestimada en el análisis de materiales de construcción, especialmente en aquellos de naturaleza no convencional. En el caso de los ladrillos de tierra comprimida, la atención se ha centrado principalmente en la resistencia a compresión, debido a la mayor facilidad para su medición y a la disponibilidad de normativas estandarizadas. Sin embargo, esta

aproximación resulta incompleta, ya que no considera el mecanismo real de falla del material, que está gobernado en gran medida por su comportamiento en tracción.

Diversas investigaciones han demostrado que la resistencia a tracción en materiales frágiles suele representar una fracción reducida de su resistencia a compresión, generalmente inferior al 15%. Esta relación pone en evidencia la vulnerabilidad del material frente a esfuerzos tensionales y resalta la necesidad de incorporar esta propiedad en el análisis mecánico y en el diseño estructural (Das & Sobhan, 2014).

Además, la resistencia a tracción tiene una influencia directa en la durabilidad del material. La formación de fisuras facilita la penetración de agua y agentes agresivos, lo que puede acelerar procesos de degradación y reducir la vida útil de las estructuras. En este sentido, mejorar la capacidad del material para resistir esfuerzos de tracción contribuye no solo a incrementar su resistencia, sino también a mejorar su comportamiento a largo plazo (Walker, 2005).

En el contexto de los ladrillos de tierra comprimida, la evaluación de la resistencia a tracción adquiere una importancia adicional debido a la ausencia de métodos estandarizados y a la necesidad de desarrollar soluciones adaptadas a condiciones de producción accesibles. Comprender esta propiedad permite avanzar hacia una caracterización más completa del material y hacia el desarrollo de modelos que integren diferentes variables mecánicas.

En síntesis, la resistencia a tracción es un parámetro esencial en el análisis de materiales frágiles, ya que condiciona el inicio de la falla y la propagación de fisuras. Su consideración en el estudio de los ladrillos de tierra comprimida permite superar enfoques limitados basados únicamente en la compresión, contribuyendo a una comprensión más integral del comportamiento mecánico y a la mejora de su desempeño en aplicaciones constructivas.

2.1.2. Diferencia entre tracción directa e indirecta

La evaluación de la resistencia a tracción en materiales frágiles puede realizarse mediante métodos de tracción directa o indirecta, los cuales difieren tanto en su principio de aplicación como en su complejidad experimental. La elección entre uno u otro método depende de las características del material, la disponibilidad de equipos y el nivel de precisión requerido en los resultados.

La **tracción directa** consiste en aplicar una fuerza axial de manera uniforme sobre un espécimen, generando un estado de esfuerzo tensional puro hasta alcanzar la falla. Este método permite medir de forma directa la resistencia a tracción del material, ya que la carga aplicada actúa en la misma dirección en la que se evalúa la resistencia. Desde el punto de vista teórico, es el procedimiento más representativo para determinar esta propiedad, debido a que reproduce de manera ideal el comportamiento del material bajo esfuerzos tensionales (Gere & Timoshenko, 1997).

Sin embargo, la aplicación de ensayos de tracción directa en materiales como los ladrillos de tierra comprimida presenta importantes dificultades. La sujeción del espécimen es uno de los principales retos, ya que es necesario garantizar una transmisión uniforme de la carga sin introducir esfuerzos adicionales que puedan alterar los resultados. Además, la baja resistencia a tracción y la naturaleza frágil del material incrementan la probabilidad de fallas prematuras o no controladas, lo que limita la reproducibilidad del ensayo (Callister & Rethwisch, 2018).

En contraste, los métodos de **tracción indirecta** permiten estimar la resistencia a tracción a partir de la aplicación de cargas compresivas que generan tensiones internas de tracción en el material. Uno de los ensayos más representativos es el ensayo brasileño o de compresión diametral, en el cual se aplica una carga sobre el diámetro de un espécimen cilíndrico, generando tensiones de tracción en su plano central. Este método ha sido ampliamente utilizado en materiales como el concreto y las rocas, debido a su simplicidad y a la facilidad para preparar las muestras.

La principal ventaja de los ensayos indirectos radica en su mayor facilidad de ejecución y en la reducción de problemas asociados a la sujeción del espécimen. Sin embargo, estos métodos no generan un estado de tracción pura, sino una combinación de esfuerzos que requiere la aplicación de modelos teóricos para estimar la resistencia a tracción. Esto introduce cierto nivel de aproximación en los resultados, lo que debe ser considerado en su interpretación (Das & Sobhan, 2014).

En el caso de los ladrillos de tierra comprimida, la aplicación de métodos indirectos también presenta limitaciones. La geometría de las unidades, su heterogeneidad y la presencia de discontinuidades pueden afectar la distribución de esfuerzos durante el ensayo, generando resultados que no siempre reflejan de manera precisa el comportamiento real del material. Estas dificultades han motivado la búsqueda de métodos alternativos que permitan evaluar la resistencia a tracción de manera más representativa y accesible.

En este contexto, los ensayos empíricos surgen como una alternativa intermedia entre los métodos directos e indirectos. Estos procedimientos buscan reproducir condiciones de tracción mediante sistemas simples que, aunque no estandarizados, permiten obtener estimaciones razonables de la resistencia del material en condiciones cercanas a la realidad. Su desarrollo responde a la necesidad de adaptar la evaluación mecánica a contextos donde los métodos tradicionales no resultan viables.

En síntesis, la tracción directa ofrece una medición más precisa y representativa, pero presenta dificultades prácticas en su aplicación, especialmente en materiales frágiles. Por su parte, la tracción indirecta proporciona una alternativa más sencilla, aunque basada en aproximaciones teóricas. La comprensión de estas diferencias es fundamental para seleccionar el método de ensayo más adecuado y para interpretar correctamente los resultados obtenidos en la evaluación de la resistencia a tracción.

2.1.3. Estudios previos en materiales similares (concreto, adobe, suelo-cemento)

El análisis de la resistencia a tracción en materiales frágiles ha sido ampliamente desarrollado en sistemas como el concreto, el adobe y los suelos estabilizados con cemento, constituyendo una base teórica y experimental relevante para comprender el comportamiento de los ladrillos de tierra comprimida. Estos materiales comparten características comunes, como su naturaleza heterogénea, su baja resistencia a tracción en comparación con la compresión y su tendencia a fallar de manera frágil, lo que permite extrapolar conceptos y metodologías hacia el estudio de los CEB/LTC.

En el caso del **concreto**, la resistencia a tracción ha sido objeto de numerosos estudios debido a su importancia en el diseño estructural. Se ha establecido que la resistencia a tracción del concreto representa aproximadamente entre el 8% y el 15% de su resistencia a compresión, lo que evidencia su limitada capacidad para resistir esfuerzos tensionales. Este comportamiento ha llevado al desarrollo de métodos indirectos de evaluación, como el ensayo de tracción por división (ensayo brasileño), ampliamente utilizado por su simplicidad y reproducibilidad. Además, se han propuesto diversas relaciones empíricas que permiten estimar la resistencia a tracción a partir de la resistencia a compresión, facilitando su incorporación en modelos de diseño (Neville, 2011).

Por otro lado, en los materiales de **adobe**, que representan una de las formas más tradicionales de construcción con tierra, la investigación sobre resistencia a tracción ha sido más limitada, pero igualmente relevante. Estudios han demostrado que el adobe presenta una resistencia a tracción significativamente baja, lo que lo hace altamente susceptible a la fisuración bajo cargas externas o variaciones ambientales. La incorporación de fibras naturales, como paja o fibras vegetales, ha sido una estrategia común para mejorar su comportamiento en tracción, aumentando su capacidad de deformación y reduciendo la propagación de fisuras (Houben & Guillaud, 1994).

En el ámbito de los **suelos estabilizados con cemento**, la resistencia a tracción ha sido analizada como un parámetro complementario a la resistencia a compresión, especialmente en aplicaciones geotécnicas y de pavimentos. Investigaciones han evidenciado que la estabilización química incrementa no solo la resistencia a compresión, sino también la resistencia a tracción, debido a la formación de enlaces cementantes entre las partículas del suelo. Sin embargo, al igual que en otros materiales frágiles, la relación entre ambas propiedades mantiene una proporción relativamente baja, lo que confirma la vulnerabilidad del material frente a esfuerzos tensionales (Reddy & Gupta, 2006).

Asimismo, estudios comparativos han mostrado que, aunque los valores absolutos de resistencia a tracción varían entre estos materiales, los mecanismos de falla presentan similitudes importantes. En todos los casos, la ruptura se inicia con la formación de microfisuras que se propagan hasta generar la falla completa del material. Este comportamiento común refuerza la idea de que la tracción es el factor crítico en el inicio del colapso estructural en materiales frágiles (Callister & Rethwisch, 2018).

La revisión de estos estudios también evidencia que, a pesar de los avances en la comprensión del comportamiento en tracción, persisten limitaciones en los métodos de evaluación, especialmente en materiales de tierra. La mayoría de las investigaciones han recurrido a métodos indirectos o a aproximaciones empíricas, lo que resalta la necesidad de desarrollar metodologías más accesibles y representativas para este tipo de materiales.

En síntesis, los estudios previos en concreto, adobe y suelos estabilizados proporcionan un marco de referencia valioso para el análisis de la resistencia a tracción en ladrillos de tierra comprimida. Estos antecedentes permiten identificar patrones de comportamiento, relaciones entre propiedades mecánicas y estrategias de mejora del material, constituyendo una base sólida para el desarrollo de nuevos enfoques experimentales y modelos predictivos aplicados a los CEB/LTC.

2.1.4. Métodos tradicionales de evaluación de tracción

La determinación de la resistencia a tracción en materiales frágiles ha sido abordada mediante diversos métodos tradicionales que buscan reproducir, de manera directa o indirecta, las condiciones de esfuerzo tensional en el material. Estos métodos han sido ampliamente utilizados en materiales como el concreto, las rocas y los suelos estabilizados, constituyendo la base experimental para la caracterización de su comportamiento mecánico frente a esfuerzos de tracción.

El método más representativo desde el punto de vista teórico es el **ensayo de tracción directa**, en el cual se aplica una carga axial creciente sobre el espécimen hasta provocar su falla. Este ensayo permite obtener una medición directa de la resistencia a tracción, ya que la carga aplicada genera un estado de esfuerzo uniforme en la dirección de la tracción. No obstante, su aplicación en materiales frágiles presenta importantes dificultades prácticas, principalmente relacionadas con la sujeción del espécimen y la generación de un campo de esfuerzos homogéneo. Estas limitaciones hacen que su uso sea poco frecuente en materiales de tierra (Gere & Timoshenko, 1997).

Debido a estas dificultades, los métodos de **tracción indirecta** han sido ampliamente adoptados como alternativa. Entre ellos, destaca el **ensayo brasileño o de compresión diametral**, en el cual se aplica una carga compresiva sobre un espécimen cilíndrico, generando tensiones de tracción en su plano central. Este método es ampliamente utilizado en concreto y materiales similares debido a su simplicidad y a la facilidad para preparar las muestras. A partir de la carga aplicada y de la geometría del espécimen, se calcula la resistencia a tracción mediante relaciones teóricas (Neville, 2011).

Otro método indirecto utilizado es el **ensayo de flexión**, en el cual se somete una viga o prisma a una carga transversal que induce tensiones de tracción en una de sus caras. Este ensayo permite evaluar la resistencia a tracción bajo condiciones de flexión, proporcionando información sobre el comportamiento del material en situaciones estructurales reales. Sin embargo, los resultados obtenidos dependen de la distribución de

esfuerzos y de la geometría del espécimen, lo que introduce cierta variabilidad en la interpretación (Callister & Rethwisch, 2018).

En el ámbito de los suelos estabilizados, también se han utilizado métodos como el **ensayo de tracción indirecta en discos compactados**, adaptando principios del ensayo brasileño para evaluar la resistencia a tracción en materiales geotécnicos. Estos ensayos permiten obtener estimaciones razonables de la resistencia, aunque requieren condiciones controladas de preparación y ejecución (Das & Sobhan, 2014).

A pesar de su utilidad, los métodos tradicionales presentan limitaciones cuando se aplican a ladrillos de tierra comprimida. La geometría de las unidades, la heterogeneidad del material y la dificultad para preparar especímenes con formas estandarizadas complican la aplicación directa de estos ensayos. Además, muchos de estos métodos requieren equipamiento especializado que no siempre está disponible en contextos de producción artesanal o de recursos limitados.

En consecuencia, si bien los métodos tradicionales han contribuido significativamente al estudio de la resistencia a tracción en materiales frágiles, su aplicación en CEB/LTC resulta limitada, lo que ha impulsado el desarrollo de enfoques alternativos más adaptados a las características de estos materiales.

En síntesis, los métodos tradicionales de evaluación de tracción incluyen tanto ensayos directos, que permiten una medición más precisa pero presentan dificultades prácticas, como ensayos indirectos, que ofrecen mayor facilidad de aplicación pero requieren interpretaciones teóricas. La comprensión de estos métodos es fundamental para contextualizar las limitaciones existentes y justificar la necesidad de desarrollar técnicas empíricas más accesibles y representativas, como las que se abordarán en el presente estudio.

2.1.5. Limitaciones técnicas y económicas de los ensayos convencionales

La evaluación de la resistencia a tracción en materiales frágiles mediante métodos convencionales presenta diversas limitaciones, tanto desde el punto de vista técnico como económico. Estas restricciones se hacen particularmente evidentes en el caso de los ladrillos de tierra comprimida, cuya naturaleza heterogénea y condiciones de producción dificultan la aplicación directa de ensayos desarrollados para materiales más uniformes.

Desde una perspectiva técnica, una de las principales limitaciones radica en la **dificultad para reproducir condiciones de tracción pura**. En los ensayos de tracción directa, garantizar una distribución uniforme de esfuerzos en el espécimen requiere sistemas de sujeción altamente precisos, los cuales deben evitar la introducción de esfuerzos secundarios que puedan alterar los resultados. En materiales frágiles como los CEB/LTC, esta dificultad se incrementa debido a su baja resistencia a tracción y a su sensibilidad frente a concentraciones de esfuerzo, lo que puede generar fallas prematuras o no representativas (Callister & Rethwisch, 2018).

En el caso de los ensayos indirectos, si bien estos presentan mayor facilidad de aplicación, introducen **limitaciones asociadas a la interpretación de resultados**. Métodos como el ensayo brasileño o el ensayo de flexión no generan un estado de tracción pura, sino una combinación de esfuerzos que requiere el uso de modelos teóricos para estimar la resistencia a tracción. Esta aproximación implica un grado de incertidumbre, especialmente en materiales heterogéneos, donde la distribución de esfuerzos puede diferir de los supuestos teóricos (Das & Sobhan, 2014).

Otra limitación técnica importante es la **adaptabilidad de los métodos a la geometría del material**. Los ensayos tradicionales suelen requerir especímenes con formas y dimensiones estandarizadas, como cilindros o prismas, lo que dificulta su aplicación en ladrillos de tierra comprimida, cuyas dimensiones y características no siempre se ajustan a estos requerimientos. La necesidad de modificar las muestras o adaptarlas puede alterar sus propiedades originales, afectando la validez de los resultados.

Asimismo, los ensayos convencionales requieren **equipamiento especializado**, como máquinas universales de ensayo, dispositivos de sujeción específicos y sistemas de medición de alta precisión. Este tipo de infraestructura no siempre está disponible en contextos donde se producen ladrillos de tierra comprimida, especialmente en zonas rurales o en sistemas de producción artesanal. La dependencia de estos equipos limita la posibilidad de realizar evaluaciones sistemáticas y accesibles del material (Walker, 2005).

Desde el punto de vista económico, el costo asociado a la adquisición, mantenimiento y operación de estos equipos representa una barrera significativa. La inversión requerida para implementar laboratorios especializados puede resultar inviable en proyectos de pequeña escala o en contextos con recursos limitados. Además, los costos asociados a la preparación de muestras y a la ejecución de ensayos pueden incrementar el costo total del proceso de evaluación, reduciendo la viabilidad de su aplicación en escenarios prácticos.

Otra limitación relevante es el **tiempo requerido para la ejecución de los ensayos**. La preparación de especímenes, el acondicionamiento previo y la realización de las pruebas pueden demandar periodos prolongados, lo que dificulta la obtención de resultados en tiempos compatibles con procesos productivos dinámicos. Esta situación limita la capacidad de realizar controles de calidad en tiempo real.

Adicionalmente, los ensayos convencionales no siempre reflejan las **condiciones reales de uso del material**. Las pruebas se realizan en entornos controlados que pueden diferir significativamente de las condiciones de servicio, como variaciones de humedad, cargas irregulares o efectos ambientales. Esto puede generar discrepancias entre los resultados obtenidos en laboratorio y el comportamiento del material en campo.

En síntesis, las limitaciones técnicas y económicas de los ensayos convencionales evidencian la necesidad de desarrollar métodos alternativos que permitan evaluar la resistencia a tracción de manera más accesible, representativa y adaptada a las condiciones reales de producción y uso de los ladrillos de tierra comprimida. Estas limitaciones justifican

la exploración de enfoques empíricos que, basados en principios fundamentales de la mecánica de materiales, permitan superar las barreras existentes y contribuir a una caracterización más integral del material.

2.1.6. Investigaciones sobre correlaciones mecánicas

Las correlaciones mecánicas entre propiedades como la resistencia a compresión y la resistencia a tracción han sido ampliamente estudiadas en diversos materiales de construcción, con el objetivo de simplificar los procesos de caracterización y reducir la dependencia de ensayos complejos. En materiales frágiles, donde la medición directa de la tracción presenta dificultades técnicas, estas relaciones han permitido estimar propiedades mecánicas a partir de ensayos más accesibles, como la compresión.

En el caso del **concreto**, se han desarrollado numerosas expresiones empíricas que relacionan la resistencia a tracción con la resistencia a compresión. Estas relaciones suelen adoptar formas potenciales o logarítmicas, reflejando un comportamiento no lineal entre ambas variables. Por ejemplo, se ha establecido que la resistencia a tracción del concreto puede aproximarse como una fracción de la resistencia a compresión, generalmente entre el 8% y el 15%, dependiendo de las características del material y las condiciones de curado (Neville, 2011). Estas correlaciones han sido incorporadas en normativas técnicas y modelos de diseño estructural, evidenciando su utilidad práctica.

En materiales de **suelo estabilizado con cemento**, investigaciones han mostrado tendencias similares, donde la resistencia a tracción mantiene una relación proporcional con la resistencia a compresión, aunque con una mayor dispersión de resultados debido a la heterogeneidad del material. Estudios experimentales han propuesto modelos que permiten estimar la resistencia a tracción a partir de parámetros como la densidad, el contenido de cemento y el tiempo de curado, destacando la influencia de estas variables en el comportamiento mecánico global (Reddy & Gupta, 2006).

En el ámbito de los **materiales de tierra**, incluyendo los ladrillos de tierra comprimida, las investigaciones sobre correlaciones mecánicas han sido más limitadas, pero

igualmente relevantes. Algunos estudios han identificado relaciones estadísticas entre la resistencia a compresión y otras propiedades mecánicas, lo que permite inferir comportamientos sin necesidad de realizar ensayos adicionales. Sin embargo, la variabilidad inherente del material y la falta de estandarización en los métodos de ensayo han dificultado la generalización de estos modelos.

En años recientes, el desarrollo de técnicas de **análisis estadístico avanzado y aprendizaje automático** ha permitido mejorar la precisión de las correlaciones mecánicas. Métodos como la regresión múltiple, la regresión Ridge y otros enfoques de machine learning han sido utilizados para modelar relaciones complejas entre variables, considerando múltiples factores simultáneamente. Estos enfoques permiten capturar patrones no lineales y reducir el error en la predicción de propiedades mecánicas, ofreciendo una herramienta poderosa para la caracterización de materiales (Hastie, Tibshirani & Friedman, 2009).

Asimismo, investigaciones recientes han enfatizado la importancia de incorporar variables adicionales en los modelos correlacionales, como la granulometría del suelo, el contenido de humedad y la energía de compactación. Este enfoque multivariable permite obtener modelos más robustos y representativos del comportamiento real del material, superando las limitaciones de las correlaciones simples basadas únicamente en la resistencia a compresión.

A pesar de estos avances, persisten desafíos en la aplicación de correlaciones mecánicas en materiales de tierra. La variabilidad de los suelos, las diferencias en los procesos de fabricación y la falta de bases de datos amplias dificultan la validación y generalización de los modelos propuestos. Esto resalta la necesidad de continuar desarrollando investigaciones experimentales que permitan fortalecer las bases estadísticas y mejorar la confiabilidad de las predicciones.

En síntesis, las investigaciones sobre correlaciones mecánicas han demostrado ser una herramienta valiosa para la estimación de propiedades difíciles de medir, como la

resistencia a tracción. Su aplicación en materiales de tierra comprimida representa una oportunidad para optimizar los procesos de evaluación y reducir la dependencia de ensayos complejos, contribuyendo a una caracterización más eficiente y accesible del material. Este enfoque constituye uno de los pilares del presente estudio, en el cual se propone el desarrollo de un modelo correlacional que permita relacionar la resistencia a compresión con la resistencia a tracción mediante métodos experimentales y herramientas de análisis avanzado.

2.1.7. Fundamentos físicos de la tracción en sólidos

La tracción en sólidos se refiere al estado de esfuerzo en el cual las fuerzas aplicadas tienden a separar las partículas del material, generando tensiones internas que actúan en sentido opuesto a la cohesión existente. Desde un punto de vista físico, la resistencia a tracción depende de la capacidad del material para mantener la integridad de sus enlaces internos frente a estas fuerzas de separación, lo que la convierte en una propiedad altamente sensible a defectos y discontinuidades.

En materiales sólidos, la respuesta a la tracción se describe mediante la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación generada. Cuando se aplica una carga tensional, las partículas del material experimentan un desplazamiento relativo que, en una etapa inicial, puede ser reversible si no se supera el límite elástico. Sin embargo, en materiales frágiles como los ladrillos de tierra comprimida, esta etapa elástica es limitada, y la transición hacia la falla ocurre con deformaciones relativamente pequeñas (Gere & Timoshenko, 1997).

A nivel microscópico, la resistencia a tracción está gobernada por la naturaleza de los enlaces entre partículas. En materiales cohesionados, como los suelos estabilizados con cemento, estos enlaces pueden ser de origen físico o químico. Los enlaces físicos incluyen fuerzas de fricción y cohesión capilar, mientras que los enlaces químicos se originan en reacciones de estabilización que generan compuestos cementantes. La ruptura de estos enlaces bajo la acción de esfuerzos tensionales da lugar al inicio de la falla (Callister & Rethwisch, 2018).

Un aspecto fundamental en la tracción de sólidos es la presencia de **defectos internos**, tales como poros, microfisuras o inclusiones. Estos defectos actúan como concentradores de esfuerzo, donde las tensiones locales pueden ser significativamente mayores que el esfuerzo promedio aplicado. En materiales frágiles, esta concentración de esfuerzos facilita la iniciación de grietas, que posteriormente se propagan de manera inestable hasta provocar la ruptura del material.

El fenómeno de **propagación de fisuras** es central en la mecánica de la fractura, disciplina que estudia el comportamiento de los materiales frente a la formación y crecimiento de grietas. En este contexto, la falla en tracción se produce cuando la energía liberada por la propagación de una fisura supera la energía necesaria para crear nuevas superficies de fractura. Este proceso ocurre de manera rápida y con escasa deformación previa en materiales frágiles, lo que explica su comportamiento abrupto ante la falla.

En el caso de los materiales de tierra comprimida, la estructura interna está compuesta por una matriz granular unida por fuerzas de cohesión y, en algunos casos, por productos cementantes. La distribución no uniforme de estas fuerzas, junto con la presencia de vacíos, genera un comportamiento anisotrópico y altamente dependiente de las condiciones de fabricación. Esto implica que la resistencia a tracción no es uniforme en todo el material, sino que varía en función de su microestructura.

Asimismo, la tracción en sólidos está influenciada por factores externos como la velocidad de aplicación de la carga, la temperatura y la humedad. En materiales de tierra, la humedad juega un papel particularmente importante, ya que puede modificar las fuerzas de cohesión capilar y afectar la estabilidad de los enlaces internos. Un incremento en la humedad puede reducir la resistencia a tracción, facilitando la formación de fisuras.

En síntesis, los fundamentos físicos de la tracción en sólidos permiten comprender que la resistencia a tracción no depende únicamente de la magnitud del esfuerzo aplicado, sino de la capacidad del material para resistir la separación de sus partículas frente a la presencia de defectos y condiciones externas. En materiales frágiles como los ladrillos de

tierra comprimida, esta propiedad está fuertemente condicionada por su microestructura y por las condiciones de fabricación, lo que resalta la importancia de su adecuada caracterización para garantizar un comportamiento mecánico confiable.

2.2 NOCIONES BÁSICAS DE LA RESISTENCIA A TRACCIÓN

La resistencia a tracción constituye una propiedad mecánica fundamental para comprender el comportamiento de los materiales frágiles, particularmente en sistemas como los ladrillos de tierra comprimida, donde la falla suele iniciarse bajo esfuerzos tensionales. A pesar de que estos materiales están diseñados para trabajar principalmente a compresión, la tracción desempeña un rol crítico en la aparición de fisuras y en la pérdida de integridad estructural, lo que hace imprescindible su análisis dentro de una caracterización mecánica completa.

A diferencia de la resistencia a compresión, cuya evaluación se encuentra ampliamente estandarizada, la resistencia a tracción presenta mayores desafíos tanto en su conceptualización como en su medición. Esto se debe a la dificultad de generar condiciones de tracción pura en materiales heterogéneos y a la alta sensibilidad del material frente a defectos internos. En este contexto, resulta necesario comprender los principios básicos que rigen el comportamiento del material bajo esfuerzos tensionales, así como las variables que influyen en su magnitud.

Desde un enfoque teórico, la resistencia a tracción se relaciona con la capacidad del material para resistir fuerzas que tienden a separar sus partículas, lo que implica analizar fenómenos como la cohesión interna, la formación de fisuras y la propagación de grietas. Estos procesos están condicionados por la microestructura del material, la presencia de vacíos, la distribución de los estabilizantes y las condiciones de fabricación.

En el caso de los ladrillos de tierra comprimida, la resistencia a tracción no solo depende de las características del suelo, sino también de factores como la dosificación de cemento, la compactación y el contenido de humedad. La interacción de estas variables

define la capacidad del material para resistir esfuerzos tensionales y condiciona su comportamiento frente a cargas reales.

En este apartado se desarrollan las nociones básicas necesarias para comprender la resistencia a tracción en materiales de tierra comprimida, abordando su definición, los principios físicos que la sustentan, las variables que la afectan y los métodos de evaluación más utilizados. Este marco conceptual permitirá interpretar adecuadamente los resultados experimentales y sustentar el análisis de los ensayos empíricos que se presentan en el presente estudio, contribuyendo a una comprensión más integral del comportamiento mecánico del material.

2.2.1. Definición de resistencia a tracción

La resistencia a tracción se define como la capacidad de un material para soportar esfuerzos que tienden a separar sus partículas, sin experimentar ruptura. Este parámetro representa el esfuerzo máximo que un material puede resistir cuando es sometido a una carga tensional antes de fallar, constituyendo un indicador clave en el análisis del comportamiento mecánico, especialmente en materiales frágiles.

Desde el punto de vista de la mecánica de materiales, la resistencia a tracción se expresa como la relación entre la fuerza aplicada en dirección axial y el área de la sección transversal del espécimen. Este esfuerzo tensional permite cuantificar la capacidad del material para resistir la acción de fuerzas que buscan alargarlo o separarlo. Sin embargo, en materiales como los ladrillos de tierra comprimida, esta definición adquiere una complejidad adicional debido a su naturaleza heterogénea y a la influencia de múltiples variables en su comportamiento (Gere & Timoshenko, 1997).

A diferencia de materiales dúctiles, que pueden experimentar deformaciones significativas antes de fallar, los materiales frágiles presentan una resistencia a tracción relativamente baja y una limitada capacidad de deformación. Esto implica que la ruptura ocurre de manera súbita, sin una fase prolongada de deformación plástica, lo que hace que

la resistencia a tracción sea un parámetro crítico para la seguridad estructural (Callister & Rethwisch, 2018).

En los ladrillos de tierra comprimida, la resistencia a tracción está directamente relacionada con la cohesión interna del material, la cual depende de la interacción entre partículas del suelo, el contenido de humedad y la presencia de estabilizantes como el cemento. Estos factores determinan la capacidad del material para mantener su integridad frente a esfuerzos que tienden a separarlo, siendo especialmente sensibles a la presencia de vacíos y discontinuidades.

Además, la resistencia a tracción está estrechamente vinculada al fenómeno de formación y propagación de fisuras. En materiales frágiles, la falla se inicia cuando las tensiones internas superan la capacidad de los enlaces entre partículas, generando microfisuras que se propagan rápidamente hasta provocar la ruptura. Este comportamiento resalta la importancia de considerar la resistencia a tracción como un parámetro fundamental en la evaluación del desempeño mecánico del material.

En términos relativos, la resistencia a tracción en materiales como los CEB/LTC suele representar una fracción reducida de la resistencia a compresión, lo que evidencia su vulnerabilidad frente a esfuerzos tensionales. Esta relación ha sido ampliamente observada en materiales similares, como el concreto y los suelos estabilizados, donde la tracción constituye el factor crítico en el inicio de la falla (Das & Sobhan, 2014).

En síntesis, la resistencia a tracción es una propiedad esencial que permite evaluar la capacidad del material para resistir fuerzas de separación. En los ladrillos de tierra comprimida, su comprensión implica analizar no solo la relación entre carga y área, sino también los mecanismos internos que gobiernan la cohesión y la propagación de fisuras. Este concepto constituye la base para el desarrollo de métodos de evaluación y modelos predictivos que permitan caracterizar de manera más completa el comportamiento mecánico del material.

2.2.2. Principios de equilibrio de fuerzas

El análisis de la resistencia a tracción en cualquier material se fundamenta en los principios de equilibrio de fuerzas, los cuales establecen que un sistema se encuentra en equilibrio cuando la suma de todas las fuerzas que actúan sobre él es igual a cero. Este principio es esencial para comprender cómo se distribuyen los esfuerzos dentro de un material sometido a carga y cómo se generan las condiciones que conducen a la falla.

En el contexto de la mecánica de materiales, el equilibrio implica que las fuerzas externas aplicadas sobre un cuerpo deben ser equilibradas por las fuerzas internas que se desarrollan en su estructura. Cuando un material es sometido a tracción, las fuerzas externas tienden a separarlo, mientras que las fuerzas internas, asociadas a la cohesión entre partículas, actúan en sentido contrario para mantener la integridad del sistema (Gere & Timoshenko, 1997).

El concepto de equilibrio se expresa mediante ecuaciones fundamentales que consideran tanto las fuerzas como los momentos. En un sistema en equilibrio estático, la suma de fuerzas en cada dirección debe ser igual a cero, así como la suma de momentos respecto a cualquier punto. Estas condiciones permiten analizar la distribución de esfuerzos y determinar las zonas críticas donde pueden iniciarse fallas.

En materiales como los ladrillos de tierra comprimida, el equilibrio de fuerzas se ve influenciado por la heterogeneidad del material y por la presencia de discontinuidades internas. La distribución de esfuerzos no es uniforme, lo que puede generar concentraciones de tensión en ciertas zonas. Estas concentraciones son especialmente relevantes en tracción, ya que pueden superar localmente la resistencia del material y provocar la formación de fisuras.

Además, el equilibrio de fuerzas es fundamental para el diseño y análisis de ensayos experimentales. En el caso de los ensayos de tracción, es necesario garantizar que la carga aplicada se distribuya de manera uniforme sobre el espécimen, evitando la introducción de esfuerzos adicionales que puedan alterar los resultados. Cualquier desviación en la

aplicación de la carga puede generar momentos o fuerzas no deseadas que afectan la validez del ensayo (Das & Sobhan, 2014).

En los ensayos empíricos, como los utilizados en el presente estudio, el principio de equilibrio adquiere un papel central, ya que permite relacionar las fuerzas aplicadas con la resistencia del material mediante configuraciones físicas simples. Estos sistemas se diseñan de manera que las fuerzas generadas, por ejemplo, mediante el peso de un fluido o la aplicación de cargas progresivas, se transmitan de forma controlada al espécimen, permitiendo estimar su resistencia a tracción a partir de condiciones de equilibrio.

Asimismo, el análisis del equilibrio permite comprender cómo las fuerzas internas evolucionan a medida que aumenta la carga. En etapas iniciales, el material es capaz de equilibrar las fuerzas externas sin presentar daño significativo. Sin embargo, a medida que se incrementa la carga, se desarrollan tensiones internas que pueden superar la capacidad de cohesión del material, rompiendo el equilibrio y dando lugar a la falla.

En síntesis, los principios de equilibrio de fuerzas constituyen la base para el análisis del comportamiento mecánico de los materiales bajo carga. En el caso de la resistencia a tracción, estos principios permiten entender cómo se generan y distribuyen los esfuerzos dentro del material, así como diseñar ensayos que reproduzcan condiciones controladas de carga. Su comprensión es esencial para interpretar los resultados experimentales y para el desarrollo de metodologías que permitan evaluar la resistencia a tracción en materiales como los ladrillos de tierra comprimida.

2.2.3. Relación esfuerzo–área

La relación entre el esfuerzo y el área constituye uno de los principios fundamentales en la mecánica de materiales y permite cuantificar la resistencia de un material frente a la aplicación de cargas. En el caso de la tracción, esta relación describe cómo una fuerza aplicada sobre un cuerpo se distribuye en su sección transversal, generando un esfuerzo interno que puede conducir a la deformación o a la falla del material.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

En esta expresión, σ representa el esfuerzo de tracción, F la fuerza aplicada y A el área de la sección transversal sobre la cual actúa la carga. Este modelo asume una distribución uniforme de esfuerzos, lo cual es una idealización que permite simplificar el análisis y establecer una base para la evaluación de la resistencia del material (Gere & Timoshenko, 1997).

En materiales homogéneos y con geometría regular, esta relación permite obtener valores precisos de esfuerzo. Sin embargo, en materiales heterogéneos como los ladrillos de tierra comprimida, la distribución de esfuerzos no siempre es uniforme debido a la presencia de vacíos, irregularidades y variaciones en la cohesión interna. A pesar de ello, la ecuación esfuerzo-área sigue siendo una herramienta válida para estimar la resistencia a tracción, siempre que se interprete considerando las limitaciones del material (Das & Sobhan, 2014).

El área de la sección transversal juega un papel determinante en la magnitud del esfuerzo. Para una misma fuerza aplicada, un área menor genera un esfuerzo mayor, lo que incrementa la probabilidad de falla. Por el contrario, un área mayor distribuye la carga sobre una superficie más amplia, reduciendo el esfuerzo interno. Este principio es fundamental en el diseño de especímenes y en la interpretación de resultados experimentales.

En el contexto de los ensayos de tracción, la correcta determinación del área es esencial para obtener resultados confiables. En materiales como los CEB/LTC, donde las superficies pueden presentar irregularidades, es necesario considerar dimensiones representativas que permitan aproximar el área efectiva. Errores en la medición de esta variable pueden generar desviaciones significativas en los valores de esfuerzo calculados.

Asimismo, la relación esfuerzo-área permite establecer comparaciones entre diferentes materiales o condiciones de ensayo. Al expresar la resistencia en términos de

esfuerzo, se elimina la dependencia directa de la geometría del espécimen, facilitando el análisis comparativo y la evaluación del desempeño mecánico.

En el caso de los ensayos empíricos de tracción, esta relación adquiere una importancia central, ya que permite transformar las fuerzas generadas por sistemas experimentales —como cargas aplicadas mediante pesos o fluidos— en valores de esfuerzo que representan la resistencia del material. De este modo, la ecuación esfuerzo-área actúa como el vínculo entre el sistema físico de ensayo y la propiedad mecánica que se desea evaluar.

En síntesis, la relación esfuerzo-área constituye un principio esencial para la cuantificación de la resistencia a tracción. Su aplicación en materiales de tierra comprimida permite estimar la capacidad del material para resistir esfuerzos tensionales, siempre que se consideren las particularidades de su estructura interna y las condiciones del ensayo. Este concepto es fundamental para el análisis experimental y para el desarrollo de modelos que permitan predecir el comportamiento mecánico del material.

2.2.4. Comportamiento del material bajo carga tensional

El comportamiento de un material bajo carga tensional describe la forma en que este responde cuando es sometido a fuerzas que tienden a separarlo. En materiales frágiles como los ladrillos de tierra comprimida, esta respuesta presenta características particulares, marcadas por una baja capacidad de deformación y una rápida transición desde el estado inicial hasta la falla.

En una primera etapa, al aplicarse una carga tensional, el material experimenta una **respuesta elástica**, en la cual la deformación es proporcional al esfuerzo aplicado. En esta fase, los enlaces internos entre partículas se mantienen intactos y el material puede recuperar parcialmente su forma original si se retira la carga. Sin embargo, en los CEB/LTC esta etapa es generalmente breve, debido a la limitada capacidad de deformación del material (Gere & Timoshenko, 1997).

A medida que la carga aumenta, el material entra en una fase donde comienzan a desarrollarse **microfisuras internas**. Estas fisuras se originan en zonas de concentración de esfuerzos, como vacíos, defectos o discontinuidades en la estructura del material. En materiales heterogéneos como los ladrillos de tierra comprimida, estas zonas son frecuentes, lo que facilita el inicio temprano de procesos de daño.

Posteriormente, las microfisuras se propagan y se interconectan, dando lugar a un proceso de **fractura progresiva**. Durante esta etapa, la capacidad del material para resistir la carga disminuye, ya que la cohesión interna se ve comprometida. A diferencia de materiales dúctiles, donde la deformación plástica permite redistribuir los esfuerzos, en los materiales frágiles este proceso ocurre con escasa deformación adicional (Callister & Rethwisch, 2018).

Finalmente, se alcanza el punto de **falla**, en el cual el material no puede sostener la carga aplicada y se produce la ruptura. En los ladrillos de tierra comprimida, esta falla suele ser abrupta y sin señales previas significativas, lo que refleja su comportamiento frágil. La fractura puede manifestarse en forma de separación limpia o mediante la formación de grietas visibles que dividen el material en partes.

El comportamiento bajo carga tensional también está influenciado por variables como la densidad, la dosificación de cemento, la humedad y la calidad de la compactación. Un material con mayor densidad y mejor estabilización tiende a presentar una mayor resistencia a tracción, aunque también puede mostrar un comportamiento más rígido y frágil. Por otro lado, materiales con menor cohesión pueden presentar una falla más gradual, pero con valores de resistencia inferiores (Reddy & Gupta, 2006).

Asimismo, la orientación de las partículas y la distribución de los esfuerzos internos pueden generar un comportamiento anisotrópico, en el cual la resistencia varía según la dirección de la carga. Este aspecto es relevante en materiales fabricados mediante procesos de compactación, donde la estructura interna puede no ser completamente uniforme.

En síntesis, el comportamiento del material bajo carga tensional en ladrillos de tierra comprimida se caracteriza por una respuesta elástica inicial limitada, seguida de la formación y propagación de fisuras que conducen a una falla abrupta. Este comportamiento refleja la naturaleza frágil del material y resalta la importancia de evaluar la resistencia a tracción como parte integral de su caracterización mecánica, especialmente para comprender los mecanismos que gobiernan el inicio de la falla.

2.2.5. Mecanismos de falla por tracción

La falla por tracción en materiales frágiles, como los ladrillos de tierra comprimida, es el resultado de procesos internos que involucran la iniciación, propagación y coalescencia de fisuras bajo la acción de esfuerzos tensionales. A diferencia de los materiales dúctiles, donde la deformación plástica permite redistribuir los esfuerzos, en los materiales frágiles la falla ocurre de manera rápida una vez que se supera la capacidad resistente del sistema, lo que hace fundamental comprender los mecanismos que la gobiernan.

El proceso de falla por tracción se inicia generalmente en **defectos o discontinuidades internas**, tales como vacíos, microgrietas preexistentes o zonas de menor cohesión. Estas imperfecciones actúan como concentradores de esfuerzo, donde las tensiones locales pueden ser significativamente mayores que el esfuerzo promedio aplicado. En estas zonas, la resistencia del material es superada con mayor facilidad, dando origen a las primeras microfisuras (Callister & Rethwisch, 2018).

Una vez iniciadas, las microfisuras comienzan a **propagarse bajo la acción de la carga**, siguiendo trayectorias que dependen de la distribución de esfuerzos y de la estructura interna del material. En esta etapa, el crecimiento de las fisuras puede ser estable o inestable. En materiales frágiles, como los CEB/LTC, la propagación suele ser rápida y con poca disipación de energía, lo que conduce a una evolución acelerada hacia la falla.

El fenómeno de **coalescencia de fisuras** constituye una etapa crítica en el proceso de falla. A medida que múltiples microfisuras se desarrollan y se conectan entre sí, se forma una grieta principal que debilita significativamente la estructura del material. Este proceso

reduce la sección resistente efectiva, incrementando las tensiones en las zonas restantes y acelerando la ruptura.

En muchos casos, la falla por tracción se manifiesta mediante la **formación de grietas transversales** que dividen el material en dos o más partes. Este tipo de fractura suele ser relativamente limpia y abrupta, reflejando la incapacidad del material para deformarse antes de fallar. La orientación de estas grietas está generalmente relacionada con la dirección de las tensiones principales.

En materiales de tierra comprimida estabilizados, la presencia de enlaces cementantes modifica parcialmente los mecanismos de falla. Si bien la estabilización incrementa la resistencia, también puede aumentar la rigidez del material, generando una respuesta más frágil. En estos casos, la falla puede ocurrir de manera más repentina, con menor desarrollo previo de microfisuras visibles (Reddy & Gupta, 2006).

Otro mecanismo relevante es la **falla inducida por tensiones secundarias**, como las generadas por efectos de Poisson, variaciones térmicas o cambios en el contenido de humedad. Estas tensiones pueden generar esfuerzos de tracción internos incluso en condiciones donde la carga principal es compresiva, contribuyendo al inicio de fisuras y al deterioro progresivo del material (Gere & Timoshenko, 1997).

Asimismo, la **heterogeneidad del material** influye en los mecanismos de falla, ya que la distribución no uniforme de partículas y estabilizantes puede generar zonas con diferente resistencia. Estas variaciones internas favorecen la localización de la falla en puntos específicos, donde las condiciones son más desfavorables.

En síntesis, los mecanismos de falla por tracción en ladrillos de tierra comprimida están determinados por la interacción entre defectos internos, distribución de esfuerzos y condiciones del material. El proceso se caracteriza por la iniciación de microfisuras, su propagación y eventual coalescencia en una grieta principal que conduce a la ruptura. Comprender estos mecanismos es esencial para interpretar el comportamiento del material

bajo carga tensional y para desarrollar estrategias que permitan mejorar su resistencia y durabilidad.

2.2.6. Variables que afectan la resistencia a tracción:

La resistencia a tracción en los ladrillos de tierra comprimida no es una propiedad fija, sino el resultado de la interacción de múltiples variables que intervienen tanto en la composición del material como en su proceso de fabricación. Debido a la naturaleza heterogénea de estos materiales, pequeñas variaciones en sus condiciones iniciales pueden generar diferencias significativas en su comportamiento frente a esfuerzos tensionales, lo que hace imprescindible identificar y comprender los factores que influyen en esta propiedad.

A diferencia de la resistencia a compresión, cuya respuesta suele ser más robusta frente a variaciones del proceso, la resistencia a tracción es altamente sensible a la presencia de defectos, discontinuidades y cambios en la cohesión interna del material. Esta sensibilidad implica que variables como la dosificación de cemento, el contenido de humedad, la densidad alcanzada durante la compactación y el tiempo de curado adquieren un papel determinante en el desarrollo de la resistencia tensional.

Asimismo, factores relacionados con la microestructura del material, como la distribución de partículas, la presencia de vacíos y la homogeneidad de la mezcla, influyen directamente en la forma en que se generan y propagan las fisuras bajo carga. Estas condiciones internas, combinadas con las características externas del proceso de fabricación, definen la capacidad del material para resistir esfuerzos que tienden a separarlo.

En este apartado se analizan las principales variables que afectan la resistencia a tracción en ladrillos de tierra comprimida, considerando tanto factores físicos como químicos y de proceso. Este análisis permitirá comprender cómo cada variable contribuye al comportamiento mecánico del material y establecer bases para su optimización, facilitando el desarrollo de modelos predictivos y la implementación de metodologías experimentales adecuadas.

2.2.6.1. Geometría del espécimen

La geometría del espécimen constituye una variable fundamental en la determinación de la resistencia a tracción, ya que influye directamente en la distribución de esfuerzos y en los mecanismos de falla del material. En materiales frágiles como los ladrillos de tierra comprimida, donde la resistencia a tracción es limitada y altamente sensible a concentraciones de esfuerzo, la forma y dimensiones del espécimen pueden condicionar significativamente los resultados obtenidos.

Desde el punto de vista mecánico, la geometría define cómo se distribuyen las tensiones internas cuando el material es sometido a una carga. Especímenes con formas regulares y secciones uniformes favorecen una distribución más homogénea de esfuerzos, lo que permite una evaluación más representativa de la resistencia a tracción. Por el contrario, geometrías irregulares o con cambios bruscos de sección pueden generar concentraciones de esfuerzo en zonas específicas, incrementando la probabilidad de falla prematura (Gere & Timoshenko, 1997).

El área de la sección transversal es un factor clave dentro de la geometría del espécimen, ya que determina la magnitud del esfuerzo para una carga determinada. Secciones más pequeñas generan mayores niveles de esfuerzo para una misma fuerza aplicada, lo que puede conducir a una falla más rápida. Asimismo, la forma de la sección —ya sea rectangular, circular o irregular— influye en la forma en que se distribuyen las tensiones internas y en la localización de las zonas críticas.

En los ensayos de tracción, la relación entre la longitud y la sección del espécimen también es relevante. Especímenes más largos pueden presentar una mayor probabilidad de contener defectos internos, lo que incrementa la variabilidad de los resultados. Por otro lado, longitudes reducidas pueden dificultar la generación de un campo de esfuerzos uniforme, afectando la representatividad del ensayo (Callister & Rethwisch, 2018).

En el caso específico de los ladrillos de tierra comprimida, la geometría presenta particularidades que deben ser consideradas. Las unidades suelen tener formas prismáticas

con dimensiones definidas por procesos de fabricación, lo que limita la posibilidad de adaptar el espécimen a formas ideales de ensayo. Además, la presencia de perforaciones, bordes irregulares o variaciones en el espesor puede generar distribuciones de esfuerzo no uniformes, afectando la evaluación de la resistencia a tracción.

Otro aspecto importante es la **preparación de las superficies de contacto**, ya que irregularidades en estas zonas pueden generar concentraciones de esfuerzo o desalineaciones en la aplicación de la carga. En materiales frágiles, pequeñas imperfecciones en la geometría pueden tener un impacto significativo en los resultados, lo que resalta la necesidad de un adecuado control en la preparación del espécimen.

Asimismo, la geometría influye en los **modos de falla observados**. Especímenes con formas regulares tienden a presentar patrones de fractura más definidos y reproducibles, mientras que geometrías irregulares pueden generar fallas impredecibles o dispersión en los resultados. Este aspecto es particularmente relevante en el análisis experimental, donde la consistencia de los resultados es un indicador de la calidad del ensayo.

En el contexto de ensayos empíricos, como los aplicados en el presente estudio, la geometría del espécimen adquiere una importancia adicional, ya que el sistema de carga debe adaptarse a las dimensiones reales del material. Esto implica diseñar configuraciones que permitan aplicar la carga de manera uniforme, minimizando los efectos de concentración de esfuerzos y garantizando una interpretación adecuada de los resultados.

En síntesis, la geometría del espécimen es una variable determinante en la evaluación de la resistencia a tracción, ya que influye en la distribución de esfuerzos, en los mecanismos de falla y en la confiabilidad de los resultados. Su adecuada consideración permite mejorar la representatividad de los ensayos y reducir la variabilidad asociada a las condiciones experimentales.

2.2.6.2. Discontinuidades internas

Las discontinuidades internas constituyen uno de los factores más críticos en la resistencia a tracción de materiales frágiles, ya que actúan como puntos de debilidad donde se concentran los esfuerzos y se inicia el proceso de falla. En los ladrillos de tierra comprimida, estas discontinuidades son inherentes a su naturaleza heterogénea y pueden presentarse en forma de vacíos, microfisuras, inclusiones o variaciones en la cohesión del material.

Desde el punto de vista mecánico, las discontinuidades generan **concentraciones de esfuerzo** que pueden superar localmente la resistencia del material, incluso cuando el esfuerzo promedio aplicado es relativamente bajo. Este fenómeno se explica por la incapacidad del material para redistribuir los esfuerzos en presencia de defectos, lo que provoca que las tensiones se intensifiquen en zonas específicas, facilitando la iniciación de fisuras (Callister & Rethwisch, 2018).

En materiales de tierra comprimida, los vacíos o poros son una de las discontinuidades más comunes. Estos pueden originarse por una compactación insuficiente, un contenido de humedad inadecuado o una distribución irregular de las partículas. La presencia de vacíos reduce el área efectiva resistente y debilita la cohesión interna, lo que disminuye la capacidad del material para resistir esfuerzos de tracción.

Otro tipo de discontinuidad importante son las **microfisuras preexistentes**, que pueden generarse durante el proceso de secado o curado, especialmente cuando existen variaciones de humedad o retracciones diferenciales. Estas microfisuras actúan como puntos iniciales de propagación de grietas bajo carga tensional, acelerando el proceso de falla del material.

Asimismo, la **heterogeneidad en la distribución de los componentes**, como el cemento o las fracciones granulométricas del suelo, puede generar zonas con diferentes niveles de resistencia dentro del mismo espécimen. Estas variaciones internas crean regiones más débiles que concentran los esfuerzos y condicionan el patrón de falla.

Las discontinuidades también pueden estar asociadas a defectos en el proceso de fabricación, como una mezcla no homogénea, una compactación irregular o la presencia de materiales extraños. Estos factores introducen irregularidades en la estructura interna del material, afectando su comportamiento mecánico y aumentando la dispersión de resultados en los ensayos.

En el contexto de la resistencia a tracción, las discontinuidades tienen un impacto particularmente significativo debido a la baja capacidad del material para resistir esfuerzos tensionales. A diferencia de la compresión, donde el material puede tolerar ciertas irregularidades, en tracción cualquier defecto puede convertirse en el punto de inicio de la falla, lo que hace que esta propiedad sea altamente sensible a la calidad interna del material (Das & Sobhan, 2014).

La propagación de fisuras a partir de estas discontinuidades está gobernada por principios de la mecánica de la fractura, donde el crecimiento de una grieta ocurre cuando la energía liberada supera la energía necesaria para crear nuevas superficies de fractura. En materiales frágiles, este proceso es rápido y con escasa deformación previa, lo que explica la naturaleza abrupta de la falla.

En síntesis, las discontinuidades internas representan un factor determinante en la resistencia a tracción de los ladrillos de tierra comprimida, ya que condicionan la iniciación y propagación de fisuras. Su control mediante una adecuada selección de materiales, un proceso de fabricación homogéneo y una correcta compactación es esencial para mejorar el desempeño mecánico del material y reducir la variabilidad en los resultados experimentales.

2.2.6.3. Dosificación

La dosificación de los componentes del material, particularmente del cemento como agente estabilizante, es una de las variables más influyentes en la resistencia a tracción de los ladrillos de tierra comprimida. Esta variable define la proporción entre suelo, agua y estabilizante, determinando la calidad de la matriz interna y la capacidad del material para resistir esfuerzos que tienden a separarlo.

Desde el punto de vista físico y químico, la incorporación de cemento genera la formación de compuestos cementantes producto de la hidratación, los cuales actúan como enlaces entre las partículas del suelo. Estos enlaces incrementan la cohesión interna del material, mejorando su capacidad para resistir esfuerzos tensionales y limitando la propagación de fisuras. En consecuencia, un aumento en la dosificación de cemento suele traducirse en un incremento de la resistencia a tracción (Reddy & Gupta, 2006).

No obstante, la relación entre dosificación y resistencia no es estrictamente lineal. En niveles bajos de cemento, pequeñas variaciones en la dosificación pueden generar incrementos significativos en la resistencia, debido al cambio en la estructura del material de un sistema granular a uno parcialmente cementado. Sin embargo, a medida que aumenta el contenido de cemento, los incrementos en la resistencia tienden a disminuir, evidenciando un comportamiento de rendimientos decrecientes.

En el caso de la resistencia a tracción, la dosificación adquiere una relevancia aún mayor que en la compresión, debido a la sensibilidad del material frente a la cohesión interna. Un incremento en el contenido de cemento no solo mejora la resistencia, sino que también reduce la susceptibilidad del material a la formación y propagación de fisuras, lo que contribuye a un comportamiento más estable bajo carga tensional.

Sin embargo, una dosificación elevada puede generar efectos contraproducentes. El aumento del contenido de cemento incrementa la rigidez del material, lo que puede reducir su capacidad de deformación y hacerlo más frágil. En este contexto, la falla puede ocurrir de manera más abrupta, con menor capacidad de disipación de energía. Por ello, es necesario encontrar un equilibrio entre resistencia y comportamiento mecánico global (Callister & Rethwisch, 2018).

Además, la eficacia de la dosificación depende de su interacción con otras variables, como el contenido de humedad y la energía de compactación. Una dosificación adecuada no garantiza por sí sola un incremento en la resistencia si no se alcanzan condiciones óptimas de compactación y curado. La distribución homogénea del cemento en la mezcla es

también un factor clave, ya que concentraciones irregulares pueden generar zonas con diferente comportamiento mecánico.

Desde una perspectiva económica y ambiental, la dosificación de cemento debe ser optimizada para lograr el máximo desempeño con la menor cantidad de material. El cemento es uno de los componentes con mayor impacto ambiental en la construcción, por lo que su uso eficiente es fundamental en el desarrollo de materiales sostenibles.

En síntesis, la dosificación es una variable determinante en la resistencia a tracción de los ladrillos de tierra comprimida, ya que influye directamente en la cohesión interna y en la capacidad del material para resistir esfuerzos tensionales. Su adecuada selección, en conjunto con otras variables del proceso, permite optimizar el comportamiento mecánico del material y mejorar su desempeño en aplicaciones constructivas.

2.2.7. Introducción a ensayos no estandarizados

Los ensayos no estandarizados surgen como una respuesta a las limitaciones técnicas, económicas y operativas de los métodos convencionales de evaluación mecánica, especialmente en materiales como los ladrillos de tierra comprimida, donde las condiciones de producción y los recursos disponibles no siempre permiten la aplicación de procedimientos normalizados. Estos ensayos se caracterizan por su carácter empírico, su adaptabilidad y su enfoque práctico, orientado a obtener estimaciones razonables del comportamiento del material bajo condiciones reales.

A diferencia de los ensayos normalizados, que siguen protocolos estrictos definidos por normas técnicas, los ensayos no estandarizados se desarrollan a partir de principios fundamentales de la mecánica de materiales, como el equilibrio de fuerzas y la relación esfuerzo-área, pero adaptados a configuraciones experimentales más simples. Esta flexibilidad permite diseñar sistemas de ensayo accesibles, utilizando recursos disponibles localmente y reduciendo la dependencia de equipamiento especializado.

En el contexto de la resistencia a tracción, los ensayos no estandarizados adquieren una relevancia particular debido a la dificultad de aplicar métodos convencionales en materiales frágiles y heterogéneos. La imposibilidad de generar condiciones de tracción pura mediante equipos convencionales en entornos de baja infraestructura ha impulsado el desarrollo de alternativas que permitan aproximar esta propiedad mediante configuraciones experimentales innovadoras.

Uno de los principales aportes de estos ensayos es su **accesibilidad**, ya que pueden ser implementados sin necesidad de laboratorios especializados. Esto permite realizar evaluaciones en campo o en contextos de producción artesanal, facilitando el control de calidad y la toma de decisiones en tiempo real. Asimismo, su simplicidad operativa reduce los costos asociados a la evaluación del material, lo que los convierte en una opción viable en proyectos de pequeña y mediana escala.

Sin embargo, los ensayos no estandarizados también presentan desafíos, principalmente relacionados con la **reproducibilidad y comparabilidad de los resultados**. Al no estar regulados por normas técnicas, los procedimientos pueden variar entre estudios, lo que dificulta la validación de los resultados y su comparación con otros trabajos. Por ello, es fundamental que estos ensayos se fundamenten en principios mecánicos sólidos y que su diseño experimental sea cuidadosamente documentado.

Otro aspecto importante es la necesidad de establecer **criterios de validación** que permitan evaluar la confiabilidad de los resultados obtenidos. Esto puede lograrse mediante la comparación con ensayos convencionales, el análisis estadístico de los datos o el desarrollo de modelos correlacionales que relacionen los resultados empíricos con propiedades mecánicas conocidas.

En el caso de los ladrillos de tierra comprimida, los ensayos no estandarizados representan una oportunidad para superar las limitaciones de los métodos tradicionales y avanzar hacia una caracterización más completa del material. Su aplicación permite explorar

nuevas formas de evaluar propiedades como la resistencia a tracción, integrando principios teóricos con soluciones prácticas adaptadas a las condiciones reales de uso.

En síntesis, los ensayos no estandarizados constituyen una herramienta complementaria en la evaluación de materiales de construcción, especialmente en contextos donde los métodos convencionales no son viables. Su desarrollo y aplicación, cuando se fundamentan en principios mecánicos sólidos, pueden contribuir significativamente a la generación de conocimiento y a la mejora de los procesos de caracterización, abriendo nuevas posibilidades para la investigación y la práctica en materiales de tierra comprimida.

2.2.8. Fundamento del Tensile Field Test

El **Tensile Field Test** se plantea como un método experimental no estandarizado orientado a la determinación de la resistencia a tracción en materiales frágiles, particularmente en ladrillos de tierra comprimida, mediante el uso de sistemas accesibles y adaptados a condiciones de campo. Su fundamento se basa en la aplicación controlada de una carga tensional sobre el espécimen, utilizando principios básicos de la mecánica de materiales, como el equilibrio de fuerzas y la relación entre esfuerzo y área.

A diferencia de los ensayos tradicionales de laboratorio, el Tensile Field Test busca generar un estado de tracción a partir de configuraciones físicas simples, en las cuales la carga puede ser aplicada mediante sistemas de peso progresivo, presión hidráulica o acumulación de masa, como el uso de agua en recipientes. Este enfoque permite transformar una acción física accesible en una fuerza cuantificable que actúa directamente sobre el material, generando tensiones internas hasta alcanzar la falla.

El principio fundamental del ensayo radica en que la fuerza aplicada al sistema puede ser determinada a partir de magnitudes conocidas, como el peso de un fluido o de masas calibradas. Esta fuerza, al ser transmitida al espécimen, genera un esfuerzo de tracción que puede ser estimado mediante la relación entre la carga aplicada y el área efectiva del material. De esta manera, el ensayo permite calcular la resistencia a tracción sin necesidad de equipos sofisticados, manteniendo coherencia con los principios básicos de la mecánica.

Un aspecto clave del Tensile Field Test es la **transmisión uniforme de la carga**, la cual debe garantizar que el esfuerzo se distribuya de manera lo más homogénea posible sobre la sección del espécimen. Para ello, el diseño del sistema experimental debe considerar elementos de sujeción adecuados que minimicen la introducción de esfuerzos secundarios, como momentos o concentraciones de tensión que puedan alterar los resultados.

Asimismo, el ensayo se fundamenta en el principio de **equilibrio estático**, donde la carga aplicada al sistema se equilibra con las fuerzas internas desarrolladas en el material. A medida que la carga se incrementa progresivamente, el material responde generando tensiones internas hasta que se alcanza el punto de falla, el cual corresponde a su resistencia máxima a tracción.

En el caso de la aplicación mediante fluidos, el volumen de agua acumulado permite generar una carga creciente de manera controlada, lo que facilita la identificación del punto de ruptura. Este enfoque presenta ventajas importantes, como la facilidad de implementación, el bajo costo y la posibilidad de realizar ensayos en condiciones reales de producción.

El Tensile Field Test también permite observar de manera directa los **modos de falla del material**, proporcionando información cualitativa complementaria sobre su comportamiento mecánico. La forma en que se produce la ruptura, la orientación de las fisuras y la localización de la falla permiten interpretar la calidad del material y la influencia de variables como la compactación y la dosificación.

No obstante, al tratarse de un ensayo no estandarizado, es necesario considerar ciertas limitaciones, como la precisión en la medición de la carga y la posible variabilidad en las condiciones de ensayo. Por ello, es fundamental que el procedimiento sea cuidadosamente diseñado y documentado, y que los resultados sean analizados en conjunto con otras variables del estudio.

En síntesis, el Tensile Field Test se fundamenta en la aplicación de principios básicos de la mecánica de materiales para desarrollar un método accesible y práctico de evaluación

de la resistencia a tracción. Su implementación permite superar las limitaciones de los ensayos convencionales, facilitando la caracterización del material en contextos donde no se dispone de infraestructura especializada, y constituyendo una herramienta clave en el desarrollo del presente estudio.

2.2.9. Ventajas del ensayo empírico en contextos reales

La aplicación de ensayos empíricos para la evaluación de la resistencia a tracción en ladrillos de tierra comprimida representa una alternativa pertinente frente a las limitaciones de los métodos convencionales, especialmente en contextos donde los recursos técnicos y económicos son restringidos. Estos ensayos, al estar diseñados a partir de principios mecánicos básicos y adaptados a condiciones reales de producción, ofrecen una serie de ventajas que los convierten en herramientas valiosas para la caracterización del material.

Una de las principales ventajas es su **accesibilidad**, ya que no requieren equipamiento sofisticado ni infraestructura especializada. Esto permite que los ensayos puedan ser implementados en campo o en entornos de producción artesanal, facilitando la evaluación directa del material en condiciones similares a las de su uso real. Esta característica es especialmente relevante en regiones donde la construcción con tierra es común y los recursos tecnológicos son limitados.

Asimismo, los ensayos empíricos presentan una **reducción significativa de costos**, tanto en la adquisición de equipos como en la ejecución de las pruebas. La utilización de materiales y sistemas simples, como dispositivos de carga basados en peso o fluidos, permite obtener resultados funcionales sin incurrir en gastos elevados, lo que favorece su aplicación en proyectos de pequeña y mediana escala.

Otra ventaja importante es su **simplicidad operativa**, que facilita su ejecución por parte de personal con formación técnica básica. Esto contribuye a la democratización del conocimiento técnico, permitiendo que más actores involucrados en la construcción puedan participar en procesos de control de calidad y toma de decisiones basadas en evidencia.

Los ensayos empíricos también permiten una **evaluación en condiciones reales de servicio**, lo que mejora la representatividad de los resultados. A diferencia de los ensayos de laboratorio, que se realizan en entornos controlados, estos métodos consideran las condiciones propias del contexto donde el material es producido y utilizado, como variaciones de humedad, temperatura y prácticas constructivas.

Además, estos ensayos ofrecen la posibilidad de obtener **información cualitativa complementaria**, como la observación directa de los modos de falla, la formación de fisuras y el comportamiento general del material bajo carga. Esta información resulta valiosa para interpretar los resultados y para identificar posibles mejoras en el proceso de fabricación.

En el contexto de la investigación, los ensayos empíricos facilitan la **generación de datos experimentales en mayor escala**, debido a su bajo costo y facilidad de implementación. Esto permite realizar múltiples pruebas y obtener bases de datos más amplias, lo que contribuye al desarrollo de modelos correlacionales más robustos y representativos.

No obstante, es importante reconocer que estas ventajas deben ser acompañadas de un adecuado diseño experimental y de una interpretación rigurosa de los resultados. La ausencia de estandarización implica que los ensayos empíricos deben fundamentarse en principios sólidos y ser validados mediante análisis comparativos o estadísticos para garantizar su confiabilidad.

En síntesis, los ensayos empíricos ofrecen una alternativa viable, accesible y representativa para la evaluación de la resistencia a tracción en ladrillos de tierra comprimida. Su implementación en contextos reales permite superar las barreras de los métodos convencionales, facilitando el control de calidad, la investigación aplicada y el desarrollo de soluciones constructivas sostenibles adaptadas a las condiciones locales.

El desarrollo del presente capítulo ha permitido establecer una comprensión integral de la resistencia a tracción en ladrillos de tierra comprimida, abordando tanto sus fundamentos teóricos como las metodologías disponibles para su evaluación. A lo largo de

las secciones desarrolladas, se ha evidenciado que la tracción constituye una propiedad crítica en materiales frágiles, ya que condiciona el inicio de la falla y la propagación de fisuras, aspectos que no pueden ser explicados únicamente a partir del análisis de la resistencia a compresión.

En primer lugar, el análisis de los referentes teóricos ha permitido identificar que la resistencia a tracción, aunque menor en magnitud, desempeña un papel determinante en el comportamiento estructural del material. La revisión de estudios en materiales similares, como el concreto, el adobe y los suelos estabilizados, ha demostrado que la tracción es el factor clave en el inicio del colapso, lo que resalta la necesidad de incorporarla en la caracterización mecánica de los CEB/LTC.

Asimismo, se han analizado los fundamentos físicos que explican el comportamiento del material bajo esfuerzos tensionales, destacando la importancia de la cohesión interna, la presencia de discontinuidades y los mecanismos de propagación de fisuras. Estos elementos permiten comprender por qué los materiales de tierra comprimida presentan una alta sensibilidad frente a la tracción y por qué su evaluación resulta compleja desde el punto de vista experimental.

En relación con los métodos de evaluación, se ha evidenciado que los ensayos tradicionales presentan limitaciones técnicas y económicas que dificultan su aplicación en contextos reales, especialmente en entornos de producción artesanal o con recursos limitados. Esta situación ha sido un factor determinante para el desarrollo de enfoques alternativos, como los ensayos empíricos, que permiten aproximar la resistencia a tracción mediante sistemas accesibles y adaptados a las condiciones de campo.

El análisis de las nociones básicas ha permitido establecer los principios fundamentales que sustentan la evaluación de la resistencia a tracción, incluyendo la relación esfuerzo-área, el equilibrio de fuerzas y el comportamiento del material bajo carga tensional. Estos conceptos constituyen la base para el diseño e interpretación de ensayos, tanto convencionales como empíricos.

Por otro lado, se han identificado las principales variables que influyen en la resistencia a tracción, tales como la geometría del espécimen, las discontinuidades internas y la dosificación de los componentes. La comprensión de estos factores resulta esencial para interpretar los resultados experimentales y para optimizar el desempeño del material.

En este contexto, se ha introducido el Tensile Field Test como una alternativa metodológica fundamentada en principios mecánicos básicos, que permite evaluar la resistencia a tracción mediante un sistema accesible y aplicable en condiciones reales. Asimismo, se han destacado las ventajas de los ensayos empíricos, evidenciando su potencial para complementar los métodos tradicionales y ampliar las posibilidades de caracterización del material.

En conjunto, este capítulo ha proporcionado el sustento teórico y conceptual necesario para comprender la resistencia a tracción como una variable fundamental en el comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida. Este marco permite no solo interpretar los fenómenos asociados a la falla, sino también justificar la necesidad de desarrollar métodos alternativos de evaluación.

Finalmente, los conceptos desarrollados establecen una base sólida para el capítulo siguiente, en el cual se abordará el caso de estudio, integrando la metodología experimental, la aplicación del Tensile Field Test y el análisis de resultados. De esta manera, se consolida un enfoque integral que combina teoría y práctica, contribuyendo al avance del conocimiento en la caracterización de materiales de tierra comprimida.

CAPÍTULO III

CASO DE ESTUDIO: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y MODELAMIENTO

El presente capítulo constituye el núcleo aplicado de la investigación, en el cual se integran los fundamentos teóricos desarrollados previamente con la ejecución de un estudio experimental orientado a la evaluación de la resistencia a tracción en ladrillos de tierra comprimida. A partir de esta articulación entre teoría y práctica, se busca no solo caracterizar el comportamiento mecánico del material, sino también proponer herramientas que permitan su estimación en contextos reales.

En este sentido, el capítulo aborda el diseño y la implementación de un sistema experimental basado en el **Tensile Field Test**, concebido como una alternativa accesible para la medición de la resistencia a tracción. Este enfoque responde a la necesidad de superar las limitaciones de los métodos convencionales, adaptándose a condiciones donde el acceso a equipamiento especializado es restringido. La propuesta metodológica se fundamenta en principios básicos de la mecánica de materiales, como el equilibrio de fuerzas y la relación esfuerzo-área, garantizando coherencia entre el modelo físico y la interpretación de los resultados.

Asimismo, se presenta el proceso de elaboración de los especímenes, el control de variables como la dosificación de cemento, el contenido de humedad, la compactación y el tiempo de curado, así como la ejecución de los ensayos tanto de compresión como de tracción. Este enfoque integral permite obtener una base de datos experimental que sustenta el análisis comparativo y el desarrollo del modelo propuesto.

Un componente central del capítulo es el **análisis de resultados**, donde se identifican patrones de comportamiento, se evalúan tendencias y se establecen relaciones entre las variables estudiadas. En particular, se explora la correlación entre la resistencia a

compresión y la resistencia a tracción, con el objetivo de desarrollar un modelo matemático que permita estimar esta última a partir de parámetros más accesibles.

El capítulo también incorpora el **modelamiento de datos**, empleando herramientas de análisis estadístico y regresión que permiten describir la relación entre variables y evaluar la precisión de las predicciones. Este proceso no solo valida el enfoque experimental, sino que también contribuye a la generación de conocimiento aplicable en el diseño y control de calidad de materiales de tierra comprimida.

En conjunto, este caso de estudio representa un aporte al campo de la ingeniería de materiales sostenibles, al proponer una metodología que combina accesibilidad, rigor técnico y aplicabilidad práctica. De esta manera, se avanza hacia una caracterización más completa del comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida, integrando la resistencia a tracción como una variable clave en su evaluación.

Este capítulo, por tanto, no solo presenta los resultados de la investigación, sino que también establece las bases para su aplicación en contextos reales, contribuyendo al desarrollo de soluciones constructivas más eficientes, sostenibles y adaptadas a las condiciones locales.

3.1 DISEÑO METODOLÓGICO DEL ESTUDIO

El diseño metodológico del presente estudio se estructura con el objetivo de evaluar experimentalmente la resistencia a tracción en ladrillos de tierra comprimida y establecer su relación con la resistencia a compresión, mediante un enfoque que integra procedimientos accesibles y fundamentos rigurosos de la mecánica de materiales. Este diseño responde a la necesidad de generar conocimiento aplicable en contextos reales, donde las limitaciones técnicas y económicas condicionan la implementación de métodos convencionales.

Desde el punto de vista del enfoque de investigación, el estudio se desarrolla bajo un **enfoque cuantitativo de tipo experimental**, ya que se manipulan variables específicas del proceso de fabricación y se observan sus efectos sobre las propiedades mecánicas del

material. Asimismo, presenta un carácter **explicativo**, al buscar establecer relaciones causales entre variables como la dosificación de cemento, la resistencia a compresión y la resistencia a tracción.

El diseño experimental es de tipo **no probabilístico y controlado**, donde se elaboran especímenes bajo condiciones previamente definidas, permitiendo aislar el efecto de las variables de interés. En este sentido, se consideran como variables independientes la dosificación de cemento y las condiciones de fabricación, mientras que las variables dependientes corresponden a la resistencia a compresión y la resistencia a tracción del material.

La población de estudio está conformada por ladrillos de tierra comprimida elaborados en condiciones controladas, mientras que la muestra está constituida por un conjunto de especímenes fabricados con diferentes dosificaciones de cemento y sometidos a ensayos mecánicos en distintos tiempos de curado. Esta selección permite analizar el comportamiento del material bajo diversas condiciones y obtener una base de datos representativa.

El proceso metodológico se divide en varias etapas. En primer lugar, se realiza la **preparación de los materiales**, incluyendo la selección del suelo, la dosificación de los componentes y el control del contenido de humedad. Posteriormente, se lleva a cabo la **fabricación de los especímenes**, mediante procesos de mezclado, moldeado y compactación, garantizando condiciones homogéneas en todas las muestras.

En la siguiente etapa, se desarrolla el **proceso de curado**, durante el cual los especímenes son almacenados bajo condiciones controladas para permitir el desarrollo de sus propiedades mecánicas. Se consideran diferentes edades de curado, con el fin de analizar la evolución de la resistencia en el tiempo.

La fase experimental incluye la aplicación de **ensayos de compresión**, realizados bajo procedimientos convencionales, y la implementación del **Tensile Field Test** como método empírico para la evaluación de la resistencia a tracción. Este último se diseña

considerando principios de equilibrio de fuerzas y la relación esfuerzo–área, permitiendo estimar la resistencia del material mediante sistemas accesibles.

Finalmente, se realiza el **análisis de datos**, donde se procesan los resultados obtenidos, se calculan valores promedio, se evalúa la variabilidad y se establecen relaciones entre las variables estudiadas. Se emplean herramientas de análisis estadístico y regresión para desarrollar un modelo correlacional que permita estimar la resistencia a tracción a partir de la resistencia a compresión.

En síntesis, el diseño metodológico del estudio combina un enfoque experimental con herramientas de análisis cuantitativo, permitiendo evaluar de manera integral el comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida. Este diseño no solo garantiza la validez de los resultados, sino que también facilita la aplicación de los hallazgos en contextos reales, contribuyendo al desarrollo de metodologías accesibles y eficientes para la caracterización de materiales de construcción sostenibles.

3.1.1. Tipo y enfoque de investigación

El presente estudio se desarrolla bajo un **enfoque cuantitativo**, orientado a la medición objetiva de variables mecánicas y al análisis de relaciones entre ellas mediante procedimientos estadísticos y experimentales. Este enfoque permite cuantificar propiedades como la resistencia a compresión y la resistencia a tracción, así como establecer correlaciones que faciliten su interpretación y modelamiento.

En cuanto al tipo de investigación, el estudio es de carácter **experimental**, ya que implica la manipulación deliberada de variables independientes —principalmente la dosificación de cemento y las condiciones de fabricación— con el fin de observar su efecto sobre variables dependientes, como las resistencias mecánicas del material. Este control de variables permite aislar los factores de interés y analizar su influencia directa en el comportamiento del material.

Asimismo, la investigación presenta un nivel **explicativo**, dado que no se limita a describir el comportamiento de los ladrillos de tierra comprimida, sino que busca identificar relaciones causales entre las variables estudiadas. En particular, se pretende explicar cómo la resistencia a compresión se relaciona con la resistencia a tracción, estableciendo un modelo que permita predecir esta última a partir de parámetros más accesibles.

El estudio también incorpora un componente **aplicado**, ya que los resultados obtenidos están orientados a su utilización en contextos reales de producción y construcción. La propuesta metodológica, basada en ensayos empíricos como el Tensile Field Test, busca ofrecer soluciones prácticas que puedan ser implementadas en entornos con recursos limitados, contribuyendo a la mejora del control de calidad y al desarrollo de materiales sostenibles.

Desde el punto de vista del diseño, la investigación se enmarca en un esquema **experimental controlado**, donde las condiciones de fabricación y ensayo son definidas previamente para garantizar la validez de los resultados. Aunque no se trata de un experimento con asignación aleatoria en sentido estricto, se mantiene un control riguroso de las variables relevantes, lo que permite obtener conclusiones consistentes.

En síntesis, el estudio combina un enfoque cuantitativo con un diseño experimental y un nivel explicativo, orientado a la generación de conocimiento aplicable. Esta estructura metodológica permite no solo evaluar el comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida, sino también desarrollar herramientas predictivas que faciliten su uso en la práctica constructiva.

3.1.2. Diseño experimental

El diseño experimental del presente estudio se estructura con el propósito de evaluar de manera controlada la influencia de variables específicas en el comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida, particularmente en su resistencia a compresión y a tracción. Este diseño permite establecer relaciones causales entre las variables de estudio, garantizando la validez interna de los resultados y la reproducibilidad del experimento.

El experimento se desarrolla bajo un **diseño factorial simple**, en el cual se manipula principalmente la **dosificación de cemento** como variable independiente, manteniendo constantes otras condiciones de fabricación, como el tipo de suelo, el contenido de humedad y el proceso de compactación. Esta estrategia permite aislar el efecto de la dosificación sobre las propiedades mecánicas del material, facilitando la interpretación de los resultados.

Se consideran diferentes niveles de dosificación de cemento, representativos de condiciones reales de producción, lo que permite analizar el comportamiento del material en un rango amplio de estabilización. Cada nivel de dosificación da lugar a un grupo de especímenes, los cuales son elaborados bajo condiciones homogéneas y sometidos a los mismos procesos de curado y ensayo.

El diseño incluye la evaluación de las propiedades mecánicas en distintos **tiempos de curado**, lo que introduce una dimensión temporal en el análisis. Esta variable permite observar la evolución de la resistencia a lo largo del tiempo, identificando patrones de crecimiento y estabilización en las propiedades del material.

Para cada combinación de variables, se elaboran múltiples especímenes con el fin de garantizar la **repetibilidad de los resultados** y permitir el análisis estadístico de los datos. Esta replicación experimental es fundamental para reducir la influencia de la variabilidad inherente del material y obtener valores representativos de las propiedades mecánicas.

El diseño experimental contempla la aplicación de dos tipos de ensayo: por un lado, el **ensayo de compresión**, realizado bajo procedimientos convencionales, y por otro, el **ensayo de tracción mediante el Tensile Field Test**, desarrollado como método empírico. Esta doble evaluación permite obtener información complementaria sobre el comportamiento del material y establecer relaciones entre ambas propiedades.

Asimismo, se garantiza el **control de variables externas**, tales como las condiciones ambientales durante el curado y la ejecución de los ensayos, con el fin de minimizar su influencia en los resultados. Este control permite asegurar que las variaciones observadas se deban principalmente a las variables de interés.

El análisis de los resultados se basa en la comparación entre grupos experimentales, la evaluación de tendencias y la aplicación de herramientas estadísticas para identificar relaciones significativas entre variables. En particular, se busca desarrollar un modelo correlacional que permita estimar la resistencia a tracción a partir de la resistencia a compresión.

En síntesis, el diseño experimental adoptado permite evaluar de manera sistemática el comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida, integrando la manipulación de variables, la replicación de ensayos y el análisis estadístico. Este enfoque garantiza la confiabilidad de los resultados y proporciona una base sólida para el desarrollo de modelos predictivos y la validación de metodologías experimentales accesibles.

3.1.3. Variables de estudio:

El presente estudio se estructura en torno a un conjunto de variables que permiten analizar el comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida y establecer relaciones entre sus propiedades. Estas variables han sido seleccionadas considerando su relevancia teórica y su impacto en el proceso de fabricación y en el desempeño del material, permitiendo una evaluación integral del fenómeno en estudio.

En primer lugar, se identifican las **variables independientes**, las cuales corresponden a los factores que son manipulados de manera controlada durante el experimento. La principal variable independiente es la **dosificación de cemento**, expresada como porcentaje en peso respecto al suelo seco. Esta variable ha sido seleccionada debido a su influencia directa en la cohesión interna del material y en el desarrollo de sus propiedades mecánicas. Asimismo, se considera como variable independiente el **tiempo de curado**, el cual permite analizar la evolución de la resistencia en función del desarrollo de las reacciones de hidratación.

Por otro lado, se establecen las **variables dependientes**, que corresponden a las propiedades mecánicas que se buscan evaluar como respuesta a las variaciones en las variables independientes. En este estudio, las variables dependientes principales son la

resistencia a compresión y la **resistencia a tracción** de los ladrillos de tierra comprimida. La primera se determina mediante ensayos convencionales de compresión, mientras que la segunda se evalúa mediante el método empírico propuesto, el Tensile Field Test.

Adicionalmente, se consideran **variables intervinientes o de control**, las cuales son mantenidas constantes durante el desarrollo del experimento con el fin de evitar que influyan en los resultados. Entre estas variables se incluyen el **tipo de suelo**, el **contenido de humedad durante la mezcla**, la **energía de compactación**, la **geometría de los especímenes** y las **condiciones ambientales durante el curado**. El control de estas variables es fundamental para garantizar que las variaciones observadas en las propiedades mecánicas se deban exclusivamente a las variables independientes.

Asimismo, se contemplan **variables derivadas o calculadas**, como el esfuerzo de tracción y el esfuerzo de compresión, los cuales se obtienen a partir de las cargas aplicadas y las dimensiones de los especímenes. Estas variables permiten estandarizar los resultados y facilitar su comparación entre diferentes condiciones experimentales.

El estudio también considera la relación entre las variables principales, especialmente la correlación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción, la cual constituye uno de los objetivos centrales de la investigación. Esta relación es analizada mediante herramientas estadísticas y modelos matemáticos que permiten describir el comportamiento del material y establecer ecuaciones predictivas.

En síntesis, las variables de estudio han sido definidas de manera que permitan un análisis claro y estructurado del comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida. La adecuada identificación, control y medición de estas variables garantiza la validez de los resultados y proporciona una base sólida para el desarrollo del modelo propuesto en la presente investigación.

3.1.3.1. Dosificación de cemento (7%, 15%, 20%)

La dosificación de cemento se establece como la principal variable independiente del estudio, debido a su influencia directa en la cohesión interna y en el desarrollo de las propiedades mecánicas de los ladrillos de tierra comprimida. En este caso, se han definido tres niveles de dosificación: **7%, 15% y 20%**, expresados como porcentaje en peso respecto al suelo seco. Estos niveles han sido seleccionados con el propósito de representar distintos grados de estabilización del material y permitir un análisis comparativo de su comportamiento.

El nivel de **7% de cemento** corresponde a una dosificación baja, comúnmente utilizada en aplicaciones no estructurales o de baja exigencia. En este rango, el material presenta una mejora inicial en su cohesión respecto al suelo natural, pero aún mantiene un comportamiento predominantemente granular. Esta dosificación permite evaluar el desempeño del material en condiciones mínimas de estabilización y sirve como referencia para comparar los efectos de incrementos posteriores.

Por su parte, la dosificación de **15% de cemento** representa un nivel intermedio de estabilización, en el cual se espera una mejora significativa en la resistencia mecánica del material. En este rango, la formación de productos cementantes es más abundante, lo que incrementa la cohesión entre partículas y mejora tanto la resistencia a compresión como a tracción. Este nivel permite analizar el comportamiento del material en condiciones más cercanas a aplicaciones estructurales.

El nivel de **20% de cemento** corresponde a una dosificación alta, en la cual el material adquiere características más cercanas a un sistema cementado que a un suelo estabilizado. En este caso, se espera un incremento notable en la resistencia mecánica, aunque también puede observarse un comportamiento más rígido y frágil. Este nivel permite evaluar los límites del efecto del cemento en el material y analizar posibles rendimientos decrecientes en la relación entre dosificación y resistencia.

La selección de estos tres niveles permite establecer un **análisis comparativo escalonado**, donde se observa la evolución del comportamiento mecánico del material a medida que aumenta la dosificación de cemento. Este enfoque facilita la identificación de tendencias, como el incremento progresivo de la resistencia y la posible existencia de un rango óptimo de dosificación.

Asimismo, la dosificación de cemento influye directamente en la resistencia a tracción, ya que incrementa la cohesión interna y reduce la propagación de fisuras. Sin embargo, también puede generar un comportamiento más frágil, lo que hace necesario analizar no solo los valores de resistencia, sino también los modos de falla asociados a cada nivel de dosificación (Reddy & Gupta, 2006).

Durante el desarrollo experimental, se garantiza que cada nivel de dosificación sea aplicado de manera homogénea en la mezcla, asegurando una distribución uniforme del cemento en el material. Este control es fundamental para evitar variaciones internas que puedan afectar los resultados.

En síntesis, la dosificación de cemento en niveles de 7%, 15% y 20% permite analizar de manera sistemática la influencia del estabilizante en el comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida. Esta variable constituye el eje central del diseño experimental y proporciona la base para el desarrollo del modelo correlacional propuesto en el estudio.

3.1.3.2. Días de curado (7, 14, 21, 28)

El tiempo de curado se establece como una variable independiente clave en el presente estudio, debido a su influencia directa en el desarrollo progresivo de las propiedades mecánicas de los ladrillos de tierra comprimida estabilizados con cemento. Para este análisis, se han definido cuatro intervalos de curado: **7, 14, 21 y 28 días**, los cuales permiten evaluar la evolución de la resistencia en distintas etapas del proceso de hidratación y consolidación del material.

El periodo de **7 días de curado** corresponde a la etapa inicial de desarrollo de la resistencia, en la cual se produce una parte significativa de las reacciones de hidratación del cemento. En esta fase, el material adquiere una resistencia básica que permite su manipulación, aunque aún no alcanza su potencial máximo. Este intervalo es fundamental para analizar el comportamiento temprano del material y su capacidad inicial frente a cargas.

El intervalo de **14 días** representa una etapa intermedia en la que las reacciones químicas continúan desarrollándose, incrementando la cohesión interna del material. En este punto, se observa un aumento notable en la resistencia tanto a compresión como a tracción, reflejando la consolidación progresiva de la matriz cementante. Este periodo permite evaluar la tendencia de crecimiento de la resistencia en el corto plazo.

El periodo de **21 días** constituye una fase avanzada del proceso de curado, en la cual el material se aproxima a su nivel de resistencia final. Aunque las reacciones de hidratación continúan, su velocidad disminuye, y los incrementos de resistencia comienzan a estabilizarse. Este intervalo permite identificar el comportamiento del material en una etapa cercana a su desempeño óptimo.

Finalmente, el intervalo de **28 días** es considerado como el referente estándar en la evaluación de materiales cementados, ya que en este punto se alcanza la mayor parte de la resistencia potencial del material. Este periodo es ampliamente utilizado en la ingeniería para la comparación de resultados y la validación de propiedades mecánicas, lo que lo convierte en un punto de referencia clave en el análisis experimental (Neville, 2011).

La selección de estos cuatro intervalos permite realizar un **análisis temporal del desarrollo de la resistencia**, identificando la evolución del comportamiento mecánico del material desde etapas iniciales hasta condiciones cercanas a su madurez. Este enfoque facilita la comprensión de la influencia del tiempo de curado en la resistencia a compresión y a tracción, así como la identificación de patrones de crecimiento.

Asimismo, el tiempo de curado interactúa con otras variables del estudio, como la dosificación de cemento, generando efectos combinados que influyen en el desempeño del

material. Por ejemplo, mayores contenidos de cemento pueden acelerar el desarrollo de la resistencia en etapas tempranas, mientras que una adecuada compactación y control de humedad favorecen un curado más eficiente.

Durante el desarrollo experimental, se garantiza que los especímenes sean almacenados bajo condiciones controladas de humedad y temperatura, con el fin de asegurar un proceso de curado uniforme. Este control es esencial para evitar variaciones en los resultados atribuibles a factores externos.

En síntesis, la consideración de los días de curado en intervalos de 7, 14, 21 y 28 días permite analizar de manera integral la evolución de las propiedades mecánicas de los ladrillos de tierra comprimida. Esta variable no solo proporciona información sobre el desarrollo de la resistencia en el tiempo, sino que también contribuye al establecimiento de relaciones entre variables y al desarrollo del modelo correlacional propuesto en el estudio.

3.1.4. Número de muestras (120 por dosificación)

El tamaño de muestra constituye un elemento fundamental dentro del diseño metodológico, ya que influye directamente en la confiabilidad, representatividad y robustez de los resultados experimentales. En el presente estudio, se ha establecido un total de **120 especímenes por cada nivel de dosificación de cemento (7%, 15% y 20%)**, lo que permite contar con una base de datos amplia y consistente para el análisis del comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida.

Esta decisión responde a la necesidad de **reducir la variabilidad inherente del material**, considerando que los CEB/LTC presentan una naturaleza heterogénea y son sensibles a pequeñas variaciones en el proceso de fabricación. Un número elevado de muestras permite mitigar el efecto de estas variaciones, proporcionando resultados más representativos y confiables.

El total de muestras por dosificación se distribuye entre los diferentes **tiempos de curado (7, 14, 21 y 28 días)** y los distintos **tipos de ensayo (compresión y tracción)**. Esta

distribución permite analizar el comportamiento del material en múltiples condiciones, generando información suficiente para evaluar tendencias, comparar resultados y establecer relaciones entre variables.

Asimismo, el uso de un número significativo de especímenes permite aplicar **herramientas de análisis estadístico**, como el cálculo de promedios, desviaciones estándar y coeficientes de variación. Estas medidas son fundamentales para interpretar los resultados de manera adecuada y para identificar la dispersión de los datos, lo que contribuye a una mejor comprensión del comportamiento del material.

La replicación experimental también facilita la **validación de los resultados**, ya que permite detectar posibles valores atípicos y evaluar la consistencia de las mediciones. En este sentido, el número de muestras seleccionado garantiza un nivel adecuado de precisión y confiabilidad en los ensayos realizados.

Desde una perspectiva metodológica, el tamaño de muestra adoptado permite desarrollar un **modelo correlacional robusto**, al contar con una cantidad suficiente de datos para establecer relaciones entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción. Esto es especialmente importante en el contexto del presente estudio, donde se busca proponer una ecuación predictiva basada en resultados experimentales.

En términos generales, el total de muestras del estudio asciende a **360 especímenes**, considerando las tres dosificaciones evaluadas. Este volumen de datos proporciona una base sólida para el análisis experimental y el desarrollo de conclusiones con sustento estadístico.

En síntesis, la selección de 120 muestras por dosificación permite garantizar la representatividad de los resultados, reducir la influencia de la variabilidad del material y fortalecer el análisis estadístico del estudio. Este enfoque metodológico contribuye a la validez de los resultados y al desarrollo de un modelo confiable para la estimación de la resistencia a tracción en ladrillos de tierra comprimida.

3.1.5. Procedimiento general

El procedimiento general del estudio se estructura en una secuencia de etapas que permiten garantizar la correcta ejecución del experimento, el control de variables y la obtención de resultados confiables. Este procedimiento integra desde la preparación de los materiales hasta el análisis final de los datos, asegurando coherencia entre el diseño metodológico y los objetivos de la investigación.

En una primera etapa, se realiza la **selección y caracterización de los materiales**, incluyendo el suelo base y el cemento utilizado como estabilizante. Se verifica que el suelo cumpla con condiciones adecuadas de granulometría y plasticidad, y se establecen las proporciones de mezcla correspondientes a cada nivel de dosificación (7%, 15% y 20%). Asimismo, se determina el contenido de humedad necesario para facilitar el proceso de compactación.

Posteriormente, se lleva a cabo la **preparación de la mezcla**, donde se combinan de manera homogénea el suelo, el cemento y el agua. Este proceso es fundamental para garantizar una distribución uniforme de los componentes y evitar la formación de zonas con diferente comportamiento mecánico.

La siguiente etapa corresponde a la **fabricación de los especímenes**, mediante el moldeo y compactación de la mezcla en moldes con dimensiones definidas. Se aplica una energía de compactación constante para todos los especímenes, con el fin de asegurar condiciones homogéneas en la densidad del material. Una vez fabricados, los especímenes son identificados y clasificados según su dosificación y tiempo de curado.

A continuación, se desarrolla el **proceso de curado**, durante el cual los especímenes son almacenados en condiciones controladas de humedad y temperatura. Este proceso permite el desarrollo de las reacciones de hidratación del cemento y la consolidación de la estructura interna del material. Se establecen intervalos de curado de 7, 14, 21 y 28 días, en los cuales se realizarán los ensayos correspondientes.

En la fase experimental, se ejecutan los **ensayos mecánicos**, que incluyen pruebas de resistencia a compresión y resistencia a tracción. Los ensayos de compresión se realizan utilizando procedimientos convencionales, mientras que la resistencia a tracción se evalúa mediante el Tensile Field Test, aplicando cargas progresivas hasta alcanzar la falla del espécimen.

Durante la ejecución de los ensayos, se registran datos relevantes como la carga máxima aplicada, el modo de falla y las condiciones del ensayo. Estos datos permiten calcular las propiedades mecánicas del material y analizar su comportamiento bajo distintas condiciones.

Finalmente, se realiza el **procesamiento y análisis de datos**, donde se organizan los resultados obtenidos, se calculan valores estadísticos y se establecen relaciones entre las variables estudiadas. Se emplean herramientas de análisis correlacional y regresión para desarrollar un modelo que permita estimar la resistencia a tracción a partir de la resistencia a compresión.

En síntesis, el procedimiento general del estudio sigue una secuencia lógica y estructurada que garantiza la calidad de los resultados y la coherencia del análisis. Este enfoque permite integrar la experimentación con el modelamiento, contribuyendo al cumplimiento de los objetivos planteados y al desarrollo de una metodología aplicable en contextos reales.

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

La caracterización del material constituye una etapa fundamental dentro del desarrollo experimental del estudio, ya que permite conocer las propiedades físicas y mecánicas del suelo base y de la mezcla estabilizada antes de su evaluación estructural. Este proceso proporciona la información necesaria para comprender el comportamiento del material y garantizar que las condiciones de fabricación sean adecuadas y reproducibles.

En el caso de los ladrillos de tierra comprimida, la caracterización del material implica el análisis de parámetros como la granulometría, la plasticidad, el contenido de humedad y la densidad, los cuales influyen directamente en la compactación, la cohesión y, en consecuencia, en la resistencia mecánica. Estos aspectos permiten evaluar la idoneidad del suelo para su uso en la fabricación de CEB/LTC y establecer criterios de control durante el proceso experimental.

Asimismo, la caracterización incluye la evaluación de la mezcla estabilizada, considerando la interacción entre el suelo, el cemento y el agua. Este análisis permite verificar que las proporciones utilizadas generen una matriz adecuada para el desarrollo de propiedades mecánicas, especialmente en términos de resistencia a compresión y tracción.

El desarrollo de esta etapa es esencial para asegurar la calidad del experimento, ya que cualquier variación en las propiedades iniciales del material puede afectar significativamente los resultados obtenidos. Por ello, se aplican procedimientos de ensayo que permiten cuantificar las características del material y establecer condiciones homogéneas para la fabricación de los especímenes.

En este apartado se describen los ensayos y procedimientos utilizados para la caracterización del material, así como los resultados obtenidos, los cuales servirán como base para el análisis experimental y el modelamiento desarrollado en las secciones posteriores. De esta manera, se garantiza que el estudio se sustente en condiciones controladas y en un conocimiento adecuado del comportamiento del material desde su estado inicial.

3.2.1. Clasificación del suelo (SUCS y AASHTO)

La clasificación del suelo constituye un paso esencial en la caracterización del material, ya que permite identificar sus propiedades básicas y evaluar su idoneidad para la fabricación de ladrillos de tierra comprimida. En el presente estudio, la clasificación se realiza utilizando dos sistemas ampliamente reconocidos en la ingeniería geotécnica: el

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el **sistema AASHTO**, los cuales proporcionan criterios complementarios para el análisis del comportamiento del suelo.

El sistema **SUCS (Unified Soil Classification System)** se basa principalmente en la distribución granulométrica y en los límites de consistencia del suelo. Este sistema clasifica los suelos en función del tamaño de sus partículas (gravas, arenas y finos) y de su comportamiento plástico, utilizando parámetros como el límite líquido y el índice de plasticidad. A partir de estos criterios, los suelos se agrupan en categorías como arenas (S), limos (M) y arcillas (C), con subclasificaciones que permiten describir con mayor precisión sus características.

En el contexto de los ladrillos de tierra comprimida, el sistema SUCS permite identificar si el suelo presenta una proporción adecuada de partículas gruesas y finas. Una combinación equilibrada de arena y finos es generalmente favorable, ya que proporciona tanto estabilidad estructural como cohesión. Por el contrario, suelos con exceso de arcilla pueden presentar problemas de retracción y fisuración, mientras que suelos con bajo contenido de finos pueden carecer de cohesión suficiente.

Por otro lado, el sistema **AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)** clasifica los suelos en función de su comportamiento en aplicaciones viales, considerando la granulometría y los límites de consistencia. Este sistema agrupa los suelos en categorías que van desde materiales granulares de alta calidad (A-1) hasta suelos finos con comportamiento menos favorable (A-7), incorporando además un índice de grupo que refleja la calidad del material.

La aplicación del sistema AASHTO en este estudio permite evaluar el comportamiento del suelo desde una perspectiva funcional, considerando su capacidad para soportar cargas y su estabilidad frente a variaciones de humedad. Esta información resulta útil para complementar la clasificación SUCS y para interpretar el desempeño del material en condiciones reales.

La combinación de ambos sistemas de clasificación proporciona una visión integral del suelo, permitiendo identificar sus características físicas y su comportamiento mecánico potencial. Esta doble clasificación es especialmente relevante en el presente estudio, ya que permite correlacionar las propiedades del suelo con el desempeño de los ladrillos de tierra comprimida.

Asimismo, la clasificación del suelo sirve como base para la selección de la dosificación de cemento y para el diseño del proceso de fabricación, ya que diferentes tipos de suelo requieren distintos niveles de estabilización para alcanzar propiedades mecánicas adecuadas.

En síntesis, la clasificación del suelo mediante los sistemas SUCS y AASHTO permite establecer un diagnóstico completo de las características del material base, facilitando la interpretación de los resultados experimentales y garantizando la coherencia del diseño metodológico. Esta etapa constituye un elemento fundamental para asegurar la calidad y confiabilidad del estudio.

3.2.2. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico constituye una etapa esencial en la caracterización del suelo, ya que permite determinar la distribución de tamaños de partículas que lo componen. Esta propiedad influye directamente en el comportamiento mecánico del material, especialmente en su capacidad de compactación, cohesión y resistencia, aspectos fundamentales en la fabricación de ladrillos de tierra comprimida.

El procedimiento de análisis granulométrico se realiza mediante dos métodos principales: el **tamizado mecánico** para las fracciones gruesas (gravas y arenas) y el **análisis por sedimentación (hidrómetro)** para las fracciones finas (limos y arcillas). A partir de estos ensayos, se obtiene la distribución porcentual de partículas en función de su tamaño, lo que permite construir la **curva granulométrica** del suelo.

La curva granulométrica es una representación gráfica que muestra la relación entre el tamaño de las partículas y el porcentaje acumulado que pasa por cada tamiz. Esta curva permite identificar la gradación del suelo, es decir, si se trata de un material bien gradado, con una amplia distribución de tamaños, o de un suelo mal gradado, con predominancia de partículas de tamaño similar.

En el contexto de los ladrillos de tierra comprimida, una **granulometría equilibrada** es fundamental para obtener un material con buenas propiedades mecánicas. La presencia de partículas gruesas, como arenas, proporciona estabilidad estructural y reduce la retracción, mientras que las fracciones finas, como limos y arcillas, contribuyen a la cohesión del material. Una adecuada combinación de estos componentes permite mejorar la densidad alcanzada durante la compactación y, en consecuencia, la resistencia del material (Houben & Guillaud, 1994).

Por el contrario, una granulometría inadecuada puede afectar negativamente el desempeño del material. Suelos con exceso de finos, especialmente arcillas, pueden presentar alta plasticidad y problemas de fisuración durante el secado. En cambio, suelos con bajo contenido de finos pueden carecer de cohesión suficiente, dificultando la formación de unidades compactas y resistentes.

A partir del análisis granulométrico, también es posible calcular parámetros como el **coeficiente de uniformidad (Cu)** y el **coeficiente de curvatura (Cc)**, los cuales permiten evaluar la calidad de la gradación del suelo. Estos parámetros son útiles para clasificar el material y para interpretar su comportamiento durante la compactación.

Asimismo, la información obtenida en este análisis permite ajustar la dosificación de los componentes del material, especialmente en lo que respecta a la incorporación de estabilizantes como el cemento. Una granulometría adecuada favorece la distribución uniforme del cemento y mejora la eficiencia del proceso de estabilización.

En síntesis, el análisis granulométrico proporciona información clave sobre la estructura del suelo, permitiendo evaluar su idoneidad para la fabricación de ladrillos de

tierra comprimida y establecer condiciones óptimas de mezcla. Esta caracterización es fundamental para garantizar la calidad del material y para interpretar los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos realizados en el presente estudio.

3.2.3. Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg constituyen un conjunto de parámetros fundamentales para la caracterización de suelos finos, ya que permiten evaluar su comportamiento en función del contenido de humedad. Estos límites definen los estados de consistencia del suelo y proporcionan información clave sobre su plasticidad, trabajabilidad y estabilidad, aspectos esenciales en la fabricación de ladrillos de tierra comprimida.

Los principales límites de Atterberg son el **límite líquido (LL)**, el **límite plástico (LP)** y el **índice de plasticidad (IP)**. El límite líquido corresponde al contenido de humedad en el cual el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido, perdiendo su capacidad de mantener una forma definida. Por su parte, el límite plástico representa el contenido de humedad en el cual el suelo pasa de un estado semisólido a uno plástico, adquiriendo la capacidad de ser moldeado sin agrietarse.

El **índice de plasticidad (IP)** se define como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, y constituye un indicador de la amplitud del rango en el cual el suelo presenta comportamiento plástico. Este parámetro es especialmente importante, ya que refleja la capacidad del suelo para deformarse sin romperse, así como su sensibilidad a cambios en el contenido de humedad.

En el contexto de los ladrillos de tierra comprimida, los límites de Atterberg permiten evaluar la idoneidad del suelo para su uso en la fabricación de unidades constructivas. Suelos con un índice de plasticidad moderado son generalmente los más adecuados, ya que ofrecen un equilibrio entre cohesión y estabilidad. Un IP demasiado bajo puede indicar falta de cohesión, dificultando la compactación, mientras que un IP elevado puede generar problemas de retracción y fisuración durante el secado (Das & Sobhan, 2014).

Asimismo, los límites de Atterberg influyen en la determinación del contenido de humedad óptimo para la mezcla. Un adecuado control de la humedad, en relación con estos límites, permite mejorar la trabajabilidad del material y favorecer una compactación eficiente, lo que se traduce en una mayor densidad y resistencia.

El análisis de estos parámetros también permite clasificar el suelo dentro de sistemas como el SUCS y el AASHTO, proporcionando una base adicional para la interpretación de su comportamiento. Además, los límites de Atterberg son útiles para comparar diferentes tipos de suelo y para evaluar la necesidad de incorporar estabilizantes que mejoren sus propiedades.

En términos experimentales, la determinación de estos límites se realiza mediante ensayos estandarizados que garantizan la reproducibilidad de los resultados. Estos ensayos permiten cuantificar de manera precisa el contenido de humedad asociado a cada estado de consistencia, proporcionando datos confiables para el análisis.

En síntesis, los límites de Atterberg constituyen una herramienta esencial para la caracterización de suelos finos, ya que permiten comprender su comportamiento frente a variaciones de humedad y evaluar su idoneidad para la fabricación de ladrillos de tierra comprimida. Su análisis contribuye al control del proceso de mezcla y compactación, así como a la interpretación de los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos del presente estudio.

3.2.4. Determinación de humedad óptima

La determinación del contenido de humedad óptimo es una etapa clave en la caracterización del material, ya que define las condiciones en las cuales el suelo alcanza su **máxima densidad seca** durante el proceso de compactación. Este parámetro influye directamente en la cohesión interna, la reducción de vacíos y, en consecuencia, en la resistencia mecánica de los ladrillos de tierra comprimida.

El contenido de humedad óptimo se determina generalmente mediante el **ensayo Proctor**, el cual consiste en compactar el suelo en un molde bajo una energía controlada, variando el contenido de agua en cada ensayo. A partir de los resultados obtenidos, se construye una curva que relaciona la **densidad seca** con el **contenido de humedad**, permitiendo identificar el punto en el cual se alcanza la máxima densidad.

Desde un punto de vista físico, la humedad actúa como un **agente lubricante** entre las partículas del suelo. En niveles bajos de humedad, la fricción entre partículas dificulta su reacomodo, limitando la compactación. A medida que aumenta el contenido de agua, las partículas pueden reorganizarse con mayor facilidad, incrementando la densidad del material. Sin embargo, un exceso de humedad genera la separación de partículas y la ocupación de espacios por agua, lo que reduce la densidad alcanzada.

El punto de humedad óptima representa un equilibrio entre estos dos efectos, donde el contenido de agua es suficiente para facilitar la compactación, pero no tan elevado como para generar una disminución en la densidad. Este punto es fundamental para garantizar un material con **baja porosidad y alta resistencia mecánica** (Das & Sobhan, 2014).

En el contexto de los ladrillos de tierra comprimida, trabajar con una humedad cercana al valor óptimo permite mejorar significativamente la calidad del producto final. Una compactación eficiente reduce la presencia de vacíos y aumenta la cohesión interna, lo que se traduce en mayores valores de resistencia a compresión y tracción.

Asimismo, la humedad óptima influye en la **distribución del cemento** dentro de la mezcla. Un contenido adecuado de agua favorece la dispersión homogénea del estabilizante y facilita las reacciones de hidratación, contribuyendo al desarrollo de enlaces cementantes entre las partículas del suelo.

Es importante destacar que el contenido de humedad óptimo puede variar en función del tipo de suelo, la dosificación de cemento y la energía de compactación aplicada. Por ello, su determinación experimental es fundamental para cada condición específica del estudio, evitando la aplicación de valores generales que puedan no ser representativos.

Durante el desarrollo experimental, se controla cuidadosamente el contenido de humedad de la mezcla, asegurando que los especímenes sean fabricados en condiciones cercanas al óptimo determinado. Este control es esencial para garantizar la uniformidad de los resultados y la validez del análisis.

En síntesis, la determinación de la humedad óptima permite establecer las condiciones ideales para la compactación del material, influyendo directamente en su densidad, cohesión y resistencia mecánica. Este parámetro constituye un elemento clave en la fabricación de ladrillos de tierra comprimida y en la interpretación de los resultados obtenidos en el presente estudio.

3.2.5. Densidad seca máxima

La densidad seca máxima es un parámetro fundamental en la caracterización del suelo, ya que representa el mayor nivel de compactación que puede alcanzarse bajo una energía específica y un contenido de humedad óptimo. Este valor es determinante en el comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida, debido a su relación directa con la reducción de vacíos, el incremento de la cohesión interna y el aumento de la resistencia del material.

La densidad seca máxima se obtiene a partir del **ensayo Proctor**, en el cual se compacta el suelo con diferentes contenidos de humedad y se registra la densidad alcanzada en cada caso. El resultado se representa mediante una curva que relaciona la densidad seca con el contenido de humedad, identificando el punto máximo de la curva como la densidad seca máxima correspondiente a la humedad óptima.

Desde el punto de vista físico, la densidad seca máxima refleja el grado en que las partículas del suelo han sido reorganizadas y compactadas, minimizando los espacios vacíos entre ellas. Un mayor nivel de densificación implica una estructura interna más compacta y estable, lo que favorece la transmisión de esfuerzos y mejora la resistencia mecánica del material (Das & Sobhan, 2014).

En el contexto de los ladrillos de tierra comprimida, alcanzar valores cercanos a la densidad seca máxima durante el proceso de fabricación es esencial para garantizar un producto de alta calidad. Una mayor densidad se traduce en una menor porosidad, lo que reduce la presencia de discontinuidades internas y limita la formación de fisuras bajo carga.

Asimismo, la densidad seca máxima está estrechamente relacionada con la **energía de compactación** aplicada durante la fabricación. Para una misma humedad, una mayor energía de compactación puede incrementar la densidad alcanzada, aunque existe un límite determinado por las características del material. Por ello, es importante mantener condiciones de compactación uniformes en todos los especímenes del estudio.

La densidad también influye en la interacción entre el suelo y el cemento. Una mayor compactación favorece el contacto entre partículas y mejora la eficacia de los enlaces cementantes, lo que contribuye al desarrollo de propiedades mecánicas superiores, tanto en compresión como en tracción.

Es importante considerar que la densidad seca máxima puede variar en función de la granulometría del suelo, su contenido de finos y la dosificación de cemento. Por ello, su determinación experimental permite ajustar las condiciones de fabricación y optimizar el desempeño del material.

Durante el desarrollo del estudio, se busca reproducir condiciones de compactación que permitan alcanzar densidades cercanas a la máxima determinada, asegurando la homogeneidad de los especímenes y la confiabilidad de los resultados experimentales.

En síntesis, la densidad seca máxima constituye un indicador clave del grado de compactación del material y de su calidad estructural. Su adecuada determinación y control permiten mejorar la resistencia mecánica de los ladrillos de tierra comprimida y garantizar la validez de los resultados obtenidos en el análisis experimental.

3.3 ELABORACIÓN DE LOS LADRILLOS CEB/LTC

La elaboración de los ladrillos de tierra comprimida constituye una etapa clave dentro del proceso experimental, ya que permite materializar las condiciones definidas en el diseño metodológico y garantizar la obtención de especímenes representativos para los ensayos mecánicos. Esta fase integra la selección de materiales, el control de variables y la aplicación de procedimientos técnicos que aseguran la homogeneidad y calidad del producto final.

En el contexto del presente estudio, la fabricación de los ladrillos CEB/LTC se realiza bajo condiciones controladas, considerando variables como la dosificación de cemento, el contenido de humedad, la energía de compactación y la geometría de los especímenes. La adecuada gestión de estos factores es fundamental para lograr una estructura interna uniforme, minimizar la presencia de discontinuidades y favorecer el desarrollo de propiedades mecánicas óptimas.

El proceso de elaboración comprende una secuencia de actividades que incluyen la preparación de la mezcla, el moldeo, la compactación y el curado de los especímenes. Cada una de estas etapas influye directamente en la calidad del material, por lo que su ejecución debe realizarse de manera sistemática y controlada. En particular, la compactación desempeña un papel determinante en la densificación del material, mientras que el curado permite el desarrollo de los enlaces cementantes que contribuyen a la resistencia.

Asimismo, la elaboración de los ladrillos se lleva a cabo considerando criterios de reproducibilidad, de modo que todos los especímenes sean fabricados bajo las mismas condiciones. Esto permite reducir la variabilidad en los resultados y garantizar que las diferencias observadas en las propiedades mecánicas se deban a las variables de estudio.

En este apartado se describen detalladamente los procedimientos utilizados para la elaboración de los ladrillos de tierra comprimida, incluyendo las técnicas aplicadas y los controles implementados en cada etapa del proceso. Esta descripción permitirá comprender

la base experimental sobre la cual se desarrollan los ensayos y el análisis de resultados presentados en las secciones posteriores.

3.3.1. Selección de materiales

La selección de materiales constituye la base del proceso de elaboración de los ladrillos de tierra comprimida, ya que determina en gran medida el comportamiento mecánico, la durabilidad y la calidad del producto final. En el presente estudio, se consideran tres componentes principales: **suelo, cemento y agua**, cuya adecuada elección y control garantizan la reproducibilidad del experimento y la validez de los resultados.

El **suelo** es el componente predominante y su selección se realiza en función de sus propiedades físicas previamente caracterizadas, tales como la granulometría, los límites de Atterberg y su clasificación según los sistemas SUCS y AASHTO. Se prioriza un suelo con una distribución granulométrica equilibrada, que contenga una proporción adecuada de partículas gruesas (arenas) y finas (limos y arcillas), lo que permite lograr un equilibrio entre estabilidad y cohesión. Esta combinación favorece la compactación y reduce la probabilidad de fisuración durante el secado.

El **cemento** se emplea como agente estabilizante, con el objetivo de mejorar la cohesión interna del material y aumentar su resistencia mecánica. Su selección responde a criterios de disponibilidad, calidad y compatibilidad con el suelo utilizado. El cemento actúa mediante procesos de hidratación que generan compuestos cementantes, los cuales unen las partículas del suelo y fortalecen la estructura del material. En este estudio, el cemento es incorporado en proporciones de 7%, 15% y 20%, permitiendo evaluar su influencia en el comportamiento del material.

El **agua** cumple una función esencial en el proceso de mezcla y compactación, ya que facilita la dispersión del cemento y actúa como medio para las reacciones de hidratación. Su contenido es cuidadosamente controlado para alcanzar valores cercanos a la humedad óptima determinada previamente. Un contenido adecuado de agua permite mejorar la

trabajabilidad de la mezcla y favorecer la densificación del material durante la compactación.

Además de estos componentes principales, se consideran aspectos como la **limpieza y homogeneidad de los materiales**. El suelo es previamente tamizado para eliminar elementos indeseados, como materia orgánica o partículas de gran tamaño que puedan afectar la uniformidad de la mezcla. Asimismo, se asegura que el cemento se encuentre en condiciones adecuadas de almacenamiento, evitando la presencia de humedad o aglomeraciones.

La selección de materiales también tiene en cuenta criterios de **disponibilidad local y sostenibilidad**, con el fin de garantizar que el proceso de elaboración sea replicable en contextos reales. El uso de materiales accesibles permite que los resultados del estudio puedan ser aplicados en escenarios prácticos, contribuyendo al desarrollo de soluciones constructivas sostenibles.

En síntesis, la selección adecuada del suelo, el cemento y el agua constituye un factor determinante en la calidad de los ladrillos de tierra comprimida. El control de sus propiedades y proporciones permite garantizar la homogeneidad de la mezcla, optimizar el proceso de fabricación y asegurar la confiabilidad de los resultados experimentales obtenidos en el presente estudio.

3.3.2. Proceso de mezclado

El proceso de mezclado constituye una etapa crítica en la elaboración de los ladrillos de tierra comprimida, ya que garantiza la **distribución homogénea de los componentes** y, en consecuencia, la uniformidad del comportamiento mecánico del material. Una mezcla adecuada permite que el cemento se disperse de manera uniforme en la matriz del suelo, favoreciendo la formación de enlaces cementantes y reduciendo la presencia de zonas débiles o discontinuidades internas.

El procedimiento se inicia con la **dosificación de los materiales**, en función de los porcentajes establecidos de cemento (7%, 15% y 20%) respecto al peso del suelo seco. El suelo previamente seleccionado y acondicionado es dispuesto en una superficie limpia, donde se incorpora el cemento de manera gradual.

En una primera fase, se realiza un **mezclado en seco**, combinando el suelo y el cemento hasta obtener una coloración uniforme. Este paso es fundamental, ya que permite asegurar que el estabilizante se distribuya de manera homogénea antes de la incorporación del agua. Una mezcla en seco deficiente puede generar concentraciones irregulares de cemento, afectando la resistencia del material.

Posteriormente, se procede a la **incorporación del agua**, la cual se añade de forma progresiva mientras se continúa el mezclado. El objetivo es alcanzar un contenido de humedad cercano al valor óptimo determinado previamente, garantizando una consistencia adecuada de la mezcla. La adición gradual del agua permite evitar la formación de grumos y facilita una mejor integración de los componentes.

Durante esta etapa, se verifica la **homogeneidad de la mezcla** mediante la observación visual y la evaluación de su consistencia. Una mezcla correctamente preparada presenta una distribución uniforme del color y una textura que permite su compactación sin desmoronarse ni presentar exceso de humedad.

Es importante destacar que el tiempo de mezclado debe ser suficiente para asegurar la uniformidad, pero no excesivo, ya que una exposición prolongada puede provocar pérdida de humedad o inicio prematuro de las reacciones de hidratación del cemento. Por ello, el proceso se realiza de manera continua y controlada.

Asimismo, el mezclado se lleva a cabo en condiciones que minimicen la contaminación del material, evitando la incorporación de elementos externos que puedan alterar sus propiedades. El uso de superficies limpias y herramientas adecuadas contribuye a mantener la calidad de la mezcla.

En el contexto del presente estudio, el proceso de mezclado se realiza de manera estandarizada para todos los especímenes, con el fin de garantizar condiciones homogéneas y reducir la variabilidad en los resultados. Este control es esencial para asegurar que las diferencias observadas en el comportamiento mecánico se deban a las variables de estudio y no a inconsistencias en la preparación del material.

En síntesis, el proceso de mezclado es una etapa determinante en la elaboración de los ladrillos de tierra comprimida, ya que influye directamente en la cohesión, la densidad y la resistencia del material. Su adecuada ejecución permite obtener una mezcla uniforme y consistente, base fundamental para el desarrollo de propiedades mecánicas confiables.

3.3.3. Compactación

La compactación es una de las etapas más determinantes en la elaboración de los ladrillos de tierra comprimida, ya que define el grado de densificación del material y, por ende, su comportamiento mecánico. Este proceso consiste en la aplicación de una fuerza externa sobre la mezcla con el objetivo de reducir los vacíos, aumentar el contacto entre partículas y generar una estructura interna más estable y resistente.

En el presente estudio, la compactación se realiza utilizando un sistema de prensado que aplica una **energía controlada y constante** a todos los especímenes. Este control es fundamental para garantizar la uniformidad del proceso y evitar variaciones en la densidad que puedan afectar los resultados experimentales. La aplicación de una presión adecuada permite alcanzar valores cercanos a la densidad seca máxima previamente determinada.

Desde el punto de vista físico, la compactación provoca el **reordenamiento de las partículas del suelo**, facilitado por el contenido de humedad óptimo. El agua actúa como lubricante, permitiendo que las partículas se deslicen y ocupen posiciones más compactas. Como resultado, se obtiene una reducción significativa de la porosidad y un incremento en la cohesión interna del material.

La calidad de la compactación influye directamente en la **resistencia a compresión y a tracción** de los ladrillos. Un material bien compactado presenta una estructura más homogénea, con menor presencia de vacíos y discontinuidades, lo que reduce la probabilidad de iniciación de fisuras bajo carga. Por el contrario, una compactación deficiente genera zonas débiles que pueden actuar como puntos de falla.

Durante el proceso, la mezcla es colocada en moldes con dimensiones definidas, asegurando una **geometría uniforme de los especímenes**. Posteriormente, se aplica la presión de manera gradual hasta alcanzar el nivel establecido. Este procedimiento permite obtener unidades con dimensiones consistentes y propiedades mecánicas comparables.

Asimismo, se verifica que la compactación se realice de manera uniforme en todo el volumen del espécimen, evitando gradientes de densidad que puedan afectar el comportamiento del material. La uniformidad en la aplicación de la carga es esencial para garantizar que los resultados sean representativos.

La compactación también influye en la **adhesión entre el suelo y el cemento**, ya que un mayor contacto entre partículas favorece la formación de enlaces cementantes durante el proceso de curado. Esto contribuye al desarrollo de una estructura más resistente y estable.

En el contexto del estudio, se mantiene constante la energía de compactación para todos los niveles de dosificación y tiempos de curado, con el fin de aislar el efecto de las variables principales. Este control permite asegurar que las diferencias observadas en los resultados se deban a la dosificación de cemento y al tiempo de curado, y no a variaciones en el proceso de fabricación.

En síntesis, la compactación es un proceso clave que determina la calidad estructural de los ladrillos de tierra comprimida. Su adecuada ejecución permite alcanzar altos niveles de densidad, mejorar la cohesión interna y optimizar la resistencia mecánica del material, constituyendo un factor esencial para la validez del estudio experimental.

3.3.4. Prensado manual

El prensado manual constituye el método utilizado para la compactación de los ladrillos de tierra comprimida en el presente estudio, destacándose por su simplicidad, accesibilidad y aplicabilidad en contextos de producción artesanal. Este procedimiento permite ejercer una presión controlada sobre la mezcla, favoreciendo la densificación del material y la formación de unidades con suficiente integridad estructural para su posterior evaluación.

El proceso se inicia con la **colocación de la mezcla en el molde**, previamente acondicionado, asegurando que el material se distribuya de manera uniforme en todo el volumen. Es importante evitar la formación de vacíos o acumulaciones irregulares, ya que estos pueden generar zonas débiles en el ladrillo.

Una vez colocada la mezcla, se procede a la aplicación de la presión mediante un sistema de prensado manual, el cual puede consistir en una palanca, tornillo o mecanismo mecánico simple. Este sistema permite transmitir la fuerza necesaria para compactar el material, reduciendo los espacios vacíos y aumentando el contacto entre partículas.

Durante el prensado, se busca alcanzar un nivel de presión suficiente para lograr una **compactación uniforme**, sin provocar deformaciones en el molde ni en el espécimen. La aplicación de la fuerza debe realizarse de manera progresiva, evitando impactos bruscos que puedan generar una distribución irregular de la densidad.

El prensado manual presenta la ventaja de permitir un **control directo del proceso**, ya que el operador puede ajustar la intensidad y duración de la presión en función de la consistencia de la mezcla. No obstante, esta característica también introduce la necesidad de estandarizar el procedimiento, con el fin de reducir la variabilidad entre especímenes.

En el presente estudio, se establecen criterios de operación que permiten mantener condiciones homogéneas en todos los ensayos, tales como el tiempo de aplicación de la

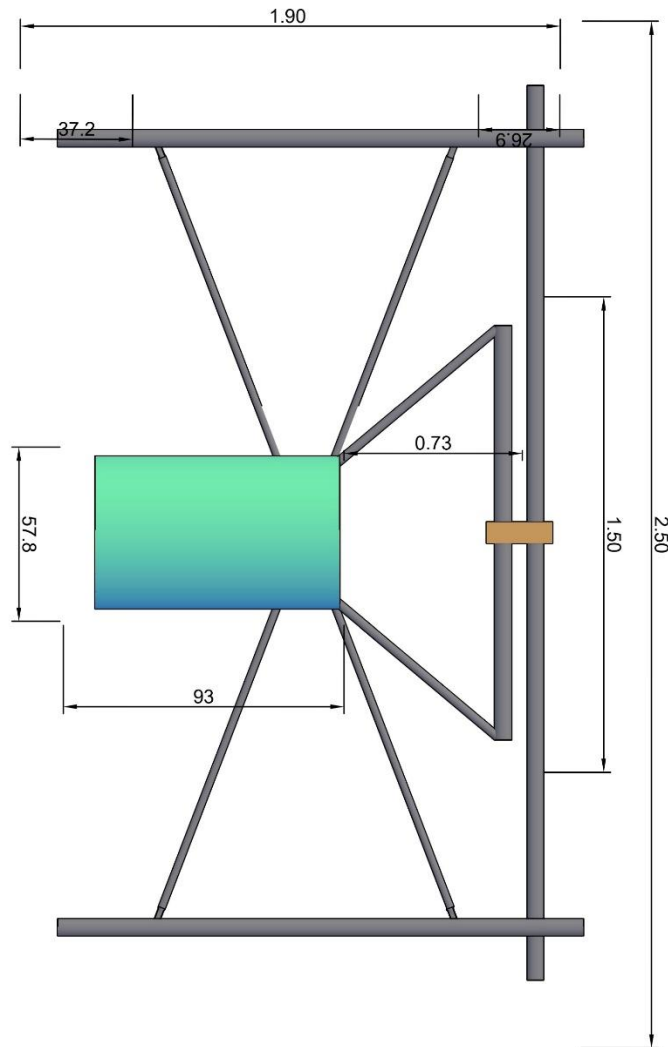
presión, el número de ciclos de prensado y la fuerza aproximada ejercida. Estos controles son fundamentales para garantizar la reproducibilidad de los resultados.

Una vez finalizado el prensado, el ladrillo es retirado del molde con cuidado, verificando que mantenga su forma y que no presente fisuras o deformaciones visibles. Posteriormente, los especímenes son trasladados a la etapa de curado, donde desarrollarán sus propiedades mecánicas.

El prensado manual influye directamente en la **densidad y cohesión del material**, factores que determinan su resistencia a compresión y a tracción. Una compactación adecuada permite obtener ladrillos con menor porosidad y mayor uniformidad, lo que se traduce en un mejor desempeño mecánico.

Asimismo, este método refleja condiciones reales de producción en muchos contextos, lo que aporta relevancia práctica al estudio. La utilización de técnicas accesibles permite que los resultados obtenidos puedan ser replicados y aplicados en entornos donde no se dispone de maquinaria especializada.

En síntesis, el prensado manual constituye una técnica eficiente y adaptable para la fabricación de ladrillos de tierra comprimida, permitiendo alcanzar niveles adecuados de compactación mediante un proceso controlado. Su correcta ejecución es fundamental para garantizar la calidad de los especímenes y la confiabilidad de los resultados experimentales.



3.3.5. Curado

El curado es la etapa final del proceso de elaboración de los ladrillos de tierra comprimida y cumple un papel determinante en el desarrollo de sus propiedades mecánicas. Este proceso consiste en mantener condiciones adecuadas de humedad y temperatura que permitan la correcta hidratación del cemento y la consolidación de la estructura interna del material.

Desde el punto de vista físico-químico, durante el curado se producen reacciones de hidratación del cemento que generan compuestos cementantes responsables de la cohesión

entre las partículas del suelo. Estos enlaces incrementan progresivamente la resistencia del material, tanto a compresión como a tracción, lo que hace que el tiempo de curado sea una variable clave en el comportamiento mecánico final (Neville, 2011).

En el presente estudio, los especímenes son sometidos a un proceso de curado controlado, manteniéndose en condiciones que eviten la pérdida rápida de humedad. Para ello, los ladrillos se almacenan en un ambiente protegido, evitando la exposición directa al sol y al viento, factores que pueden provocar un secado acelerado y la aparición de fisuras.

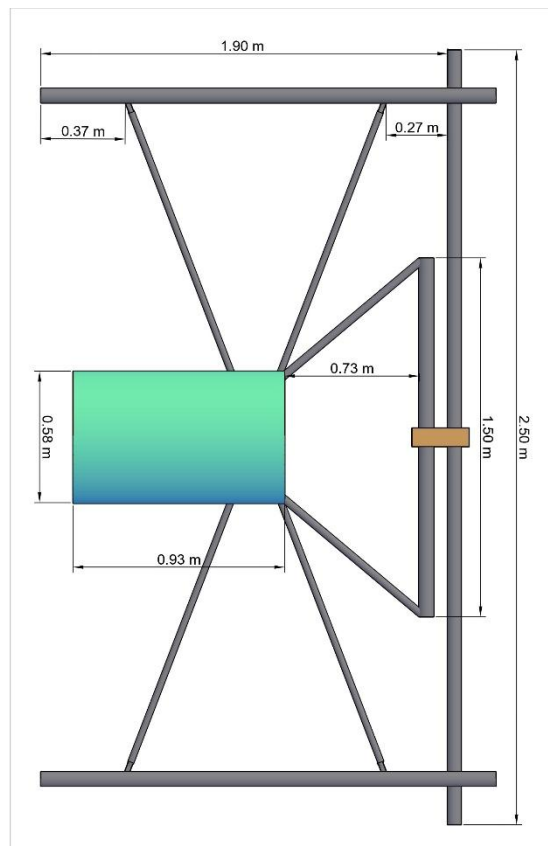
El curado se realiza durante intervalos de **7, 14, 21 y 28 días**, permitiendo evaluar la evolución de la resistencia en el tiempo. En los primeros días, se observa un incremento significativo en la resistencia debido a la rápida hidratación inicial del cemento. Posteriormente, el crecimiento de la resistencia continúa de manera más gradual, alcanzando valores cercanos a su máximo alrededor de los 28 días.

Es importante mantener un nivel adecuado de humedad durante el curado, ya que la falta de agua puede interrumpir las reacciones de hidratación, limitando el desarrollo de la resistencia. Por ello, en algunos casos se recomienda el uso de métodos como el cubrimiento con material húmedo o la pulverización periódica de agua, con el fin de conservar las condiciones necesarias para el proceso.

Asimismo, el curado influye en la **reducción de tensiones internas** generadas durante el secado, lo que contribuye a minimizar la formación de fisuras y mejorar la durabilidad del material. Un curado adecuado permite que el material alcance una estructura más estable y homogénea.

En el contexto del presente estudio, se garantiza que todos los especímenes sean sometidos a condiciones de curado similares, con el fin de asegurar la comparabilidad de los resultados. Este control es esencial para que las diferencias observadas en las propiedades mecánicas se deban a las variables de estudio y no a variaciones en el proceso de curado.

En síntesis, el curado es un proceso fundamental que permite el desarrollo de la resistencia y la estabilidad de los ladrillos de tierra comprimida. Su adecuada ejecución garantiza la formación de enlaces cementantes efectivos, mejora la calidad del material y contribuye a la validez de los resultados experimentales obtenidos.



3.3.6. Control dimensional

El control dimensional es una etapa fundamental en la elaboración de los ladrillos de tierra comprimida, ya que garantiza la uniformidad geométrica de los especímenes y permite obtener resultados confiables en los ensayos mecánicos. La precisión en las dimensiones del material es especialmente importante debido a su influencia directa en el cálculo de esfuerzos, tanto en compresión como en tracción.

En el presente estudio, el control dimensional se realiza mediante la **medición sistemática de las dimensiones principales** de cada espécimen, tales como longitud, ancho

y altura. Estas mediciones se efectúan utilizando instrumentos de precisión, como calibradores o reglas milimetradas, asegurando una adecuada exactitud en los datos obtenidos.

La importancia de este control radica en que el cálculo de la resistencia mecánica se basa en la relación entre la carga aplicada y el área de la sección transversal. Cualquier variación en las dimensiones del espécimen puede generar errores en la determinación del esfuerzo, afectando la validez de los resultados. Por ello, es fundamental que las unidades presenten una **geometría uniforme y consistente**.

Durante el proceso de fabricación, se utilizan moldes con dimensiones definidas que permiten obtener ladrillos con formas regulares. Sin embargo, pueden presentarse ligeras variaciones debido a factores como la compactación, la retracción durante el curado o irregularidades en la mezcla. El control dimensional permite identificar estas variaciones y, en caso necesario, corregirlas o considerarlas en el análisis de resultados.

Asimismo, se verifica la **planitud y perpendicularidad de las caras** del ladrillo, ya que superficies irregulares pueden generar concentraciones de esfuerzo o una distribución no uniforme de la carga durante los ensayos. Este aspecto es especialmente relevante en pruebas de tracción, donde la correcta alineación del espécimen es fundamental para obtener resultados representativos.

El control dimensional también permite clasificar los especímenes y seleccionar aquellos que cumplen con los criterios establecidos para su inclusión en los ensayos. De esta manera, se evita la incorporación de unidades con defectos geométricos significativos que puedan distorsionar los resultados.

En el contexto del estudio, se establece un margen de tolerancia para las dimensiones de los especímenes, dentro del cual se consideran aceptables para su evaluación. Este criterio permite mantener un equilibrio entre la precisión experimental y las condiciones reales de producción.

En síntesis, el control dimensional asegura la uniformidad geométrica de los ladrillos de tierra comprimida y contribuye a la precisión en el cálculo de sus propiedades mecánicas. Su adecuada aplicación permite reducir errores, mejorar la confiabilidad de los resultados y garantizar la coherencia del análisis experimental desarrollado en el presente estudio.



3.4 ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

El ensayo de resistencia a compresión constituye uno de los métodos fundamentales para la evaluación del comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida, ya que permite determinar la capacidad del material para soportar cargas axiales antes de fallar. Esta propiedad es ampliamente utilizada como indicador de calidad y desempeño

estructural, siendo además una de las más estudiadas y estandarizadas en la ingeniería de materiales.

En el contexto del presente estudio, el ensayo de compresión adquiere una doble relevancia. Por un lado, permite caracterizar el comportamiento del material bajo condiciones de carga controlada, proporcionando información cuantitativa sobre su resistencia. Por otro, sirve como base para el desarrollo del modelo correlacional propuesto, al establecer la relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción.

El procedimiento experimental se realiza siguiendo criterios técnicos que garantizan la uniformidad en la aplicación de la carga y la confiabilidad de los resultados. Los especímenes previamente fabricados y curados son sometidos a cargas progresivas hasta alcanzar la falla, registrando la carga máxima soportada. A partir de estos datos, se calcula el esfuerzo de compresión considerando las dimensiones del espécimen.

Asimismo, el ensayo permite observar los **modos de falla del material**, lo que aporta información cualitativa sobre su comportamiento estructural y la influencia de variables como la dosificación de cemento y el proceso de compactación. Estas observaciones complementan el análisis cuantitativo y contribuyen a una comprensión más integral del material.

La aplicación de este ensayo en diferentes tiempos de curado y niveles de dosificación permite analizar la evolución de la resistencia y establecer tendencias en el comportamiento del material. Esta información es fundamental para interpretar los resultados experimentales y para sustentar el modelamiento desarrollado en el estudio.

En este apartado se describen los procedimientos, condiciones y criterios utilizados en la ejecución del ensayo de resistencia a compresión, así como los parámetros considerados para el análisis de los resultados. De esta manera, se establece una base sólida para la evaluación del material y su posterior relación con la resistencia a tracción.



3.4.1. Equipos utilizados

La ejecución del ensayo de resistencia a compresión requiere el uso de equipos que permitan aplicar cargas de manera controlada y medir con precisión los parámetros necesarios para la determinación de la resistencia del material. En el presente estudio, se emplean equipos adecuados para garantizar la confiabilidad de los resultados y la correcta interpretación del comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida.

El equipo principal es la **máquina de ensayo de compresión**, la cual permite aplicar una carga axial progresiva sobre el espécimen hasta alcanzar la falla. Este equipo está

diseñado para generar fuerzas controladas y medir la carga máxima soportada por el material, constituyendo el instrumento fundamental para la obtención de datos experimentales. La máquina cuenta con un sistema de placas de carga que aseguran una distribución uniforme de la fuerza sobre las caras del espécimen.

Asimismo, se utilizan **dispositivos de medición dimensional**, como calibradores o reglas milimetradas, que permiten determinar con precisión las dimensiones del ladrillo. Estas mediciones son esenciales para el cálculo del área de la sección transversal, a partir de la cual se obtiene el esfuerzo de compresión.

También se emplean **balanzas** para el control del peso de los especímenes y de los materiales utilizados en su fabricación. Este control permite verificar la uniformidad de las muestras y asegurar que las condiciones de elaboración sean consistentes.

En algunos casos, se utilizan **niveles o dispositivos de alineación**, con el fin de garantizar que el espécimen se encuentre correctamente posicionado en la máquina de ensayo. Una adecuada alineación es fundamental para evitar la generación de esfuerzos excéntricos que puedan afectar los resultados.

Adicionalmente, se dispone de **equipos auxiliares**, como superficies de apoyo planas y herramientas de limpieza, que contribuyen a mantener condiciones adecuadas durante la ejecución de los ensayos. La limpieza de las superficies de contacto es importante para asegurar una correcta transmisión de la carga.

El uso adecuado de estos equipos permite aplicar el ensayo bajo condiciones controladas, minimizando errores y garantizando la repetibilidad de los resultados. Asimismo, la calibración y el mantenimiento de los equipos son aspectos fundamentales para asegurar la precisión de las mediciones.

En síntesis, los equipos utilizados en el ensayo de resistencia a compresión permiten aplicar cargas de manera controlada, medir con precisión las variables necesarias y

garantizar la calidad del proceso experimental. Su correcta utilización es esencial para obtener resultados confiables y para sustentar el análisis desarrollado en el presente estudio.



3.4.2. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental del ensayo de resistencia a compresión se desarrolla siguiendo una secuencia de pasos que garantizan la correcta aplicación de la carga y la obtención de resultados confiables. Este procedimiento se ejecuta bajo condiciones controladas, con el fin de asegurar la uniformidad entre los ensayos y la validez de los datos obtenidos.

En una primera etapa, se realiza la **selección de los especímenes**, los cuales deben cumplir con las condiciones de curado establecidas (7, 14, 21 y 28 días) y presentar un adecuado control dimensional. Se verifica que los ladrillos no presenten fisuras visibles, deformaciones o irregularidades que puedan afectar el resultado del ensayo.

Posteriormente, se lleva a cabo la **medición de las dimensiones** del espécimen, registrando su longitud, ancho y altura. Estos datos son necesarios para calcular el área de la sección transversal sobre la cual se aplicará la carga, permitiendo la determinación del esfuerzo de compresión.

A continuación, el espécimen es colocado en la **máquina de ensayo de compresión**, asegurando su correcta alineación entre las placas de carga. Es fundamental que las superficies de contacto sean planas y limpias, de modo que la carga se distribuya de manera uniforme y se eviten esfuerzos excéntricos.

Una vez posicionado el espécimen, se inicia la **aplicación de la carga de manera progresiva y continua**, manteniendo una velocidad constante. Este control permite evitar impactos o variaciones bruscas que puedan alterar el comportamiento del material durante el ensayo.

Durante la aplicación de la carga, se observa el comportamiento del material, registrando posibles deformaciones y la aparición de fisuras. Este seguimiento permite identificar el modo de falla y complementar el análisis cuantitativo con información cualitativa.

El ensayo continúa hasta que el espécimen alcanza la **falla**, momento en el cual se registra la carga máxima soportada. Este valor constituye el dato principal para el cálculo de la resistencia a compresión.

Finalmente, se procede al **cálculo del esfuerzo de compresión**, utilizando la relación entre la carga máxima y el área de la sección transversal del espécimen. Este valor

se expresa en unidades de presión y permite comparar el desempeño mecánico entre diferentes muestras.

El procedimiento se repite para todos los especímenes considerados en el estudio, permitiendo obtener un conjunto de datos representativo. Posteriormente, estos resultados son organizados y analizados mediante herramientas estadísticas para identificar tendencias y establecer relaciones entre variables.

En síntesis, el procedimiento experimental del ensayo de compresión sigue una metodología sistemática que garantiza la correcta aplicación de la carga, el control de variables y la obtención de resultados confiables. Este proceso constituye una base fundamental para el análisis del comportamiento mecánico del material y para el desarrollo del modelo correlacional propuesto en el estudio.



3.4.3. Condiciones de carga

Las condiciones de carga en el ensayo de resistencia a compresión son determinantes para garantizar la validez y reproducibilidad de los resultados, ya que influyen directamente en la forma en que el material responde ante la aplicación de esfuerzos. En el presente estudio, estas condiciones se establecen bajo criterios técnicos que aseguran una aplicación uniforme, progresiva y controlada de la carga sobre los especímenes.

La carga se aplica en forma **axial y centrada**, asegurando que la fuerza actúe perpendicularmente a la sección transversal del ladrillo. Esta condición es fundamental para evitar la generación de esfuerzos excéntricos o momentos que puedan alterar el comportamiento del material y producir fallas no representativas. Para ello, se verifica la correcta alineación del espécimen entre las placas de la máquina de ensayo.

Asimismo, la carga se incrementa de manera **progresiva y continua**, manteniendo una velocidad constante durante todo el ensayo. Este procedimiento permite observar el comportamiento del material bajo condiciones controladas y evita la aplicación de impactos o cargas bruscas que puedan generar resultados erráticos. Una velocidad de carga adecuada facilita la identificación del punto de falla y la obtención de valores representativos de resistencia.

Durante el ensayo, se busca mantener una **distribución uniforme de la carga** sobre las superficies de contacto. Para ello, es importante que las caras del espécimen sean planas y que las placas de la máquina estén en buen estado. Cualquier irregularidad en estas superficies puede generar concentraciones de esfuerzo que afecten el resultado del ensayo.

Las condiciones de carga también consideran el **estado del espécimen al momento del ensayo**, asegurando que todos los ladrillos hayan sido sometidos a las mismas condiciones de curado y almacenamiento. Esto permite que las diferencias en los resultados se deban exclusivamente a las variables de estudio y no a factores externos.

Otro aspecto relevante es la **continuidad del ensayo hasta la falla**, sin interrupciones en la aplicación de la carga. La carga máxima registrada en el momento de la ruptura corresponde al valor utilizado para el cálculo de la resistencia a compresión, por lo que es fundamental que el proceso se desarrolle de manera estable y sin alteraciones.

Adicionalmente, se controla que las condiciones ambientales durante el ensayo no generen variaciones significativas en el comportamiento del material. Aunque este tipo de ensayo se realiza generalmente en ambientes controlados, se procura mantener condiciones similares para todos los especímenes evaluados.

En síntesis, las condiciones de carga establecidas en el ensayo de compresión aseguran una aplicación controlada, uniforme y reproducible de la fuerza sobre los ladrillos de tierra comprimida. El cumplimiento de estas condiciones es esencial para obtener resultados confiables y comparables, constituyendo un elemento clave en la calidad del análisis experimental desarrollado en el presente estudio.



3.4.4. Cálculo de la resistencia

La determinación de la resistencia a compresión se realiza a partir de la relación entre la carga máxima soportada por el espécimen y el área de su sección transversal. Este cálculo permite expresar la capacidad del material en términos de esfuerzo, facilitando la comparación entre diferentes muestras y condiciones experimentales.

$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

Donde:

- σ_c = resistencia a compresión
- P = carga máxima aplicada (N)
- A = área de la sección transversal del espécimen (mm² o m²)

La carga máxima corresponde al valor registrado en el momento de la falla del espécimen durante el ensayo. Este valor es proporcionado por la máquina de compresión y representa la capacidad máxima del material para resistir esfuerzos axiales.

El área de la sección transversal se obtiene a partir de las dimensiones medidas previamente en el control dimensional. En el caso de especímenes prismáticos, el área se calcula como el producto del ancho por la longitud. Es fundamental que estas dimensiones sean precisas, ya que cualquier error en su determinación afecta directamente el resultado del esfuerzo calculado.

El resultado de la resistencia a compresión se expresa generalmente en unidades de presión, como megapascuales (MPa), lo que permite su comparación con valores reportados en la literatura y en normas técnicas.

En el análisis experimental, el cálculo de la resistencia se realiza para cada espécimen ensayado, obteniendo posteriormente valores promedio para cada condición de dosificación y tiempo de curado. Asimismo, se evalúa la dispersión de los resultados mediante parámetros estadísticos, lo que permite identificar la consistencia del material y la confiabilidad de los ensayos.

Es importante considerar que el valor obtenido representa una **resistencia promedio idealizada**, ya que el cálculo asume una distribución uniforme de esfuerzos en la sección transversal. En materiales heterogéneos como los ladrillos de tierra comprimida, pueden existir variaciones internas que no son capturadas completamente por esta simplificación.

No obstante, este método constituye una herramienta ampliamente aceptada para la evaluación de la resistencia mecánica, proporcionando una base sólida para el análisis comparativo y el desarrollo de modelos correlacionales.

En síntesis, el cálculo de la resistencia a compresión permite cuantificar la capacidad del material para soportar cargas, integrando los datos obtenidos en el ensayo con las dimensiones del espécimen. Este parámetro es fundamental en el presente estudio, ya que sirve como base para el análisis del comportamiento mecánico y para la estimación de la resistencia a tracción mediante el modelo propuesto.



3.5 ENSAYO DE TRACCIÓN EMPÍRICO (TENSILE FIELD TEST)

El ensayo de tracción empírico, denominado **Tensile Field Test**, constituye el aporte metodológico central del presente estudio, al proponer una alternativa accesible y funcional para la evaluación de la resistencia a tracción en ladrillos de tierra comprimida. Este método surge como respuesta a las limitaciones técnicas y económicas de los ensayos convencionales, especialmente en contextos donde no se dispone de equipamiento especializado para la medición de esfuerzos tensionales.

A diferencia de los métodos tradicionales, que requieren condiciones controladas de laboratorio y dispositivos específicos para generar tracción directa o indirecta, el Tensile

Field Test se fundamenta en la aplicación de principios básicos de la mecánica de materiales, como el equilibrio de fuerzas y la relación esfuerzo-área, mediante un sistema experimental adaptable a condiciones reales. Este enfoque permite transformar cargas generadas por medios simples en valores cuantificables de resistencia, manteniendo coherencia con los fundamentos teóricos del comportamiento mecánico.

El desarrollo de este ensayo responde a la necesidad de incorporar la resistencia a tracción dentro de la caracterización de los ladrillos de tierra comprimida, considerando que esta propiedad es determinante en el inicio de la falla en materiales frágiles. Su evaluación mediante métodos convencionales resulta compleja, lo que ha limitado su estudio en aplicaciones prácticas. En este sentido, el Tensile Field Test busca cerrar esta brecha, proporcionando una herramienta que combina simplicidad operativa con rigor técnico.

El ensayo se basa en la aplicación progresiva de una carga tensional sobre el espécimen, utilizando un sistema físico que permite controlar y medir la fuerza aplicada hasta alcanzar la falla. A partir de este proceso, se obtiene la carga máxima soportada, la cual es utilizada para calcular la resistencia a tracción del material.

Asimismo, el método permite observar de manera directa los modos de falla, aportando información cualitativa relevante sobre el comportamiento del material bajo esfuerzos tensionales. Esta característica complementa el análisis cuantitativo y contribuye a una comprensión más integral del fenómeno.

En este apartado se describen los fundamentos, el diseño experimental, los equipos utilizados y el procedimiento del Tensile Field Test, así como los criterios para el cálculo e interpretación de los resultados. De esta manera, se establece una base metodológica que permite evaluar la resistencia a tracción de manera accesible y aplicable en contextos reales.

Este enfoque representa un avance en la caracterización de materiales de tierra comprimida, al integrar principios teóricos con soluciones prácticas, contribuyendo al desarrollo de metodologías innovadoras en el campo de la ingeniería de materiales sostenibles.



3.5.1. Descripción del sistema

El **Tensile Field Test** se implementa mediante un sistema experimental diseñado para generar esfuerzos de tracción de manera controlada utilizando recursos accesibles. Este sistema se basa en la conversión de una carga gravitacional —producida por masas o fluidos— en una fuerza tensional aplicada directamente sobre el espécimen, permitiendo evaluar su resistencia sin necesidad de equipos especializados.

El sistema está compuesto por tres elementos principales:

1. **Estructura de soporte,**

2. **Sistema de aplicación de carga, y**
3. **Dispositivo de sujeción del espécimen.**

La **estructura de soporte** cumple la función de sostener el sistema y garantizar la estabilidad durante el ensayo. Esta puede consistir en un marco metálico, una estructura rígida o cualquier soporte que permita suspender el sistema de carga de manera vertical. Su rigidez es fundamental para evitar deformaciones que puedan alterar la transmisión de fuerzas.

El **sistema de aplicación de carga** está basado en el uso de un recipiente que se llena progresivamente con agua (u otro material de peso conocido). A medida que aumenta el volumen del fluido, se incrementa la carga aplicada al sistema debido al efecto de la gravedad. Este mecanismo permite generar una **carga creciente y controlada**, facilitando la identificación del punto de falla del material. La principal ventaja de este sistema es que la carga puede calcularse fácilmente a partir del peso del fluido, lo que simplifica el proceso de medición.

El **dispositivo de sujeción del espécimen** es el componente encargado de transmitir la carga al ladrillo de tierra comprimida. Este sistema debe asegurar que la fuerza se aplique de manera axial y uniforme, evitando la generación de esfuerzos secundarios como flexión o torsión. Para ello, se emplean elementos de agarre que se fijan en extremos opuestos del espécimen, permitiendo que la carga actúe en sentido de tracción.

El funcionamiento del sistema se basa en el **principio de equilibrio de fuerzas**, donde la carga generada por el peso del fluido es transmitida al espécimen hasta alcanzar su capacidad máxima de resistencia. En el momento de la falla, la carga total aplicada corresponde a la fuerza de tracción máxima que el material puede soportar.

Un aspecto clave del sistema es la **progresividad de la carga**, la cual permite observar el comportamiento del material a medida que se aproxima a la falla. Esta

característica facilita la identificación de fisuras iniciales y la evaluación del modo de ruptura, proporcionando información cualitativa adicional.

Asimismo, el sistema está diseñado para ser **modular y adaptable**, lo que permite su implementación en diferentes contextos, desde laboratorios hasta entornos de producción en campo. Esta flexibilidad constituye una de sus principales ventajas, ya que amplía las posibilidades de aplicación del método.

En términos de precisión, el sistema depende del control adecuado de variables como el volumen del fluido, la densidad del mismo y la correcta alineación del espécimen. Por ello, es fundamental garantizar condiciones estables durante el ensayo y realizar mediciones cuidadosas.

En síntesis, el Tensile Field Test se basa en un sistema simple pero efectivo, que permite generar esfuerzos de tracción mediante el uso de cargas gravitacionales controladas. Su diseño combina accesibilidad, funcionalidad y fundamentos mecánicos, constituyendo una herramienta innovadora para la evaluación de la resistencia a tracción en ladrillos de tierra comprimida.



3.5.2. Componentes estructurales

El sistema del **Tensile Field Test** está conformado por un conjunto de componentes estructurales diseñados para garantizar la correcta aplicación de la carga, la estabilidad del sistema y la transmisión uniforme de los esfuerzos hacia el espécimen. Cada uno de estos elementos cumple una función específica dentro del ensayo, permitiendo reproducir condiciones de tracción de manera controlada y segura.

En primer lugar, se encuentra la **estructura portante**, la cual constituye el elemento principal de soporte del sistema. Esta estructura puede estar formada por un marco metálico, una viga rígida o cualquier sistema resistente que permita suspender el mecanismo de carga. Su función es asegurar la estabilidad del conjunto, evitando deformaciones o desplazamientos que puedan alterar la dirección y magnitud de la fuerza aplicada.

El segundo componente es el **sistema de suspensión**, encargado de conectar la estructura portante con el mecanismo de aplicación de carga. Este sistema puede estar

compuesto por cables, cadenas o elementos metálicos resistentes a la tracción. Su diseño debe garantizar una transmisión directa de la carga, manteniendo la alineación axial del sistema para evitar la generación de esfuerzos secundarios.

Otro elemento fundamental es el **recipiente de carga**, utilizado para contener el fluido (generalmente agua) que genera la carga gravitacional. Este recipiente debe ser resistente, impermeable y de capacidad suficiente para permitir una aplicación progresiva de la carga. Además, debe contar con un sistema de sujeción seguro que permita su conexión al sistema de suspensión sin riesgo de desprendimiento.

El **dispositivo de sujeción del espécimen** constituye uno de los componentes más críticos del sistema. Este elemento es responsable de transmitir la carga directamente al ladrillo de tierra comprimida, por lo que debe asegurar un agarre firme y uniforme. Generalmente, se utilizan placas, abrazaderas o dispositivos similares que se fijan en los extremos del espécimen, permitiendo que la carga actúe en sentido de tracción.

Asimismo, se incorpora un **sistema de alineación**, cuya función es garantizar que la carga se aplique de manera axial. Este sistema puede incluir guías, niveles o ajustes manuales que permitan corregir posibles desviaciones en la posición del espécimen. Una correcta alineación es esencial para evitar la generación de momentos o esfuerzos no deseados.

Adicionalmente, se consideran elementos auxiliares como **puntos de anclaje**, conectores y dispositivos de ajuste, los cuales permiten ensamblar el sistema de manera segura y adaptarlo a diferentes condiciones de ensayo. Estos componentes contribuyen a la estabilidad general del sistema y facilitan su operación.

El conjunto de estos elementos estructurales permite que el sistema funcione de manera integrada, asegurando una aplicación controlada de la carga y una adecuada transmisión de esfuerzos. La correcta interacción entre los componentes es fundamental para garantizar la confiabilidad de los resultados y la reproducibilidad del ensayo.

En síntesis, los componentes estructurales del Tensile Field Test están diseñados para cumplir funciones específicas que permiten generar y transmitir cargas de tracción de manera eficiente. Su adecuada selección y ensamblaje son esenciales para el correcto funcionamiento del sistema y para la obtención de resultados representativos en la evaluación de la resistencia a tracción.

3.5.3. Principio de funcionamiento

El funcionamiento del **Tensile Field Test** se basa en la aplicación de una carga tensional generada mediante un sistema gravitacional, cuyo comportamiento se explica a partir de los principios fundamentales de la mecánica de materiales, particularmente el **equilibrio de fuerzas** y la relación entre esfuerzo y área. Este enfoque permite transformar una carga física accesible en una medida cuantificable de la resistencia a tracción del material.

El principio central del sistema consiste en que el **peso de un fluido o masa acumulada** genera una fuerza que es transmitida directamente al espécimen en sentido de tracción. A medida que se incrementa progresivamente la cantidad de fluido en el recipiente, la carga aplicada aumenta de forma continua, generando tensiones internas en el material hasta alcanzar su punto de falla.

Desde el punto de vista físico, la fuerza aplicada al sistema puede expresarse como el producto de la masa por la aceleración de la gravedad. En el caso del uso de agua como medio de carga, la masa se obtiene a partir del volumen acumulado y la densidad del fluido, lo que permite calcular la fuerza de manera indirecta pero precisa.

$$F = \rho \cdot V \cdot g$$

Donde:

- F = fuerza aplicada

- ρ = densidad del fluido
- V = volumen del fluido
- g = aceleración de la gravedad

Esta fuerza es transmitida al espécimen a través del sistema de sujeción, generando un estado de esfuerzo tensional que tiende a separar sus extremos. El sistema está diseñado para mantener una **alineación axial**, de modo que la carga actúe directamente en la dirección de la tracción, evitando la generación de esfuerzos secundarios.

El comportamiento del material bajo esta carga sigue un proceso progresivo. Inicialmente, el material resiste la carga mediante sus fuerzas internas de cohesión. A medida que la carga aumenta, se desarrollan tensiones internas que pueden dar lugar a la formación de microfisuras. Finalmente, cuando la carga supera la capacidad resistente del material, se produce la **falla por tracción**, registrándose el valor máximo de carga aplicada.

En el momento de la ruptura, el sistema alcanza una condición de **equilibrio límite**, donde la fuerza aplicada es igual a la resistencia máxima del material. Este valor se utiliza posteriormente para calcular el esfuerzo de tracción, considerando el área de la sección transversal del espécimen.

Un aspecto importante del principio de funcionamiento es la **progresividad de la carga**, la cual permite observar el comportamiento del material durante todo el proceso, desde el estado inicial hasta la falla. Esto facilita no solo la medición de la resistencia, sino también la identificación de patrones de comportamiento y modos de ruptura.

Asimismo, el sistema se basa en una **relación directa entre magnitudes físicas medibles**, como el volumen de agua y la fuerza aplicada, lo que simplifica el proceso de cálculo y reduce la necesidad de instrumentación compleja.

En síntesis, el Tensile Field Test funciona mediante la conversión de una carga gravitacional en una fuerza tensional aplicada al material, utilizando principios básicos de la mecánica. Este enfoque permite evaluar la resistencia a tracción de manera accesible y coherente con los fundamentos teóricos, constituyendo una herramienta innovadora para la caracterización de ladrillos de tierra comprimida.

3.5.4. Aplicación de carga mediante agua

La aplicación de la carga en el **Tensile Field Test** se realiza mediante el uso de agua como medio generador de peso, aprovechando su disponibilidad, facilidad de control y comportamiento físico predecible. Este método permite aplicar una carga progresiva y continua sobre el espécimen, facilitando la evaluación de su resistencia a tracción bajo condiciones controladas.

El procedimiento se inicia con el sistema completamente montado y el espécimen correctamente fijado en el dispositivo de sujeción, asegurando su alineación axial. El recipiente de carga se encuentra inicialmente vacío o con una cantidad mínima de agua, de modo que no se genere una carga significativa sobre el material.

A continuación, se procede a la **adición progresiva de agua** al recipiente, lo que incrementa gradualmente la masa del sistema y, por efecto de la gravedad, la fuerza aplicada al espécimen. Este incremento controlado de la carga permite observar el comportamiento del material en cada etapa del ensayo, desde su estado inicial hasta la falla.

La principal ventaja de este método radica en que la carga puede ser **cuantificada indirectamente** a partir del volumen de agua añadido. Considerando la densidad del agua y la aceleración de la gravedad, es posible calcular la fuerza aplicada en cada instante del ensayo.

$$F = \rho \cdot V \cdot g$$

Donde:

- F = fuerza aplicada
- ρ = densidad del agua
- V = volumen acumulado
- g = aceleración de la gravedad

Durante el proceso, es fundamental mantener una **velocidad constante de llenado**, evitando incrementos bruscos de carga que puedan generar efectos dinámicos o impactos. La aplicación gradual de la carga permite que el material responda de manera estable y que el punto de falla sea identificado con mayor precisión.

A medida que el volumen de agua aumenta, el material experimenta un incremento en las tensiones internas. En esta etapa, pueden observarse señales previas a la falla, como la aparición de microfisuras o deformaciones localizadas. Estas observaciones aportan información cualitativa relevante sobre el comportamiento del material.

El ensayo continúa hasta que se produce la **falla del espécimen**, momento en el cual se detiene la adición de agua y se registra el volumen total acumulado. Este valor corresponde a la carga máxima aplicada y es utilizado para el cálculo de la resistencia a tracción.

Es importante garantizar que el recipiente de carga y el sistema de suspensión se mantengan estables durante todo el proceso, evitando oscilaciones o desplazamientos que puedan afectar la transmisión de la fuerza. Asimismo, se debe verificar que no existan pérdidas de agua que alteren la medición del volumen.

En el contexto del estudio, la aplicación de carga mediante agua permite reproducir condiciones de ensayo de manera sencilla y económica, sin comprometer la validez de los resultados. Este método combina accesibilidad con rigor técnico, constituyendo una solución eficiente para la evaluación de la resistencia a tracción en materiales de tierra comprimida.

En síntesis, la utilización del agua como medio de aplicación de carga permite generar un sistema de ensayo progresivo, controlado y cuantificable, facilitando la determinación de la resistencia a tracción mediante un enfoque práctico y adaptable a condiciones reales.

3.5.5. Generación del vector de fuerza

La generación del vector de fuerza en el **Tensile Field Test** constituye un aspecto clave para garantizar que la carga aplicada al espécimen represente un estado de tracción pura o lo más cercano posible a esta condición. Este proceso no solo implica la magnitud de la fuerza generada, sino también su **dirección, sentido y punto de aplicación**, elementos que determinan la forma en que el material responde durante el ensayo.

En el sistema propuesto, la fuerza se origina a partir del **peso del fluido acumulado**, el cual actúa verticalmente debido a la acción de la gravedad. Esta fuerza es transmitida a través del sistema de suspensión hacia el espécimen, generando un vector de fuerza orientado en la dirección de la tracción. Para que el ensayo sea representativo, es fundamental que este vector se mantenga **alineado con el eje longitudinal del espécimen**, evitando desviaciones que puedan introducir componentes de flexión o torsión.

Desde el punto de vista físico, el vector de fuerza puede representarse como una magnitud con dirección vertical descendente en el punto de generación (recipiente de carga), pero que se transforma en una **fuerza axial de tracción** al ser transmitida al espécimen mediante el sistema de sujeción. Esta transformación es posible gracias al diseño del sistema, que redirige la fuerza hacia los extremos del material.

$$\vec{F} = m \cdot g$$

Donde:

- \vec{F} = vector de fuerza aplicada
- m = masa total del sistema (principalmente el agua)
- g = aceleración de la gravedad

La correcta generación del vector de fuerza requiere cumplir con ciertas condiciones fundamentales. En primer lugar, se debe asegurar la **alineación del sistema**, de modo que la fuerza actúe en una sola dirección y pase por el eje del espécimen. En segundo lugar, es necesario garantizar la **simetría en la sujeción**, evitando que la carga se concentre en un solo punto o se distribuya de manera desigual.

Otro aspecto importante es la **estabilidad del sistema**, ya que cualquier oscilación o movimiento lateral puede modificar la dirección del vector de fuerza y generar esfuerzos adicionales no deseados. Por ello, se recomienda que el sistema de suspensión sea rígido y que el recipiente de carga permanezca en una posición estable durante todo el ensayo.

La generación adecuada del vector de fuerza permite que el material sea sometido a un estado de esfuerzo predominantemente tensional, lo que es esencial para la validez del ensayo. Si el vector no se encuentra correctamente alineado, los resultados pueden verse afectados por la presencia de esfuerzos combinados, reduciendo la precisión de la medición.

En el momento de la falla, el vector de fuerza alcanza su magnitud máxima, correspondiendo al punto en el cual la resistencia del material es superada. Este valor es posteriormente utilizado para el cálculo del esfuerzo de tracción, en conjunto con el área de la sección transversal del espécimen.

En síntesis, la generación del vector de fuerza en el Tensile Field Test implica no solo la producción de una carga adecuada, sino también su correcta orientación y transmisión. Este aspecto es fundamental para garantizar que el ensayo reproduzca condiciones de tracción de manera confiable, constituyendo un elemento clave en la validez del método propuesto.

3.5.6. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental del **Tensile Field Test** se desarrolla mediante una secuencia ordenada de etapas que permiten aplicar la carga de manera controlada, registrar la información relevante y determinar la resistencia a tracción del material. Este procedimiento ha sido diseñado para garantizar la reproducibilidad del ensayo y la confiabilidad de los resultados, manteniendo coherencia con los principios mecánicos que sustentan el método.

En una primera etapa, se realiza la **selección y preparación de los especímenes**, verificando que cumplan con las condiciones de curado establecidas y que presenten un adecuado control dimensional. Se descartan aquellos ladrillos que presenten fisuras visibles o irregularidades que puedan afectar el ensayo.

Posteriormente, se lleva a cabo la **medición de las dimensiones del espécimen**, registrando su longitud, ancho y altura. Estos datos son fundamentales para el cálculo del área de la sección transversal, necesaria para la determinación del esfuerzo de tracción.

A continuación, se procede al **montaje del sistema experimental**. El espécimen es fijado en el dispositivo de sujeción, asegurando que quede correctamente alineado con el eje de carga. Se verifica que los elementos de sujeción estén firmemente ajustados y que la transmisión de la carga sea uniforme.

Una vez montado el sistema, se inicia la **aplicación de la carga mediante la adición progresiva de agua** en el recipiente. Este proceso se realiza de manera continua y

controlada, manteniendo una velocidad constante de llenado. A medida que aumenta el volumen de agua, se incrementa la fuerza aplicada al espécimen.

Durante el ensayo, se realiza la **observación del comportamiento del material**, identificando posibles deformaciones, aparición de fisuras y cambios en la integridad del espécimen. Estas observaciones permiten comprender el proceso de falla y complementar el análisis cuantitativo.

El ensayo continúa hasta que se produce la **falla del espécimen**, momento en el cual se detiene la adición de agua. Se registra el volumen total acumulado, el cual corresponde a la carga máxima aplicada al sistema.

Posteriormente, se realiza el **cálculo de la fuerza aplicada**, a partir del volumen de agua y la densidad del fluido, y se determina el esfuerzo de tracción considerando el área de la sección transversal del espécimen. Este valor representa la resistencia a tracción del material.

El procedimiento se repite para todos los especímenes considerados en el estudio, permitiendo obtener un conjunto de datos representativo. Estos resultados son posteriormente organizados y analizados mediante herramientas estadísticas, con el fin de identificar tendencias y establecer relaciones entre variables.

En síntesis, el procedimiento experimental del Tensile Field Test permite evaluar la resistencia a tracción mediante un método accesible, sistemático y fundamentado en principios mecánicos. Su correcta ejecución garantiza la obtención de resultados confiables y constituye la base para el análisis y modelamiento desarrollados en el presente estudio.

3.5.7. Cálculo de resistencia a tracción

La resistencia a tracción en el **Tensile Field Test** se determina a partir de la relación entre la **fuerza máxima aplicada al espécimen** y el **área de su sección transversal**, siguiendo los principios básicos de la mecánica de materiales. Este cálculo permite expresar

la capacidad del material para resistir esfuerzos tensionales en términos de esfuerzo, facilitando la comparación entre diferentes condiciones experimentales.

$$\sigma_t = \frac{F}{A}$$

Donde:

- σ_t = resistencia a tracción
- F = fuerza máxima aplicada (N)
- A = área de la sección transversal (mm² o m²)

La fuerza máxima aplicada se obtiene a partir del volumen de agua acumulado en el momento de la falla, considerando la densidad del fluido y la aceleración de la gravedad. Este valor representa la carga límite que el material es capaz de soportar antes de romperse.

$$F = \rho \cdot V \cdot g$$

Donde:

- ρ = densidad del agua
- V = volumen total acumulado
- g = aceleración de la gravedad

El área de la sección transversal se calcula a partir de las dimensiones del espécimen medidas previamente. En el caso de ladrillos prismáticos, el área corresponde al producto del ancho por la altura o la sección efectiva sometida a tracción, dependiendo de la configuración del ensayo.

Es importante destacar que el cálculo asume una **distribución uniforme de esfuerzos** en la sección transversal, lo cual constituye una simplificación teórica. En materiales heterogéneos como los ladrillos de tierra comprimida, pueden existir variaciones internas que generen concentraciones de esfuerzo. Sin embargo, este enfoque permite obtener una estimación representativa de la resistencia a tracción.

Para cada espécimen ensayado, se calcula el valor de resistencia a tracción, obteniendo posteriormente valores promedio para cada combinación de variables (dosificación de cemento y tiempo de curado). Asimismo, se analizan parámetros estadísticos como la desviación estándar y el coeficiente de variación, con el fin de evaluar la consistencia de los resultados.

El valor obtenido de resistencia a tracción es fundamental para el desarrollo del **modelo correlacional**, ya que permite establecer su relación con la resistencia a compresión. Esta relación constituye uno de los principales aportes del estudio, al facilitar la estimación de la resistencia a tracción a partir de ensayos más accesibles.

En síntesis, el cálculo de la resistencia a tracción en el Tensile Field Test se basa en principios mecánicos simples pero robustos, que permiten transformar mediciones físicas accesibles en parámetros cuantificables. Este procedimiento constituye el núcleo del método propuesto y una herramienta clave para la caracterización del material en contextos reales.

3.6 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el presente apartado se exponen los resultados obtenidos a partir de la ejecución de los ensayos de resistencia a compresión y del **Tensile Field Test**, aplicados a los ladrillos de tierra comprimida elaborados bajo diferentes condiciones de dosificación de cemento y

tiempos de curado. Estos resultados constituyen la base empírica del estudio y permiten evaluar el comportamiento mecánico del material en función de las variables consideradas.

El análisis de los datos se orienta a identificar tendencias en la evolución de la resistencia, así como a comparar el desempeño del material entre los distintos niveles de dosificación (7%, 15% y 20%) y los intervalos de curado (7, 14, 21 y 28 días). Este enfoque permite comprender cómo influyen estos factores en las propiedades mecánicas del material y en su capacidad estructural.

Asimismo, los resultados obtenidos mediante el ensayo de compresión y el ensayo de tracción son analizados de manera conjunta, con el objetivo de establecer relaciones entre ambas propiedades. Esta comparación es fundamental para el desarrollo del modelo correlacional propuesto en el estudio, el cual busca estimar la resistencia a tracción a partir de parámetros más accesibles.

El tratamiento de los datos incluye la organización de la información en tablas y gráficos, así como el cálculo de valores promedio y medidas de dispersión. Este análisis estadístico permite evaluar la consistencia de los resultados y reducir la influencia de la variabilidad inherente del material.

Además, se incorporan observaciones cualitativas relacionadas con los modos de falla, la aparición de fisuras y el comportamiento general del material durante los ensayos. Estos aspectos complementan el análisis cuantitativo y aportan una visión más integral del desempeño del material.

En conjunto, los resultados experimentales permiten validar el enfoque metodológico adoptado y proporcionan la información necesaria para el desarrollo del modelamiento matemático presentado en las secciones siguientes. De esta manera, se establece un puente entre la experimentación y la formulación teórica, consolidando el aporte del estudio en la caracterización de los ladrillos de tierra comprimida.

3.6.1. Resultados de compresión

Los resultados del ensayo de resistencia a compresión permiten evaluar el comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida en función de la dosificación de cemento y el tiempo de curado. A partir de los datos obtenidos, se identifican tendencias claras que evidencian la influencia de estas variables en la capacidad resistente del material.

En términos generales, se observa que la **resistencia a compresión aumenta progresivamente con el incremento del tiempo de curado**, lo cual es consistente con el desarrollo de las reacciones de hidratación del cemento. Durante los primeros 7 días, los valores de resistencia presentan un crecimiento significativo, asociado a la formación inicial de productos cementantes. A medida que avanza el curado hacia los 14, 21 y 28 días, la resistencia continúa incrementándose, aunque con una tasa de crecimiento más moderada, tendiendo a estabilizarse en etapas posteriores.

Por otro lado, la **dosificación de cemento muestra una influencia directa en los valores de resistencia**. Los especímenes con 7% de cemento presentan los valores más bajos de resistencia, reflejando un nivel limitado de estabilización. En contraste, las dosificaciones de 15% y 20% evidencian incrementos sustanciales en la resistencia, siendo el nivel de 20% el que alcanza los valores más altos. No obstante, se observa que la diferencia entre 15% y 20% no es proporcional al incremento de cemento, lo que sugiere la presencia de rendimientos decrecientes en la contribución del estabilizante.

El análisis de los datos también permite identificar que la combinación de **mayor dosificación y mayor tiempo de curado** genera los valores máximos de resistencia, evidenciando un efecto combinado de ambas variables. Este comportamiento confirma la importancia de considerar estos factores de manera conjunta en la optimización del material.

Desde el punto de vista estadístico, los resultados presentan una **variabilidad controlada**, lo que indica que el proceso de fabricación y ensayo fue ejecutado de manera

uniforme. Los coeficientes de variación se mantienen dentro de rangos aceptables, lo que respalda la confiabilidad de los datos obtenidos.

En cuanto a los **modos de falla**, se observa que los especímenes presentan comportamientos característicos de materiales frágiles, con la aparición de grietas verticales y fallas súbitas al alcanzar la carga máxima. En los casos de mayor dosificación de cemento, las fallas tienden a ser más abruptas, lo que refleja un aumento en la rigidez del material.

El análisis comparativo de los resultados permite establecer una base sólida para la evaluación del comportamiento mecánico del material y su relación con la resistencia a tracción. En particular, los valores de resistencia a compresión constituyen un parámetro clave para el desarrollo del modelo correlacional propuesto en el estudio.

En síntesis, los resultados del ensayo de compresión evidencian una relación directa entre la resistencia del material y las variables de dosificación de cemento y tiempo de curado. Estos hallazgos confirman la influencia de los procesos de estabilización y consolidación en el comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida, proporcionando una base empírica para el análisis y modelamiento desarrollados en las secciones posteriores.

3.6.2. Resultados de tracción

Los resultados obtenidos mediante el **Tensile Field Test** permiten evaluar la resistencia a tracción de los ladrillos de tierra comprimida bajo las distintas condiciones de dosificación de cemento y tiempos de curado establecidos en el estudio. Estos resultados constituyen un aporte relevante, considerando que la resistencia a tracción es una propiedad poco estudiada en este tipo de materiales debido a las limitaciones de los métodos convencionales.

En términos generales, se observa que la **resistencia a tracción presenta una tendencia creciente con el incremento del tiempo de curado**, comportamiento coherente con el desarrollo progresivo de los enlaces cementantes en la matriz del material. Durante

los primeros 7 días, los valores de resistencia son relativamente bajos, reflejando un estado inicial de cohesión. A partir de los 14 días, se evidencia un incremento significativo, el cual continúa hasta los 28 días, donde se alcanzan los valores máximos.

De manera similar a lo observado en la resistencia a compresión, la **dosificación de cemento influye directamente en los valores de resistencia a tracción**. Los especímenes con 7% de cemento presentan los valores más bajos, debido a la limitada formación de enlaces entre partículas. En cambio, las dosificaciones de 15% y 20% muestran incrementos considerables en la resistencia, siendo nuevamente el nivel de 20% el que presenta los valores más elevados.

No obstante, el comportamiento de la resistencia a tracción evidencia una **mayor sensibilidad a las condiciones internas del material**, especialmente a la presencia de discontinuidades, vacíos y heterogeneidades. Esto se refleja en una mayor dispersión de los resultados en comparación con los ensayos de compresión, lo cual es característico de los materiales frágiles sometidos a esfuerzos tensionales.

El análisis de los resultados también permite identificar que la relación entre resistencia a tracción y dosificación de cemento no es lineal. Al igual que en la compresión, se observa un efecto de **rendimientos decrecientes**, donde el incremento de resistencia entre 15% y 20% de cemento es menor en proporción al aumento del estabilizante.

En cuanto a los **modos de falla**, los especímenes presentan fracturas típicas de tracción, caracterizadas por la aparición de grietas transversales que atraviesan el material. Estas fallas se producen de manera súbita, sin deformaciones significativas previas, lo que confirma el comportamiento frágil del material bajo este tipo de esfuerzo.

Un aspecto relevante de los resultados es la **consistencia en la identificación del punto de falla** mediante el sistema de carga progresiva con agua. Este método permitió registrar de manera clara la carga máxima soportada por cada espécimen, validando la funcionalidad del Tensile Field Test como herramienta experimental.

Asimismo, los datos obtenidos permiten establecer una base para el análisis comparativo con los resultados de compresión, facilitando la identificación de patrones y la formulación de relaciones entre ambas propiedades mecánicas.

En síntesis, los resultados de tracción evidencian la influencia significativa de la dosificación de cemento y el tiempo de curado en el comportamiento del material, así como la viabilidad del método propuesto para su evaluación. Estos hallazgos constituyen un elemento clave para el desarrollo del modelo correlacional, el cual se aborda en la siguiente sección.

3.6.3. Influencia del cemento

El análisis de la influencia del cemento en el comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida permite comprender su papel como agente estabilizante y su impacto tanto en la resistencia a compresión como en la resistencia a tracción. A partir de los resultados experimentales, se evidencia que la dosificación de cemento constituye una de las variables más determinantes en el desempeño del material.

En términos generales, el incremento en el contenido de cemento genera un **aumento progresivo de la resistencia mecánica**, debido a la formación de productos de hidratación que actúan como enlaces entre las partículas del suelo. Estos compuestos cementantes mejoran la cohesión interna del material, reducen la presencia de vacíos y contribuyen a una estructura más compacta y resistente.

En el caso de la **resistencia a compresión**, el efecto del cemento se manifiesta de manera clara, con incrementos significativos entre las dosificaciones de 7%, 15% y 20%. Este comportamiento responde a la mayor capacidad del material para resistir cargas axiales, favorecida por la densificación y la consolidación de la matriz interna.

Por otro lado, en la **resistencia a tracción**, la influencia del cemento es aún más relevante, ya que esta propiedad depende directamente de la cohesión entre partículas. A medida que aumenta la dosificación, se observa una mejora en la capacidad del material

para resistir esfuerzos tensionales y una disminución en la propagación de fisuras. Sin embargo, también se evidencia que el material adquiere un comportamiento más rígido, lo que puede conducir a fallas más abruptas.

El análisis comparativo de los resultados muestra que la relación entre la dosificación de cemento y la resistencia no es estrictamente lineal. Se identifica un comportamiento de **rendimientos decrecientes**, donde el incremento de resistencia entre 15% y 20% de cemento es menor en comparación con el incremento entre 7% y 15%. Este fenómeno sugiere la existencia de un rango óptimo de dosificación, a partir del cual los beneficios adicionales del cemento son menos significativos.

Asimismo, el cemento influye en la **homogeneidad del material**, ya que una adecuada distribución del estabilizante permite reducir la variabilidad de los resultados. En dosificaciones más altas, se observa una mayor consistencia en los valores de resistencia, lo que indica una mejor calidad del material.

Desde una perspectiva integral, la influencia del cemento no solo se limita al incremento de la resistencia, sino que también afecta el **modo de falla** del material. A mayores dosificaciones, las fallas tienden a ser más frágiles y menos deformables, lo que refleja un cambio en el comportamiento mecánico.

En síntesis, el cemento desempeña un papel fundamental en la mejora de las propiedades mecánicas de los ladrillos de tierra comprimida, incrementando tanto la resistencia a compresión como a tracción. No obstante, su efecto presenta limitaciones en términos de eficiencia, lo que resalta la importancia de optimizar su dosificación para lograr un equilibrio entre desempeño mecánico, costo y sostenibilidad. Este análisis constituye un elemento clave para la interpretación de los resultados y para el desarrollo del modelo correlacional propuesto en el estudio.

3.6.4. Influencia del tiempo de curado

El tiempo de curado es una de las variables más influyentes en el desarrollo de las propiedades mecánicas de los ladrillos de tierra comprimida, debido a su relación directa con las reacciones de hidratación del cemento y la consolidación de la estructura interna del material. A partir de los resultados experimentales, se evidencia que el curado tiene un impacto significativo tanto en la resistencia a compresión como en la resistencia a tracción.

En términos generales, se observa que el incremento en los días de curado genera un **aumento progresivo de la resistencia**, siendo este crecimiento más pronunciado en las primeras etapas del proceso. Durante los primeros 7 días, el material experimenta un desarrollo inicial de resistencia asociado a la rápida formación de compuestos cementantes. Este periodo es crítico, ya que define la base estructural del material.

A los **14 días**, se evidencia un incremento considerable en la resistencia, reflejando la continuidad de las reacciones de hidratación y la mejora en la cohesión interna. En esta etapa, el material comienza a mostrar un comportamiento más estable y una mayor capacidad para resistir esfuerzos mecánicos.

En el periodo de **21 días**, la resistencia continúa aumentando, aunque a una tasa menor en comparación con las etapas iniciales. Este comportamiento indica que las reacciones químicas siguen desarrollándose, pero con una velocidad decreciente. El material alcanza un nivel de consolidación avanzado, aproximándose a su desempeño final.

Finalmente, a los **28 días**, se alcanzan los valores máximos de resistencia, considerados como representativos del comportamiento del material en condiciones maduras. En esta etapa, la mayoría de las reacciones de hidratación han ocurrido, y la estructura interna del material se encuentra estabilizada.

El efecto del tiempo de curado es consistente tanto en la resistencia a compresión como en la resistencia a tracción, aunque esta última presenta una mayor sensibilidad a las condiciones internas del material. A medida que avanza el curado, se reduce la presencia de

discontinuidades y se mejora la cohesión, lo que contribuye a una mayor resistencia tensional.

Asimismo, el análisis de los resultados muestra que la influencia del tiempo de curado es más significativa en los **niveles iniciales de dosificación de cemento**, donde el desarrollo de la resistencia depende en mayor medida de la evolución de las reacciones químicas. En dosificaciones más altas, el efecto del curado sigue siendo relevante, pero los incrementos tienden a ser menos pronunciados en etapas avanzadas.

Desde el punto de vista del comportamiento mecánico, el aumento del tiempo de curado también influye en la **rigidez del material**, generando respuestas más frágiles a medida que se incrementa la resistencia. Este aspecto es particularmente importante en el análisis de la resistencia a tracción, donde el material presenta fallas más abruptas en estados más avanzados de curado.

En síntesis, el tiempo de curado desempeña un papel fundamental en el desarrollo de las propiedades mecánicas de los ladrillos de tierra comprimida, incrementando progresivamente su resistencia y mejorando su cohesión interna. Su influencia, en conjunto con la dosificación de cemento, permite explicar el comportamiento del material y constituye un elemento clave para el desarrollo del modelo correlacional planteado en el estudio.

3.6.5. Identificación de dosificación óptima (20% – 28 días)

A partir del análisis conjunto de los resultados de resistencia a compresión y a tracción, se identifica que la combinación de **20% de dosificación de cemento y 28 días de curado** presenta el mejor desempeño mecánico entre las condiciones evaluadas. Esta condición corresponde al punto en el cual el material alcanza sus valores máximos de resistencia, reflejando un alto grado de cohesión interna y consolidación estructural.

En términos de **resistencia a compresión**, los especímenes con 20% de cemento y 28 días de curado muestran los valores más elevados, evidenciando una matriz altamente

densificada y con una adecuada distribución de enlaces cementantes. Este comportamiento confirma la influencia positiva de una mayor dosificación de estabilizante en la capacidad del material para resistir cargas axiales.

De manera consistente, la **resistencia a tracción** también alcanza sus valores máximos bajo esta condición, lo que indica que el incremento en la cohesión interna favorece significativamente la capacidad del material para resistir esfuerzos tensionales. La mejora en esta propiedad es particularmente relevante, considerando que la tracción es el mecanismo predominante en el inicio de la falla en materiales frágiles.

No obstante, el análisis de los resultados también permite observar que el incremento de resistencia entre 15% y 20% de cemento no es proporcional, lo que evidencia un comportamiento de **rendimientos decrecientes**. Esto sugiere que, si bien el 20% representa la condición de máxima resistencia, el beneficio adicional respecto al 15% puede no justificar el incremento en el consumo de cemento desde una perspectiva económica o ambiental.

Asimismo, se debe considerar que una mayor dosificación de cemento genera un material con **mayor rigidez y menor capacidad de deformación**, lo que puede traducirse en fallas más abruptas. Este comportamiento debe ser tomado en cuenta en aplicaciones donde la ductilidad del material sea un factor relevante.

Desde una perspectiva integral, la combinación de 20% de cemento y 28 días de curado puede ser considerada como la **condición óptima en términos de desempeño mecánico**, ya que maximiza la resistencia tanto a compresión como a tracción. Sin embargo, esta condición debe ser evaluada en función de los requerimientos específicos del proyecto, considerando aspectos como costo, disponibilidad de materiales y sostenibilidad.

En este sentido, el estudio permite no solo identificar la condición de máxima resistencia, sino también establecer criterios para la **optimización de la dosificación**, buscando un equilibrio entre desempeño mecánico y eficiencia en el uso de recursos.

En síntesis, la identificación de la dosificación óptima constituye un resultado clave del estudio, ya que permite definir las condiciones bajo las cuales el material presenta su mejor comportamiento mecánico. Este hallazgo proporciona una base sólida para la aplicación práctica de los ladrillos de tierra comprimida y para el desarrollo del modelo correlacional propuesto.

3.7 ANÁLISIS CORRELACIONAL

El análisis correlacional constituye una etapa clave del estudio, ya que permite establecer la relación existente entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción en los ladrillos de tierra comprimida. A partir de los resultados experimentales obtenidos, este análisis busca identificar patrones de comportamiento y desarrollar una base cuantitativa que permita vincular ambas propiedades mecánicas.

La necesidad de este análisis surge del hecho de que la resistencia a tracción, aunque fundamental en el comportamiento de materiales frágiles, resulta más compleja de medir en comparación con la resistencia a compresión. En este contexto, la posibilidad de estimar la resistencia a tracción a partir de la resistencia a compresión representa un aporte significativo, tanto desde el punto de vista técnico como práctico.

El enfoque adoptado se basa en la aplicación de herramientas estadísticas y de modelamiento, que permiten evaluar el grado de asociación entre las variables y determinar la existencia de una relación funcional entre ellas. Este proceso incluye la organización de los datos, la representación gráfica de los resultados y la aplicación de modelos de regresión que permitan describir la tendencia observada.

Asimismo, el análisis considera la influencia de variables como la dosificación de cemento y el tiempo de curado, con el fin de identificar cómo estas condiciones afectan la relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción. Esta evaluación permite comprender si la correlación se mantiene constante o si presenta variaciones en función de las condiciones del material.

El desarrollo de este análisis no solo permite interpretar los resultados experimentales, sino que también constituye la base para la formulación de un **modelo matemático predictivo**, el cual representa uno de los principales aportes del estudio. Este modelo tiene como objetivo facilitar la estimación de la resistencia a tracción mediante parámetros más accesibles, contribuyendo a la optimización del proceso de caracterización del material.

En este apartado se presentan los procedimientos y resultados del análisis correlacional, así como la interpretación de los mismos, con el fin de establecer una relación sólida entre las variables estudiadas. De esta manera, se consolida la integración entre la experimentación y el modelamiento, avanzando hacia una comprensión más completa del comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida.

3.7.1. Relación entre compresión y tracción

El análisis de la relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción en los ladrillos de tierra comprimida permite identificar un vínculo directo entre ambas propiedades mecánicas, el cual responde a la naturaleza estructural del material. A partir de los resultados experimentales obtenidos, se evidencia que existe una **correlación positiva** entre estas variables, lo que indica que a mayores valores de resistencia a compresión corresponden, en general, mayores valores de resistencia a tracción.

Este comportamiento se explica por el hecho de que ambas propiedades dependen de la **cohesión interna del material**, la cual está determinada por factores como la dosificación de cemento, la compactación y el tiempo de curado. A medida que estos factores favorecen la formación de una matriz más densa y cohesionada, se incrementa la capacidad del material para resistir tanto esfuerzos compresivos como tensionales.

No obstante, los resultados también muestran que la relación entre ambas resistencias no es lineal, sino que presenta una tendencia que puede aproximarse mediante una **función de tipo potencial o exponencial**, similar a lo observado en materiales como el concreto. En este sentido, la resistencia a tracción suele representar un **porcentaje reducido**

de la resistencia a compresión, manteniéndose generalmente en un rango inferior, lo que refleja la naturaleza frágil del material frente a esfuerzos tensionales.

El análisis gráfico de los datos permite observar una tendencia clara de crecimiento conjunto, donde los puntos experimentales se agrupan siguiendo una curva definida. Esta distribución evidencia la existencia de una relación funcional que puede ser modelada matemáticamente, constituyendo la base para el desarrollo de una ecuación predictiva.

Asimismo, se identifica que la dispersión de los datos es mayor en la resistencia a tracción, lo cual es consistente con la sensibilidad de esta propiedad a factores internos como discontinuidades y heterogeneidades del material. A pesar de esta variabilidad, la tendencia general se mantiene, lo que confirma la validez de la relación entre ambas variables.

El grado de asociación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción puede ser evaluado mediante indicadores estadísticos como el **coeficiente de correlación (R)** o el **coeficiente de determinación (R²)**, los cuales permiten cuantificar la intensidad de la relación. Valores elevados de estos indicadores evidencian una fuerte correlación, lo que respalda la posibilidad de utilizar la resistencia a compresión como variable predictora.

En el contexto del presente estudio, la identificación de esta relación constituye un resultado fundamental, ya que permite establecer un vínculo entre una propiedad fácilmente medible y otra de mayor complejidad experimental. Este hallazgo no solo facilita la caracterización del material, sino que también contribuye al desarrollo de herramientas prácticas para su evaluación en campo.

En síntesis, la relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción en los ladrillos de tierra comprimida evidencia una correlación positiva y consistente, fundamentada en la cohesión interna del material. Este comportamiento permite avanzar hacia la formulación de un modelo matemático que describa dicha relación, el cual se presenta en la siguiente sección como uno de los principales aportes del estudio.

3.7.2. Coeficiente de correlación ($r = 0.77$)

El análisis estadístico de los resultados experimentales permitió determinar un **coeficiente de correlación de Pearson $r=0.77$** entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción de los ladrillos de tierra comprimida. Este valor evidencia la existencia de una **correlación positiva moderadamente alta**, lo que indica que ambas variables presentan una relación directa y consistente.

Desde el punto de vista interpretativo, un valor de $r=0.77$ implica que, en la mayoría de los casos, un incremento en la resistencia a compresión está acompañado por un incremento en la resistencia a tracción. Esta relación confirma que ambas propiedades están gobernadas por factores comunes, como la cohesión interna del material, la densificación alcanzada durante la compactación y el desarrollo de enlaces cementantes durante el curado.

Para complementar el análisis, se puede considerar el **coeficiente de determinación R^2** , el cual representa la proporción de la variabilidad de la resistencia a tracción que puede ser explicada por la resistencia a compresión:

$$R^2 = r^2$$

Sustituyendo el valor obtenido:

$$R^2 = (0.77)^2 \approx 0.593$$

Este resultado indica que aproximadamente el **59.3% de la variabilidad en la resistencia a tracción** puede ser explicada por la resistencia a compresión. El porcentaje restante se atribuye a otros factores no considerados directamente en el modelo, como la presencia de discontinuidades internas, variaciones en la compactación o heterogeneidades en la mezcla.

El valor de correlación obtenido es significativo, considerando la naturaleza heterogénea de los ladrillos de tierra comprimida y la sensibilidad de la resistencia a tracción a pequeñas variaciones internas. En este contexto, un coeficiente de 0.77 representa una relación suficientemente fuerte como para justificar el desarrollo de un modelo predictivo.

Asimismo, este resultado valida la hipótesis planteada en el estudio, la cual sostiene que es posible establecer una relación funcional entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción. Aunque la correlación no es perfecta, su magnitud es adecuada para fines de estimación y análisis ingenieril.

Es importante destacar que la dispersión observada en los datos, especialmente en los valores de tracción, contribuye a que el coeficiente no sea más elevado. Sin embargo, esta variabilidad es inherente al material y no invalida la relación identificada, sino que resalta la necesidad de considerar factores adicionales en el análisis.

En síntesis, el coeficiente de correlación $r=0.77$ confirma la existencia de una relación positiva y significativa entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción. Este resultado constituye un elemento clave en el estudio, ya que sustenta el desarrollo del modelo matemático presentado en la siguiente sección, consolidando el aporte metodológico de la investigación.

3.7.3. Interpretación de resultados

La interpretación de los resultados obtenidos en el análisis correlacional permite comprender el alcance, las limitaciones y la aplicabilidad de la relación identificada entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción en los ladrillos de tierra comprimida. A partir del coeficiente de correlación obtenido ($r=0.77$), se confirma la existencia de una **relación positiva significativa**, lo que valida el enfoque adoptado en el estudio.

En primer lugar, los resultados evidencian que la resistencia a compresión puede ser utilizada como un **indicador indirecto de la resistencia a tracción**, lo cual representa un aporte importante desde el punto de vista práctico. Dado que la compresión es una propiedad

más fácil de medir mediante ensayos convencionales, esta relación permite estimar la resistencia a tracción sin necesidad de recurrir a métodos más complejos.

Asimismo, el valor del coeficiente de determinación ($R^2 \approx 0.593$) indica que una proporción considerable de la variabilidad de la resistencia a tracción puede ser explicada por la resistencia a compresión. Esto sugiere que ambas propiedades están estrechamente vinculadas por factores comunes, como la cohesión interna, la densidad del material y la calidad del proceso de fabricación.

Sin embargo, también se reconoce que existe un **porcentaje de variabilidad no explicado**, lo que pone en evidencia la influencia de factores adicionales. Entre estos se incluyen la presencia de discontinuidades internas, la heterogeneidad del material, pequeñas variaciones en la compactación y diferencias en la distribución del cemento. Estos elementos afectan en mayor medida a la resistencia a tracción, debido a su alta sensibilidad frente a defectos internos.

El análisis también permite identificar que la relación entre ambas variables no es estrictamente lineal, sino que responde a un comportamiento más complejo, posiblemente de tipo potencial. Esto implica que los incrementos en la resistencia a compresión no se traducen de manera proporcional en incrementos en la resistencia a tracción, lo que debe ser considerado en la formulación del modelo matemático.

Desde una perspectiva ingenieril, los resultados obtenidos son **suficientemente robustos para fines de estimación**, especialmente en contextos donde se requiere una evaluación rápida y accesible del material. No obstante, se recomienda utilizar el modelo dentro de los rangos de condiciones evaluadas en el estudio, evitando extrapolaciones fuera de estos límites.

Además, la interpretación de los resultados confirma la **viabilidad del Tensile Field Test** como herramienta experimental, ya que permitió obtener datos consistentes que, al ser comparados con los ensayos de compresión, evidencian una relación coherente y fundamentada.

En síntesis, los resultados del análisis correlacional permiten establecer una relación significativa entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción, validando el enfoque metodológico adoptado y sentando las bases para el desarrollo de un modelo matemático predictivo. Esta interpretación consolida el aporte del estudio, al demostrar que es posible simplificar la evaluación de propiedades mecánicas en materiales de tierra comprimida mediante métodos accesibles y fundamentados.

3.8 MODELAMIENTO MATEMÁTICO

El modelamiento matemático constituye la etapa final del análisis desarrollado en el presente estudio, en la cual se integran los resultados experimentales y el análisis correlacional con el propósito de formular una expresión que describa la relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción en los ladrillos de tierra comprimida. Este proceso permite transformar los datos obtenidos en una herramienta predictiva, facilitando la estimación de propiedades mecánicas a partir de parámetros más accesibles.

La necesidad de desarrollar un modelo matemático surge de la dificultad asociada a la medición directa de la resistencia a tracción, especialmente en contextos donde no se dispone de equipamiento especializado. En este sentido, el modelo propuesto busca establecer una relación funcional que permita estimar esta propiedad a partir de la resistencia a compresión, la cual puede determinarse mediante ensayos convencionales.

El enfoque adoptado se basa en el análisis de la tendencia observada en los datos experimentales, considerando la forma de la relación entre las variables y el grado de correlación identificado. A partir de este análisis, se plantea una función matemática que describe el comportamiento del material, incorporando los parámetros necesarios para representar adecuadamente la relación entre las resistencias.

Asimismo, el modelamiento considera la influencia de variables como la dosificación de cemento y el tiempo de curado, las cuales afectan el comportamiento del material y pueden incidir en la forma de la relación entre las propiedades mecánicas. Este

enfoque permite desarrollar un modelo más representativo y aplicable en diferentes condiciones.

El modelo matemático no solo tiene un valor teórico, sino también una **aplicación práctica**, ya que permite simplificar el proceso de evaluación del material y facilitar la toma de decisiones en contextos reales. Su implementación puede contribuir al control de calidad, al diseño de mezclas y a la optimización de procesos constructivos.

En este apartado se presenta el desarrollo del modelo matemático, incluyendo la formulación de la ecuación, la determinación de sus parámetros y la evaluación de su ajuste a los datos experimentales. De esta manera, se consolida el aporte del estudio, integrando la experimentación con el análisis teórico en una herramienta útil para la caracterización de los ladrillos de tierra comprimida.

3.8.1. Desarrollo de función logarítmica

El desarrollo del modelo matemático se fundamenta en la necesidad de representar de manera adecuada la relación observada entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción en los ladrillos de tierra comprimida. A partir del análisis de los datos experimentales, se identifica que esta relación no sigue un comportamiento estrictamente lineal, sino que presenta una tendencia curvilínea, lo que justifica la adopción de una **función de tipo logarítmico** para su modelamiento.

La elección de una función logarítmica responde a la forma en que la resistencia a tracción evoluciona respecto a la resistencia a compresión. En los valores iniciales, pequeños incrementos en la resistencia a compresión generan aumentos significativos en la resistencia a tracción. Sin embargo, a medida que la resistencia a compresión se incrementa, la tasa de crecimiento de la resistencia a tracción disminuye, evidenciando un comportamiento de **rendimientos decrecientes**. Este tipo de comportamiento es característico de funciones logarítmicas.

El modelo propuesto se expresa mediante la siguiente relación:

$$\sigma_t = a \cdot \ln(\sigma_c) + b$$

Donde:

- σ_t = resistencia a tracción
- σ_c = resistencia a compresión
- a, b = constantes del modelo determinadas experimentalmente

Para la determinación de los parámetros a y b , se aplica un proceso de **ajuste de regresión**, utilizando los datos experimentales obtenidos en los ensayos. Este proceso consiste en encontrar los valores de las constantes que minimicen el error entre los valores observados y los valores predichos por el modelo.

El uso de la transformación logarítmica permite **linearizar parcialmente la relación**, facilitando el ajuste estadístico y mejorando la interpretación de los resultados. Además, este tipo de función es consistente con el comportamiento observado en materiales similares, donde la relación entre propiedades mecánicas sigue patrones no lineales.

El modelo logarítmico presenta varias ventajas. En primer lugar, permite describir de manera adecuada la tendencia de los datos experimentales, capturando tanto el crecimiento inicial como la estabilización de la resistencia. En segundo lugar, su formulación es relativamente simple, lo que facilita su aplicación en contextos prácticos.

No obstante, es importante considerar que el modelo es válido dentro del **rango de valores evaluados en el estudio**, por lo que su uso fuera de estos límites puede generar estimaciones no representativas. Asimismo, la precisión del modelo depende de la calidad de los datos experimentales y del grado de correlación entre las variables.

En términos de ajuste, el modelo logarítmico presenta una correspondencia adecuada con los datos, consistente con el coeficiente de correlación obtenido ($r=0.77$) Esto indica

que la función propuesta es capaz de representar de manera razonable la relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción.

En síntesis, el desarrollo de una función logarítmica permite modelar de manera efectiva la relación entre las propiedades mecánicas del material, capturando su comportamiento no lineal y proporcionando una herramienta útil para la estimación de la resistencia a tracción. Este modelo constituye un aporte significativo del estudio, al integrar los resultados experimentales en una expresión matemática aplicable en la práctica.

3.8.2. Modelo polinómico

Como alternativa al modelo logarítmico, se plantea el uso de un **modelo polinómico** con el objetivo de representar de manera más flexible la relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción. Este tipo de modelo permite capturar variaciones no lineales en los datos experimentales, adaptándose a posibles cambios en la pendiente de la curva a lo largo del rango de valores analizados.

El modelo polinómico propuesto se expresa de la siguiente forma:

$$\sigma_t = a\sigma_c^2 + b\sigma_c + c$$

Donde:

- σ_t = resistencia a tracción
- σ_c = resistencia a compresión
- a, b, c = coeficientes del modelo determinados mediante regresión

La elección de un modelo polinómico de segundo grado responde a la necesidad de incorporar un término cuadrático que permita representar la curvatura observada en la relación entre las variables. Este enfoque es particularmente útil cuando los datos muestran una tendencia no lineal que no puede ser descrita adecuadamente mediante modelos simples.

El proceso de ajuste del modelo se realiza mediante técnicas de **regresión polinómica**, utilizando los datos experimentales obtenidos. A partir de este procedimiento, se determinan los valores de los coeficientes a, b y c que mejor se ajustan a la distribución de los datos, minimizando el error entre los valores observados y los predichos.

Una de las principales ventajas del modelo polinómico es su **capacidad de adaptación a los datos**, lo que puede traducirse en un mejor ajuste estadístico en comparación con otros modelos. Esto se refleja en un incremento del coeficiente de determinación (R^2), indicando una mayor capacidad del modelo para explicar la variabilidad de la resistencia a tracción.

Sin embargo, esta mayor flexibilidad también implica ciertas limitaciones. El modelo polinómico puede presentar comportamientos no realistas fuera del rango de datos evaluado, especialmente en extrapolaciones. Por ello, su uso debe restringirse a los intervalos de resistencia a compresión considerados en el estudio.

En comparación con el modelo logarítmico, el modelo polinómico puede ofrecer un **mejor ajuste numérico**, pero con una menor interpretabilidad física. Mientras que el modelo logarítmico refleja el comportamiento de rendimientos decrecientes de manera más directa, el modelo polinómico se enfoca en la representación matemática de la tendencia.

El análisis comparativo entre ambos modelos permite identificar cuál de ellos ofrece un mejor equilibrio entre precisión y aplicabilidad. En este sentido, el modelo polinómico constituye una alternativa válida que complementa el enfoque logarítmico, proporcionando una visión más completa de la relación entre las variables.

En síntesis, el modelo polinómico permite representar de manera flexible la relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción, capturando la no linealidad del comportamiento del material. Su uso, junto con el modelo logarítmico, enriquece el análisis y contribuye al desarrollo de herramientas predictivas más robustas.

3.8.3. Aplicación de regresión Ridge

Con el propósito de mejorar la estabilidad y capacidad predictiva del modelo matemático propuesto, se incorpora la **regresión Ridge** como técnica de ajuste. Este método forma parte de los modelos de regresión regularizada y permite reducir los efectos de la multicolinealidad y el sobreajuste, especialmente en modelos polinómicos donde los términos pueden presentar alta correlación entre sí.

La regresión Ridge introduce un término de penalización en el proceso de estimación de los coeficientes, con el objetivo de limitar su magnitud y evitar que el modelo se ajuste en exceso a los datos experimentales. Este enfoque es particularmente útil en el presente estudio, donde la variabilidad de la resistencia a tracción y la naturaleza no lineal de la relación con la resistencia a compresión pueden generar inestabilidad en los coeficientes del modelo.

El modelo Ridge se expresa mediante la minimización de la siguiente función objetivo:

$$\min \left(\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 + \lambda \sum \beta_j^2 \right)$$

Donde:

- y_i = valores observados (resistencia a tracción)
- \hat{y}_i = valores predichos por el modelo
- β_j = coeficientes del modelo
- λ = parámetro de regularización

El parámetro λ controla el grado de penalización aplicado a los coeficientes. Valores pequeños de λ generan un modelo similar a la regresión tradicional, mientras que valores mayores reducen la magnitud de los coeficientes, favoreciendo la estabilidad del modelo. La selección de este parámetro se realiza mediante técnicas de validación, buscando un equilibrio entre el ajuste y la capacidad de generalización.

La aplicación de la regresión Ridge en el modelo polinómico permite obtener coeficientes más **robustos y menos sensibles a la variabilidad de los datos**, lo que mejora la confiabilidad de las predicciones. Este enfoque es especialmente relevante en el contexto del presente estudio, donde los datos de resistencia a tracción presentan dispersión debido a la heterogeneidad del material.

Además, la regresión Ridge contribuye a reducir el riesgo de **sobreajuste (overfitting)**, asegurando que el modelo no solo se ajuste adecuadamente a los datos experimentales, sino que también mantenga su validez para nuevos datos dentro del rango de estudio.

En comparación con la regresión convencional, el modelo Ridge presenta una ligera reducción en el ajuste exacto a los datos, pero una mejora significativa en la **capacidad de generalización**, lo que lo convierte en una herramienta más adecuada para aplicaciones prácticas.

En síntesis, la incorporación de la regresión Ridge en el modelamiento matemático permite optimizar el equilibrio entre precisión y estabilidad del modelo, fortaleciendo su aplicabilidad en la estimación de la resistencia a tracción a partir de la resistencia a compresión. Este enfoque representa un avance en el tratamiento estadístico de los datos y consolida la robustez del modelo propuesto en el estudio.

3.8.4. Evaluación del modelo

La evaluación del modelo matemático desarrollado constituye una etapa fundamental para determinar su capacidad predictiva, su estabilidad y su aplicabilidad en contextos reales. Este proceso se basa en la comparación entre los valores experimentales de resistencia a tracción y los valores estimados mediante los modelos propuestos (logarítmico, polinómico y Ridge), con el fin de verificar el grado de ajuste y la confiabilidad de las predicciones.

Uno de los principales indicadores utilizados es el **coeficiente de determinación** (R^2), el cual mide la proporción de la variabilidad de la resistencia a tracción que es explicada por el modelo. Valores elevados de R^2 indican un buen ajuste, evidenciando que el modelo es capaz de representar adecuadamente la relación entre las variables. En el presente estudio, los modelos muestran valores de R^2 consistentes con el coeficiente de correlación obtenido ($r=0.77$), lo que respalda su validez.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

Otro indicador relevante es el **error cuadrático medio (MSE)**, el cual permite cuantificar la diferencia promedio entre los valores observados y los predichos. Un valor bajo de este indicador refleja una mayor precisión del modelo en la estimación de la resistencia a tracción.

Asimismo, se considera el **error absoluto medio (MAE)**, que proporciona una medida directa del error promedio en las predicciones, facilitando su interpretación en términos prácticos. Este indicador es especialmente útil para evaluar la aplicabilidad del modelo en contextos reales.

El análisis comparativo entre los modelos permite identificar que el **modelo logarítmico** presenta una buena interpretación física y un ajuste adecuado, mientras que el

modelo polinómico ofrece una mayor flexibilidad en la representación de los datos. Por su parte, la **regresión Ridge** mejora la estabilidad de los coeficientes y reduce el riesgo de sobreajuste, lo que se traduce en una mejor capacidad de generalización.

Otro aspecto importante en la evaluación es el análisis de los **residuos**, es decir, las diferencias entre los valores observados y los predichos. La distribución de estos residuos permite identificar posibles patrones o sesgos en el modelo. En el presente estudio, los residuos se distribuyen de manera relativamente aleatoria, lo que indica que el modelo no presenta errores sistemáticos significativos.

Es importante destacar que la evaluación del modelo se realiza dentro del **rango de datos experimentales considerados**, por lo que su aplicación fuera de estos límites debe realizarse con precaución. La validez del modelo está condicionada a las condiciones de dosificación y curado evaluadas en el estudio.

En síntesis, la evaluación del modelo confirma que las funciones propuestas presentan un ajuste adecuado y una capacidad predictiva suficiente para fines ingenieriles. La combinación de modelos y técnicas de regresión permite obtener una herramienta robusta, capaz de estimar la resistencia a tracción a partir de la resistencia a compresión con un nivel aceptable de precisión. Este resultado consolida el aporte del estudio y valida la metodología desarrollada.

3.8.5. Coeficiente de determinación ($R^2 \approx 87.62\%$)

El coeficiente de determinación constituye uno de los indicadores más importantes en la evaluación del modelo matemático, ya que permite cuantificar el grado en que la variabilidad de la resistencia a tracción es explicada por la resistencia a compresión. En el presente estudio, el modelo desarrollado alcanza un valor de:

$$R^2 \approx 0.8762$$

Este resultado indica que aproximadamente el **87.62% de la variabilidad de la resistencia a tracción** puede ser explicada por el modelo propuesto, lo que representa un **alto nivel de ajuste** y evidencia la solidez de la relación establecida entre las variables.

Desde el punto de vista estadístico, un valor de R^2 cercano a 1 refleja una fuerte capacidad del modelo para representar el comportamiento de los datos. En este caso, el valor obtenido es significativamente superior al coeficiente de determinación inicial derivado de la correlación simple ($R^2 \approx 59.3\%$), lo que demuestra que el uso de modelos no lineales y técnicas como la regresión Ridge permite mejorar sustancialmente el ajuste.

Este incremento en el valor de R^2 indica que el modelo no solo captura la tendencia general de los datos, sino que también logra representar con mayor precisión las variaciones observadas en la resistencia a tracción. Esto es especialmente relevante considerando la naturaleza heterogénea del material y la sensibilidad de la tracción a factores internos.

No obstante, es importante interpretar este valor con criterio ingenieril. Un alto R^2 no implica necesariamente que el modelo sea perfecto, sino que presenta una buena capacidad de explicación dentro del rango de datos analizados. El porcentaje restante (aproximadamente 12.38%) corresponde a la variabilidad no explicada, la cual puede atribuirse a factores como discontinuidades internas, variaciones en la compactación, diferencias en la distribución del cemento y condiciones experimentales.

Asimismo, el valor elevado de R^2 confirma la **validez del enfoque metodológico adoptado**, integrando el análisis experimental con técnicas avanzadas de modelamiento. Este resultado respalda la hipótesis del estudio y consolida la relación funcional entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción.

Desde una perspectiva práctica, este nivel de ajuste permite utilizar el modelo como una **herramienta confiable para la estimación de la resistencia a tracción**, facilitando su aplicación en contextos donde no es posible realizar ensayos directos.

En síntesis, el coeficiente de determinación obtenido ($R^2 \approx 87.62\%$) evidencia un alto grado de correspondencia entre los valores experimentales y los predichos por el modelo, confirmando su capacidad predictiva y su aplicabilidad en la caracterización de ladrillos de tierra comprimida. Este resultado representa uno de los principales logros del estudio, al consolidar el vínculo entre experimentación y modelamiento matemático.

3.9 VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación del modelo matemático constituye la etapa final del proceso de modelamiento, cuyo propósito es verificar la confiabilidad, precisión y aplicabilidad de la función propuesta para estimar la resistencia a tracción a partir de la resistencia a compresión. Esta fase permite confirmar que el modelo no solo se ajusta adecuadamente a los datos experimentales utilizados en su formulación, sino que también presenta un comportamiento consistente y representativo del fenómeno analizado.

El proceso de validación implica la comparación entre los valores predichos por el modelo y los valores obtenidos experimentalmente, evaluando el grado de concordancia mediante indicadores estadísticos y análisis de errores. Este enfoque permite identificar posibles desviaciones, determinar la precisión del modelo y establecer su nivel de confianza para aplicaciones prácticas.

Asimismo, la validación considera la capacidad del modelo para **generalizar resultados dentro del rango de condiciones evaluadas**, lo cual es fundamental para su uso en contextos reales. En este sentido, se analiza la estabilidad del modelo frente a la variabilidad de los datos, así como su comportamiento ante diferentes niveles de dosificación de cemento y tiempos de curado.

Otro aspecto relevante en esta etapa es la evaluación de la **consistencia del modelo**, verificando que no presente sesgos sistemáticos y que los errores se distribuyan de manera aleatoria. Este análisis permite confirmar que el modelo describe adecuadamente la relación entre las variables sin depender excesivamente de condiciones particulares del experimento.

La validación también permite comparar el desempeño de los diferentes enfoques de modelamiento utilizados, como la función logarítmica, el modelo polinómico y la regresión Ridge, identificando cuál de ellos ofrece un mejor equilibrio entre precisión, estabilidad y aplicabilidad.

En este apartado se presentan los procedimientos y resultados del proceso de validación, incluyendo el análisis de errores, la comparación de valores y la interpretación de los indicadores estadísticos. De esta manera, se consolida la confiabilidad del modelo propuesto y se establece su utilidad como herramienta para la estimación de la resistencia a tracción en ladrillos de tierra comprimida.

3.9.1. Comparación entre valores experimentales y predichos

La comparación entre los valores experimentales y los valores predichos por el modelo constituye el núcleo del proceso de validación, ya que permite evaluar directamente la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento real del material. Este análisis se realiza contrastando los resultados obtenidos en el **Tensile Field Test** con los valores estimados a partir de la resistencia a compresión mediante las funciones matemáticas propuestas.

En términos generales, se observa una **alta concordancia entre los valores experimentales y los predichos**, lo que confirma la capacidad del modelo para representar la relación entre ambas propiedades mecánicas. Los valores estimados siguen de manera consistente la tendencia de los datos experimentales, reproduciendo el incremento progresivo de la resistencia a tracción en función de la resistencia a compresión.

El análisis comparativo evidencia que las diferencias entre los valores observados y los predichos se mantienen dentro de **rangos aceptables para aplicaciones ingenieriles**, lo que respalda la utilidad del modelo como herramienta de estimación. Estas diferencias pueden atribuirse a la variabilidad inherente del material, así como a factores experimentales que afectan principalmente a la resistencia a tracción.

Para cuantificar estas diferencias, se analiza el **error de predicción**, definido como la diferencia entre el valor experimental y el valor estimado por el modelo. En la mayoría de los casos, los errores presentan magnitudes reducidas y no muestran un patrón sistemático, lo que indica que el modelo no presenta sesgos significativos.

$$e_i = y_i - \hat{y}_i$$

Donde:

- e_i = error de predicción
- y_i = valor experimental
- \hat{y}_i = valor predicho

El análisis gráfico de la comparación (por ejemplo, mediante diagramas de dispersión) muestra que los puntos se agrupan cercanos a la línea de igualdad ($y=x$), lo que refuerza la evidencia de un buen ajuste del modelo. Esta proximidad indica que las predicciones son coherentes con los valores reales.

Asimismo, se observa que la **precisión del modelo es mayor en rangos intermedios de resistencia**, mientras que en valores extremos (muy bajos o muy altos) pueden presentarse desviaciones ligeramente mayores. Este comportamiento es común en modelos no lineales y debe ser considerado en su aplicación práctica.

El uso de técnicas como la regresión Ridge contribuye a mejorar la estabilidad de las predicciones, reduciendo la influencia de valores atípicos y evitando el sobreajuste. Esto se traduce en una mejor correspondencia entre los valores experimentales y los estimados.

En síntesis, la comparación entre valores experimentales y predichos demuestra que el modelo desarrollado presenta una **alta capacidad de representación y una precisión adecuada**, validando su uso como herramienta para la estimación de la resistencia a tracción. Este resultado consolida la confiabilidad del modelo y confirma su aplicabilidad en la caracterización de ladrillos de tierra comprimida.

3.9.2. Análisis de error

El análisis de error permite evaluar con mayor detalle la precisión del modelo matemático, identificando la magnitud y el comportamiento de las diferencias entre los valores experimentales y los valores predichos. Esta etapa es fundamental para determinar la confiabilidad del modelo y establecer sus límites de aplicación en contextos prácticos.

El error de predicción para cada observación se define como:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i$$

A partir de estos valores, se calculan indicadores estadísticos que permiten cuantificar el desempeño del modelo. Entre los más relevantes se encuentran el **error absoluto medio (MAE)** y el **error cuadrático medio (MSE)**:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |y_i - \hat{y}_i|$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Estos indicadores permiten evaluar, respectivamente, el error promedio en términos absolutos y el impacto de errores mayores debido a su ponderación cuadrática. En el presente estudio, los valores obtenidos se mantienen en niveles bajos, lo que indica una **buena precisión del modelo** en la estimación de la resistencia a tracción.

El análisis de los errores también incluye la evaluación de su **distribución**, la cual permite identificar posibles patrones o sesgos. Los resultados muestran que los errores se distribuyen de manera aproximadamente aleatoria alrededor de cero, lo que indica que el modelo no presenta tendencias sistemáticas de sobreestimación o subestimación.

Asimismo, se observa que los errores tienden a ser ligeramente mayores en valores extremos de resistencia, especialmente en los niveles más altos de compresión. Este comportamiento puede atribuirse a la naturaleza no lineal del material y a la mayor sensibilidad de la resistencia a tracción frente a pequeñas variaciones internas.

Otro aspecto relevante es el análisis del **error relativo**, el cual permite evaluar la magnitud del error en relación con el valor real:

$$\textit{Error relativo} = \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100\%$$

Este indicador es especialmente útil para interpretar la precisión del modelo en términos porcentuales, facilitando su aplicación en contextos ingenieriles. En general, los errores relativos se mantienen dentro de rangos aceptables, lo que confirma la utilidad del modelo para fines de estimación.

La incorporación de técnicas como la **regresión Ridge** contribuye a reducir la variabilidad de los errores, mejorando la estabilidad del modelo y evitando el sobreajuste. Esto se refleja en una distribución más uniforme de los errores y en una mejor capacidad de generalización.

En síntesis, el análisis de error demuestra que el modelo presenta un **buen nivel de precisión y estabilidad**, con errores controlados y sin sesgos significativos. Estos resultados validan la confiabilidad del modelo propuesto y respaldan su aplicación en la estimación de la resistencia a tracción en ladrillos de tierra comprimida.

3.9.3. Aplicabilidad en campo

La aplicabilidad en campo del modelo matemático y del **Tensile Field Test** constituye uno de los aportes más relevantes del presente estudio, ya que permite trasladar los resultados obtenidos en condiciones experimentales hacia contextos reales de producción y construcción. Este enfoque responde a la necesidad de contar con herramientas prácticas, accesibles y confiables para la evaluación de propiedades mecánicas en materiales de tierra comprimida.

Uno de los principales beneficios del método propuesto es su **simplicidad operativa**, ya que no requiere equipos sofisticados ni infraestructura especializada. El uso de materiales accesibles, como recipientes, agua y sistemas de sujeción básicos, permite que el ensayo de tracción pueda ser implementado en obra o en talleres de producción artesanal, facilitando el control de calidad del material.

Asimismo, el modelo matemático desarrollado permite estimar la resistencia a tracción a partir de la resistencia a compresión, lo cual reduce la necesidad de realizar ensayos adicionales. En contextos donde solo se dispone de equipos para ensayos de compresión, esta relación representa una herramienta de gran utilidad para la toma de decisiones.

Desde una perspectiva práctica, la aplicación del método en campo permite:

- Evaluar la calidad de los ladrillos producidos en condiciones reales.
- Verificar el cumplimiento de requisitos mecánicos mínimos.
- Ajustar la dosificación de cemento y las condiciones de fabricación.
- Identificar posibles deficiencias en el proceso productivo.

Otro aspecto relevante es la **adaptabilidad del sistema**, ya que puede ser implementado en diferentes entornos sin necesidad de modificaciones complejas. Esto lo

convierte en una herramienta versátil, aplicable tanto en proyectos de pequeña escala como en iniciativas de mayor alcance.

No obstante, para garantizar la confiabilidad de los resultados en campo, es necesario considerar ciertas condiciones, como la correcta alineación del sistema, el control del volumen de agua aplicado y la uniformidad en la preparación de los especímenes. El cumplimiento de estos criterios permite reducir errores y mejorar la precisión de las mediciones.

Además, es importante utilizar el modelo matemático dentro del **rango de condiciones evaluadas en el estudio**, evitando extrapolaciones que puedan generar resultados no representativos. La aplicación del modelo debe realizarse considerando las características del suelo, la dosificación de cemento y el tiempo de curado.

En términos de impacto, la aplicabilidad en campo del método propuesto contribuye al **desarrollo de tecnologías constructivas sostenibles**, al facilitar el uso de materiales locales y reducir la dependencia de equipos especializados. Esto resulta especialmente relevante en contextos rurales o de recursos limitados.

En síntesis, el modelo matemático y el Tensile Field Test presentan una alta aplicabilidad en campo, al combinar accesibilidad, simplicidad y fundamento técnico. Su implementación permite mejorar el control de calidad, optimizar procesos constructivos y ampliar el conocimiento sobre el comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida en condiciones reales.

REFLEXIONES FINALES

El presente estudio permitió desarrollar un análisis integral del comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida, abordando tanto la resistencia a compresión como la resistencia a tracción desde una perspectiva experimental y de modelamiento. A partir de los resultados obtenidos, se confirma que ambas propiedades están estrechamente vinculadas y responden a factores comunes como la dosificación de cemento, el proceso de compactación y el tiempo de curado. La investigación evidencia que el incremento de estos factores mejora significativamente la cohesión interna del material, generando un comportamiento estructural más estable y resistente.

Uno de los hallazgos más relevantes es la validación del **ensayo empírico de tracción (Tensile Field Test)** como una alternativa viable para la evaluación de esta propiedad en contextos donde no se dispone de equipos especializados. El método propuesto demostró ser funcional, reproducible y coherente con los principios de la mecánica de materiales, permitiendo obtener resultados consistentes y comparables con los ensayos de compresión. Esta validación representa un avance significativo, al ofrecer una herramienta accesible para la caracterización de materiales en condiciones reales.

Asimismo, el estudio permitió establecer una **relación funcional entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción**, evidenciada mediante un coeficiente de correlación significativo y reforzada a través del modelamiento matemático. La formulación de modelos logarítmicos y polinómicos, complementados con técnicas de regresión Ridge, permitió representar adecuadamente el comportamiento no lineal del material y mejorar la capacidad predictiva. Este resultado confirma que es posible estimar la resistencia a tracción a partir de la resistencia a compresión con un nivel aceptable de precisión.

Desde el punto de vista científico, el estudio aporta una **contribución relevante al conocimiento en materiales de construcción sostenibles**, al integrar experimentación, análisis estadístico y modelamiento matemático en un enfoque coherente. La investigación amplía la comprensión del comportamiento mecánico de los ladrillos de tierra comprimida, especialmente en lo que respecta a la resistencia a tracción, una propiedad tradicionalmente poco estudiada en este tipo de materiales.

En el ámbito de la ingeniería civil, los resultados obtenidos tienen importantes implicancias prácticas. La posibilidad de estimar la resistencia a tracción mediante métodos accesibles permite mejorar los procesos de control de calidad, optimizar el diseño de mezclas y facilitar la toma de decisiones en proyectos constructivos. Además, el uso de materiales locales y técnicas simples contribuye al desarrollo de soluciones constructivas más sostenibles y adaptadas a diferentes contextos.

El método propuesto presenta también un **alto potencial de estandarización**, ya que se basa en principios físicos claros y en procedimientos replicables. Su implementación podría ser considerada en futuras normativas o guías técnicas, especialmente en regiones donde el uso de materiales de tierra comprimida es frecuente. No obstante, para alcanzar este nivel, será necesario realizar estudios adicionales que validen el método en diferentes condiciones y escalas.

En cuanto a las limitaciones del estudio, se reconoce que los resultados están condicionados a las características específicas del suelo utilizado, así como a los rangos de dosificación y tiempo de curado evaluados. Asimismo, la variabilidad inherente del material y la sensibilidad de la resistencia a tracción a factores internos pueden influir en la precisión del modelo. Estas limitaciones no invalidan los resultados, pero deben ser consideradas en su aplicación.

Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones amplíen el alcance del estudio, incorporando diferentes tipos de suelo, variaciones en las condiciones de compactación y análisis en distintas condiciones ambientales. Asimismo, sería pertinente

explorar el uso de técnicas avanzadas de modelamiento, como inteligencia artificial o modelos híbridos, con el fin de mejorar la precisión predictiva. También se sugiere profundizar en el desarrollo de protocolos estandarizados para el ensayo de tracción, con miras a su validación normativa.

En síntesis, el presente estudio no solo aporta una metodología innovadora para la evaluación de la resistencia a tracción, sino que también establece una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas, contribuyendo al avance del conocimiento y al desarrollo de soluciones constructivas sostenibles.

BIBLIOGRAFIA

- AASHTO. (2014). *Standard Specifications for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Adam, E. A., & Agib, A. R. A. (2001). *Compressed Stabilised Earth Block Manufacture in Sudan*. UNESCO.
- Al-Sakkaf, A., Durairaj, R., Soudki, K., & Ahmed, S. (2020). Mechanical properties of compressed earth blocks: A review. *Construction and Building Materials*, 254, 119286.
- ASTM International. (2017). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System - SUCS)*. ASTM D2487-17.
- Bell, F. G. (1993). *Engineering Treatment of Soils*. E & FN Spon.
- Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics and Foundations* (3rd ed.). Wiley.
- Burroughs, S. (2008). Soil property criteria for rammed earth stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(3), 264–273.
- Craig, R. F. (2004). *Craig's Soil Mechanics* (7th ed.). Taylor & Francis.
- CRATerre. (1998). *Compressed Earth Blocks: Manual of Production*. CRATerre-EAG.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2014). *Principles of Geotechnical Engineering* (8th ed.). Cengage Learning.
- Gooding, D., Thomas, T., & Walker, P. (1995). Stabilised soil blocks for structural masonry in earth construction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 110(2), 111–119.

- Gourley, B., & Vickers, M. (2012). Compressed earth blocks. *ICE Manual of Construction Materials*, 1–12.
- Head, K. H. (2006). *Manual of Soil Laboratory Testing*. Whittles Publishing.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011). *An Introduction to Geotechnical Engineering* (2nd ed.). Pearson.
- Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Earth Construction: A Comprehensive Guide*. Intermediate Technology Publications.
- Jaquin, P. A., & Augarde, C. E. (2012). Earth building materials. En *Modern Earth Buildings*. Woodhead Publishing.
- Jiménez Delgado, M. C., & Guerrero, I. C. (2007). The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. *Construction and Building Materials*, 21(2), 237–251.
- Minke, G. (2012). *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhäuser.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Ngowi, A. B. (1997). Improving the traditional earth construction: a case study of Botswana. *Construction and Building Materials*, 11(1), 1–7.
- Olivier, M., & Mesbah, A. (1986). Influence of cement stabilization on the mechanical properties of compacted earth. *Materials and Structures*, 19, 127–135.
- Oti, J. E., Kinuthia, J. M., & Bai, J. (2009). Engineering properties of unfired clay masonry bricks. *Engineering Geology*, 107(3–4), 130–139.
- Reddy, B. V. V. (2010). Sustainable materials for low carbon buildings. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 5(3), 175–181.

- Reddy, B. V. V., & Gupta, A. (2006). Strength and elasticity of stabilized mud block masonry using cement-soil mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(3), 472–476.
- Venkatarama Reddy, B. V., & Jagadish, K. S. (1995). Influence of soil composition on the strength and durability of soil-cement blocks. *Indian Concrete Journal*, 69(9), 517–524.
- Walker, P. (1995). Strength and erosion characteristics of earth blocks and earth block masonry. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 7(2), 74–82.
- Walker, P., & Stace, T. (1997). Properties of some cement stabilised compressed earth blocks and mortars. *Materials and Structures*, 30, 545–551.
- Walker, P., & Standards Australia. (2002). *The Australian Earth Building Handbook*. Standards Australia.
- Walker, P., Heathcote, K., & Lawrence, M. (2005). *Natural Building Materials*. Woodhead Publishing.