

**APROVECHAMIENTO DE MATERIALES PRODUCTO DE LA DEMOLICIÓN DE UNA
VIVIENDA DE ADOBE
CASO DE ESTUDIO VIVIENDA UBICADA EN YOTOCO VALLE DEL CAUCA
-TRABAJO DE GRADO-**

Natalia Ordoñez Muñoz

Directora:
Sandra Liliana Cano Moya, PhD.

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Programa de ingeniería civil - 3747
Grupo de Investigación Aplicada en Construcción (GRUA)
Santiago de Cali
2026

NOTA DE ACEPTACIÓN:

El presente trabajo fue aprobado por el director del programa académico, los jurados y la directora de investigación.

CARLOS A. MADERA SIERRA, PhD.

Director del Programa Académico de Ingeniería Civil.

SANDRA LILIANA CANO MOYA, PhD.

Directora de la investigación.

Jurado

Jurado

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por poner en mi camino seres maravillosos que me acompañaron en este recorrido. A mi madre, Nohora Muñoz, por ser el pilar que sostiene cada parte de mi vida; por guiarme siempre con sus manos suaves y su sonrisa cálida; por enseñarme e inculcarme el valor del conocimiento. Este es un homenaje especial para quien dejó de lado parte de su propia vida para brindarme la mejor de las oportunidades.

A mi padre, Marin Ordoñez, le agradezco por cada consejo que me impulsó a enfrentar los retos con valentía. A mi hermano, Juan Carlos Ordoñez, por ser luz en los momentos de oscuridad, por levantarme en cada tropiezo y enseñarme que, al igual que en la ingeniería, todo en la vida tiene una solución.

A Andrés Guerrero, por compartir su tiempo, por su paciencia y por su apoyo constante durante este proceso de aprendizaje continuo.

A mis profesores, quienes no solo compartieron su vasto conocimiento, sino también su calidez y sus valores humanos en especial a mi profesor Carlos Alberto Manrique por su constante acompañamiento y por toda la paciencia con la que enseña. A mi profesora Sandra Liliana Cano, por ser una mujer fuerte, llena de sabiduría e inspiración que desde aquella primera clase en primer semestre fue un ejemplo a seguir.

A cada uno de mis compañeros y amigos, por ser parte esencial tanto de mi formación profesional como personal. Gracias a ustedes comprendí la importancia del trabajo en equipo y del apoyo mutuo.

Finalmente, agradezco a la Universidad del Valle, mi alma mater, y especialmente a la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, por brindarme las herramientas necesarias para mi crecimiento como persona y profesional.

RESUMEN

Esta investigación evalúa la viabilidad del aprovechamiento de los materiales provenientes del desmonte/demolición de una vivienda tradicional de adobe ubicada en el municipio de Yotoco, valle del Cauca. La finalidad es reintegrar los materiales en el ciclo de producción de bloques de tierra comprimida (BTC) partiendo de la necesidad de mitigar el impacto ambiental generado por los residuos de construcción y demolición (RCD) y la pérdida del patrimonio construido en tierra cruda debido a su falta de mantenimiento y vulnerabilidad sísmica.

La metodología implementada comprende fases iniciales de diagnóstico y caracterización físico-mecánica de los materiales originales (adobe, mortero de pega, pañete y teja), seguida por definición de productos y diseño de mezclas, teniendo la incorporación de fibras de naturales extraídas de la penca del maguey y triturado de teja, con el fin de reforzar la matriz de los bloques eliminando la necesidad de estabilizar con cemento o cal, y por último las pruebas de las nuevas unidades de mampostería, sometiénolas a ensayos de resistencia a la compresión y módulo de rotura bajo estándares normativos como las Normas Técnicas Colombianas (NTC) y la Norma Sismo Resistente (NSR-10).

Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad técnica de reutilizar la tierra y otros materiales producto del desmonte para crear productos más eficientes y con mejor desempeño. El uso de BTC sin estabilizantes químicos y con incorporación de fibras de maguey o triturado de teja representa una alternativa de bajo costo y reducida huella de carbono, adicionalmente se obtiene el incremento significativo del desempeño mecánico de las unidades.

Palabras clave: adobe, BTC, RCD, fibras naturales, teja, mampostería, bloque, sostenibilidad, economía circular, propiedades

Índice

1. PROBLEMA.....	8
1.1. GENERALIDADES	8
1.2. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	10
2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	15
3. MARCO DE REFERENCIA	15
3.1. Antecedentes.....	15
3.1.1. El adobe como material de construcción tradicional	15
3.1.2. Residuos producto de la demolición	15
3.1.3. Caracterización de los materiales	16
3.1.4. Reutilización de materiales en tierra en nuevas construcciones	16
3.1.5. Método alternativo de producción de BTC respecto al BTC tradicional estabilizado	17
3.2. Estado del arte	17
4. OBJETIVOS	24
4.1. General.....	24
4.2. Específicos.....	24
5. JUSTIFICACIÓN	25
5.1. Caracterización de materiales y viabilidad como insumos para la construcción.	25
5.2. Desarrollo de productos de construcción con materiales reutilizados.....	25
5.3. Impacto social, económico y ambiental.	26
5.4. Contribución al sector educativo	26
5.5. Alineación a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	27
6. METODOLOGÍA	27
6.1. Estructura de desglose de trabajo	27
6.1.1. Estudios y diagnóstico.....	27
6.1.2. Diseño de productos de construcción.....	37
7. RESULTADOS.....	46

7.1. Propiedades del suelo	46
7.2. Límites de Atterberg	47
7.3. Clasificación del suelo	48
7.4. Absorción de agua	49
7.5. Resistencia a compresión.....	50
7.6. Módulo de rotura	57
8. CONCLUSIONES	62
9. REFERENCIAS.....	63
10. ANEXOS.....	66

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Censo nacional de viviendas ocupadas 2018. Fuente: DANE	9
Ilustración 2. Censo nacional de viviendas ocupadas 2018. Fuente: DANE	9
Ilustración 3. Zona de Amenaza Sísmica del municipio de Yotoco, Valle del Cauca.	11
Ilustración 4. Caso de estudio, Yotoco Valle del Cauca.	12
Ilustración 5. Ficha guía de caracterización para sistemas constructivos en tierra cruda. [24]	16
Ilustración 6. Esquema de la metodología experimental empleada [9].....	18
Ilustración 7. Tipos de unidades de mampostería de arcilla cocida de acuerdo con la NSR-10	21
Ilustración 8. Propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural.	22
Ilustración 9. Propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural.	22
Ilustración 10. Ciclo continuo de producción del adobe [10]	26
Ilustración 11. Taller práctico Construcción con Tierra (Tapia pisada)	29
Ilustración 12. Muro tapia pisada con cimientos en piedra.....	29
Ilustración 13. Los bloques de tierra de excavación comprimida. Fuente: https://ecohabitar.org/tierra-de-excavacion-de-residuo-a-materia-prima/	30
Ilustración 14. Inspección visual en visita de campo - Caso de estudio, Yotoco.	31
Ilustración 15. Cuarteo. Fuente: NTC 1522 [18].	33
Ilustración 16. Estado de unidades de mampostería (Adobe).	37
Ilustración 17. Prueba de humedad.	39
Ilustración 18. Elaboración BTC sin aditivos con presión de compactación de 6.5 kg/cm ²	39
Ilustración 19. Tamaño nominal de la teja triturada.....	40
Ilustración 20. Fibra natural de maguey.....	41
Ilustración 21. Molde y medidas nominales de las unidades de mampostería (BTC)	42
Ilustración 22. Bloques de tierra comprimida	43
Ilustración 23. Ensayo de compresión.....	44

Ilustración 24. Ensayo de flexión.	45
Ilustración 25. Extracción de materiales para reutilizar - caso de estudio, Yotoco.	46
Ilustración 26. Clasificación de suelo. Fuente ASTM D 2487.	49
Ilustración 27. Prueba de absorción de agua. NTC 4205.	49
Ilustración 28. Adobe (muestra original) después del ensayo.	52
Ilustración 29. Bloque de fibra (BF6) después de ensayo.	54
Ilustración 30. BTC con adición de teja (BT) después del ensayo.	55
Ilustración 31. BTC con presión de compactación después del ensayo.	57
Ilustración 32. Ensayo de flexión. B2.	58
Ilustración 33. Falla de bloque B2.	59
Ilustración 34. Falla de bloque BT6.	59
Ilustración 35. Falla de bloque BF2.	60

Índice de tablas

Tabla 1. Pruebas de laboratorio para determinar propiedades físico-mecánicas según normativa vigente.	32
Tabla 2. Normativa vigente para evaluación de reutilización de materiales.	35
Tabla 3. Resultados de ensayo de granulometría.	47
Tabla 4. Resultados de límites de Atterberg.	48
Tabla 5. Prueba de absorción de agua. NTC 4205.	50
Tabla 6. Resultado de pruebas de compresión para muestras originales (ADOBE).	51
Tabla 7. Resultados de pruebas de compresión para muestras de BTC con adición de fibras naturales.	53
Tabla 8. Resultados de pruebas de compresión de muestras de BTC con adición de teja triturada (BT).	55
Tabla 9. Resultados de pruebas de compresión BTC tradicional con presión de compactación 6.5 kg/cm ² (B).	56
Tabla 10. Resultados de ensayo a flexión (módulo de rotura).	58
Tabla 11. Validación entre los resultados y normativa vigente.	61

Índice de gráficas

Gráfica 1. Ensayo de granulometría.	47
Gráfica 2. Curva de fluides límites de Atterberg.	48
Gráfica 3. Prueba de compresión de muestra original (ADOBE 1).	51
Gráfica 4. Prueba de compresión de BTC con adición de fibra natural (BF6).	53
Gráfica 5. Prueba de compresión de BTC con adición de teja triturada (BT4).	54
Gráfica 6. Prueba de compresión BTC tradicional con presión de compactación 6.5 kg/cm ² (B4).	56

1. PROBLEMA

1.1. GENERALIDADES

Desde el inicio de la humanidad, se ha presentado la necesidad de resguardarse de los diferentes factores de riesgo como lo son naturales y climáticos. En la era primitiva, estos eran refugios naturales, hechos a base de ramas y la utilización de cuevas, dada su condición de nómadas.

El método constructivo fue evolucionando a medida que el tiempo avanzaba. Surgió la necesidad de adaptarse a su entorno, al tener asentamientos permanentes. Para esto, fue necesario explorar e implementar diversos materiales que se encontraban en su medio, utilizándolos y combinándolos de tal manera que su funcionalidad fuera óptima, llegando a obtener un tipo de construcción más eficiente. [1]

En la continua evolución de la combinación de los materiales, se llegó a la utilización del sistema constructivo en tierra cruda, denominado tradicionalmente como muros en adobe. Básicamente, está formado por la unión de tierra cruda secada al sol (adobes), adheridos con barro que actúa como mortero de pega. El proceso de fabricación o moldeado de estas unidades comienza con la identificación y selección del material, después, se realiza la preparación y moldeado, por último, se tiene el curado del bloque de adobe y su posterior secado. Para esto se tiene diversos formatos con variadas composiciones granulométricas sin especificar. [2] [3]

El amplio uso de la tierra cruda como material de construcción se debe a que presenta características sostenibles con cualidades térmicas y acústicas, teniendo un bajo impacto ambiental. La construcción en adobe se ha mantenido vigente en países como Argentina, Bolivia, Colombia, Ecuador, México y Perú, convirtiéndose en patrimonio de familias y distintas comunidades étnicas. [3].

En el año 2018, se realizó en Colombia el Censo Nacional de Población y Vivienda teniendo un total de viviendas ocupadas de 13'480.729 en el territorio nacional de las cuales 720.213 que equivalen al 5.34% de las viviendas las cuales son de materiales predominantes como tapia pisada, bahareque o adobe.

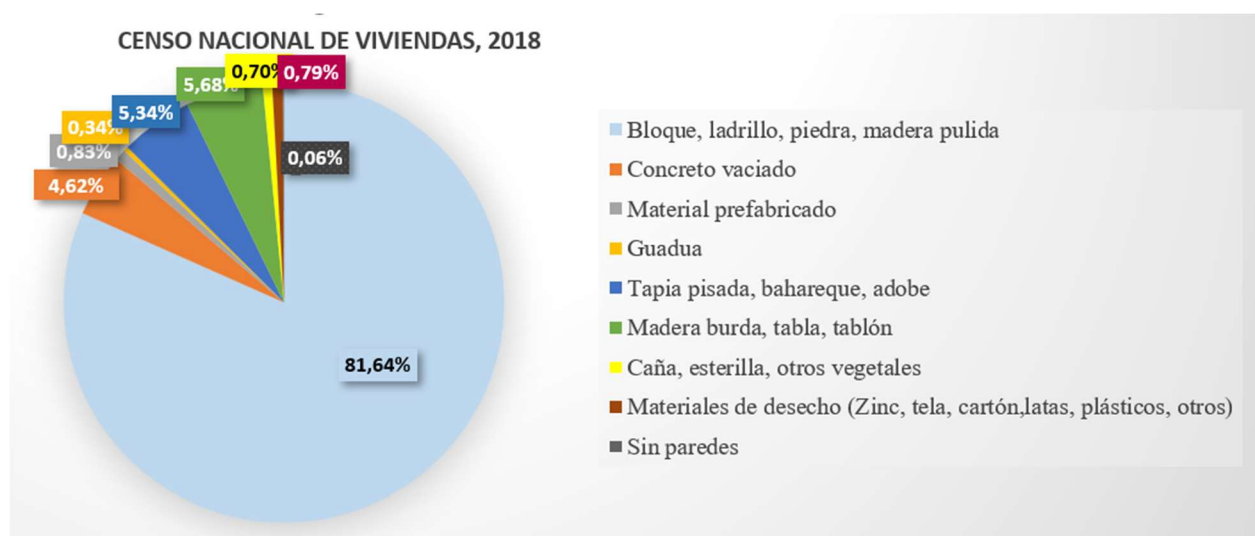


Ilustración 1. Censo nacional de viviendas ocupadas 2018. Fuente: DANE

En el departamento del Valle del Cauca, se encuentra un total de 24.724 viviendas donde el material que predomina es tapia pisada, bahareque o adobe, lo que equivale a un 2.01% del total de viviendas ocupadas en el departamento.

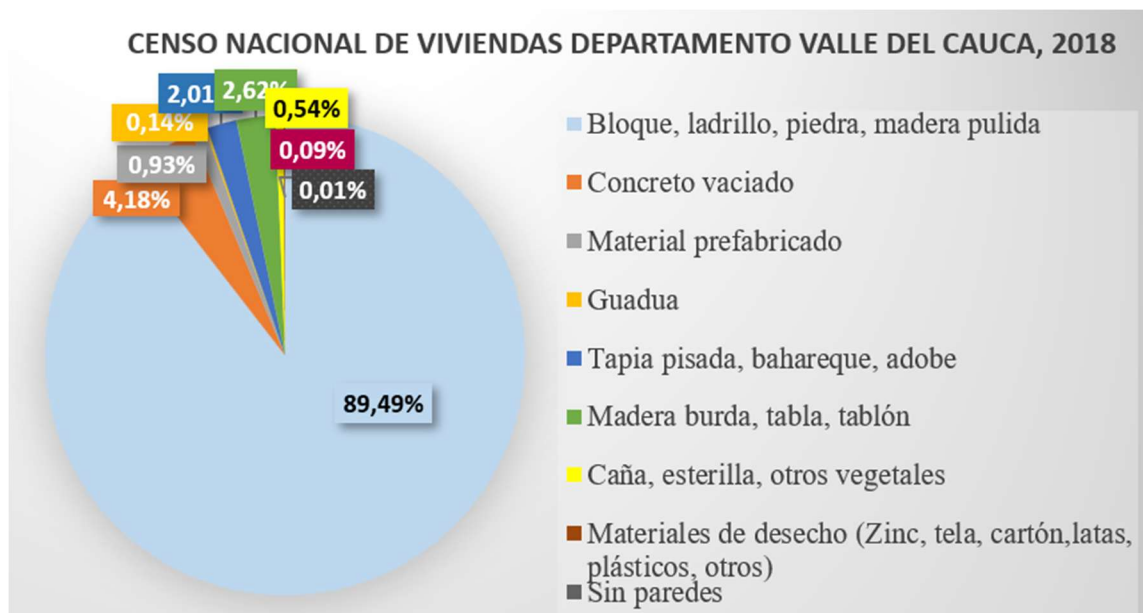


Ilustración 2. Censo nacional de viviendas ocupadas 2018. Fuente: DANE

En este orden de ideas, es evidente que la obtención de este conocimiento ha sido principalmente empírica. Por consiguiente, se han presentado diversos inconvenientes siendo el principal la durabilidad del

material, puesto que dependiendo de la composición de la mezcla y del proceso de secado al que ha sido sometido éste será susceptible al paso del tiempo.

Asimismo, existen limitaciones estructurales pues se deben usar grandes grosores para mejorar las propiedades mecánicas de la estructura.

La vulnerabilidad sísmica de las construcciones en tierra es un factor determinante ante el agrietamiento excesivo e incluso el colapso inminente de la estructura, acarreado pérdidas invaluable de vidas humanas y grandes pérdidas materiales, debido a que estas construcciones presentan baja resistencia a la compresión, mal comportamiento ante esfuerzos de flexión en los muros generando cizalladuras, desprendimientos y deslizamientos de las unidades de mampostería. La irregularidad en la distribución de la estructura, la altura de los pisos y los muros con distintos espesores hacen aún más vulnerable este tipo de construcciones puesto que cada muro se comportaría de manera diferente ante un evento sísmico [4].

También la falta de mantenimiento oportuno a la estructura debilita sus propiedades mecánicas y su estado original, disminuyendo su funcionalidad y generando un riesgo inminente para los que la habitan [5].

Así pues, el deterioro progresivo de estas edificaciones ha causado la demolición inminente de construcciones antiguas debido a que se ha perdido gran parte de sus propiedades iniciales y se opta por construir estructuras de mayor altura y resistencia, generando residuos de demolición teniendo contaminación de suelos y aguas superficiales debido a la disposición inadecuada de estos [6].

El deterioro ambiental derivado de la explotación de los recursos naturales para la construcción inicial de las edificaciones en tierra cruda produce alteraciones significativas en los ecosistemas. Además, durante el desmonte de edificaciones no se contempla la reutilización de los materiales disponibles; por el contrario, estos suelen ser desechados en lugares de acopio inadecuados, lo que incrementa aún más el impacto negativo sobre el entorno [1].

1.2. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

El municipio de Yotoco está situado en el departamento del Valle del Cauca, cuenta con numerosas viviendas construidas en adobe las cuales se encuentran en un estado de conservación adecuado. De acuerdo con el mapa de [*Zona de Amenaza Sísmica*](#) en el Geoportal del Servicio Geológico Colombiano, el municipio de Yotoco se encuentra en zona de amenaza sísmica alta lo que agrava los desafíos relacionados con la preservación y restauración de estas construcciones, adicionalmente algunos propietarios, para evitar que sus inmuebles sean declarados patrimonio cultural, optan por abandonarlos deliberadamente.

Esta práctica permite que el deterioro natural conduzca al colapso de las estructuras, facilitando el aprovechamiento del terreno para nuevas construcciones sin enfrentar repercusiones legales o patrimoniales.

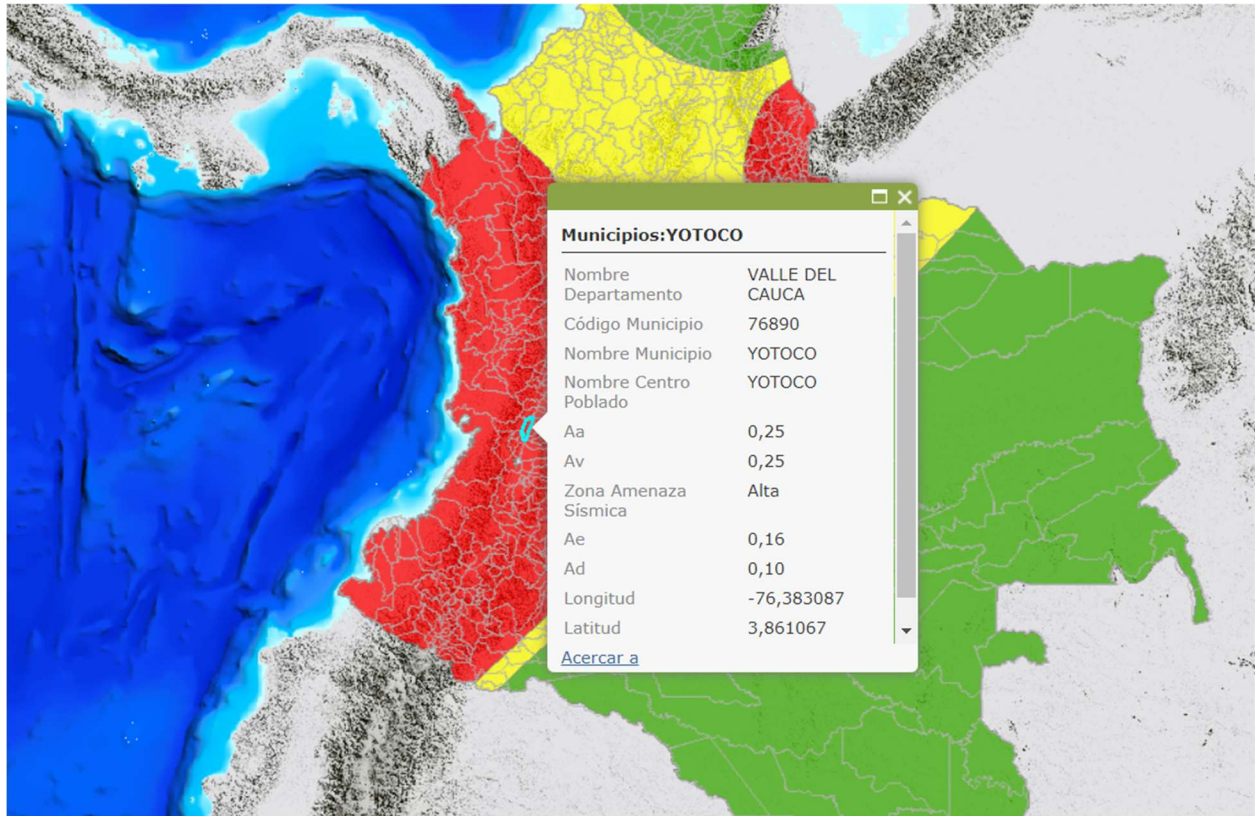


Ilustración 3. Zona de Amenaza Sísmica del municipio de Yotoco, Valle del Cauca.

Fuente: Geoportal Servicio Geológico Colombiano

Sin embargo, otras edificaciones presentan un deterioro significativo que demanda restauración, y en casos más críticos, la demolición total. Tal es el caso de estudio, correspondiendo a una vivienda cuyos muros tienen un tiempo de envejecimiento de 80 años de acuerdo con la información suministrada por los propietarios, ocasionando inicialmente la demolición parcial de los muros más afectados los cuales no tuvieron mantenimiento adecuado causando que con el paso del tiempo y con la agresividad del medio ambiente, la edificación presentase fisuras y disgregación en las unidades de adobe perdiendo sección transversal de los muros.



Ilustración 4. Caso de estudio, Yotoco Valle del Cauca.

Al tener el desmonte o demolición de la edificación en adobe tradicionales se genera un volumen significativo de residuos clasificados como RCD (Residuos de Construcción y Demolición). Ahora bien, el Artículo 2 de la Ley 1259 de 2008 *párrafo 2* establece como “Residuo sólido recuperable a todo tipo de residuo sólido al que, mediante un debido tratamiento, se le puede devolver su utilidad original u otras utilidades” [8]. En este orden de ideas se tiene principalmente materiales en tierra, entre ellos se encuentran:

Mampostería en tierra (Adobe): Los adobes son bloques de tierra cruda moldeados y secados al sol. Esta mezcla de tierra cruda se compone de la unión de un porcentaje de agregado grueso (arena) cuya función es formar estructuras internas debido a la diferente granulometría que este contiene lo que permite transmitir la carga vertical, un porcentaje de agregado fino (limos y arcillas) permitiendo la cohesión entre estos dos agregados y un porcentaje de agua que actúa como activador de la cohesión, en algunas regiones se incorpora fibras naturales con el fin de controlar la retracción de los bloques. Estas unidades de mampostería generalmente ocupan aproximadamente un 75% del volumen total de la edificación.

Mortero de pega: es un material utilizado para unir los bloques de adobe entre sí en la construcción de muros. Su composición por lo general es similar a la utilizada para la formación de los bloques de adobe. Ocupa aproximadamente un 5% del volumen total de la edificación.

Pañete: es una capa de material aplicada sobre la superficie de las paredes de adobe para suavizar y proteger la superficie. Esta mezcla se compone de un porcentaje de agregado grueso, como grava y arena, que proporciona soporte estructural interno; un porcentaje de agregado fino, que asegura la cohesión entre

los agregados; y un porcentaje de agua, que actúa como agente activador de dicha cohesión. Además, se incorpora un porcentaje de fibras naturales para controlar la retracción de los bloques de adobe. En algunas regiones, se añade una pequeña cantidad de cal a la mezcla. Este revoque representa aproximadamente el 10% del volumen total de la edificación.

Tejas: son piezas de arcilla cocida cuya función principal es la cobertura de los techos para el aislamiento de la edificación contra la radiación y lluvia directa. Son moldeadas con una mezcla de tierra y secadas “cocidas” en hornos tradicionales. Dentro del volumen total de la edificación ocupan aproximadamente un 10%.

Estos materiales representan un volumen considerable de residuos generados por el desmonte de estructuras en adobe, tal como sucede en el caso de estudio, por tanto, es necesario determinar estrategias efectivas para la restauración o la implementación de estos materiales que mediante una gestión integral permiten la construcción sostenible y la preservación del patrimonio.

Una de las principales ventajas de las edificaciones en tierra radica en la reutilización de sus materiales. A diferencia de otros métodos constructivos, donde los residuos de demolición suelen terminar en rellenos sanitarios, los materiales de tierra pueden ser clasificados y reincorporados en nuevos proyectos, contribuyendo así a la construcción sostenible y a la economía circular.

Las unidades de adobe en buen estado de conservación pueden ser reutilizadas de forma directa para la construcción de nuevas edificaciones o para la reparación de estructuras existentes. Esta reutilización minimiza la necesidad de fabricar nuevos adobes, reduciendo el consumo de recursos naturales y la generación de residuos.

En el caso de unidades de adobe en mal estado, estas pueden ser trituradas y reintegradas en el ciclo de producción de nuevos adobes. Mediante un proceso de mezclado, moldeado y secado, ya sea en hornos tradicionales o de laboratorio, la unidad se transforma en "ladrillos" de tierra, listos para ser utilizados en nuevas construcciones.

El mortero de pega, al ser triturado y mezclado con agua, puede volver a utilizarse como mortero fresco, cumpliendo con sus funciones originales de unión y adherencia en la construcción.

La teja es otro material que mediante una inspección visual y verificando su idoneidad puede ser reutilizado para reparar o construir nuevos techos. Cabe destacar que todos los materiales de tierra que surgen del desmonte o demolición de una edificación pueden ser incorporados en diversos procesos. Por ejemplo, el material triturado puede ser empleado para nivelar terrenos, creando una base sólida y compacta para futuras construcciones.

En los últimos años, se ha evidenciado una disminución significativa en la construcción de viviendas utilizando materiales en tierra, debido a la percepción generalizada de que se trata de un material con baja resistencia estructural, especialmente ante eventos sísmicos. Además, las restricciones de la Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR-10) han limitado su aplicación a edificaciones al ser empleadas solamente en muros divisorios que no tengan función portante ni contribuyan con la estabilidad de la construcción, adicionalmente las unidades de mampostería deben cumplir con requisitos de resistencia mínimas, durabilidad y protección contra la humedad.

La escasa investigación orientada a la mejora de las propiedades físico-mecánicas de los materiales en tierra ha restringido su evolución tecnológica, manteniéndose en gran medida en el ámbito de los saberes constructivos tradicionales o empíricos. Esta falta de desarrollo ha contribuido a que persista la percepción sociocultural de que las viviendas construidas con tierra están asociadas a condiciones de baja capacidad económica, lo que ha influido negativamente en su aceptación dentro de los modelos contemporáneos de desarrollo urbano y vivienda sostenible.

Así pues, uno de los procesos empleados para la reincorporación de estos materiales consiste en la fabricación de nuevas unidades de mampostería en tierra cruda (adobe), mediante la pulverización y reprocesamiento de elementos deteriorados. No obstante, resulta evidente la necesidad de diversificar e innovar en los métodos de reutilización, con el fin de incrementar la proporción de materiales aprovechados y mejorar las propiedades físico-mecánicas de los productos obtenidos, especialmente en cuanto a su desempeño estructural ante sollicitaciones sísmicas y su resistencia frente a agentes climáticos.

Una alternativa viable en el ámbito de la construcción con tierra es la fabricación de bloques de tierra comprimida (BTC). De acuerdo con Cabrera, González y Rotondaro [9], desde la perspectiva del consumo energético, la producción de BTC requiere significativamente menos energía en comparación con otras unidades de mampostería elaboradas con tierra cruda. Además, los BTC presentan ventajas económicas y ambientales relevantes, ya que su elaboración no demanda mano de obra altamente especializada ni certificada, y pueden fabricarse utilizando recursos locales disponibles en el sitio de la obra, lo que reduce costos logísticos y emisiones asociadas al transporte de materiales.

2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo aprovechar los materiales de origen de tierra producto de la demolición o desmonte de una edificación en adobe?

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1. Antecedentes

3.1.1. El adobe como material de construcción tradicional

El adobe es un material de construcción ancestral, utilizado en diversas regiones del mundo, particularmente en zonas áridas y semiáridas. Se caracteriza por estar compuesto de tierra cruda, mezclada con agua y en ocasiones con materiales orgánicos como paja. Este material ha sido estudiado ampliamente por sus propiedades térmicas y acústicas, así como por su baja huella ecológica. Según Gama Castro, J.E. y otros [1], el adobe como material de construcción ha sido utilizado por miles de años por los pueblos de América, representando a una alternativa viable para resolver el problema de la falta de vivienda, a través de la propuesta de una casa auto construible de bajo costo.

3.1.2. Residuos producto de la demolición

La demolición de edificaciones en adobe genera una gran cantidad de residuos, principalmente tierra, que tradicionalmente ha sido desechada de manera inadecuada o utilizada de forma limitada. Sin embargo, con el enfoque contemporáneo hacia la sostenibilidad, se ha comenzado a explorar el potencial de reutilizar estos materiales. Vásquez Hernandez, Botero Botero, & Carvajal Arango (2015) [10], señalan que la demolición y construcción de edificaciones de adobe han generado una gran cantidad de residuos, transformando el entorno y contribuyendo a la contaminación.

Además, plantean la posibilidad de que, una vez concluida la vida útil de estas edificaciones, los materiales de tierra sean reincorporados en nuevas construcciones tradicionales, mejorando sus propiedades físicas y mecánicas, controlando patologías, y promoviendo la sistematización e industrialización de los procesos de fabricación.

3.1.3. Caracterización de los materiales

Rivera, J.C. (2012) [3], en su artículo de investigación expone la caracterización de probetas de adobe patrimonial del orden de 300 años, definiendo una guía metodológica para la caracterización de sistemas constructivos en tierra cruda, adobe y entre otros. En la *Ilustración 5* Rivera, J.C. expone un proceso secuencial y cronológico que permite identificar características tipológicas del sistema constructivo y estructural, y permite realizar un análisis diagnóstico de las unidades que conforman el inmueble de carácter patrimonial para su rehabilitación o para su reutilización.

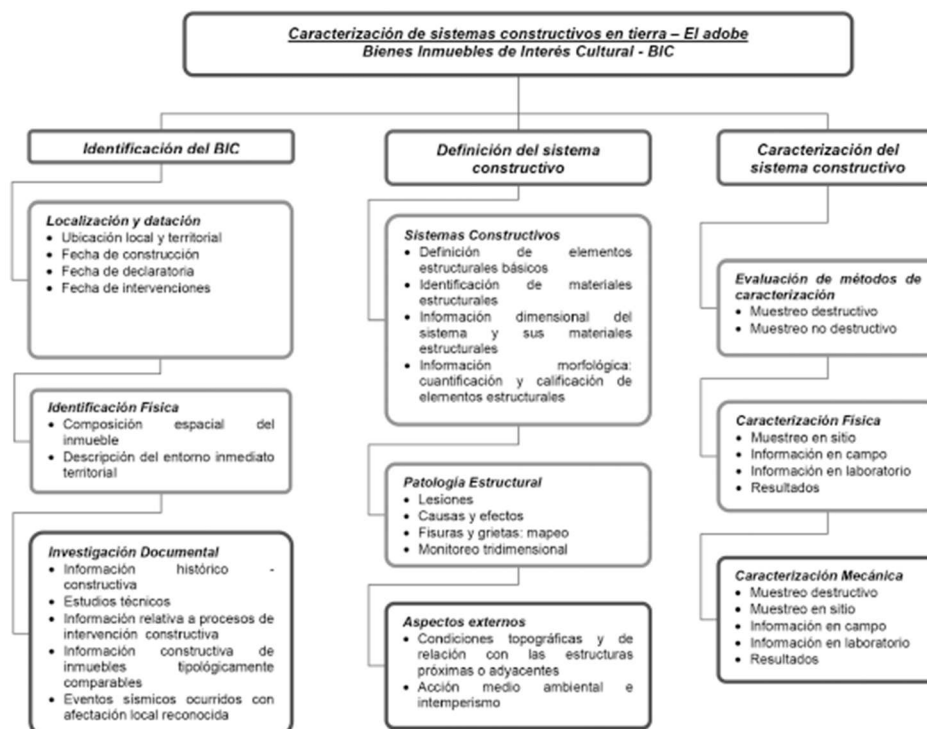


Ilustración 5. Ficha guía de caracterización para sistemas constructivos en tierra cruda. [24]

3.1.4. Reutilización de materiales en tierra en nuevas construcciones

En investigaciones se ha explorado la posibilidad de reutilizar los materiales de tierra desmontados o demolidos en la construcción de nuevas edificaciones. Comúnmente se reutilizan las unidades de adobe que aún conservan sus propiedades físicas como lo es la forma y composición, desechando los materiales que no cuentan con esta característica, pero Vásquez Hernandez, Botero Botero, & Carvajal Arango (2015) [10], en su investigación plantean la posibilidad de reducir la problemática ambiental, disminuyendo el ritmo de extracción y de consumo de los recursos para identificar la viabilidad de la adición de RCD (Residuos de

Construcción y Demolición) en la fabricación de bloques de tierra comprimida BTC para la construcción de viviendas sostenibles.

Su investigación demostró que la tierra reciclada, cuando se mezcló con RCD presentaron mejores resultados que los bloques fabricados con agregado convencional, al respecto de sus propiedades mecánicas y que cumplen con las especificaciones físicas y mecánicas establecidos por la Norma Técnica Colombiana para ser empleados en la construcción en usos para bloques de suelo-cemento.

3.1.5. Método alternativo de producción de BTC respecto al BTC tradicional estabilizado

En el artículo investigativo de Fernando Galíndez denominado “BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA SIN ADICIÓN DE CEMENTO (BTC)” [11], estudia la viabilidad de realizar un mampuesto denominado BTC sin la adición de estabilizantes definidos en las normas IRAM (**Instituto Argentino de Normalización y Certificación**) el cual establece una adición del 15% de cemento. Con la investigación se busca eliminar en el mampuesto en la etapa de cocción disminuyendo la emisión de contaminantes y el consumo de recursos no renovables como el gas natural y leña de bosques nativos.

Dentro del análisis de las ventajas de la utilización y fabricación de BTC sin estabilizar se encuentra:

- Valorización de residuos. Plantea la posibilidad de integrar residuos de otras industrias y la posibilidad de reciclar bloques de tierra una vez haya concluido su vida útil.
- Tecnología limpia. En el proceso de fabricación no se produce ningún tipo de contaminación, solo residuos nuevamente aprovechables como tierra inerte para construir nuevos bloques
- Ausencia de toxicidad. El material no desprende ningún tipo de radiación ni producto tóxico durante su tiempo de vida útil.
- Economía. El material brinda una alternativa de fácil acceso y bajo costo al eliminar la utilización de estabilizante como el cemento.

3.2. Estado del arte

La construcción con tierra ha sido una práctica ancestral en muchas culturas, especialmente en regiones con acceso limitado a otros materiales de construcción. Sin embargo, con la modernización, muchas de estas construcciones han sido reemplazadas por materiales más industrializados, lo que genera un desafío en el manejo de los residuos de tierra, especialmente cuando se trata de edificaciones en adobe. En la actualidad,

el enfoque en la sostenibilidad ha llevado a investigar métodos para reutilizar materiales de demolición, lo cual es crucial para reducir el impacto ambiental y promover la economía circular.

En el artículo de Chica-Osorio, L. & Beltrán-Montoya, J. (2018) [12], se genera estrategias para la identificación de posibles reusos de los RCD identificando características tanto físicas como mineralógicas que condicionan una aplicación específica llevando a una caracterización exhaustiva de los residuos de demolición y construcción generados en la ciudad de Medellín, como paso preliminar para evaluar su potencial de reutilización. Los autores desarrollan una metodología para identificar los residuos con mayor viabilidad para ser reincorporados en la cadena productiva, estableciendo posibles aplicaciones para cada tipo de residuo como se indica en la 6.



Ilustración 6. Esquema de la metodología experimental empleada [9]

Para esta investigación es relevante el esquema de la metodología experimental y las aplicaciones encontradas por los autores acerca de los residuos de excavación, definiendo que pueden ser empleados como materia prima en la fabricación de ladrillos o bloques. Con base en su investigación se concluye que los bloques fabricados a partir de estas mezclas no solo cumplen con las normativas vigentes, sino que también permiten reducir el consumo energético en la fabricación hasta en un 35%, además de mejorar las propiedades de conductividad térmica del producto final.

Según POSADA ORGANIZACIÓN, S.A [13], empresa dedicada a excavaciones, movimiento de tierras y molienda de materiales pétreos, y demoliciones, menciona que actualmente el aprovechamiento de residuos de construcciones con tierra está cobrando relevancia dentro del campo de la ingeniería civil y la construcción sostenible. Uno de los enfoques que se está desarrollando son la reutilización de materiales de demolición donde se están implementando técnicas para reutilizar ladrillos, bloques de adobe, y otros elementos de construcciones antiguas.

Estos materiales se limpian y reacondicionan para ser utilizados en nuevas construcciones, reduciendo la necesidad de fabricar nuevos productos. Por otro lado, se menciona el reciclaje de residuos de tierra, en donde se maneja una clasificación de residuos para asegurar sus opciones de aprovechamiento, sin dejar de lado la estabilización de tierra, en las cuales se están desarrollando técnicas para estabilizar residuos de tierra con aditivos naturales como cal o fibras vegetales, mejorando sus propiedades mecánicas y permitiendo su reutilización en nuevas estructuras.

Estas iniciativas buscan no solo reducir los residuos producto de demoliciones de edificaciones echas a base de tierra, sino también minimizar el impacto ambiental y promover una economía circular en la industria de la construcción.

Arteaga Medina, K. T., Medina, Ó. H., & Gutiérrez Junco, Ó. J en su trabajo investigativo denominado *“Bloque de tierra comprimida como material constructivo”* mencionan la disminución de nuevas construcciones de viviendas con materiales en tierra debido a la falta de difusión e investigación para mejorar sus propiedades físico-mecánicas y puesto que este tipo de viviendas se relacionan con pobreza. Resaltan las ventajas de utilizar estos materiales, teniendo como principales: *“la abundancia de la materia prima, la localización, el reciclaje, la producción sin consumo de energía, bajo costo, la resistencia, aislamiento térmico y acústico”* que con un adecuado estudio del material e implementando el uso de herramientas mecánicas se puede potenciar estas ventajas.

Realizaron bloques de tierra comprimida con el material reciclado extraído del Claustro Santa Clara la Real, donde una parte del material fue de la cubierta, y adobes de los muros de la construcción. Para el ensayo de resistencia a la compresión realizaron muretes, donde se aplicó la carga de forma vertical y diagonal, teniendo como principal conclusión: *“al ser comprimido, su fractura no es inmediata; por lo general, el material pierde sus caras y mantiene la geometría. La principal fractura se dirige hacia las esquinas en un plano inclinado, porque se concentran los esfuerzos. Se podría decir que el material es dúctil, ya que su deformación no es de forma brusca y ocurre a medida que se le aplique la carga hasta llegar a la fractura”*

Galíndez, F en su artículo investigativo denominado *“BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA SIN ADICIÓN DE CEMENTO (BTC)”* [11], plantea la necesidad de resolver problemáticas del deterioro ambiental generado por la explotación excesiva de los recursos naturales, el consumo de recursos no renovables como el gas natural y la leña de bosques nativos utilizados en el proceso de cocción y la eliminación del principal producto para estabilizar denominado cemento debido al impacto en el ambiente el proceso de fabricación del mismo, por tanto, analizan el comportamiento de un material alternativo como lo es el *“bloque de tierra cruda comprimida sin adición de cemento o BTC)”*. Para ello realizaron 6 probetas

para tres tipos de tierra, y compactando a 4 kg/cm², 6 kg/cm² y 8 kg/cm² respectivamente. El resultado más significativo para esta investigación fue: *“La tierra tipo T3, clasificada como arena arcillosa (SM) de mediana plasticidad, con un índice de plasticidad de 15,81 y un límite líquido de 26,3 compactada a 8 kg/cm², arrojó valores de resistencia media a la compresión de 44 kg/cm², valor muy próximo a los valores de resistencia media de los BTC con cemento.”*

3.3. Análisis de la normativa vigente

- Requisitos de calidad para materiales

El capítulo D.3 de la NSR-10 detalla los requisitos de calidad para los materiales empleados en la mampostería estructural, incluyendo cemento, cal, agregados y agua. Estos materiales deben cumplir con las normas técnicas colombianas (NTC) respectivas, y en su ausencia, con las normas ASTM correspondientes.

- Clasificación de Unidades:

La NSR-10, en su Título D, establece que las unidades de mampostería utilizadas en edificaciones de uno y dos pisos pueden ser de concreto, arcilla cocida o sílico-calcareas, cumpliendo con las normas NTC correspondientes.

La norma clasifica las unidades principalmente como perforadas y macizas de concreto y de arcilla cocida. Los bloques de tierra comprimida sin estabilizar no tienen un capítulo o apartado donde especifique el diseño, especificaciones mínimas para la mampostería, por lo cual es necesario tener como referente las características mecánicas de los requisitos mínimos de la mampostería confinada o reforzada [20].

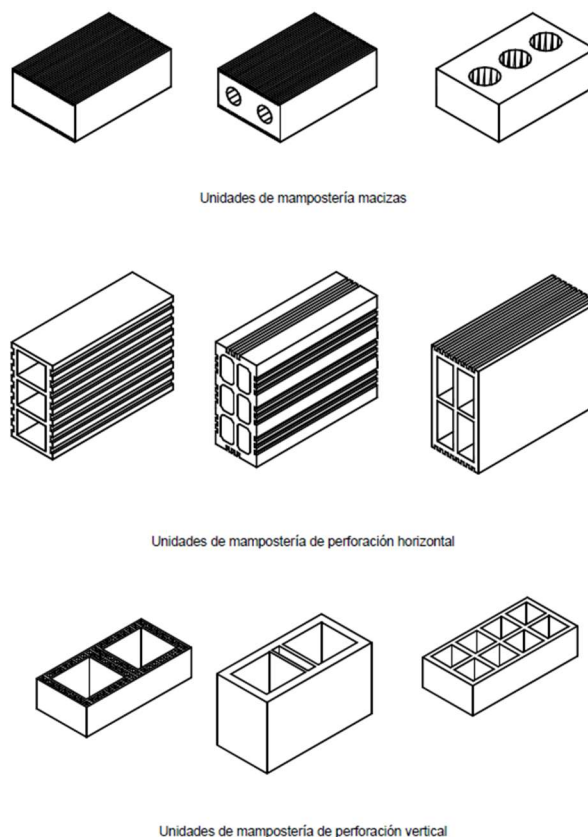


Figura 1. Tipos de unidades de mampostería de arcilla cocida

Ilustración 7. Tipos de unidades de mampostería de arcilla cocida de acuerdo con la NSR-10

- Resistencia a la compresión (NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4017)

El principal desafío de los bloques de tierra comprimida sin estabilizar (BTC) es cumplir o acercarse a los valores mínimos de resistencia a la compresión y ensayo de flexión exigidos en el título D de la Norma Sismo Resistente NSR-10, teniendo como enfoque que si los productos propuestos no alcanzan los estándares de la mampostería industrial, su uso podría restringirse a elementos divisorios no estructurales o requerir ser utilizados bajo el sistema de mampostería confinada donde la carga es soportada por los elementos de concreto (vigas y columnas) [21].

Diseño y Construcción de Mampostería Estructural

La NSR-10 establece criterios específicos para el diseño y construcción de mampostería estructural, incluyendo la resistencia mínima del mortero de pega y las dimensiones de las unidades de mampostería. Dado que los materiales de tierra cruda tienen propiedades diferentes a las de los materiales convencionales,

como la variabilidad en la resistencia y la sensibilidad a la humedad, es necesario que los valores obtenidos al realizar las respectivas pruebas de laboratorio se acerquen a los requisitos mínimos que establece la norma [20].

Tabla 1. Propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural

Tipo	Resistencia mínima ¹⁾ a la compresión Pa (kgf/cm ²)		Absorción de agua máxima en %			
			Interior *		Exterior	
	Prom 5 U	Unidad	Prom 5 U	Unidad	Prom 5 U	Unidad
PH	5,0 (50)	3,5 (35)	13	16	13,5	14
PV	18,0 (180)	15,0 (150)	13	16	13,5	14
M	20,0 (200)	15,0 (150)	13	16	13,5	14

Ilustración 8. Propiedades físicas de las unidades de mampostería estructural.

Fuente: NTC 4205. UNIDADES DE MAMPOSTERÍA DE ARCILLA COCIDA Y BLOQUES CERÁMICOS

Tabla 2. Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural

Tipo	Resistencia mínima ¹⁾ a la compresión Pa (kgf/cm ²)		Absorción de agua máxima en %			
			Interior		Exterior	
	Prom 5 U	Unidad	Prom 5 U	Unidad	Prom 5 U	Unidad
PH	3,0 (30)	2,0 (20)	17	20	13,5	14
PV	14,0 (140)	10,0 (100)	17	20	13,5	14
M	14,0 (140)	10,0 (100)	17	20	13,5	14

Ilustración 9. Propiedades físicas de las unidades de mampostería no estructural.

Fuente: NTC 4205. UNIDADES DE MAMPOSTERÍA DE ARCILLA COCIDA Y BLOQUES CERÁMICOS

3.3.1. Ensayos de laboratorio según la normativa vigente

- Absorción de agua (NTC 4205)

Las unidades ensayadas deben cumplir con los requisitos de absorción de agua en 24 horas de inmersión que se dan en las tablas 8 y 9. Este ensayo se efectúa sobre 5 muestras, pesando las muestras secadas en horno y realizando después la inmersión.

$$\% \text{ Absorción: } \left(\frac{(\text{peso muestra saturada} - \text{peso muestra seca})}{\text{peso muestra seca}} \right) * 100$$

- **Clasificación del suelo:**

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS / USCS):

La norma ASTM D 2487 *Clasificación de Suelos para Propósitos de Ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS)* [1], tiene como base el ensayo de granulometría y la plasticidad del suelo para la clasificación, teniendo como criterio principal dos categorías al usar el tamiz N°200 (0,075 mm):

- **Suelos Gruesos (G, S): Si más del 50% se retiene en el tamiz N° 200.**

- < 5% finos: Se evalúa la curva granulométrica (Cu y Cc) para ver si es GW/SW o GP/SP.
- 12% finos: Se evalúa la plasticidad de los finos para ver si son GM/SM (limosos) o GC/SC (arcillosos).

- **Suelos Finos (M, C): Si 50% o más pasa por el tamiz N° 200.**

Se utiliza el ensayo de **Límites de Atterberg**. Se grafican el Límite Líquido (LL) y el Índice de Plasticidad (IP). La "Línea A" separa las Arcillas (sobre la línea) de los Limos (bajo la línea) [24].

Simbología:

Primera letra (Tipo de suelo):

G: Grava (Gravel)

S: Arena (Sand)

M: Limo (Silt - del sueco Mo)

C: Arcilla (Clay)

O: Orgánico

Pt: Turba (Peat - suelos altamente orgánicos)

Segunda letra (Propiedad):

W: Bien graduado (Well graded)

P: Mal graduado (Poorly graded)

H: Alta plasticidad (High plasticity, LL > 50)

L: Baja plasticidad (Low plasticity, LL < 50)

Sistema AASHTO M 145 (Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes) [25].

Criterio Principal

- **Materiales Granulares:** Si 35% o menos pasa por el tamiz N° 200.
- **Materiales Limo-Arcillosos:** Si más del 35% pasa por el tamiz N° 200.

Clasificación por Grupos

Los suelos se clasifican en siete grupos principales (A-1 a A-7):

- **A-1 a A-3 (Granulares):** Excelentes a buenos.
 - **A-1:** Mezclas de piedra, grava y arena bien graduadas.
 - **A-3:** Arena fina limpia.
- **A-4 a A-7 (Limo-Arcillosos):** Regulares a malos.
 - **A-4 y A-5:** Suelos limosos.
 - **A-6 y A-7:** Suelos arcillosos (El grupo A-7 es el de peor calidad, subdividido en A-7-5 y A-7-6).

Índice de Grupo (IG)

Corresponde a un valor numérico que acompaña la clasificación (ej. A-6(8)). Sirve para evaluar la calidad del suelo dentro de su grupo.

- **IG = 0:** Suelo excelente.
- **IG > 20:** Suelo muy pobre.

$$IG = (F - 35) + [0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(IP - 10)$$

Donde F es el porcentaje que pasa el tamiz N° 200, LL es el límite líquido e IP es el índice de plasticidad.

4. OBJETIVOS

4.1. General

Aprovechar los materiales de tierra que surgen del desmonte o demolición de edificaciones en adobe para su reutilización en edificaciones de mampostería.

4.2. Específicos

- Caracterizar los materiales producto del desmonte, identificando sus propiedades físico-mecánicas para ser viabilizados como insumos para productos utilizados en construcción de edificaciones de mampostería.

- Desarrollar productos de construcción para edificaciones de mampostería utilizando los materiales producto del desmonte

5. JUSTIFICACIÓN

La creciente demanda de materiales de construcción, junto con la necesidad urgente de reducir el impacto ambiental de la industria, ha llevado a un interés creciente en la reutilización de materiales provenientes del desmonte o demolición de edificaciones. En este contexto, los materiales de origen de tierra, como los adobes, tejas, mortero de pega, entre otros, se presentan como una alternativa viable para ser reincorporados en nuevas construcciones. Sin embargo, el aprovechamiento efectivo de estos materiales requiere una comprensión profunda de sus propiedades y una metodología clara para su integración en nuevos productos constructivos.

A continuación, se detalla la contribución que esta investigación tendría en diversos aspectos.

5.1. Caracterización de materiales y viabilidad como insumos para la construcción.

La caracterización permite evaluar la viabilidad de los materiales de tierra como insumos para la fabricación de productos utilizados en la construcción de edificaciones de mampostería identificando las propiedades físico-mecánicas, esto radica en la necesidad de asegurar que los materiales reciclados cumplan con los estándares de calidad y seguridad exigidos en la construcción actual, garantizando así su uso efectivo y sostenible.

El análisis detallado de las propiedades de estos materiales también proporciona información esencial para optimizar los procesos de reutilización, evitando la degradación de los productos finales y mejorando su desempeño estructural. Además, contribuye a la reducción de residuos, al disminuir la necesidad de materiales vírgenes, y fomentará la economía circular dentro del sector de la construcción.

5.2. Desarrollo de productos de construcción con materiales reutilizados

El desarrollo de estos productos radica en la necesidad de innovar en la creación de nuevos materiales de construcción que no tan solo sean sostenibles, sino también económicamente viables y técnicamente competitivos con los productos convencionales, contribuyendo a reducir el impacto ambiental asociado con la extracción y procesamiento de nuevos materiales incluyendo la materia prima que surge del desmonte o

demolición de una edificación en tierra. La implementación del bloque de tierra comprimida BTC con suelo reciclado permite incorporar gran parte de los residuos generados en la demolición disminuyendo las fases de extracción y vertido del material, por un ciclo continuo de producción como lo indica la *Ilustración 7*.

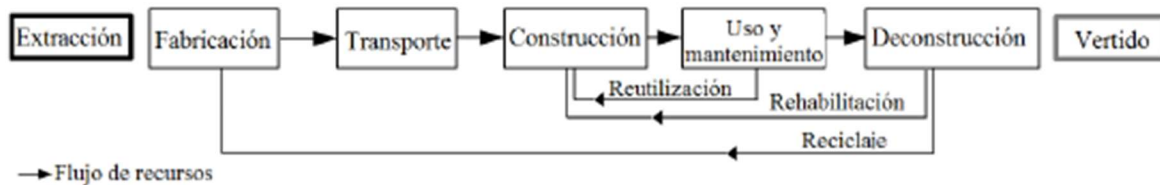


Ilustración 10. Ciclo continuo de producción del adobe [10]

5.3. Impacto social, económico y ambiental.

Desde una perspectiva social, se busca promover prácticas constructivas más sostenibles y conscientes del medio ambiente, lo que es especialmente relevante en un contexto de creciente urbanización y cambio climático. Dentro de los aspectos ambientales, la fabricación de viviendas con materiales en tierra solo aporta una sexta parte de las emisiones atribuidas a los bloques de hormigón y una décima parte a lo producido por los ladrillos de arcilla cocida comunes [14]. Económicamente, el uso de materiales reciclados podría reducir los costos de construcción, haciéndolos más accesibles, y generar nuevas oportunidades de negocio en el ámbito de la construcción sostenible.

5.4. Contribución al sector educativo

La investigación aborda los desafíos técnicos relacionados a la integración de materiales de tierra reciclados en unidades de mampostería, específicamente en bloques de tierra comprimida (BTC). Surge la necesidad de validar la viabilidad técnica de reintegrar materiales de desmonte, dada la escasez en investigaciones en cuanto al reciclaje de dichos materiales y adicionalmente se cuenta con poca literatura acerca del comportamiento de los BTC sin estabilizar y con adición de otros componentes RCD que ayuden con el mejoramiento del comportamiento mecánico (resistencia a la compresión y resistencia a flexión).

5.5. Alineación a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

El trabajo de investigación se enmarca en varios Objetivos de Desarrollo Sostenible adaptados por las Naciones Unidas en el año 2015 en los cuales se busca equilibrar el ámbito cultural, económico y social, particularmente en el ODS 11 (*Ciudades y Comunidades Sostenibles*), al contribuir a la preservación de la identidad cultural y la resiliencia de las edificaciones en comunidades como Yotoco.

Además, al promover la reutilización de materiales de origen de tierra en la construcción, el proyecto apoya el ODS 12 (*Producción y Consumo Responsables*), fomentando patrones de consumo más sostenibles y la reducción de residuos promoviendo un ciclo continuo de producción.

Asimismo, al reducir la dependencia de materiales convencionales con alta huella de carbono, se contribuye al ODS 13 (*Acción por el Clima*), abordando los desafíos del cambio climático. Esta investigación promueve la creación de técnicas innovadoras para la reutilización de adobe reciclado apoyando el ODS 9 (*Industria, Innovación e Infraestructura*), al desarrollar soluciones constructivas más sostenibles y resilientes. Finalmente, apoya al ODS 8 (*Trabajo Decente y Crecimiento Económico*), al generar empleo en el proceso de desmonte, caracterización y reutilización de los materiales, generando un crecimiento económico en la región.

6. METODOLOGÍA

6.1. Estructura de desglose de trabajo

6.1.1. Estudios y diagnóstico

6.1.1.1. Revisión bibliográfica de documentos

- **Revisión de literatura relacionada con procesos de desmonte y estudios previos sobre materiales de tierra y su reutilización en construcción:**

Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura técnica y científica con el propósito de identificar los métodos más adecuados para la recolección de muestras y materiales, así como los procesos constructivos más eficientes para la transformación y aprovechamiento de estos recursos. El análisis se centró particularmente en la obtención y fabricación de Bloques de Tierra Comprimida (BTC), considerados como el producto principal por su potencial para mejorar el comportamiento estructural, aumentar la durabilidad y cumplir con los criterios establecidos en la normativa técnica vigente, tales como la NSR-10 y las Normas Técnicas Colombianas (NTC) aplicables.

- **Adición de Polvo de Escombros (Ladrillo y Concreto) reciclado en mezcla de adobe**

Un estudio reciente evaluó la posibilidad de añadir fragmentos pulverizados de ladrillo cerámico y concreto reciclado a la mezcla de adobe. En el desarrollo de la investigación encontraron que redujo en un

10% la utilización de suelo natural, adicionalmente con polvo de ladrillo aumento la resistencia a compresión y que si la incorporación del polvo cerámico supera el 20 % reduce la cohesión y aumenta la fragilidad del bloque [15].

- **Refuerzo con fibras recicladas (Papel y Celulosa)**

Buscando mejorar propiedades físicas de unidades de mampostería cruda y de mitigar el impacto ambiental, P. Muñoz, V. Letelier, L Muñoz, M.A. Bustamante, evalúan la incorporación de residuos de papel y pulpa en la mezcla de adobes. Los resultados mostraron una mejora en la conductividad térmica (más aislantes) y una reducción de grietas por retracción. Como resultado contraproducente se evidenció una disminución ligera a la resistencia a la compresión si la proporción de fibra es alta [16].

- **Reutilización de tierra (Tapia Pisada)**

En el artículo investigativo de Bui & Moriel, estudian los efectos de proceso de construcción y exposición al ambiente sobre el material en tierra (tapia pisada) con un envejecimiento de los muros de 22 años. Realizan la comparación entre la resistencia a la compresión, el módulo de Young de los muros envejecidos y el del estado inicial al reciclar el material del mismo muro envejecido, confirmando que, si el muro original no tiene algún estabilizante como el cemento o cal, el material puede triturarse, humedecerse y volver a compactarse recuperando su resistencia inicial [17].

• **Identificación de procesos de reutilización de materiales de tierra en Colombia y a nivel internacional.**

Colombia, Cúcuta.

El XV Congreso Internacional de Arquitectura de Tierra, Tradición e Innovación (CIATTI) celebrado en el año 2018 en la Universidad Francisco de Paula Santander (UFPS) Cúcuta [28], resalta el fortalecimiento por parte de la universidad en conservación de prácticas de conservación patrimonial, tradiciones e innovación académica que busca validar normas técnicas en los procesos de construcción con tierra. Dentro de su visión del material, no tratan la tierra como residuo sino como material permanente [18].

En los programas ofertados se encuentra el taller práctico de *Construcción con Tierra* en la Maestría en Construcción, donde el enfoque del taller resalta la compresión del desempeño del material desde un enfoque estructural para entender su alcance y limitaciones en base a la normativa vigente. A continuación, se presenta el acercamiento práctico en las construcciones con tierra en el taller realizado:



Ilustración 11. Taller práctico Construcción con Tierra (Tapia pisada)



Ilustración 12. Muro tapia pisada con cimientos en piedra

Francia (CRATerre - Centro Internacional de Arquitectura en Tierra)

- Líder en investigaciones sobre reutilización de tierra cruda.
- Procesos como el “recycling earth”, donde la tierra de edificaciones antiguas se recicla directamente sin cocción.
- Promueven sistemas como el BTC (Bloque de Tierra Comprimida), que puede incorporar material recuperado.

Proyecto Cycle Terre (Francia):

El proyecto fue lanzado en el año 2018 por el programa europeo Actions Innovatrices Urbaines difundiendo el uso de tierra no estabilizada utilizando tierra natural de material excavado no contaminado. El objetivo, a medio plazo, es gestionar 25.000 m³ de tierra reutilizada cada año [19].



Ilustración 13. Los bloques de tierra de excavación comprimida. Fuente: <https://ecohabitar.org/tierra-de-excavacion-de-residuo-a-materia-prima/>

Alemania y Austria

- Desarrollo de normas técnicas (DIN 18945 a 18948) que permiten la reutilización de tierra de excavaciones y demolición, previa caracterización.
- Uso de sistemas prefabricados de tierra reciclada en muros interiores y paneles.

India

- El Auroville Earth Institute promueve la reutilización de suelo local y de adobes antiguos.
- Se aplican técnicas como CSEB (Compressed Stabilized Earth Blocks) hechos con mezclas de tierra reciclada y cal o cemento.

6.1.1.2. Caracterización de materiales producto del desmonte

- **Identificación del caso de estudio:**

La vivienda correspondiente al caso de estudio se encuentra ubicada en el municipio de Yotoco, Valle del Cauca. Se trata de una construcción tradicional elaborada en mampostería de adobe, cuyas unidades presentan dimensiones aproximadas de $26 \times 10 \times 9$ cm. Los bloques están dispuestos de manera transversal en los muros, conformando un espesor total de 26 cm, típico de sistemas constructivos en tierra utilizados en edificaciones rurales de la región.

- **Visita de campo**

Se realizó la visita al caso de estudio, teniendo que la edificación se constituye por 3 alcobas, cocina y un pasillo interno con vista hacia un patio, está construida principalmente con mampostería en adobe, mezclada con una mínima proporción de mampostería cocida. El mortero de pega corresponde a una mezcla de tierra fina, sin adición de fibras naturales ni agregados gruesos. El revoque o pañete está conformado por una mezcla de tierra y fibras naturales, entre ellas llano seco. Finalmente, la teja de la cubierta corresponde al material cerámico tradicional que ha sido sometido a un proceso de cocción.



Ilustración 14. Inspección visual en visita de campo - Caso de estudio, Yotoco.

- **Inspección visual:**

En la inspección visual se identificó un deterioro significativo en las unidades de mampostería. Asimismo, se evidenció que los elementos fabricados con tierra cruda (adobe) presentan deficiencias en su calidad física y mecánica, lo cual imposibilita su reutilización directa sin un reproceso previo. Adicionalmente, se evidenció la existencia de una mezcla heterogénea de materiales, combinando unidades de adobe con elementos de arcilla cocida (ladrillo cerámico), lo que compromete la uniformidad estructural y el desempeño del sistema de mampostería.

- **Extracción de muestras representativas de los materiales de desmonte.**

Se procedió a la extracción de dos unidades de adobe desde un muro en servicio, mediante el retiro cuidadoso del mortero de pega. Cuatro unidades fue recuperada en estado óptimo, mientras que la otra otras sufrieron fractura durante el proceso de extracción. Adicionalmente, se recolectaron muestras del mortero de pega remanente al realizar un segundo raspado para facilitar la liberación del adobe. También se extrajeron muestras del revestimiento (pañete) adherida a la superficie del muro. Finalmente, se desmontaron de forma manual unidades de teja que se encontraban en condición condiciones aceptables para su posterior reutilización.

- **Realización de pruebas de laboratorio para determinar propiedades físico-mecánicas: peso, textura, color, porosidad, granulometría, densidad, resistencia a la compresión, conductividad térmica, humedad, entre otros.**

Tabla 1. Pruebas de laboratorio para determinar propiedades físico-mecánicas según normativa vigente.

Propiedad	Ensayo / Método	Proceso Descriptivo	Norma / Referencia
Peso unitario / masa	Pesado de muestra seca	Secar la muestra a 105°C hasta masa constante y pesar en balanza de precisión.	INV E 141
Color	Identificación con carta de colores	Comparar el color seco y húmedo con la carta de colores Munsell.	Munsell Soil Color Chart
Textura	Evaluación táctil-visual	Frotar la muestra entre los dedos y clasificar la textura según proporción de arena, limo y arcilla.	ASTM D2488
Clasificación del suelo	Límites de Atterberg	LL: Se prepara una pasta homogénea de suelo con agua. Se coloca en una copa de Casagrande; el contenido de humedad al que el surco se cierra en 25 golpes . LP: e toma una porción de suelo húmedo y se enrolla hasta formar un hilo de 3 mm de diámetro sobre una superficie plana	NTC 4630

Granulometría	Tamizado	Secar y disgregar la muestra, pasar por tamices	NTC 1522
Resistencia a compresión	Prueba de compresión uniaxial	Colocar la muestra entre platos de la prensa hidráulica, aplicar carga hasta falla, registrar carga máxima.	ASTM C39 / NTC 5324 NTC 4017
Módulo de rotura	Ensayo de resistencia a la flexión	Apoyar el bloque en dos rodillos en los extremos y aplicar la carga en el centro hasta fallar y registrar la carga	NCT 4017 / NMAC 14.7.4

- **Granulometría (NTC 1522):**

Procedimiento:

El análisis granulométrico para determinar la distribución porcentual de los diferentes tamaños de partículas que componen una muestra extraída de las unidades de mampostería extraídas del caso de estudio. El análisis se realiza de acuerdo con lo establecido en la **NTC 1522 – Ensayo para determinar la granulometría por tamizado** [22].

Cuarteo:

Se obtuvo una muestra significativa mediante la trituration de 5 unidades de mampostería ubicadas en diferentes muros de la vivienda y se deja secar al aire. Posteriormente se realiza el cuarteo de la muestra dividiendo la muestra en cuatro partes aproximadamente iguales; se toma las dos partes opuestas (1 y 3 o 2 y 4) [18] como indica la *Ilustración 15*, el procedimiento se repitió hasta la obtención de una muestra con un peso de 90.2 gramos. Se realiza el proceso de lavado de la muestra para eliminar el contenido de material fino, obteniendo al final una muestra de 71.21 gramos.

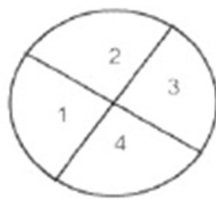


Ilustración 15. Cuarteo. Fuente: NTC 1522 [18].

Tamaño de la muestra:

Se realiza el proceso de lavado de la muestra para eliminar material fino adherido, después de un proceso de secado al horno se obtuvo un peso de muestra de 71.21 g.

Cálculos

El material fue sometido a un proceso de tamizado en seco utilizando una serie de tamices dispuestos en orden descendente. Se determinó la masa retenida en cada tamiz y se calcularon los siguientes parámetros [22]:

- **Porcentaje retenido:**

$$\%Ret = \frac{Peso\ retenido}{Peso\ inicial} * 100$$

- **Porcentaje retenido acumulado**

$$\%Ret\ Acumul = \%Ret + \sum Ret\ Acumul$$

- **Porcentaje que pasa**

$$\%Pasa = 100 - \%Ret\ Acumul$$

- **Módulo de finura**

$$MF = \frac{\sum(\%Ret\ Acumul)}{100}$$

- **Límites de Atterberg (NTC 4630):**

Se realizó conforme a lo establecido en la **NTC 4630 - Procedimientos para la determinación de los límites de consistencia** [20], la cual se basa en la norma **ASTM D4318 - Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils**. La muestra fue previamente mezclada hasta obtener una pasta homogénea, uniforme y de consistencia adecuada para la ejecución de las pruebas.

Límite líquido

Fue determinado mediante el *método de Casagrande*, procesando un espécimen para remover cualquier material retenido en el tamiz #40, al tener la mezcla homogénea con agua se extiende en un recipiente esférico de bronce y se divide diametralmente en dos partes. Posteriormente, se hicieron caer los golpes del recipiente a una altura de 10 mm, registrando el número de impactos para lograr el cierre de la ranura anteriormente realizada.

El proceso se repite para diferentes condiciones de humedad en la muestra con el fin de obtener entre 3 y 4 ensayos cuyo número de golpes esté comprendido entre el rango de 15 a 35 golpes. El límite líquido

(LL) corresponde a la humedad determinada para un número de golpes N=25 obtenido mediante la interpolación [23].

Límite plástico

Se determinó tomando una porción de la muestra (pasta homogénea) de suelo y amasándola manualmente hasta alcanzar una consistencia adecuada para ser moldeada. Se formaron cordones cilíndricos sobre una superficie lisa, aplicando presión uniforme con las palmas de las manos hasta obtener diámetros cercanos a 3 mm. Al empezar a fisurarse o desmoronarse al alcanzar dicho diámetro, se considera que el suelo alcanzado su estado plástico límite. Luego, se recolecta los fragmentos de los cordones y se secan en horno y se procede a pesar [23].

- **Índice de plasticidad:**

$$IP = LL - LP$$

6.1.1.3. Evaluación de viabilidad técnica

- **Evaluación de la reutilización de los materiales de desmonte en base a sus propiedades y la normativa vigente.**

Tabla 2. Normativa vigente para evaluación de reutilización de materiales.

Material / Recurso	Propiedad Evaluada	Referencia Normativa	Criterio/Aplicación a unidades de BTC
Residuos de construcción	Uso de recursos naturales y residuos de construcción	Ley 99 de 1993 (Sistema Nacional Ambiental – SINA)	Respalda legalmente el uso de materiales reciclados en sitio, evitando su transporte o disposición externa.
Muestra de suelo	Análisis granulométrico (tamizado)	NTC 1522 – Clasificación de suelos por granulometría	Necesario para evaluar si la tierra del desmonte tiene una composición adecuada para BTC (ideal: arcilla 15–30%, arena 50–70%).
Propiedades del suelo	Límites de Atterberg: - Límite líquido - Límite plástico - Índice de plasticidad	NTC 4630 /UNE 41410	UNE 41410 /CRATerre: IP entre 10 y 20 para garantizar cohesión sin exceso de retracción

Teja Cerámica Triturada (RCD)	Resistencia y Gradación. Aporta un esqueleto rígido.	Resolución 0472 de 2017 (MinAmbiente).	Se clasifica como Residuo de Construcción y Demolición (RCD) pétreo. La norma incentiva su uso como agregado reciclado en materiales no estructurales o de mampostería simple.
Propiedades mecánicas	Resistencia a la compresión uniaxial	NTC 5324-/NTC 4017/NSR-10 – (Título E – Mampostería estructural)	Resistencia mínima a compresión para muros estructurales en unidades macizas: 20 (kgf/cm ²) (muros de cerramiento), y 14 (kgf/cm ²) para muros no estructurales
	Módulo de rotura: Ensayo de resistencia a la flexión	NCT 4017 / NMAC 14.7.4	Según la NMAC 14.7.4 (New Mexican Earthen Building Materials CODE), el módulo de rotura debe ser como mínimo 0.3 MPa (3.05915 kgf/cm ²). La norma no define si la unidad de mampostería es maciza o perforada.
Bienes patrimoniales	Viviendas construidas con materiales en tierra	Ley 1185 de 2008 (Patrimonio Cultural de la Nación)	Protege y regula el uso de materiales tradicionales en construcciones con valor cultural

-
- **Identificar mercados para los productos de construcción elaborados con materiales de tierra.**
 - **Vivienda Rural y Autoconstrucción**
 - Características:
 - Alta demanda de soluciones de bajo costo.
 - Disponibilidad de materiales locales.
 - Tradición de construcción en tierra en zonas rurales.
 - **Construcción Sostenible / Ecológica**
 - Clientes interesados en reducir la huella de carbono.
 - Construcción bioclimática, pasiva y saludable.
 - Arquitectura regenerativa
 - Construcción de proyectos certificados

- **Patrimonio y de Restauración Arquitectónica**

Necesidad de materiales compatibles con estructuras históricas.

Revalorización de técnicas constructivas tradicionales.

Restauración de patrimonios construidos en materiales en tierra.

6.1.2. Diseño de productos de construcción

6.1.2.1. Definición de productos de construcción por ser elaborados

- **Identificación de materiales de tierra que pueden ser elaborados: bloques, ladrillos morteros, pañete, entre otros.**

Adobe (bloques de tierra cruda sin cocción):

Se evaluó la viabilidad de reutilizar unidades de adobe en su estado original, sin ningún tipo de reprocesamiento. Sin embargo, debido a su alta fragilidad estructural y baja cohesión presentadas en el desmonte de las muestras, se determinó que las unidades no presentan la resistencia mecánica mínima requerida para su reincorporación directa en nuevos elementos constructivos, por lo que esta alternativa fue descartada.



Ilustración 16. Estado de unidades de mampostería (Adobe).

Bloques de tierra comprimida (BTC) con adiciones: Se consideró la producción de bloques de tierra comprimida incorporando agregados reciclados, tales como polvo de pañete, triturado de teja cerámica y adiciones de fibras naturales. Esta alternativa se perfila como viable al permitir mejorar la resistencia mecánica y durabilidad del bloque, reduciendo además el impacto ambiental mediante la valorización de residuos de obra.

- **En base a la demanda de materiales del mercado, propiedades de los materiales y normativa vigente (NSR-10), seleccionar los productos a desarrollar.**

Bloque de tierra comprimida:

Tras una revisión exhaustiva de las investigaciones realizadas se seleccionó el BTC como principal producto. Desde la perspectiva de la energía utilizada para la elaboración de otras unidades de mampostería de tierra cruda es menor la aplicada para la producción de los BTC, adicionalmente posee características que la hacen más económica y ambientalmente amigable debido a que no es necesario tener una mano de obra certificada y se utiliza recursos disponibles en el sitio.

BTC sin aditivos y sin estabilizar.

BTC con aditivo de fibras naturales y sin estabilizar.

BTC con contenido de teja triturada y sin estabilizar.

6.1.2.2. Diseño de mezclas

- **Desarrollo de mezclas combinando los materiales de tierra con aditivos y/o materiales complementarios para optimizar sus propiedades.**

Para este proceso, se llevó a cabo la trituración de las unidades de mampostería desmontadas de la edificación, empleando un *mazo metálico de 3 libras* como herramienta principal. y se adicionó el mortero de pega recuperado. El material obtenido presentó partículas de diversos tamaños debido a que no se logró pulverizar en la totalidad cada unidad, por tanto, fueron clasificadas mediante una *malla zaranda de 6×6 mm* en alambre galvanizado, separando así las fracciones mayores del conjunto.

Posteriormente, para alcanzar la humedad adecuada en las mezclas, se siguieron las recomendaciones proporcionadas por constructores expertos en técnicas de tierra cruda del municipio de Ocaña, Santander. Dichas orientaciones fueron adquiridas durante el curso *Construcción con Tierra* de la Universidad Francisco de Paula Santander, en el marco de la Maestría en Construcción. Allí se explicó de manera práctica que la humedad ideal se determina mediante la formación manual de un turrón: se toma una porción de tierra, se aprieta hasta compactarla y se deja caer; si esta no se desmorona, la mezcla posee la humedad adecuada.

Este procedimiento se aplicó de forma consistente en todos los productos analizados durante la investigación.



Ilustración 17. Prueba de humedad.

BTC sin aditivos:

Para la elaboración de la mezcla del bloque de BTC sin aditivos se empleó el material previamente pulverizado, al cual se le adicionó un 9% de humedad respecto al peso seco, verificando su adecuada consistencia mediante la prueba empírica descrita anteriormente.

La compactación se ejecutó utilizando una prensa hidráulica, aplicando una energía de **6.5 kg/cm²**. Durante este proceso se determinó que una energía de compactación superior no era recomendable, ya que generaba deformación en el molde, afectando la geometría y estabilidad del bloque.



Ilustración 18. Elaboración BTC sin aditivos con presión de compactación de 6.5 kg/cm²

BTC con adición de teja triturada

Para este bloque mampuesto se trituró la teja proveniente de la cubierta de la edificación hasta obtener fragmentos lo suficientemente pequeños para pasar por la malla zaranda de 6×6 mm. Posteriormente, se eliminaron las fracciones excesivamente pulverizadas, conservando únicamente partículas con tamaños similares a los mostrados en la imagen.



Ilustración 19. Tamaño nominal de la teja triturada

Este agregado, en estado seco, corresponde al 7.6% del peso seco de la tierra. Para la preparación de la mezcla, el material triturado se humedeció previamente con el fin de evitar que absorbiera el agua destinada a la mezcla principal, considerando que el contenido de humedad es fundamental para garantizar la cohesión adecuada entre las partículas de tierra y el triturado de teja.

BTC con adición de fibras naturales

Dado que no existen estudios previos que incorporen fibras naturales en la fabricación de bloques de tierra comprimida, esta investigación busca mejorar la resistencia a la compresión, y flexión, disminuyendo los efectos de retracción y fisuración durante el secado, y reducir el peso propio del bloque al incorporar fibras y al realizar el proceso de compactación. Para ello, se evaluó el comportamiento de dos tipos de fibras:

En primer lugar, se consideró la utilización de fibra de coco como agregado. Se realizó la separación manual de las fibras y la eliminación del material no aprovechable; sin embargo, durante el proceso de mezclado se observó que las fibras no se incorporaban adecuadamente a la mezcla de tierra, generando zonas con acumulación excesiva de material fibroso, teniendo una distribución no homogénea. Se probó con longitudes de la fibra de 5 y 3 cm, sin tener buenos resultados, se optó finalmente por una longitud de

1 cm mejorando levemente la incorporación a la mezcla, teniendo un peso final de la fibra en estado seco de 8 gramos. Esta se humedeció, aumentando la cantidad de agua adicionada a la mezcla, teniendo un 15% del peso seco del material en tierra, evidenciando el exceso de agua al realizar la compactación. La alternativa fue descartada debido a que en el proceso de secado se presentó fisuración del bloque debido al exceso de agua y a que la longitud de las fibras no cumplió el objetivo, adicionalmente el acabado final del bloque no fue el esperado.

Por otro lado, se evaluó la fibra extraída de la penca del maguey, comúnmente empleada en la elaboración de colchones tradicionales y en la fabricación de manilas. Esta fibra, de menor diámetro, tuvo un mejor desempeño durante el mezclado. Para facilitar su incorporación, las fibras fueron cortadas a una longitud aproximada de 3 cm y humedecidas previamente. Con este procedimiento se obtuvo una mezcla más homogénea, que permitió un mejor acabado y una compactación más uniforme al conformar los mampuestos.



Ilustración 20. Fibra natural de maguey

- **Diseño de formulaciones específicas para cada producto según el método de construcción, considerando las propiedades esperadas y la normativa vigente.**

Especificaciones geométricas:

Se estableció realizar los bloques replicando las dimensiones de los bloques originales desmontados teniendo 26*10*9 cm, lo que corresponde a un volumen nominal de 2340 cm³.

BTC Tradicional:

Se incorporó **306 g** de agua a un promedio de **3400 g** material seco (tierra), equivalente a una relación agua/suelo del 9% del peso de material seco. Este porcentaje de agua fue establecido mediante dos criterios:

- Humedad necesaria para formar enlaces entre agregado grueso y agregado fino.
- Porcentaje de agua evacuada al realizar la compactación.

BTC con adición de teja triturada:

El peso de material seco (tierra) promedio para un bloque es **3400 g**, pero al tener adición de teja triturada en estado seco y libre de material particulado fino, se redujo en un 8.23%, teniendo aproximadamente 280 g de agregado de teja y un total de material de tierra de **3210 g**. El contenido de agua se incrementó al 11%, considerando la pre - humectación del material cerámico antes del mezclado para garantizar el puente de adherencia.

BTC con adición de fibras naturales:

Para este bloque se utilizó fibras de penca de maguey, con un peso de **9 g** de fibra para cada bloque. El material seco (tierra) tuvo un peso de **3400 g** y el agua utilizada corresponde a **10.7%** del peso del material seco, esto debido a que se humedeció previamente la fibra para facilitar el mezclado

6.1.2.3. Prototipado

- **Método de elaboración de prototipos utilizando diferentes procesos de compactación.**

Se realiza la fabricación de un molde con láminas metálicas con las medidas de los bloques de adobes desmontados 26*10*9 cm. Dicho molde contiene una lámina móvil en la cual se aplica la fuerza de compactación. Para evitar que el material se adhiera a las paredes del molde, se realizó un forraje con plástico



Ilustración 21. Molde y medidas nominales de las unidades de mampostería (BTC)

Cada producto se realizó por capaz teniendo un espesor de 4 cm por capa y posteriormente la compactación se ejecutó utilizando una prensa hidráulica, aplicando energías de 6.5 kg/cm² por fase.

Para los bloques con adición de teja y fibra natural, la compactación se llevó a cabo mediante el método tradicional, utilizando un trozo de madera y un mazo metálico para aplicar la fuerza necesaria para la compactación. Este procedimiento se adoptó con el propósito de obtener resultados más representativos de las prácticas constructivas tradicionales y de las herramientas comúnmente disponibles para cualquier persona interesada en emplear esta técnica, considerando que no siempre se cuenta con el acceso a una prensa hidráulica.

Las muestras tuvieron un proceso de secado al aire libre bajo sombra para mitigar el proceso de retracción y por consiguiente la fisuración del bloque. Se realizó un total de 11 bloques para cada producto anteriormente mencionados.



Ilustración 22. Bloques de tierra comprimida

6.1.2.4. Pruebas de laboratorio

- **Realización de ensayos de laboratorio para evaluar las propiedades de los prototipos (resistencia a la compresión, flexión, entre otros).**

NTC 4017 – Métodos de Muestreo y Ensayo de Mampostería y Otros Productos de Arcilla.

Absorción de agua:

Ensayo de resistencia a la compresión:

El ensayo tiene como objetivo determinar la capacidad máxima de carga axial que puede soportar la unidad antes de fallar. Las muestras tuvieron un proceso de secado al aire libre bajo sombra para mitigar el

proceso de retracción y por consiguiente la fisuración del bloque. Se pulió la superficie para garantizar que las caras (superior e inferior) sean planas y paralelas para asegurar una distribución uniforme de la carga, adicionalmente se utilizó el material *neopreno* para mitigar desperfectos de la superficie del bloque.

$$\text{Tensión media } \sigma_m = \frac{\text{Carga máxima}}{\text{Area bruta}}$$

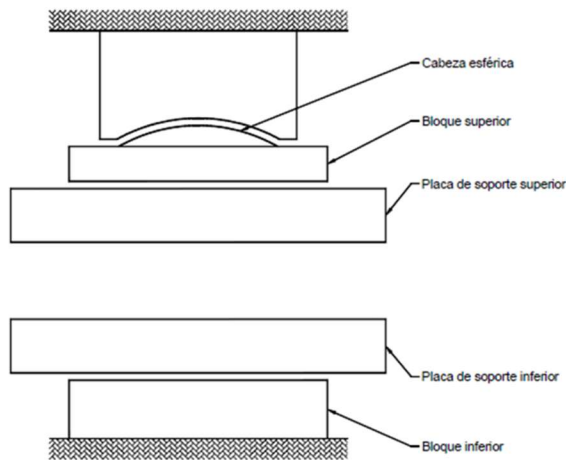


Figura A.1. Equipo utilizado para el ensayo a compresión



Ilustración 23. Ensayo de compresión.

Imagen izquierda: extraída de NTC 4017.

Imagen derecha: Laboratorio LABESTRUS Universidad del Valle.

Ensayo de resistencia a la flexión (módulo de rotura):

Evalúa la resistencia a la tracción por flexión de la unidad, simulando las cargas a las que se somete el bloque cuando las fuerzas actúan al recibir cargas transversales. La unidad de mampostería se coloca horizontalmente sobre dos soportes cilíndricos de acero (rodillos) distanciados permitiendo un voladizo corto en los extremos y una carga superior en el punto medio.

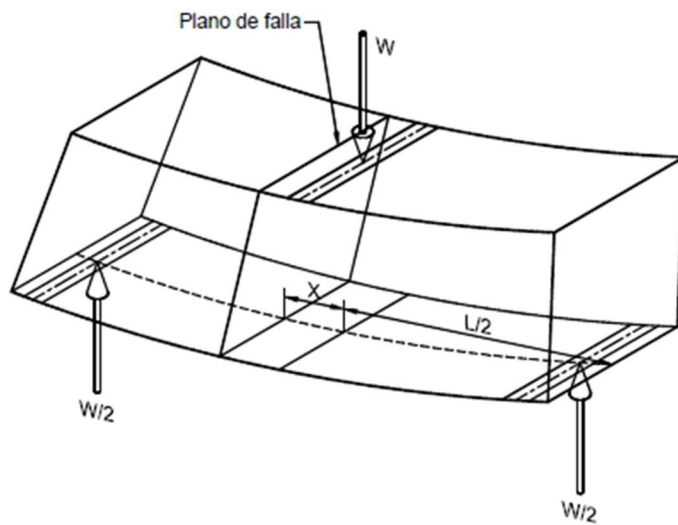


Ilustración 24. Ensayo de flexión.

Imagen izquierda: extraída de NTC 4017.

Imagen derecha: Laboratorio LABISPA Universidad del Valle.

$$MR = 3W \left(\frac{L}{2} - x \right) / bd^2$$

En donde,

MR = Módulo de rotura de la muestra en el plano de falla, en Pa.

W = Carga máxima indicada por la máquina de prueba, en N.

L = Distancia entre los soportes (medida centro a centro), en mm.

b = Ancho neto (distancia de cara a cara) de la muestra en el plano de falla, en mm.

d = Profundidad

x = Distancia promedio del plano de falla al centro de la pieza, medida en la dirección de la línea central de la superficie sometida a tensión, en mm.

7. RESULTADOS

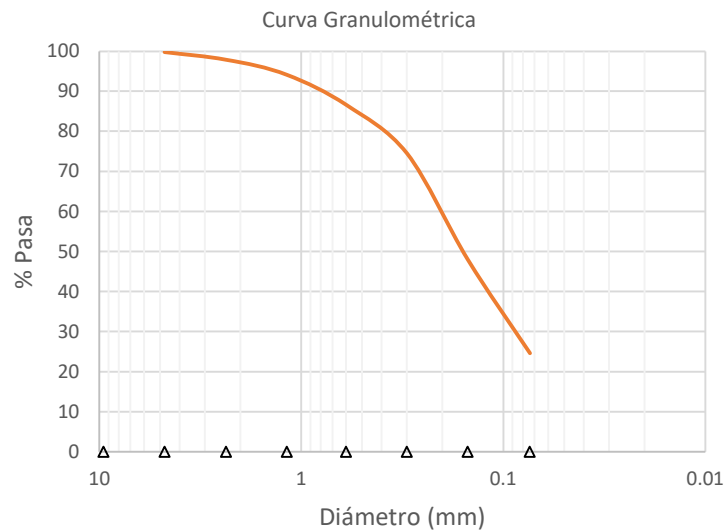
El material utilizado fue extraído de la demolición de muros de la edificación en estudio. La clasificación de los materiales aptos para la reutilización se definió al realizar la visita de campo, identificando que solo era posible reutilizar las unidades de mampostería, mortero de pega y teja, el pañete no fue posible reutilizarlo debido a la cantidad de estuco y pintura que presentaba el material.



Ilustración 25. Extracción de materiales para reutilizar - caso de estudio, Yotoco.

7.1. Propiedades del suelo

Al realizar el ensayo de granulometría en base a la Norma Técnica Colombiana NTC 1522, se obtuvo que el suelo es mayoritariamente granular, predominando las arenas en un 75.13%. Este porcentaje de arenas constituye la matriz resistente del bloque, aportando estabilidad y resistencia por fricción interna. Con un contenido de finos correspondiente a un 24.65 %, el material cuenta con las partículas suficientes para aportar la cohesión necesaria para fabricar unidades de mampostería sin la adición de estabilizantes como el cemento. El valor obtenido para el módulo de finura **1.74** al estar por debajo de 2.0, se clasifica la muestra del suelo como una arena fina.



Gráfica 1. Ensayo de granulometría.

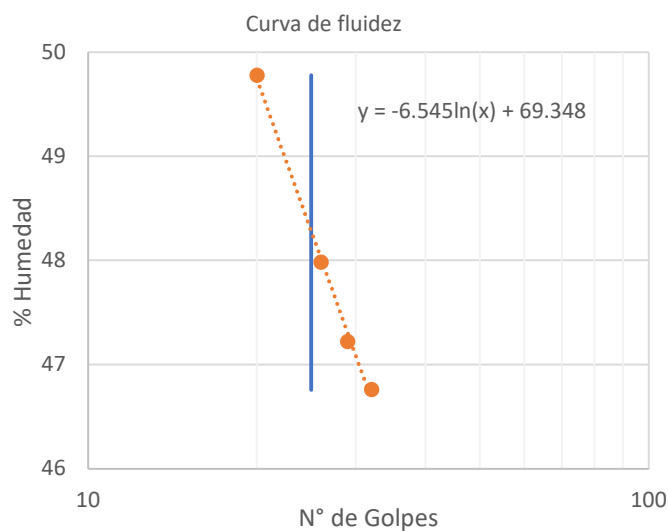
Tabla 3. Resultados de ensayo de granulometría.

Pasa N°200	
Tamizado.	3.24 g
Peso total	71.21 g
% Gravas	0.22 %
% Arenas	75.13 %
% Finos	24.65 %
Módulo de finura	1.74

En la gráfica 1, se observa que la curva no presenta saltos bruscos, lo que indica que los tamaños de partículas intermedias complementan o rellenan los espacios entre las arenas más gruesas y los finos.

7.2. Límites de Atterberg

De acuerdo con la norma española UNE 41410 y las recomendaciones de CRATerre, el rango ideal de índice de plasticidad generalmente esta entre el 10% y el 18%, el material al presentar un índice de plasticidad IP de 16.6 %, se encuentra dentro del rango, proporcionando una matriz arcillosa para el revestimiento de los granos de arena, esto implica que el suelo tiene la cohesión suficiente para mantener la forma del bloque después de realizar el desmolde y con una posibilidad baja de presentar fisuras en el proceso de secado.



Gráfica 2. Curva de fluidez límites de Atterberg

Tabla 4. Resultados de límites de Atterberg

Límite Líquido (%)	LL	48.3
Límite Plástico (%)	LP	31.7
Índice de Plasticidad (%)	IP	16.6
Fracción gruesa	FG	75.4
Fracción fina	FF	24.6
Clasificación	USCS	SM

Al tener un límite líquido alto $LL=48.3\%$, indica que requiere porcentajes de humedad considerables para activar la plasticidad.

7.3. Clasificación del suelo

Dentro de la clasificación mediante la SUCS / USCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) el suelo se encuentra en el grupo S (arena), puesto que se tiene el 75.13% retenido en el tamiz No. 200. Con un límite líquido de 48.3 y un índice de plasticidad de 16.6, el suelo se sitúa por debajo de la “línea A”, caracterizándolo como limoso. Como resultado se tiene una arena limosa (**SM**)

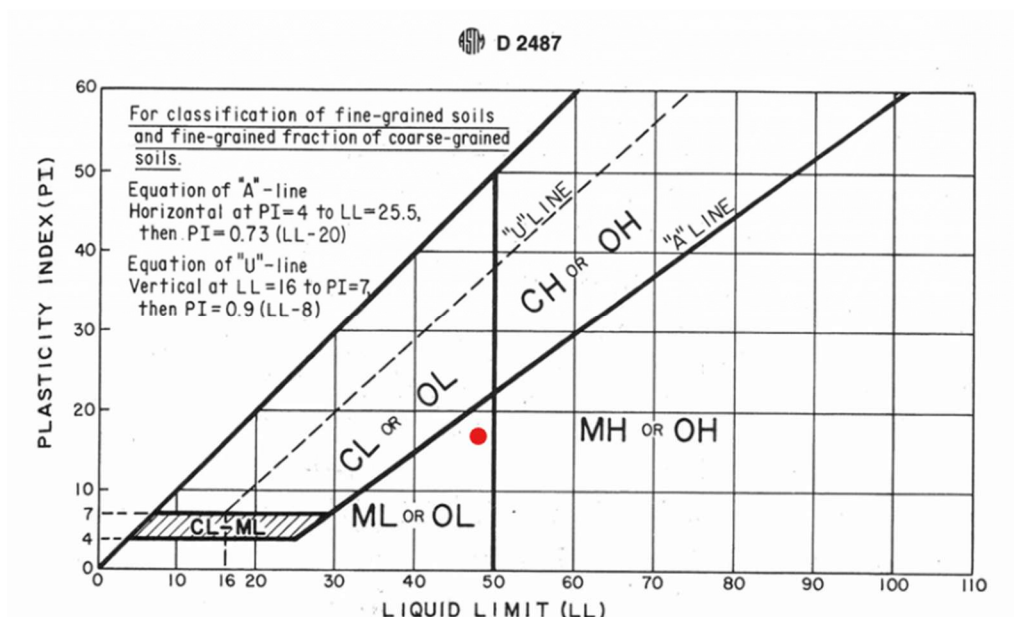


Ilustración 26. Clasificación de suelo. Fuente ASTM D 2487

7.4. Absorción de agua



Ilustración 27. Prueba de absorción de agua. NTC 4205

Se realizó la prueba de absorción de agua según la NTC 4205, sumergiendo por 24 horas parte de las unidades. En la tabla 5, se presente el promedio de los resultados obtenidos, teniendo la comparativa con los valores máximos permitidos por la norma para unidades de arcilla quemada estructural y no estructural.

Tabla 5. Prueba de absorción de agua. NTC 4205

BLOQUE	MUESTRA SECA (g)	MUESTRA SATURADA (g)	ABSORCIÓN %	NTC 4205 MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL	NTC 4205 MAMPOSTERÍA NO ESTRUCTURAL
BTC (6.5 kg/cm ²)	2264.72	2637.99	16.48	No Max 13%	Sí Max 17%
BTC: adición de teja triturada (BT)	2352.30	2730.31	16.13	No Max 13%	Sí Max 17%
BTC: adición de fibras naturales (BF)	1891.23	2089.68	10.47	Sí Max 13%	Sí Max 17%

La adición de las fibras naturales redujo aproximadamente un 36% respecto a los demás bloques, sugiriendo que la matriz interna reforzada con las fibras optimiza el sellado de los microporos y mejorando la cohesión interna del bloque sin necesidad de estabilizantes químicos.

Las muestras de BTC con presión de compactación de 6.5 kg/cm² y BTC con adición de triturado de teja se encuentran dentro del rango máximo permitido para mampostería no estructural, sugiriendo que tienen mayor grado de porosidad y permeabilidad.

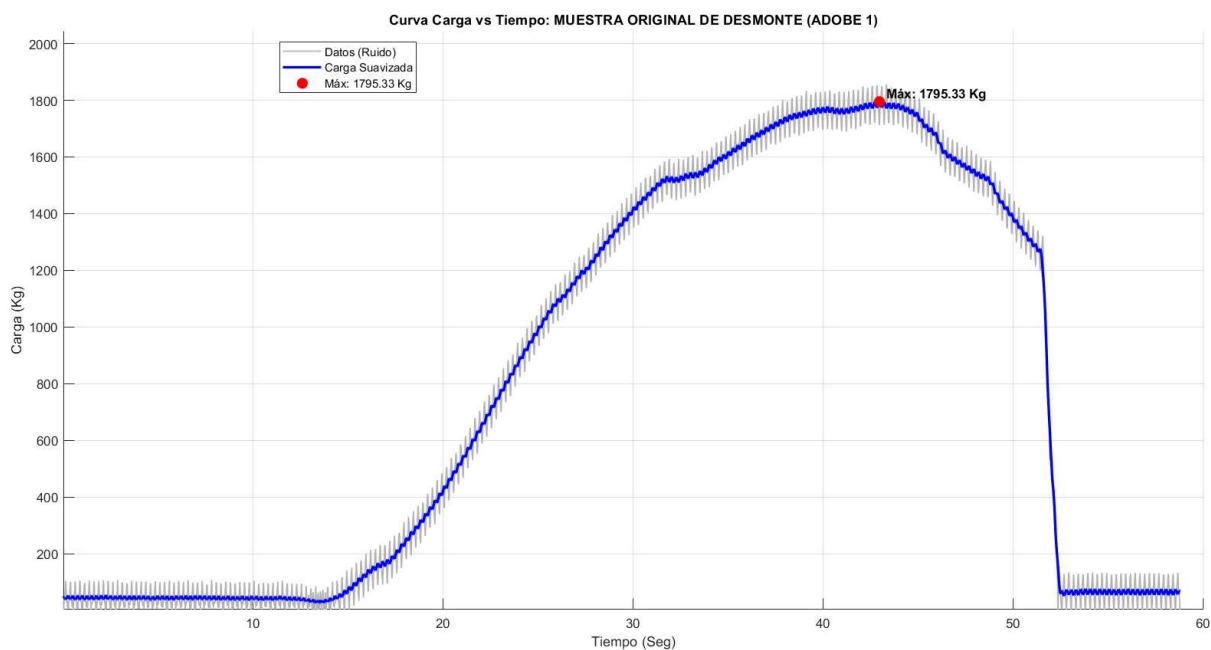
7.5. Resistencia a compresión

Para llevar a cabo el ensayo de resistencia a compresión se realizó en el laboratorio de estructuras LABESTRUS ubicado en la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática en la Universidad del Valle.

Los datos de las pruebas fueron analizados y graficados mediante el software MATLAB presentando en las gráficas en color gris los datos originales (datos crudos, incluyendo el ruido experimental), la curva en color azul presenta el comportamiento suavizado tras el filtrado de datos y con rojo la carga máxima alcanzada.

- Muestra original (Adobe) extraída en el desmonte:

Se realiza la extracción de 4 muestras intactas para la realización de los ensayos de compresión. En el proceso de trasiego de material se agrietó el bloque denominado ADOBE 3, por tanto, se realiza la prueba con 3 bloques. En la gráfica 3 se presenta los resultados del comportamiento del bloque ADOBE 1 durante el ensayo.



Gráfica 3. Prueba de compresión de muestra original (ADOBE 1)

Tabla 6. Resultado de pruebas de compresión para muestras originales (ADOBE)

ADOBE: Muestras iniciales desmontadas	BLOQUE	ÁREA (cm ²)	VOLUMEN (cm ³)	PESO (g)	PESO ESPECÍFICO MEDIO (g/cm ³)	CARGA MAX (kg)	TENSIÓN MEDIA σ_m (kg/cm ²)
	ADOBE 1	260.0	2340.0	3628.1	1.550	1795.33	6.91
	ADOBE 2	260.0	2340.0	3559.9	1.521	1775.15	6.83
	ADOBE 3	260.0	2340.0	-	-	-	-
	ADOBE 4	260.0	2340.0	2437.7	1.042	1859.11	7.15
	PROMEDIO			3208.6	1.4	1785.2	6.9

En la tabla 6 se presenta el resumen de los valores obtenidos en el ensayo, teniendo como carga máxima promedio de 1785.2 kg y el bloque cuya resistencia fue mayor es del ADOBE 4. Estos valores obtenidos respaldan lo identificado en la visita de campo, teniendo unas propiedades mecánicas bajas.

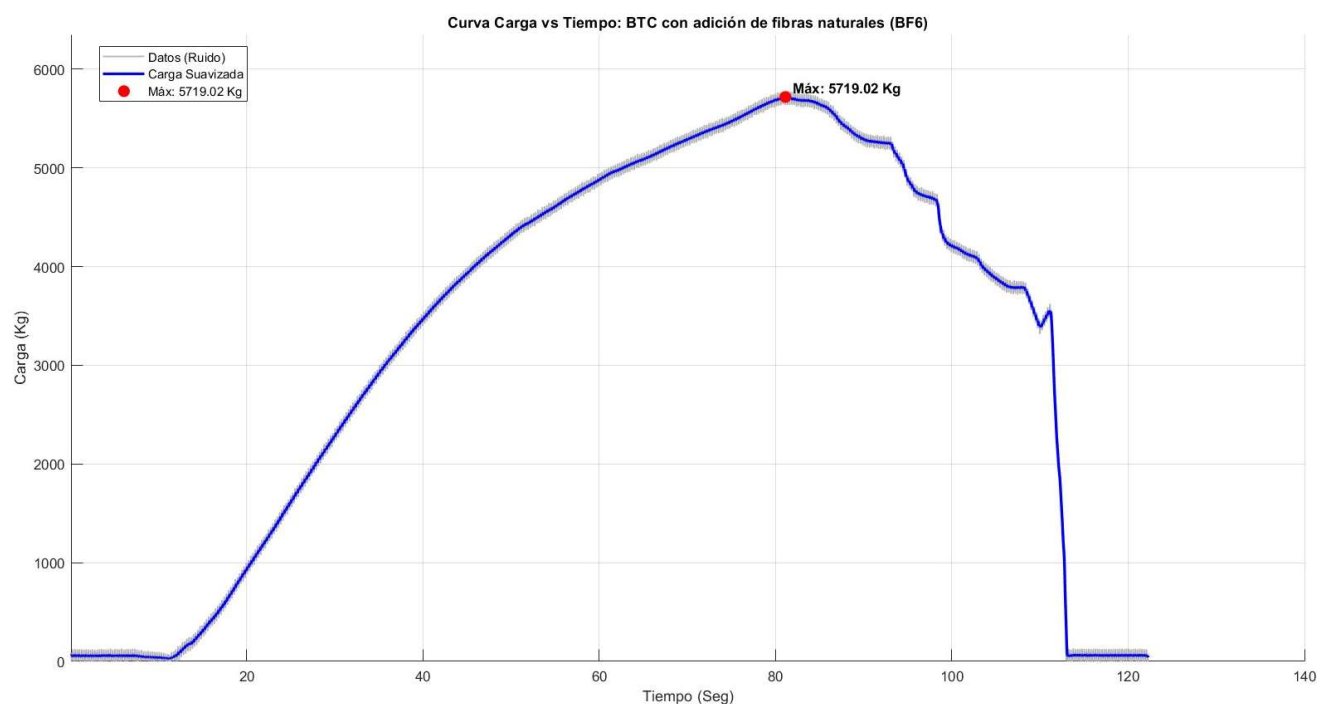


Ilustración 28. Adobe (muestra original) después del ensayo.

- **BTC con adición de triturado de fibra natural (BF):**

En la fabricación del bloque se tuvo inconvenientes al definir la longitud de las fibras, debido a que, a pesar de estar humedecidas, no se obtenía una mezcla homogénea quedando la fibra separada de la tierra. Se definió que la longitud recomendada es de 3cm puesto que es lo suficientemente larga para actuar en la prevención de fisuras en el secado y permite su incorporación en la mezcla.

Al tener la superficie superior rugosa con textura aportada por la fibra, genera mayor adherencia entre el mortero de pega y el bloque, adicionalmente la fibra que sobresale de las caras laterales brinda adherencia con el revestimiento (pañete).



Gráfica 4. Prueba de compresión de BTC con adición de fibra natural (BF6)

Tabla 7. Resultados de pruebas de compresión para muestras de BTC con adición de fibras naturales.

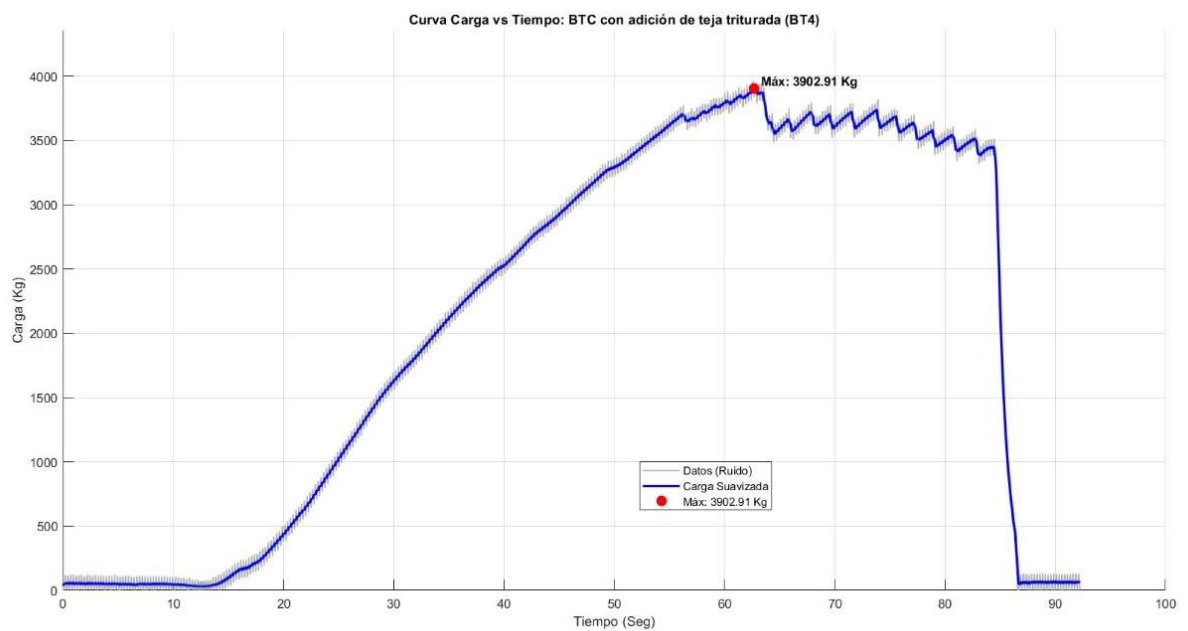
BTC con adición de fibras naturales	BLOQUE	ÁREA (cm ²)	VOLUMEN (cm ³)	PESO (g)	PESO ESPECÍFICO MEDIO (g/cm ³)	CARGA MAX (kg)	TENSIÓN MEDIA σ_m (kg/cm ²)
	BF1	260.00	2340.00	3450.00	1.47	5856.09	22.52
	BF2	260.00	2340.00	3731.50	1.59	5059.43	19.46
	BF3	260.00	2340.00	3600.50	1.54	5956.98	22.91
	BF4	260.00	2340.00	3598.00	1.54	5318.93	20.46
	BF5	260.00	2340.00	3468.00	1.48	4179.91	16.08
	BF6	260.00	2340.00	3796.50	1.62	5719.02	22.00
	BF7	260.00	2340.00	3700.24	1.58	5240.90	20.16
	PROMEDIO			3620.68	1.55	5333.04	20.51

En la gráfica 4, se presenta el comportamiento del bloque BF6, donde se observa una pendiente constante y pronunciada desde aproximadamente a los 15 seg hasta 89.45 seg donde se presenta la carga máxima. El comportamiento elástico ante la carga aplicada demuestra que no hubo reacomodos bruscos ni fallas internas prematuras antes de alcanzar la carga máxima, evidenciando que mantiene cierta integridad estructural durante la falla (pérdida de carga gradual).



Ilustración 29. Bloque de fibra (BF6) después de ensayo.

- **BTC con adición de triturado de teja (BT):**



Gráfica 5. Prueba de compresión de BTC con adición de teja triturada (BT4)

Tabla 8. Resultados de pruebas de compresión de muestras de BTC con adición de teja triturada (BT)

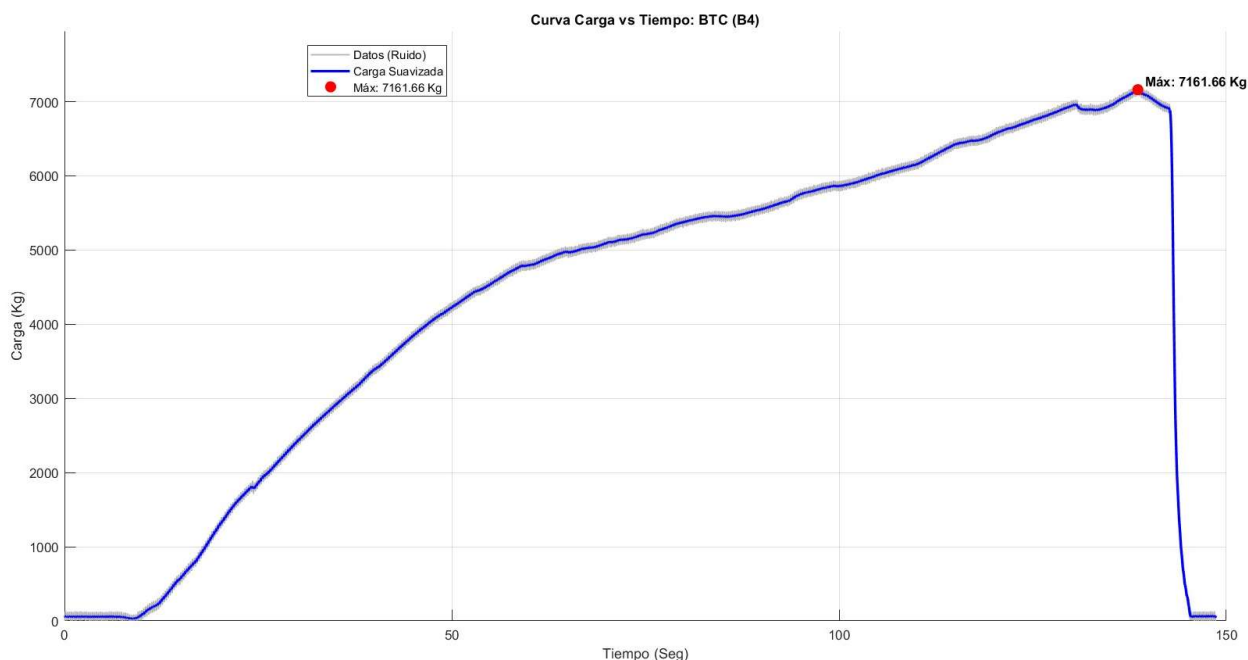
BTC con adición de teja triturada	BLOQUE	ÁREA (cm ²)	VOLUMEN (cm ³)	PESO (g)	PESO ESPECÍFICO MEDIO (g/cm ³)	CARGA MAX (kg)	TENSIÓN MEDIA σ_m (kg/cm ²)
	BT1	260.00	2340.00	3655.50	1.56	3865.65	14.87
	BT2	260.00	2340.00	3910.20	1.67	2700.33	10.39
	BT3	260.00	2340.00	3737.50	1.60	3687.61	14.18
	BT4	260.00	2340.00	3828.00	1.64	3902.91	15.01
	BT5	260.00	2340.00	3660.50	1.56	4103.53	15.78
	BT6	260.00	2340.00	3895.00	1.66	3189.87	12.27
	BT7	260.00	2340.00	3764.50	1.61	3580.21	13.77
	PROMEDIO			3778.74	1.61	3575.73	13.75

En la tabla 8, se presenta los resultados del ensayo de compresión para las 7 muestras, obteniendo una resistencia promedio de 13.75 kg/cm², y un peso específico promedio de 1.61 g/cm³, particularmente es el bloque más denso y pesado, pero con la menor resistencia en el ensayo de compresión. Al añadir triturado de teja a un suelo que mayoritariamente se compone de arena (SM), se empobrece la matriz de finos, teniendo menos limos disponibles para generar el puente de adherencia entre la arena y el triturado de teja. En la gráfica 5, se puede observar pequeñas caídas en la carga aplicada antes de la falla final, lo cual sugiere que las partículas de teja se acomodan o se fisuran internamente antes de la falla.



Ilustración 30. BTC con adición de teja (BT) después del ensayo.

- **BTC tradicional con presión de compactación 6.5kg/cm² (B):**



Gráfica 6. Prueba de compresión BTC tradicional con presión de compactación 6.5 kg/cm² (B4)

Tabla 9. Resultados de pruebas de compresión BTC tradicional con presión de compactación 6.5 kg/cm² (B)

BTC Presión de compactación: 6.5 kg/cm ²	BLOQUE	ÁREA (cm ²)	VOLUMEN (cm ³)	PESO (g)	PESO ESPECÍFICO MEDIO (g/cm ³)	CARGA MAX (kg)	TENSIÓN MEDIA σ_m (kg/cm ²)
	B1	260.00	2340.00	3591.50	1.53	5613.25	21.59
	B2	260.00	2340.00	3480.20	1.49	4682.18	18.01
	B3	260.00	2340.00	3775.00	1.61	6483.32	24.94
	B4	260.00	2340.00	3795.10	1.62	7161.66	27.54
	B5	260.00	2340.00	3762.50	1.61	6087.96	23.42
	B6	260.00	2340.00	2904.50	1.24	7454.47	28.67
	B7	260.00	2340.00	2837.00	1.21	7198.38	27.69
	PROMEDIO			3449.40	1.47	6383.03	24.55

En la tabla 9, se evidencia el aumento de la resistencia a la compresión al ejercer en la fabricación una presión de compactación, aumentando un 255% a la resistencia obtenida en los bloques originales.

Al ser bloques no estabilizados con productos como el cemento o la cal, la presión al compactar logró generar una matriz formando enlaces con la arena limosa reacomodando la estructura interna para que los vacíos en el bloque sean mínimos.

En la gráfica 6 se evidencia que el bloque tiene una rigidez mayor, teniendo una curva ascendente y relativamente limpia hasta el pico de 7161.66 kg, sin embargo, la caída de la carga aplicada cae de manera frágil y súbita.



Ilustración 31. BTC con presión de compactación después del ensayo.

7.6. Módulo de rotura

Para la realización del ensayo de flexión, los apoyos inferiores fueron ubicados a 3 cm de las caras laterales y, teniendo una distancia entre apoyos de 20 cm, la carga puntual fue ubicada en el centro del bloque tal y como se indica en la ilustración 30. El ensayo fue realizado en el laboratorio de suelos y pavimentos [LABISPA](#) ubicado en la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática en la Universidad del Valle. Se tuvo un total de 4 muestras para cada tipo de bloque.



Ilustración 32. Ensayo de flexión. B2

Tabla 10. Resultados de ensayo a flexión (módulo de rotura)

BLOQUE	ÁREA (cm ²)	CARGA MAX PROM (lib)	CARGA MAX PROM (kg)	MÓDULO DE ROTURA PROM (Kg/cm ²)
BTC Presión de compactación: 6.5 kg/cm ² (B)	260.00	102.21	46.36	1.72
BTC con adición de teja triturada (BT)	260.00	140.82	63.88	2.37
BTC con adición de fibras naturales (BF)	260.00	241.05	109.34	4.05
PROMEDIO		161.36	73.19	2.71

- BTC con presión de compactación: 6.5 kg/cm² (B)

Al no tener adición de estabilizante y de ningún agregado, la unión de las partículas del suelo depende únicamente del entrelazado entre la arena fina y los limos. Como se indica en la ilustración 32 y a los resultados presentados en la tabla 10, la falla obtenida es de tipo frágil, teniendo una fisura formada de forma instantánea y en el área de aplicación de la carga puntual.



Ilustración 33. Falla de bloque B2

- BTC con adición de teja triturada (BT)

La adición del triturado de teja genera rugosidad, actuando como un agregado grueso con un área de contacto mayor que la de la arena natural del suelo, esto mejorando el agarre mecánico interno del bloque debido su forma angular, permitiendo soportar un 38% más de carga que el BTC con una presión de compactación de 6.5 kg/cm^2 . En la ilustración 33, se puede observar que la falla no ocurre en el centro del bloque, esta se propaga entre las partículas cerámicas las cuales actúan como puentes u obstáculos, obligando a la grieta a rodearlas teniendo una falla ligeramente diagonal. A pesar de que su comportamiento a flexión es mayor, aún sigue siendo un material que falla por separación de granos, sin capacidad de puentear grietas.



Ilustración 34. Falla de bloque BT6

- **BTC con adición de fibras naturales (BF)**

Con los resultados de este ensayo, se puede observar que las fibras actúan como una “armadura” distribuida aleatoriamente. Durante la aplicación de la carga, la matriz de tierra se agrieta, mientras que las fibras permanecen intactas absorbiendo los esfuerzos de tracción que el suelo siendo SM no puede soportar. A diferencia de las grietas obtenidas en las anteriores unidades, este bloque no se desmorona inmediatamente tras la rotura, y la fisura producida es apenas visible.



Ilustración 35. Falla de bloque BF2

7.7. Validación del cumplimiento de la normativa vigente (NSR-10) para los productos de construcción elaborados con materiales de tierra.

Tabla 11. Validación entre los resultados y normativa vigente

BLOQUE	Resistencia compresión	NTC 4205/NTC 5324 (BSC 40) Mampostería estructural	NTC 4205/NTC 5324 (BSC 20) Mampostería no estructural	Módulo de rotura	NMAC 14.7.4	Absorción %	NTC 4205 Mampostería estructural	NTC 4205 Mampostería no estructural
ADOBE (muestra original)	6.90 kg/cm ²	NO (mín 40 kg/cm ²)	NO (mín 20.0 kg/cm ²)	--	--	--	--	--
BTC Presión de compactación: 6.5 kg/cm ² (B)	24.55 kg/cm ²	NO (mín 40 kg/cm ²)	SÍ	1.72 kg/cm ²	NO (mín 3.05915 kg/cm ²)	16.48	No Max 13%	Sí Max 17%
BTC con adición de teja triturada (BT)	13.75 kg/cm ²	NO (mín 40 kg/cm ²)	NO (mín 20.0 kg/cm ²)	2.37 kg/cm ²	NO (mín 3.05915 kg/cm ²)	16.13	No Max 13%	Sí Max 17%
BTC con adición de fibras naturales (BF)	20.51 kg/cm ²	NO (mín 40 kg/cm ²)	SÍ	4.05 kg/cm ²	SÍ	10.47	Sí Max 13%	Sí Max 17%

El bloque de tierra comprimida con adición de fibras naturales (BF) obtuvo el mejor desempeño cumpliendo con normativa nacional (NTC) e internacional (NMAC) para muros divisorios no estructurales. En términos de resistencia a la compresión, el bloque alcanzó un valor promedio de 20.0 kg/cm² cumpliendo el valor mínimo establecido en la NTC 5324 para un BSC20 (bloque de suelo-cemento macizo), esto sin tener adición de cemento en la fabricación. La norma estadounidense New Mexican Earthen Building Materials CODE (NMAC 14.7.4) aplicable en construcción con materiales terrosos que se realicen en Nuevo México desde el año 2016 [26], establece un mínimo valor del módulo de rotura de 3.05915 kg/cm² el cual se cumple al tener en valor promedio de 4.05 kg/cm².

8. CONCLUSIONES

- El suelo SM (arena limosa) tiene un buen comportamiento ante esfuerzos de compresión, al tener un IP de 16.6% el cual proporciona una matriz arcillosa que actúa como ligante natural generando cohesión sin generar fisuras por contracción en el proceso de secado. Esta cohesión interna es potenciada al implementar una presión de compactación en el proceso de fabricación del bloque (B), incrementando la capacidad de carga del de este en un 255% con respecto a la muestra original.
- Los bloques fabricados cumplen con los porcentajes expuestos en la norma NTC 4205 para mampostería no estructural sin el uso de estabilizantes como el cemento o la cal, validando el uso de estas unidades para edificaciones sostenibles siempre que se garantice la protección de las unidades frente al contacto directo y prolongado con el agua.
- La adición de teja triturada (BT) resultó contraproducente, puesto que al añadir un material cerámico a un suelo que mayormente se compone por arena, aumentó la superficie a cubrir por la limitada fracción arcillosa (IP 16.6%), teniendo la resistencia a compresión más baja de los BTC fabricados (13.75 kg/cm^2).
- Los resultados obtenidos en el ensayo de flexión evidenciaron que un suelo SM por su naturaleza granular, no tiene capacidad intrínseca para transmitir esfuerzos de tracción. Las fibras actuaron como puentes de transferencia de esfuerzos, permitiendo la absorción de energía, siendo fundamental para mejorar el comportamiento antes los efectos de sismos o asentamientos.
- El bloque con adición de fibras (BF) es la solución constructiva más viable, con un módulo de rotura promedio de 4.05 kg/cm^2 , siendo capaz de absorber energía y deformarse antes de colapsar. A pesar de que la fabricación del bloque fue realizada de manera tradicional, alcanzó una resistencia de compresión promedio de 20.51 kg/cm^2 cumpliendo con la resistencia mínima definida en la NTC 4205 para unidades macizas. Adicionalmente las caras del bloque donde sobresale la fibra aportan rugosidad al tener textura mejorando la adherencia entre el mortero de pega/pañete y el bloque.

9. REFERENCIAS

- [1] Gama Castro, J. E., Cruz y Cruz, T., Pi Puig, T., Alcalá Martínez, R., Cabadas Báez, H., Jasso Castañeda, C., . . . Villanova de Allende, R. (2012). Arquitectura de tierra: el adobe como material de construcción en la época prehispánica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(2), 177-188. Recuperado el 2024, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94326949003>
- [2] Rivera Salcedo, H., Valderrama Gutiérrez, O. M., Daza Barrera, Á., & Plazas Jaimes, G. S. (Enero/Junio de 2021). Adobe como saber ancestral usado en construcciones autóctonas de Pore y Nunchía, Casanare (Colombia). *Revista de Arquitectura*, 74-85. doi:<https://doi.org/10.14718/RevArq.2021.2762>
- [3] Rivera Torres, J. C. (Julio/Diciembre de 2012). El adobe y otros materiales de sistemas constructivos en tierra cruda: caracterización con fines estructurales. *Apuntes: Revista de Estudios sobre Patrimonio Cultural - Journal of Cultural Heritage Studies*, 25(2), 18. Recuperado el 14 de Septiembre de 2023
- [4] Salazar, I. H. (s.f.). Restauración de Arquitectura de Tierra en Zonas Sísmicas - El Caso de Costa Rica. (F. V. Camila Mileto, Ed.) *Máster en Conservación del Patrimonio Arquitectónico*, 208. Obtenido de El : <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/45059/Memoria.pdf?sequence=1>
- [6] Pacheco Bustos , C. A., Fuentes Pumarejo, L. G., Sánchez Cotte, É. H., & Rondón Quintana, H. A. (2017). Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de Barranquilla desde su modelo de gestión. *INGENIERIA Y DESARROLLO*, 23.
- [7] Arteaga Medina, K. T., Medina, Ó. H., & Gutiérrez Junco, Ó. J. (31 de julio-diciembre de 2011). Bloque de tierra comprimida como material constructivo. *Facultad de ingeniería*, 20(31), 55-68. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413940770005>
- [8] Colombia, C. d. (s.f.). Ley 1259 de 2008. *EVA - Gestor Normativo*. Colombia.
- [9] Cabrera, S., Gonzáles, A., & Rotondaro, R. (2020). Resistencia a compresión en Bloques de Tierra Comprimida. Comparación entre diferentes métodos de ensayo. *Informes de la Construcción*, 72(560). doi:<https://doi.org/10.3989/ic.70462>
- [10] Vásquez Hernandez, A., Botero Botero, L., & Carvajal Arango, D. (30 de enero de 2015). Fabricación de bloques de tierra comprimida con adición de residuos de construcción y demolición como

- reemplazo del agregado pétreo convencional. *Ingeniería y Ciencia*, 11(21), 197-220. doi:doi:10.17230/ingciencia.11.21.10
- [11] Galíndez, F. (2009). BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA SIN ADICIÓN DE CEMENTO (BTC). *SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE*, 12.
- [13] Transportes y Excavaciones Posada S.A. (s.f.). *Reutilización de Residuos de la Construcción y Demolición*. Obtenido de Posada: <https://www.posada.org/reutilizacion-residuos-construccion-demolicion/>
- [14] Baquero Beltran, L. D. (2025). *Parámetros de durabilidad y comportamiento mecánico del Bloque de Tierra Comprimida (BTC) en Colombia para la ejecución de viviendas de mampostería reforzada*. Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/8d07c60c-315d-4c67-bed4-1883d5eb5ffe/content>
- [15] Zeng, M., Huang, H., & Zhang, X. (2023). Experiment on the Performance of Recycled Powder of Construction Waste on Adobe Materials. *Buildings*. doi:<https://doi.org/10.3390/buildings13051358>
- [16] Muñoz, P., Letelier, V., Muñoz, L., & Bustamante, M. (10 de September de 2020). Adobe bricks reinforced with paper & pulp wastes improving thermal and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 254. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119314>
- [17] Bui, Q., & Morel, J. (2015). First exploratory study on the reuse of rammed earth material. *Construction and Building Materials*. doi:10.3390/ma8010001
- [18] Chica Osorio, L., & Beltrán Montoya, J. (2018). Caracterización de residuos de demolición y construcción para la identificación de su potencial de reúso. *DYNA*, 85(206), 338-347. doi:<https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.68824>
- [19] Carnevale, E. (15 de enero de 2024). *Tierra de excavación: de residuo a materia prima*. Obtenido de EcoHabitat: <https://ecohabitar.org/tierra-de-excavacion-de-residuo-a-materia-prima/>
- [20] NSR-10. (s.f.). *NORMA SISMO RESISTENTE NSR-10 CAPÍTULO D*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.unisdr.org/campaign/resilientcities/uploads/city/attachments/3871-10684.pdf>

- [21] NTC. (s.f.). *NTC 4017 - MÉTODOS PARA MUESTREO Y ENSAYOS DE UNIDADES DE MAMPOSTERÍA Y OTROS PRODUCTOS DE ARCILLA*. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/199898739/NTC-4017>
- [22] NTC. (s.f.). *NTC 1522*. Obtenido de NTC 1522 - ENSAYO PARA DETERMINAR LA GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO: <https://es.scribd.com/document/559395051/NTC-1522-GRANULOMETRIA>
- [23] NTC. (s.f.). *NTC 4630: Métodos de Ensayo de Suelos*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/257430551/Procedimientos-Para-La-Determinacion>
- [24] AASHTO. (s.f.). *ASTM D 2487-93. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/358456196/ASTM-D-2487-93-Traduccion>
- [25] AASHTO. (s.f.). *Clasificación AASHTO M 145*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/477223946/Clasificacion-AASHTO-M-145>
- [26] Pocero, J. H. (05 de 07 de 2016). UPCommons. Portal de acceso abierto al conocimiento de la UPC. *Construcción con tierra: Análisis, conservación y mejora. Un caso práctico en Senegal*. Barcelona, España.
- [27] ASTM. (s.f.). *Clasificación de Suelos para Propósitos de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS)*. ASTM.
- [28] Dialnet. (2018). *Construcción con Tierra. Permanencia del pasado y tecnología actual*. Obtenido de XV CIATTI 2018, Congreso Internacional de Arquitectura de Tierra, Tradición e Innovación: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=794966>

10. ANEXOS

a. Resultados ensayo de granulometría

Masa muestra seca inicial (g)				90.20 g	
Masa muestra seca y lavada por el tamiz # 200 (g)				71.21 g	
Tamiz	Abertura Tamiz mm	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Porcentaje pasa (%)
2"	50.8		0.0	0.0	100.0
1 1/2"	38.1		0.0	0.0	100.0
1"	25.4		0.0	0.0	100.0
3/4"	19.05		0.0	0.0	100.0
1/2"	12.7		0.0	0.0	100.0
3/8"	9.525		0.0	0.0	100.0
# 4	4.75	0.2	0.2	0.2	99.8
# 8	2.36	1.7	1.9	2.1	97.9
#16	1.18	3.4	3.8	5.9	94.1
# 30	0.60	6.8	7.5	13.4	86.6
# 50	0.30	10.9	12.1	25.5	74.5
# 100	0.15	23.9	26.5	52.0	48.0
# 200	0.074	21.1	23.3	75.4	24.6

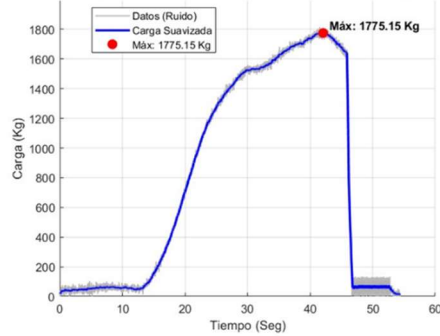
b. Resultados límites de Atterberg

	Límite Líquido L.L.				Límite Plástico L.P.	
	No. de Golpes	20	26	29	32	x
Masa Recipiente + Muestra húmeda (g)		28.87	29.91	28.17	24.71	21.33
Masa Recipiente + Muestra seca (g)		24.38	25.15	23.33	21.68	19.87
Masa Recipiente (g)		15.36	15.23	13.08	15.20	15.30
Humedad (%)		49.8	48.0	47.2	46.8	31.9

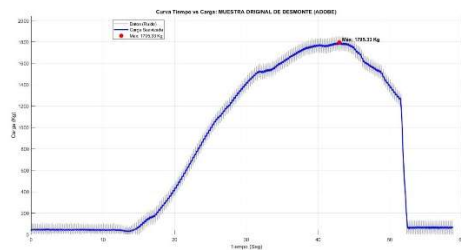
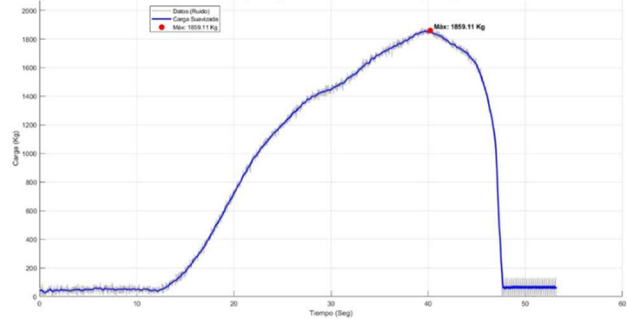
c. Gráficas ensayo de compresión

Muestra original (Adobe)

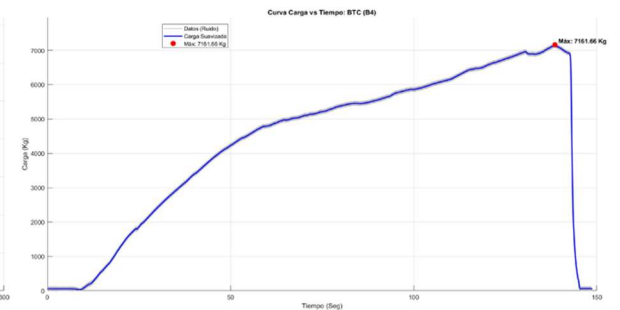
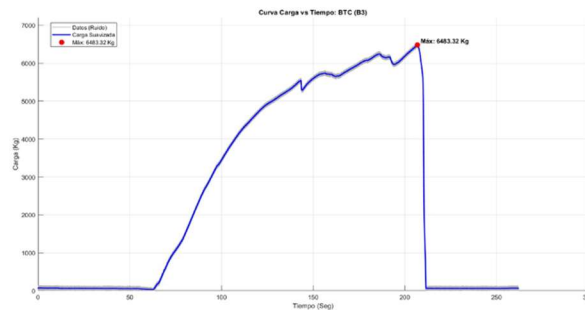
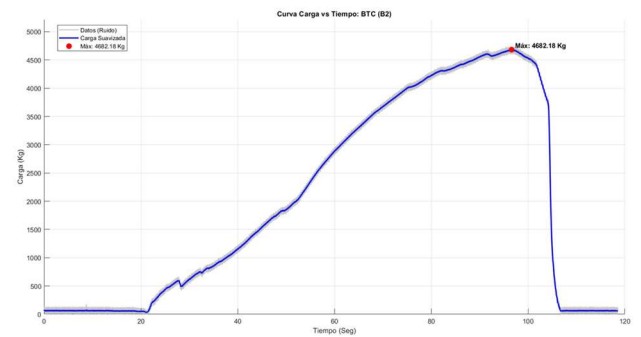
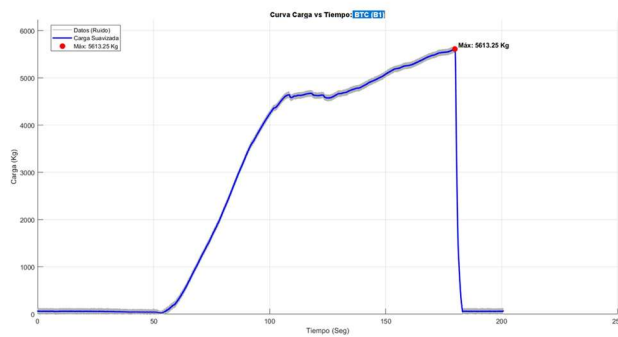
Curva Tiempo vs Carga: MUESTRA ORIGINAL DE DESMONTE (ADOBE 2)

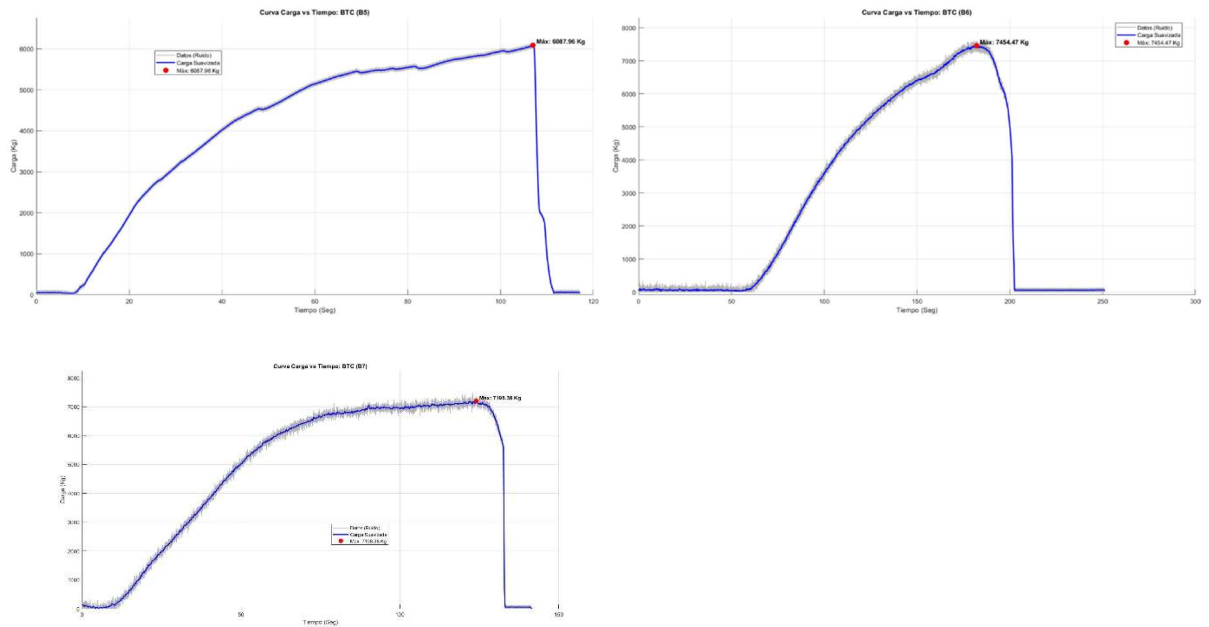


Curva Tiempo vs Carga: MUESTRA ORIGINAL DE DESMONTE (ADOBE 4)

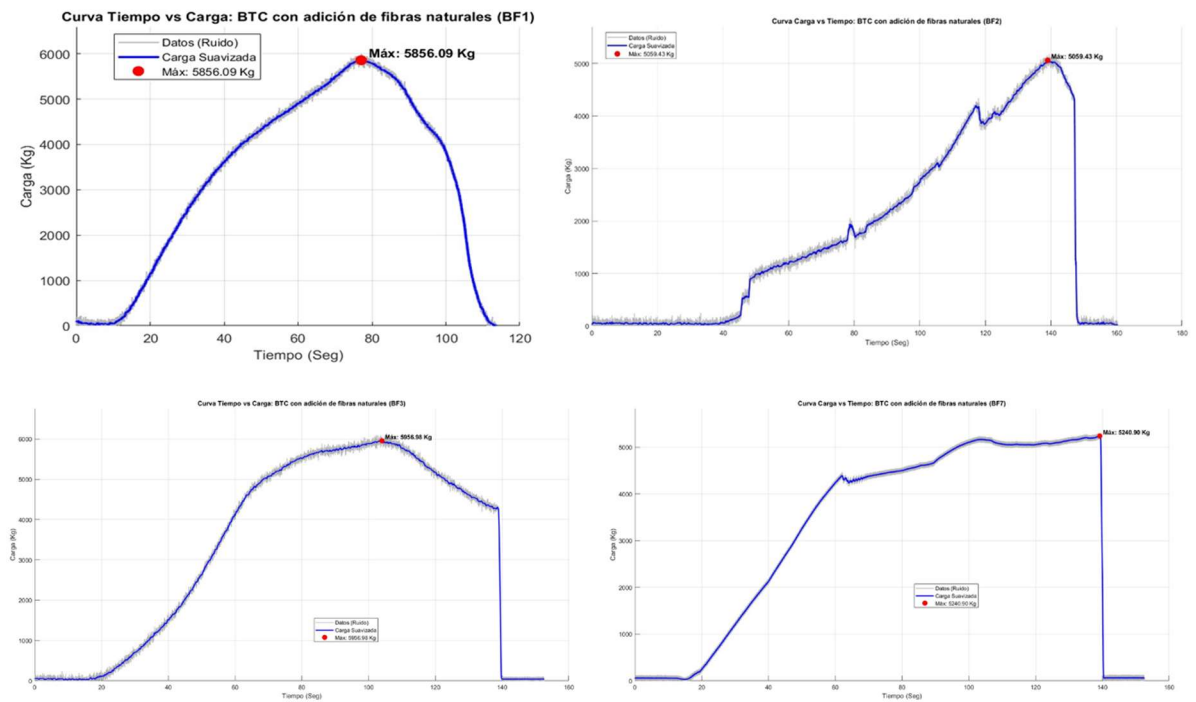


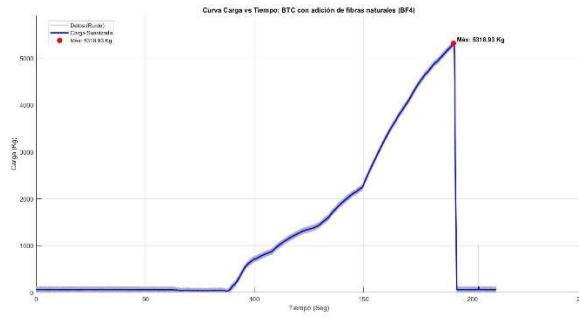
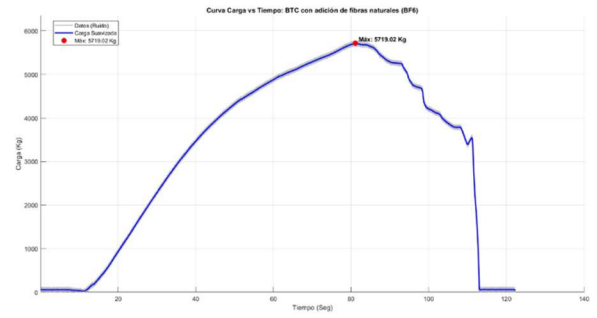
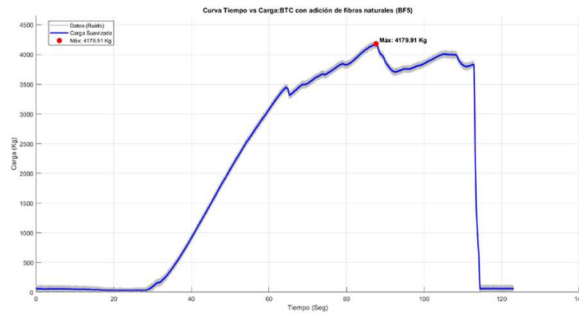
Bloque de tierra comprimida con presión de compactación de 6.5 kg/cm2



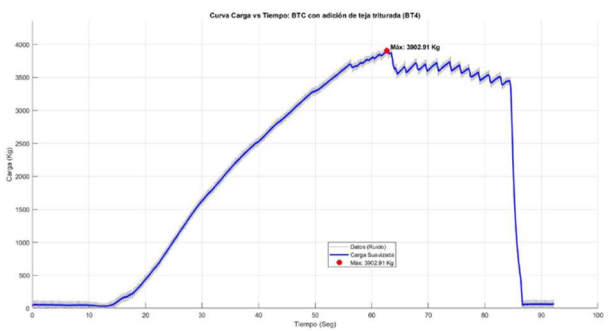
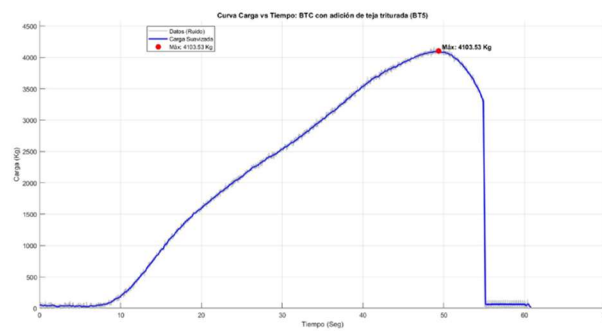
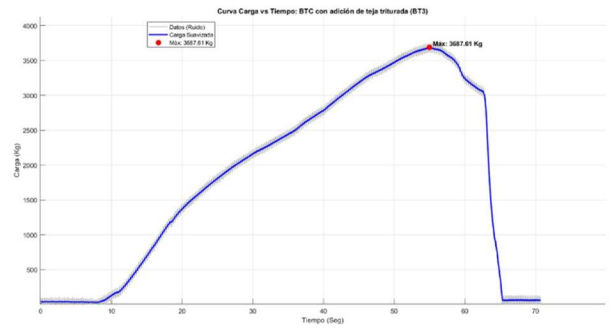
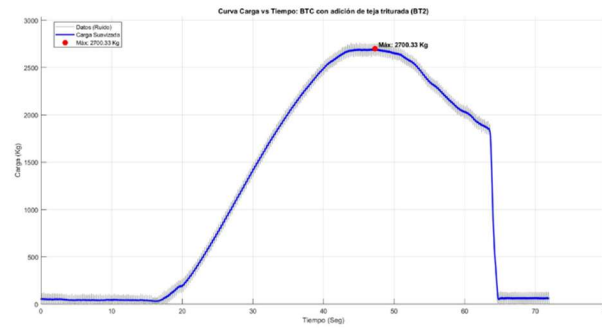


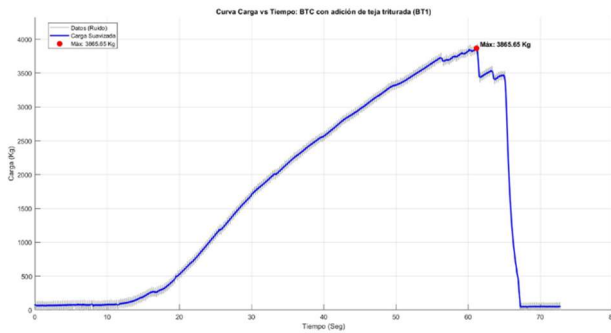
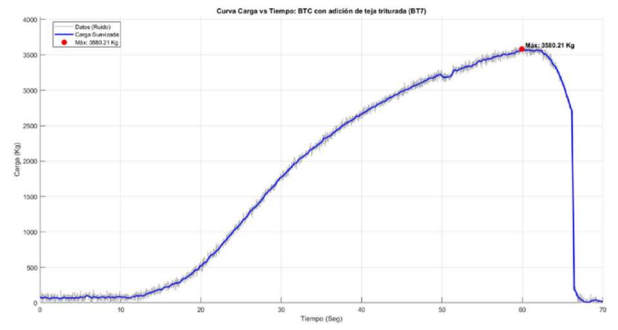
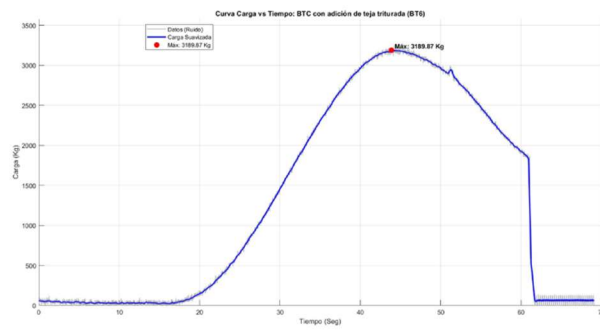
Bloque de tierra comprimida con adición de fibra natural





Bloque de tierra comprimida con adición de triturado de teja





d. Resultados ensayo a flexión

BF1		
DEFOR $\times 10^{-3}$	LECT ANILLO $\times 10^{-4}$	LIB
5.00	2.00	6.81
10.00	9.00	30.66
15.00	14.00	47.70
20.00	23.00	78.36
25.00	31.00	105.62
30.00	43.00	146.50
35.00	51.00	173.76
40.00	68.00	231.68
45.00	73.00	248.71
50.00	81.00	275.97

BF2		
DEFOR $\times 10^{-3}$	LECT ANILLO $\times 10^{-4}$	LIB
5.00	2.00	6.81
10.00	3.00	10.22
15.00	5.00	17.04
20.00	6.00	20.44
25.00	8.00	27.26
30.00	10.00	34.07
35.00	13.00	44.29
40.00	18.00	61.33
45.00	24.00	81.77
50.00	29.00	98.80
55.00	38.00	129.47
60.00	47.00	160.13
65.00	60.00	204.42
70.00	75.00	255.53
75.00	86.00	293.00

BF3		
DEFOR x10 ⁻³	LECT ANILLO x10 ⁻⁴	LIB
5.00	2.00	6.81
10.00	3.00	10.22
15.00	7.00	
20.00	9.00	30.66
25.00	16.00	54.51
30.00	19.00	64.73
35.00	22.00	74.95
40.00	28.00	95.40
45.00	37.00	126.06
50.00	40.00	136.28
55.00	42.00	143.09
60.00	44.00	149.91
65.00	45.00	153.32
70.00	53.00	180.57

BF4		
DEFOR x10 ⁻³	LECT ANILLO x10 ⁻⁴	LIB
5.00	3.00	10.22
10.00	6.00	20.44
15.00	12.00	40.88
20.00	18.00	61.33
25.00	21.00	71.55
30.00	25.00	85.18
35.00	29.00	98.80
40.00	37.00	126.06
45.00	42.00	143.09
50.00	49.00	166.94
55.00	51.00	173.76
60.00	63.00	214.64

B1		
DEFOR x10 ⁻³	LECT ANILLO x10 ⁻⁴	LIB
5.00		0.00
10.00	7.00	23.85
15.00	13.00	44.29
20.00	15.00	51.11
25.00	17.00	57.92
30.00	21.00	71.55
35.00	25.00	85.18
40.00	29.00	98.80

B2		
DEFOR x10 ⁻³	LECT ANILLO x10 ⁻⁴	LIB
5.00	1.00	3.41
10.00	2.00	6.81
15.00	3.00	10.22
20.00	4.00	13.63
25.00	5.00	17.04
30.00	7.00	23.85
35.00	10.00	34.07
40.00	15.00	51.11
45.00	19.00	64.73
50.00	22.00	74.95
55.00	26.00	88.58
60.00	29.00	98.80
65.00	34.00	115.84

B3		
DEFOR x10 ⁻³	LECT ANILLO x10 ⁻⁴	LIB
5.00	2.00	6.81
10.00	2.00	6.81
15.00	5.00	17.04
20.00	7.00	23.85
25.00	11.00	37.48
30.00	17.00	57.92
35.00	22.00	74.95
40.00	25.00	85.18
45.00	28.00	95.40
50.00	30.00	102.21

B4		
DEFOR x10 ⁻³	LECT ANILLO x10 ⁻⁴	LIB
5.00	1.00	3.41
10.00	2.00	6.81
15.00	5.00	17.04
20.00	10.00	34.07
25.00	13.00	44.29
30.00	19.00	64.73
35.00	21.00	71.55
40.00	22.00	74.95
45.00	24.00	81.77
50.00	27.00	91.99

BT1		
DEFOR x10 ⁻³	LECT ANILLO x10 ⁻⁴	LIB
5.00	3.00	10.22
10.00	4.00	13.63
15.00	5.00	17.04
20.00	7.00	23.85
25.00	9.00	30.66
30.00	13.00	44.29
35.00	16.00	54.51
40.00	18.00	61.33
45.00	21.00	71.55
50.00	25.00	85.18
55.00	29.00	98.80
60.00	33.00	112.43
65.00	38.00	129.47
70.00	43.00	146.50

BT2		
DEFOR x10 ⁻³	LECT ANILLO x10 ⁻⁴	LIB
5.00	1.00	3.41
10.00	4.00	13.63
15.00	5.00	17.04
20.00	9.00	30.66
25.00	11.00	37.48
30.00	16.00	54.51
35.00	17.00	57.92
40.00	21.00	71.55
45.00	26.00	88.58
50.00	28.00	95.40
55.00	31.00	105.62
60.00	33.00	112.43

BT4		
DEFOR x10 ⁻³	LECT ANILLO x10 ⁻⁴	LIB
5.00	2.00	6.81
10.00	3.00	10.22
15.00	3.00	10.22
20.00	4.00	13.63
25.00	4.00	13.63
30.00	5.00	17.04

35.00	9.00	30.66
40.00	15.00	51.11
45.00	21.00	71.55
50.00	31.00	105.62
55.00	39.00	132.87
60.00	48.00	163.54

e. Pruebas de absorción de agua

BLOQUE	MUESTRA SECA (g)	MUESTRA SATURADA (g)	%ABSORCIÓN
BF1	1774	1975	11.33
BF2	2056.10	2314.09	12.55
BF3	1812.35	2001.97	10.46
BF4	1922.47	2067.65	7.55
PROMEDIO	1891.23	2089.68	10.47

BLOQUE	MUESTRA SECA (g)	MUESTRA SATURADA (g)	%ABSORCIÓN
BT1	2125	2517.15	18.45
BT2	2371.07	2679.90	13.02
BT3	-	-	-
BT4	2560.84	2993.89	16.91
PROMEDIO	2352.30	2730.31	16.13

BLOQUE	MUESTRA SECA (g)	MUESTRA SATURADA (g)	%ABSORCIÓN
B1	2125	2517.15	18.45
B2	2371.07	2679.90	13.02
B3	2560.84	2993.89	16.91
B4	2001.96	2361.01	17.93
PROMEDIO	2264.72	2637.99	16.58